

19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 383 152**

51 Int. Cl.:

**H04J 3/06** (2006.01)

**G05B 19/042** (2006.01)

12

### TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Número de solicitud europea: **09809328 .9**

96 Fecha de presentación: **24.08.2009**

97 Número de publicación de la solicitud: **2316179**

97 Fecha de publicación de la solicitud: **04.05.2011**

54 Título: **Sincronización de tiempos en sistemas de control o automatización de procesos industriales**

30 Prioridad:  
**29.08.2008 EP 08163244**

45 Fecha de publicación de la mención BOPI:  
**18.06.2012**

45 Fecha de la publicación del folleto de la patente:  
**18.06.2012**

73 Titular/es:  
**ABB Research Ltd.  
Affolternstrasse 44  
8050 Zürich, CH**

72 Inventor/es:  
**TOURNIER, Jean-Charles y  
WERNER, Thomas**

74 Agente/Representante:  
**Ungría López, Javier**

ES 2 383 152 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

Sincronización de tiempos en sistemas de control o automatización de procesos industriales

5 **Campo de la invención**

La invención se refiere al campo de la sincronización de tiempos de una pluralidad de dispositivos de un sistema de control o automatización de procesos industriales y, en particular, de sistemas de Automatización de Subestaciones de una subestación del sistema de transmisión de energía eléctrica.

10

**Antecedentes de la invención**

La subestaciones en las redes eléctricas de alta y media tensión incluyen dispositivos primarios tales como cables eléctricos, líneas, embarrados, interruptores, transformadores de potencia y transformadores de medida, que se disponen en general en parques de maniobra y/o calles. Estos dispositivos primarios se accionan en una forma automatizada a través de un sistema de Automatización de Subestaciones (SA, del inglés "Substation Automation"). El sistema de SA comprende dispositivos secundarios, denominados dispositivos electrónicos inteligentes (IED, del inglés "Intelligent Electronic Devices"), responsables de la protección, control y supervisión de los dispositivos primarios. Los IED pueden estar asignados a niveles jerárquicos, por ejemplo al nivel de estación, al nivel de calle, y al nivel de proceso, siendo este último separado del nivel de calle por la denominada interfaz de proceso. El nivel de estación del sistema de SA incluye una estación de trabajo del operador (OWS, del inglés "Operator Work Station") con una interfaz hombre máquina (HMI, del inglés "Human-Machine Interface") y una pasarela al centro de control de la red (NCC, del inglés "Network Control Centre"). Los IED en el nivel de calle, también se denominan unidades de calle, a su vez se conectan entre sí así como a los IED del nivel de estación a través de un bus entre calles o de estación que sirve principalmente al propósito de intercambiar órdenes e información de estado. Los IED en el nivel de proceso comprenden sensores electrónicos de la tensión (VT), intensidad (CT) y mediciones de densidad de gas, sondas de contacto para la detección de las posiciones de interruptores y del cambiador de tomas del transformador y/o actuadores inteligentes (I/O) para el control de los conmutadores tales como interruptores o seccionadores.

Generalmente, el reloj local interno de un IED de estación puede presentar una deriva de hasta 0,1 ms por segundo, mientras que para un PC con un reloj de calidad media, una deriva de 0,015 ms por segundo es normal. Sin embargo, para el propósito de sincronización con otros datos internos, el muestreo de señales analógicas por el convertidor Analógico a Digital (AD) de un IED tal como unos transformadores del intensidad y tensión no convencionales que tengan una salida digital, las unidades de mezcla dedicada, o las unidades de calle, requieren un marcado de tiempos correcto. Para este fin, los IED como clientes o esclavos del reloj intercambian periódicamente mensajes con un reloj servidor o maestro conectado a la red de comunicación del sistema de SA para evaluar la desviación relativa y deriva de su reloj local. La norma de protocolos de sincronización de tiempos bidireccional tal como la IEEE 1588 (norma IEEE 1588-2002, Norma IEEE de Precision Clock Synchronization Protocol for Networked Measurement and Control Systems) define métodos para dispositivos de sincronización a través de la red de comunicaciones tales como una Red de Área Local (LAN), de una alta precisión (superior a un microsegundo).

Desde un punto de vista de la sincronización de tiempos, un sistema de SA típico tiene la siguiente arquitectura tal como se representa en la Fig. 1. Se recibe una señal GPS por parte de un dispositivo de red, denominado el gran reloj maestro, dentro del sistema de SA. El gran reloj maestro transmite el tiempo GPS usando el protocolo IEEE 1588 a los dispositivos (principalmente IED pero también los PC de la estación, pasarelas, registradores de transitorios de faltas) conectados a la red a través de TCP/IP.

En la arquitectura descrita, la señal GPS y su parte receptora representa un único punto de fallo dado que la pérdida del GPS significa que el gran reloj maestro está funcionando con su propio reloj, local que es de una menor precisión que el reloj GPS. Como ejemplo, las consecuencias de los vientos solares, perturbaciones atmosféricas o tormentas que inciden en la antena GPS pueden provocar la pérdida del tiempo correcto. De la misma manera, el aislamiento temporal, por razones políticas, de seguridad de los sistemas de información o mantenimiento, del sistema de SA mediante la desconexión deliberada de una Red de Área Grande puede provocar que el gran reloj maestro funcione aislado. Como consecuencia, la desincronización de sistemas de SA distantes geográficamente puede convertir las funciones de protección diferencial en inoperativas.

Convencionalmente, en el caso de un fallo transitorio de la señal GPS, se elegirá un nuevo reloj maestro, denominado *maestro transitorio*, entre los dispositivos y propagará su propio tiempo en la red. Debido a las condiciones medioambientales (por ejemplo temperatura y presión) o imperfecciones del hardware (por ejemplo calidad del cuarzo), el reloj maestro transitorio derivará respecto al reloj GPS. Una vez que vuelve la señal GPS y el gran reloj maestro toma de nuevo el control, aparecerá una desviación entre el tiempo enviado por el GPS y el presente en la red. Esto puede conducir a una situación en la que todos los dispositivos tengan que pasar a través de una etapa de resincronización. Una etapa de resincronización implica una interrupción de las funciones de control y protección en ejecución en los dispositivos, así como un cambio abrupto del tiempo base de los dispositivos que a su vez puede conducir a un defecto de funcionamiento de los algoritmos de protección que dependen de los valores

instantáneos de los datos con tiempos marcados.

El documento US 4602375 se interesa en un sistema de corrección de reloj de satélite a bordo del tipo en el que se determinan los errores de fase entre el reloj de satélite y el reloj basado en tierra y se envía un valor de corrección del reloj al satélite. El valor de corrección del reloj se determina mediante un ajuste de curvas de los errores de fase determinados de acuerdo con una función polinómica, actualizando los coeficientes de la función polinómica de modo que se minimice la discrepancia entre los errores de fase determinados y aquellos de acuerdo con la función polinómica, y prediciendo una deriva del reloj de acuerdo con la función polinómica y calculando un valor de corrección de error de acuerdo con la deriva de reloj predicha.

El documento US 2001/0021196 describe un primer usuario que transmite unos primeros mensajes de referencia con una información de una primera base de tiempos a través de un bus (TTCAN) a un segundo usuario y el segundo usuario actúa como un temporizador si la información del primer usuario no ha llegado al segundo usuario antes de la expiración de una marca de tiempos. El segundo usuario puede transmitir su visión de un tiempo global, que se determina en base a una desviación constante supuesta.

El documento US 6157957 describe un método de sincronización de reloj para la conversión de un tiempo de nodo local en una base de tiempos maestra, mediante el intercambio de información de tiempos, registro de una secuencia de datos de tiempos y cálculo de una función de conversión local a maestra en base a los datos de tiempos.

### Descripción de la invención

Es un objetivo de la invención mejorar la disponibilidad de las funciones de protección y control de tiempo crítico configuradas en dispositivos de un sistema de control o automatización de procesos industriales. Este objetivo se consigue mediante un método de sincronización de tiempos y un sistema de control o automatización de procesos industriales, de acuerdo con las reivindicaciones 1 y 8. Las realizaciones preferidas adicionales son evidentes a partir de las reivindicaciones de la patente dependientes.

De acuerdo con la invención, se proporciona una sincronización de tiempos mejorada entre los dispositivos de un sistema de control o automatización de procesos industriales durante una ausencia temporal de un tiempo de referencia del sistema. Por lo tanto, se evita la interrupción de las funciones de protección y control de tiempo crítico debidas a la resincronización que sigue a la ausencia temporal del tiempo de referencia del sistema y se incrementa la disponibilidad de las funciones de tiempo crítico configuradas en los dispositivos. Durante el funcionamiento normal, un dispositivo del sistema registra o almacena una desviación o discrepancia entre el tiempo de referencia del sistema y un reloj interno del dispositivo. Tan pronto como el tiempo de referencia del sistema se interrumpe, el dispositivo comienza a predecir la desviación o deriva entre su reloj local y el tiempo de referencia del sistema, no disponible, en base a la desviación registrada. Como un reloj maestro transitorio, el dispositivo distribuye entonces un tiempo de referencia del sistema aproximado o transitorio, en base al reloj local del dispositivo corregido por la desviación predicha, a los otros dispositivos del sistema que a su vez ejecutan unas funciones de protección y control de tiempo crítico. De acuerdo con la invención, se implementen diferentes técnicas o algoritmos para la predicción de la desviación. Dependiendo de la duración del período de interrupción, es decir la duración de la ausencia o indisponibilidad del tiempo de referencia del sistema, la predicción de la desviación reierte a una primera o a una segunda técnica de predicción de la desviación. El método mantenido para la predicción de la desviación es un compromiso entre la precisión requerida y proporcionada así como la capacidad y tiempo de procesamiento disponible.

El tiempo de referencia del sistema se propaga de modo más conveniente a los dispositivos del sistema mediante el intercambio de mensajes de sincronización de tiempos entre un dispositivo de reloj maestro y dispositivos esclavos de acuerdo con la IEEE 1588. El dispositivo de reloj maestro a su vez se adapta para recibir una señal del Sistema de Posicionamiento Global (GPS) que comprende un tiempo de referencia global. Por lo tanto la invención maneja la pérdida temporal de la señal GPS (por ejemplo en el caso de vientos solares o perturbaciones atmosféricas) que produzcan una corta interrupción del orden de segundos a minutos, la pérdida del receptor de la antena GPS (por ejemplo que la antena sea alcanzada por una tormenta) y la pérdida del dispositivo del reloj maestro (por ejemplo un fallo de hardware), requiriendo las estas dos últimas la intervención humana y/o la sustitución de repuestos en una escala de tiempos más larga de minutos a horas. La pérdida de una señal y/o antena de GPS debido a las exposiciones a un medio ambiente desfavorable y/o tiempos de envío largos para el personal de mantenimiento son particularmente cruciales en subestaciones localizadas remotamente de un sistema de transmisión de energía eléctrica.

En realizaciones ventajosas de la invención, se puede anticipar la duración de la interrupción si se puede determinar la clase de esa indisponibilidad del tiempo de referencia del sistema (por ejemplo pérdida de la señal GPS, antena, o dispositivo de reloj maestro). Sin embargo, en caso de que esto último no sea posible y/o para evitar innecesariamente predicciones de desviación precisas durante cortas interrupciones, se determina inicialmente un tiempo de referencia del sistema transitorio de acuerdo con la primera técnica. En caso de que la interrupción aún persista después de una cierta cantidad de tiempo, el tiempo de referencia del sistema transitorio se determina

posteriormente de acuerdo con la segunda técnica, que puede ser más cara desde el punto de vista de capacidad de cálculo y/o más lenta en el intercambio para una predicción a largo plazo fiable. El primer dispositivo de reloj maestro transitorio que distribuye los primeros mensajes de sincronización de tiempos en base a la primera técnica puede o no ser idéntico al segundo dispositivo de reloj maestro transitorio que implementa la segunda técnica de predicción.

Preferiblemente, los dispositivos que actúan potencialmente como un reloj maestro transitorio pueden dedicar suficiente capacidad de procesamiento para almacenar un histórico de la desviación registrada durante un período de varias horas y calcular una predicción de la deriva en base a ello. Esto es verdad ciertamente para el dispositivo de reloj maestro que, en caso de pérdida de la señal y/o la antena GPS, puede por sí mismo actuar como un reloj maestro transitorio basándose en su reloj o local. Por otro lado, y para prepararse para el caso de un fallo en el dispositivo de reloj maestro, varios si no todos los dispositivos esclavos que en funcionamiento normal se basan en este último, pueden registrar individualmente un histórico de la desviación o deriva y calcular una previsión de la desviación de acuerdo con una única o con un número de técnicas de predicción. De entre estos dispositivos, se elige uno como reloj maestro transitorio de acuerdo con la calidad de los relojes locales en los dispositivos esclavos o de acuerdo con la clase de indisponibilidad del tiempo de referencia del sistema.

En una variante adicionalmente preferida de la invención, el dispositivo también registra las magnitudes atmosféricas tales como la temperatura y/o presión ambiente mientras registra la desviación. Siendo la temperatura uno de los factores principales para la desviación del cuarzo, la inclusión de la información de temperatura registrada en la evaluación del histórico de desviación y la consulta de una previsión de temperatura en la predicción de la desviación, mejora adicionalmente la calidad del tiempo de referencia del sistema transitorio.

En breve, la invención reduce e idealmente evita la desviación entre el reloj GPS y el tiempo conocido en un sistema de Automatización de Subestaciones (SA) mientras no esté disponible una señal GPS o el gran reloj maestro. El protocolo se puede auto configurar lo que permite añadir o eliminar dinámicamente cualquiera de los dispositivos participantes (tanto maestros como esclavos) mediante la elección del mejor reloj disponible en tiempo de ejecución. Esto permite una reintegración suave del reloj GPS en el sistema después de un marco de tiempo razonable que no supere el orden de 48 horas. La invención mejora la fiabilidad del protocolo IEEE 1588 sin modificar el protocolo en sí y sin que requiera que todos y cada uno de los dispositivos electrónicos inteligentes (IED) del sistema de SA participen. Finalmente, no se requiere tampoco una duplicación del hardware con vistas a una implementación o arquitectura de la IEEE 1588 tolerante a fallos.

### Breve descripción de los dibujos

La materia objeto de la invención se explicará con más detalle en el texto a continuación con referencia a las realizaciones de ejemplo preferidas que se ilustran en los dibujos adjuntos, en los que:

la Fig. 1 muestra un extracto de un sistema de Automatización de Subestaciones (SA),  
la Fig. 2 representa una desviación final para tres técnicas de predicción de desviación diferentes y  
la Fig. 3 representa los tiempos de procesamiento correspondientes.

Los símbolos de referencia usados en los dibujos, y sus significados, se listan en forma de resumen en la lista de símbolos de referencia. En principio, las partes idénticas están provistas con los mismos símbolos de referencia en las figuras.

### Descripción detallada de realizaciones preferidas

La Fig. 1 muestra un extracto del sistema de Automatización de Subestaciones (SA) para una subestación de un sistema de transmisión de energía eléctrica como un ejemplo de un sistema de control o automatización de procesos industriales. El sistema de SA comprende una red de comunicaciones 1, es decir un bus de estación o un bus de proceso que se extiende más allá de una única calle y tres dispositivos electrónicos inteligentes (IED) o unidades de calle 10, 20, 30 como dispositivos de red de ejemplo que ejecutan las funciones de protección y control por parte de una calle de la subestación (no mostrada). Un dispositivo de reloj maestro 2 o receptor GPS proporciona, por ejemplo a través de protocolos basados en Ethernet tales como el IEEE 1588, un tiempo de referencia del sistema a los IED y de ese modo asegura una sincronización de tiempos de las funciones de protección y control configuradas en los IED.

En el contexto de la presente invención, se consideran dos configuraciones diferentes: (a) la configuración normal en la que la señal GPS se recibe y propaga al sistema de SA; y (b) la configuración en falta, en la que la señal GPS se pierde o el ordenador del reloj maestro está caído o desconectado de la red de comunicaciones. La suposición principal de la invención es que la falta es transitoria, es decir después de un tiempo finito el sistema de SA volverá a la configuración normal. La vuelta desde una configuración de defecto a una normal puede suceder debido a la desaparición de la configuración de defecto (por ejemplo la vuelta de la señal GPS) o mediante un servicio manual que intercambia/repára los componentes defectuosos.

Durante la configuración normal, uno o varios de los dispositivos conectados que incluyen el gran reloj maestro registran su desviación a lo largo de varias horas o días. Una vez que se elige un nuevo dispositivo como maestro transitorio en la configuración de fallo, éste realiza las tareas normales llevadas a cabo por cualquier maestro de IEEE 1588, incluyendo específicamente la distribución de mensajes de sincronización de tiempos a través de la red. Sin embargo, el maestro transitorio, siempre que lee su propio tiempo local desde el reloj interno del dispositivo, estimará una desviación respecto al reloj GPS actualmente no disponible y corregirá en consecuencia la señal de tiempo que se distribuye a los esclavos.

La estimación de la desviación se basa en el histórico de desviación y se puede realizar por medio de un enfoque *estadístico*, bien calculando una desviación media o mediante la identificación de patrones de los datos históricos a través de un análisis de extracción de datos. El patrón es o bien periódico, por ejemplo un perfil durante 24 horas y/o bien relativo a un parámetro medioambiental, por ejemplo la temperatura. Por otro lado, se puede usar un enfoque *probabilístico*, en el que a partir del histórico de los datos se evalúa la probabilidad de cada valor de desviación y se elige el valor más probable. Como con el cálculo de la media estadística, la ventaja de este enfoque es que la predicción se realiza sólo una vez. Como tercera y más precisa alternativa, se propone una predicción de *series de tiempos* que involucra un modelo para prever eventos futuros en base a eventos pasados conocidos. Los detalles sobre el enfoque de las series de tiempos se pueden encontrar en el artículo "Improving Reliability of IEEE1588 in Electric Substation Automation" por Jean-Charles Tournier y Xiao Yin, presentado en el International IEEE Symposium on Precision Clock Synchronization for Measurement, Control and Communication, IEEE ISPCS 2008, Ann Arbor, Michigan, Estados Unidos, septiembre de 2008, XP031354125.

La Fig. 2 representa la evolución de la desviación final  $\theta$  para cada una de las tres técnicas de predicción (series de tiempos, estadística, probabilística) en función del horizonte de predicción. La predicción basada en series de tiempos siempre responde mejor que las otras dos en un factor de 10 (para un horizonte de predicción de 20 segundos) a 100 (para un horizonte de predicción de 28.800 segundos).

La Fig. 3 representa la evolución del tiempo de procesamiento requerido para las tres técnicas de predicción (series de tiempos, estadística, probabilística) en función del horizonte de predicción. Los tiempos de procesamiento notificados se cimentan en un entorno de simulación específico y son solamente indicativos de los requisitos de capacidad de cálculo relativos para cada técnica. El enfoque con base estadística requiere baja capacidad de cálculo comparada con los otros dos enfoques. Más aún, esta técnica de predicción es casi insensible a la duración del horizonte de predicción. Por otro lado, el enfoque basado en series de tiempos es intensivo en capacidad de cálculo y altamente influenciado por la duración de la predicción. El enfoque con base probabilística tiene un perfil de tiempo de cálculo similar al de las series de tiempos pero con valores inferiores.

A partir de los resultados anteriores, son adecuadas diferentes técnicas de predicción dependiendo de la clase de desconexión del GPS:

- En el caso de una corta desconexión, es decir del orden de un par de segundos (por ejemplo perturbaciones atmosféricas), un enfoque con base estadística da una precisión suficientemente buena (menor de 20  $\mu$ s) para las funciones de protección con un coste de capacidad de cálculo bajo.
- Por otro lado, en el caso de una desconexión larga, es decir del orden de un par de horas (por ejemplo por pérdida de la antena de GPS u operaciones de mantenimiento), es más adecuada una predicción basada en series de tiempos. Sin embargo, esta clase de predicción no se puede ejecutar en cualquier dispositivo y ha de estar soportada por un ordenador suficientemente potente.
- En el caso de una desconexión media del orden de un par de minutos, la técnica de predicción probabilística es una alternativa interesante a los otros dos enfoques de predicción dado que los resultados son aún aceptables para algunas funciones de protección pero a un precio de capacidad de cálculo inferior que con la técnica basada en series de tiempos.

**Lista de designaciones**

- 1 red de comunicaciones
- 2 dispositivo de reloj maestro
- 10, 20, 30 dispositivos de red

**REIVINDICACIONES**

5 1. Método de sincronización de tiempos de una pluralidad de dispositivos (2, 10, 20, 30) de un sistema de control o automatización de procesos industriales interconectados a través de una red de comunicación (1), en el que un dispositivo de reloj maestro (2) distribuye mensajes de sincronización de tiempos que comprenden un tiempo de referencia del sistema a través de una red de comunicaciones a los dispositivos esclavos (10, 20, 30), que comprende

- 10 - registro, mediante un dispositivo del sistema, de un histórico de desviación entre el tiempo de referencia del sistema y un reloj local en el dispositivo,  
 - deducción, por el dispositivo, de una previsión de desviación en base al histórico de desviación registrado,  
 - cálculo, por el dispositivo y tras la interrupción del tiempo de referencia del sistema, de un tiempo de referencia del sistema transitorio en base al reloj local y a la previsión de desviación y  
 15 - distribución, por el dispositivo, de mensajes de sincronización de tiempos que incluyen el tiempo de referencia del sistema transitorio a los otros dispositivos del sistema,

**caracterizado por que** el método comprende

- 20 - la deducción de una primera previsión de desviación de acuerdo con una primera técnica de predicción para una primera duración de la interrupción y una segunda previsión de desviación de acuerdo con una segunda técnica de predicción para una segunda duración de interrupción que exceda a la primera duración de interrupción.

25 2. El método de acuerdo con la reivindicación 1, que comprende

- el registro, por una pluralidad de dispositivos esclavos del sistema, de desviaciones individuales entre el tiempo de referencia del sistema y los relojes locales en los dispositivos esclavos y  
 - la selección de un reloj maestro transitorio de entre los dispositivos esclavos que realizan el registro.

30 3. El método de acuerdo con la reivindicación 1, que comprende

- la medición y registro de una magnitud atmosférica junto con la desviación y  
 - la deducción de la previsión de desviación en base a una predicción de la magnitud atmosférica.

35 4. El método de acuerdo con una de las reivindicaciones 1 a 3, en el que la primera técnica de predicción se basa en un enfoque estadístico y en el que la segunda técnica de predicción se basa en un enfoque de series de tiempos.

40 5. El método de acuerdo con una de las reivindicaciones 1 a 3, en el que el sistema de automatización es un sistema de Automatización de Subestaciones SA de una subestación de un sistema de transmisión de energía eléctrica.

45 6. Un sistema de control o automatización de procesos industriales con una pluralidad de dispositivos (2, 10, 20, 30) interconectados a través de una red de comunicación (1), en el que un dispositivo de reloj maestro (2) distribuye mensajes de sincronización de tiempos que comprenden un tiempo de referencia del sistema a través de la red de comunicaciones a los dispositivos esclavos (10, 20, 30), y estando uno o más de los dispositivos (2, 10, 20, 30) del sistema adaptado para

- 50 - registrar un histórico de desviación entre el tiempo de referencia del sistema y un reloj del dispositivo local,  
 - deducir una primera y una segunda previsión de desviación en base al histórico de desviación registrado y de acuerdo con una primera técnica de predicción para una primera duración de la interrupción y de acuerdo con una segunda técnica de predicción para una segunda duración de la interrupción que exceda a la primera duración de la interrupción, respectivamente,  
 - calcular, tras la interrupción del tiempo de referencia del sistema, de un tiempo de referencia del sistema transitorio en base al reloj del dispositivo local y a una previsión de desviación y  
 55 - distribuir mensajes de sincronización de tiempos que incluyen el tiempo de referencia del sistema transitorio a los otros dispositivos del sistema,

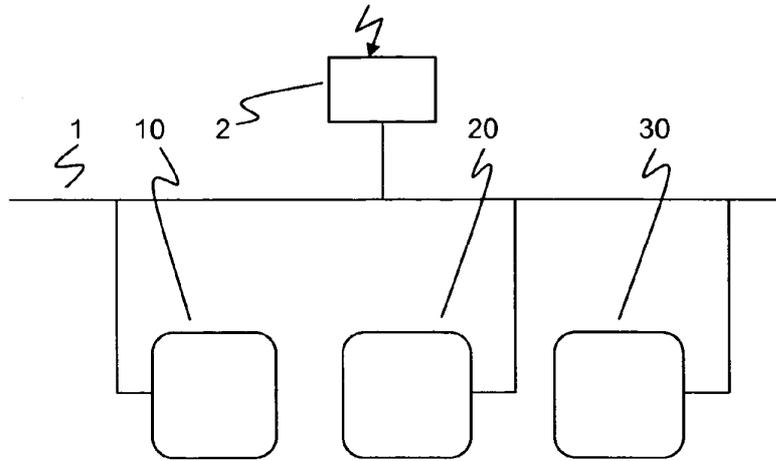


Fig. 1

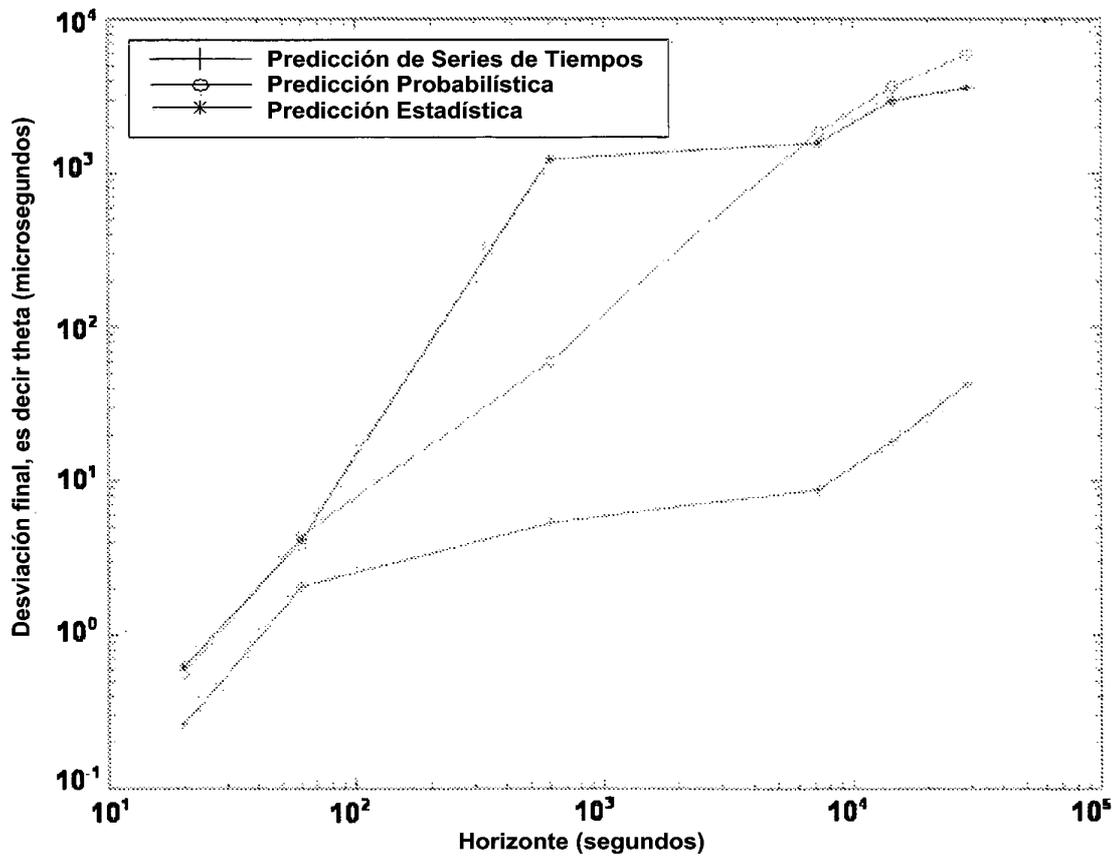


Fig. 2

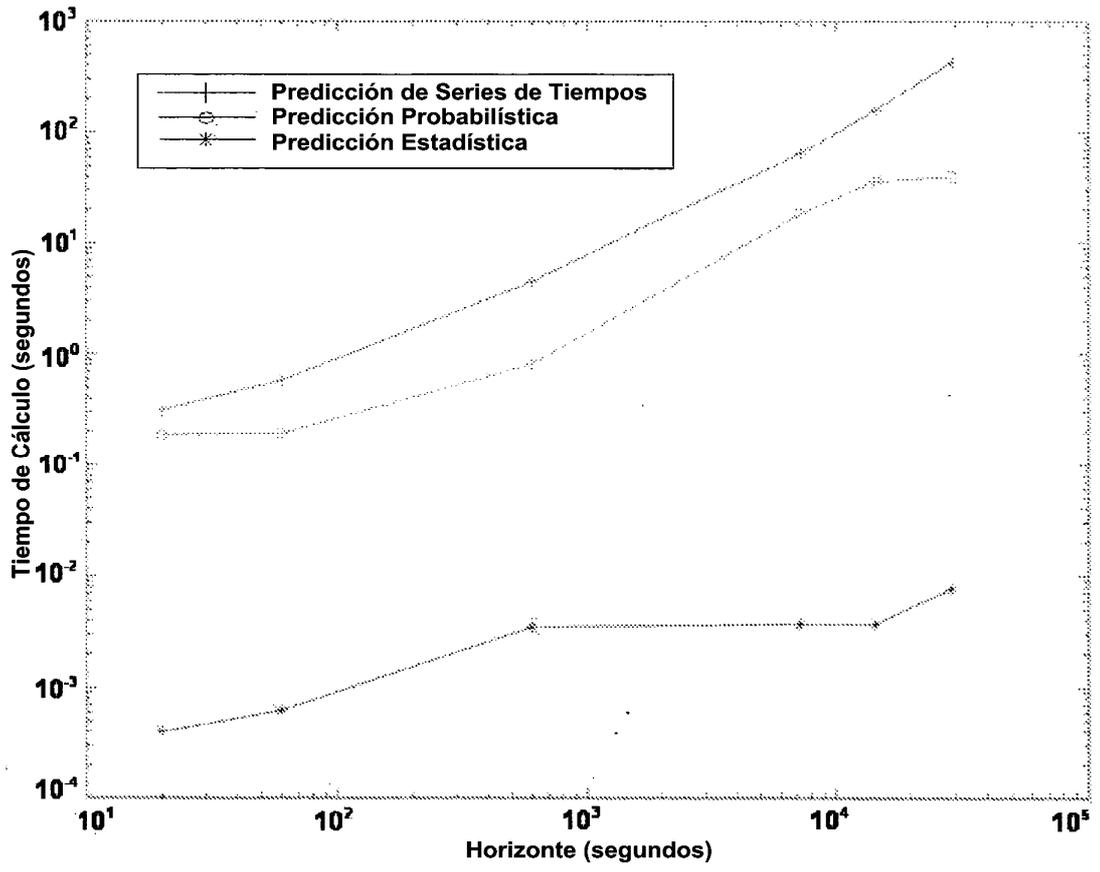


Fig. 3