

MÉTODO Y APARATO PARA LA GESTIÓN DEL METANO

REFERENCIA CRUZADA CON SOLICITUD RELACIONADA

[0001] La presente solicitud reivindica la prioridad y el beneficio de la solicitud provisional estadounidense con el número de serie 63/265,122, titulada «MÉTODO Y APARATO PARA LA GESTIÓN DEL METANO», presentada el 8 de diciembre de 2021, que se incorpora a la presente mediante referencia en su totalidad.

ANTECEDENTES

[0002] La presente descripción se refiere en general al monitoreo de emisiones de gases de efecto invernadero y, más particularmente, a un método y aparato para realizar la gestión de fugas de metano, incluida la colocación de sensores de gas y/o la detección de fugas de metano para instalaciones de producción de petróleo y gas.

[0003] Se pretende que esta sección presente al lector diversos aspectos de la técnica que pueden estar relacionados con diversos aspectos de las técnicas del presente documento, que se describirán y/o reivindicarán más adelante. Se cree que este análisis es útil para proporcionarle información al lector sobre los antecedentes para facilitar una mejor comprensión de los diversos aspectos de la presente descripción. En consecuencia, debe entenderse que estas declaraciones deben leerse desde esta perspectiva y no como admisiones de ningún tipo.

[0004] El metano es un gas de efecto invernadero relativamente potente y el principal componente del gas natural. El proceso de extracción y procesamiento del gas natural genera inevitablemente algunas emisiones de metano, y esas emisiones conducen al calentamiento global, lo que contribuye significativamente al cambio climático. Como tal, los operadores de petróleo y gas downstream/midstream están interesados en reducir las emisiones de metano de sus instalaciones. Tales emisiones surgen de una variedad de instalaciones (p. ej., pozos individuales a plantas de gas), fuentes (p. ej., ventilaciones intencionales a fugas fugitiva no intencionales) y equipos (p. ej., tanques, compresores, separadores, controladores neumáticos, etc.). Por lo tanto, las emisiones de metano se pueden reducir mediante una variedad de tecnologías que incluyen detección de fugas, reparación de fugas, eliminación de ventilación y gestión de datos. De hecho, las tecnologías de hardware para el monitoreo de fugas incluyen imágenes ópticas de gas (OGI, por sus siglas en inglés), medición de sensores y algunas técnicas novedosas recientes. La imagen óptica de gas (OGI) es una tecnología de imágenes térmicas que utiliza cámaras infrarrojas de alta sensibilidad para detectar emisiones fugitivas de gases y se ha convertido en el método de detección recomendado por la Agencia de Protección Ambiental (EPA, por sus siglas en inglés). El

desempeño de la cámara OGI puede depender de las tasas de emisión, las condiciones ambientales y otros factores, como el diseño, el ajuste y los protocolos de uso del sistema. Los sensores de gas son dispositivos que miden la concentración de un determinado gas en una sola ubicación colocada cerca del lugar de la fuga. Algunas técnicas novedosas recientes pueden incluir la inspección automática de instalaciones utilizando robots o drones o similares. Esto puede reducir el costo de mano de obra a largo plazo y puede presentar ventajas para escenarios que son difíciles de monitorear (DTM, por sus siglas en inglés) o inseguros de monitorear (UTM, por sus siglas en inglés).

[0005] Hay muchos sensores, cámaras y tecnologías novedosas en el mercado comercial, y cada uno puede tener ventajas y desventajas en términos de rango de detección, precisión y costo. Sin embargo, además de las tecnologías de hardware, la planificación de la ubicación de los sensores sigue siendo un problema sin resolver. Para monitorear las fugas de gas en un área grande o en una instalación completa, la simple instalación de los sensores de gas sin ningún plan para optimizar su implementación resultará en un gasto de capital excesivo, sin garantías de que la implementación proporcione los resultados o retornos deseados. Si bien puede ser útil un estudio del sitio para planificar la implementación de sensores, esto es costoso y no es fácil de realizar, especialmente porque no se pueden determinar múltiples factores utilizando un solo estudio del sitio, como las condiciones del viento (que varían constantemente) y el estado actual de las fugas de gas.

[0006] Es necesario proporcionar una solución sistemática, basada en modelos numéricos, para planificar la ubicación de los sensores de detección de fugas de gases de efecto invernadero de manera óptima, de modo que el plan cubra tantas fuentes potenciales de fugas en una instalación como sea posible manteniendo el presupuesto económico.

COMPENDIO

[0007] A continuación, se indicará un compendio de determinadas modalidades descritas en la presente. Debe entenderse que estos aspectos se presentan simplemente para proporcionar al lector un breve compendio de estas determinadas modalidades y que no se pretende que estos aspectos limiten el alcance de la presente descripción.

[0008] En una modalidad, un sistema de análisis de emisiones de gases de efecto invernadero (GGEA, por sus siglas en inglés) incluye al menos una memoria configurada para almacenar un modelo de penacho y al menos un procesador configurado para ejecutar instrucciones almacenadas para realizar acciones. Las acciones incluyen recibir mediciones de concentración de gas de sensores de gas acoplados comunicativamente al sistema de GGEA y recibir mediciones de viento de sensores de viento acoplados

comunicativamente al sistema de GGEA. Las acciones incluyen convertir las mediciones de concentración de gas y de viento en registros de eventos válidos y prever la ubicación y la tasa de fuga de una fuga de gas dentro de un lugar de trabajo en función, al menos en parte, de los registros de eventos válidos y el modelo de penacho.

5 **[0009]** En una modalidad, un método para prever una ubicación y tasa de fuga de una fuga de gas dentro de un lugar de trabajo incluye recibir mediciones de concentración de gas de sensores de gas dispuestos dentro del lugar de trabajo y recibir mediciones de viento de sensores de viento dispuestos dentro del lugar de trabajo. El método incluye convertir las mediciones de concentración de gas y de viento en registros de eventos válidos y prever la ubicación y la tasa de fuga de gas dentro del lugar de trabajo
10 en función, al menos en parte, de los registros de eventos válidos y un modelo de penacho.

[0010] En una modalidad, un método incluye usar datos meteorológicos históricos para generar un modelo estocástico de viento para el lugar de trabajo durante un período de tiempo de pronóstico de interés y segmentar el modelo estocástico de viento en períodos de tiempo para generar un programa de viento, en donde cada período de tiempo del programa de viento incluye al menos una velocidad y una dirección
15 del viento. El método incluye crear un programa de prueba que tiene un conjunto de casos de prueba, en donde cada caso de prueba define una ubicación de fuga de gas y una tasa de fuga de gas. El método incluye generar una disposición de sensores de gas que tiene varios sensores de gas y ubicaciones para cada uno de los sensores de gas dentro del lugar de trabajo. El método incluye proporcionar, como entradas a un modelo de penacho, al menos las ubicaciones de cada uno de los sensores de gas, la ubicación de la
20 fuga de gas y la tasa de fuga de gas de cada caso de prueba del programa de pruebas, y la velocidad del viento y la dirección del viento de cada período de tiempo del programa de viento, y recibir, como resultado del modelo de penacho, mediciones de concentración de gas previstas de cada uno de los sensores de gas durante cada período de tiempo del programa de viento para cada caso de prueba del programa de prueba. El método incluye construir un perfil de medición de cada uno de los sensores de gas
25 durante el período de tiempo de pronóstico de interés en función de las mediciones de concentración de gas previstas de cada uno de los sensores de gas, y usar el modelo de penacho para determinar una ubicación de fuga de gas prevista y una tasa de fuga de gas prevista para cada caso de prueba del programa de prueba en función, al menos en parte, del perfil de medición de cada uno de los sensores de gas, las ubicaciones de cada uno de los sensores de gas y el modelo estocástico de viento. El método incluye
30 evaluar la disposición del sensor de gas en función de la ubicación de la fuga de gas prevista y la tasa de fuga de gas prevista.

[0011] Determinadas modalidades de la presente descripción incluyen un método y un sistema que comprenden planificar la ubicación de sensores de detección de fugas de gases de efecto invernadero. Determinadas modalidades de la presente descripción incluyen un dispositivo perimetral que es parte de un entorno informático basado en la nube, en el que el dispositivo perimetral comprende un sistema para la gestión de fugas de gases de efecto invernadero configurado para planificar la ubicación de sensores de detección de fugas de gases de efecto invernadero o detectar la fuente y/o la tasa de la fuga de gas. Determinadas modalidades de la presente descripción incluyen un método para la gestión de fugas de gases de efecto invernadero, que comprende el uso de datos en tiempo real de sensores colocados para establecer una fuente de fuga de gas. En modalidades de la descripción, los sensores de detección comprenden un sensor de detección de metano y/o cámaras de imágenes ópticas de gas (OGI).

[0012] Pueden llevarse a cabo diversas mejoras de las características mencionadas anteriormente en relación con diversos aspectos de la presente descripción. También se pueden incorporar características adicionales a estos diversos aspectos. Estas mejoras y características adicionales pueden existir individualmente o en cualquier combinación. Por ejemplo, varias características que se analizan más adelante en relación con una o más de las modalidades ilustradas pueden incorporarse en cualquiera de los aspectos antemencionados de la presente descripción solos o en cualquier combinación. El objetivo del breve compendio presentado anteriormente es familiarizar al lector con determinados aspectos y contextos de las modalidades de la presente descripción sin imponer limitaciones en la materia reivindicada.

BREVE DESCRIPCIÓN DE LAS FIGURAS

[0013] Diversos aspectos de la presente descripción pueden comprenderse mejor a partir de la lectura de la descripción detallada que sigue y a partir de la referencia a las figuras, en las que:

[0014] La Figura 1 ilustra un lugar de trabajo de petróleo y gas de ejemplo que tiene múltiples sensores y un sistema de análisis de emisiones de gases de efecto invernadero (GGEA) que pueden usarse para monitorear las emisiones de gases de efecto invernadero en un lugar de trabajo de petróleo y gas, de acuerdo con modalidades de la presente descripción;

[0015] La Figura 2 ilustra un modelo directo de ejemplo del sistema de GGAE como un modelo de penacho gaussiano, de acuerdo con modalidades de la presente descripción;

[0016] La Figura 3 ilustra la respuesta de modelo directo para una fuga de gas de ejemplo, de acuerdo con modalidades de la presente descripción;

[0017] La Figura 4 ilustra un esquema de datos de ejemplo del sistema de GGAE para la

identificación de la ubicación de la fuente de una fuga de gas, de acuerdo con modalidades de la presente descripción;

[0018] La Figura 5 es un diagrama de flujo que ilustra un proceso mediante el cual el sistema de GGEA recibe y procesa información del sensor en registros de eventos válidos, de acuerdo con modalidades de la presente descripción;

[0019] La Figura 6 ilustra la interrelación de datos de viento y sensores para generar registros de eventos válidos, de acuerdo con modalidades de la presente descripción;

[0020] La Figura 7 representa una representación del dominio del problema en dos dimensiones (2D), de acuerdo con modalidades de la presente descripción;

[0021] La Figura 8 representa una representación del dominio del problema en tres dimensiones (3D), de acuerdo con modalidades de la presente descripción;

[0022] Las Figuras 9, 10 y 11 representan ejemplos de detección de sensor de concentración de gas fijo con diferentes condiciones de viento en diferentes intervalos de tiempo, de acuerdo con modalidades de la presente descripción; y

[0023] La Figura 12 es un diagrama de flujo que ilustra un proceso mediante el cual el sistema de GGEA determina una disposición óptima de sensores de gas para un lugar de trabajo, de acuerdo con modalidades de la presente descripción.

DESCRIPCIÓN DETALLADA

[0024] A continuación, se describirán una o más modalidades específicas de la presente descripción.

Estas modalidades descritas son solamente ejemplos de las técnicas descritas en el presente documento. Además, en un esfuerzo por proporcionar una descripción concisa de estas modalidades, es posible que no se describan algunas características de una implementación real en la memoria descriptiva. Debe tenerse en cuenta que, en el desarrollo de cualquier implementación real, por ejemplo, en cualquier proyecto de ingeniería o diseño, se deben tomar numerosas decisiones específicas de la implementación para lograr los objetivos específicos de los desarrolladores, tales como el cumplimiento de las restricciones relacionadas con el sistema y relacionadas con la actividad comercial, que pueden variar de una implementación a otra. Además, se debe reconocer que dicho intento de desarrollo puede ser complejo y puede llevar tiempo, pero, sin embargo, sería una tarea rutinaria de diseño y fabricación para los expertos en la técnica que se benefician de la presente descripción.

[0001] Cuando se presentan elementos de diversas modalidades de la presente descripción, se pretende que los artículos «un», «una», «el» y «la» signifiquen que existen uno o más de los elementos. Las

expresiones «que comprende», «que incluye» y «que tiene» pretenden ser inclusivas y significan que puede haber elementos adicionales además de los elementos enumerados. Además, se debe comprender que no se pretende que se interprete que las referencias a «una modalidad» de la presente descripción excluyan la existencia de modalidades adicionales que también incorporen las características mencionadas.

[0002] Tal como se usan en la presente, las expresiones «conectar», «conexión», «conectado/a», «en conexión con» y «que conecta/n» se usan para hacer referencia a «en conexión directa con» o «en conexión con, a través de uno o más elementos»; y el término «conjunto» se usa con el significado de «un elemento» o «más de un elemento». Además, los términos «acoplar», «acoplamiento», «acoplado» y «acoplado con» se utilizan para referirse a «acoplado directamente» o «acoplado a través de uno o más elementos».

[0003] Además, tal como se usan en el presente documento, las expresiones «tiempo real», «en tiempo real» o «considerablemente en tiempo real» pueden usarse indistintamente y están destinadas a describir operaciones (p. ej., operaciones informáticas) que se realizan sin ninguna interrupción perceptible por el ser humano entre las operaciones. Por ejemplo, tal como se usan en el presente documento, los datos relacionados con los sistemas descritos en el presente documento pueden recopilarse, transmitirse y/o utilizarse en cálculos de control «considerablemente en tiempo real», de forma tal que las lecturas de datos, las transferencias de datos y/o las etapas de procesamiento de datos se produzcan una vez cada minuto, algunos minutos, segundo, una vez cada 0,1 segundos, una vez cada 0,01 segundos o incluso con mayor frecuencia durante las operaciones de los sistemas (p. ej., mientras los sistemas están funcionando).

Además, como se usan en la presente, los términos «automático» y «automatizado» tienen por objeto describir las operaciones que se llevan a cabo, por ejemplo, mediante un sistema de análisis de emisiones de gases de efecto invernadero (es decir, únicamente mediante el sistema de análisis de emisiones de gases de efecto invernadero, sin intervención humana). Como se usa en el presente documento, un «sensor de gas», un «sensor de concentración de gas», un «sensor de emisión de gas», un «sensor de gas fugado», un «sensor de detección de fuga de gas» y términos relacionados, hacen referencia a un sensor que mide la concentración de un gas fugado de interés dentro de un dominio de interés (por ejemplo, un lugar de trabajo).

[0004] Un aspecto de la presente descripción es permitir la colocación de un sensor de detección de fugas de metano para instalaciones de producción de petróleo y gas. Debido a que el gas emitido se pierde del flujo de producción, y debido a que el metano es un gas de efecto invernadero relativamente potente, las emisiones fugitivas de gas natural son económica y ambientalmente perjudiciales. Los métodos

existentes de detección de emisiones de gas son relativamente caros, ya que generalmente implican una gran cantidad de recursos humanos o una cantidad exorbitante de equipos costosos para detectar fugas de gas. Por lo tanto, es deseable contar con una solución sistemática, basada en modelos numéricos, para planificar la ubicación de los sensores de gas (por ejemplo, sensores de detección de fugas de metano, sensores de detección de fugas de gas de otros tipos) de una manera óptima, de manera que el plan cubra tantas fuentes potenciales de fugas en una instalación como sea posible, manteniendo al mismo tiempo las consideraciones económicas (por ejemplo, costo del sensor, costos de los recursos humanos). Otro aspecto de la presente descripción es permitir la previsión de una ubicación y una tasa de fuga de una fuga de gas dentro de una instalación de producción de petróleo y gas en función de mediciones recopiladas por sensores de fugas de gas dispuestos dentro de la instalación y la información del viento predominante.

[0005] Teniendo en cuenta lo anterior, las presentes modalidades están dirigidas a un sistema de análisis de emisiones de gases de efecto invernadero (GGEA) que incluye al menos un modelo (por ejemplo, un modelo de simulación de penacho), que puede describirse en el presente documento como modelos matemáticos, numéricos y/o implementados por computadora para simular fugas de gas en diversas condiciones de viento. El sistema de GGEA se puede aplicar de diferentes maneras para permitir la gestión de fugas de gas en un lugar de trabajo, como un lugar de trabajo de exploración de petróleo y gas, una instalación de procesamiento de petróleo y gas, una instalación de procesamiento o fabricación de productos químicos, o cualquier otro lugar de trabajo en el que sea deseable la detección y gestión de las emisiones de gases de efecto invernadero. El sistema de GGEA generalmente está diseñado para recibir una serie de entradas y luego ejecutar una simulación o flujo de trabajo en función de el al menos un modelo, para determinar una o más salidas relacionadas con la detección de fugas de gas en función de la simulación. Por ejemplo, en una modalidad, el sistema de GGEA está provisto de una serie de entradas relacionadas con la ubicación y la tasa de fuga de una fuga de gas que se va a simular en el lugar de trabajo, información sobre el viento en el lugar de trabajo y ubicaciones de los sensores de gas dispuestos en el lugar de trabajo, y el sistema de GGEA utiliza estas entradas, en combinación con el al menos un modelo, para generar concentraciones de gas simuladas o esperadas que serían detectadas por cada uno de los sensores de gas en cada una de sus respectivas ubicaciones como resultado de la fuga de gas simulada. En otra modalidad, el sistema de GGEA está provisto de una serie de entradas relacionadas con ubicaciones de sensores de gas dispuestos en el lugar de trabajo, mediciones de detección de gas recopiladas por cada uno de estos sensores de gas e información sobre el viento en el lugar de trabajo y el sistema de análisis de emisiones de gases de efecto invernadero utiliza estas entradas, en combinación con el al menos un

modelo, para generar una ubicación prevista y una tasa de fuga de una fuga de gas en el lugar de trabajo. Además, en determinadas modalidades, el sistema de GGEA puede utilizar el al menos un modelo para determinar la ubicación óptima del sensor de gas para una detección efectiva de emisiones de gases de efecto invernadero en el lugar de trabajo.

- 5 **[0006]** La Figura 1 ilustra un lugar de trabajo de petróleo y gas 10 de ejemplo que incluye múltiples sensores 12 que pueden usarse para monitorear las emisiones de gases de efecto invernadero en el lugar de trabajo de petróleo y gas 10. Por ejemplo, como se ilustra en la Figura 1, en determinadas modalidades, los sensores 12 pueden incluir monitores de quemador 12A, sensores de tanque 12B, monitores de concentración de gas 12C, monitores de estado del compresor 12D, monitores estructurales 12E, 10 monitores de proceso 12F, y/o sensores meteorológicos 12G. Sin embargo, en otras modalidades, los sensores 12 pueden incluir otros tipos de sensores capaces de proporcionar datos relacionados con las emisiones de gases de efecto invernadero. Además, se pueden utilizar otros tipos de datos para controlar las emisiones de gases de efecto invernadero en el lugar de trabajo de petróleo y gas 10, como la hora del día en que ocurrió la detección y la hora del amanecer/atardecer de ese día, entre otra información.
- 15 **[0007]** Aunque se describe principalmente en este documento en relación con los sitios de trabajo de petróleo y gas 10, se pretende que la expresión «lugar de trabajo de petróleo y gas» incluya cualquier lugar de trabajo 10 en donde se procese petróleo y/o gas de cualquier manera, y a partir del cual pueden producirse emisiones fugitivas de gases. De hecho, las modalidades descritas en este documento incluyen sistemas y métodos para identificar la ubicación de sensores de emisiones fugitivas de gases de cualquier 20 tipo de lugar de trabajo 10, incluidas, entre otras, emisiones de gas natural del equipo de plataforma de pozo o cualquier punto de la entrega de gas a un punto de uso. Además, las modalidades descritas en el presente documento se pueden aplicar a otros tipos de gases (p. ej., otros gases de efecto invernadero, dióxido de carbono, óxido nitroso, dióxido de azufre, gases fluorados) o fluidos (p. ej., humo, compuestos orgánicos volátiles, productos de petróleo y gas) emitidos por otro tipo de lugares de trabajo 10. En 25 general, las modalidades descritas en este documento incluyen colocar uno o más sensores 12 descritos anteriormente alrededor de un lugar de trabajo de petróleo y gas 10 como se ilustra en la Figura 1. En conjunto, los sensores 12 brindan una medición continua de las emisiones de gases de efecto invernadero fugitivas y ventiladas, así como otras condiciones (p. ej., condiciones climáticas, condiciones de proceso, condiciones estructurales) con respecto al lugar de trabajo 10. Además, como se ilustra en la Figura 1, en 30 determinadas modalidades, uno o más de los sensores 12 descritos en este documento pueden montarse en una plataforma móvil o camión 14, por ejemplo, un vehículo aéreo no tripulado (p. ej., un dron), un

robot móvil (p. ej., un robot Spot) o cualquier otra plataforma móvil relativamente ágil configurada para moverse por un lugar de trabajo de petróleo y gas 10, que lleva uno o más sensores 12 que pueden detectar datos relevantes relacionados con las emisiones de gases de efecto invernadero que pueden estar ocurriendo en el lugar de trabajo de petróleo y gas 10, como se describe con mayor detalle en este documento.

[0008] Para la modalidad ilustrada en la Figura 1, los diversos sensores 12 dispuestos en el lugar de trabajo 10, y alrededor de este, están acoplados comunicativamente a un sistema de análisis de emisiones de gases de efecto invernadero (GGEA) 16 y configurados para proporcionar datos de sensores al sistema de GGEA durante la operación. Por ejemplo, algunos de los sensores 12 pueden estar acoplados comunicativamente al sistema de GGEA 16 a través de una conexión por cable adecuada (por ejemplo, Ethernet), mientras que otros de los sensores 12 pueden estar acoplados comunicativamente al sistema de GGEA 16 a través de una conexión inalámbrica adecuada (por ejemplo, Wi-Fi, Bluetooth). El sistema de GGEA 16 incluye al menos un procesador 18 (por ejemplo, una unidad central de procesamiento (CPU, por sus siglas en inglés)) y al menos una memoria 20 (por ejemplo, memoria de acceso aleatorio (RAM, por sus siglas en inglés), memoria de solo lectura (ROM, por sus siglas en inglés), disco de estado sólido (SSD, por sus siglas en inglés), memoria flash). Además de almacenar instrucciones ejecutables por el procesador de computadora del sistema de GGEA 16, la memoria 20 almacena uno o más modelos. En algunas modalidades, el uno o más modelos pueden incluir un modelo directo 22 y/o un modelo inverso 24, como se analiza con mayor detalle a continuación.

[0009] En algunas modalidades, el hardware del sistema de GGEA 16 puede incluir un microprocesador, un microcontrolador, un módulo o subsistema de procesador, un circuito integrado programable, una matriz de puertas programables, un procesador de señales digitales (DSP, por sus siglas en inglés) u otro dispositivo de control o informático. De manera alternativa o adicional, el al menos un procesador 18 puede incluir componentes electrónicos separados acoplados a una placa de circuito impreso, circuitos integrados (por ejemplo, circuitos integrados específicos de aplicación (ASIC, por sus siglas en inglés)), y/o dispositivos lógicos programables (por ejemplo, matrices de puertas programables en campo (FPGA, por sus siglas en inglés)). En determinadas modalidades, el sistema de GGEA 16 puede estar acoplado comunicativamente a uno o más servicios externos 26 para recibir otros datos (por ejemplo, datos meteorológicos, datos de intensidad solar, datos de la hora del día, horarios de operación del lugar de trabajo) utilizados por el sistema de GGEA 16 durante la operación. En determinadas modalidades, el sistema de GGEA 16 puede estar parcial o totalmente dispuesto dentro de un sistema informático basado

en la nube. Como se señaló anteriormente, en diversas modalidades, el sistema de GGEA 16 utiliza los modelos 22 y/o 24, en combinación con entradas particulares, para simular o modelar fugas de gas dentro del lugar de trabajo 10.

[0010] En determinadas modalidades, el uno o más modelos 22 y 24 pueden implementarse como lógica de programa informático para su uso con el al menos un procesador 18. La lógica del programa informático puede incorporarse de varias formas, incluida una forma de código fuente o una forma ejecutable por computadora. El código fuente puede incluir una serie de instrucciones de programas de computadora en una variedad de lenguajes de programación (por ejemplo, un código objeto, un lenguaje ensamblador o un lenguaje de alto nivel como C, C++ o JAVA). Las instrucciones informáticas se pueden distribuir de cualquier forma como un medio de almacenamiento extraíble con documentación impresa o electrónica adjunta (por ejemplo, software envuelto en plástico), pueden precargarse en el sistema de GGEA 16 (por ejemplo, en la ROM del sistema o en un disco fijo) o distribuirse desde un servidor o tablón de anuncios electrónico a través de un sistema de comunicación (por ejemplo, Internet o World Wide Web). Además, en determinadas modalidades, las técnicas descritas pueden implementarse a través de un dispositivo perimetral que es parte de un entorno informático basado en la nube, y la lógica del programa informático puede ser ejecutada por el dispositivo perimetral en el entorno informático basado en la nube.

[0011] Como se señaló anteriormente, en determinadas modalidades, el sistema de GGEA 16 está configurado para recibir información con respecto a una fuga que se va a simular, las condiciones de viento predominantes y las ubicaciones de los sensores de gas 12 dentro del lugar de trabajo 10 y, en función de una simulación, proporcionar una respectiva concentración del gas fugado que sería detectado por los sensores de gas 12. En algunas modalidades, el sistema de GGEA 16 aplica un flujo de trabajo utilizando el modelo directo 22, de acuerdo con la Ecuación 1:

Ecuación 1: $MEAS = f(LOCS, SOURCE, WIND)$

, en donde

$LOCS$ es una matriz que tiene dimensiones $[m3]$, donde m es la cantidad de sensores de gas 12 (por ejemplo, ubicaciones de muestra) que se simularán dentro del lugar de trabajo, y donde cada sensor 12 de la matriz $LOCS$ incluye valores x , y y z respectivos que definen la ubicación simulada del sensor de gas dentro de un volumen 3D (por ejemplo, un subdominio) del lugar de trabajo 10;

$SOURCE$ es una matriz o conjunto de valores que describen la ubicación (S_x , S_y y S_z) de la fuga de gas simulada, así como una tasa de fuga constante (S_r) de la fuga de gas simulada, dentro del lugar de trabajo 10;

WIND es una matriz o conjunto de valores que describen un modelo de viento predominante en el lugar de trabajo 10, que puede incluir, de modo no taxativo: velocidad del viento (W_s), dirección del viento (W_d), variabilidad del viento a lo largo del tiempo (W_t);

MEAS es una matriz que tiene dimensiones $[m \ 1]$, donde cada valor indica una concentración de gas fugado respectiva, prevista o estimada (por ejemplo, en partes por millón (ppm) o kilogramos por metro cúbico (kg/m^3)) que sería medida por cada uno de los m sensores de gas 12; y

f es una función que define el modelo directo, que relaciona las entradas (por ejemplo, *LOCS*, *SOURCE* y *WIND*) con la salida (por ejemplo, *MEAS*).

[0012] Además, en algunas modalidades, el modelo directo 22 (f) puede aceptar otras entradas adicionales, que incluyen, de modo no taxativo: una dirección y momento del chorro de penacho inicial; una composición y/o densidad del gas que se fuga; un plano detallado del lugar de trabajo en 2D o 3D, o una vista aérea o satelital del lugar de trabajo, que indique la ubicación de estructuras, obstrucciones como tanques, edificios, árboles, colinas o valles, paredes, etc. También puede proporcionarse información atmosférica adicional, como el perfil vertical del viento, la intensidad de la radiación solar, el perfil vertical de la temperatura, la humedad, la nubosidad, la presencia de capas de inversión, la clase de estabilidad atmosférica, así como otros datos atmosféricos o meteorológicos adecuados, como entradas al modelo directo 22 en determinadas modalidades.

La Figura 2 ilustra una modalidad de ejemplo del modelo directo (f) 22, que es un modelo de dispersión de penacho gaussiano que se configura utilizando parámetros de un gas de efecto invernadero particular (por ejemplo, metano). La modalidad del modelo directo 22 ilustrada en la Figura 2 proporciona una solución estable que, para una fuente de fuga continua de tasa fija y propiedades del viento conocidas (por ejemplo, dirección del viento fija (W_d) y velocidad del viento fija (W_s)), produce la concentración de gas que se espera medir en un punto arbitrario en el espacio dentro del lugar de trabajo 10. Para el modelo directo 22 ilustrado, se dispone una fuente de fuga de gas simulada 30 a una altura Z_1 y se combina con la información del viento antes mencionada para producir un penacho de gas simulado en 3D que tiene una línea central de penacho H . Este penacho de gas simulado produce perfiles de concentración 3D simulados, que pueden usarse para estimar o prever la medición de un sensor de gas simulado dispuesto en una ubicación determinada (por ejemplo, definida con respecto a la línea central del penacho) en las condiciones de fuga y viento del modelo. En otras modalidades, el modelo directo 22 puede incluir o depender de otros métodos más complejos (por ejemplo, para abordar fugas de tasa constante no continuas), y estos métodos pueden basarse en simulación numérica, dinámica de fluidos computacional

(CFD), u otros métodos computacionales o de modelado adecuados. Por ejemplo, en algunas modalidades, el modelo directo 22 puede ser un modelo de penacho basado en dinámica de fluidos computacional (CFD), un modelo de penacho basado en modelos de aprendizaje automático entrenados o un modelo de penacho para flujo alrededor de estructuras. Se puede apreciar que tales métodos pueden capturar la generación inicial de penacho y manejar mejor el efecto de los obstáculos en la trayectoria del penacho, en determinadas modalidades.

[0013] La Figura 3 es un gráfico 3D 40 que representa visualmente la salida de la modalidad del modelo directo 22 para un ejemplo de fuga de gas simulada. El volumen representado por el gráfico 40 corresponde al volumen 3D del lugar de trabajo 10, mientras que el punto 42 representa la ubicación de la fuente de la fuga de gas dentro del volumen 3D del lugar de trabajo 10. Además, para el ejemplo representado en la Figura 3, la dirección del viento (W_d) se fija en 90 grados, la velocidad del viento se fija en 5 kilómetros por hora y la tasa de fuga constante se establece en 1 kilogramo por hora. Cada uno de los puntos 44 dentro del gráfico 40 representa la respuesta del modelo directo 22 de ejemplo de la Figura 2 en la ubicación indicada. Es decir, cada uno de los puntos 44 representa un registro dentro de la salida de la matriz *MEAS* por el modelo directo 22 en respuesta a las entradas antes mencionadas. Como tal, cada uno de los puntos 44 del gráfico 3D representa una concentración esperada de gas fugado que sería medida por un sensor 12 dispuesto en la ubicación ilustrada dentro del volumen 3D del lugar de trabajo 10. Además, cada uno de los puntos 44 se ilustra usando diferentes estilos de puntos, en los que 44A representa concentraciones de gas relativamente más altas, 44B representa concentraciones de gas relativamente más bajas y 44C representa concentraciones de gas aún más bajas dentro del volumen 3D del lugar de trabajo 10, según lo previsto mediante el modelo directo 22.

[0014] En determinadas modalidades, el sistema de GGEA 16 está configurado adicional o alternativamente para recibir información sobre las ubicaciones de los sensores 12 dentro del lugar de trabajo 10, las concentraciones de gas fugado medidas por cada uno de estos sensores 12 y las condiciones del viento en el lugar de trabajo 10 y, en función de una simulación que utiliza el modelo inverso 24, proporcionar una ubicación de la fuente y una tasa de fuga de una fuga de gas dentro del lugar de trabajo 10. Al igual que el modelo directo (*f*) 22, el modelo inverso (*g*) 24 puede derivarse de un modelo de dispersión de penacho gaussiano utilizando parámetros para un gas de efecto invernadero particular (por ejemplo, metano), u otro modelo o método adecuado, como se analizó anteriormente. En algunas modalidades, las entradas y salidas pueden representar datos hipotéticos o simulados, mientras que, en otras modalidades, las entradas corresponden a mediciones reales de los sensores de gas 12 dispuestos en

ubicaciones específicas dentro del lugar de trabajo 10, y las salidas corresponden a una fuga de gas prevista dentro el lugar de trabajo 10.

[0015] En algunas modalidades, para identificar la ubicación y la tasa de fuga de una fuga de gas real o simulada dentro del lugar de trabajo 10, el sistema de GGEA 16 puede aplicar un segundo flujo de trabajo utilizando el modelo inverso 24, de acuerdo con la Ecuación 2:

Ecuación 2: $SOURCE = g (MEAS, LOCS, WIND)$

, en donde

$SOURCE$ es una matriz o conjunto de valores que describen la ubicación (S_x , S_y y S_z) de la fuga de gas dentro de un volumen 3D (p. ej., un subdominio) del lugar de trabajo 10, así como una tasa de fuga constante (S_r) de la fuga de gas simulada;

$LOCS$ es una matriz que tiene dimensiones $[m3]$, donde m es la cantidad de sensores de gas 12 (por ejemplo, ubicaciones de muestra) posicionados dentro del lugar de trabajo, y donde cada sensor 12 de la matriz $LOCS$ incluye valores x , y y z respectivos que definen la ubicación del sensor de gas dentro del lugar de trabajo 10;

$MEAS$ es una matriz que tiene dimensiones $[m 1]$, donde cada valor indica una concentración de gas fugado respectiva (por ejemplo, en partes por millón (ppm) o kilogramos por metro cúbico (kg/m^3)) medida por cada uno de los m sensores de gas 12;

$WIND$ es una matriz o conjunto de valores que describen un modelo de viento predominante en el lugar de trabajo 10, que puede incluir, de modo no taxativo: velocidad del viento (W_s), dirección del viento (W_d), variabilidad del viento del tiempo (W_t); y

g es una función que define el modelo inverso 24, que relaciona las entradas (por ejemplo, $MEAS$, $LOCS$ y $WIND$) con la salida (por ejemplo, $SOURCE$).

[0016] Además, en algunas modalidades, el modelo inverso 24 (g) puede aceptar otras entradas adicionales, que incluyen, de modo no taxativo: una dirección y momento iniciales del chorro de penacho; una composición y/o densidad del gas que se fuga; plano detallado del lugar de trabajo en 2D o 3D, o una vista aérea o satelital del lugar de trabajo, que indique la ubicación de estructuras, obstrucciones como tanques, edificios, árboles, colinas o valles, paredes, etc. También puede proporcionarse información atmosférica adicional, como el perfil vertical del viento, la intensidad de la radiación solar, el perfil vertical de la temperatura, la humedad, la nubosidad, la presencia de capas de inversión, la clase de estabilidad atmosférica, así como otros datos atmosféricos o meteorológicos adecuados, como entradas al modelo inverso en determinadas modalidades. Como se señaló, en determinadas modalidades, el modelo inverso

24 se puede usar para modelar la ubicación de la fuente y la tasa de fuga de una fuga de gas real en el lugar de trabajo 10 cuando se conocen las ubicaciones y las mediciones de los sensores 12 reales. Sin embargo, como se analiza a continuación, en algunas modalidades, el sistema de GGEA 16 también puede configurarse para determinar la cantidad óptima de sensores 12, así como sus ubicaciones óptimas dentro del lugar de trabajo 10, en función de entradas relacionadas con el lugar de trabajo 10, el modelo directo 22 y/o el modelo inverso 24.

Identificación de la fuente de fuga

[0017] Como se señaló, en determinadas modalidades, el sistema de GGEA 16 está configurado para identificar o prever una ubicación y una tasa de fuga de una fuga de gas en función de mediciones de concentración de gas recopiladas por los sensores de gas 12 dispuestos en ubicaciones particulares dentro del lugar de trabajo 10. En modalidades de la descripción, el problema de identificación de la fuente de fuga se puede considerar un problema de optimización multivariante (por ejemplo, para la ubicación de la fuente, la tasa de fuga de la fuente y otros elementos de interés) dado un número de sensores de gas 12 en ubicaciones conocidas dentro del lugar de trabajo 10 con mediciones de concentración de gas conocidas recopiladas durante algún período de tiempo de interés (d_t). Además, para este caso de uso también se supone que se conoce el modelo de viento (*WIND*), que describe el comportamiento del viento durante el período de interés. Además, como se indica en el presente documento, en determinadas modalidades, el sistema de GGEA 16 también puede recibir otras entradas que pueden usarse para definir o restringir los modelos directo y/o inverso.

[0018] La Figura 4 es un esquema de datos 50 para una modalidad del sistema de GGEA 16. Para la modalidad ilustrada en la Figura 4, el sistema de GGEA 16 incluye un componente de detección de eventos y generación de registros 52 que está diseñado para recibir información sobre la condición del viento predominante 54 y datos del sensor de gas 56, y para interrelacionarlos en registros de eventos válidos para análisis posteriores, como se analiza a continuación. Como se ilustra, el componente de detección de eventos y generación de registros 52 puede recibir información de la condición del viento predominante 54 de uno o más de los sensores de viento 12 dispuestos en el lugar de trabajo, de un servicio meteorológico externo adecuado u otra fuente adecuada. Como se indica, la información de la condición del viento predominante 54 de ejemplo puede incluir información relacionada con la temperatura/presión/humedad 58, datos históricos de viento/meteorológicos 60, datos de horario 62, condiciones climáticas actuales o pronosticadas 64, velocidad del viento medida 66 y/o dirección del viento medida 68. Los datos de sensor de gas 56 de ejemplo pueden incluir mediciones de concentraciones de gas 70, información relacionada

con el tipo 72 de cada sensor de gas e información relacionada con la ubicación de cada sensor de gas (por ejemplo, ubicación del sensor 74, coordenadas del sistema de posicionamiento global (GPS) 76 de cada sensor de gas). Como se analiza a continuación, el componente de detección de eventos y generación de registros 52 está diseñado para generar y almacenar registros de eventos válidos en un almacén de registros de eventos 78 (por ejemplo, una base de datos) del sistema de GGEA 16.

[0019] Para la modalidad ilustrada en la Figura 4, el sistema de GGEA 16 incluye un solucionador 80 que está diseñado para recibir información de varias fuentes diferentes y para proporcionar al menos parte de esta información como entradas a al menos un modelo o flujo de trabajo descrito en el presente documento para determinar información útil relacionada con la gestión de fugas de gas. Para la modalidad ilustrada, el solucionador 80 recibe o recupera registros de eventos válidos del almacén de registros de eventos 78. El solucionador 80 también recibe información del mapa de la instalación 82, que puede incluir información relacionada con el diseño 84 del lugar de trabajo o información relacionada con la viabilidad de la fuga 86 (y la falta de factibilidad) para diferentes partes (por ejemplo, subdominios) del lugar de trabajo. El solucionador 80 ilustrado también recibe información de restricción 88, que puede incluir condiciones impuestas 90 que deben respetarse durante el análisis. Para la modalidad ilustrada, el solucionador 80 utiliza modelos de penacho (por ejemplo, el modelo directo 22 y/o el modelo inverso 24) para determinar o prever información de fuente potencial de fuga de gas 92, tal como la ubicación prevista 94 de la fuga de gas, la tasa de fuga 96 de la fuga de gas, u otra información útil. Además, el sistema de GGEA 16 incluye un almacén de identificación de fuente 98 (por ejemplo, una base de datos), que está diseñado para almacenar la información de fuente potencial de fuga de gas 92 para uso y evaluación posteriores. En algunas modalidades, el componente de detección de eventos y generación de registros 52 y el solucionador 80 pueden implementarse como instrucciones de computadora (por ejemplo, software) almacenadas en la al menos una memoria 20 y ejecutadas por el al menos un procesador 18 del sistema de GGEA 16 ilustrado en la Figura 1.

[0020] La Figura 5 es un diagrama de flujo que ilustra una modalidad de un proceso 110 mediante el cual el componente de detección de eventos y generación de registros 52 recibe y procesa información en registros de eventos válidos para su posterior procesamiento por parte del solucionador 80. El proceso 110 puede implementarse como instrucciones ejecutables por computadora que se almacenan en la al menos una memoria 20 y se ejecutan mediante al menos un procesador 18 del sistema de GGEA 16. El proceso 110 incluye recibir (bloque 112) mediciones de concentración de gas desde sensores de gas 12 que monitorean continuamente las concentraciones de gas en ubicaciones conocidas dentro del lugar de

trabajo. El proceso 110 incluye recibir (bloque 114) mediciones de viento desde sensores de viento 12 que monitorean continuamente la velocidad y dirección del viento en el lugar de trabajo. En algunas modalidades, el proceso 110 también puede incluir recibir (bloque 116) otras entradas, tales como un diseño 2D o 3D del lugar de trabajo o restricciones, que se analizan con mayor detalle a continuación.

5 **[0021]** Para la modalidad ilustrada en la Figura 5, el proceso 110 incluye que el componente de detección de eventos y generación de registros 52 convierta (bloque 118) una parte de las mediciones de concentración de gas y viento recibidas en un registro de eventos válido 120 en función de criterios de eventos válidos 122. La interrelación puede implicar una o más etapas. Por ejemplo, en determinadas modalidades, la interrelación implica al menos sincronizar las mediciones de concentración de gas y las mediciones de viento en función del momento en que se recopilaban las mediciones. En algunas modalidades, la interrelación puede implicar el suavizado de datos durante un pequeño período de interés. En algunas modalidades, la interrelación puede implicar eliminar o ignorar determinadas mediciones de concentración de gas, tales como mediciones de concentración de gas por debajo de un valor umbral predefinido y/o mediciones recopiladas durante condiciones de viento desfavorables, según lo definido por los criterios de eventos válidos. En algunas modalidades, los criterios de eventos válidos pueden ser definidos por un usuario o diseñador del sistema de GGEA 16. Se puede apreciar que, si bien se analizan en particular las mediciones de viento, la interrelación del bloque 118 puede implicar adicionalmente la interrelación de datos de otros sensores meteorológicos (por ejemplo, sensores de radiación solar, sensores de lluvia) y/o datos meteorológicos (por ejemplo, datos de intensidad solar, datos de lluvia) recibidos de servicios meteorológicos externos.

20 **[0022]** Para la modalidad ilustrada en la Figura 5, el registro de eventos válidos 120 incluye la conversión de mediciones de concentración de gas (*MEAS*) e información de viento (*WIND*) recopiladas (por ejemplo, por los sensores de gas y viento 12) en un momento particular (*t*). El proceso 110 continúa con el componente de detección de eventos y generación de registros 52 que almacena (bloque 124) el registro de evento válido 120 en el almacén de registros de eventos 78, como se analizó anteriormente. En determinadas modalidades, el componente de detección de eventos y generación de registros 52 puede eliminar o archivar intermitentemente (bloque 126) registros de eventos válidos 120 del almacén de registros de eventos 78 que corresponden a horarios fuera de un período de tiempo actual de interés (por ejemplo, una ventana de tiempo de ejecución predefinida). Como lo indica la flecha 128, el componente de detección de eventos y generación de registros 52 puede continuar interrelacionando las mediciones de concentración de gas y viento entrantes para generar y almacenar nuevos registros de eventos válidos.

Puede apreciarse que cada detección discernible (por ejemplo, cada registro de evento válido) proporciona información sobre una posible fuente. Esto significa que se puede obtener información valiosa de un registro de evento válido que tenga una medición de concentración de gas que indique que el sensor de gas no realizó ninguna detección a pesar de las condiciones de viento favorables. Por ejemplo, en determinadas situaciones, un sensor de gas con lectura cero en condiciones de viento favorables también proporciona información útil para la identificación de la fuente de la fuga y puede incluirse como parte de un registro de evento válido.

[0023] La Figura 6 es un conjunto de gráficos 140 que ilustran interrelaciones de ejemplo, en los que una modalidad del componente de detección de eventos y generación de registros 52 recibe y procesa mediciones de concentración de gas y mediciones de viento para generar registros de eventos válidos. Los gráficos 140 incluyen: el gráfico 140A que ilustra la dirección del viento medida en el lugar de trabajo a lo largo del tiempo, el gráfico 140B que ilustra la velocidad del viento medida en el lugar de trabajo a lo largo del tiempo, el gráfico 140C que ilustra la concentración de gas medida en una ubicación en el lugar de trabajo, el gráfico 140D que ilustra condiciones de validez que son parte de los criterios de eventos válidos 122 mencionados anteriormente, y el gráfico 140E ilustra la recopilación de registros de eventos válidos 120A-E a partir de los datos de viento y concentración de gas entrantes. La interrelación de datos de concentración de gas y viento se utiliza para identificar registros de eventos válidos, que indican tanto la medición de la concentración de gas como las condiciones del viento predominantes en un momento específico. Puede apreciarse que, si bien en la Figura 6 se ilustra una única medición de sensor de concentración de gas, este proceso de interrelación se puede aplicar a las mediciones de concentración de gas de todos los sensores de gas dispuestos en el lugar de trabajo.

[0024] Como se señaló anteriormente, en algunas modalidades, el procedimiento de interrelación incluye la sincronización temporal y puede incluir el suavizado de las mediciones de concentración de gas, las mediciones de viento o ambas. Para la modalidad ilustrada en la Figura 6, en función de las condiciones de validez de los criterios de eventos válidos 122, el componente de detección de eventos y generación de registros 52 interrelaciona partes de la información del viento de los gráficos 140A y 140B con partes de la medición de la concentración de gas de 140C para generar registros de eventos válidos 120A, 120B, 120C, 120D y 120E. En algunas modalidades, las condiciones de validez pueden ser definidas por el usuario o diseñador del sistema de GGEA 16, y estas condiciones pueden estar relacionadas con condiciones de viento constante, baja variabilidad en las lecturas, lapso de tiempo mínimo para cada registro de evento u otras condiciones adecuadas. Para la modalidad ilustrada en la

Figura 6, se puede apreciar que los registros de eventos válidos 120B y 120C incluyen lecturas de concentración de gas nulas o insignificantes; sin embargo, como se señaló anteriormente, estos registros de eventos válidos incluyen datos significativos que son útiles para identificar la fuente de una posible fuga de gas.

- 5 **[0025]** En determinadas modalidades, el sistema de GGAE 16 puede determinar o prever la ubicación de la fuente y la tasa de fuga de una posible fuga de gas (durante el período d_t) mediante la resolución de un problema de optimización de acuerdo con la Ecuación 3:

$$\begin{aligned} \operatorname{argmin} R(X) &= \sum_{j=1}^r (M_j^{mod}(LOC_j, X, WIND_j) - M_j^{obs})^2 \\ &s. t. x_i^L \leq x_i \leq x_i^U \end{aligned}$$

- 10 , en donde $R(X)$ es una función de costo de ejemplo, que en este ejemplo es la suma de los cuadrados de los residuos de la falta de coincidencia (sobre r registros de eventos válidos) entre la medición real M_j^{obs} en ubicaciones de sensores conocidas ($LOCS$) y las establecidas a partir del modelo directo M_j^{mod} para la ubicación de la fuente y la tasa dada por el conjunto de variables de control X . En algunas modalidades, se pueden usar otras funciones de costos, de acuerdo con la presente descripción. En algunas modalidades, se pueden incluir otros parámetros en el modelo directo en esta ecuación como parte de la función de costo
15 (pero no se muestran aquí).

- [0026]** Las soluciones al problema de optimización representado por la Ecuación 3 proporcionan las ubicaciones potenciales de una fuente de fuga de gas, así como la tasa de fuga potencial, durante el período d_t dados r registros de eventos válidos de interés. Estas soluciones pueden almacenarse, por ejemplo, en
20 el almacén de identificación de fuente 98 mencionado anteriormente, y el período de tiempo se incrementa posteriormente en t_d . En algunas modalidades, el almacén de identificación de fuente 98 puede filtrarse para eliminar registros antiguos, o puede aplicarse un término de ponderación a los registros más antiguos en este sentido. Entonces, una función de costos podría reflejar un indicador de suma ponderada de residuos. En determinadas modalidades, el tiempo de cálculo utilizado para prever la ubicación y la tasa
25 de fuga de una fuga de gas es menor que el período de retraso en t_d . En algunas modalidades, la función de costos puede incluir la suma de diferencias absolutas frente a otras normas sólidas.

[0027] En determinadas modalidades, el problema de optimización se puede resolver repetidamente en etapas incrementales (con un período d_t), ya que se almacenan registros de eventos válidos adicionales en función de los datos de medición recientes recibidos de los sensores de gas y viento del lugar de trabajo,

como se analizó anteriormente. En modalidades, se podría construir (y actualizar en cada etapa) un mapa de densidad de ubicación de la fuente para indicar visualmente la ubicación más probable de una fuente de fuga de gas dentro del lugar de trabajo.

[0028] En modalidades de la descripción, poca o ninguna información de los sensores de gas puede indicar que no se ha detectado una fuga de gas debido a las condiciones del viento predominantes, pero puede no ser suficiente para concluir que no existe una fuga de gas. De hecho, registros de eventos válidos anteriores pueden indicar si se ha identificado previamente una fuga potencial. De lo contrario, un registro de eventos válidos con una detección de gas notable puede ser suficiente para anticipar que podría haber una fuga de gas. Cuando el almacén de registros de eventos 78 está vacío, el proceso de detección puede comenzar de nuevo, de acuerdo con la presente descripción.

[0029] En algunas modalidades, la afirmación de las variables de ubicación de la fuente (S_x , S_y , S_z) como números enteros puede limitar las posibles ubicaciones de fugas a una cuadrícula predefinida, mientras que, en algunas modalidades, las ubicaciones de fugas factibles pueden mapearse por índice en el problema de optimización directamente. De manera similar, las regiones inviables pueden definirse mediante la adición de restricciones, como las que se analizan a continuación. En cualquier caso, el problema de optimización se puede modificar adecuadamente para gestionar las condiciones estipuladas. En algunas modalidades, el sistema de GGEA 16 puede incluir un solucionador 80 que puede manejar fácilmente variables enteras mixtas, por ejemplo, las analizadas en *Advances in Metaheuristics for Hard Optimization*, Patrick Siaray y Zbigniew Michalewicz, Eds., Springer, 2007 o *Handbook of Metaheuristics*, Michel Gendreau y Jean-Yves Potvin, Eds., Springer, 2019.

[0030] En modalidades de la descripción, se muestran en las Figuras 7 y 8 ejemplos de un dominio de interés 150 representativo (p. ej., lugar de trabajo 10, una instalación, un edificio, un área geográfica) con subdominios 152 factibles. Cada uno de los subdominios 152 puede definirse mediante un conjunto de restricciones que indica la factibilidad de las ubicaciones de las fugas de gas. Cada uno de los subdominios 152 puede ser continuo, separado o estar definido por ubicaciones puntuales factibles. La implementación de ubicación puntual factible permite ubicaciones separadas no basadas en una cuadrícula, o un subconjunto de estas. El dominio de interés 150 puede comprender cualquier tipo de subdominio dada la descripción del lugar de trabajo. Por lo tanto, la previsión de la ubicación de la fuga descrita puede incluir restricciones para garantizar que la ubicación de la fuente de la fuga establecida sea factible. Para modalidades sin restricciones definidas, la fuente de fuga de gas puede identificarse en cualquier lugar dentro de los límites del dominio de interés 150. Nótese que los subdominios 152 pueden describirse en

2D (eje z invariante) o en 3D, como se muestra en las Figuras 7 y 8, respectivamente. En la Figura 7, la ubicación de un sensor de gas 154 y un medidor de viento 156 se muestra en una vista en planta, mientras que en la Figura 8, la ubicación del sensor de gas 154 y un medidor de viento 156 se muestra en 3D. En ambas Figuras 7 y 8, se muestran ejemplos de subdominios factibles como subdominios continuos 152A, subdominios separados 152B y subdominios de ubicación puntual 152C, mientras que el límite de restricción no lineal 158 puede afirmar o definir una región no factible (por ejemplo, un río, terrenos colindantes, etc.) que deben excluirse de la consideración al prever la ubicación de una fuga de gas.

[0031] Se cree que la interrelación antes mencionada de datos de sensores de gas y viento en registros de eventos válidos proporciona mejores resultados que intentar prever las ubicaciones de las fuentes de gas de forma independiente utilizando los datos de sensor en cada etapa temporal, ya que este enfoque puede fallar cuando algunos sensores de gas no indican la detección debido a la dirección predominante del viento. Además, incluir datos de múltiples registros de eventos válidos o etapas temporales mejora la solidez de la previsión de la fuente de la fuga, ya que más eventos de detección ayudan al proceso de localización. Además, se reconoce que el uso de mediciones de concentración de gas con muy pocos sensores de gas puede impedir la localización de la fuente, ya que puede no haber información suficiente para triangular eficazmente la fuente de fuga de gas.

Generación de registros y localización de fuentes

[0032] Las Figuras 9, 10 y 11 ilustran un proceso de generación de registros de eventos válido de ejemplo a intervalos cambiantes de acuerdo con modalidades de la descripción. Cada una de estas figuras ilustra la ubicación de tres sensores de gas fijos 170 (por ejemplo, sensores de gas 170A, 170B y 170C) y un medidor de velocidad y dirección del viento 172 dentro de un dominio de interés 174 (por ejemplo, el lugar de trabajo) ilustrados en una vista en planta. En cada una de las figuras, la fuente de fuga de gas conocida 176 se ilustra dispuesta dentro de un subdominio continuo factible 177 junto con los isocontornos 178 del penacho de gas fugado. Las figuras indican además las mediciones de concentración de gas recopiladas por cada sensor de gas 170 dispuesto en las ubicaciones ilustradas dentro del dominio de interés 174 en un intervalo de tiempo particular. Las mediciones o lecturas de los sensores de gas ubicados fuera del rango del penacho son insignificantes, como lo indican las lecturas de concentración de gas ilustradas.

[0033] En el ejemplo de la Figura 9, la lectura del sensor de gas 170A es cero, mientras que las lecturas de los otros dos sensores de gas 170B y 170C indican detección de fuga de gas. Como tal, durante el intervalo de tiempo representado por la Figura 9, cada uno de los sensores de gas 170 experimenta

condiciones de viento favorables, lo que da como resultado la creación y almacenamiento de tres registros de eventos válidos. En un intervalo de tiempo posterior representado por la Figura 10, un cambio en la dirección del viento da como resultado que el sensor de gas 170C detecte gas fugado, mientras que los sensores de gas 170A y 170B muestran poca o ninguna detección con la dirección del viento dada. En un intervalo de tiempo posterior representado por la Figura 11, otro cambio en la dirección del viento da como resultado que los sensores de gas 170A y 170B detecten gas fugado, mientras que el sensor de gas 170C muestra poca o ninguna detección con la dirección del viento dada. Como lo indican estas figuras, se pueden recopilar datos significativos de los sensores de gas 170, incluso con lecturas bajas. Por lo tanto, determinados registros de eventos válidos en este contexto pueden incluir una medición de concentración de gas de lectura cero, dependiendo de los criterios de eventos válidos 122 analizados anteriormente.

Disposición óptima de los sensores de gas

[0034] Para las modalidades analizadas anteriormente, se conocen las ubicaciones de los sensores de gas (*LOCS*) dentro del lugar de trabajo 10. Sin embargo, en determinadas modalidades, el sistema de GGEA 16 se puede usar para determinar una disposición óptima de los sensores de gas, que indica una cantidad óptima de sensores de gas a usar para controlar un lugar de trabajo, así como ubicaciones óptimas para cada uno de estos sensores de gas dentro del lugar de trabajo. La disposición óptima de los sensores de gas generalmente maximiza la detección de fugas al tiempo que minimiza el costo involucrado (por ejemplo, usando la menor cantidad de sensores de gas, usando la menor cantidad de intervalos de tiempo). Para modalidades que permiten la determinación de la disposición óptima de sensores de gas, se puede utilizar el modelo directo 22 analizado anteriormente. Además, se conoce información sobre la topología y el diseño del lugar de trabajo, junto con las ubicaciones de los componentes del lugar de trabajo que es factible o probable que tengan fugas, y esta información puede proporcionarse al sistema de GGEA 16 para permitir la determinación de la disposición de los sensores de gas, como se analiza más adelante.

[0035] La Figura 12 es un diagrama de flujo que ilustra una modalidad de un proceso 190 mediante el cual el sistema de GGEA 16 determina la disposición óptima de sensores de gas para un dominio de interés particular (por ejemplo, el lugar de trabajo 10). El proceso 190 puede implementarse como instrucciones ejecutables por computadora que se almacenan en la al menos una memoria 20 y se ejecutan mediante al menos un procesador 18 del sistema de GGEA 16, como se analiza anteriormente. Para la modalidad ilustrada, el proceso 190 comienza con el sistema de GGEA 16 que utiliza (bloque 192) datos meteorológicos históricos para generar un modelo estocástico de viento para el lugar de trabajo durante un período de tiempo de pronóstico de interés, que puede ser del orden de días. Cabe señalar que, en

algunas modalidades, se puede generar un modelo no estocástico de viento directamente a partir de datos meteorológicos históricos (por ejemplo, usando las condiciones del viento durante un conjunto de períodos de tiempo de 12 horas de duración), y este modelo no estocástico de viento puede utilizarse en lugar del modelo estocástico de viento durante el resto del proceso 190.

5 **[0036]** Para la modalidad ilustrada en la Figura 12, el proceso 190 continúa con el sistema de GGEA 16 que genera (bloque 194) un programa de viento mediante la separación del modelo de viento en períodos de tiempo de ∂t . El sistema de GGEA 16 también crea (bloque 196) un programa de prueba que tiene un conjunto de casos de prueba, en el que cada caso de prueba define una combinación única de una posible ubicación de fuga y una posible tasa de fuga. Por ejemplo, cuando hay n_c posibles ubicaciones de fugas, cada una con n_s posibles tasas de fuga, habrá n_d casos de prueba en el programa de pruebas, en donde $n_d = n_c \times n_s$. El sistema de GGEA 16 también define (bloque 198) una cantidad inicial de sensores de gas para controlar el lugar de trabajo, así como una ubicación propuesta inicial para cada sensor de gas. En algunas modalidades, la cantidad y las ubicaciones iniciales de los sensores de gas pueden definirse en función de la entrada del usuario, o pueden seleccionarse al azar. En algunas modalidades, se pueden usar al menos tres sensores de gas para permitir la triangulación de la fuente de fuga, en donde los sensores de gas se pueden definir en diferentes ubicaciones espaciales y/o diferentes elevaciones en todo el lugar de trabajo.

15 **[0037]** Para la modalidad ilustrada en la Figura 12, el proceso 190 continúa con el sistema de GGEA 16 que realiza una serie de acciones dentro de un conjunto de bucles para cada elemento anidados. Para la modalidad ilustrada, el bucle para cada elemento externo 200 itera a través de cada caso de prueba i del programa de prueba (como se creó en el bloque 196), el bucle para cada elemento intermedio 202 itera a través de cada sensor de gas j (como se define en el bloque 198) y el bucle para cada elemento interno 204 itera a través de cada período de tiempo k del programa de viento (como se genera en el bloque 194). En consecuencia, en el bloque 206, el sistema de GGEA 16 proporciona al menos la ubicación (*LOCS*) del sensor j , la ubicación de la fuga y la tasa de fuga (*SOURCE*) del caso de prueba i y la velocidad y dirección del viento (*WIND*) del programa de viento en el período de tiempo k como entradas al modelo directo 22, en donde el modelo directo 22 responde emitiendo una medición de concentración de gas prevista en el sensor j durante el período de tiempo k en función del escenario de fuga del caso de prueba i . Como se indica en el presente documento, en algunas modalidades, también pueden proporcionarse otras entradas al modelo directo 22, y estas entradas se pueden obtener a partir de datos históricos, datos de ubicación cercana o datos simulados (en la medida de lo posible), y luego tratarse de una manera análoga a los datos

del viento.

[0038] Para la modalidad ilustrada en la Figura 12, después de repetir las acciones del bloque 206 para cada uno de los períodos de tiempo k del programa de viento, en el bloque 208, el sistema de GGEA 16 construye un perfil de medición respectivo (*MEAS*) para cada sensor j durante el período de tiempo de pronóstico de interés. En modalidades, estos perfiles de medición sirven como sustituto de las mediciones de concentración de gas en tiempo real que proporcionaría un sensor de gas real en la ubicación definida en las condiciones del viento y del caso de prueba.

[0039] Para la modalidad ilustrada en la Figura 12, después de construir el perfil de medición respectivo (*MEAS*) para cada sensor j durante el período de tiempo de pronóstico de interés, para cada caso de prueba i del programa de prueba, el sistema de GGEA 16 usa el proceso de identificación de fuente de fuga analizado anteriormente para prever (bloque 210) una ubicación de fuga y una tasa de fuga (*SOURCE*) en función de los perfiles de medición (*MEAS*) de todos los sensores de gas, las ubicaciones (*LOCS*) de todos los sensores de gas y la velocidad y dirección del viento (*WIND*) del modelo estocástico de viento. El propósito general de esta etapa es localizar la fuente de la fuga a cierta distancia de la fuente de fuga conocida (por ejemplo, usando los mismos datos del modelo de penacho), teniendo en cuenta que se puede agregar ruido para mejorar la solidez del análisis en algunas modalidades. La *SOURCE* prevista de cada caso de prueba se almacena adecuadamente (por ejemplo, en el almacén de identificación de fuente 98 analizado anteriormente) para una evaluación posterior, así como la cantidad de tiempo (por ejemplo, cantidad de intervalos de tiempo o períodos de tiempo, cantidad de registros de eventos válidos simulados a partir de los perfiles de medición) utilizado para prever la *SOURCE* para cada caso de prueba.

[0040] Para la modalidad ilustrada en la Figura 12, el sistema de GGEA 16 posteriormente evalúa (bloque 212) el desempeño simulado de los sensores de gas en las ubicaciones definidas en función de la *SOURCE* prevista almacenada de cada caso de prueba y/o el tiempo involucrado en la determinación de cada previsión de *SOURCE*. Por ejemplo, en algunas modalidades, la disposición de sensores de gas se puede evaluar en función de la cantidad de tiempo utilizado para prever la *SOURCE* de cada uno de los casos de prueba, en donde es deseable un tiempo menor o minimizado. En algunas modalidades, la disposición de sensor de gas puede evaluarse adicional o alternativamente en función de una distancia o diferencia entre cada ubicación prevista de la fuga de gas y la ubicación real de la fuga de gas definida en cada caso de prueba, en donde es deseable una distancia menor o minimizada. Se puede apreciar que también se pueden usar otros indicadores, de acuerdo con la presente descripción.

[0041] Por ejemplo, en determinadas modalidades, el tiempo total (T) para resolver todos los casos de

prueba puede estar dado por la Ecuación 4:

$$\textbf{Ecuación 4: } T = \sum_{i=1}^{n_d} t_i^{min}$$

, en donde t_i^{min} es el tiempo mínimo para prever la *SOURCE* para cada caso de prueba (por ejemplo, producto de la cantidad de períodos de tiempo de los cuales se utilizan datos *MEAS* y la duración del período de tiempo), y n_d es la cantidad total de casos de prueba en el programa de pruebas. Por ejemplo, en algunas modalidades, t_i^{min} puede calcularse como el producto de la cantidad de períodos de tiempo (de los cuales se usan datos *MEAS* de los sensores de gas y datos de *WIND* para prever la *SOURCE* con un nivel predefinido de precisión) y la duración del período de tiempo. Se puede apreciar que se puede realizar un cálculo similar para calcular una diferencia total en la distancia entre las ubicaciones de fuente previstas y definidas en todos los casos de prueba. En el ejemplo anterior, la cantidad de sensores n con ubicaciones *LOCS* da lugar a una medida del tiempo necesario para resolver todos los posibles casos de fugas enumerados en el programa de pruebas. En algunas modalidades, se podría estipular una medida de costo que tenga en cuenta la cantidad de sensores de gas utilizados y el tiempo total (o distancia u otro indicador) necesarios para identificar las fugas de gas, más penalizaciones por fugas de gas que no se detecten (por ejemplo, usando un resultado prolongado y una penalización por no detección). En modalidades, se puede generar un valor acumulativo representativo de todas las pruebas (por ejemplo, $V(LOCS)$), que es la solución a un problema de optimización que identifica la ubicación óptima de los sensores de gas en *LOCS*. Por tanto, se puede determinar la disposición óptima de los sensores de gas para una cantidad determinada de sensores n . Como lo indica la flecha 214, la cantidad de ubicaciones de los sensores de gas se puede modificar en el bloque 198 (por ejemplo, al incrementar la cantidad de sensores de gas), y el resto del proceso 190 se puede repetir para evaluar la nueva disposición de sensores de gas. Por ejemplo, en algunas modalidades, la disposición con el menor costo que detecta la mayor cantidad de fugas de gas en el programa de prueba en el menor tiempo proporciona la cantidad óptima de sensores de gas, así como sus ubicaciones óptimas dentro del lugar de trabajo.

[0042] Por lo tanto, en determinadas modalidades de la descripción, se permite una identificación de fuga de gas cuando están disponibles mediciones de concentración de gas de una cantidad definida de sensores de gas en ubicaciones definidas dentro del dominio de interés. Determinadas modalidades permiten la determinación de la cantidad óptima de sensores de gas y su ubicación en un enfoque predictivo. En determinadas modalidades de la descripción, la técnica descrita tiene en cuenta la entrada del operador humano que condujo a la colocación manual de los sensores de gas, un enfoque de prueba y error o una colocación aleatoria de los sensores de gas en las proximidades de componentes que tienen

probabilidad de tener fugas.

[0043] En determinadas modalidades de la descripción, se puede asumir información previa a partir de una lista de componentes conocidos y sus ubicaciones. En determinadas modalidades, también podría incluirse la probabilidad de una fuga de gas para priorizar la selección de esos sitios antes que otros. Sin embargo, si solo hay una fuga de gas, se debe identificar el componente con fuga, en cualquier caso. Además, la probabilidad de fuga también se puede utilizar para filtrar el conjunto de posibles ubicaciones o subdominios, lo que permite realizar la identificación de la fuente de fuga en función de grupos de probabilidad de fuga. En determinadas modalidades, esta información de probabilidad de fuga puede incluirse (por ejemplo, como ubicaciones puntuales separadas) como parte de una restricción. En modalidades de la descripción, los componentes del lugar de trabajo pueden clasificarse según la probabilidad de fuga en función de datos o conocimientos pasados del operador humano, y estos componentes pueden agruparse por probabilidad y resolverse en turnos. Esto significa que, para cada subproblema, los componentes/ubicación de la fuga más probable se resolverán primero antes de pasar al siguiente grupo de probabilidad de componentes del lugar de trabajo. Si solo se prevé una fuga, esta ocurrencia puede identificarse como la fuente de la fuga sobre todos los demás elementos del conjunto (por ejemplo, probando cada escenario de fuga).

[0044] También es posible que determinadas ubicaciones (por ejemplo, determinadas regiones de interés) puedan presentar naturalmente altos niveles de concentración de metano. Por ejemplo, esto podría deberse a la proximidad a granjas, ganado, marismas u otras fuentes naturales. A este respecto, en modalidades de la descripción, se puede establecer un nivel de referencia midiendo las concentraciones de metano en todos los sensores de gas del lugar de trabajo antes de realizar la localización de la fuente de la fuga. El uso de mediciones de concentración de gas recopiladas cuando no hay fugas, o datos de sensores de gas colocados en dirección opuesta a la dirección del viento con respecto a una fuga esperada, permite determinar las concentraciones de gas ambientales de referencia. En algunas modalidades, la concentración ambiental de referencia se utiliza para compensar las mediciones de concentración de gas de cada sensor de gas.

[0045] En modalidades de la descripción, se proporciona la adquisición en tiempo real de datos de sensores de gas. En algunas modalidades, la posibilidad de ruido puede dar como resultado que la medición o señal de la concentración de gas se suavice y/o se promedie. Sin embargo, el uso de mediciones promedio (en lugar de registros de eventos válidos descritos) puede ser menos efectivo en el proceso de identificación de la fuente. Los registros de eventos válidos del almacén de registros de eventos pueden

incluir algunos promedios, como se analizó anteriormente con respecto a las Figuras 5 y 6. Por ejemplo, las lecturas de concentración de gas nula de nivel bajo o cero pueden promediarse para indicar el nivel ambiental en cada sensor de gas.

[0046] En modalidades de la descripción, el sistema de GGEA 16 también puede tener en cuenta factores estacionales. Como se señaló, al determinar la disposición óptima de sensores de gas, se puede utilizar un modelo estocástico de viento representativo de las condiciones predominantes en un sitio determinado durante un período de interés determinado. En particular, se reconoce que el comportamiento del viento puede cambiar con la estación. Como tal, en algunas modalidades, el período de pronóstico de interés puede ampliarse para incluir esta variabilidad, o el modelo de previsión podría realizarse sobre varios modelos de viento para tener en cuenta el cambio estacional. De esta manera, la determinación de la disposición óptima de sensores de gas puede incluir los efectos de la variabilidad estacional. Además, para abordar la estacionalidad y comprender mejor las condiciones más probables en un lugar de trabajo determinado, las modalidades de la descripción pueden tener en cuenta o utilizar datos históricos (por ejemplo, clima, precipitaciones, viento, energía solar, temperatura, etc.) de cualquier fuente adecuada pública o privada. Esta información se puede utilizar para informar a los modelos de viento en la determinación de la disposición óptima de sensores de gas. En algunas modalidades, se pueden usar datos meteorológicos en tiempo real para validar las mediciones del viento en el sitio y usarse en lugar de las mediciones del viento en el sitio cuando los sensores de viento no están disponibles o no funcionan en el lugar de trabajo.

[0047] En determinadas modalidades, las técnicas descritas pueden aplicarse sujetas a incertidumbre en las mediciones de gas o viento o en los parámetros del modelo directo. Por ejemplo, esto puede implicar muestrear el espacio de incertidumbre de cada parámetro incierto y optimizar la función de desajuste residual, como se analizó anteriormente, excepto que puede realizarse de acuerdo con un factor de confianza definido por el usuario, como se analiza en *Handbook of Metaheuristics*, Michel Gendreau y Jean-Yves Potvin, Eds., Springer, 2019. La variabilidad asociada con las condiciones del viento puede presentar naturalmente una distribución de posibles ubicaciones de fuentes que se pueden mostrar gráficamente en el mapa de la instalación. En ausencia de incertidumbre en el modelo y ruido de medición tanto para los sensores de gas como para los medidores de viento, las técnicas descritas permiten la identificación de la fuente de la fuga con mayor certeza.

[0048] Las modalidades específicas descritas anteriormente se han ilustrado a modo de ejemplo, y debe entenderse que estas modalidades pueden ser pasibles de diversas modificaciones y formas

alternativas. Se debe entender además que no se pretende que las reivindicaciones se limiten a las formas particulares descritas, sino que abarquen todas las modificaciones, los equivalentes y las alternativas que se encuentran dentro del espíritu y alcance de la presente descripción.

[0049] En las reivindicaciones, se pretende que las cláusulas de medios más funciones incluyan las
5 estructuras descritas en la presente que realizan la función descrita, y no solo equivalentes estructurales sino también estructuras equivalentes. Así, por ejemplo, aunque un clavo y un tornillo pueden no ser equivalentes estructurales en el sentido de que un clavo emplea una superficie cilíndrica para unir piezas de madera, mientras que un tornillo emplea una superficie helicoidal, en el entorno de la sujeción de piezas de madera, un clavo y un tornillo pueden ser estructuras equivalentes. Es intención expresa del solicitante
10 no invocar el párrafo 6 del artículo 112 del título 35 del U.S.C. en cuanto a limitaciones para cualquiera de las reivindicaciones de la presente, excepto en los casos en los que la reivindicación emplee de forma expresa las palabras «medio para» junto con una función asociada.