

COMBUSTIBLES A BASE DE MEZCLAS DE CARBON Y AGUA
COMO UNA ALTERNATIVA VIABLE PARA LA INDUSTRIA ELECTRICA

Por

Dr. Juan A. Bonnet, Jr., Director
Dr. Modesto Iriarte, Consultor



CENTER FOR ENERGY AND ENVIRONMENT RESEARCH
UNIVERSITY OF PUERTO RICO -- U.S. DEPARTMENT OF ENERGY

COMBUSTIBLES A BASE DE MEZCLAS DE CARBON Y AGUA
COMO UNA ALTERNATIVA VIABLE PARA LA INDUSTRIA ELECTRICA

Por

Dr. Juan A. Bonnet, Jr., Director
Dr. Modesto Iriarte, Consultor

COMBUSTIBLES A BASE DE MEZCLAS DE CARBON Y AGUA
COMO UNA ALTERNATIVA VIABLE PARA LA INDUSTRIA ELECTRICA*

Por

Dr. Juan A. Bonnet, Jr., Director
Dr. Modesto Iriarte, Consultor

Centro para Estudios Energéticos y Ambientales
Universidad de Puerto Rico

El interés de la industria eléctrica en conseguir combustibles alternos al petróleo es de primerísima prioridad. El combustible líquido fabricado de mezclas de carbón pulverizado con agua representa una alternativa atractiva. El Colegio Dominicano de Ingenieros, Arquitectos y Agrimensores en su revista Codia informa de planes esbozados por la Compañía Falconbridge C. por A. para la posible conversión de la Central Haina para utilizar este combustible. (1)

MEZCLAS DE CARBON Y AGUA

Las mezclas de carbón y agua (MAC) tienen propiedades térmicas y físicas similares al aceite residual, pero a un costo menor por millón de BTU debido a la diferencia en precio con relación al carbón. En su producción, donde se utiliza carbón de buena calidad, el primer paso es la pulverización; luego se combina con una cantidad fija de agua y con un volumen pequeño de aditivos especiales.

Ya para mediados de la década de 1960, cuando aún no se vislumbraba la dislocación de los precios del petróleo en el mercado mundial, se comenzaron los experimentos con la quema de combustible MAC. Las primeras investigaciones fueron informadas en el año 1965 por los rusos⁽²⁾⁽³⁾ y por los alemanes⁽⁴⁾⁽⁵⁾ en 1966 y 1967.

*Conferencia dictada en el CODIA, Santo Domingo el 14 de marzo de 1984. Se agradece la contribución técnica de los ingenieros de la AEE Rolando Lugo Cancio y Jorge El Koury.

Para fines de la década del 70 la Atlantic Research Corporation realizó pruebas extensas con la quema de MAC en un túnel refractorio.⁽⁶⁾⁽⁷⁾ Babcock & Wilcox también han realizado pruebas de quema de MAC.⁽⁸⁾⁽⁹⁾

A fines de la década pasada y principios de la presente se llevaron a cabo pruebas extensas en la quema de MAC por el Pittsburgh Energy Technology Center, financiadas por el Departamento de Energía de los Estados Unidos.⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾⁽¹²⁾

Japón (FUJOGROUP), Italia (ENEL) y Suecia (Fluid Carbon) han contribuido recientemente al desarrollo de esta tecnología. En el Quinto Simposio Internacional de MAC y su Tecnología celebrado en Tampa, Florida en abril 25-27 de 1983 se presentó un gran número de ponencias sobre esta tecnología y sus futuros desarrollos.⁽¹³⁾ La más reciente reunión sobre este tema auspiciada por EPRI (Electric Power Research Institute) de Palo Alto, California y celebrada en agosto 23-24 de 1983 en Memphis, Tennessee igualmente presentó nuevos desarrollos⁽¹⁴⁾ y auspició una visita a una caldera industrial de la Dupont en esa ciudad que está quemando MAC exitosa y limpiamente. Esta caldera fue diseñada y construida en 1953 para quemar sólo gas y aceite y tiene una capacidad de 60,000 libras por hora.

La Florida Power and Light anunció en las mencionadas conferencias la conversión de las unidades 1-2 de Sanford de capacidad de 400 MW cada una y las unidades 1-2 de Central Martin de 800 MW para quemar MAC.

Combustion Engineering ha logrado valores de quema de 80 millones de BTU por hora por quemador y espera aumentar esta capacidad próximamente de acuerdo con los informes de la última conferencia de EPRI. Canadá también anunció en la reciente conferencia de EPRI la conversión de una unidad Foster Wheeler de 12 MW y una de Combustion Engineering de 24 MW.

La tecnología para la quema de combustible MAC requiere que el aire de combustión se mantenga por lo menos en 316°F para alcanzar una flama de combustión estable. En un horno de central termoeléctrica la temperatura del aire de combustión está muy por encima de este valor, lo cual no representa dificultad alguna. Se ha demostrado en las instalaciones mencionadas que una distribución de 60% carbón y 40% de agua se quema satisfactoriamente. Se han alcanzado rendimientos de más de 96% con la quema del carbón con exceso de aire de 16% y temperaturas del aire de combustión en 490°F sin haber tratado de optimizar las condiciones isokinéticas. La pérdida de rendimiento debida a la evaporación del agua en el combustible MAC representa un 5-6% de reducción de la eficiencia de la caldera.

La separación de las partículas de carbón en el combustible MAC se evita exitosamente manteniendo la agitación y recirculación del MAC. La velocidad de los gases de combustión, que depende de los parámetros operacionales de la caldera, son comparables con la condición de quema de aceite Bunker C. Los efectos erosionales de las cenizas pueden reducirse sustancialmente optimizando el tamaño del particulado.

Se ha demostrado por el PETC que las cenizas o emisión de particulado pueden correlacionarse directamente con el tamaño del grano de carbón a quemarse y es inversamente proporcional con el tamaño de partículas. Por otro lado, el depósito en los tubos de la caldera que afecta adversamente los coeficientes de transferencia de calor es directamente proporcional con la fineza de las partículas del carbón a quemarse. El soplado adecuado y frecuente de la caldera ha demostrado ser una solución adecuada. El carbón de Pittsburgh con temperatura de ablandamiento de 2400°F no presentó dificultades. Este es un parámetro muy importante en las especificaciones del carbón que va a quemarse en las centrales de Haina y/o Santo Domingo.

La principal dificultad encontrada en la quema de MAC ha sido en la erosión de la punta de los quemadores, lo que ha requerido cambios frecuentes de la punta de éstos. Se están diseñando nuevos quemadores de metales más duros para este propósito. Combustion Engineering, bajo

contrato con el Departamento de Energía de Estados Unidos, está evaluando los mejores metales para carbones de diferentes calidades.

La técnica de ingeniería e información requerida para el cálculo y diseño de tubería por caída de presión debido al flujo de MAC ha sido debidamente evaluada en PETC y al presente se cuenta con suficiente información de Reynolds Numbers, Prandtl y otros, y tablas para flujos de diferentes grados de turbulencia.

La proporción relativa de carbón a agua (usualmente dada en por ciento por peso) variará dependiendo del contenido de calor del carbón usado y de las propiedades térmicas deseadas del combustible líquido. Generalmente la proporción resultante fluctúa entre 60% carbón/39% agua 75% carbón/24% agua, siendo el por ciento restante aditivo. Las mezclas cuyo contenido de carbón es menor de 60% por peso presentan más dificultades para una combustión estable. Aquellas con un contenido de carbón mayor de 75% por peso pueden causar dificultades en el flujo, manejo y atomización. Los aditivos empleados en estas mezclas que fluctúan entre 0.2 y 1.5% por peso de mezcla total contribuyen a mejorar la estabilidad durante su transportación e inhiben el crecimiento bacterial, además de que permiten un manejo eficiente a través de las tuberías y tanques de almacenamiento. Tanto la composición química como la concentración de aditivos dependerá de la calidad del carbón y las características de bombeo deseado. La información específica sobre estos aditivos es considerada generalmente como confidencial por parte de los suplidores de estas mezclas.

Las modificaciones principales a incorporarse en una central de combustión de aceite para hacer posible la quema de combustible MAC están ilustradas en la Figura 1.

VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE MEZCLAS CARBON Y AGUA¹⁵

La conversión de una planta para utilizar carbón/agua resulta aproximadamente entre 20-40 por ciento menos del costo, comparada con una convertida para utilizar carbón pulverizado. No se necesitaría construir

instalaciones portuarias para su descargas, ya que se utilizarían las mismas que se usan para el recibo y el almacenamiento del aceite residual. De igual manera, no sería necesario tener una pila de carbón almacenado, correas portadoras, "bunker" y pulverizadores. Las unidades convertidas a carbón/agua pueden mantener la flexibilidad de operar con petróleo, manteniendo así 100% de su capacidad nominal disponible cuando quema aceite residual.

Una de las desventajas del uso de estas mezclas es la posible reducción en la capacidad nominal de las unidades, la cual podría estar en el orden de 25%, dependiendo del diseño original de cada caldera, y del efecto de las cenizas producidas en la combustión. También se produce una pérdida en la eficiencia de las calderas de alrededor de un 5-6 por ciento según indicado anteriormente, debido a la evaporación de agua. El contenido calorífico de MAC puede ser 40% del aceite residual a base de peso. Manteniendo los mismos tanques de almacenamiento de combustible, su capacidad se reduciría debido a esta diferencia en contenido calorífico. En la transferencia de la mezcla se requieren bombas y tuberías de mayor viscosidad. Para quemar esta mezcla hay que realizar modificaciones a las calderas actuales.

STATUS DE SU DESARROLLO COMERCIAL

La producción de la mezcla de carbón/agua es actualmente muy limitada; sin embargo, continúan surgiendo nuevas compañías interesadas en su producción y no debe haber duda de que habrá un abastecimiento adecuado a medida que surja la demanda por este producto. Dichas compañías, unidas a importantes firmas de ingenieros-arquitectos, han formado asociaciones comerciales, las cuales están dispuestas a suplir el combustible.

La Florida Power & Light Co. ha tomado la iniciativa para desarrollar esta nueva tecnología y ha presupuestado la cantidad de \$1.5 millones para investigar durante este año, con el propósito de convertir poste-

riormente sus unidades de 400 MW, diseñadas previamente para petróleo, a carbón/agua.

Otra unidad comercial con carbón/agua la está realizando Fluidcarbon Sweden, un consorcio de compañías suecas. El proyecto envuelve la construcción de instalaciones para producir unas 275,000 toneladas al año de la mezcla carbón/agua en Malmo, Suecia. Esta compañía supliría el combustible a clientes industriales y a compañías productoras de electricidad.

Pruebas del carbón/agua se llevaron a cabo por EPRI en una caldera industrial de la Dupont Chemical Company en Memphis, Tennessee. La caldera de 60,000 libras por hora tiene cinco quemadores especialmente diseñados para 15 millones de BTU por hora. La prueba--la de mayor duración en los E.U.-- duró varios días, utilizando unas 2400 toneladas (11,000 barriles) de carbón/agua. No hubo problemas operacionales significativos. El combustible fue transportado por trenes hasta el lugar de la prueba, permaneciendo almacenado en un vagón de tren por catorce semanas antes de ser utilizado. Este hecho comprobó la capacidad de estas mezclas para ser transportadas sin que ocurrieran problemas de sedimentación.

Al presente se continúan realizando estudios abarcadores en cuanto al uso de estas mezclas. Entre éstos figuran la determinación del tamaño de las cenizas producidas bajo diferentes condiciones, encaminado a minimizar la reducción en la capacidad nominal de las unidades modificadas. Respecto a los quemadores, se interesa prolongar el tiempo de reemplazo de su punta a más de 2,000 horas. Actualmente se están desarrollando con éxito quemadores y atomizadores que permitirán encendido en un horno frío, tendrán una operación estable, emplearán condiciones de atomización (presión y flujo) similares al aceite residual, y se podrá obtener una eficiencia de conversión de carbono comparable al residual.

EFFECTOS EN LA COMBUSTION AL QUEMAR LAS MEZCLAS

El éxito del desarrollo de las mezclas carbón/agua depende de que se encuentren maneras para minimizar los problemas relacionados con las cenizas producidas y optimizar su combustión.

La cantidad de ceniza producida al quemar la mezcla, que no es significativa al utilizar aceite residual, representa un factor de gran importancia en esta tecnología. Las diferencias básicas que existen entre las calderas diseñadas exclusivamente para la quema de aceite residual y aquellas para el uso del carbón tendrán un efecto en la combustión de la mezcla.

En las calderas diseñadas para aceite residual el tamaño del horno es menor que para aquellas diseñadas para quemar carbón con igual capacidad. Aunque la razón de salida de calor es mayor, el tiempo de residencia para el enfriamiento de los gases es menor, siendo la velocidad de los gases de salida ("flue gases") mayor a la entrada de los pasos de convección del horno. Estos factores podrían hacer necesario que se tenga que limitar su capacidad nominal para mantener dentro de límites aceptables de limpieza las áreas de transferencia de calor y al mínimo la abrasión de las partes que componen la caldera.

Existen varios factores que actúan como topes o límites respecto al porcentaje máximo de capacidad disponible al quemar la mezcla en calderas para aceite residual. El primero de éstos es la abrasión de los tubos del paso de convección del horno, debido a la velocidad mayor de los gases de combustión, compuesta de ceniza fugaz ("flyash"). Otro factor limitante es la degradación ("fouling") de los tubos de paso de convección, debido a la cercanía de ellos, comparado con su separación en los hornos para quemar carbón. Aún otro factor que determina la reducción en capacidad es la formación de encrustaciones ("slagging") en los tubos de las paredes del horno. Una vez superados los factores anteriores, obtener una quema de carbón adecuado sería el próximo paso. La secuencia exacta del comportamiento de estos factores en cuanto al obtener la

capacidad máxima posible variará de acuerdo con el combustible específico y la caldera que se considere modificar.

Los estudios han demostrado que los índices que utiliza la industria para clasificar el carbón respecto a su potencial para causar "slagging and fouling" en las calderas aplican también a las mezclas carbón/agua. Los índices del carbón padre, el utilizado en su elaboración, resultan inalterables cuando son aplicados a las mezclas originadas por él. Este hecho nos permite evaluar las propiedades de las cenizas respecto a su comportamiento en las calderas, el cual es un factor más importante que la misma cantidad de ceniza producida.

PROPIEDADES QUIMICAS

El contenido de azufre es sumamente bajo, lo cual representa cantidades menores en las emisiones de dióxido de azufre.

El contenido de ceniza de la mezcla, aunque sumamente bajo comparado con el carbón pulverizado, resulta elevado al compararse con el petróleo. Por tal razón será necesario añadir equipos, como precipitadores electrostáticos, para atrapar la ceniza producida y evitar que vaya al ambiente.

Un contenido de ceniza de 5% o menos es deseable para el carbón/agua, ya que la unidad retiene un porcentaje mayor de capacidad nominal. La cantidad de ceniza producida será también menor, reduciendo así los costos envueltos en su desecho. Hay varios posibles usos para la ceniza de carbón.

Para obtener mezclas de carbón/agua cuyas características resulten en la reducción mínima de capacidad, los fabricantes de las mezclas emplean carbón de alta calidad en su preparación.

El contenido de ceniza de este carbón es bajo (seis por ciento o menos). La volatilidad es alta y su contenido calorífico también: tienen una temperatura de fusión y un índice de triturabilidad altos, facilitando

su pulverización a partículas muy pequeñas antes de mezclarse con el agua y aditivos para elaborar la mezcla de carbón.

También podrían producirse mezclas de un contenido de cinco por ciento de ceniza o menos, con una recuperación de 90% (BTU), utilizando los procesos de mejoramiento del carbón.

Se están desarrollando métodos para pulverizar el carbón a partículas sumamente pequeñas, en los cuales se podría utilizar carbón de menor calidad. Esto promete minimizar aún más el efecto de las cenizas en la combustión de las mezclas y reducir al mínimo la degradación de capacidad en las calderas diseñadas para aceite residual. Al presente estos métodos resultan muy costosos debido a su desarrollo y economías de escala. El contenido de ceniza de estas mezclas puede ser de menos de dos por ciento.

ASPECTOS ECONOMICOS

El contenido calorífico de una mezcla de carbón/agua típica es de alrededor de 20 millones de BTU por tonelada. El costo de este combustible es de menos de \$3.50 por millón de BTU, incluyendo limpieza, procesamiento y transportación.

Al comparar este costo con el precio actual del aceite residual, \$4.50 por millón de BTU, obtenemos una diferencia de un dólar por millón de BTU a favor del uso de las mezclas carbón/agua, equivalente a 25% de ahorro en costos de combustible en términos de BTU.

La localización de las plantas de producción de estas mezclas tienen sin lugar a dudas un impacto importante en cuanto a su costo de producción. El recibo del carbón para procesarse y su posterior transportación a los usuarios afectaría el precio. Su localización, ya sea en de la misma mina o en el puerto de exportación, será determinada por razones económicas, según la oferta y la demanda. El precio relativo de las mezclas comparado con el aceite residual podría ampliarse en el futuro al establecerse nuevas plantas de producción de mayor capacidad.

CONCLUSION

La conversión de centrales eléctricas de petróleo para la utilización de mezclas de carbón pulverizado en el agua se ha presentado como una alternativa técnicamente viable y económica para las compañías eléctricas e industriales. Por supuesto antes de su implementación en cada caso se requiere un estudio de viabilidad donde se analicen todos los parámetros discutidos en este trabajo. El establecimiento de un suministro adecuado y confiable de mezcla de carbón pulverizado en agua, la determinación de la viabilidad de los cambios de ingeniería necesarios en la planta y un análisis económico detallado de la conversión son indispensables.

El MAC puede ser utilizado como combustible alterno en una planta generadora diseñada para utilizar sólo petróleo como combustible sin afectar significativamente la eficiencia de la planta, la confiabilidad de operación, o afectar adversamente el medio ambiente. De esta manera se puede utilizar equipo existente y reducir los costos de conversión y de combustión.

TABLA 1

MODIFICACIONES PARA QUEMAR MEZCLAS DE CARBON/AGUA EN CALDERAS DISEÑADAS PARA ACEITE RESIDUAL

1. Quemadores y Sistema de Encendido
2. Recogedor de Ceniza y Auxiliares
3. Conductos de Convección
4. Sopladores de Desperdicios (Sootblowers)
5. Modificaciones de los Pasos de Convección
6. Abanicos de tiro inducido (si necesario)
7. Controles y Misceláneos
8. Bombas y Tuberías

TABLA 2

NOMBRE COMERCIAL PARA MEZCLAS DE CARBON/AGUA
Y LAS COMPAÑIAS QUE LAS REPRESENTAN O PRODUCEN

ARC-COAL	- Atlantic Research
CARBOGEL	- Foster Wheeler representa esta compañía en Estados Unidos
FLUID CARBON	- Allis-Chalmers y Fluid Carbon Inter- national firmaron acuerdo para pro- ducir y mercadear el producto en Estados Unidos
CO-AL	- Ashland Oil se unió a Babcock & Wilcox para manufacturar este pro- ducto.
OXCE FUEL	- La Occidental Petroleum Corp. se ha unido a la Combustion Engi- neering para investigar, desarro- llar y producir mezclas carbón- /agua.
ADVANCED FUELS TECHNOLOGY	- Una compañía Gulf & Western. Re- cientemente adquirida por la Stan- dard Oil Co. (Ohio)
COMCO	- Electric Fuels Corp. Producía mezcla carbón/aceite para la Flori- da Power Corp.
COALIQUID	- Subsidiaria de McConnell Douglas

TABLA 3
PROPIEDADES NOMINALES DE MEZCLAS DE CARBON Y AGUA

<u>PROPIEDAD</u>	<u>MEZCLA CARBON Y AGUA</u>	<u>ACEITE RESIDUAL</u>
Millones de BTU/Barril	4.2	6.3
Densidad (Lb/Gallon)	10.0	7.8
Temperatura de la flama (Grados F)-(20% de exceso de aire)	3150	3300
Viscosidad (CP)	1000	No hay flujo
% Azufre	Menos de 0.7%	0.3% a 2.8%
% Ceniza	3.6%*	0.02%

*Siendo un carbón de bajo contenido de ceniza.

TABLA 4

UTILIZACION DE LAS CENIZAS PRODUCIDAS EN UNA PLANTA DE CARBON COMO RECURSO MINERAL

A. CENIZAS DE FONDO

1. Agregado liviano
2. Relleno base para carreteras
3. Agregado subbase para carreteras
4. Pavimento bituminoso
5. Drenaje

B. CENIZAS FUGACES

1. Puzolánico
 - a. Fabricación de cemento
 - b. Concreto mixto
 - c. Grandes volúmenes de concreto
2. Material de relleno
3. Productos estructurales
 - a. Tubos de concreto
 - b. Bloques de concreto
4. Mejoramiento de las aguas y el terreno
 - a. Tratamiento aguas contaminadas
 - b. Neutralización del terreno
 - c. Fertilizante
 - d. Reclamación terreno de minas
5. Otros
 - a. Agregado liviano
 - b. Lechadas
 - c. Recuperación de metales valiosos

REFERENCIAS

1. CODIA 64. "Estrategia para el Desarrollo del Sector Energía Eléctrica." Falconbridge, C. por A. [1982?].
2. Delygin, G.N. "Regularities of the Combustion of Pulverized Coal-Water Suspension in an Air System." Inst. Goryuch. Iskop., 72-83 (1965).
3. Davydova, I.V., G.N. Delygin, B.V. Kantowitch, V.S. Levanevsky. "Experimental Investigation of Combustion of Coal-Water Suspension." Inst. Goryuch. Iskop., 140-145 (1965).
4. Schwartz, O. and H. Merten. "Preparation, Transportation and Combustion of Coal-Water Suspensions." Brennst-Warme-Kraft 19, No.10, 474-478 (1966).
5. Schwartz, O. and H. Merten. "Direct Burning of Coal-Water Suspensions in Power Plants." Gluckauf 2:215-231 (1967).
6. Scheffee, R.S. and E.T. McHale. "Development and Evaluation of Highly-Loaded Coal Slurries." Proceedings of the Second International Symposium on Coal-Oil Mixture Combustion, Vol. 2 (CONF-791160), Pittsburgh Energy Technology Center, Pittsburgh, PA (1979).
7. Scheffee, R.S., N.P. Rossmeissl, T.J. Boyd, C.B. Henderson, and E.T. McHale. "Development and Burning of Coal-Water Slurries." Proceedings of the Third International Symposium on Coal-Oil Mixture Combustion, Vol. 1 (CONF-810498), Pittsburgh Energy Technology Center, Pittsburgh, Pennsylvania, 182-195 (1981).
8. Funk, J.E., D.R. Dinger, J.E. Funk, Jr., D.F. Funk, S.J. Vecci, G.A. Farthing, Jr., and S.A. Johnson. "Combustion Tests of a High Solids Coal-Water Fuel--Co-Al." Presented at the Governor's Conference on Expanding the Use of Coal in New York State, Albany, New York, May 21-22, 1981.
9. Ghassemzadeth, M.R., T.M. Sommer, G. Farthing, and S. Vecci. Rheology and Combustion Characteristics of Coal/Water Mixtures." Presented at American Flame Research Committee's International Symposium on Industrial Fuel Technology, Chicago, Illinois, October 5-7, 1981.
10. Pan, Y.S., G.T. Bellas, D. Lunifeld, and J.I. Joubert. "Coal-Oil Mixtures: A Near-Term Approach to Conserving Petroleum." Preprint No. 81-Pet-22, presented at ASME energy-Sources Technology Conference and Exhibition, Houston, Texas, January 18-22, 1981.
11. Pan, Y.S., G.T. Bellas, M.P. Mathur, J.I. Joubert, and D. Bienstock. "Recent Coal-Oil Mixture Combustion Tests at PETC." DOE-/PETS/TR-80/5, Pittsburgh Energy Technology Center, Pittsburgh, Pennsylvania, June 1980.

12. PETC Internal Report. Exploratory Coal-Water and Coal-Methanol Mixture Combustion Tests in Oil Designed Boilers.
13. 5th International Symposium on Coal-Slurry Combustion and Technology, April 25-27, 1983. Tampa, Fla.
14. EPRI Coal Water Slurry Project Review, Aug. 23-24, 1983. Memphis, Tennessee.
15. Lugo Cancio, Rolando y El Koury, Jorge, Mezclas de Carbón y Agua (MAC) para la Industria Eléctrica. Conferencia presentada en el Colegio de Ingenieros y Agrimensores de Puerto Rico en el Mini-Congreso COPIMERA en marzo 9, 1984.

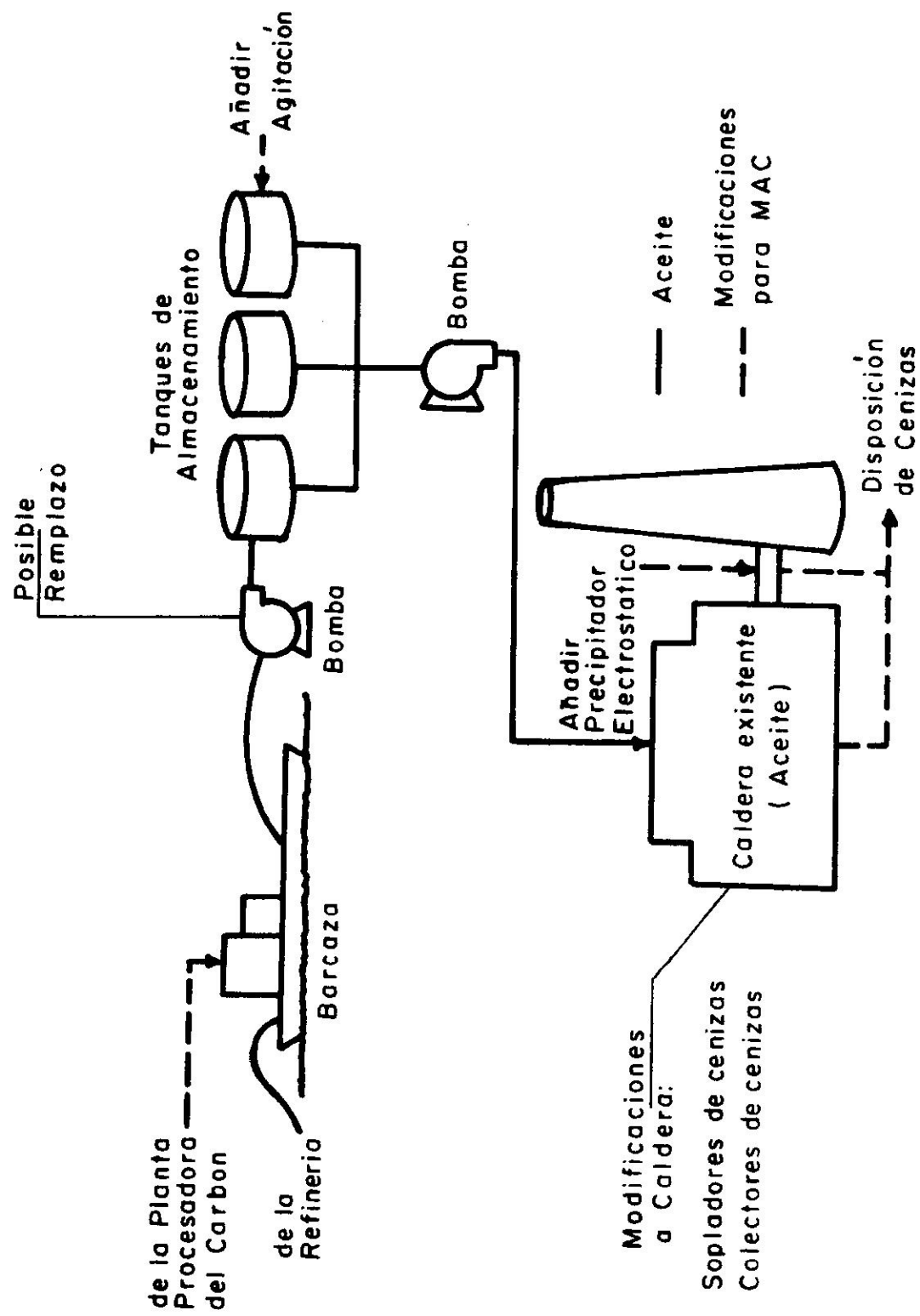


Figura I. MODIFICACIONES PARA QUEMAR MAC

