

Estudio del empleo de un convertidor catalítico para las emisiones gaseosas en un motor de ignición por chispa usando etanol como combustible.

K. C. R. Martins, F. Soto Pau^{*}, J. A. Silva^{}, A. M. dos Santos^{***}, R. F. E. Santos^{***}.**

Centro Federal de Educação Tecnológica do Maranhão (CEFET-MA). Departamento de Metal Mecânica. Avenida Getulio Vargas, n.04 Monte Castelo, son Luis, Maranhão. Brasil. Tel. (55)(98) 218 9044. e-Mail: kmartins@sc.usp.br

^{*}Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría (ISPJAE). Facultad de Ingeniería Mecánica. Departamento de Ingeniería del Transporte. Calle 116 s/n, CUJAE, Marianao 15, Ciudad de la Habana, Cuba. Telf. (537) 260 7731.

e-Mail: pauf@mecanica.cujae.edu.cu

^{**}Universidade Federal de son João del Rey. Pça Frei Orlando, 170, son João del Rey, Minas Gerais. Brasil. Tel: (55)(32) 3379 2617 – 2619.

e-Mail: jant@ufsj.edu.br

^{***}Escola de Engenharia de son Carlos - USP. Av.Trabalhador São-carlense N 400, son Carlos, son Paulo. Brasil. Tel: (55)(16) 273 9414, FAX: (55)(16) 273 9402

e-Mail: asantos@sc.usp.br

(Recibido el 15 de Diciembre de 2003, aceptado el 10 de Abril de 2004).

Resumen.

Con este trabajo de investigación se estudia el índice de emisiones gaseosas en un motor de ignición por chispa movido con etanol y se analiza el control de estas emisiones con aplicación de un convertidor catalítico platino/paladio (P_t/P_d) en el sistema de descarga del motor. Fueron realizados ensayos dinamométricos de un motor de combustión interna MCI para analizar las emisiones y el control de estas, en condiciones operacionales, en función de la rotación y ángulo de avance de ignición. El convertidor catalítico alcanzó un 75% de eficiencia cuando el ángulo de avance de ignición del motor aumentó para 16° . Se observó que en rotaciones de 2000 r.p.m el convertidor catalítico presentó mayor reducción de las emisiones de hidrocarburos no quemados HC, monóxido de carbono CO y óxidos de nitrógeno NO_x . Con la aplicación de un convertidor catalítico en un vehículo se debe estandarizar nuevas regulaciones en cuanto al ángulo de avance de ignición para optimizar el funcionamiento del motor.

Palabras claves: Convertidor catalítico; emisiones de escape; eficiencia catalítica; etanol.

1. Introducción.

Los efectos de la contaminación en el aire atmosférico, provenientes de las sucesivas sustancias gaseosas lanzadas por las industrias y principalmente por los automóviles, provocan fenómenos de desequilibrio ambiental que se manifiestan a través del calentamiento de la tierra, lluvias ácidas, mayor incidencia de rayos ultravioletas y otros fenómenos, que juntos ponen en riesgo toda la humanidad.

Según Heywood [6], los gases de escape de los MCI presentan, principalmente, concentraciones de óxido de nitrógeno (NO_x), hidrocarburos no quemados (HC) y monóxido de carbono (CO) cuando ocurren quemas incompletas de combustible en los cilindros en

diferentes regímenes de funcionamiento, esto ocurre en las regiones frías del cilindro donde la llama no se propaga, o aun a altas temperaturas de combustión que favorece la oxidación de las moléculas de nitrógeno. Estas emisiones automotrices por ser inertes y químicamente estables, dan origen a humo fotoquímico, debido a la ocurrencia de reacciones de estas sustancias con los rayos ultravioletas, formando productos de oxidación.

Los combustibles, alcohol, gasolina, diesel, biodiesel y sus combinaciones son aplicados en diversos motores. Cuando la combustión de estos combustibles es incompleta, los gases de escape contienen sustancias nocivas. El control de estas sustancias gaseosas en Brasil es establecido por la legislación que rige el

Programa de Control de la Contaminación del aire por Vehículos Automotrices (PROCONVE) que establece normas de control de las emisiones automotrices, además de estimular la ingeniería automotriz en la creación de tecnologías y dispositivos de combate a la contaminación del aire atmosférico. La tabla 1 muestra los límites máximos para las emisiones de escape de vehículos de pasajeros.

El funcionamiento irregular del motor o alteraciones de sus parámetros de operación, como rotación, punto de ignición y relación aire-combustible, ocasionan variaciones en las concentraciones de las emisiones de escape. Para entender mejor los patrones de exigencia de calidad del aire, fueron desarrollados sistemas de control de alimentación e ignición del motor.

Fue establecida una nueva disminución de los límites patrones de las emisiones automotrices, y los sistemas de control electrónico de alimentación y de ignición no eran suficientes para mantener el motor dentro de las normas exigidas de calidad del aire, lo que resultó la aplicación de sistemas catalíticos en el escape del motor, funcionando simultáneamente con los sistemas de inyección e ignición electrónica, incluso para los motores que funcionen con etanol, el cual es un combustible más limpio que la gasolina y el Diesel.

Los convertidores catalíticos, o simplemente catalizadores, convierten químicamente los contaminantes CO, HC y NO_x en emisiones menos nocivas como dióxido de carbono, vapor de agua y nitrógeno. Estos sistemas catalíticos de control de las emisiones vehiculares dependen de la relación en masa de aire-combustible, velocidad de los gases de escape y de la temperatura del catalizador.

Ferguson [4], afirma que los convertidores catalíticos presentan mejor desempeño cuando el motor opera con mezclas estequiométricas, o sea, para lambda unitaria ($\lambda=1$), permitiendo 80% de conversión simultánea de los contaminantes CO, HC y NO_x.

Según Günther y Kraus [5], la estrategia de alterar la mezcla aire-combustible para lograr una mejor reducción de los gases contaminantes a través de los convertidores catalíticos causa conflictos, pues si la mezcla pasa de rica a estequiométrica ocurre una reducción en las emisiones de CO y HC, pero los

niveles de NO_x aumentan y cuando el ángulo de avance de ignición aumenta, se acentúan los niveles de concentración de los contaminantes, en consecuencia de las altas presiones en la cámara de combustión.

1.1. Emisiones de escape automotrices.

Según D'Amato y otros [3], los contaminantes gaseosos de origen vehicular actúan como irritantes en las vías respiratorias, deterioran los tejidos aumentando su permeabilidad, haciéndolos más vulnerables a las infecciones virales y bacterianas. Bascom y otros [1], afirman que las enfermedades respiratorias están asociadas a la contaminación atmosférica, lo que permite mayor frecuencia de síntomas alérgicos y asma bronquial.

El monóxido de nitrógeno (NO) es formado por la combinación de nitrógeno con el oxígeno, en elevados picos de temperatura en la cámara de combustión.

El dióxido de nitrógeno (NO₂) es un gas de color rojizo y olor irritante; que cuando es inhalado se disuelve en la mucosa nasal donde forma rápidamente ácido nítrico. La formación de este ácido causa inmediata irritación de la mucosa de las vías respiratorias y también en los ojos. Los pulmones son afectados por tos y reacción bronco asmática.

El monóxido de carbono (CO) resulta de la oxidación incompleta del combustible bajo condiciones de aire insuficiente. La formación de monóxido de carbono aumenta con la disminución de la relación aire-combustible.

Wayne (1998) afirma que el monóxido de carbono es un gas incoloro y sin olor, que en altas concentraciones, por encima de 750 ppm, puede causar cambios fisiológicos y patológicos. El monóxido de carbono es un gas venenoso que priva el tejido del cuerpo de oxígeno necesario, esto debido a la gran afinidad de la hemoglobina con el CO.

Algunos hidrocarburos no quemados producen irritación en los ojos y en la membrana de la mucosa de la garganta, además de poseer un efecto narcótico y cancerígeno. Los hidrocarburos contribuyen a la formación de lluvia ácida y también reaccionan con los rayos ultravioletas produciendo el humo fotoquímico.

Tabla 1 - Límites máximos para las emisiones de escape de vehículos de pasajeros.

Año de fabricación	Hidrocarburos (HC)	Dióxido de carbono (CO ₂)	Monóxido de carbono (CO)	Oxígeno (O ₂)
Posterior 06/1988	< 600ppm	> 8%	< 3%	< 7%
A partir de 01/1992	< 400ppm	> 8%	< 2,5%	< 7%
A partir de 01/1997	< 100ppm	> 8%	< 0,5%	< 7%

Fuente: Günther y otros (1988)

1.2. Convertidores catalíticos.

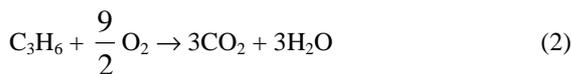
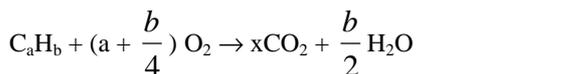
A pesar de que un catalizador acelere una reacción química, él nunca determina el equilibrio o el punto final de la reacción, de esta forma las reacciones químicas son únicamente influenciadas por las variables termodinámicas, como temperatura, presión y concentración de especies químicas involucradas.

Una solución de metales preciosos, utilizada individualmente o de forma combinada, recubre la superficie de la estructura cerámico (Al_2O_3) formando el catalizador del motor. El catalizador es envuelto por una manta expansiva, que sirve de sello, de protección mecánica y de aislante térmico; y en sus extremidades posee conos metálicos. Todo este conjunto da origen al convertidor catalítico, que es instalado en el tubo de escape del vehículo.

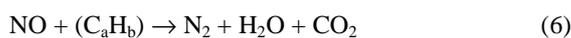
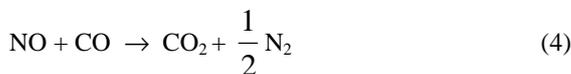
Para *Bhattacharyya* y *Randip* [2], escoger metales preciosos se debió a la necesidad de remover contaminantes en un corto tiempo del pase de gases relativo al tamaño del catalizador, con menor tiempo de reacción, además de la resistencia al envenenamiento y a la desactivación térmica, cuando es expuesto a altas temperaturas. Luego, el platino (Pt), el paladio (Pd) y el rodio (Rh) son los materiales catalíticos que más cumplen con los requisitos, haciendo que inicialmente el platino y el paladio fueran usados en los catalizadores de oxidación, y el rodio era incluido en el catalizador de tres vías por acelerar la reducción de NO_x en N_2 .

Las reacciones asociadas a los procesos de oxidación y reducción son las siguientes:

a) Reacciones de oxidación.



b) Reacciones de Reducción.



2. Metodología.

2.1 Bancada experimental.

La bancada experimental, como ilustra la Figura (1), consta de un convertidor catalítico de tipo P₁/P_d

instalado en el escape de un MCI de 4 cilindros movido con etanol, con inyección monopunto y cilindrada total de 1,987 litros, acoplado a un dinamómetro tipo corriente de *Foucault*, que permite variar las condiciones de rotación y carga del motor. Las condiciones de operación del motor fueron a carga parcial, 50% con las siguientes variaciones de rotación: 1500, 2000, 3000 y 4000 r.p.m. Para modificar el mapa de inyección e ignición de la central electrónica fue utilizado un instrumento denominado simulador *bit power* con *software* ECM 2001, que permite visualizar y modificar el mapa de la unidad de comando. Las emisiones de los contaminantes y las medidas de las presiones y temperaturas fueron colectadas en la entrada y salida del catalizador.

El control del escape de los gases enviados para el analizador de gases fue efectuado con auxilio de dos válvulas reguladoras de gases de tipo accionamiento rápido de ½ pulg., por donde los gases eran conducidos a través de un serpentín intercambiador de calor y a continuación seguían dos filtros para retirar el agua condensada antes de llegar al analizador de gases; esta precaución de evitar la entrada del agua condensada en el analizador de gases, es necesaria para evitar la corrosión de los equipos.

Para el análisis de la concentración de los gases de escape fue empleado un analizador de gases infrarrojos TM 131, que utiliza una celda electroquímica para medición de las concentraciones de CO, CO₂ y O₂. Para las mediciones de NO_x se utiliza una celda electrónica. El analizador fue calibrado con propano (C₃H₈). El aforado del equipo fue realizado con NO a una concentración de 1600 ppm y para el CO, una concentración del 4%, con certificado de aforación y garantía de 60 meses.

3. Resultados y discusiones.

3.1. Eficiencia catalítica.

La eficiencia de conversión de un catalizador automotriz es la relación entre la cantidad de masa gaseosa removida en el catalizador, que no es más que la diferencia de las derivadas con relación al tiempo del gas en cuestión que entra y sale por el convertidor catalítico y el flujo de masa del constituyente a la entrada del catalizador:

$$\eta_{cat} = \frac{\frac{dm_{gas_e}}{dt} - \frac{dm_{gas_s}}{dt}}{\frac{dm_{gas_e}}{dt}}, \quad (7)$$

A modo de ejemplo y para abreviar escritura, representando la derivada como un punto, para el HC, la fórmula es:

$$\eta_{cat} = \frac{m_{HC_e} - m_{HC_s}}{m_{HC_e}} = 1 - \frac{m_{HC_s}}{m_{HC_e}}$$

El catalizador es ineficiente para temperaturas inferiores a 250°C. Según *Ferguson* [4], la variación de la eficiencia de conversión de un catalizador en relación a la temperatura, puede llegar al estado de conversión de 98% para el CO y 95% para el HC.

Parte de los ensayos experimentales en el MCI con catalizador fueron realizados a 50% de la carga, a 2000 r.p.m y con ángulo de ignición de 14°. La figura 2 indica la eficiencia catalítica de los gases de escape calculados por la ecuación (7) y llevada a %, con relación a la variación del punto de ignición. Con auxilio de un *software* ECM 2001 se modificó el mapa de ignición de la central electrónica, variando el ángulo de ignición de 10° a 20°, y fue observado que la mayor eficiencia de conversión simultánea de los tres principales contaminantes; CO, HC y NO_x ocurrió para el ángulo de 16°.

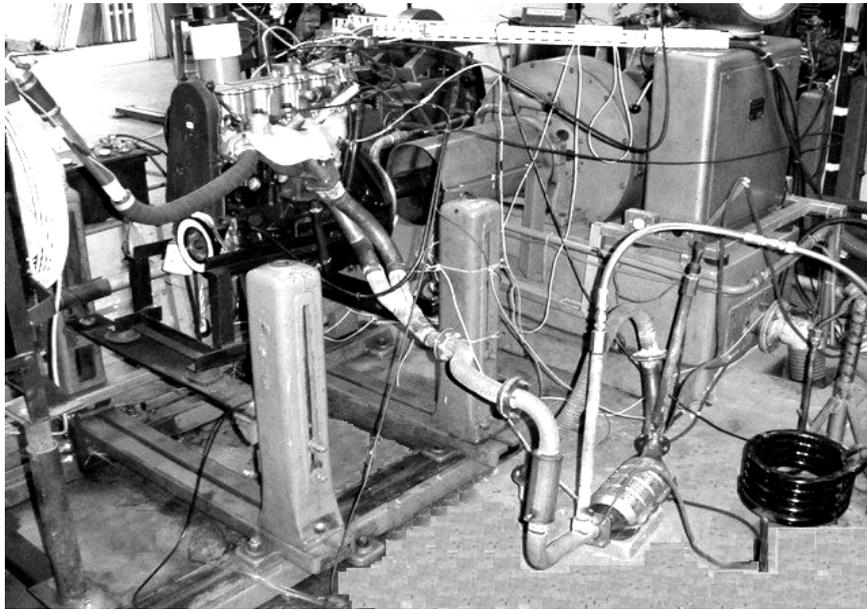


Figura 1 – Banco experimental.

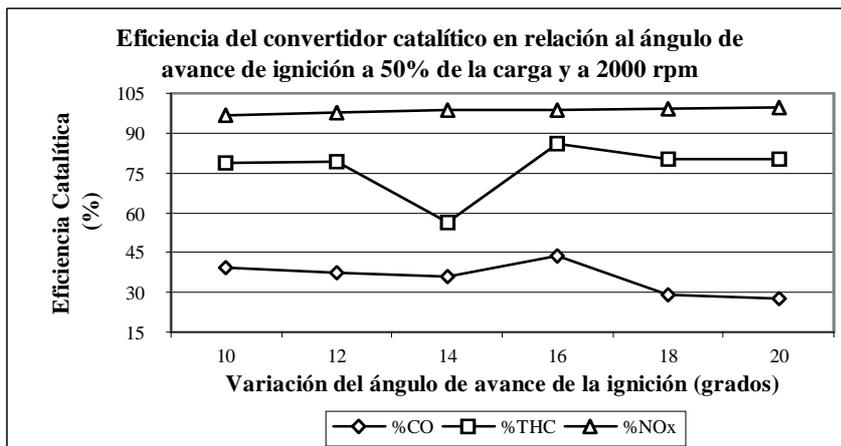


Figura 2 – Eficiencia del catalizador en relación a la variación del punto de ignición del motor.

3.2. Presencia de emisiones en la entrada y salida del convertidor catalítico.

Las figuras 3, 4 y 5 indican la presencia de emisiones de HC, CO y NO_x en la entrada y salida del convertidor catalítico a condición de operación del MCI de 50% de abertura de la mariposa a rotaciones de 1500 r.p.m a 3500 r.p.m, sin alterar la configuración normal del motor por el *software* ECM-2001. Se observa que las emisiones de HC decrecen con el aumento de las rotaciones en la entrada del catalizador debido a la creciente presencia de oxígeno, dando mayor eficiencia catalítica en el proceso de oxidación. Las concentraciones de CO en la entrada del catalizador

disminuyen hasta cerca de 2500 r.p.m, donde el MCI opera en condiciones estequiométricas, por encima de esta rotación las emisiones de CO aumentan, por causa del enriquecimiento de la mezcla a altas rotaciones. Al contrario de las emisiones de NO_x, que aumentan proporcionalmente a la elevación de la temperatura de la cámara de combustión, que a 2500 r.p.m llega a su máximo pico de temperatura en el rango estequiométrico. Por encima de 2500 r.p.m disminuyen las emisiones de NO_x, ya que según *Heywood* [6], las temperaturas de la cámara de combustión sufren una caída, debido al exceso de aire que enfría las paredes del cilindro de combustión.

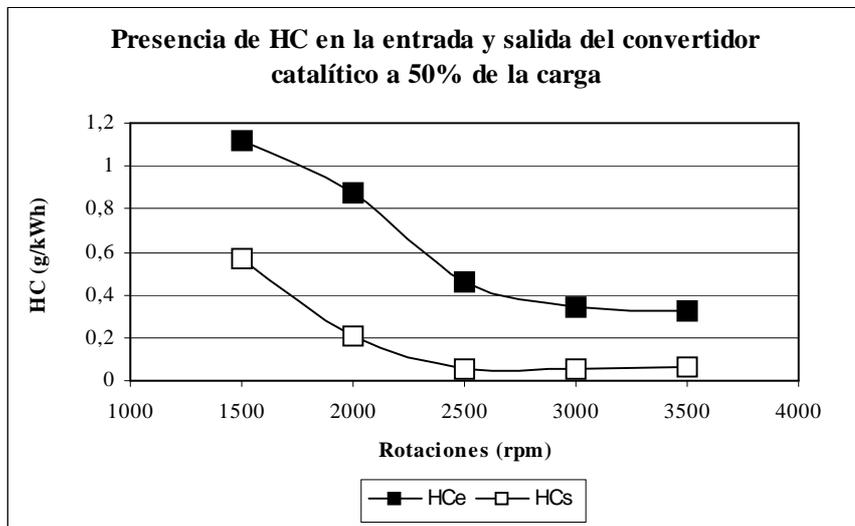


Figura 3 – Presencia de HC en la entrada y salida del convertidor catalítico.

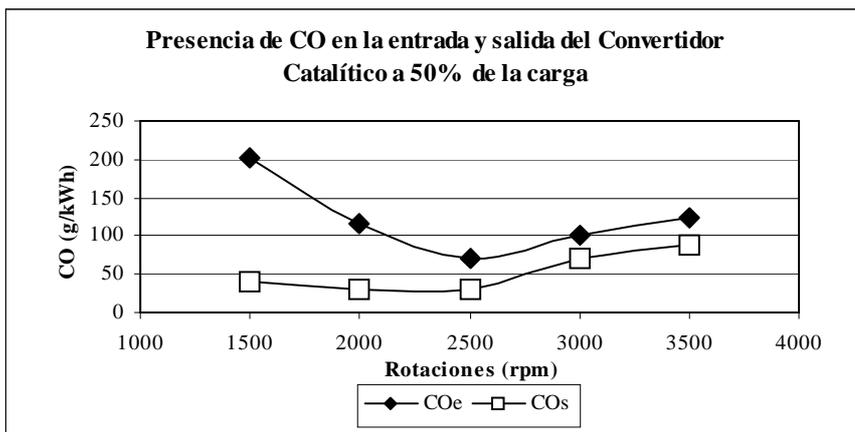


Figura 4 – Presencia de CO en la entrada y salida del convertidor catalítico.

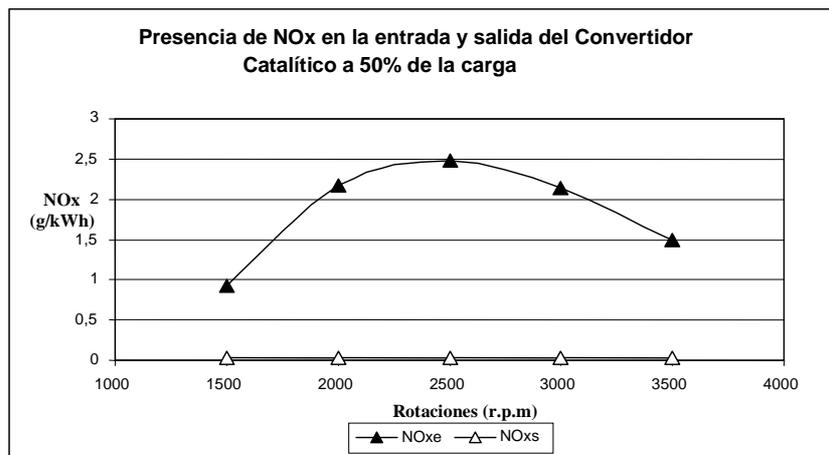


Figura 5 – Presencia de NO_x en la entrada y salida del convertidor catalítico.

Vale resaltar que trabajos que preceden este estudio (Soto Pau [7]), demostraron que los motores alimentados con etanol emiten mayor cantidad de NO_x que con gasolina, es por eso que los convertidores catalíticos modernos deben garantizar una alta eficiencia para la reducción de este gas, ya que son varios los países que ya usan como aditivo antidetonante el etano. Esta es la explicación de por que la curva correspondiente al comportamiento de NO_x mantuvo valores muy próximos a cero.

3.3. Efectos de la variación del ángulo de avance de ignición en las emisiones de escape a través del catalizador.

Las figuras 6, 7 y 8 ilustran la presencia de las emisiones de THC, CO y NO_x en la entrada y salida del convertidor catalítico, de acuerdo con la variación del punto de ignición del MCI, modificado a través del diagrama de ángulo de avance del software ECM 2001, para condiciones constantes de funcionamiento a 50% de abertura de la mariposa y 2000 r.p.m, con un valor constante de exceso de aire $\lambda = 0,93$.

Primeramente se ensayó con el punto de ignición normal del motor (14°), en el cual fueron medidas las emisiones en el catalizador, donde se obtuvieron eficiencias de 56% de THC, 36% de CO y 98,5% de NO_x. Seguidamente el punto de ignición fue atrasado para 12° y 10°, resultando un aumento de las emisiones de THC y CO, debido a la combustión incompleta, que elevó la cantidad de combustible no quemado en el escape, sus respectivas eficiencias catalíticas pasaron a 78% de THC y 39% de CO, contrario de la emisión de NO_x que disminuyó por la falta de oxígeno y su eficiencia pasó a 97% NO_x. Cuando el punto de ignición del MCI fue adelantado para 16°, 18° hasta llegar a 20°

donde la detonación es inminente, se observó que las emisiones de THC aumentaron principalmente para 16°, lógico, condición de mayor combustión incompleta comparado con los otros valores de ángulo (18° y 20°), por eso disminuyeron hasta llegar a 18°. Entre los ángulos de 18° y 20° las emisiones de THC permanecieron inalteradas, con cerca de 82% de eficiencia. Las concentraciones de CO bajaron con el ángulo de ignición adelantado, acompañado de mayor presencia de oxígeno en la combustión, la eficiencia catalítica pasó a 28% CO. Las emisiones de NO_x fueron elevadas con el aumento creciente de la ignición adelantada, pues las temperaturas de combustión aumentaron gradualmente favoreciendo los altos niveles de NO_x. La eficiencia de conversión fue de 99,5% de NO_x.

La variación del punto de ignición de 10° a 20°, en eminente detonación, permitió una elevación de las presiones y temperaturas en la cámara de combustión, propiciando mayor formación de NO_x, como ya fue visto en la figura 8, sin embargo, las temperaturas en la entrada del catalizador disminuyeron con el avance del ángulo de ignición adelantado. Para un MCI con punto de ignición correcto, la curva de presión en la cámara de combustión se muestra moderada, sin picos acentuados de presión. Por el contrario, el comportamiento de la curva de presión con ángulo de ignición muy adelantado, presenta picos de presiones elevadas, seguido de caídas bruscas de presiones después de la expansión de los gases, con consecuente disminución de la temperatura, quedando la curva de presión por debajo de la curva con punto de ignición correcto. Cuando la ignición es atrasada se presentan bajas curvas de presión.

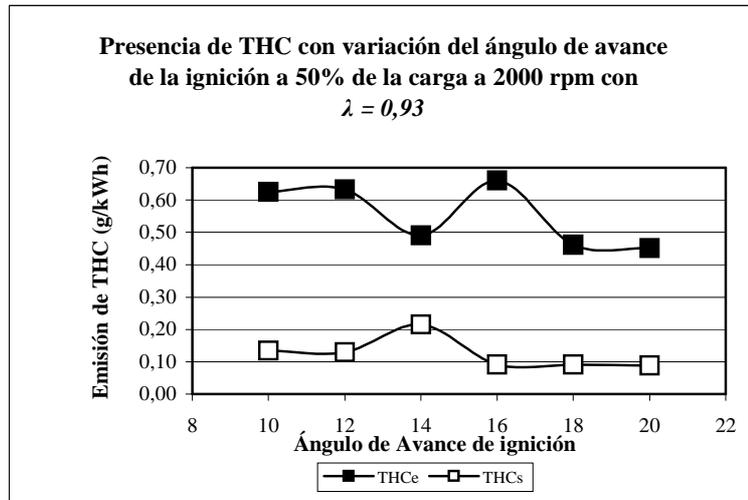


Figura 6 – Presencia de emisiones de THC en la entrada y salida del convertidor catalítico con variación del punto de ignición.

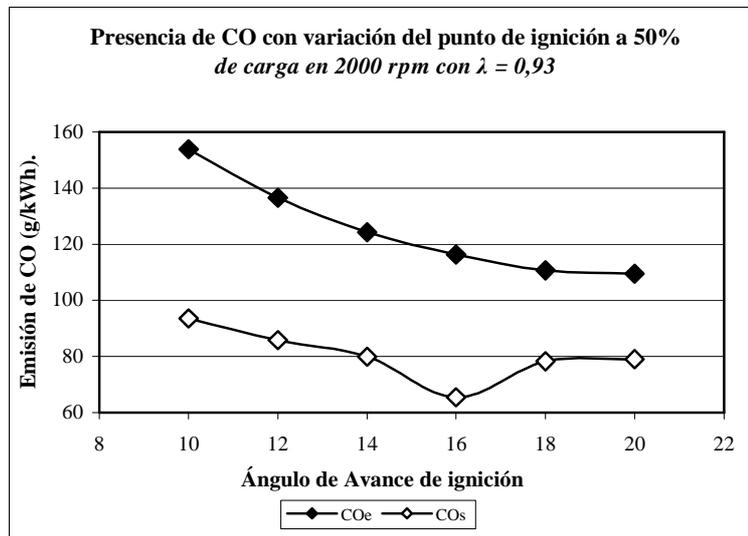


Figura 7 – Presencia de emisiones de CO en la entrada y salida del convertidor catalítico con variación del punto de ignición.

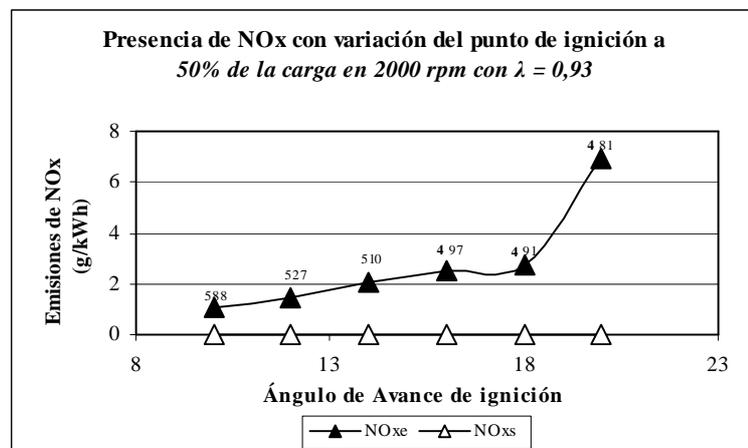


Figura 8 – Presencia de emisiones de NO_x en la entrada y salida del convertidor catalítico con variación del punto de ignición.

4. Conclusión.

El convertidor catalítico P_v/P_d contribuye fuertemente para disminuir los índices de emisiones de THC, CO y NO_x, principalmente para esos dos últimos gases en condiciones operacionales de 50% de abertura de la mariposa y en el rango de 1500 a 3500 r.p.m.

La elevación de la rotación del MCI provocó disminución de la presencia de emisiones de THC y CO a la entrada del catalizador debido al aumento de oxígeno, propiciando mayor oxidación y formación de H₂O y CO₂. Pero las emisiones de NO_x aumentaron proporcionalmente a la elevación de la temperatura de la cámara de combustión, teniendo mayor concentración a 2500 r.p.m, lo cual caracteriza condición estequiométrica del MCI.

Los ensayos demostraron que hay necesidad de determinar el punto de ignición óptimo para cada régimen de operación del motor, para obtener potencia máxima y consumo específico mínimo.

Debe llamarse la atención que para condiciones operacionales fuera de la mezcla estequiométrica ($\lambda=1$), la relación de conversión catalítica cae fuertemente, aumentando los índices de emisiones de esos gases estudiados.

Con el aumento del ángulo de avance de ignición la concentración de CO aumentó, la de NO_x disminuyó y la de THC permaneció prácticamente constante.

Agradecimientos.

A CNPq por el financiamiento del Proyecto CNPq n° 460283/01-4 que permitió la compra de los

convertidores catalíticos, de los combustibles y parte del montaje experimental.

5. Referencias.

1. Bascom, R. y colectivo. "State of art: health effects of outdoor pollution". Am. J. Respir Crit. Care Med. P.477-498, 1996.
2. Bhattacharyya Souvik y Randip Das K. "Catalytic Control of Automotive Nox: A Review". International Journal of energy Research, v.23, p.351-369, 1999.
3. D'Amato, G., Liccardi, G. y Cazzola M. "Environment and development of respiratory allergy". Monaldi Arcg. Chest. Dis. V.49, p.406, 1994.
4. Ferguson Colin R. "Internal Combustion Engines: Applied Thermo sciences". New York, 1986.
5. Günther, D.; Kraus, B. "Automotive Electric/Electronic Systems: Exhaust Emission Engineering". p. 304-340, 1988.
6. Heywood, John B. "Internal Combustion Engines: Applied Thermo sciences". New York, 1986.
7. F. Soto Pau "Análisis experimental de los fenómenos de la combustión y de las emisiones de gases en MCI utilizando mezclas de combustibles alternativos con gasolina". Tesis presentada en opción de grado científico de Doctor en Ciencias. 2002.
8. Wark, K.; Warner, C. F.; Davis, W. T. "Air Pollution – Its Origin and Control". Third edition. Addison Wesley Longman, USA, 1998.

Study of the employment of a catalytic convertor for the gassy emissions in an spark ignition engine using ethanol fuel.

Summary.

With this investigation work the index of gassy emissions is studied in an spark ignition engine using ethanol, the control of these emissions is analyzed with application of a platinum/palladium (Pt/Pd) catalytic convector in the engine discharge system. Rehearsals carried out in engines in order to analyze the emissions and the control of these, under operational conditions, in function of the rotation and angle of ignition advance were carried out. The catalytic convector reaches 75% of efficiency when the ignition advance angle of the engine increased to 16°. It was observed that in rotations of 2000 r.p.m the catalytic convector presented bigger reduction of the emissions of non-burnt hydrocarbons HC, monoxide of carbon CO and nitrogen oxides NO_x. With the application of a catalytic convector in a vehicle should be standardized new regulations for the ignition advance angle in order to optimize the motor operation.

Key words: Catalytic convector; escape emissions; catalytic efficiency; ethanol.