

Consideraciones para el desarrollo de un sistema automatizado para la evaluación de la eficiencia de combustión en una planta generadora por motores de combustión interna.

Autores:

Manoel S. Santos Azevedo

Iván Leandro Rodríguez Rico

Pablo Romelio Roque Díaz

Ítalo Jorge Tavares Jimenez

Jandecy Cabral Leite

Palabras clave— combustión interna, eficiencia energética, software.

RESUMEN

En este trabajo se exponen las principales consideraciones teóricas para el desarrollo de un sistema automatizado para la evaluación de la eficiencia de combustión en la central termoeléctrica de Manauara. Se analizan las informaciones referentes a los intervalos de los valores de las variables que serán procesadas, lo que permitirá realizar los cálculos de las eficiencias de combustión y de conversión de energía térmica a energía eléctrica, a partir de la determinación directa (el producto dividido por el consumo) e indirecta (el consumo descontando las pérdidas, referido al consumo), identificando cuáles son las variables relevantes a ser medidas y cuál es el procesamiento requerido para cada una de ellas.

Estos cálculos sirven de base para la elaboración de los modelos matemáticos y de los algoritmos principales, donde el modelo matemático fundamental, que en general es en estado no estacionario por causa de los procesos transientes dentro del motor, se hace con los datos disponibles inicialmente y después con los obtenidos en el desempeño de la planta y de cada una de sus unidades componentes.

I. INTRODUCCIÓN

La combustión es una de las tecnologías más antiguas de la humanidad. Actualmente, la mayor parte de la energía consumida en el mundo (por ejemplo en transporte, generación de energía eléctrica, etc.), es obtenida por el proceso de combustión. De modo que el conocimiento de este proceso es de gran importancia para muchas áreas, principalmente en las plantas termoeléctricas.

El consumo de combustibles líquidos en las plantas termoeléctricas, es aun uno de los métodos más utilizados para la generación de energía eléctrica. El uso del gas en vez

del combustible líquido, resulta más atractivo económicamente.

Uno de los inconvenientes fundamentales de la combustión es la emisión a la atmósfera de un considerable volumen de gas con alto contenido de gases tóxicos, que tienen además un alto contenido energético, afectando directamente la eficiencia de combustión y el medio ambiente.

Este contenido energético tiene una gran responsabilidad en los parámetros de eficiencia energética, dentro de los cuales el índice de consumo específico de combustible, es uno de los más importantes.

La determinación de la eficiencia basada en el método indirecto, que calcula la eficiencia cuantificando las diferentes causas de las pérdidas de energía en el proceso, precisa de la determinación de la composición y temperatura de los gases de combustión así como otros indicadores de las pérdidas del proceso.

El desarrollo industrial y urbano ha originado en todo el mundo un aumento considerable de la emisión de contaminantes atmosféricos. En función de la creciente preocupación por el medio ambiente, crece también la necesidad de evaluar los impactos reales y potenciales generados por el sistema de combustión de la central termoeléctrica.

El análisis costo-beneficio de un sistema de mejoría de la combustión a través de la adecuación de la relación aire/combustible puede llevar a resultados más eficientes del proceso.

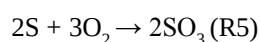
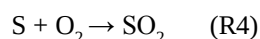
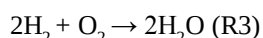
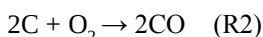
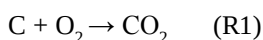
II DESARROLLO

La Compañía Energética Manauara está compuesta por una planta termoeléctrica, situada en Manaus, Estado de Amazonas, Brasil. La energía eléctrica producida por la planta es mediante corriente alterna, a una frecuencia de 60 Hz, 13,8 kV, elevada a 69 kV en la subestación elevadora. El punto de conexión y entrega de energía está situado en la SE Cidade Nova de MANAUS ENERGIA. La subestación elevadora de 13,8/69 KV está constituida de 2 transformadores de 85 MVA y demás equipamientos asociados. La línea de transmisión que interconecta a Manauara con SE Cidade Nova tiene una extensión de 13,84 km.

Puesto que el objetivo principal de este proyecto es desarrollar un sistema automatizado para la captura de datos en tiempo real del sistema de combustión de la central termoeléctrica Manauara que permita la evaluación de la eficiencia del

proceso y detectar las posibles causas de los problemas, fue preciso establecer los preceptos teóricos-prácticos relacionados con el tema.

Como es conocido, los principales elementos químicos encontrados en la mayoría de los combustibles son el carbono y el hidrógeno. Además de ellos, el azufre es otro componente normalmente presente aunque en cantidades menores. Esos elementos químicos reaccionan con el oxígeno de acuerdo con las siguientes reacciones: (R1) a (R5).



Las reacciones (R1) a (R5) son llamadas reacciones redox, en la cuales ocurre transferencia de electrones y un reactante se reduce y otro se oxida.

Modelo de la combustión.

El modelo matemático del proceso de combustión de los motores componentes de la UTE Manauara (cinco motores Wärtsilä, modelo 18V46 GD, de 17.076 kW cada uno de potencia) debe tener en cuenta que la combustión es apenas uno de los cinco procesos componentes del ciclo termodinámico de cuatro tiempos (admisión, compresión, combustión, expansión y escape). Debe considerarse también las particularidades del proceso de combustión de los motores de ignición por compresión y formación interna de la mezcla aire-combustible, conocidos como motores diesel igual que en el caso en que se utilicen otros combustibles, como aceite combustible pesado (fuel oil) y/o gas natural.

Será preciso modelar la combustión en dos escenarios totalmente diferentes: régimen tradicional utilizando apenas aceite combustible pesado y un nuevo régimen (en este momento está siendo sometido a pruebas) donde el combustible fundamental pasa a ser gas natural inyectado a sobrepresión superior a los 300 bar (30 MPa), con ignición piloto de aceite combustible no sobrepasando el 3% del combustible total (régimen dual).

El proceso de combustión periódico (207 veces por minuto o cada 0,29 segundos en cada uno de los 18 cilindros de cada motor), se caracteriza por las irregularidades presentadas en la formación de la mezcla y la proximidad física entre los reactivos (determinadas por las leyes de la aerodinámica y por la geometría del motor y de sus sistemas), el limitado tiempo disponible para la realización de las reacciones químicas (relevante para la cinética y equilibrio químicos) y de la difusión de los componentes gaseosos desde y a la zona de reacción (también importante para la velocidad general del

proceso de combustión). Muchas de estas características hacen del proceso de combustión a ser modelado, totalmente diferente del proceso correspondiente a una combustión estacionaria, como se pudiera presentar en una caldera de vapor.

Aerodinámica del chorro.

En un motor diesel de formación interna de la mezcla aire-combustible, ésta se forma dentro del cilindro en un proceso que se inicia apenas con la entrada de un chorro líquido o gaseoso (según el combustible usado). Es así que la formación de la mezcla estará determinada por la penetración del chorro dentro del volumen de la cámara y de la propia aerodinámica del movimiento del aire dentro de ella. La primera va a depender principalmente de la presión de la inyección del combustible, además de las características geométricas de la boquilla o tobera. La segunda depende de la geometría de la cámara y de las válvulas de admisión.

En régimen de funcionamiento dual, será preciso considerar la modelación de dos chorros diferentes: el chorro de combustible gaseoso, que debe garantizar la mezcla homogénea cuanto sea posible, y el chorro líquido, cuyo fin principal es iniciar la combustión de la mezcla gaseosa.

Difusión del chorro.

En la medida en que se produce la penetración del chorro dentro del volumen de aire o de la mezcla gaseosa, es observada una evaporación junto con la difusión de combustible dentro de la mezcla. Los procesos de difusión juegan un importante rol en la formación de la mezcla tanto en régimen de combustible líquido, como en el dual.

Modelo de la ignición.

Simultáneamente ocurre el calentamiento intensivo del combustible, que alcanza rápidamente la temperatura de inflamación y después de un tiempo de retardo, la ignición o inicio de la combustión en algunas regiones de la frontera de difusión donde aparecen las condiciones locales favorables (de temperatura y composición de la mezcla). La propagación de la combustión al resto de la cámara es un fenómeno complejo, que resulta diferente para el caso de un combustible líquido (atmósfera de aire), que para el caso de combustible dual, donde la atmósfera es la de una mezcla inflamable de aire y combustible, además de productos gaseosos intermedios de la combustión. En el primer caso, la combustión de líquido ocurre desde su salida de la boquilla, pues una vez iniciada la inflamación la temperatura es elevada para calentar luego el combustible que sale, y la cantidad de aire es excesiva, garantizando los requerimientos de oxígeno. En el segundo caso, la combustión, después de iniciada con la inflamación del chorro líquido, se propaga por el volumen de la cámara siguiendo una complicada secuencia de fenómenos.

Cinética de equilibrio químico. Velocidad de combustión.

Las altas temperaturas alcanzadas en el proceso normalmente garantizan elevadas velocidades de reacción, mas están presentes los fenómenos de difusión que influyen en la cinética global. De ahí la importancia de lograr que los procesos de mezclado ocurran con el mayor grado de perfección.

Las leyes del equilibrio químico y de la cinética química posibilitan modelar el sentido predominante de una reacción química y los factores que lo determinan. En este caso, son de interés las reacciones directas de combustión, principalmente las que describen la combustión de carbono y de hidrógeno hasta dióxido de carbono y agua, visto que son ellas las que liberan energía útil a conversión de trabajo. Las reacciones inversas de CO_2 y de agua, que ocurren a temperaturas elevadas por ser endotérmicas consumen energía antes liberada, contribuyendo a la disminución de la máxima temperatura efectiva del proceso y, por tanto, de la eficiencia de la combustión.

Balance exergético (segunda ley de la Termodinámica)

El balance exergético es una moderna técnica de análisis termodinámico que permite valorar sobre la eficiencia de utilización de la disponibilidad de la energía, o sea, de su convertibilidad en trabajo u otras formas de energía de alta cualidad (análisis de segunda ley de la Termodinámica). La exergía involucrada en el proceso de combustión en un motor puede ser de varios tipos, entre ellas: exergía física que expresa la posibilidad de un sistema de entregar trabajo de sus diferencias de presión y temperatura relativas al medio ambiente, y la exergía química que expresa las posibilidades de obtener trabajo del desequilibrio químico con dicho medio. En este caso, es la exergía química la de mayor magnitud.

Un balance de exergía de la combustión permite obtener la destrucción de exergía restando de la suma de la exergía física y de la química de los reactivos, la exergía física y química de los productos además de exergía del calor y del trabajo saliendo del sistema durante del proceso. La relación de la exergía de los productos más la del trabajo (despreciando el calor transferido al exterior durante la combustión), respecto a la exergía al inicio del proceso constituye la eficiencia exergética de la combustión.

MODELO MATEMÁTICO.

El modelo matemático elemental fue elaborado preliminarmente con la información disponible para ser posteriormente corregido con el resto de la información obtenida en el estudio detallado del desempeño de la planta y de cada una de sus unidades componentes. El modelo, que en general es en estado no estacionario por causa de los procesos transientes dentro del motor, debe de tener los siguientes ítems:

1. Modelo de la combustión

- 1.1. Estequiometría (conservación de masa)
- 1.2. Conservación de la energía
- 1.3. Aerodinámica del chorro.
- 1.4. Difusión del chorro en la mezcla gaseosa
- 1.5. Modelo de la ignición
- 1.6. Cinética
- 1.7. Equilibrio químico
- 1.8. Velocidad de la combustión
- 1.9. Balance energético (de segunda ley de Termodinámica).

Está previsto desarrollar los siguientes aspectos:

Modelo del ciclo termodinámico dentro de los cilindros

Modelo de la salida – enfriamiento de los gases de chimenea.

Modelo de la conversión mecánica – eléctrica

Modelo de las necesidades propias de energía: lubricación, refrigeración, equipamiento auxiliar, alimentación de aire y combustible.

Modelo de la cinemática y dinámica del motor, del generador y de los auxiliares.

Modelo de la eficiencia directa

Modelo de las pérdidas y de la eficiencia indirecta.

III CONCLUSIONES

La concepción del modelo matemático para la evaluación de la eficiencia de combustión en la central termoeléctrica Manauara requiere de tener en cuenta aspectos claves para la comprensión, monitoreo y evaluación del proceso de combustión interna en los motores, destacándose los referidos a la cinética y equilibrio químico, aerodinámica de los fluidos involucrados y las consideraciones exergéticas.

Los aspectos relacionados para la confección del modelo de la combustión permitirá no solo evaluar la eficiencia sino que aportará suficiente información sobre las variables del proceso para el desarrollo un sistema automatizado.

IV BIBLIOGRAFÍA

1. Annand, J.D., 1973, "Effects of Simplifying Kinetics Assumptions in Calculating Nitric Oxide Formation in Spark Ignition Engines", Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Vol. 188, pp. 41/73.
2. Bowman, C.T., 1975, "Kinetics of Pollutant Formation and Destruction in Combustion", Progress in Energy and Combustion Science, Vol.1, pp. 33-45.
3. Heywood, J.B., 1988, "Internal Combustion Engines

- Fundamentals”, McGraw-Hill, Singapore.
4. James, E.H., 1982, “Errors in NO emission Prediction from Spark Ignition Engines”, SAE Paper 820046, International Congress & Exposition, Detroit, Michigan USA.
 5. Lavoie, G., Heywood, J.B., and Keck, J.C., 1970, Experimental and Theoretical Investigation of Nitric Oxide Formation in I.C.E.”, Combustion Science and Technology, Vol. 1, pp. 313-326.
 6. Rizzo, G., Ivan, A., and Pianese, C., 1998 Models for the prediction of performance and Emissions in a Spark Ignition Engine-A Sequentially Structured Approach SAE paper 980779
 7. Rublewski, M. e Heywood, J. B., 2001, Modeling NO formation in Spark Ignition Engines with a Layered Adiabatic Core and Combustion Inefficiency Routine, SAE paper 2011-01-1011, SAE International Congress and Exposition , Detroit, Michigan, USA
 8. Sodré, J.R., 1995, “Formulation and Experimental Validation of a Computer Model for Spark Ignition Engine Exhaust Hydrocarbons”, Ph D Thesis UMIST, Manchester. UK
 9. Tan, Pi-Quang, e Lu, Jia-Xiang, 2001 Modeling for Particulate Matter Emission of Diesel Engines, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Journal of Automobile Engineering, Part D
 10. Tinaut, F.V., Melgar, A., and Horrillo, A.J., 1999, “Utilization of a Quasi-Dimensional Model for Predicting Pollutant Emissions in SI Engines”, SAE Technical Paper Series 1999-01-0223, SAE International Congress and Exposition, Detroit, Michigan, USA, March 1-4.