

ANÁLISIS DE LA DEMANDA DE POTENCIA DE LOS ÓRGANOS MECÁNICOS QUE CONFORMAN UN CICLO RANKINE ORGÁNICO DE PEQUEÑA ESCALA

Aníbal O. Gomez Khairallah¹ & Carlos A. Cattaneo¹ & Ulises O. Gomez Khairallah¹

(1) Universidad Nacional de Santiago del Estero, Facultad de Ciencias Exactas y Tecnologías. Av. Belgrano "S" N°1912, Ciudad Capital, C.P. 4200.

agomez@unse.edu.ar cacatta@unse.edu.ar tonnycap@yahoo.com.ar

RESUMEN: La realidad actual de las energías renovables en el ámbito de aplicación del mercado rural de la República Argentina se encuentra acotada exclusivamente a sistemas de aprovechamiento solar fotovoltaico y en algunos casos puntuales, sistemas de aprovechamiento eólico de escala reducida. El aprovechamiento de fuentes de calor, basados en biomasa con fines de obtención de energía eléctrica se encuentran con escaso y casi nulo desarrollo local, desaprovechando una fuente de energía primaria abundante en sectores rurales.

La alternativa de aprovechamiento seleccionada, con fines eléctrico, basada en el uso de biomasa como fuente de energía primaria, fue la tecnología de tipo Rankine Orgánica, la cual consiste en una conversión de energía de tipo térmica en energía mecánica, efectuándose las estimaciones y análisis de la demanda de potencia de los órganos que conforman un sistema Rankine Orgánico de pequeña escala (máquina de expansión, bomba de fluido de trabajo, generador eléctrico), basándose en las mediciones de los requerimientos de estos, para alcanzar su funcionamiento autónomo, con capacidad de generar potencia útil, a través de un prototipo en desarrollo, cuya máquina de expansión y generador (arreglo tecnológico denominado microturbogenerador) están ya en instancias de prueba y adquisición de datos de relevancia de este "según Gomez Khairallah (2011)".

1 INTRODUCCIÓN.

La energía eléctrica es una de las varias formas que puede asumir la energía; en particular, es ésta, la forma más versátil, ya que permite su generación, distribución y transformación en los puntos de consumo en otras formas de energía: lumínica, mecánica, térmica, a través de dispositivos adecuadamente diseñados para tal efecto. A pesar de su enorme potencialidad de uso, que todos conocemos, esta forma de energía, se encuentra sub valorada desde la perspectiva de las fuentes primarias de las que proviene y el impacto ambiental que su generación produce.

En la actualidad, en particular para el caso de la República Argentina, existe un grupo de personas que no tienen acceso a los beneficios que brinda la energía eléctrica, lo que representa un 4% de la población informada extractada de "unidad coordinadora PERMER-UCO (2008)", situación motivada por diferentes factores, entre los que

sobresalen la gran extensión del territorio y la baja densidad de población de estas regiones, lo que hace inviable la instalación de líneas de transmisión para abastecimiento de energía.

Estas situaciones puntuales de falta de suministro energético constituyen, lo que se ha dado a llamar Mercado eléctrico rural, en el que la demanda es atendida básicamente a través del proyecto PERMER (Programa de Energías Renovables en Mercados Rurales).

Si bien el PERMER utiliza para satisfacer la demanda de energía eléctrica casi exclusivamente sistemas Fotovoltaicos y aerogeneradores de pequeña potencia, las cuales son tecnologías muy difundidas, estudiadas y con un alto grado de desarrollo (las llamadas tecnologías 'maduras'), no deja de lado la posibilidad de uso de otras formas de energía primaria aparte de la solar y eólica para lograr su objetivo principal, atento a lo que establece la Ley Nacional N° 26190 de RÉGIMEN DE FOMENTO NACIONAL PARA



IX JORNADAS DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA DE FACULTADES DE INGENIERÍA DEL NOA

Santiago del Estero, 3 y 4 de Octubre de 2013



EL USO DE FUENTES RENOVABLES DE ENERGÍA, DESTINADA A LA PRODUCCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA en su Artículo Primero y Artículo Sexto inciso “b” “Ley nacional N° 26190”.

Es la gran demanda de suministro energético detectado, la posibilidad de disponer de fuentes de calor de variada índole no aprovechadas con fines energéticos actualmente, y la escasa o nula existencia de tecnología local (desarrollado y producido en Argentina) de origen térmico de baja temperatura para la generación de energía eléctrica, lo que motivó la iniciativa de concretar el presente trabajo.

Si bien existen varias alternativas para la conversión de energía térmica en mecánica-eléctrica, tales como tecnología termodinámica de tipo Stirling y ciclo Ericsson, o tecnología de tipo termoeléctrica, se tuvo en cuenta la tecnología de tipo Rankine Orgánica debido a su relativa sencillez, a su posibilidad de funcionar a temperaturas reducidas en su fuente caliente (a pesar del bajo rendimiento que posee para estas temperaturas de trabajo), como así también a su potencialidad, de ser replicada en la escala que se requiera, dependiendo de las características de la fuente de calor.

2. DESCRIPCIÓN DE ARREGLO TECNOLÓGICO.

El sistema que sustenta la construcción del prototipo está basado en un ciclo Rankine Orgánico, ciclo termodinámico donde el fluido que evoluciona es un fluido orgánico, no es agua, tal como lo comenta “Wang (2010) y Nishith (2009)”. El fluido de trabajo es un gas es de alto peso molecular y propiedades tales que permite el funcionamiento del equipo, con un rendimiento adecuado, a temperaturas del orden de los 90°C, lo que le confiere un gran número de aplicaciones a esta tecnología de acuerdo al trabajo de “Bertrand (2011)” como lo son:

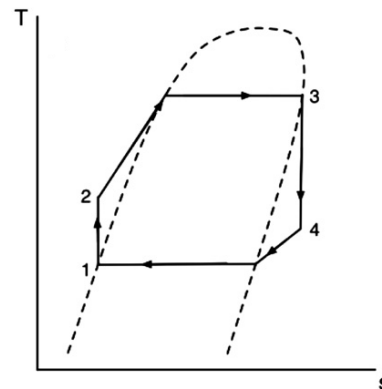
- Aprovechamientos Geotermiales.
- Aprovechamientos de tipo solar Térmico (en sus diferentes alternativas, incluido desalación).
- Aprovechamiento de la energía de Biomasa.

- Aprovechamiento del gradiente de temperatura oceánico.
- Aprovechamiento de fuentes de calor residual

Éstas son sólo algunas de las tantas aplicaciones, ya que es posible, de acuerdo a las características de las fuentes de calor disponible, como así también a las necesidades locales, desarrollar equipos combinados basados en esta tecnología, que brinden además de energía, ya sea mecánica o eléctrica, por ejemplo refrigeración o calefacción.

Un sistema Rankine Orgánico es básicamente un equipo Rankine (conjunto de dispositivos de carácter térmico, mecánico, eléctrico) que transforma energía térmica en energía mecánica en el eje, la cual es en general transformada nuevamente en energía eléctrica. Para lograr tal fin, en el interior del sistema evoluciona un fluido termodinámico (Orgánico) que describe un ciclo, el cual se pretende sea lo más próximo posible a un ciclo de Rankine (Ciclo ideal de potencia de vapor) “Cengel (2008)”, que está formado por cuatro transformaciones termodinámicas 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).





IX JORNADAS DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA DE FACULTADES DE INGENIERÍA DEL NOA

Santiago del Estero, 3 y 4 de Octubre de 2013



Figura 1 Representación del Ciclo Rankine en el campo T-S

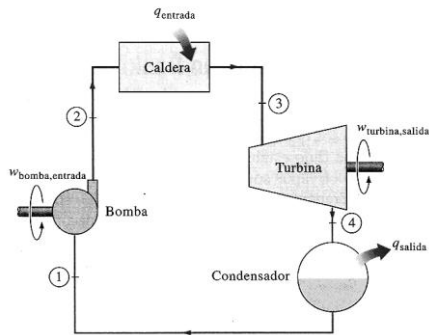


Figura 2. Arreglo esquemático de los componentes mecánicos para su concreción.

Resulta claro, que los componentes críticos de un sistema Rankine son los dispositivos mecánicos de transformación de energía (máquina de expansión: transformaciones 3-4 de la figura 2), siendo los elementos mecánicos y térmicos restantes (bomba, intercambiadores de calor) periféricos de éste que permiten el funcionamiento en estado estacionario del primero.

Se concretó el diseño de un arreglo tecnológico, al que se le asignó el nombre de Microturbogenerador. Este consta de tres dispositivos mecánicos: la máquina de expansión, el generador eléctrico y la bomba de fluido motor, que se encuentran vinculados directamente en un eje común, girado de este modo, a una única velocidad, resultando esta configuración novedosa en la escala de trabajo abordada.

El hecho de concretar un arreglo como el mencionado permite que sus dimensiones sean reducidas, lo que facilita llevar a cabo el encapsulado de éste, en un recipiente de presión, logrando por este medio evitar todas las posibilidades de fuga de fluido motor desde el conjunto de dispositivos mecánicos figura 4.

Esta posibilidad de encapsular el arreglo tecnológico, es de suma relevancia, ya que de no ser por esta, serían necesarios dispositivos mecánicos de hermetismo (retenes de diversa índole), que impidan fugas de fluido motor, transformándose en puntos críticos en lo

relacionado a confiabilidad y rendimiento, ya que éstos son elementos que consumen potencia.

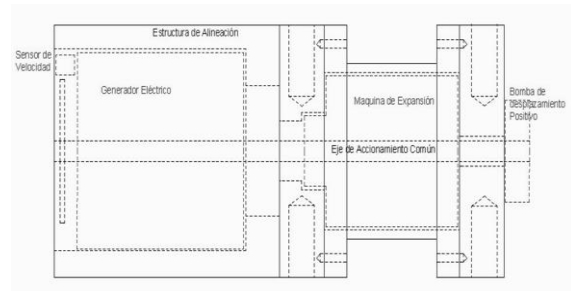


Figura 3. Representación esquemática del arreglo tecnológico.

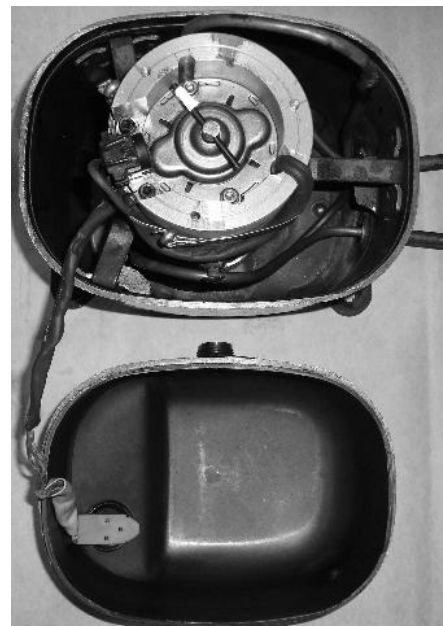


Figura 4. Encapsulado abierto con el arreglo tecnológico instalado en su interior

3. Proceso de caracterización del arreglo tecnológico.

Para concretar esta tarea, es necesario conocer los parámetros que gobiernan las transformaciones termodinámicas que se llevan a cabo en cada componente del sistema Rankine, los cuales son las variables de estado del fluido de trabajo (presión, entalpía, entropía, etc.).



IX JORNADAS DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA DE FACULTADES DE INGENIERÍA DEL NOA

Santiago del Estero, 3 y 4 de Octubre de 2013



En base a estos parámetros se seleccionaron los equipos de medición y servicios auxiliares necesarios para la construcción del banco de pruebas del arreglo. Este equipo fue de gran utilidad para evaluar el comportamiento del arreglo y poder de este modo realizar las correcciones pertinentes sobre éste.

Es necesario aclarar que el banco de pruebas permite el funcionamiento en forma aislada del arreglo tecnológico construido, por medio de aire comprimido como fluido motor.

Los parámetros que se consideran de relevancia y que permiten la simulación del comportamiento del microturbogenerador en un sistema Rankine son:

- Presión de entrada a la máquina de expansión.
- Presión de salida de la máquina de expansión.
- Presión de descarga de la bomba de fluido de trabajo.
- Caudal de descarga de la bomba de fluido.
- Frecuencia de giro del arreglo tecnológico.
- Caudal demandado a la entrada de la máquina de expansión.
- Tensión producida por el generador eléctrico.
- Corriente generada por el generador eléctrico.

Los resultados de las mediciones son representados en las siguientes figuras, en las que se destacan las diferentes condiciones de funcionamiento bajo las que se concretaron los ensayos del Microturbogenerador.

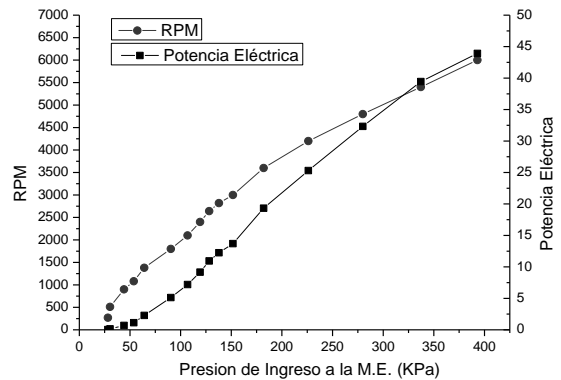


Figura 5. Resultado de mediciones, microturbogenerador sin bomba de fluido incorporada.

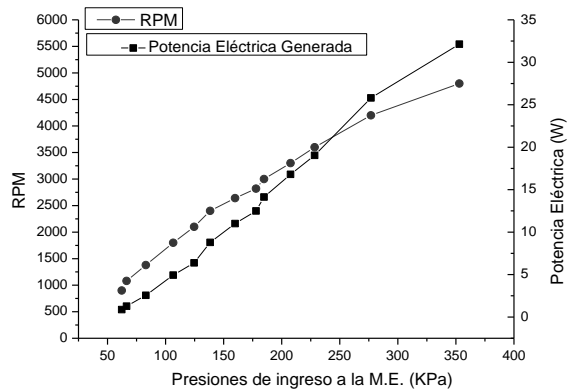


Figura 6. Resultado de mediciones, microturbogenerador con bomba de fluido incorporada.

4. ESTIMACIÓN DE LA POTENCIA DEMANDADA POR LOS COMPONENTES DEL ARREGLO TECNOLÓGICO.

Con la ayuda de toda la información recabada, a través de las mediciones y de los escasos datos que se dispone de alguno de los componentes que integran el arreglo, se pudo estimar en forma aproximada, la demanda de potencia de cada componente y con este dato su eficiencia, para su cotejo con elementos de características semejantes y de los cuales se dispone de información detallada, cuya semejanza en valor absoluto validan la metodología utilizada.



IX JORNADAS DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA DE FACULTADES DE INGENIERÍA DEL NOA

Santiago del Estero, 3 y 4 de Octubre de 2013



4.1. Condiciones para la estimación de la Potencia demandada por los componentes del arreglo tecnológico.

Las condiciones para poder llevar a cabo las estimaciones planteadas ilustradas en la figura 7, se detallan a continuación:

- Se trabaja sobre puntos de funcionamiento estables, es decir puntos de equilibrio mecánico.
- Conocimiento de las características de funcionamiento del generador (la potencia generada es función de las revoluciones de la maquina).
- Conocimiento aproximado del rendimiento del generador 50 % funcionando como motor (Valor de manual), 25 % para su funcionamiento como generador (Valor estimado).
- Conocimiento, del potencial hidráulico de la bomba, (valores medidos en banco de pruebas).
- Conocimiento de la potencia de entrada (provista por el aire comprimido) a la Maquina de Expansión, para el arreglo sin bomba (valores medidos en banco de pruebas).
- Conocimiento de la potencia de entrada (provista por el aire comprimido) a la Maquina de Expansión, para el arreglo con bomba (valores medidos en banco de pruebas).
- Conocimiento del rendimiento bombas de características semejantes a las utilizadas en el arreglo, (Valor que permite la validación de la estimación realizada).

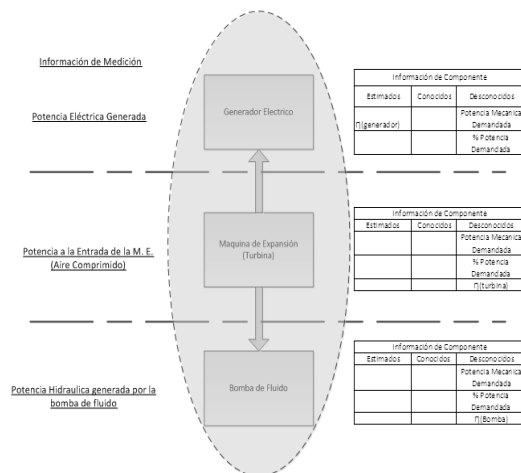


Figura 7. Representación esquemática de información para determinación de los parámetros desconocidos.

4.2. Procedimiento para la estimación de la Potencia demandada por los componentes del arreglo tecnológico.

El proceso de determinación de los parámetros desconocidos, que permiten la caracterización propiamente dicha del arreglo tecnológico, se desarrolló en cinco pasos, proceso que ilustra a través del diagrama de flujo representado en la figura 8.

1. Determinación del rendimiento de la M.E. η_{ME} en función de rpm.

Resultado determinado por cálculo, ecuación (1), obtenido a través de la información del valor estimado para el rendimiento del generador eléctrico η_g , la potencia eléctrica producida por el generador PE y la potencia de entrada a la M.E. PME, esta última proporcionada a través de aire comprimido, mediciones llevas a cabo, para el caso del arreglo sin la bomba de fluido.

$$\eta_{ME} \eta_g P_{ME} = P_E \rightarrow \eta_{ME} \quad (1)$$

2. Determinación de la potencia mecánica producida por la M.E. Peje, para el arreglo con la bomba de fluido incluida.

Parámetro logrado por medio de cálculos, ecuación (2), con los coeficientes de rendimiento obtenido en el paso N° 1, para cada uno de los valores de revoluciones utilizados en los ensayos, la ayuda del coeficiente de rendimiento supuesto para el generador eléctrico y los resultados de la medición con bomba de fluido (potencia de entrada a la M.E. y potencia eléctrica generada para esta configuración del arreglo).

$$P_{eje} = \eta_{ME} P_{ME} \quad (2)$$

3. Determinación de la potencia mecánica demandada PB por la bomba y su correspondiente rendimiento η_B .

Con la información obtenida en el paso N° 2, se determina por un simple cálculo de diferencia, ecuación (3), la potencia consumida por la bomba en el arreglo, diferencia entre la potencia producida en el eje por la M.E. Peje y la potencia demandada por el generador eléctrico Pg, de forma semejante, efectuando el cociente de la potencia hidráulica (medida para cada punto de revoluciones) y la potencia consumida por la bomba, se obtiene el rendimiento de esta.



IX JORNADAS DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA DE FACULTADES DE INGENIERÍA DEL NOA

Santiago del Estero, 3 y 4 de Octubre de 2013



$$P_B = P_{eje} - P_g = P_{eje} - \frac{P_e}{\eta_g}; \eta_B = \frac{P_H}{P_B} \quad (3)$$

4. Validación del proceso de cálculo.

Esta acción de validación, se lleva a cabo por medio de la comparación del rendimiento de bomba obtenido por cálculo, según el procedimiento descrito, con el valor del rendimiento mecánico, de una bomba comercial, de características semejantes, en particular para este caso, se trata de bombas de engranajes internos, marca PMPO, de la cual se dispone información técnica detallada.

5. Determinación de las condiciones de funcionamiento nominales del arreglo tecnológico.

Del análisis de variación de los coeficientes de rendimiento obtenidos en función de las revoluciones, el módulo de la potencia eléctrica generada y la demanda de fluido motor, se definen las condiciones nominales de funcionamiento del arreglo tecnológico logrado.

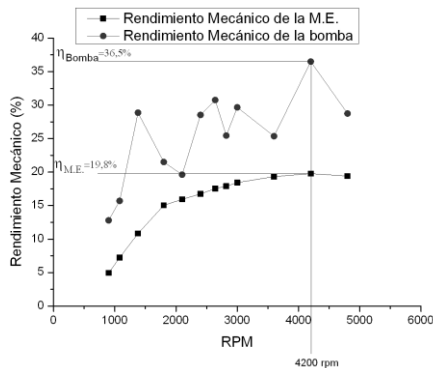


Figura 9. Resultado del proceso de estimación concretado.

De forma semejante en la figura 9, son representados los resultados obtenidos en el proceso de estimación, mediante un gráfico en el campo de las revoluciones, el cual facilita la tarea de análisis, para la determinación de las condiciones de funcionamiento nominales del arreglo tecnológico.

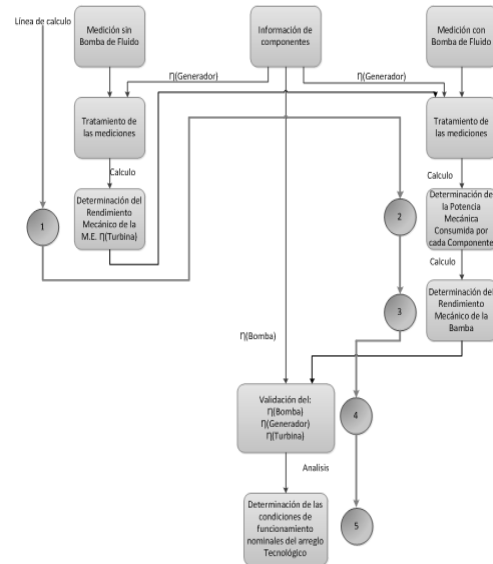


Figura 8. Representación de la línea de cálculo seguida para la estimación de la potencia demandada por los componentes del arreglo tecnológico.

4.1. Procedimiento de validación del método de estimación.

La coincidencia de los coeficientes obtenidos por el método de estimación descrito, reflejados en la figura 9, con la información técnica disponible de la bomba de referencia utilizada de referencia, la que arroja un valor de rendimiento de 30%, permiten adoptar como ciertos los coeficientes de rendimiento de la bomba incluida en el arreglo tecnológico, del generador eléctrico y la turbina, los que resultaban desconocidos en un principio, además de la figura 9 se destaca la exagerada irregularidad del comportamiento correspondiente al rendimiento mecánico de la bomba de fluido, este se asocia al mecanismo utilizado para la regulación de presión de descarga de fluido de la bomba al momento de las mediciones, el cual es de accionamiento manual.

En las figuras 9 y 10, se tiene representado la información resultado del proceso de estimación, a través de esta se considera concretada la etapa de caracterización del equipo, además de la lectura de estas figuras surge casi de inmediato la identificación de las condiciones nominales de funcionamiento buscadas, asociada a la



IX JORNADAS DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA DE FACULTADES DE INGENIERÍA DEL NOA

Santiago del Estero, 3 y 4 de Octubre de 2013



información que se dispone del motor eléctrico utilizado.

Se considera condiciones nominales de funcionamiento de un equipo, aquellas condiciones en las que el equipo es capaz de funcionar en forma permanente, en este punto, los parámetros de funcionamiento permanecen constantes.

Las condiciones de funcionamiento identificadas como nominales para este arreglo en particular, son 4200 rpm, condición en la que el efecto útil final del equipo (potencia eléctrica generada) es $P(\text{eléctrica}) = 28,8\text{W}$, con un rendimiento mecánico global de $\eta(\text{Mecánico}) = 4,1\%$.

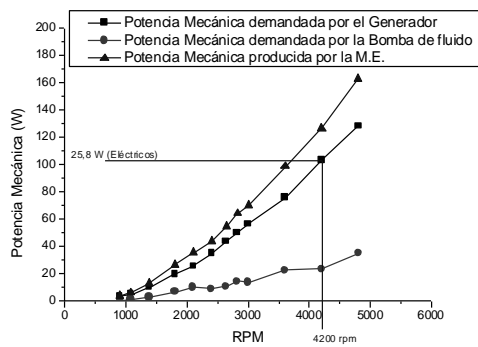


Figura 9. Resultado del proceso de estimación concretado, Potencia demandada por cada componente del Microtubogenerador.

Tabla 1 Condiciones de funcionamiento nominal del arreglo tecnológico logrado.

Condiciones de funcionamiento nominales		
RPM	Potencia Eléctrica generada	$\eta(\text{Global})$
4200	25,8 W	4,1%

5. CONCLUSIONES.

Se puede comentar, que a pesar del reducido número de mediciones concretadas y la escasa información técnica de los componentes usados en el arreglo tecnológico, se logró la determinación de la demanda de potencia de estos, e incluso con esta información se determinaron las condiciones de funcionamiento nominales y el rendimiento mecánico global del arreglo.

Así mismo con la información lograda en el proceso de estimación comentado, se pudo determinar en forma cuantitativa a través del rendimiento de cada componente, un orden de importancia de las mejoras a tener en cuenta para el desarrollo, la que encabeza el generador eléctrico utilizado, ya que su rendimiento es demasiado bajo, estando al alcance mejoras sustanciales sobre el mismo. De forma semejante, del trabajo surge que la máquina de expansión utilizada, posee un rendimiento del mismo orden que el del generador eléctrico, aunque en este caso lograr mejoras sobre la misma no son simples ni económicas, tanto es así, que en este caso se justifica un cambio de escala que permita el uso de máquinas de expansión de mejores prestaciones.

6. REFERENCIAS.

Bertrand F. T., Gr. Lambrinos. Low-grade heat conversion into power using organic Rankine cycles – A review of various applications, *ScienceDirect Energy Conversion and Management* 15 3963–3979, 2011.

Cengel Y., M.Boles; *Termodinamica*; 5ª Edición; ISBN 970-10-5611-6.

Gomez Khairallah A. O., C. Cattaneo, U. O. Gomez Khairallah Analisis de factibilidad de aplicación técnica, en un sistema Rankine Organico, de prototipo de, *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, Vol. 15, 2011. ISSN 0329-5184, pag. 3-79, 3-85. 2010 Impreso en la Argentina.

Gomez Khairallah A. O., C. Cattaneo, U. O. Gomez Khairallah, Construcción y ensayo de Microturbogenerador. *Anales de Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica*, 2010 Oporto, Portugal .

Ley Nacional N° 26190 de Régimen de fomento nacional para el uso de fuentes renovables de energía destinada a la producción de energía eléctrica, <http://infoleg.mecon.gov.ar/infolegInternet/anexos/120000-124999/123565/norma.htm>, 04/06/2013.

Nishith B. D., S. Bandyopadhyay, Process integration of organic Rankine cycle. *Energy*, 1674–1686, 2010

Unidad Coordinadora del PERDER-UCP 2008 <https://www.se.gov.ar/permer/MarcoManejoAmbientaFINAL.pdf>, 04/06/2013

Wang X.D., L. Zhao, J.L. Wang. Experimental investigation on the low-temperature solar Rankine cycle. *ScienceDirect, Applied Energy* 87-3366–3373, 2010.



IX JORNADAS DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA DE FACULTADES DE INGENIERÍA DEL NOA

Santiago del Estero, 3 y 4 de Octubre de 2013

