



ISSN 1029-3450



Comportamiento Termodinámico de un ORC operando con varias sustancias para el aprovechamiento de Fuentes Térmicas de Bajo Potencial.

Thermodynamic behavior of an operating ORC with various substances for the use of Low Thermal Potential Power.

Dr. Artemio de Jesús Benítez Fundora

Laboratorio de Investigación en Energía Facultad de Ingeniería, Campus

Coatzacoalcos Universidad Veracruzana. Méjico

E-mail: abenitez@uv.mx

Dr. Francisco Espinosa Arenal

M.Sc. Oscar Fernando Silva Aguilar

Laboratorio de Investigación en Energía Facultad de Ingeniería, Campus

Coatzacoalcos Universidad Veracruzana. Méjico

RESUMEN

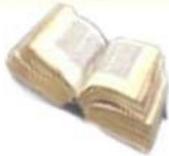
En el presente artículo, se muestra el estudio preliminar relacionado con la selección y propuesta de varios fluidos para operar un Ciclo Rankine Orgánico (ORC) con el fin de recuperar el calor de desperdicio de fuentes industriales. El principal criterio de selección fue definido teniendo en cuenta la temperatura promedio de la fuente industrial de calor y su disponibilidad. Finalmente, son recomendados dos grupos de sustancias para la recuperación de calor de los gases de combustión emitidos por calderas industriales o calentadores a fuego directo; y para efluentes líquidos de una planta industrial, basándose el análisis en la eficiencia obtenida por el ciclo y el nivel de potencia eléctrica generada por el mismo.

Palabras claves: Comportamiento termodinámico, ciclo rankine orgánico, fuentes térmicas de bajo potencial.

ABSTRACT

In this paper, a preliminary study related to the selection and proposal of several organic fluids, to operate an ORC facility to recover the waste heat from industrial sources, is presented. The main selection criterion was defined by the industrial heat source average temperature, and availability. Finally, two groups are recommended to be used for the waste heat recovery from the rejected combustion gases of boilers or fired heaters, and for liquid effluents from an industrial plant; based of the cycle efficiency and the level of electric power produced.

Keywords: Thermodynamic behavior, organic rankine cycle, low-potential heat sources.



ISSN 1029-3450



INTRODUCCION

El estudio de ORC's con el propósito de lograr un máximo aprovechamiento de la energía en ciclos Rankine con regeneración y recalentamiento intermedio de Centrales Termoeléctricas actuales o de Ciclo Combinado, al operar estos ciclos orgánicos como ciclo inferior en una combinación de ciclo binario o ternario; ha avanzado considerablemente en los últimos años, existiendo pleno consenso en cuanto a los tipos de sustancias más recomendables para operarlos [1].

Sin embargo, muy poca atención se le ha prestado a la recuperación de energía proveniente de otro tipo de industrias como la química y la petroquímica; donde los niveles de emisiones de efluentes térmicos son mucho mayores que los de la industria de generación de electricidad.

El presente trabajo propone el estudio de un grupo de sustancias que independientemente de factores químico-biológicos como pueden ser sus niveles de toxicidad o su punto de inflamación que serán objeto de un estudio posterior; pueden ser recomendadas por su comportamiento termodinámico para su uso en un ORC con el propósito de recuperar energía de los grandes efluentes térmicos de las industrias químicas y petroquímicas.

Materiales y métodos

Para el presente estudio teórico se tomaron como referencia un total de 29 sustancias tanto orgánicas como inorgánicas, que a continuación se relacionan:



ISSN 1029-3450

**Tabla 1.1 Sustancias objeto de estudio**

SUSTANCIA	Pcrit MPa	Tcrit °C	Rango °C
ACETONA (C ₃ H ₆ O)	4.7	234.95	276.85,-94.65
AMONIACO(NH ₃)	11.333	132.25	426.85,-77.655
BENCENO	4.894	288.9	361.85,9.85
BUTANO	3.796	151.98	315.85,-138.28
DECAFLUOROBUTANO (C ₄ F ₁₀)	2.3234	113.18	226.85,-84.15
DODECAFLUOROPENTANO (C ₅ F ₁₂)	2.045	147.41	226.85,-73.15
TOLUENO	4.1273	318.61	426.85,-95.15
SULFURO DE CARBONILO (COS)	6.37	105.62	376.85,-138.85
CIS BUTENO	4.2255	162.6	251.85,-138.85
CICLO HEXANO	4.075	280.49	426.85, 6.32
CICLO PROPANO	5.5797	125.15	199.85,-0.15
DECANO	2.103	344.55	401.85,-29.65
DIMETILETER	5.3702	126.95	176.85,-73.15
DODECANO	1.817	384.96	426.85,-9.55
ETANO	4.8718	32.18	351.85,-182.8
ETANOL	6.1609	240.78	426.85,-23.15
HEPTANO	2.736	266.98	326.85,-90.6
HEXANO	3.034	234.67	326.85,-95.32
SULFURO DE HIDROGENO	9	99.95	486.85,-85.45
ISOBUTANO(2METHYL PROPANO)	3.64	134.67	299.85,-159.59
ISOBUTENO(2 METHYL,1 PROPENO)	4.0098	144.94	276.85,-140.75
ISOHEXANO(2 METHYLPENTANO)	3.04	224.55	276.85,-153.55
ISOPENTANO(2 METHYLBUTANO)	3.396	187.2	226.85,-160.5
R152A	4.5168	113.26	226.85,-118.59
R245fa	3.6400	154.05	226.85,-73.15
R21	5.1812	178.33	200.04,-73.15
R22	4.99	96.145	276.85,-157.42
R32	5.782	78.105	161.85,-136.81
METANOL	8.1035	239.45	346.85,-97.54

Las características termodinámicas de estas sustancias son definitorias en cuanto a sus posibilidades reales de aplicación a ORC, debido al comportamiento de su diagrama T-S. Atendiendo a la morfología del diagrama en cada una de ellas, se pueden clasificar como fluidos con comportamiento simétrico o cuasi-simétrico de su curva de saturación, como el agua, como se aprecia en la siguiente figura:



ISSN 1029-3450

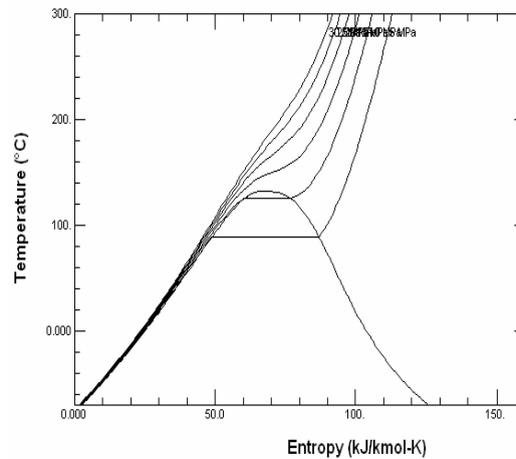


Fig. 1.1 Diagrama T-S para el a moníaco.

Otro grupo de las sustancias propuestas, muestran un comportamiento del diagrama T-S, aproximadamente asintótico en el valor de la entropía en la curva de saturación de la fase gaseosa, es decir, un comportamiento pseudo-isentrópico como por ejemplo, el etanol:

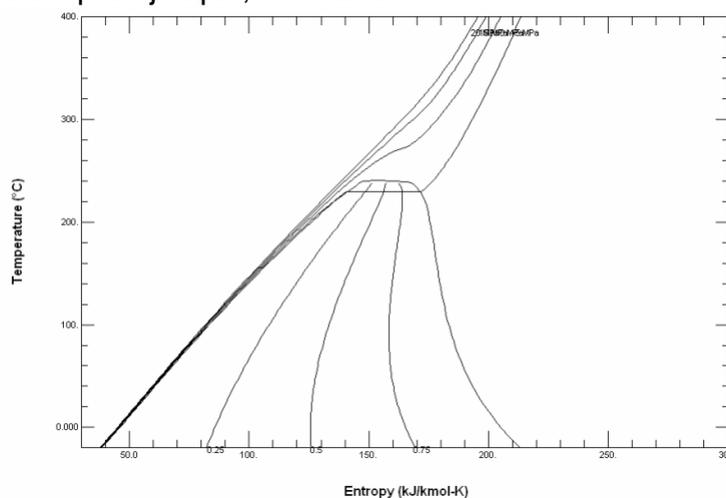


Fig. 1.2 Diagrama T-S para el Etanol.

En este ejemplo es evidente la asimetría entre la curva de saturación de líquido y la curva de vapor saturado, en la cual, una gran parte de la misma, muestra un rango de variación de la entropía muy estrecho, o cuasi-isentrópico.

El último grupo de sustancias tiene un comportamiento hiper-asimétrico entre las curvas de saturación de líquido y de vapor, como el ciclohexano:



ISSN 1029-3450

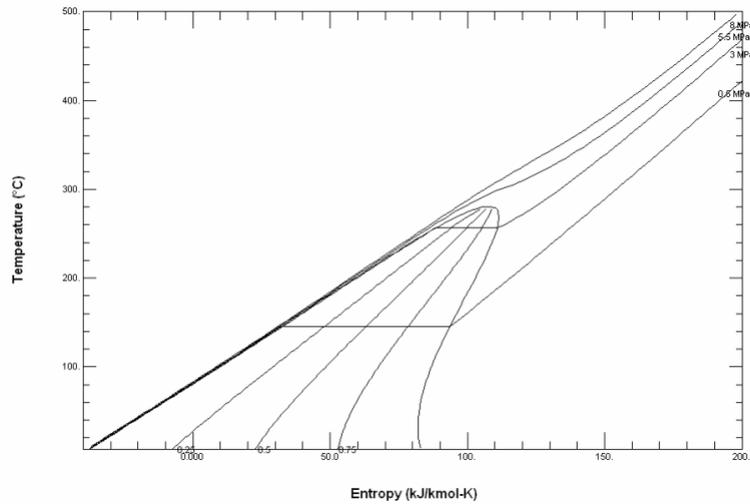


Fig. 1.3 Diagrama T-S para el Ciclohexano.

Estos comportamientos termodinámicos definen las dos variantes del Ciclo Rankine Orgánico utilizados en el estudio: El Ciclo Rankine Simple y el Ciclo Rankine con Recuperación de Calor.



ISSN 1029-3450

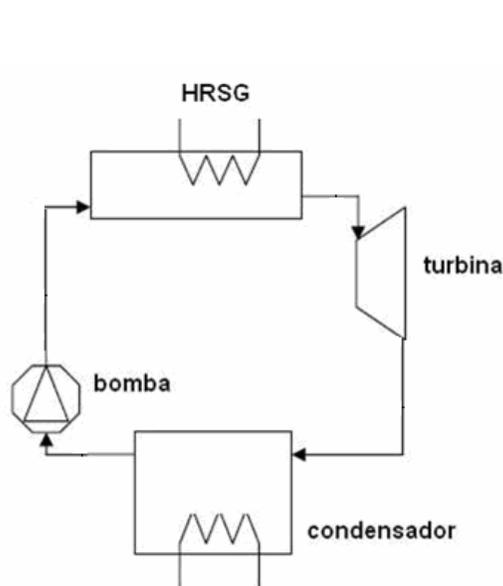


Fig. 1.4 Ciclo Rankine Standard

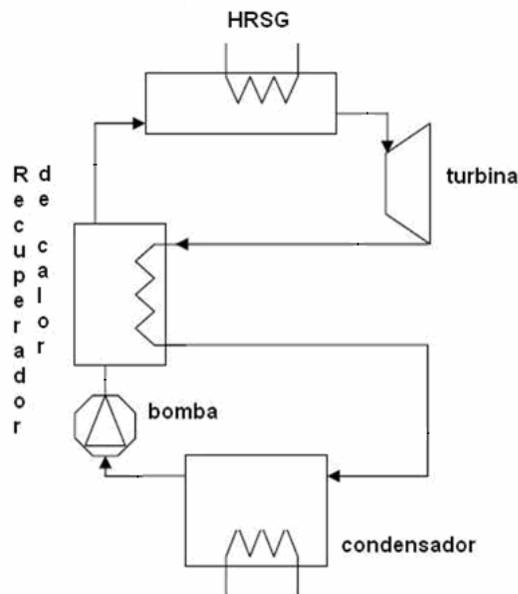


Fig. 1.5 Ciclo Rankine con Recuperación

El primero de ambos fue utilizado para el estudio de las sustancias con comportamiento cuasi-simétrico y cuasi-isentrópico; mientras que el segundo tipo de esquema fue aplicado al análisis del comportamiento de los fluidos hiperasimétricos donde es necesario aprovechar el sobrecalentamiento del gas que se genera a la salida de la expansión de la sustancia de trabajo en la turbina.

Resultados y discusión

1.- Aprovechamiento de Fuentes Térmicas de Bajo Potencial en forma de efluentes gaseosos industriales.

Para el estudio del comportamiento de las diferentes sustancias propuestas en ambos ciclos, se partió de la premisa de utilizar dos fuentes térmicas de calor de desperdicio industrial, divididas de acuerdo a sus características de estado de agregación y temperatura promedio. La primera de ellas la constituyen los efluentes gaseosos con temperaturas iguales o superiores a los 453 K (180 °C), disponibles en forma de gases de desecho de la combustión en Calderas de Vapor o Calentadores a Fuego Directo de la industria química y petroquímica.

Cada una de las sustancias propuestas se estudió para un flujo de **1 kg/s** en el ciclo correspondiente, considerando para los efluentes gaseosos, que la diferencia mínima de temperaturas esperada entre el gas que cede calor al fluido orgánico que se evapora en el HRSG, fuese de entre 20 y 60 K, lo que



ISSN 1029-3450



propondría evaporar y/o sobrecalentar cualesquiera de las sustancias empleadas hasta un máximo entre 393 y 433 K (120 a 160 °C).

La temperatura de la fuente fría en el ciclo se tomó como 308 K (35 °C) por ser la temperatura usual en la región, y el pinch point de 7 K, por lo que la temperatura de condensación de las sustancias estudiadas, estaría fijada en 315 K (42 °C)

a) Sustancias con comportamiento cuasi-simétrico y cuasi-isentrópico

Las sustancias de uso más prometedor bajo condiciones de temperatura de calentamiento hasta los 393 K (120 °C), con comportamiento cuasi-simétrico y cuasi-isentrópico, que se modelaron bajo las condiciones del ciclo Rankine mostrado en la fig. 1.4, son las que a continuación se muestran en la Tabla 1.2:

Tabla 1.2 Sustancias cuasi-simétricas y cuasi-isentrópicas de Mejor Comportamiento en un ORC estándar.

Sustancia	Temperatura de salida del HRSG (MPa)	Presión del HRSG (MPa)	Presión del Condensador (MPa)	Potencia Eléctrica	Flujo de Vapor	Eficiencia del Ciclo
Metanol	393.16	0.35	0.03896	148.6	1	11.80
Etanol	393.16	0.30	0.02082	128.4	1	12.72
Amoníaco	393.16	5.00	1.64350	122.4	1	9.53
Ciclo	393.16	4.50	1.15000	53.8	1	10.90
Dióxido de R152a	393.16	2.50	0.70000	39.3	1	10.15
R21	393.16	4.30	1.00000	34.0	1	10.31
R21	393.16	1.90	0.32000	33.5	1	12.89
Sulfuro de	393.16	5.70	1.95210	28.7	1	9.60

Las condiciones de modelación del ciclo se prefijó un rendimiento termodinámico del proceso de expansión del gas en la turbina, igual al 72 %, valor típico en turbinas multietápicas de vapor de agua como las utilizadas en centrales termoeléctricas. De igual modo, se consideró un rendimiento mecánico de 97.5 % para la turbina y de 98 % para el generador eléctrico que compone el conjunto del turbo-generador.

Es evidente que el Metanol, es la sustancia que mayor índice de potencia logra en el ciclo, para un flujo unitario; siguiéndole a continuación, el Etanol y el Amoníaco con valores muy similares. Los tres tienen limitaciones técnicas en su uso, el amoníaco por su toxicidad y los dos alcoholes por su inflamabilidad y



ISSN 1029-3450



peligro de explosión.

b) Sustancias con comportamiento hiper-simétrico y cuasi-isentrópico

Estas sustancias fueron utilizadas para evaluar su comportamiento en un esquema con regeneración como el de la Fig. 1.5, bajo condiciones idénticas a las anteriores, excepto que la temperatura a la salida del HRSG en estos casos se elevó hasta 433 K (160 °C) para compensar en algo la desventaja de presentar un alto recalentamiento en la descarga de la turbina, y en algún grado equiparar esta desventaja con respecto a las sustancias cuasi-simétricas.

Las sustancias que generan bajo estas condiciones los máximos valores de potencia para un flujo en el ciclo de **1 kg/s** son:

Tabla 1.3 Sustancias hiper-asimétricas y cuasi-isentrópicas de Mejor Comportamiento en un ORC con Regeneración.

Sustancia	Temperatura de salida del HRSG (MPa)	Presión del HRSG (MPa)	Potencia Eléctrica (kW)	Presión del Condensador (MPa)	Eficiencia del Ciclo	Flujo de Vapor
Tolueno	433	0.20	88.35	0.0086	17.77	1
Ciclopropano	433	5.00	74.79	1.1441	14.73	1
R245fa	433	1.00	25.65	0.2687	12.02	1

EL ciclo propano aparece en esta segunda variante de análisis de ORC, aprovechando el ligero sobrecalentamiento en las condiciones de expansión real de la turbina, que aparece al elevarle la presión al HRSG para esta sustancia por encima del valor trabajado en el ORC estándar. Esta característica lo convierte en un candidato para los ciclos con regeneración, aunque el valor de potencia eléctrica generada aún se encuentre por debajo de los propuestos en la Tabla 1.2.

Resulta evidente que para el aprovechamiento del calor de desperdicio de efluentes gaseosos industriales, es mucho más conveniente el uso de sustancias de punto de ebullición más bajo que el del agua, y con comportamiento en su diagrama T-S cuasi-simétrico; no obstante, esta conclusión no es definitiva, pues aún queda por analizar una gama más amplia de sustancias, así como evaluar factores adversos de las propuestas en este estudio, referentes a su toxicidad, explosividad, nivel de corrosividad, etc; aspectos que pueden invalidar su uso para este fin o hacerlo económicamente inviable como proyecto. No obstante, existen antecedentes del uso del amoníaco en ciclos cerrados OTEC, y en aplicaciones del mismo en forma de



ISSN 1029-3450



solución para operar ciclos tipo Kalina o Uehara.

II.- Aprovechamiento de Fuentes Térmicas de Bajo Potencial en forma de efluentes líquidos industriales.

La segunda de las fuentes estudiadas, se corresponden con aquellos efluentes líquidos con temperaturas cercanas o superiores a los 333 K ($> 60\text{ }^{\circ}\text{C}$), que como promedio emanan, de sistemas de enfriamiento de reactores y equipos de intercambio térmico diverso; este tipo de fuente térmica, fundamentalmente como agua de enfriamiento, es abundante a pesar de no tener muy altos niveles de temperatura, pero en volumen representan un alto valor de contaminación térmica en los vertederos naturales, especialmente en el impacto que tienen en la alteración de espejos de agua, mantos freáticos, ríos y mares adyacentes a estas plantas, con las consabidas alteraciones de orden ecológico.

Este estudio tomó como premisas los mismos valores de eficiencias y temperatura de la fuente fría utilizada en el estudio de los efluentes gaseosos, la única diferencia es que en el HRSG, la sustancia de trabajo será calentada hasta 328 K ($55\text{ }^{\circ}\text{C}$), y en este caso, solo se trabajó con las sustancias de comportamiento cuasi-simétrico y cuasi-isentrópico.

Un total de 10 sustancias arrojan resultados favorables para este propósito, coincidiendo como las mejores, dos alcoholes y el amoníaco:

Tabla 1.4 Sustancias cuasi-simétricas y cuasi-isentrópicas de Mejor Comportamiento en un ORC estándar operando con efluentes industriales líquidos.

Sustancia	Presión del HRSG (MPa)	Temperatura de salida del HRSG	Eficiencia del Ciclo (%)	Potencia del Eléctrica (kW)	Flujo de Vapor (kg/s)
Metanol	0.0680	328	3.08	35.58	1
Amoniaco	2.2000	328	2.62	30.09	1
Etanol	0.0360	328	2.74	25.05	1
Ciclopropano	1.5030	328	2.67	11.01	1
Dióxido de Azufre	0.9600	328	2.68	9.33	1
R152a	1.3200	328	2.53	7.09	1
Sulfuro de Carbonilo	2.5000	328	2.61	6.63	1
R21	0.4530	328	2.88	6.61	1
R32	3.4000	328	2.31	6.39	1
R22	2.1000	328	2.33	4.41	1



ISSN 1029-3450



Es lógico esperar que la eficiencia del ciclo se reduzca considerablemente al reducir la temperatura de la fuente caliente, lo que no arroja utilidad alguna para la generación de energía eléctrica, pues el nivel de inversión con respecto a la producción de energía es mucho mayor para este caso. Por lo que es recomendable, no utilizar el calor de desperdicio de fuentes líquidas industriales con estos niveles de temperatura para la transformación de energía térmica en energía eléctrica siguiendo el camino tradicional de un ciclo Rankine; es mucho más factible el uso de esta energía térmica para su conversión en otra forma de energía térmica a otro nivel de temperatura, como por ejemplo, producir confort mediante un ciclo de absorción que acondicione aire, a partir de usar el calor del efluente líquido en el generador y el aire del ambiente como fuente fría. Este aspecto será objeto de estudio para una publicación posterior.

Conclusiones:

1. El estudio de 29 sustancias para evaluar su desempeño en cuanto a la producción de energía eléctrica usando fuentes térmicas de bajo potencial en estado gaseoso de origen industrial, arroja que solo 10 de ellas, tienen un comportamiento termodinámico favorable, para la conversión de energía térmica en eléctrica, operando con fuentes en estado gaseoso con temperaturas de 393 a 433 K, con un rendimiento en el ORC entre 9.6 y 17.7 %; valores esperados con respecto a la temperatura de rechazo de calor a la fuente fría prefijada en 315 K.
2. El estudio de las mismas sustancias para el aprovechamiento de fuentes térmicas de bajo potencial en estado líquido; a pesar de que señala el estudio termodinámico del ORC que 10 de ellas también satisfacen los requerimientos para operar un ciclo de este tipo, los rendimientos de conversión oscilan entre 2.3 y 3 %; valores que indican que se requeriría una infraestructura muy costosa casi similar a la de los ORC operados con una fuente térmica en estado gaseoso, lo cual la haría económicamente más inviable que estos últimos.
3. Se recomienda el uso de las fuentes térmicas de bajo potencial provenientes de efluentes líquidos para la producción de aire acondicionado mediante ciclos de absorción, aspecto que puede mitigar la contaminación térmica que originan las mismas en acuíferos, espejos de agua, ríos y mares donde son depositadas a estas temperaturas.



ISSN 1029-3450



Bibliografía

1. Angelino, G. et al., 1999, "The Potential Role of Organic Bottoming Rankine Cycles in Steam Power Stations," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, Vol. 213, Part A.
2. "Compact Recuperated Binary-Fluid Rankine-Cycle Engine," 2000, *NASA Tech Briefs*, September.
3. De Castro Illera, Margarita Rosa "Efectos sociales de la contaminación térmica" Universidad del Norte, octubre 2006
4. Energetics, Inc., 1998, "Energy and Environmental Profiles of the U.S. Petroleum Refinery Industry," Columbia, MD, Report for the Office of Industrial Technologies, the U.S. Department of Energy.
5. Energetics, Inc., 2000, "Energy and Environmental Profiles of the U.S. Chemical Industry," Columbia, MD, Report for the Office of Industrial Technologies, the U.S. Department of Energy.
6. Erickson, D.C., 1992, "Vapor Exchange Duplex GAX Absorption Cycle," U.S. Patent 5,097,676, 1992.
7. Erickson, D.C., Papar, R., Anand, G., and Tang, J., 1998, "Refinery Waste Heat Powered Absorption Refrigeration – Cycle Specification and Design," *Proceedings of ASME*, AES-Vol. 38, pp 391-402.
8. Lizaranzu Perinat, Ignacio "Hibridación de una micro turbina de gas operando en poli generación con ciclo de Rankine orgánico", Universidad Pontificia Comillas, MADRID, Junio de 2007
9. Mendoza Larive, Alejandro "Análisis de la viabilidad técnica-económica de un ciclo combinado con motor de combustión interna alternativo y ciclo de Rankine orgánico", Universidad Pontificia Comillas, MADRID, Junio de 2007
10. Romero Córdoba, Daniel "Sistema de poli-generación para viviendas mediante ciclo de Rankine orgánico activado por energía solar térmica de baja temperatura", Universidad Pontificia Comillas, MADRID, Junio de 2007