ASADES

Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente
Vol. 15, 2011. Impreso en la Argentina. ISSN 0329-5184

ANALISIS DE FACTIBILIDAD DE APLICACION TECNICA, EN UN SISTEMA RANKINE ORGANICO, DE PROTOTIPO DE MICROTURBOGENERADOR.

A. O. Gomez Khairallah[1], C. Cattaneo[2], U. O. Gomez Khairallah[3].
1- Departamento de Mecánica, Facultad de Ciencias Exactas y Tecnologías, Universidad Nacional de Santiago del Estero, República Argentina, email: agomez@unse.edu.ar
2- Departamento de Mecánica, Facultad de Ciencias Exactas y Tecnologías, Universidad Nacional de Santiago del Estero, República Argentina, email: cacatta@unse.edu.ar
3- Escuela Técnica Nº2 Ingeniero Santiago Barabino, Santiago del Estero, República Argentina, email: tonnycap@yahoo.com.ar

RESUMEN: En el presente trabajo se expone el estado de avance y los resultados de las mediciones y estimaciones realizadas sobre el arreglo tecnológico denominado microturbogenerador, el cual fue diseñado, construido y ensayado para evaluar la potencialidad del mismo de ser incluido en un sistema Rankine orgánico, a los fines de lograr el aprovechamiento de fuentes de calor de baja temperatura, en particular, para el aprovechamiento del recurso solar y permitir a través del mismo equipamiento, la generación de energía eléctrica durante la noche o en caso de días sin radiación solar, por medio de otras fuentes de energías primarias. La iniciativa de un desarrollo de estas características, surge de una realidad cotidiana en numerosos hogares del interior de la provincia de santiago del estero, realidad en la cual el acceso a energía eléctrica para necesidades mínimas es escaso.

Palabras clave: Microturbogenerador, Rankine Orgánico

INTRODUCCIÓN

La Energía constituye un elemento esencial para la calidad de vida del ser humano; esto adquiere mayor dimensión cuando se involucra la energización del sector rural (Audisio, 2007), existiendo en la actualidad, un gran número de personas sin la posibilidad de acceso a suministro de energía eléctrica, ante esta situación la política de solución es básicamente a través del programa PERMER (Programa de Energías Renovables en Mercados Rurales), el que utiliza esencialmente Tecnología FV-Fotovoltaica, siendo ésta una tecnología madura, importada en su totalidad de países del primer mundo y existiendo escasos o nulos emprendimiento y proyectos nacionales de aprovechamiento térmico para generación de energía eléctrica (potencias reducidas), lo cual retrasa el desarrollo de tecnología propia en esta área de conocimiento. Es claro que la tecnología F.V., masivamente utilizada en la actualidad representa la única alternativa de suplir las necesidades de suministro de energía eléctrica para necesidades mínimas, en lugares aislados, aunque ésta también cuenta con algunas desventajas, que si bien son tenidas en cuenta al momento del diseño, conllevan en general al sobredimensionamiento de las instalaciones, encareciendo y complicándolas.

El arreglo tecnológico que se plantea, denominado Microturbogenerador, es una conjunción de componentes de índole mecánico-eléctrica, que formará parte de un equipo que permita la transformación de energía térmica en energía eléctrica. Para lograr tal fin, en el interior del sistema evoluciona un fluido termodinámico (Orgánico, no es agua (Liu, et al. 2004; Nishith B. Desai, et al. 2009; Wang et al. 2010), es un gas de alto peso molecular y propiedades tales que permiten su funcionamiento a temperaturas del orden de los 90 ºC.). Tal fluido describe un ciclo (sucesión de transformaciones termodinámicas, en las que el fin de una de ellas implica el comienzo de la siguiente), el cual se pretende sea lo más próximo posible a un ciclo de Rankine (Ciclo ideal de potencia de vapor (Yunus Cengel et al.2006), que está formado por cuatro transformaciones básicas:

1. Compresión isentrópica en una bomba (Transformación 1-2).
2. Adición de calor a presión constante en una caldera (Transformación 2-3).
3. Expansión isentrópica en una Máquina de Expansión (Transformación 3-4).
4. Rechazo de calor a presión constante en un condensador (Transformación 4-1).

Un ciclo simple de las características mencionadas, se representan el la Figura 1.

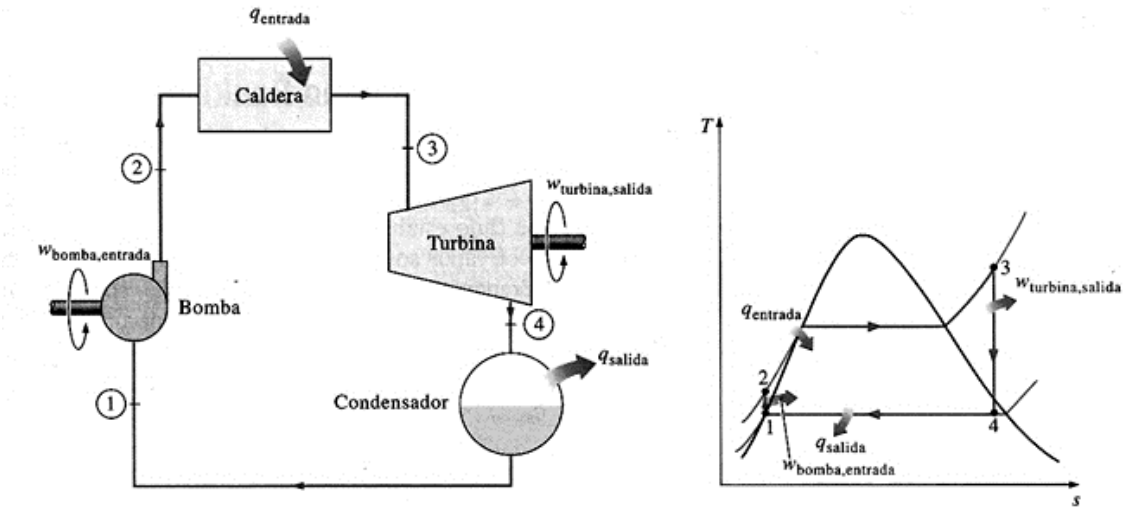

Figura 1: Ciclo Rankine, Componentes (Yunus Cengel et al.2006)

Se aprecia claramente que los órganos vitales para lograr la transformación de energía térmica en energía eléctrica son aquellos en los cuales se consume y produce trabajo *w*, de modo que es en ellos donde se enfoca toda la atención.

Si bien existen diversas configuraciones en lo concerniente a la disposición de los equipos mencionados (bomba y turbina), la elección adoptada fue la de disponer la Máquina de Expansión, la bomba y el generador, todos en el mismo eje. Dicha configuración responde a las condiciones básicas adoptadas en la etapa de diseño, las cuales son asequibilidad de componentes, facilidad de operación y mantenimiento, y muy bajo costo de construcción. Esta combinación de condiciones está motivada por la realidad socioeconómica del país.

COMPONENTES DEL ARREGLO TECNOLOGICO

El prototipo íntegramente funcional de Microturbogenerador está compuesto por tres órganos principales, los cuales fueron elegidos siguiendo las premisas básicas del diseño antes mencionado (Gomez Khairallah et al, 2011). Los mismos son una Máquina de Expansión, un Generador Eléctrico y una Bomba de desplazamiento positivo, donde las funciones de cada uno de los componentes en el ciclo son:

- La Máquina de Expansión es una máquina rotativa de desplazamiento positivo con una admisión y descarga de gases. Los órganos internos de la misma son tales que permiten la evolución del gas en su interior (expansión), logrando de este modo energía mecánica en el eje de salida, el que se vincula directamente a un generador de baja tensión.
- El Generador Eléctrico es el dispositivo encargado de transformar la energía mecánica en el eje, brindada por la Máquina de Expansión a la que se encuentra vinculada, en energía eléctrica de baja tensión. Se trata de un motor eléctrico de imán permanente con escobillas.
- La Bomba de desplazamiento Positivo es la encargada de permitir un funcionamiento estacionario del ciclo propuesto, ya que es ésta la que permite el ingreso de fluido líquido desde el condensador al evaporador del sistema Rankine, produciendo un incremento de presión del fluido. Esta bomba es accionada directamente por la máquina de expansión de desplazamiento positivo. La misma es de reducidas dimensiones y se adquirió como repuesto de motor de un motovehículo de baja cilindrada.

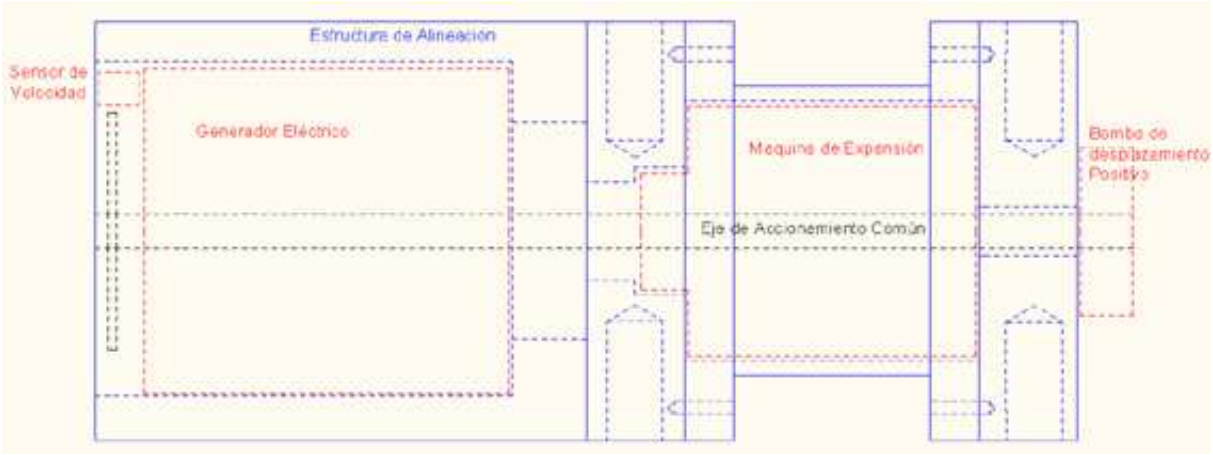

Figura 2: Gráfico de Componentes del Arreglo Tecnológico.

CONSTRUCCION DEL ARREGLO TECNOLOGICO

Todos componentes mencionados se encuentran organizados, alineados y vinculados entre sí a través de una estructura externa mecanizada en aluminio. En lo concerniente al maquinado de la estructura de alineación, el armado y la puesta a punto, fueron llevadas a cabo en las instalaciones del Laboratorio de Ing. Electromecánica, dependiente de FCEyT UNSE, sin la necesidad de tercerizar ninguna actividad. Como se prevé que el dispositivo mencionado se encuentre encapsulado en un recipiente de presión, que además es el único recipiente de estas características que formará parte en el ciclo Rankine mencionado, se tomaron las previsiones necesarias del caso incluyendo en el arreglo descrito un dispositivo detector de revoluciones electromagnético conectado al exterior del encapsulado a través de una bornera hermética, que permita el monitoreo de este parámetro durante la operación del equipo.

Figura 3: Imagen Real de Componentes del Arreglo Tecnológico.

EQUIPO DE MEDICION

La instancia en la que se encuentra el proyecto es precisamente la de prueba del dispositivo mencionado, que ya esta incluido en el recipiente de presión, es precisamente la etapa de caracterización del mismo, con el objeto de, a través de ésta, poder predecir el comportamiento, capacidad del mismo, posibilidad de funcionamiento estable, condiciones óptimas de funcionamiento del desarrollo, entre otras.

Para lograr la caracterización mencionada se llevó a cabo la construcción de un banco de pruebas para el prototipo (Gomez Khairallah et al, 2011). En éste se posibilita el funcionamiento del mismo a través de aire comprimido como fluido motor, con la posibilidad de regular las condiciones de funcionamiento y la medición de parámetros de relevancia como la presión de entrada y el caudal de aire en la descarga de la Máquina de Expansión, la presión de descarga y el caudal de la Bomba de Desplazamiento Positivo, la tensión y corriente brindada por el Generador y la frecuencia de giro de la Máquina.

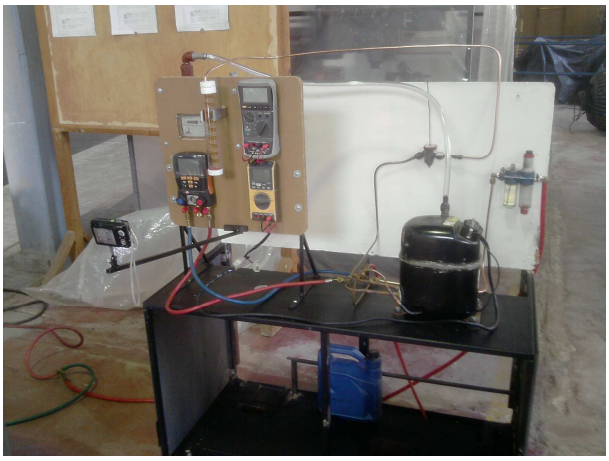

Figura 4:Microturbogenerador montado en el Banco de Pruebas

El instrumental utilizado para las mediciones de los parámetros de interés fue:

- Un analizador de refrigeración digital, el cual es básicamente un manómetro digital de precisión, clase 0.75, de dos puertos de medición.
- Un multímetro digital de precisión, doble canal, destinado a la medición de tensión y corriente de la carga, clase 0.3 para las escalas de medición adoptadas.
- Un multímetro digital, destinado a la medición de frecuencia de giro de la máquina, clase 0.1.
- Una probeta calibrada, destinada a la medición de caudal de desplazamiento de la bomba.

- Un medidor de caudal de desplazamiento positivo, destinado a la medición del caudal de aire a la descarga de la Máquina de Expansión, clase 1.

Es posible apreciar en la Figura 4, que existen además de los dispositivos mencionados, otros equipos; éstos son los encargados de permitir simular las condiciones de funcionamiento previstas para el prototipo. Son un regulador de presión, que permite lograr distintos estados de funcionamiento; un lubricador, ya que esta función es indispensable para el normal funcionamiento de la Máquina de Expansión; una válvula reguladora de presión de descarga de la bomba de fluido; un reservorio de fluido para la bomba; cañería de interconexión; una cámara digital, dispuesta para el registro fílmico del proceso de medición llevado a cabo para cada uno de los puntos de funcionamiento estudiados y un equipo de suministro de aire comprimido, que no es visible en la figura.

PROCESODE MEDICION EN BANCO DE PRUEBAS

El proceso de medición se llevó a cabo, registrando todos lo parámetros mencionados en condiciones de funcionamiento estable del equipo. Como se puede apreciar en la figura 1 las condiciones adecuadas para el posterior uso del equipo en un ciclo Rankine Orgánico, son aquellas en las que el incremento de presión que es capaz de generar la bomba, transformación 1-2 (donde se toma como referencia la presión de aspiración de esta) sea igual o superior a la diferencia de presión entre la entrada y la salida de la máquina de expansión, transformación 3-4 (en condiciones de ensayo la salida corresponde a la atmósfera).

De las mediciones realizadas, a través de relaciones conocidas y consideraciones adecuadas es posible, obtener información que permite evaluar el fin buscado, tales como la potencia de entrada, la potencia de salida, la eficiencia global del dispositivo, el caudal de aire al ingreso de la máquina de expansión.

- Determinación del torque.

$$P_{Electrica}[W] = M[Nm] \times \omega[rad/seg] \Rightarrow M = \frac{P}{\omega} \tag{1}$$

- Determinación de la potencia de entrada.

$$P_{Entrada}[W] = Q\left[m^3/seg\right] \times p[Pa] \tag{2}$$

- Rendimiento.

$$\eta[\%] = \frac{P_{Electrica}[W]}{P_{Entrada}[W]} \times 100 \tag{3}$$

$E_{Eléctrica}$: Potencia Eléctrica de salida.
M: Torque de ingreso al generador eléctrico.
ω: Frecuencia de giro de la máquina.
$E_{Entrada}$: Potencia de entrada proporcionada por el flujo de aire comprimido.
Q: Caudal de aire comprimido a la entrada de la máquina de expansión.
p: Presión de aire comprimido a la entrada de la máquina de expansión.

En la Figura 5 se comparan la presión de descarga de la bomba con la presión de aire de ingreso a la máquina de expansión, para determinar las condiciones mínimas de funcionamiento del futuro ciclo orgánico.

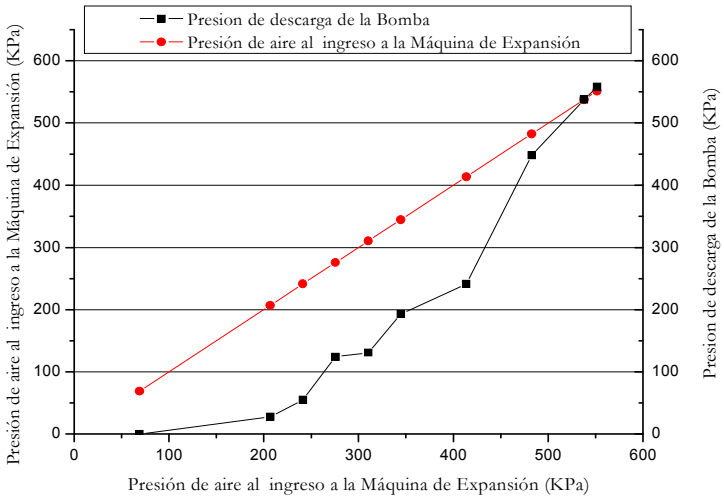

Figura 5: Representación de presión de descargas de Bomba y presión de ingreso a la Máquina de Expansión.

En la Figura 6 se muestra el rendimiento mecánico del Microturbogenerador.

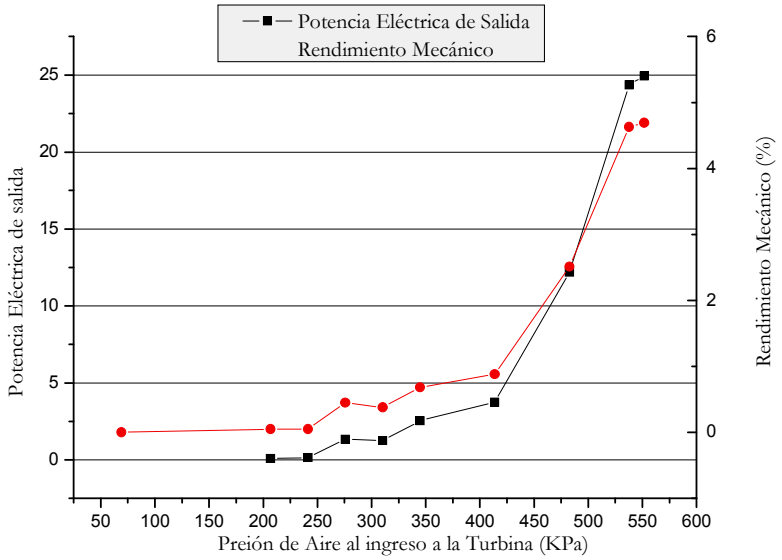

Figura 6: Representación del Rendimiento y el Torque

Observando la figura 5 puede verse que para que el Microturbogenerador pueda formar parte del sistema Rankine Orgánico, la presión de fluido de ingreso a la máquina de expansión debe ser superior a 550 KPa, obteniéndose en estas condiciones una potencia eléctrica útil de 25 W, con un rendimiento mecánico próximo al 5%

De los registros de las mediciones y supuestos que a continuación se detallan, es posible realizar una estimación del rendimiento global del equipo Microturbogenerador, una vez incluido éste en el sistema Rankine Orgánico.
Supuestos para cálculo:

- Se considera que la potencia eléctrica útil obtenida del equipo, se logra para condiciones de funcionamiento estable del mismo; es decir que la bomba instalada cumple con las condiciones de funcionamiento planteadas.
- La temperatura máxima de funcionamiento de la instilación, Fuente Caliente es de 80ºC.
- La temperatura de condensación, Fuente Fría, corresponde a un valor medio de 32ºC.
- Los cálculos se llevan a cabo para un ciclo Rankine con recalentamiento, sin considerar irreversibilidades.

Los cálculos de los puntos característicos del ciclo planteado se llevan a cabo para cuatro fluidos refrigerantes, los cuales son potenciales fluidos de trabajo para el ciclo, que cumplen con las condiciones básicas de diseño y surgen de un estudio exhaustivo de análisis comparativo de los mismos.

	1	**2**	**3**	**4**
P (bar)	8.16	13.4	13.4	8.16
t (ºC)	32	50	80	60
s (Kj/KgºC)	1.1534	1.1534	1.8117	1.8117
h (Kj/Kg)	244.8	273.5	458.4	445.2
v (m3/Kg)	0.0008	0.0009	0.01865	0.02998

Tabla 1: Variables de estado de los puntos característicos del ciclo, Refrigerante R134a (referencia Figura 1)

	1	**2**	**3**	**4**
P (bar)	9.34	14.68	14.68	8.14
t (ºC)	32	50	80	50
s (Kj/KgºC)	1.1403	1.1403	1.7922	1.7922
h (Kj/Kg)	241	266.4	454.3	437.9
v (m3/Kg)	0.0009	0.0009	0.0171	0.0313

Tabla 2: Variables de estado de los puntos característicos del ciclo, Refrigerante R401A (referencia Figura 1)

	1	2	3	4
P (bar)	11.87	17.13	17.13	10.93
t (ºC)	32	47	80	65
s (Kj/KgºC)	1.153	1.153	1.17241	1.7241
h (Kj/Kg)	244.9	267.8	429.8	421.8
v (m3/Kg)	0.0009	0.001	0.0131	0.0207

Tabla 3: Variables de estado de los puntos característicos del ciclo, Refrigerante R417A (referencia Figura 1)

	1	2	3	4
P (bar)	1.17	5.02	5.02	1.17
t (ºC)	32	81	81	40
s (Kj/KgºC)	1.105	1.105	1.6746	1.6746
h (Kj/Kg)	230.4	283.3	428.5	405
v (m3/Kg)	0.0007	0.0008	0.0334	0.1357

Tabla 4: Variables de estado de los puntos característicos del ciclo, Refrigerante R123 (referencia Figura 1)

Con la ayuda de estos datos, las mediciones del caudal de fluido al ingreso de la máquina de expansión y las suposiciones anteriores, se obtiene la siguiente información.

	Refrigerante R134a	Refrigerante R401A	Refrigerante R417A	Refrigerante R123
Δh3-2 (Kj/Kg)	177	188	162	145.2
Q (W)	9200	10653	11933	4187
q (Bomba) (l/min)	2.8	3.05	4	1.4
Relación de volúmenes	20	19	14.5	41.5
η (%) (rendimiento global)	0.27	0.23	0.2	0.59

Tabla 5: Tabla de comparación de datos relevantes

CONCLUSIONES

En primera instancia, evaluando los resultados obtenidos, podemos decir que para las condiciones de cálculo propuestas el fluido refrigerante que mejores resultados brinda para esta aplicación es el R134a, ya que el Refrigerante R123, está incluido en la tabla como valor de referencia, aunque no es posible utilizarlo por no cumplir las condiciones de ser un gas de tipo ecológico (Tabla 5).

Es posible, con una lectura apresurada, decir que el valor de rendimiento global obtenido es muy bajo, pero es preciso tener en cuenta que la fuente primaria para lograr esto, es de baja temperatura (80ºC); asimismo, si se coteja dicho rendimiento con los resultados de máquinas de absorción (que funcionan con fuentes de calor a temperaturas del orden de los 110ºC, con COPs de 0.5), el resultado obtenido en este primer prototipo experimental es prometedor.

Si bien es preciso realizar mejoras en el equipo, se otorga prioridad a la bomba de desplazamiento positivo (de modo que su presión de descarga supere a la presión de ingreso de fluido a la turbina, en valores de presión bajos). En segunda instancia se encuentra el generador eléctrico para mejorar el rendimiento mecánico-eléctrico.

Si analizamos el rendimiento global estimado del ciclo Rankine Orgánico, conjuntamente con el rendimiento mecánico del Microturbogenerador, se aprecia una coherencia entre los mismos. El rendimiento termodinámico del ciclo para las temperaturas de trabajo es próximo al 10% (de la energía térmica ingresada al sistema, se obtiene idealmente un 10% de energía mecánica), mientras que el rendimiento mecánico obtenido del Microturbogenerador es del orden del 5%. Se corresponden con un rendimiento global de 0,5% (figura 7).

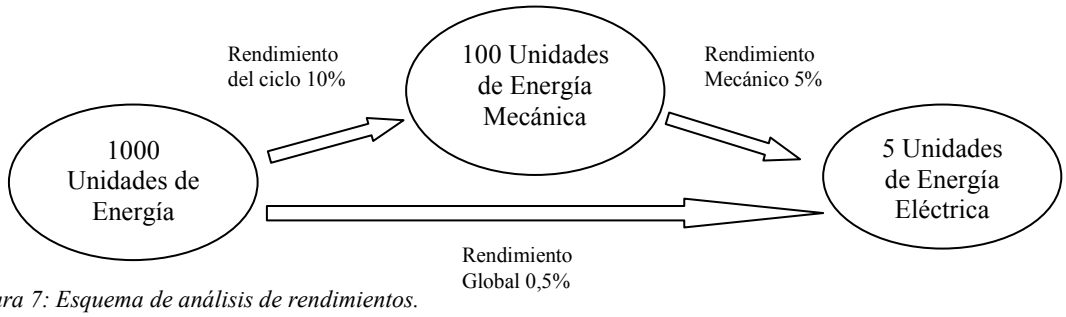

Figura 7: Esquema de análisis de rendimientos.

REFERENCIAS

Audisio A. O. Electrificación Rural y Energías Renovables en Argentina <http://www.cerpch.unifei.edu.br/Adm/artigos/159587e054d4cd113ca508c4b3ec9ce5.pdf>

Liu B.-T., Chien K.-H., Wang C.-C. (2004). Effect of working fluids on organic Rankine cycle for waste heat recovery. Energy 29, 1207–1217.

Gomez Khairallah A. O., Cattaneo C. A., Gomez Khairallah U. O. (2011). Construcción y ensayo de Microturbogenerador. En proceso de publicación en las actas de las conferencias del CIBIM10.

Nishith B. Desai, Santanu Bandyopadhyay (2009). Process integration of organic Rankine cycle. Energy, 1674–1686.

Wang X.D., Zhao L., Wang J.L. (2010) Experimental investigation on the low-temperature solar Rankine cycle system using R245fa. ScienceDirect, 2010.

Yunus Cengel, Michael A. Boles (2006). Termodinamica, 5a edicion pp 553. Mc Graw Hill.

ABSTRACT

The present work exhibits the progress and results of the measurements and estimations about the technological device named MICROTURBOGENERADOR, which was designed, built and tested to evaluate its potential to be included in an organic Rankine System, for the purposes of achieving the use of low-temperature heat sources specially, to take advantage of the solar resource and allow through it, the generation of electrical energy during nights or days without SOLAR radiation using other sources of primary energies. The initiative of a development of these features emerges from a daily reality in many homes in small location at the province of Santiago del Estero, which have limited access to electrical energy for minimum needs.

Keywords: Microturbogenerador, Organic Rankine