

MÉTODO Y DISPOSITIVO PARA LA GESTIÓN INTEGRAL DE ENERGÍA

CAMPO DE LA INVENCION

La presente invención se refiere a un método de gestión integral de energía mediante el control de las variables operacionales que influyen en el desempeño energético. Más concretamente, la invención se refiere a técnicas destinadas al incremento del rendimiento operacional de los sistemas de acondicionamiento de aire y a la medición de parámetros necesarios para identificar las causas operacionales de pérdida del rendimiento.

ANTECEDENTES

Los sistemas de acondicionamiento de aire son procesos necesarios tanto en los procesos industriales, como en la búsqueda de las condiciones de confort de las personas que ocupan un determinado lugar. Así como en los sistemas de refrigeración, en el acondicionamiento de aire se hace necesario el aporte de energía, lo cual implica costos significativos, por lo que se requieren importantes desarrollos e innovaciones en sistemas de gestión energética que garanticen una adecuada operación, control y mantenimiento de los equipos y sus consumos energéticos. El propósito fundamental de los sistemas de acondicionamiento de aire radica en llevar al aire a unas condiciones controladas de humedad, temperatura y régimen de flujo, que le permitan experimentar tanto unas condiciones de confort térmico a los usuarios como un ambiente idóneo a las máquinas y los materiales para su operación y conservación..

La eficiencia energética puede ser determinada de dos formas, mediante la eficiencia en condiciones estacionarias o nominales o mediante la eficiencia estacional u operacional. La eficiencia en condiciones estacionarias o

nominales se determina para los parámetros nominales de operación y considera que los parámetros operacionales del equipo son constantes en el tiempo y por lo tanto no es capaz de determinar la influencia de la variabilidad operacional y el estado técnico del equipo en el incremento de su demanda de energía.

En el caso particular de los sistemas de acondicionamiento de aire y de calefacción esta eficiencia considera temperatura constante de rechazo de calor y trabajo del equipo a su capacidad nominal, no tiene en cuenta el consumo de energía de los sistemas auxiliares, así como tampoco las fluctuaciones de carga de acuerdo a la demanda, los consumos por arranques y paradas o por cambios de parámetros operacionales, como el ajuste de las temperaturas de confort en los salones climatizados o la temperatura ambiental y tampoco el cambio de las condiciones operativas por las variables relacionadas con el mantenimiento del equipo como: estado de limpieza de filtros, de superficies de transferencia de calor, de la calidad de la energía eléctrica etc.

Por ello un análisis de la eficiencia en condiciones estacionarias casi siempre resulta en medidas de cambios tecnológicos del equipo para reducir su consumo y muy pocas veces recomienda mejoras del control operacional o de la gestión del mantenimiento.

La eficiencia estacional del equipo es aquella que tiene en cuenta los efectos de la variabilidad operacional en el incremento de la demanda energética. La misma considera el impacto de las paradas, los arranques, los cambios de carga, el trabajo a cargas parciales o con el equipo principal temporalmente apagado y el deterioro de condiciones técnicas que dependen del tiempo de operación, en la eficiencia global del equipo, durante un ciclo de operación típico.

Siendo así que varios autores han realizado una variedad de estudios al respecto con el fin de optimizar la gestión de la energía. Fong et al, (2012) hace una propuesta de la gestión eficiente de la energía de sistemas HVAC utilizando un enfoque simulación-optimización, utilizando un modelado matemático para el sistema de HVAC, teniendo en cuenta el fenómeno de transferencia de calor que ocurre en el lado del agua y los sistemas secundarios de aire, para sugerir ajustes óptimos ante diferentes condiciones de operación atendiendo a la respuesta de las cargas de enfriamiento dinámicos y los cambios de tiempo a lo largo de un año. El potencial de ahorro que se obtiene con este desarrollo es alrededor del 7% en comparación con los ajustes operativos existentes, sin ningún costo adicional, utilizando un enfoque de programación evolutiva.

Por otra parte, Dounis & Caraisc (2009) realiza una breve descripción de los sistemas de control convencionales en sistemas de acondicionamiento de aire en edificios, además de presentar sus ventajas y desventajas. De igual manera, se observa el desarrollo de sistemas inteligentes de control para mejorar la eficiencia energética de los sistemas de control para la gestión del ambiente interior, teniendo en cuenta los requerimientos de los usuarios. Específicamente, se trata el tema del diseño de sistemas inteligentes de control basados en agentes en entornos de construcción.

Otro estudio, propone estrategias para reducir el consumo de energía y la promoción del uso de las energías renovables, garantizando al mismo tiempo el confort térmico, al calentar edificios "multi-energía", gracias a los sistemas de control de la temperatura interior. Tres esquemas (basado en un controlador PID de uso común y en la combinación de controladores PID y modelo predictivo o difusos) se ensayaron en la simulación, utilizando modelos dinámicos que describen el comportamiento térmico de un edificio, y se reunieron plenamente los requisitos de la estrategia de gestión, especialmente la reducción del consumo de energía (Paris et al, 2010).

Una metodología general de reducir al mínimo el consumo de energía a partir de fuentes de energía actuales y adaptación mínima es propuesta por Siroky et al (2011), pero en lugar de hacer uso de técnicas avanzadas de control, se fundamenta en el análisis de los ahorros energéticos que se pueden lograr en un sistema de calefacción del edificio mediante la aplicación de control predictivo basado en modelos (MPC) y el uso de predicciones meteorológicas. La formulación básica de MPC se describe con énfasis en la aplicación de control de edificios y probado en un experimento de dos meses realizada en un edificio real en Praga, República Checa.

Un Modelo de Control predictivo (MPC) y las predicciones meteorológicas pueden aumentar la eficiencia energética en un cuarto de automatización integrado (IRA) respetando al mismo tiempo el confort de los ocupantes. IRA se ocupa del control simultáneo de calefacción, ventilación y aire acondicionado (HVAC). MPC es una técnica de control avanzado que, cuando se aplica a los edificios, emplea un modelo de la dinámica de construcción y resuelve un problema de optimización para determinar las entradas de control óptimos. En este modelo se hace un desarrollo y análisis de una estrategia de control predictivo del modelo estocástico (SMPC) para la construcción de climatización que tenga en cuenta la incertidumbre debido a la utilización de las predicciones meteorológicas (Oldewurtel et al, 2012).

Por último, se propone por Arabali et al, (2013) estrategia para satisfacer la carga controlable de sistemas de calefacción, ventilación y aire acondicionado (HVAC) con un sistema de almacenamiento y generación de energía renovable híbrido. A partir de un histórico de velocidad por hora de viento, de la radiación solar, y de la carga de datos para modelar estocásticamente la generación eólica, la generación fotovoltaica, y la carga. Con el fin de minimizar los costes y aumentar la eficiencia, se utiliza un enfoque de optimización basado en GA junto con un método estimación de dos puntos.

Habida cuenta de la necesidad de reducir las fuentes directas de emisión de gas de efecto invernadero (GEI) para la sostenibilidad ambiental del planeta, los sistemas de acondicionamiento de aire no se escapan a este objetivo vital y por tanto la mejora de la eficiencia energética de los sistemas de refrigeración medida a través del COP se ha incrementado de 2,5 en 1960 a 3,8 en 2002. (Refrigeration Report; 2002)

A pesar de lo mucho que se ha avanzado en la eficiencia de los sistemas de aire acondicionado todavía existe mucho potencial de ahorro de energía en la optimización de la operación de los mismos. La mayor parte de estos equipos no operan en las condiciones en que fueron diseñados debido a la alta variabilidad de la temperatura ambiente a la que se produce la condensación, el cambio de las condiciones operacionales y el estado técnico de los equipos principales y sus sistemas auxiliares en el tiempo.

El exceso del consumo de energía de los sistemas de acondicionamiento de aire no se identifica como un problema funcional de los mismos y las normas que regulan la eficiencia del diseño de los sistemas se basan en indicadores de eficiencia como el coeficiente de eficiencia energética (EER) y el coeficiente de rendimiento (COP) que son medidos a plena carga y en condiciones controladas, cosa que no sucede en la mayoría de las ocasiones.

Por tal motivo en los últimos años (2013) se establecieron regulaciones en muchos países a nivel mundial, tales como que los indicadores de eficiencia de los acondicionadores de aire deben venir etiquetados con su factor de eficiencia energética estacional (SEER) y su coeficiente de rendimiento estacional (SCOP) en vez de los anteriores EER y COP. Estos indicadores ya tienen en cuenta algunos aspectos operativos de los equipos como consumo del equipo cuando está apagado, desactivado por termostato o en espera, y el funcionamiento del equipo con cargas parciales (100%, 74%, 47%, 21%).

El rendimiento estacional es siempre menor que el rendimiento instantáneo y permite valorar con mayor exactitud el impacto real del sistema sobre el medio ambiente así como los factores que influyen en el consumo de energía.

El aumento del rendimiento estacional de los equipos de aire acondicionado abre un nuevo camino en la investigación y el desarrollo de herramientas para su incremento.

En estudios realizados como los mencionados previamente, se ha identificado que el 87% de las instalaciones no trabaja dentro de los parámetros de rendimiento nominales y que la media del consumo excesivo de energía oscila entre el 10-30% (Berglöf; 2002).

Por tanto se ha determinado una serie de problemas que en operación producen mayores disminuciones de los valores de la eficiencia como el incorrecto subenfriamiento y sobrecalentamiento del refrigerante, la insuficiente capacidad de condensación, el incorrecto funcionamiento del dispositivo de expansión, el mal funcionamiento de ventiladores en difusores del evaporador, los filtros bloqueados, los controles más ajustados y la baja eficiencia del compresor del refrigerante; los cuales se presentan por diversas causas operacionales que no son posibles de prevenir y por ende se requiere contar con la capacidad de identificarlas y corregirlas en tiempo real.

Ahora bien, dichas causas operacionales vienen dadas debido a que los sistemas de aire acondicionado cuentan con medición de energía independiente, condiciones operacionales dinámicas y variables que ocasionan un cambio en el consumo y además, por cuanto no cuentan con un sistema de medición de parámetros termodinámicos que permita identificar las causas de los problemas presentados. Incluso, si la medición de todos los parámetros termodinámicos fuera posible, el análisis de los mismos para identificar las causas del incremento del consumo de energía o la pérdida de capacidad de

refrigeración, debe ser realizado por especialistas y requiere de largas horas de análisis para dar alertas tempranas de posibles problemas o soluciones a los ya existentes. Es así que en la actualidad el incremento de la eficiencia estacional de estos sistemas esta fuera de las manos del operador.

El método de la presente invención permite por primera vez al operador ser parte activa del incremento del rendimiento operacional de los sistemas de acondicionamiento de aire y no requiere de un alto costo en la medición de los parámetros termodinámicos necesarios para identificar las causas operacionales de pérdida del rendimiento. Se basa en modelos físico-matemáticos generales que se autoajustan durante el funcionamiento del sistema en un periodo típico de trabajo del mismo y condiciones controladas de operación, para permitir identificar desviaciones en condiciones operacionales diversas, no controladas, mostrando al operador la indicación de las desviaciones cuando éstas se producen, su impacto en el consumo de energía y las posibles soluciones para su mitigación.

La invención está basada en los conceptos de control operacional del desempeño energético establecido en la Norma Internacional ISO 50.001 Sistemas de Gestión Energética, por lo que su aplicación hace cumplir la instalación con este requisito de la Norma.

DESCRIPCIÓN DE FIGURAS

La Fig. 1. Es un diagrama de bloques que ilustra el método para el incremento de la eficiencia estacional mediante el control de operaciones de energía estacionaria

La Fig. 2. Es el dispositivo para el incremento de la eficiencia estacional mediante el control de operaciones de energía estacionaria

La Fig. 3. Es el ejemplo de la muestra del proceso de filtrado de datos

La Fig. 4. Es el ejemplo del modelo lineal multivariantes del comportamiento del consumo de energía eléctrica para un compresor de Propileno en función de las toneladas comprimidas y el porcentaje de carga del control de capacidad

La Fig. 5. Es el ejemplo de la determinación de los límites de control operacional de mejor desempeño energético para la variable presión de descarga del compresor de Propileno.

La Fig. 6. Es el ejemplo de la tendencia del consumo de energía del compresor.

DESCRIPCIÓN DETALLADA DE LA INVENCION

Esta revelación, describe el método para el incremento de la eficiencia estacional mediante el control de las variables operacionales que impactan significativamente el consumo de energía del sistema.. La eficiencia estacional del equipo es aquella que tiene en cuenta los efectos de la variabilidad operacional en el incremento de la demanda energética. La misma considera el impacto de las paradas, los arranques, los cambios de carga, el trabajo a cargas parciales o con el equipo principal apagado y el deterioro de condiciones técnicas que dependen del tiempo de operación, en la eficiencia global del equipo durante un ciclo de operación típico.

Las diferencias entre el valor de la eficiencia estacionaria y la eficiencia estacional de los equipos altamente consumidores de energía son significativamente altas. En el caso de generadores de vapor esta diferencia puede ser entre 10-15 puntos, menores para la eficiencia estacionaria que la eficiencia instantánea. Para los sistemas de acondicionamiento de aire las diferencias entre el COP instantánea y el SCOP estacional también son significativas , ocurriendo que la cantidad de calor absorbido en el evaporador por unidad de energía eléctrica suministrada al sistema, puede ser estacionalmente 2 veces inferior que en la evaluación instantánea que entrega el fabricante. Es por esto que la presente invención permite identificar y controlar la variabilidad de la demanda de energía de un equipo y las brechas

entre el consumo mínimo y la demanda real, actuando sobre las variables operacionales y de gestión del mantenimiento que impactan significativamente el consumo energético. Esto se realiza a través de un método que puede considerar la influencia de todas las variables y permite medir la relación entre lo que se debería demandar de energía para unas condiciones dadas, con respecto a lo que realmente se ha consumido para esas mismas condiciones. En una realización particular de la invención, se pueden identificar las causas de la desviación de la demanda y el consumo y además recomendar la corrección de estas causas, para lograr reducir al mínimo esta brecha elevando la eficiencia estacional.

El método para el incremento de la eficiencia estacional mediante el control de operaciones del desempeño energético comprende los pasos de: definir y registrar un tiempo de demanda energética, definir una muestra de datos mínima representativa correspondiente al tiempo de demanda energética registrado, establecer las variables termodinámicas, operacionales y de estado técnico significativas que indican efectos sobre el consumo de energía, toma de datos de estas variables significativas, filtrado de variables significativas que incluye una indicación del nivel de influencia de la variable en el consumo de energía, modelación del consumo de energía a partir de la linealización univariable o multivariable de los datos de consumo en función de las variables significativas de referencia, validación del modelo obtenido como línea base del consumo energético del sistema, identificación de las operaciones de mejor eficiencia estacional y de los parámetros operacionales asociados las mismas, establecimiento de los criterios operacionales de mayor eficiencia estacional, comparación en tiempo real del consumo real del sistema con el consumo base obtenido por el modelo univariable o multivariable, correlación de las desviaciones con las variaciones de los criterios operacionales establecidos, identificación de la variación de los parámetros operacionales que ha provocado la desviación, correlación de la variación de estos parámetros con las acciones operacionales o de mantenimiento que pudieron darle lugar,

recomendación al operador de ejecución de acciones recuperativas de la eficiencia, registro del impacto de las acciones en el perfil del consumo de energía y la eficiencia del sistema.

La definición de tiempo de demanda energética es el periodo que se toma como referencia para establecer el nivel de variabilidad de la demanda energética que se desea reducir y también el potencial al cual puede ser reducido. Este período también se denomina periodo base y debe reflejar el comportamiento cíclico del proceso para tener en cuenta la influencia de todas las variables potenciales sobre el consumo de energía. Por ejemplo para procesos en que la estación del año influye en la demanda, el periodo típico es un año

Un elemento importante del período base es determinar la frecuencia de tiempo de los datos de este período, pues de esta frecuencia depende el número de datos potenciales de la población total. Ej. Para una frecuencia diaria de un período anual, la población de datos es de 365, pero para una frecuencia mensual es de 12. Generalmente el control operacional se realiza en una empresa en una frecuencia horaria, por tanto la población de datos para este caso es de 8760, pero también puede ser por turnos de trabajo u otra frecuencia.

A partir de la población se define la muestra de datos mínima correspondiente al tiempo de demanda energética suministrado. Esta muestra mínima corresponde a la cantidad de datos del período base que me permite obtener un modelo lineal univariable o multivariable del comportamiento del consumo de energía, que sea significativo con respecto a sus variables independientes y con un nivel de confianza y de precisión suficientemente alto. Una forma de estimar inicialmente una cantidad de datos que garantice estas condiciones es determinar esta cantidad de la ecuación que determina el error típico de un modelo:

$$n_o = (z^2 * cv^2) / e^2, (1)$$

donde n_o es la estimación inicial del tamaño de muestra necesario, antes de comenzar el muestreo.

Cv es el coeficiente de varianza, producto del cociente de la desviación estándar respecto la media. Hasta que pueda estimarse la media real y la desviación estándar de la población a partir de las muestras reales, se utilizará $Cv=0,5$ como estimación inicial.

e es el nivel deseado de precisión.

z es el valor de distribución normal estándar con un número infinito de lecturas y para el nivel de confianza deseado.

Una vez definida la muestra mínima de datos de la población del periodo base seleccionada se establecen las variables significativas como aquellos parámetros operacionales o de estado técnico del sistema que afectan el consumo de energía.

Las nombradas variables significativas se clasifican en:

Variables que no dependen de la operación y del mantenimiento Por ejemplo. La producción realizada (toneladas de refrigeración); grados día de refrigeración, entre otros.

Variables que dependen de la operación y el mantenimiento Ej. Sobrecalentamiento del refrigerante, subenfriamiento del refrigerante, cantidad de refrigerante, rendimiento isoentrópico del compresor, temperatura de condensación, temperatura de evaporación, estado de

ensuciamiento de las superficies de transferencia de calor, estado de limpieza de filtros, etc....

Variables estáticas, por ejemplo. Aquellas que condicionan el consumo de energía pero no varían en el tiempo, por ejemplo. Tipo de motor (de baja eficiencia); rpm del motor (Fijas); Tipo de chiller, tipo de enfriamiento del condensador, tipo de evaporador, tipo de válvula de expansión, tipo de compresor ; también pueden ser condiciones operacionales límites por factores de seguridad o ambientales operacional Ej. Factor de carga mínimo del sistema, flujo de agua fría mínimo del sistema..

La identificación de estas variables se realiza por análisis teórico del proceso que ocurre en el uso significativo de energía a controlar, a lo cual subsigue la toma de datos de las variables significativas que es una de las etapas más importantes, ya que de ello depende la calidad y efectividad del control operacional. Los elementos a tener en cuenta son:

La cantidad mínima de datos a tomar es el valor determinado de la muestra mínima multiplicado por 20 y por un factor de seguridad que me permita realizar un filtrado de datos estadístico posterior y mantenerme en ese rango. O sea, la cantidad de datos a tomar puede ser: $n_0 * 20 * 1,25$

Los datos deben cumplir la cualidad que deben estar adecuadamente distribuidos en todo el período de la población. Si la población es de un año, no deben estar concentrados al inicio o al final del año.

Los datos deben corresponder a la frecuencia de tiempo con que se determinó la población.

Es necesario tomar datos de: todas las variables clasificadas como independientes de la operación y del mantenimiento; todas las variables clasificadas como dependientes de la operación y del mantenimiento.

Luego, el filtrado de variables significativas que incluye una indicación de si el valor de la variable influencia el consumo de energía a partir de un análisis del proceso, pero su confirmación requiere de aplicar una prueba de hipótesis sobre si su influencia sobre el consumo de energía es realmente significativa o no.

Para esto se aplica la prueba de hipótesis denominada P-value. Esta prueba consiste en determinar si la probabilidad de que las variaciones de la variable seleccionada no influye sobre las variaciones del consumo de energía, es nula o no. Cuando el valor de probabilidad es menor de 0,05 se considera que la hipótesis es nula y por lo tanto la variable si ejerce influencia.

Para aplicar la prueba se utiliza cualquier herramienta estadígrafo como EXCEL de Microsoft Office, STATGRAPHICS Plus (1997) y SigmaPlot (1999) u otros. La entrada a estas herramientas son todos los datos de la muestra de datos tomada de los valores de las variables y del consumo de energía asociado. Debe tenerse en cuenta que todos los valores deben ser tomados en el mismo intervalo de tiempo. Las variables que no queden significativas son desechadas.

A lo que seguidamente es sometido a un filtrado de datos a partir de la linealización univariable o multivariable de los datos de consumo de energía.

El proceso de linealización consiste en obtener un modelo lineal que sea capaz de representar el comportamiento del consumo de energía con las variables significativas que no dependen de la operación y del mantenimiento.

El modelo lineal obtenido me permite normalizar el consumo de energía en períodos diferentes al periodo base, con respecto a las variables que no dependen de la operación y del mantenimiento, de manera que estas no influyan en las diferencias del consumo de energía. De esta forma las diferencias en el consumo de energía de un periodo cualquiera con respecto al base (determinado por el modelo lineal) se deberán solo a la variación de aquellas variables que si dependen de la operación y del mantenimiento y que son las variables sobre las cuales si puedo actuar para corregir el consumo.

Para filtrar los datos tomamos la información de consumo de energía y de cada variable significativa que no dependen de la operación y del mantenimiento (puede ser una o más variables) y obtenemos un modelo lineal univariable o multivariable de la forma:

$$Y = m1 * X1 + m2 * X2 + ... mn * Xn + b \quad (2)$$

Obtenemos el valor del error típico y del coeficiente de determinación r^2 de este modelo. El error típico y el coeficiente de determinación pueden obtenerse aplicando el método P-value anteriormente descrito, a los datos de consumo y de las variables significativas involucradas en el modelo.

El proceso de filtrado de datos se realiza solo si el coeficiente de determinación obtenido del modelo lineal es inferior a 0,75, en caso contrario, indicaría una relación muy fuerte entre las variaciones de las variables que no dependen de la operación y del mantenimiento y las variaciones del consumo de energía. Si esto ocurre el modelo lineal obtenido representa adecuadamente el comportamiento lineal de las variaciones del consumo de energía con estas variables.

En el caso que $r^2 < 0,75$ se realiza un proceso de extracción de la muestra de aquellos datos reales de consumo más alejados del valor de consumo estimado

según el modelo lineal obtenido. El procedimiento para la extracción es comenzar con una frontera superior e inferior de z veces el error típico:

$Y + z \cdot \text{error típico}$; $Y - z \cdot \text{error típico}$; Y - valor estimado por el modelo de regresión lineal.

El primer valor de z es un valor donde todos los datos de la muestra se encuentren dentro de esa frontera.

Al reducir el valor de z se va estrechando la frontera hasta encontrar uno o más valores reales de Y , que se salgan de la frontera. Esos valores son eliminados de la muestra y con los valores que quedan en la muestra se vuelve a determinar el valor del coeficiente de determinación r^2 . Este proceso se repite hasta que ocurra cualquiera de estas condiciones:

El valor de $r^2 \geq 0,75$

El número de datos de la muestra disminuye a un valor igual a $n_0 \cdot 20$

Ocurrida una de estas condiciones los datos que queden en la muestra es la muestra de datos filtrada.

En la Figura 3 se muestra un ejemplo de un proceso de filtrado de datos, donde se aprecian los datos que están por fuera del primer límite "*segunda frontera*" y los datos que se encuentran fuera de la primera frontera.

Posteriormente se realiza la linealización del comportamiento de las variaciones del consumo de energía con las variables significativas. Es conocido que realmente este comportamiento del consumo de energía en los procesos no es lineal, pero partimos de la hipótesis de que puede ser linealizado.

La base de esta hipótesis radica en que generalmente todo consumo de energía de un proceso estacional se compone de una parte fija y una parte variable. La parte fija es aquella parte del consumo que no depende de la variable independiente de la operación o el mantenimiento, Ej. La cantidad de toneladas de refrigeración que debo entregar en función de la demanda del proceso o la temperatura ambiente a que debo entregarlo..

Esta parte fija puede ser el consumo en vacío del compresor, las pérdidas a vencer en las tuberías de refrigerante, las pérdidas isoentropicas en el compresor, las pérdidas mecánicas en el compresor, las pérdidas en la expansión de la válvula etc....

La parte variable del consumo de energía es aquella asociada a la cantidad de producto realizado (TR entregadas). Es la cantidad de energía necesaria para bajar la temperatura de un flujo de agua de un valor de retorno al valor deseado y requerido por el proceso en unas condiciones dadas y que varía con las diferencias de temperaturas y los flujos de agua fría..

La parte variable de la energía puede tener un comportamiento no lineal, pero siempre podrá transformarse matemáticamente como una constante multiplicada por la variable, ya que la energía teórica requerida para transformar una unidad de sustancia es generalmente constante, a unas condiciones dadas. En nuestro caso, el calor específico del agua a enfriar determina la cantidad de calor necesaria a extraerle al agua para cambiar su temperatura en un grado.

Esta hipótesis puede ser rechazada o aprobada al utilizar modelos estadísticos de linealización que cuentan con diferentes métodos para poder verificar el grado de aproximación del modelo al comportamiento real y la capacidad de estimación del mismo en situaciones fuera de la muestra de datos, utilizada para establecerlos. Nuestro dispositivo permite la validación en línea de esta

hipótesis para la aplicación del modelo al incremento de la eficiencia estacional del sistema.

Una vez definida la muestra filtrada de la información del consumo de energía y las variables independientes de la operación y el mantenimiento que influyen significativamente en las variaciones del consumo, se linealiza el modelo del comportamiento de estas variaciones, utilizando el método de modelo de regresión, ya que nuestro objeto es intentar predecir el comportamiento del consumo de la energía a partir de otras variables del proceso.

Para aplicar el modelo de regresión lineal univariable o multivariable utilizamos la herramienta P-value. Esta herramienta nos puede indicar los siguientes atributos del modelo:

- Coeficiente de determinación del modelo r^2 , que me indica la magnitud de la relación de los cambios de las variables independientes del modelo con los cambios en el consumo de energía
- Coeficiente de determinación corregido r^2 , que es una corrección a la baja de r^2 y que depende del número de datos utilizados para elaborar el modelo y la cantidad de variables independientes que intervienen en el mismo.
- Error típico del modelo que representa la medida de cuanto se separa la estimación del consumo de energía del modelo para un valor de las variables independientes del valor real del consumo.
- Coeficientes de regresión, que representan el coeficiente de las variables independientes del modelo lineal y el valor del inicio del modelo de regresión. Los coeficientes de las variables independientes significan la razón de cambio del consumo de energía por unidad de variación de la variable independiente y el origen del modelo representa el incremento fijo que sufre el consumo de energía o el consumo de energía base que no depende del cambio de las variables independientes.
- Pruebas de significación, que se realizan para contrastar las hipótesis nulas de que los coeficientes de regresión valen cero en la población y permiten

establecer si la variable independiente influye significativamente en el consumo de energía o es pura casualidad informática y si el valor del consumo fijo de energía es realmente diferente de cero o no. También estas pruebas, en el caso multivariable, nos permite contrastar la hipótesis nula de que el valor poblacional de R (coeficiente de correlación del modelo multivariantes) es cero y por tanto decidir si existe relación significativa entre el consumo de energía y el conjunto de las variables independientes tomadas juntas.

- La precisión absoluta del modelo, que establece el intervalo de confianza en que podemos encontrar el valor real con respecto al estimado, calculado por el modelo para un % de la población dado (nivel de confianza)
- El nivel de confianza que indica el % de la población que puede ser representada por el modelo con el grado de precisión absoluta obtenido.
- La aplicación del método P-value y la verificación de los atributos del modelo de regresión lineal univariable o multivariable nos lleva a una ecuación que representa el comportamiento del consumo de energía con la variación de las variables del proceso, que son independientes de la operación y del mantenimiento del tipo general:
- Consumo de energía / unidad de tiempo =
- B consumo fijo de energía/ unidad de tiempo +
- M1 consumo de energía por unidad de la variable independiente A1* unidades de A1/ unidad de tiempo +
- M2 consumo de energía por unidad de la variable independiente A2 * unidades de A2/ unidad de tiempo +
- M3 consumo de energía por unidad de la variable independiente A3* unidades de A3/ unidad de tiempo +
- Mn consumo de energía por unidad de la variable independiente An* unidades de An/ unidad de tiempo.
- Esta ecuación cuenta con atributos de coeficiente de determinación r^2 y una relación significativa no casual con las variables independientes consideradas en el mismo.

- Este modelo obtenido debe interpretarse correctamente ya que las variables independientes de la operación y del mantenimiento utilizado para predecir el consumo de energía no son las únicas variables significativas que influyen en el consumo de energía. Deliberadamente no hemos incluido en el modelo las variables significativas que si dependen de la operación y del mantenimiento y que seguramente pueden tener una influencia en el consumo de energía.
- El valor del coeficiente de determinación del modelo puede ser un indicador de cuanto pueden impactar el resto de variables no consideradas a formar parte del modelo. Si el valor de r^2 es 0,85, puede significar que el resto de variables no consideradas en el modelo han influenciado las variaciones del consumo de energía en un 15%, mientras las consideradas, lo han hecho en un 85%. Esto significa que la dispersión del valor real del consumo de energía con respecto al valor estimado del modelo se debe a la influencia de las variables que si dependen de la operación y del mantenimiento y que no hemos considerado en el modelo.
- Debido a que esta variabilidad del consumo de energía se produce tanto al incremento del consumo de energía con respecto al valor del modelo, como al decremento del mismo, podemos identificar cuando las variables que si dependen de la operación y del mantenimiento han influenciado para que el consumo sea inferior al valor medio estimado, por aquellas variables sobre las cuales no podemos actuar.
- Esto nos pone en una posición de poder identificar los parámetros operacionales y de mantenimiento que producen ahorros de energía en el uso significativo de energía.

Por último, se identifican los criterios operacionales de control. Estos criterios son los límites superior e inferior en que deben encontrarse las variables significativas del consumo de energía que dependen de la operación o del mantenimiento para lograr un buen desempeño energético.

Estos límites pueden encontrarse en manuales de operación, recomendaciones del fabricante o prácticas operacionales impuestas por operadores de mayor experiencia, pero frecuentemente, los criterios utilizados para establecerlos no son el buen desempeño energético, sino, “zonas de confort” de operadores, criterios de seguridad o ambientales que pueden ya estar obsoletos y que pueden ser modificados sin impactar negativamente estos indicadores.

En nuestro dispositivo estos límites se encuentran por si solos de las operaciones de mejor desempeño energético que han servido para elaborar el modelo lineal del comportamiento del consumo. Estas operaciones son las que tienen valores de consumo de energía por debajo de la curva que representa el modelo lineal obtenido.

Tomando los datos de las variables que dependen de la operación y del mantenimiento para las fechas de las mejores operaciones y realizando un gráfico de control de las mismas, podemos obtener el valor medio y los límites operacionales en que se movieron estas variables, estableciendo criterios operacionales para lograr un mejor desempeño energético.

A modo de ejemplo, en la Figura 5 se observa que la presión de descarga del compresor, para todos los datos operacionales que provocaron consumos de energía por encima del valor estimado del modelo, se encontró en el intervalo:

$$P_{descarga} = 30,48 \pm 1,88 \text{ barg}$$

Sin embargo, para las operaciones de mejor desempeño energético:

$$P_{descarga} = 29,94 \pm 1,47 \text{ barg}$$

Establecer un criterio operacional de la presión de descarga del compresor de 30 +/- 1,5 barg podría traer un ahorro de energía, que según el modelo de consumo aplicado a las mejores operaciones, que podría ser de:

$$\text{Ahorro} = (1,0325 - 1,0259) * \text{Ton Eq./h} + 153,8 - 141,59 = -0,0066 * \text{Ton / h} + 9,1 \text{ KW/h}$$

Para un valor medio de toneladas equivalentes comprimidas hora al año de 412 el ahorro es de 6,4 KWh , equivalentes a 55.130 KWh /año, cerca de 12 MM \$ COP

Como últimos pasos, sigue el seguimiento y monitoreo de los criterios operacionales y la evaluación de los resultados. El seguimiento se realiza a través de un gráfico de tendencia del desempeño energético. Este gráfico es el que mejor puede reflejar el comportamiento de la eficiencia estacional y de sus cambios en el tiempo indicando cuando un criterio operacional o de mantenimiento puede no haberse cumplido.

La tendencia del desempeño energético se mide a través de un gráfico de las sumas acumulativas, de las diferencias del consumo real, con respecto al consumo del modelo de regresión lineal, para el mismo valor de las variables independientes que no dependen de la operación y del mantenimiento, es decir para el mismo valor de las variables independientes del modelo.

Suma acumulativa = Suma (Y real - Y modelo)

$$i=1 \text{ a } n$$

$$Y \text{ modelo} = b + m1 * A1 + m2 * A2 + \dots mn * An$$

donde:

Y modelo es el consumo de energía obtenido por el modelo para las variables independientes A1, A2, An

i corresponde a la unidad de tiempo, horas, turnos, días etc. Y el,

Y_{real} es el valor del consumo de energía real medido, en las operaciones posteriores al establecimiento de los criterios operacionales para los valores de las variables independientes de la operación y del mantenimiento $A1, A2, A_n$.

Como ejemplo de la tendencia del consumo de energía del compresor, en la Figura 6, que corresponde al compresor de Propileno, posterior a la aplicación del control operacional para el seguimiento y monitoreo del cumplimiento del criterio operacional de la presión de descarga, se observa la tendencia del comportamiento del consumo de energía, posterior a la implementación del criterio operacional identificado, con respecto al comportamiento anterior, representado por el modelo de regresión lineal, en función de la variable toneladas de producto comprimido.

La pendiente de la Figura 6 es casi constante lo que indica que el ahorro diario también es prácticamente constante, ya que se debe a una misma medida.

En caso que el criterio operacional se dejara de aplicar, inmediatamente se vería reflejado en un cambio de pendiente de la tendencia. El día en que ocurre el cambio de la pendiente es el día en que probablemente ocurre el cambio del criterio operacional. Una corrección posterior del criterio operacional también se ve reflejado en la Figura 6 con la recuperación de la pendiente del mismo.

El valor final del grafico corresponde al valor del ahorro total de energía que ha conseguido el control operacional por la aplicación del criterio operacional durante el periodo de tiempo monitoreado.

La evaluación de los resultados del incremento de la eficiencia estacional del uso significativo de energía puede realizarse mediante el resultado final del gráfico de tendencia. Sin embargo, lo que se espera es una estabilización del control operacional de aquellas variables que dependen del operador y del mantenedor del proceso para que ese resultado sea sostenible en el tiempo. Esta estabilización es lo que permitirá reducir la brecha entre la demanda real de energía y el consumo del equipo o proceso.

Pueden ocurrir en el proceso de control cambios en la tendencia no explicados por los cambios en las variables operacionales y de mantenimiento pre identificadas. Esto indicara que no hemos sido capaces de identificar todas las variables que impactan significativamente en el consumo de energía y requerirá de un nuevo análisis e incorporación y validación de la nueva variable. Ello garantiza actuar también sobre el uso de la energía e identificar variables que tengan que ver con este criterio incorporándolas al modelo.

Otro resultado de la evaluación de los resultados es la determinación de cuales variables de mantenimiento que afectan el consumo de energía deben implementarse y con cual frecuencia. Esta determinación se realiza a partir de criterios económicos, cuando el impacto en el costo de la energía de no hacer la actividad de mantenimiento se iguala al costo de realizar la actividad.

De acuerdo con el método que se describe en la presente, el método para el incremento de la eficiencia estacional, exhibe un gran potencial de mejora del desempeño energético en procesos y equipos de uso significativo de energía reduciendo la brecha entre la demanda de energía y el consumo real y mejorando las prácticas de uso para reducir la demanda. Sabiendo que estas variables no pueden identificarse ni controlarse por los métodos convencionales basados en la mejora de la eficiencia nominal o

convencional de los procesos y equipos, se requiere enfocar la gestión hacia el incremento de la eficiencia estacional.

Es importante la medición y control de la eficiencia estacional de los usos significativos de energía de las empresas, ya que esta eficiencia es la responsable del gasto real de energía de los procesos y servicios y su potencial de mejora es significativo, requiriendo para ello menores inversiones que los cambios tecnológicos para el incremento de la eficiencia energética.

La gran cantidad de variables de tipo operacional, de mantenimiento y de uso que intervienen en la eficiencia estacional de un equipo o proceso no permiten usar los modelos convencionales de los indicadores de eficiencia para elevar la eficiencia estacional. Se requieren de nuevos modelos que permitan involucrar todas las variables y medir su influencia en el consumo de energía para poder controlarlo y reducirlo al mínimo económicamente posible.

El método objeto de la presente solicitud eleva la eficiencia estacional mediante el control operacional de los usos significativos de energía de las empresas y permite:

- Identificar los potenciales de mejora de la eficiencia estacional mediante la reducción de la variabilidad operacional del consumo energético
- Identificar y establecer criterios operacionales, de uso y de mantenimiento a través del control de las variables significativas que impactan el consumo de energía para la mejora del desempeño energético y el incremento sostenido de la eficiencia estacional
- Realizar el seguimiento y monitoreo del cumplimiento de los criterios operacionales establecidos y su impacto en la reducción del consumo de energía.

- El control total de la eficiencia estacional de los equipos optimizando los costos de las actividades rutinarias de mantenimiento que impactan el consumo de energía.
- Acercar la eficiencia estacional a la eficiencia nominal de los equipos y proceso lo mayor posible con la tecnología existente y propiciar la innovación para producir equipos o procesos que cada vez puedan cerrar más la brecha entre la demanda de energía y el consumo real de energía.