



19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA

11 Número de publicación: **2 364 477**

51 Int. Cl.:
G05B 13/04 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Número de solicitud europea: **04787219 .7**

96 Fecha de presentación : **27.09.2004**

97 Número de publicación de la solicitud: **1668431**

97 Fecha de publicación de la solicitud: **14.06.2006**

54 Título: **Procedimiento, programa de ordenador con elementos de código de programa y producto de programa de ordenador para analizar factores que influyen sobre un proceso de combustión en una cámara de combustión utilizando un modelo estadístico adiestrable.**

30 Prioridad: **30.09.2003 DE 103 45 440**

45 Fecha de publicación de la mención BOPI:
05.09.2011

45 Fecha de la publicación del folleto de la patente:
05.09.2011

73 Titular/es: **SIEMENS AKTIENGESELLSCHAFT**
Wittelsbacherplatz 2
80333 München, DE

72 Inventor/es: **Hofmann, Reimar y**
Sterzing, Volkmar

74 Agente: **Zuazo Araluze, Alexander**

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).

DESCRIPCION

Procedimiento, programa de ordenador con elementos de código de programa y producto de programa de ordenador para analizar factores que influyen sobre un proceso de combustión en una cámara de combustión utilizando un modelo estadístico adiestrable.

La invención se refiere a un análisis de factores que influyen sobre un proceso de combustión en una cámara de combustión.

Por [1] se conoce un análisis de factores que influyen sobre un proceso de combustión en una cámara de combustión.

5 En este análisis se utilizan métodos lineales, como un análisis de regresión, para investigar las relaciones de dependencia entre los factores que influyen y su influencia sobre el proceso de combustión.

10 Puesto que evidentemente un proceso de combustión que transcurre en una cámara de combustión es un proceso complejo, que obedece a dependencias no lineales de los factores que influyen, no aportan tales procedimientos de análisis "lineales", como los de [1] resultados fiables y suficientemente exactos en cuanto a la influencia de los factores que influyen sobre el proceso de combustión.

Por [2] se conoce un análisis de un proceso de combustión que llega más lejos, en este caso de un proceso de combustión en una cámara de combustión de una turbina de gas, una llamada turbina de gas con cámara de combustión anular tipo V84.3A.

15 Además, se conoce por [2] la aparición de vibraciones u oscilaciones de presión en un proceso de combustión en una cámara de combustión de una turbina de gas, en este caso de una turbina de gas con cámara de combustión anular V84.3A, así como que resultan daños en la cámara de combustión debidos a las vibraciones.

En [2] se describe que estas oscilaciones o vibraciones dan lugar a un llamado zumbido o zumbido en la cámara de combustión, que aparece debido a una realimentación positiva entre procesos de combustión que transcurren simultáneamente en la cámara de combustión de la turbina de gas.

20 Las vibraciones implican un frente de llama inestable, que a su vez provoca un calentamiento mayor de la cámara de combustión. Éste puede originar daños en la cámara de combustión de la turbina de gas.

Para poder tomar medidas de ayuda frente al problema de las vibraciones de la combustión, se investigó en [2] el fenómeno de las vibraciones en profundidad y se compararon y debatieron posibilidades para eliminarlas, en particular métodos activos y pasivos.

25 En [2] se determina y propone la eliminación de las vibraciones nocivas mediante la optimización del diseño de la geometría de una cámara de combustión.

En [2] se propone, frente a eventuales problemas de vibración que se presenten de nuevo al ampliar la zona de trabajo de la turbina de gas, un control de inestabilidad activo (AIC) en base a una modulación anticíclica de un flujo de combustible.

30 Desde luego, exige el AIC un caro y costoso sistema sensórico y de actuadores, lo cual limita su posibilidad utilización.

Además se sabe que este zumbido perjudicial también puede reducirse o evitarse reduciendo la carga en la turbina de gas, es decir, se sabe que la carga de una turbina de gas tiene una gran influencia sobre el zumbido (nocivo) en la cámara de gas o bien tiene una fuerte dependencia o correlación con el mismo.

35 La reducción de la carga para reducir o evitar daños de una cámara de combustión de una turbina de gas es desde luego una posibilidad de solución sólo practicable en determinadas condiciones.

Por lo general, los operadores de centrales de energía tienen compromisos de potencia frente a sus consumidores, que se ven en peligro de incumplimiento cuando se reduce la potencia de las turbinas de gas.

40 En consecuencia, tiene interés conocer otros factores que influyen sobre el proceso de combustión o bien sobre el zumbido, además de la carga, la geometría y el flujo de combustible para reducir o evitar el perjudicial zumbido en la cámara de combustión.

Así, en general es deseable conocer cualitativa y/o cuantitativamente con suficiente precisión la influencia de los distintos factores que influyen sobre el proceso de combustión, al igual que las dependencias de los factores que influyen entre sí.

45 Este conocimiento podría en particular permitir resolver de manera más efectiva o económica planteamientos de problemas generales en el campo de los procesos de combustión, así como reducir el problema del zumbido en la

cámara de combustión en especial mediante otros factores influyentes o bien combinaciones adecuadas de otros factores influyentes.

Análisis de datos utilizando una red

5 Se conoce en general la utilización de redes formadas por nodos y enlaces en el campo de un análisis de datos para conocer y describir complejas estructuras de datos y dependencias de datos en las estructuras de datos.

Por [3] se conoce un tal análisis de datos utilizando una red del tipo "red causal".

Claramente una tal red causal es un modelo estadístico de los datos descritos por la misma.

10 Una tal red causal, como la descrita en [3], es además en particular adecuada para conocer y describir características estadísticas de datos, por ejemplo una dependencia estadística o bien independencia entre dos variables.

Además, se conoce por [3] un procedimiento para eliminar enlaces que pueden determinarse en la red, un llamado Polynomial-Complexity-Verfahren (procedimiento de complejidad polinómica, procedimiento PC).

15 Un análisis de datos que utiliza una red causal del subtipo de la red bayesiana o red de Bayes [4], se conoce igualmente por [3].

En este análisis de datos mediante la red bayesiana, se averiguan (aprenden) dependencias estadísticas o bien independencias estadísticas, en general características estáticas, entre los datos. Las características estadísticas de los datos pueden entonces representarse gráficamente (figura 3) utilizando la red compuesta por nodos y enlaces.

20 La figura 3 muestra esta representación gráfica con la red 300 compuesta por nodos 310 y enlaces 320. Cada dos nodos 310 de la red 300 están unidos entre sí mediante un enlace 320.

Un nodo 310 de la red 300 representa un dato (variable). Un enlace 320 representa una dependencia estadística entre los nodos 310 o bien variables unidos mediante este enlace 320. Los nodos 310 no unidos son estadísticamente independientes entre sí.

25 La figura 4 muestra esquemáticamente un proceso 400 en un análisis de datos según el procedimiento PC conocido por [3], que da lugar a la estructura de red 300 representada (a modo de ejemplo) en la figura 3.

El objetivo del análisis de datos es averiguar las dependencias o independencias entre datos a analizar y una representación de las dependencias o independencias entre los datos, para representar una estructura contenida en los datos mediante una estructura de red o bien una red.

30 Mediante una estructura contenida en los datos ha de entenderse en general una dependencia estadística y/o una independencia estadística entre las variables.

Los datos para el análisis de datos son variables v, w, x, y y z . Resultan conjuntos de datos $(v, w, x, y, z)_i$ con $i = 1 \dots N$ (N = cantidad del conjunto de datos predeterminado).

En el análisis se averigua una dependencia estadística o una independencia entre las variables v, w, x, y y z .

35 En la figura 5 se representa una red 500 compuesta por nodos A 510, B 511, C 512, D 513 y E 514, que representan las variables v, w, x, y y z .

En una primera etapa 410 del procedimiento 400 se averigua, utilizando un procedimiento de prueba estadístico, una prueba χ^2 que se describe en [5], una independencia estadística o dependencia estadística en cada caso entre dos variables, por ejemplo (v, w) , (x, z) o (v, y) (independencia estadística o dependencia de orden 0).

40 En una segunda etapa 420 se eliminan de la red 500, que presenta una configuración inicial, en la que todos los nodos están unidos entre sí mediante enlaces, aquellos enlaces 521 que unen en cada caso dos nodos, por ejemplo (A,E), (C,D) y (C,E), para cuyas correspondientes variables se haya averiguado que existe una independencia estadística, por ejemplo (v, z) , (x, y) y (x, z) .

45 En una tercera etapa 430 se averigua para en cada caso dos variables, para las que se ha detectado una dependencia estadística, una dependencia estadística condicionada o bien una independencia bajo la condición de una tercera variable, por ejemplo $(u, x|v)$, $(v, y|w)$ o $(w, x|v)$ (independencia estadística o dependencia de primer orden). Para ello se utiliza igualmente la prueba χ^2 que se describe en [5].

Tras la cuarta etapa presenta la red 500 una estructura (configuración final), que describe las características estadísticas de los datos.

Redes de Bayes

Por [4] se conoce una red causal, una red bayesiana (de Bayes).

5 Una red de Bayes B es un tipo especial de representación de una función de densidad de probabilidad común multivariante (WDF) de un conjunto de variables X mediante un modelo gráfico.

Se define mediante un gráfico dirigido acíclico (directed acyclic graph, DAG) G en el que cada nodo $i = 1, \dots, n$ corresponde a una variable aleatoria X_i .

10 Los enlaces entre los nodos representan dependencias estadísticas y pueden interpretarse como interdependencias causales entre los mismos. El segundo componente de la red de Bayes es el conjunto de WDFs condicionadas

$P(X_i | Pa_i, \theta, G)$, que se parametriza mediante un vector θ .

Estas WDFs condicionadas especifican el tipo de dependencias de las distintas variables i del conjunto de sus nodos antecesores (parents) Pa_i . Así puede fraccionarse la WDF común en la forma de producto

$$(1) \quad P(X_1, X_2, \dots, X_n) = \prod_{i=1}^n P(X_i | Pa_i, \theta, G)$$

15 El DAG de una red de Bayes describe de manera inequívoca las relaciones condicionadas de dependencia e independencia entre un conjunto de variables pero por el contrario una estructura estadística determinada de la WDF no tiene como consecuencia ningún DAG inequívoco.

20 Más bien puede mostrarse que dos DAGs describen el mismo WDF cuando y sólo cuando los mismos presentan la misma cantidad de enlaces y la misma cantidad de "colisionadores" (colliders), siendo un colisionador una constelación en la que al menos dos enlaces orientados conducen al mismo nodo.

Por [6] se conoce otro procedimiento para averiguar ponderaciones adecuadas para la eliminación en una red neuronal y para eliminar ponderaciones de una red neuronal, un llamado procedimiento Pruning (de poda).

25 Por [7] se conoce un procedimiento para optimizar la eficiencia de una caldera de vapor. Puesto que para ello confeccionan expertos un modelo de Bayes manualmente, no es necesario antes de comenzar la optimización ningún adiestramiento del procedimiento con bloques de datos procedentes del pasado.

La invención tiene como tarea básica indicar un procedimiento que posibilite un análisis más fiable y más exacto de factores que influyen sobre un proceso de combustión.

30 Esta tarea se resuelve mediante el procedimiento, mediante el programa de ordenador con elementos de código de programa y el producto del programa de ordenador para el análisis de factores que influyen sobre un proceso de combustión en una cámara de combustión con las características según la correspondiente reivindicación independiente.

El procedimiento para analizar factores que influyen sobre un proceso de combustión en una cámara de combustión se basa en la utilización de un modelo estadístico adiestrable.

35 Este modelo estadístico adiestrable se adiestra al menos utilizando valores predeterminados de los factores que influyen (datos de adiestramiento o training), modificándose o bien adaptándose las ponderaciones del modelo estadístico adiestrable.

En el adiestramiento del modelo se adaptan en consecuencia las ponderaciones utilizando datos del adiestramiento.

40 La modificación o adaptación de las ponderaciones en el adiestramiento se realiza tal que el modelo estadístico adiestrado describe (modeliza) el proceso de combustión.

Además se realiza un llamado pruning (poda) de las ponderaciones.

Utilizando el modelo estadístico adiestrado o bien las ponderaciones modificadas adaptadas, puede analizarse la influencia de los factores que influyen sobre el proceso de combustión.

Al respecto posibilita este análisis (basado en el modelo estadístico adiestrado y en sus ponderaciones adaptadas) tanto dictámenes cualitativos como también cuantitativos sobre la influencia de los factores que influyen sobre el proceso de combustión.

5 Pueden determinarse las dependencias de los factores que influyen entre sí, al igual que individualmente y en combinación con el proceso de combustión.

Los factores que influyen pueden ordenarse en función de la magnitud de su influencia sobre el proceso de combustión. Los factores de influencia poco importantes pueden identificarse.

10 Pueden realizarse análisis de causas de los problemas de combustión, análisis de efectos para estados del proceso de combustión que pueden predeterminarse y que pueden describirse mediante valores predeterminados para los factores que influyen o bien simulaciones y pronósticos de procesos de combustión o bien estados del proceso de combustión.

Además pueden clarificarse en el análisis interrelaciones causa-efecto en el proceso de combustión.

El programa de ordenador con elementos de código de programa está preparado para realizar todas las etapas según el procedimiento correspondiente a la invención cuando el programa se ejecuta sobre un ordenador.

15 El producto del programa de ordenador con elementos de código de programa memorizados sobre un soporte legible por máquina está preparado para realizar todas las etapas según el procedimiento correspondiente a la invención cuando el programa se ejecuta sobre un ordenador.

20 El programa de ordenador con elementos de código de programa, equipado para realizar todas las etapas según el procedimiento inventivo, cuando el programa se ejecuta sobre un ordenador, así como el producto de programa de ordenador con elementos de código de programa memorizados sobre un soporte legible por máquina, preparado para realizar todas las etapas según el procedimiento inventivo cuando el programa se ejecuta sobre un ordenador, son especialmente adecuados para realizar el procedimiento correspondiente a la invención o uno de sus perfeccionamientos descritos a continuación.

25 Además, señalemos aquí que el procedimiento inventivo puede aplicarse o transmitirse en general a otros sistemas complejos, como procesos industriales de fabricación, por ejemplo en el campo de la fabricación de papel y/o acero, procesos de generación de energía y/o instalaciones de generación de energía.

Además debe señalarse que la invención logra una forma de proceder general para posibilitar y/o facilitar soluciones a problemas en el ámbito de los procesos de combustión.

Perfeccionamientos preferentes de la invención resultan de las reivindicaciones dependientes.

30 Los perfeccionamientos que se describen a continuación se refieren tanto a los procedimientos como también al programa de ordenador y al producto del programa de ordenador.

La invención y los perfeccionamientos que se describen a continuación pueden realizarse tanto en software como también en hardware, por ejemplo utilizando un circuito eléctrico especial.

35 Además es posible una realización de la invención o un perfeccionamiento descrito a continuación mediante un elemento de memoria legible por computador sobre el que está memorizado el programa de ordenador con elementos de código de programa, que ejecuta la invención o el perfeccionamiento.

También puede estar realizada la invención o cualquier perfeccionamiento que se describe a continuación mediante un producto de programa de ordenador que presenta un medio de memoria sobre que está memorizado el programa de ordenador con elementos de código de programa, que ejecuta la invención o perfeccionamiento.

40 En un perfeccionamiento incluyen los factores que influyen al menos algunas de las siguientes magnitudes y/o magnitudes derivadas de las mismas:

45 una presión de aire en el exterior, una presión de gas, una presión tras una compresión, una diferencia de presiones en un filtro de aire, un gas piloto, un punto de referencia del gas piloto, una carga, una temperatura del aire, una temperatura del gas, una temperatura tras una compresión, una reducción de presión en una cámara de combustión, una posición del "blade"/alabe, una carga, una potencia de la turbina (GtLstg), una temperatura de aspiración (air temperature inflow)(SaugT), una presión del aire del entorno (air pressure) (UmgPr), una pérdida de presión a través de un filtro de aspiración de aire (pressure difference air filter, PrDFi), una presión tras una compresión/una presión del compresor (pressure after compression, stage (VerPr)), una temperatura tras una compresión/temperatura final del compresor (temperature after compression stage (VerdT)), una posición de los álabes de guía de entrada, una pérdida de presión en una cámara de combustión (pressure difference burning chamber (DrVBr), una presión de gas (gas pressure (GasDr)), una temperatura del gas (gas temperature (GasT)), una frecuencia de rotación (rotation frequency), una velocidad de giro, una temperatura del gas de escape (exhaust gas temperature (AbgasT), un primer factor de zumbido (humming pressure amplitude (WD01)), un segundo factor de zumbido (humming pressure amplitude (WD02)).

Además pueden incluir los factores que influyen otras magnitudes para describir (otros) flujos de combustible, presiones de combustible, temperatura de combustible o condiciones de flujos de combustible.

Además, puede preverse que el proceso de combustión se describa utilizando una magnitud que describe el zumbido en la cámara de combustión, pudiendo reproducirse los factores que influyen sobre esta magnitud que describe el zumbido en la cámara de combustión.

Si se describe así por ejemplo el proceso de combustión utilizando una emisión de NO_x , se reproducen los factores que influyen en base a este factor que describe la emisión de NO_x .

También puede preverse que este factor que describe el zumbido en la cámara de combustión, como el factor que describe la antes citada emisión de NO_x , sea una magnitud objetivo (target) en el adiestramiento.

El modelo estadístico adiestrable puede realizarse de diferentes formas, por ejemplo mediante una red neuronal, en particular mediante una red neuronal feedforward (de prealimentación), o mediante una red causal, por ejemplo del tipo de una red de Bayes, o mediante un árbol de decisión.

En un perfeccionamiento se prevé que la cámara de combustión sea una cámara de combustión de una turbina, en particular de una turbina de gas.

Además se prevé un perfeccionamiento en el marco de un análisis de sensibilidad para los factores que influyen en un proceso de combustión de una cámara de combustión.

También puede utilizarse un perfeccionamiento para determinar una secuencia según la importancia de los factores que influyen sobre un zumbido en la cámara de combustión.

Además, puede introducirse una mejora para averiguar una secuencia según la importancia de los factores que influyen, en particular según la importancia de factores que influyen sobre una emisión de NO_x de una cámara de combustión.

En las figuras se representa un ejemplo de ejecución de la invención, que se describirá a continuación más en detalle.

Se muestra en

figura 1 un esquema de una cámara de combustión de una turbina de gas según un ejemplo de ejecución;

figura 2 un esquema de un bloque de datos de entrada (input) con vectores de estado con factores de influencia (variables) sobre un proceso de combustión en una cámara de combustión de una turbina de gas según un ejemplo de ejecución;

figura 3 una red compuesta por nodos y enlaces;

figura 4 etapas del proceso en un procedimiento de complejidad polinómica (Polynomial-Complexity);

figura 5 una red bayesiana que se procesa utilizando un procedimiento de complejidad polinómica;

figura 6 un proceso en un análisis de un sistema "cámara de combustión" que se basa en la determinación de un modelo estadístico del sistema "cámara de combustión" según un ejemplo de ejecución;

figura 7 un modelo estadístico simplificado según un ejemplo de ejecución;

figura 8 un esquema con diversas estructuras finales condicionadas de una red que describe el sistema "cámara de combustión", según un ejemplo de ejecución;

figura 9 un proceso en un análisis de un sistema "cámara de combustión" basado en una determinación simplificada de un modelo estadístico del sistema "cámara de combustión" según un ejemplo de ejecución alternativo;

figura 10 un esquema con una estructura final simplificada de una red que describe el sistema "cámara de combustión" según un ejemplo de ejecución alternativo;

figura 11 un esquema de un procedimiento para identificar factores importantes que influyen sobre un zumbido en la cámara de combustión;

figura 12 un esquema de un procedimiento para identificar dependencias de los factores que influyen.

Ejemplo de ejecución: análisis de un proceso de combustión en una cámara de una turbina de gas

La figura 1 muestra esquemáticamente una turbina de gas con cámara de combustión anular 100 de una serie V84.3A, tal como se describe en [2].

En esta turbina de gas con cámara de combustión anular 100 se observa, bajo ciertas condiciones de servicio, en funcionamiento con premezcla, un "zumbido" debido a vibraciones de combustión autoalimentadas.

En la combustión en espacios cerrados de combustión puede llegarse a una realimentación entre la liberación de potencia en la llama y la acústica en la cámara de combustión. Entonces se activa mediante oscilaciones en la liberación de potencia de la combustión un campo de propagación del sonido en el espacio de la combustión, que a su vez provoca nuevas oscilaciones en la potencia de combustión. Si las vibraciones de la presión y las de la potencia están suficientemente en fase, se cumple un llamado criterio de Rayleigh, llegándose a una autoamplificación de las oscilaciones.

Este fenómeno, conocido como vibración automantenida de la cámara de combustión o de quemado, implica a menudo amplitudes muy elevadas de la presión del sonido y gran aumento de la transmisión de calor en las paredes de la cámara de combustión, lo cual da lugar a una carga mecánica y térmica del sistema amplificada. El espectro de daños originado por las vibraciones de la cámara de combustión llega, desde un aumento de la emisión de ruido, pasando por reducciones de la potencia, hasta el daño de distintas piezas de la máquina.

Para poder tomar medidas de remedio adecuadas frente al problema de las vibraciones de la combustión (zumbido en la cámara de combustión), tal como se presentan en la V84.3A, se investiga y analiza en profundidad el proceso de combustión en la cámara de combustión, denominado a continuación "sistema de la cámara de combustión".

Los puntos clave de la investigación o análisis configuran una captación de estados de la cámara de combustión, por ejemplo midiendo estados de la cámara de combustión, introduciendo o leyendo datos de la cámara de combustión a partir de una memoria y a continuación, mediante un ordenador, realizando una evaluación estadística y análisis de las informaciones registradas.

En la evaluación estadística se forma en general en un primer caso un modelo estadístico, una red causal, para el sistema "cámara de combustión" (modelización según el caso 1). En un segundo caso se forma un modelo estadístico, una red neuronal del tipo feedforward (prealimentación), para un sistema "zumbido en la cámara de combustión" - un caso especial del caso 1 general del sistema "cámara de combustión" (modelización según el caso 2).

Los modelos estadísticos son en cada caso la base para los siguientes análisis.

Caso 1: Modelo general de cámara de combustión (Modelo cámara de combustión)

En una medición del estado de una cámara de combustión se miden valores de parámetros actuales y se memorizan en forma de un vector de estado en una memoria del ordenador. Lo correspondiente vale en el caso de una lectura o de una introducción de datos de la cámara de combustión.

Una tal medición del estado de valores de parámetros se repite a intervalos de tiempo de 1 s continuamente o bien durante un espacio de tiempo predeterminado, generándose una serie temporal de vectores de estado.

Éstos se reúnen y se memorizan como bloque de datos.

En la figura 2 se representa un tal bloque de datos 200 esquemáticamente en forma de tabla. La figura 2 muestra el conjunto de datos 200 con un conjunto de vectores de estado 201, de los cuales cada uno incluye los valores del parámetro 202 correspondientes a una medición de un estado de la cámara de combustión.

Un vector de estado incluye por ejemplo en cada caso los valores de los siguientes parámetros 203 medibles:

- GtLstg
- SaugT
- UmgPr
- PrDFi
- VerdPr
- VerdT
- álabe
- DrVBr

- PilotG
- GasDr
- GasT
- veloc
- gasescapeT
- WD01 (primera amplitud de presión alternativa)
- WD02 (segunda amplitud de presión alternativa).

5

10

Hay que señalar que el listado anterior de parámetros no ha de entenderse como definitivo. Un vector de estado 201 puede incluir también otros parámetros o valores de parámetros o también menos parámetros o también parámetros derivados.

15

Para modelizar el sistema "cámara de combustión", en particular para verificar y analizar los factores que influyen sobre el proceso de combustión, así como para averiguar las propiedades estadísticas que presentan entre sí los factores que influyen (variables) del sistema "cámara de combustión", se definen utilizando los parámetros Variable del sistema "cámara de combustión". Éstos deben describir de manera lo más completa posible un estado de la cámara de combustión o el proceso de combustión (ver al respecto la [figura 6](#), etapa del proceso 601).

Se determinan, tal como se describe a continuación, dependencias estadísticas o independencias entre las variables (ver al respecto [la figura 6](#), etapas del proceso 610 a 680).

Utilizando estas magnitudes estadísticas, puede determinarse un modelo estadístico, una llamada red bayesiana [4] del sistema "cámara de combustión" (ver al respecto la [figura 6](#), 690).

20

Utilizando el modelo estadístico 685 o bien la red bayesiana 685, se realiza a continuación un análisis más extenso del sistema "cámara de combustión" y con ello de un proceso de combustión (ver al respecto la [figura 6](#), etapa del proceso 690).

La [figura 6](#) muestra las etapas del proceso 601 a 680, que se realizan para determinar un modelo estadístico del sistema "cámara de combustión" 685:

25

En una etapa de inicialización 601 se determinan las variables del sistema "cámara de combustión".

Las variables definidas del sistema "cámara de combustión" son:

- GtLstg
- SaugT
- UmgPr
- PrDFi
- VerdPr
- VerdT
- álabe
- DrVBr
- PilotG
- GasDr
- GasT
- veloc
- gasescapeT
- WD01

30

35

40

- WD02

y coinciden en este caso con los parámetros 203 medibles.

Hay que resaltar que esta coincidencia no debe darse necesariamente siempre. El conjunto de variables o de factores de influencia tal como se indican antes pueden ser un subconjunto de los parámetros 203 medibles o también (al menos en parte) obtenerse mediante combinaciones de determinados parámetros 203.

5 Tampoco ha de entenderse esta relación de variables como definitiva. Pueden perfectamente definirse otras variables que describan el sistema "cámara de combustión".

Las variables se reúnen para formar un llamado vector de estado del modelo, siendo las variables componentes del vector de estado del modelo.

10 En la etapa de inicialización 601 se determina además una estructura inicial de una red, compuesta por nodos y enlaces y que describe una estructura que está contenida en el sistema "cámara de combustión".

La cantidad de nodos se fija en función de la cantidad de variables del sistema "cámara de combustión". Cada nodo representa una variable de este sistema.

En la estructura inicial están unidos todos los nodos entre sí, lo cual significa una hipótesis inicial a verificar posteriormente de dependencia entre todas las variables.

15 En una primera etapa 610 se determina un llamado bloque de datos de adiestramiento del sistema "cámara de combustión". Utilizando este bloque de datos de adiestramiento se procesa o adiestra la red, tal como se describe a continuación, tal que una estructura final de la red describe una estructura contenida en el sistema "cámara de combustión".

20 Para ello se extraen de un bloque de datos predeterminado vectores de estado del modelo y se reúnen para formar un bloque de datos de adiestramiento 610.

Éste resulta en este caso muy simple, ya que los parámetros coinciden con las variables, es decir, el vector de estado coincide con el vector de estado del modelo.

25 En una segunda etapa a 620 se averigua, utilizando un procedimiento de prueba estadístico, una prueba χ^2 que se describe en [5], y el bloque de datos de adiestramiento (ver al respecto la etapa 610) una independencia estadística directa o bien dependencia estadística directa en cada caso entre dos variables del sistema (independencia estadística o bien dependencia de orden 0).

Se determina:

- U/A(PilotG, GasDr),
- U/A(PilotG, Nox),
- 30 - U/A(PilotG, veloc)
- U/A(PilotG, GasT)
- etc.,

designándose con U/A(a,b) la independencia estadística U o bien la dependencia estadística A entre las variables a y las variables b.

35 En una tercera etapa 630 se eliminan de la red que presenta la configuración inicial aquellos enlaces que unen en cada caso dos nodos para cuyas variables correspondientes se ha detectado una independencia estadística U.

En una cuarta etapa 640 se determina en cada caso para dos variables para las que se ha detectado una dependencia estadística una dependencia estadística condicionada o bien independencia bajo la condición de una tercera variable (independencia estadística o dependencia de primer orden).

40 Para ello se utiliza igualmente la prueba χ^2 que se describe en [5].

Se determina:

- U/A(DrVBR, GasDr|PilotG),
- U/A(PilotG, VerdT|álabe),
- U/A(PilotG, Nox|UmgPr),
- 45 - U/A(GtLstg, VerdT|SaugT)

- etc.,

designándose con $U/A(a,b|c)$ la independencia estadística U o bien la dependencia estadística A entre las variables a y las variables b bajo la condición de las variables c .

5 En una quinta etapa 650 se formulan para aquellos enlaces para cuyos correspondientes nodos se haya averiguado una independencia estadística condicionada U (ver al respecto $U(a,b|c)$, etapa 640) reglas para eliminar estos enlaces.

En base al siguiente ejemplo adicional sencillo, representado en la figura 7, una red 700 con nodos A (701), B (702), C (703), D (704) y E (705) que representan las variables v , w , x y z , se describirá este procedimiento:

10 Se averiguaron las siguientes independencias estadísticas directas y dependencias y se eliminaron los correspondientes enlaces en la red (710):

a) independencias estadísticas directas (ver al respecto las etapas 620 y 630):

- $U(A,E)$ enlace (A,E) retirado,
- $U(C,D)$ enlace (C,D) retirado,
- $U(C,E)$ enlace (C,E) retirado,

15 b) dependencias estadísticas directas (ver al respecto la etapa 620):

- $A(A,B)$, $A(A,C)$, $A(A,D)$, $A(B,C)$, $A(B,D)$, $A(B,E)$, $A(D,E)$.

Se averiguaron las siguientes independencias estadísticas condicionadas y se formularon las siguientes reglas para eliminar enlaces (711):

a) $U(A,C|B)$;

20 la correspondiente regla es:

eliminar el enlace (A,C) cuando existen el enlace (A,B) y el enlace (B,C) en la red

b) $U(A,D|B)$;

la correspondiente regla es:

eliminar el enlace (A,D) cuando existen el enlace (A,B) y el enlace (B,D) en la red

25 c) $U(B,C|A)$;

la correspondiente regla es:

eliminar el enlace (B,C) cuando el enlace (A,B) y el enlace (A,C) existen en la red

d) $U(B,E|D)$;

la correspondiente regla es:

30 eliminar el enlace (B,E) cuando el enlace (B,D) y el enlace (D,E) existen en la red

e) $U(D,E|B)$;

la correspondiente regla es:

eliminar el enlace (D,E) cuando el enlace (B,D) y el enlace (B,E) existen en la red.

35 En una sexta etapa 660 se detecta una interferencia en la reglas. Mediante una simplificación de la reglas se elimina esta interferencia. De esta manera se formulan nuevas reglas simplificadas.

Para el anterior ejemplo adicional resultan las siguientes reglas simplificadas (712):

a) $U(A,C|B)$;

la correspondiente regla es:

eliminar el enlace (A,C) cuando el enlace (B,C) existe en la red

40 b) $U(A,D|B)$;

la correspondiente regla es:

eliminar el enlace (A,D)

c) $U(B,C|A)$;

la correspondiente regla es:

5 eliminar el enlace (B,C) cuando el enlace (A,C) existe en la red

d) $U(B,E|D)$;

la correspondiente regla es:

eliminar el enlace (B,E) cuando el enlace (D,E) existe en la red

e) $U(D,E|B)$;

10 la correspondiente regla es:

eliminar el enlace (D,E) cuando el enlace (B,E) existe en la red.

En una séptima etapa 670 se averiguan a partir de las reglas simplificadas condiciones para la eliminación de los enlaces. Los enlaces que sólo se borran de la red bajo una tal condición se denominan enlaces inseguros.

Para el anterior ejemplo adicional resultan los siguientes enlaces inseguros (713):

15 a) enlace inseguro (A,C) con la condición:

eliminar el enlace (A,C) cuando el enlace (B,C) existe en la red

b) enlace inseguro (B,C) con la condición:

eliminar el enlace (B,C) cuando el enlace (A,C) existe en la red

d) enlace inseguro (B,E) con la condición:

20 eliminar el enlace (B,E) cuando el enlace (D,E) existe en la red

e) enlace inseguro (D,E):

eliminar el enlace (D,E) cuando el enlace (B,E) existe en la red.

25 En una octava etapa 680 se "eliminan condicionadamente" de la red los enlaces inseguros, es decir, se dotan de un distintivo en la red los enlaces inseguros, por ejemplo mediante un enlace 714 de línea discontinua, significando el enlace de línea discontinua que este enlace dado el caso no existe (en el caso de que se cumpla la correspondiente condición en la red y con ello se haya borrado este enlace inseguro,

o bien que este enlace existe (en el caso de que no se cumpla la correspondiente condición en la red y con ello no se haya borrado este enlace inseguro).

30 Así resultan mediante este procedimiento varias estructuras finales distintas, condicionadas, para la red, que en su conjunto describen la estructura existente en los datos mejor y de manera más flexible que lo que sería posible sólo con una única estructura final fija.

En la figura 8 se representan las distintas estructuras finales condicionadas de la red 800, que describe el sistema "cámara de combustión".

Como nodos 810 a 824 se representan en la figura 8 las variables:

- 35
- GtLstg 810
 - SaugT 811
 - UmgPr 812
 - PrDFi 813
 - VerdPr, etc

40

 - VerdT

- álabe
- DrVBr
- PilotG
- GasDr
- GasT
- veloc
- gasescape
- WD01
- WD02

5

10

Las estructuras finales o bien la red 800 presentan/presenta:

- enlaces fijos 830, que unen en cada caso dos nodos 850 sin la correspondiente condición,
- enlaces inseguros 840, que unen en cada caso dos nodos 860 bajo una condición.

No se presenta en la red 800

- un nodo que no está unido con ningún otro nodo.

15

Caso 2: modelo "zumbido en la cámara de combustión" (figura 11).

Según el proceso indicado en el modelo de cámara de combustión, se desarrolla ahora un modelo, el modelo zumbido en la cámara de combustión, que en particular es adecuado para investigar y analizar el fenómeno del zumbido en la cámara de combustión [2].

20

Este modelo de zumbido en la cámara de combustión permite con validez general y con orientación selectiva una identificación de factores importantes relacionados con el problema del zumbido en la cámara de combustión [2].

Adicionalmente permite el modelo de zumbido en la cámara de combustión la evaluación del efecto de variaciones selectivas de estos factores influyentes.

25

De esta manera pueden desarrollarse, sin intervención en el sistema real modelado mediante el modelo o bien en la turbina, contramedidas que reduzcan de manera efectiva el zumbido en la turbina y que no incluyan una reducción de la carga ni de la potencia eléctrica.

Partiendo de las variables anteriores o bien del bloque de datos de adiestramiento, se eligen tales vectores de estado del modelo para los que la turbina mostraba el zumbido y se reúnen para formar otro segundo bloque de datos de adiestramiento, utilizado en el caso 2.

30

Utilizando este segundo bloque de datos de adiestramiento se forma y adiestra una red neuronal del tipo feedforward para una futura amplitud del zumbido en la cámara de combustión (u otra magnitud que se corresponda con el zumbido).

Las magnitudes-objetivo en el adiestramiento son un zumbido y una emisión de NOx.

35

Mediante un llamado pruning o "poda" [6] de parámetros del modelo, en este caso de las ponderaciones de la red neuronal, se evalúa la influencia de cada variable para el modelo del zumbido en la cámara de combustión. En base a la evaluación, se deduce la importancia de la correspondiente variable para el modelo.

Si se clasifican las variables según esta importancia, se obtiene correspondientemente también la secuencia por importancia de las variables en cuanto a la aparición del zumbido en la turbina.

Con el pruning de los parámetros del modelo se logra para la red una gran capacidad de generalización en cuanto a los periodos de zumbido que no se inclúan en el bloque de datos de adiestramiento.

40

A continuación se describen continuaciones y alternativas al ejemplo de ejecución.

1) caso 3: modelo ruido en la cámara de combustión en combinación con modelo cámara de combustión

El modelo zumbido en la cámara de combustión según el caso 2 describe la turbina bajo una momentánea política de servicio. No obstante, esto puede no ser suficiente para predecir cuál es el efecto de modificaciones de esta política de servicio o bien qué modificaciones han de realizarse para evitar el zumbido de la turbina.

Esto puede atribuirse a que el modelo zumbido en la cámara de combustión, basado en la red neuronal del tipo feedforward (prealimentación) no contiene una orientación causa-efecto de interdependencias y no diferencia entre dependencias directas e indirectas.

Por ello se realiza en el caso 3 en una primera etapa una modelización del zumbido en la cámara de combustión según el caso 2 y así identifica las variables o factores más importantes que influyen sobre el zumbido de la turbina.

Una vez identificados los factores influyentes más importantes, se realiza una segunda etapa, en la que se modelizan las dependencias entre los factores influyentes más importantes identificados en la primera etapa entre sí y con referencia a la aparición de zumbido.

La meta de esta modelización es la identificación de interdependencias causa-efecto o dependencias directas o indirectas o bien factores influyentes directos e indirectos.

La interpretación de estas dependencias posibilita entonces la identificación óptima de factores influyentes, en particular de los factores influyentes directos, mediante cuya modificación puede actuarse directamente contra un zumbido.

Para ello se realiza ahora en la segunda etapa una modelización según el caso 1, es decir, con un bloque de datos de adiestramiento que incluye nada más que los factores influyentes más importantes identificados en la etapa 1, se adiestra una red causal (**figura 12**).

La estructura de red 1200 que existe tras el adiestramiento da a conocer las dependencias directas e indirectas que se buscaban y los factores influyentes directos e indirectos.

Es de señalar que en la segunda etapa también pueden utilizarse procedimientos basados en la teoría de los modelos gráficos.

2) caso 4

En una continuación del caso 3 puede ahora, partiendo de los factores influyentes directos identificados en el caso 3, realizarse una modelización según el caso 2, es decir, una modelización utilizando una red neuronal del tipo feedforward.

Mediante la red neuronal así generada pueden averiguarse los efectos de variaciones de los factores influyentes directos identificados en el caso 3.

De esta manera pueden estimarse, sin experimentos en la turbina o antes de iniciarse los mismos, las influencias de las contramedidas frente a un zumbido.

Las contramedidas efectivas o combinaciones de las mismas se identifican, evalúan y preparan.

3) En una alternativa (ver al respecto la figura 9 y la figura 10) al caso 1 del ejemplo de ejecución, se determina una estructura de red simplificada 1000 (685') que no presenta ningún enlace inseguro.

En este caso se averiguan sólo las independencias estadísticas directas o las dependencias estadísticas directas, en cada caso entre dos variables del sistema (ver al respecto 620, independencia estadística o dependencia de orden 0.

Ya no se averiguan aquí las dependencias o independencias estadísticas condicionadas (ver al respecto 640, independencia estadística o bien dependencia de primer orden).

Se realizan así sólo las etapas de procedimiento 601, 610, 620 y 630 descritas, lo cual conduce a la estructura de red simplificada 685' o bien 1000.

En la figura 10 se representa la estructura final de la red 800', que describe el sistema "cámara de combustión".

Como nodos 810 a 824 se representan como en la figura 8 las variables:

- GtLstg 810
- SaugT 811
- UmgPr 812
- PrDFi 813
- VerdPr, etc
- VerdT

- álabe
- DrVBr
- pilotG
- GasDr
- GasT
- veloc
- gasescapeT
- WD01
- WD02.

5

10

La estructura final o bien la red 800' presenta:

- enlaces fijos 830, que unen en cada caso dos nodos 850 sin una correspondiente condición.

No se presenta en la red 800'

- un nodo que no está unido con ningún otro nodo.

Tampoco se presentan ya enlaces inseguros 840, que unen en cada caso dos nodos 860 bajo una condición.

15

- 2) En una segunda alternativa al caso 1 del ejemplo de ejecución, se averiguan enlaces adecuados para la eliminación o bien ponderaciones de una red neuronal adecuadas para la eliminación mediante un llamado procedimiento de pruning (poda).

En este documento se cita la siguiente documentación:

20

- [1] S.M. Candel, Combustion Instability Coupled by Pressure Waves and their Active Control (inestabilidad de la combustión relacionada con ondas de presión y su control activo), Invited General Lecture, 25. Simposio Int. de la Combustión, Sydney, 1992;

- [2] J. Hermann y colab., Control activo de la inestabilidad en una turbina de gas de 170 MW, informe VDI núm. 1313, 18ª Jornada germano-holandesa de la llama, TU Delft/NL, 28-29 agosto 1997;

- [3] Solicitud de patente alemana con el número de publicación DE 10134093 A1;

25

- [4] F.W. Jensen, F.V. (1996), An introduction to Bayesian networks (Una introducción a las redes bayesianas), UCL Press, Londres, 178 páginas;

- [5] prueba χ^2 ;

- [6] Solicitud de patente internacional con el número de publicación WO97/36248;

30

- [7] D.L. Eakle y colab., Optimizing Combustion to Reduce NO_x and Improve Boiler Efficiency Using Constrained Empirical Optimization based on Bayesian Models (optimización de la combustión para reducir el NO_x y mejorar la eficiencia de la caldera utilizando una optimización empírica con limitaciones basada en el modelo bayesiano, Actas de la Conferencia Técnica de Primavera 1998 de la División de Máquinas de Combustión Interna ASME, parte 1 (de 3); Fort Lauderdale, FL, USA, 26-29 abril 1998, vol. 30, Núm. 1; páginas 87-92.

REIVINDICACIONES

1. Procedimiento para el análisis de factores que influyen sobre un proceso de combustión en una cámara de combustión,

caracterizado porque

- 5
- el análisis de los factores que influyen se realiza utilizando un modelo estadístico adiestrable,
 - el modelo estadístico adiestrable se adiestra al menos utilizando valores predeterminados de los factores que influyen, modificándose las ponderaciones del modelo estadístico adiestrable tal que el modelo estadístico adiestrado describe el proceso de combustión,
 - se realiza un pruning (poda) de las ponderaciones, y
- 10
- utilizando las ponderaciones modificadas, se analiza la influencia de los factores que influyen sobre el proceso de combustión.
2. Procedimiento según una de las reivindicaciones precedentes,
- en el que los factores que influyen incluyen al menos algunas de las siguientes magnitudes y/o magnitudes derivadas de las mismas:
- 15
- una presión del aire exterior, una presión del gas, una presión tras una compresión, una diferencia de presión en un filtro de aire, un gas piloto, una carga, una temperatura del aire, una temperatura del gas, una temperatura tras una compresión, una reducción de la presión en una cámara de combustión, una posición del "blade" (álabe), una potencia de la turbina de gas, una temperatura de aspiración, una presión del aire del entorno, una pérdida de presión a través de un filtro de aspiración, una presión final del compresor, una temperatura final del compresor, una posición de los álabes de guía de entrada, una pérdida de presión en una cámara de combustión, un punto de referencia del gas piloto, una presión del gas, una temperatura del gas, una velocidad de giro, una temperatura del gas de escape.
- 20
3. Procedimiento según una de las reivindicaciones precedentes,
- en el que se describe el proceso de combustión utilizando una magnitud que describe un zumbido en la cámara de combustión,
- 25
- reproduciéndose los factores que influyen sobre el factor que describe el zumbido en la cámara de combustión.
4. Procedimiento según la reivindicación precedente,
- en el que el proceso de combustión se describe utilizando una magnitud que describe una emisión de NO_x , reproduciéndose los factores que influyen en el factor que describe la emisión de NO_x .
- 30
5. Procedimiento según la reivindicación precedente,
- en el que la magnitud que describe el zumbido en la cámara de combustión es una magnitud objetivo en el adiestramiento.
6. Procedimiento según la reivindicación precedente,
- en el que la magnitud que describe la emisión de NO_x es la magnitud objetivo en el adiestramiento.
- 35
7. Procedimiento según una de las reivindicaciones precedentes,
- en el que el modelo estadístico adiestrable es una red neuronal, en particular una red neuronal feedforward (prealimentación) o una red causal o un árbol de decisión.
8. Procedimiento según una de las reivindicaciones precedentes,
- en el que la cámara de combustión es una cámara de combustión de una turbina, en particular de una turbina de gas.
- 40
9. Procedimiento según una de las reivindicaciones precedentes,
- utilizado en el marco de un análisis de sensibilidad para factores que influyen sobre un proceso de combustión de una cámara de combustión.
10. Procedimiento según una de las reivindicaciones precedentes,

- utilizado para averiguar la secuencia según la importancia de factores que influyen sobre un zumbido en una cámara de combustión.

11. Procedimiento según una de las reivindicaciones precedentes,

5

- utilizado para averiguar una secuencia según la importancia de factores que influyen sobre una emisión de NO_x de una cámara de combustión.

12. Programa de ordenador con elementos de código de programa, para realizar todas las etapas correspondientes a reivindicación 1, cuando el programa se ejecuta en un ordenador.

13. Programa de ordenador con elementos de código de programa según la reivindicación precedente, cuyos elementos de código de programa están memorizados en un soporte de datos legible por computadora.

10

14. Producto de programa de ordenador con elementos de código de programa memorizados en un soporte legible por máquina, para realizar todas las etapas correspondientes a la reivindicación 1, cuando el programa se ejecuta en un ordenador.

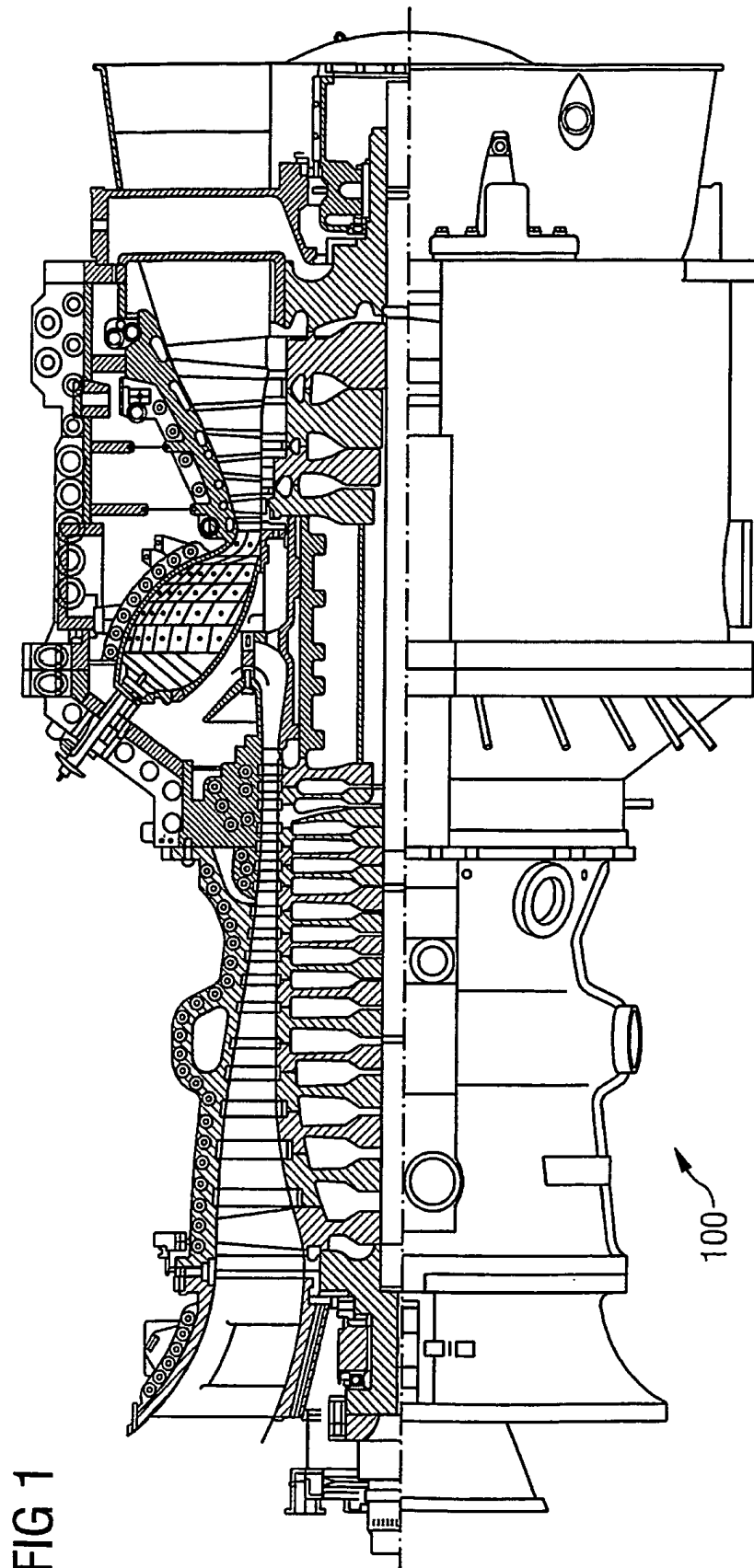


FIG 3

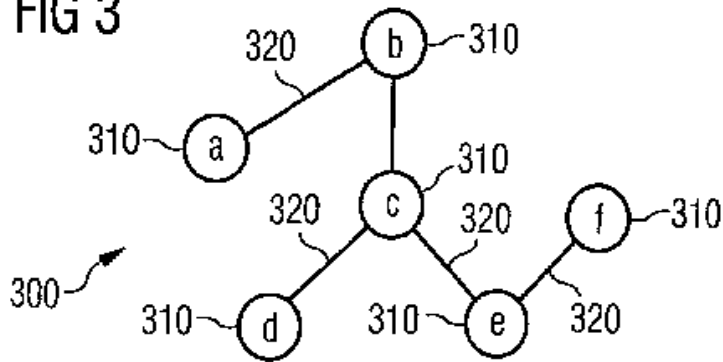


FIG 4

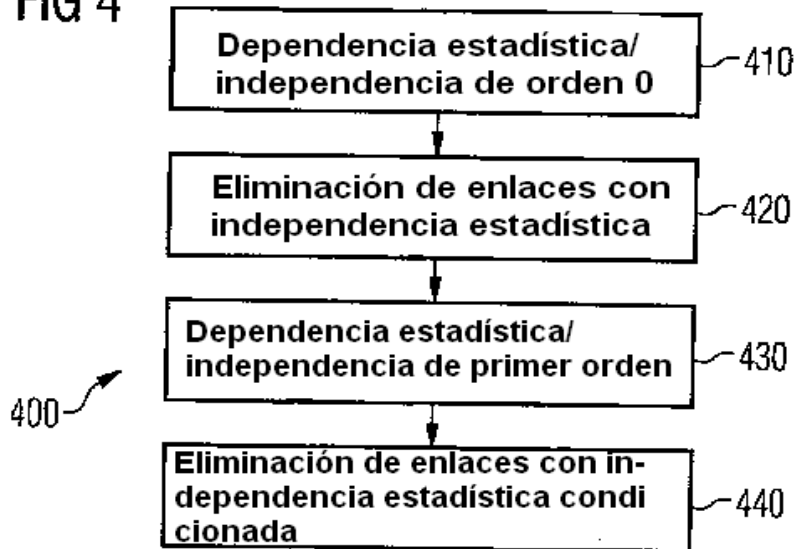


FIG 5

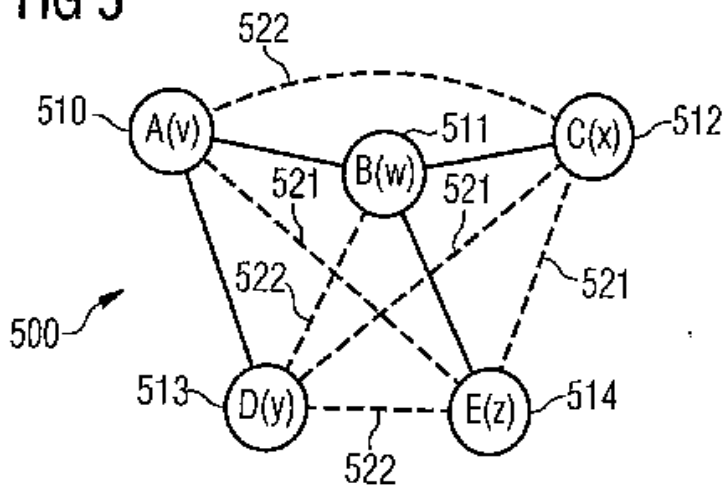


FIG 6

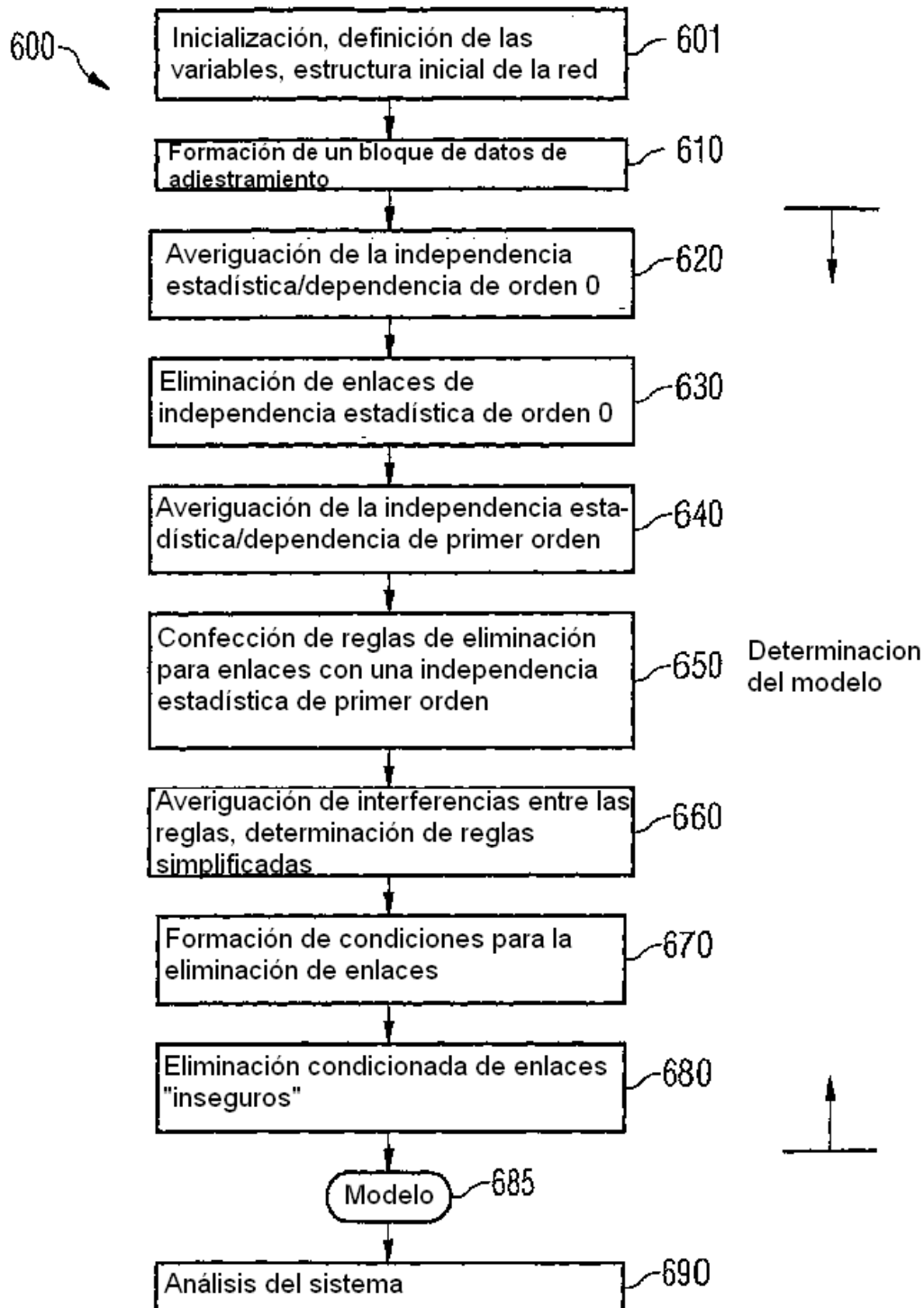


FIG 7

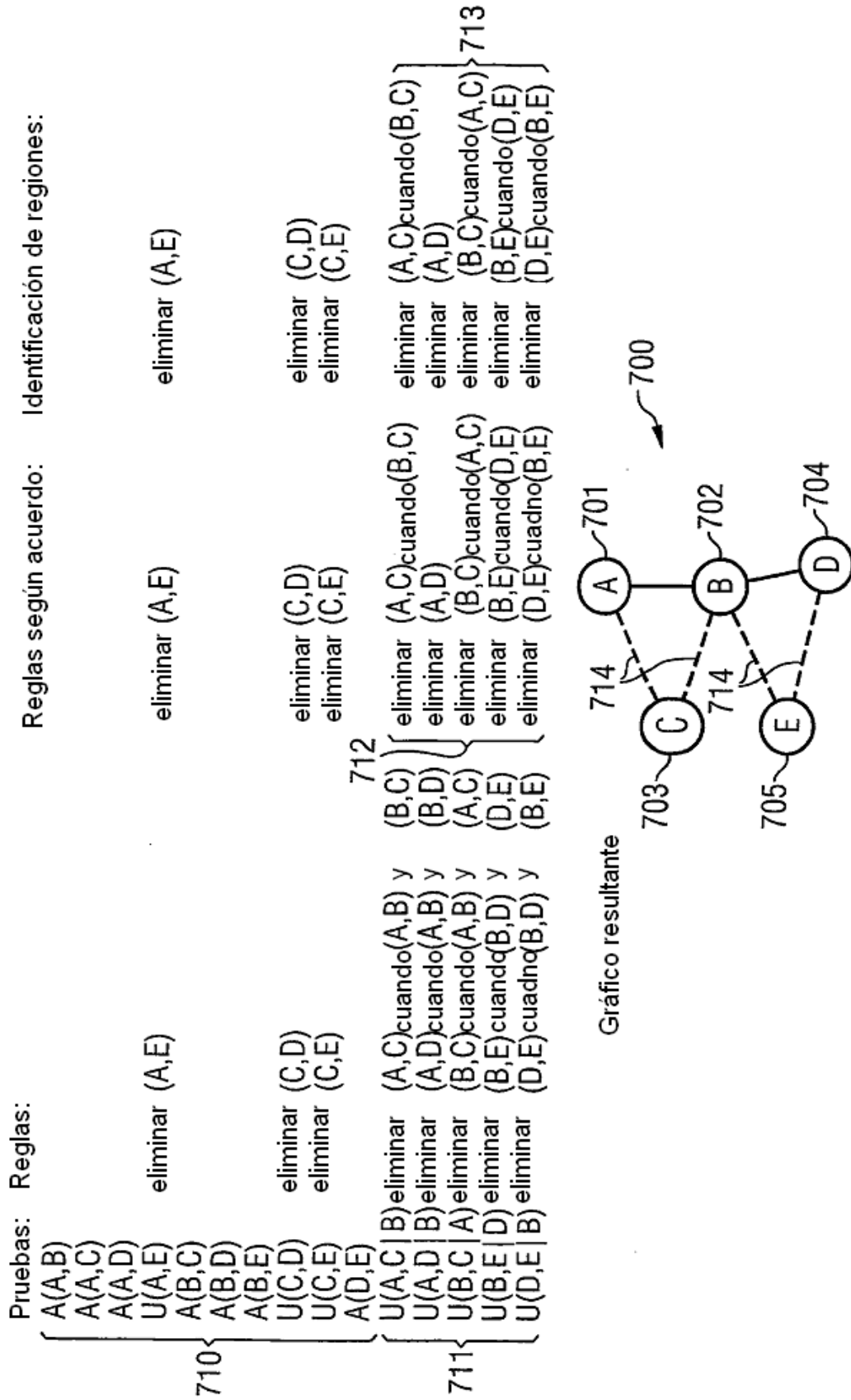


FIG 8

Resultado de los datos de la Planta de Tapada

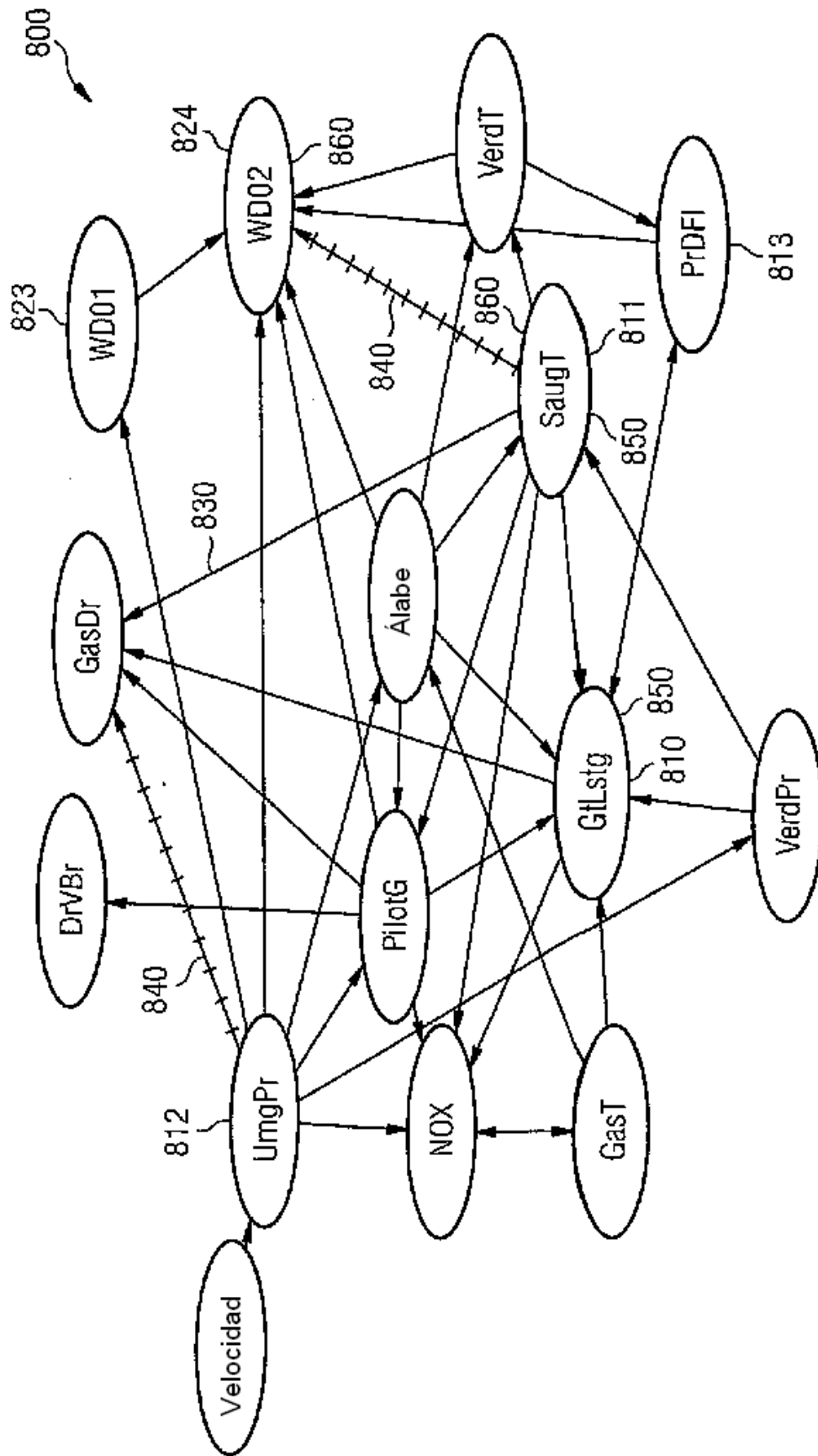


FIG 9

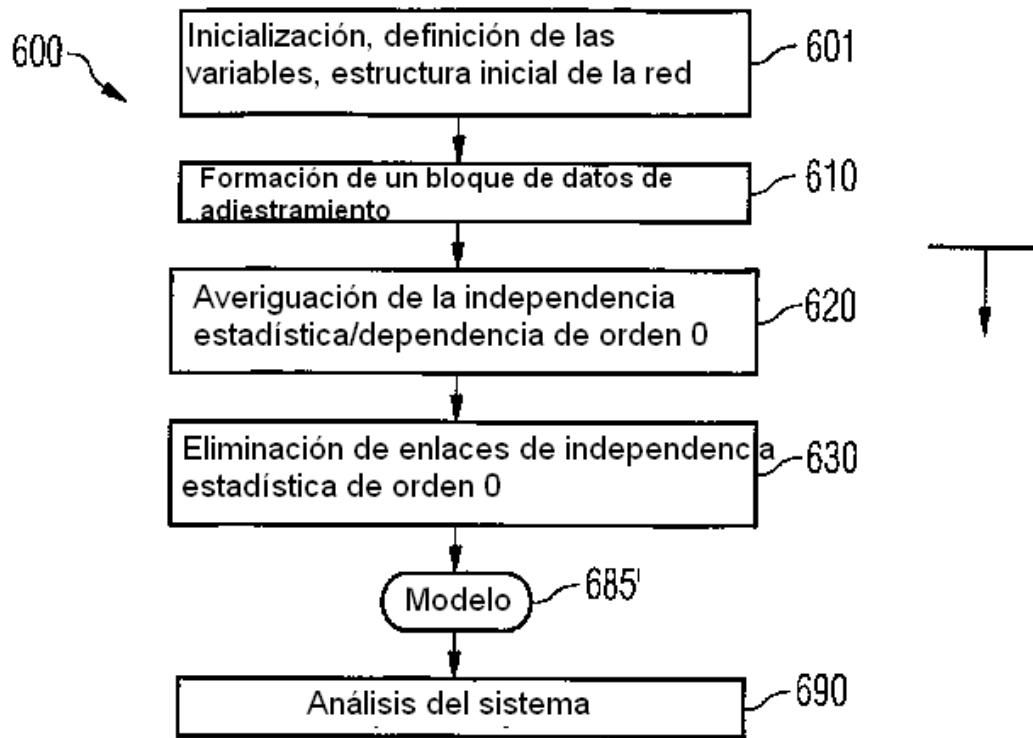


FIG 10

Resultado de los datos de la Planta de Tapada

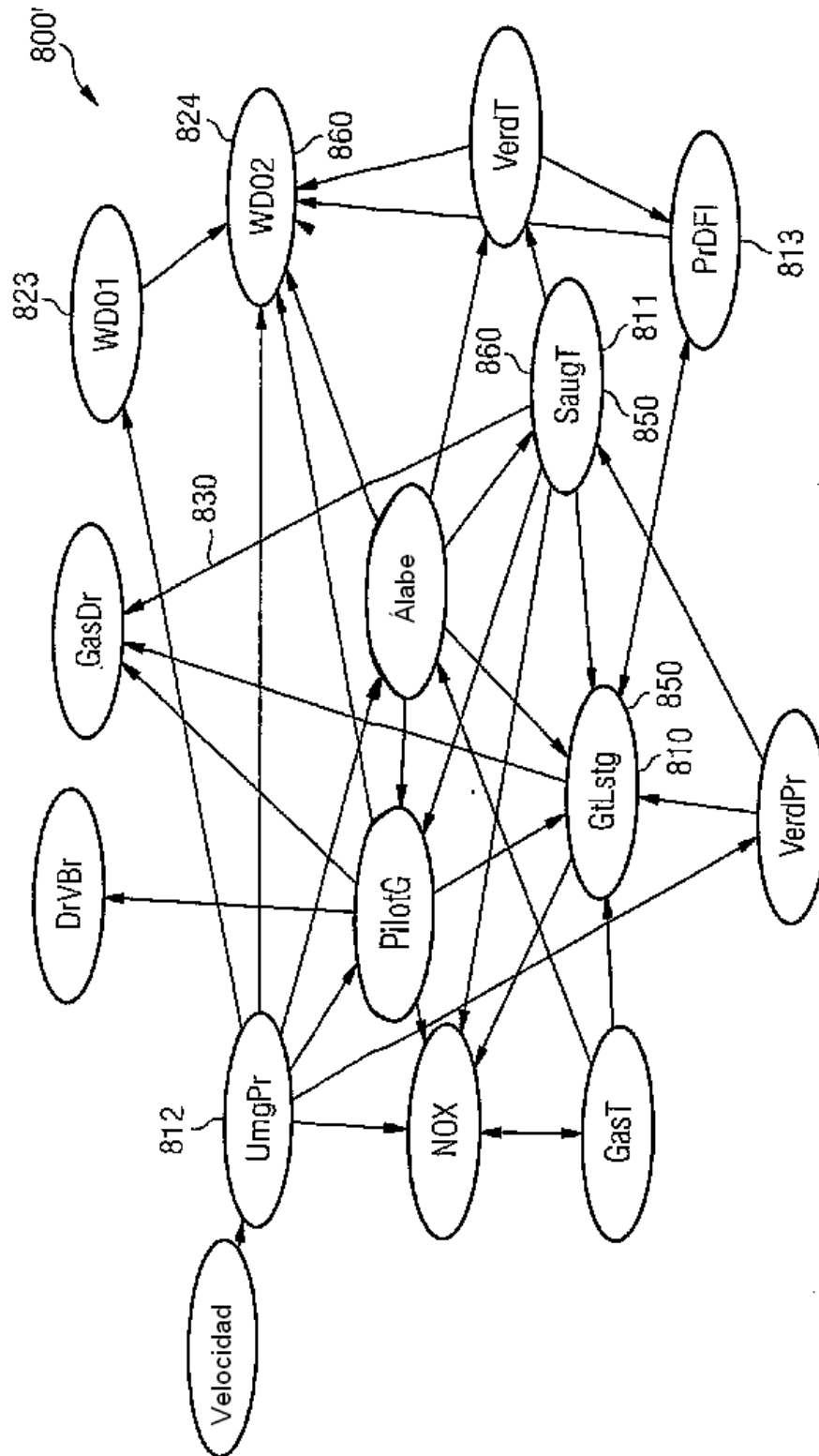


FIG 11

Principio general

senor neural virtual

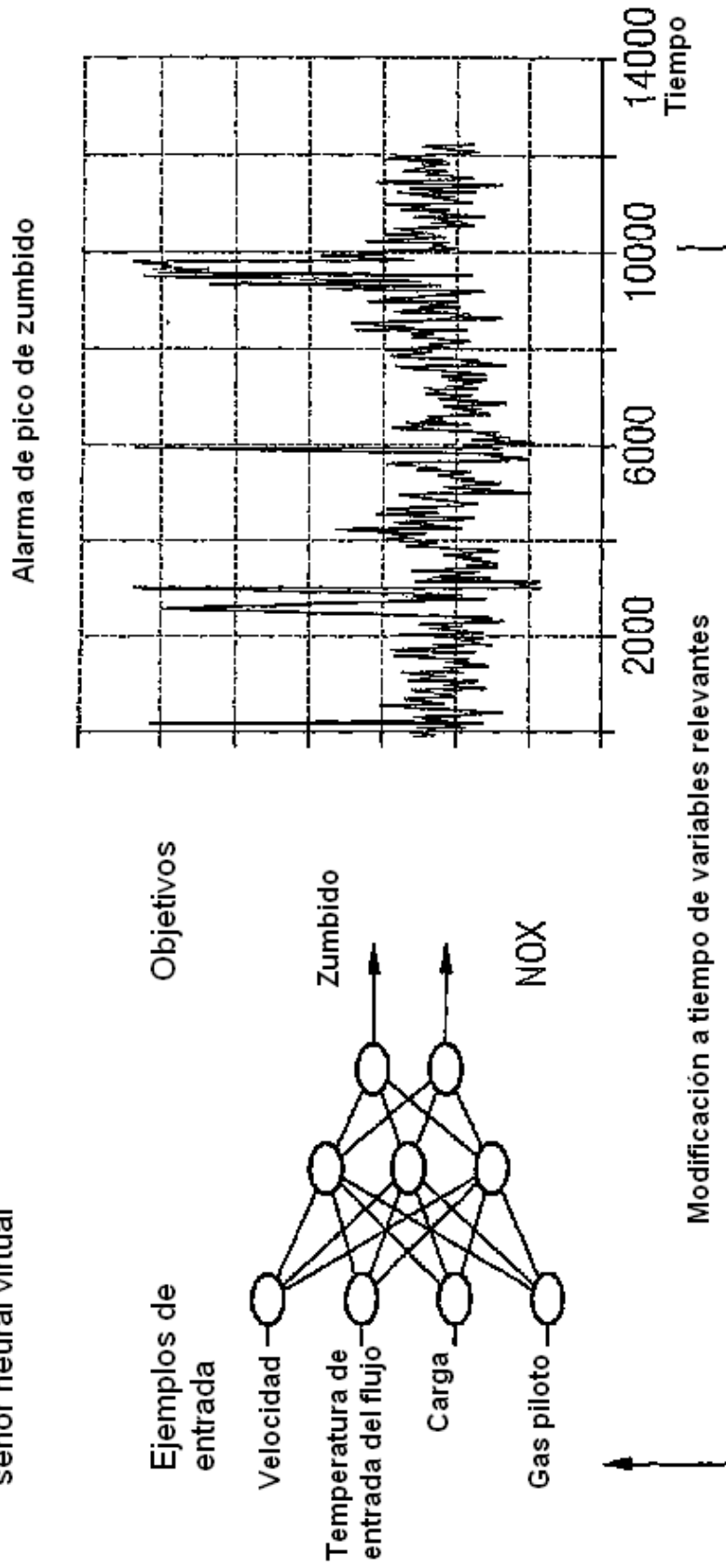


FIG 12

2. La red causal detecta la estructura de dependencia de las variables relevantes

