

Título del Proyecto de Investigación  
al que corresponde el Reporte Técnico:

Diseño de turbina radial operando con fluido orgánico para el aprovechamiento de calor de desecho.

Tipo de financiamiento

Sin financiamiento

Fecha de Inicio: 01/10/2018  
Fecha de Término: 30/09/2019

Tipo de Reporte

Parcial

Final

Autor (es) del reporte técnico:

Uzziel Caldiño Herrera  
Diego Moises Almazo Pérez  
Arturo Paz Pérez  
Alfredo Villanueva Montellano

# TÍTULO DEL REPORTE TÉCNICO

## **Resumen del reporte técnico en español (máximo 250 palabras)**

En este reporte se presentan los resultados de la investigación de un sistema de ciclo Rankine orgánico que opera con radiación solar y que aprovecha directamente la energía térmica transfiriéndola directamente al fluido de trabajo en el colector solar. Se estudiaron las condiciones de operación, fluido de trabajo y los volúmenes en los tanques necesarios para el correcto funcionamiento del sistema energético. Para las condiciones de un día promedio se concluye que el fluido de trabajo R245ca es el más indicado debido a su mayor eficiencia térmica y en el colector solar, así como una menor superficie de incidencia solar y menor tamaño en los tanques de almacenamiento.

## **Resumen del reporte técnico en inglés (máximo 250 palabras):**

In this report, the results of the research on an organic Rankine cycle Energy system are presented. This system is powered by solar radiation and a novel configuration in which solar radiation is transferred directly from the solar collector to the working fluid is implemented. Operation conditions, working fluid and storage tank volume were studied for the ORC system. For an average day solar radiation, R245ca resulted to be the most suitable working fluid due to its greater thermal and collector efficiency. It also requires a lesser incidence surface and the volume of the storage tanks are smaller.

## **Palabras clave:**

Turbina radial, ciclo Rankine orgánico, sistema energético

## **Usuarios potenciales (del proyecto de investigación)**

Estudiantes y profesionales de ingeniería mecánica, ambiental y energía

## **Reconocimientos**

Los autores agradecen a la Universidad Autónoma de Ciudad Juárez por el uso de las instalaciones e infraestructura empleada durante la realización de este proyecto

## 1. Introducción

La energía de bajo contenido entálpico ha sido considerada como energía no utilizable debido a la ausencia de sistemas o tecnología que permita convertir estas fuentes en trabajo mecánico o eléctrico. Como ejemplos de fuentes energéticas de baja entalpía está la radiación solar, los pozos geotérmicos con temperaturas menores a 80°C o el calor residual de procesos industriales.

La necesidad de hacer un uso eficiente de la energía, así como de disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero han motivado a buscar alternativas tecnológicas que diversifiquen las fuentes y tecnologías para producir energía. Una alternativa que ha demostrado su factibilidad técnica es el ciclo Rankine orgánico (ORC), el cual consiste en hacer pasar un fluido de trabajo por una serie de procesos termodinámicos usando a la fuente de energía de bajo contenido entálpico como suministro de calor. El fluido de trabajo debe tener propiedades termofísicas que permitan su evaporación a condiciones muy por debajo a las presentes en el agua. Los fluidos orgánicos (base carbón) cumplen con esta condición, además de requerir cantidades bajas de energía para lograr el cambio de fase.

Existen diferentes trabajos de investigación y desarrollo tecnológico enfocados al diseño e implementación de este tipo de sistemas, principalmente para el aprovechamiento de radiación solar en zonas desérticas, de calor residual en procesos industriales y en motores de combustión interna.

Por mencionar algunos de estos trabajos, se tiene el de Delgado-Torres et al. [1] en donde analiza y optimiza un sistema de desalinización a través de osmosis inversa operando con un sistema ORC que emplea colectores solares planos como fuente de energía. Se evaluaron 12 fluidos de trabajo buscando las condiciones de operación que minimicen el área de los colectores solares.

En 2013 Wang et al. [2] reportó el análisis de un ORC regenerativo que puede operar en rangos bajos de temperatura. A través de un estudio de optimización paramétrica definió que los fluidos R245fa y R123 son las mejores opciones debido a su alto desempeño y baja presión de operación.

En 2018 Bellos y Tzivanidis [3] investigaron un sistema ORC híbrido que opera con energía solar y con calor residual. Analizaron 4 fluidos de trabajo para un sistema ORC regenerativo, resultando el tolueno como el más adecuado debido a que resulta en la mayor potencia producida (entre 479 kW y 845 kW) con una eficiencia térmica entre 11.6% y 19.7%.

Asimismo, es importante mencionar los resultados publicados por un grupo de investigación dirigido por Quoilin [4-9] en el cual realiza estudios y análisis de sistemas ORC y sus expansores, evaluando diferentes configuraciones, fluidos de trabajo, condiciones de operación y fuentes energéticas. Asimismo, existen colaboraciones en la librería de código abierto CoolProp, la cual permite evaluar propiedades termofísicas de más de 140 sustancias a través formulaciones de tipo Helmholtz-energy-explicit-type. En este reporte se muestran los resultados del estudio de un sistema ORC solar y la influencia de diferentes fluidos de trabajo en las condiciones de operación. Asimismo, se desarrolla un estudio tecno-económico para evaluar la factibilidad de implementar este tipo de sistemas energéticos en regiones de alta radiación en México.

## **2. Planteamiento**

### **2.1 Antecedentes**

El aprovechamiento energético de la radiación solar no se limita exclusivamente a las celdas fotovoltaicas. Es posible aprovechar, además de la luz, el calor que resulta de la incidencia solar sobre alguna superficie. Este aprovechamiento no solo se limita al calentamiento de agua que, si bien permite sustituir el consumo de hidrocarburos para dicho proceso, también es posible obtener trabajo mecánico en un ciclo Rankine orgánico.

Una operación habitual de un sistema ORC solar toma en cuenta la variación de la radiación solar a lo largo del día. Al ser la radiación solar la fuente energética que calienta el fluido de trabajo, una variación en esta resulta en condiciones termodinámicas variantes. Para evitar esto, se propone una configuración que permita el uso de un flujo másico variable para el evaporador. El flujo a la salida del evaporador se almacena en un depósito a manera de reservorio, de tal forma que a la salida del depósito se pueda tener un flujo másico constante, ya que el expansor se diseña para operar de manera eficiente

bajo un flujo másico en particular y cualquier condición fuera de diseño disminuye su desempeño.

### **2.1 Marco teórico**

En este trabajo se evalúa el desempeño de un sistema ORC operando con radiación solar, considerando la variación de ésta a lo largo de un día promedio. Utilizando 4 fluidos de trabajo, se determina el volumen de almacenamiento de los tanques que aseguren un flujo constante en el expansor y se calcula el flujo másico en función de la radiación solar de un día promedio. Se considera un periodo de arranque en el que el fluido solo ingresa al tanque de almacenamiento con el objetivo de asegurar la disponibilidad del fluido en cualquier momento del día a través de un balance de masa.

Además, se calculan parámetros de desempeño tales como eficiencia térmica, eficiencia del colector, superficie de incidencia radiativa y flujo másico en el colector para determinar que fluido de trabajo y en qué condiciones de operación resulta más efectivo para el sistema ORC.

Finalmente se realiza un análisis tecno-económico en donde se evalúa los costos de equipos, los costos de generación y la inversión necesaria para su instalación y operación.

### **3. Objetivos (general y específicos)**

Desarrollar una metodología para definir condiciones de operación y dimensiones preliminares del expansor para un sistema de generación eléctrica basado en ciclo Rankine orgánico teniendo como dato de entrada las características de la radiación solar para uso como fuente energética de baja entalpía

### **4. Metodología**

El desarrollo de este proyecto se dividió en 3 etapas: el análisis termodinámico del sistema ORC, el cálculo de los tanques de almacenamiento y el análisis tecno-económico.

El análisis termodinámico del sistema ORC consiste en calcular las propiedades termodinámicas del fluido de trabajo en cada uno de los estados. Para este caso de estudio se considera un ORC simple con 4 estados termodinámicos. Para el cálculo de las propiedades termodinámicas se hace uso de CoolProp, el cual requiere de dos propiedades conocidas en cada estado para conocer el resto.

La condición del fluido de trabajo a la entrada la bomba (estado 1) es de líquido saturado, por lo tanto, se calculan las propiedades de este estado a partir de la condición de saturación a temperatura ambiente.

La salida de la bomba se define por la presión. Este dato se calcula del parámetro  $P_R$  que es la relación de presiones entre la presión alta y la presión baja del ciclo. Este parámetro funciona como la variable independiente en el análisis y define las condiciones de operación del sistema ORC. Una vez definida la presión de salida de la bomba, se calcula las demás propiedades considerando una eficiencia isentrópica de 80%.

El estado 3 corresponde a la salida del colector solar. Se busca que el fluido se sobrecaliente 5 K por encima de la temperatura de saturación. Con este dato y la presión de evaporación se definen las demás propiedades en este estado.

El estado 4 corresponde a la salida del expansor. El fluido de trabajo se expande hasta alcanzar la presión de condensación que es la misma que la presión de entrada a la bomba. Con la presión de salida de la turbina una eficiencia isentrópica del 75%.

Una vez definidos las propiedades termodinámicas de los 4 estados del ORC se calculan los parámetros de desempeño de acuerdo con la Ec (1)

$$\eta_{th} = \frac{(h_3 - h_4) - (h_2 - h_1)}{h_3 - h_2} \quad (1)$$

En el análisis termodinámico no se considera la radiación solar disponible, solo se asegura que el fluido alcance las condiciones de operación que son la temperatura a la entrada de la turbina y las presiones de evaporación y condensación. Para asegurar que la temperatura a la salida del evaporador sea la deseada (vapor sobrecalentado 5 K) se debe calcular y ajustar el flujo másico en el evaporador de acuerdo con la radiación disponible. El calor disponible para ser transferido al fluido de trabajo depende de la eficiencia del colector y de la superficie de incidencia radiativa se calcula de acuerdo con la Ec. (2)

$$\dot{Q}_{evap} = \eta_{col} q'_{rad} A_{inc} \quad (2)$$

El flujo másico en el colector se calcula en función del calor disponible en el evaporador para asegurar las condiciones termodinámicas de diseño. Cada fluido de trabajo requiere un flujo másico distinto para lograr el incremento en la temperatura correspondiente incluyendo el cambio de fase. Además, este dato también es función de la presión de trabajo en el evaporador. El cálculo de este parámetro se lleva a cabo a partir de la Ec. (3).

$$\dot{m}_{col} = \frac{\dot{Q}_{evap}}{h_3 - h_2} \quad (3)$$

Conociendo los valores de radiación solar a lo largo del tiempo de funcionamiento (8 horas), los cuales se obtuvieron de estaciones solarimétricas, se calcula el flujo másico necesario en intervalos de 10 minutos.

Una vez conocido el flujo másico, se calculan los volúmenes en los tanques, tanto a la salida del evaporador como a la salida del condensador, teniendo en cuenta que el primero trabaja con vapor sobrecalentado (menor densidad) y el segundo con líquido saturado. La masa de fluido en el tanque a la salida del evaporador (TST) se calcula de acuerdo con la Ec. (4).

$$m_{TST}(t) = m_{TST}(t_e) + \int_{t_e}^{t_0} \dot{m}(t) \cdot (t - t_e) dt - \int_{t_e}^{t_0} \dot{m}_{ORC} \cdot (t - t_e) dt \quad (4)$$

Y la masa de fluido en el tanque a la salida del condensador (PST) se calcula de acuerdo con la Ec. (5)

$$m_{PST}(t) = m_{PST}(t_e) - \int_{t_e}^{t_0} \dot{m}(t) \cdot (t - t_e) dt + \int_{t_e}^{t_0} \dot{m}_{ORC} \cdot (t - t_e) dt \quad (5)$$

El volumen del tanque TST comienza en 0 y se va llenando con el fluido proveniente del colector solar. Cuando el volumen del tanque alcanza cierto

valor crítico, se abre la válvula para que el fluido continúe hacia la turbina. El flujo de salida del tanque es constante y la entrada es variable. De aquí los términos que se restan y suman respectivamente en la Ec. (4). Algo similar pasa en el tanque PST, en donde la salida es variable (dirigida hacia el colector) y la entrada es constante (proveniente de la turbina).

Finalmente, el análisis tecno-económico consiste en analizar el costo total de inversión considerando la compra de equipo, el costo de operación y el precio de la energía generada a través de este sistema en el territorio mexicano.

### 5. Instituciones, organismos o empresas de los sectores social, público o productivo participantes (Si aplica)

No Aplica

### 6. Resultados

A continuación, se presentan los resultados obtenidos en el desarrollo de este trabajo. Iniciando con la radiación solar promedio en un día, la Fig 1 muestra la radiación directa, indirecta y global

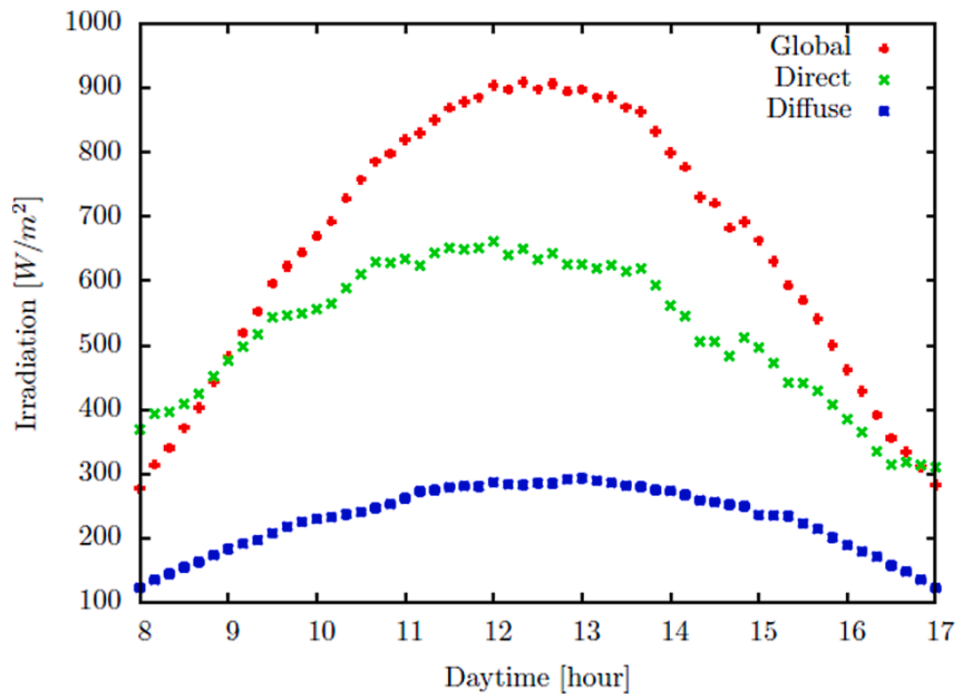


Figura 1. Radiación solar de un día promedio



Esta información es útil para determinar el volumen de los tanques. En lo que respecta al estudio termodinámico del ORC, en las Figs. 2, 3, 4 y 5 se muestran los parámetros de desempeño: eficiencia del colector, flujo másico del ORC, eficiencia térmica, y superficie de incidencia necesaria para los diferentes fluidos de trabajo evaluados. Todo esto como función de  $P_R$ .

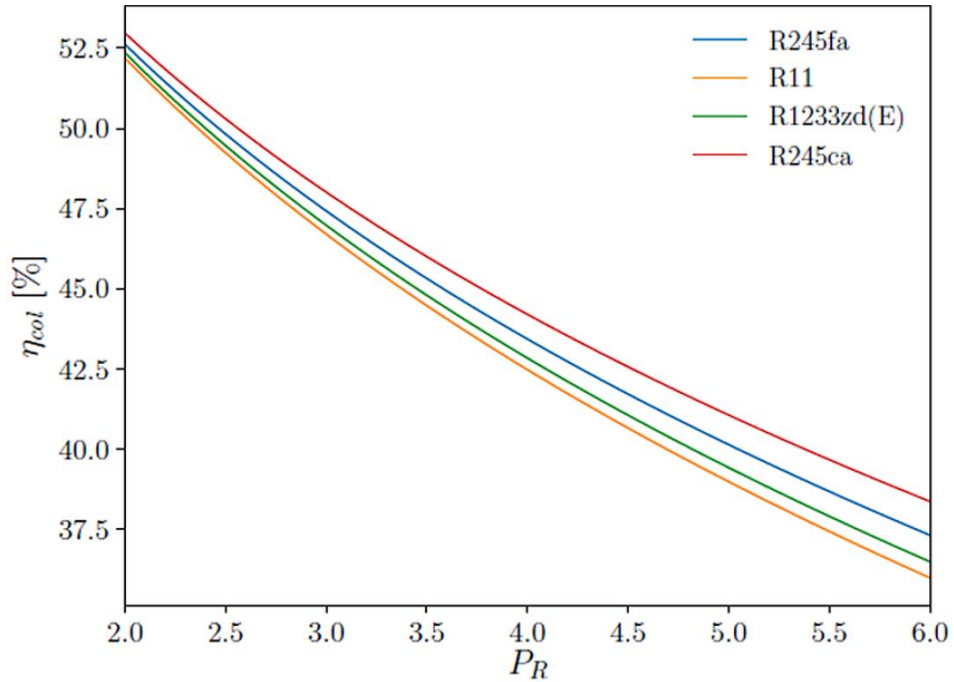


Figura 2. Eficiencia del colector para los 4 fluidos de trabajo

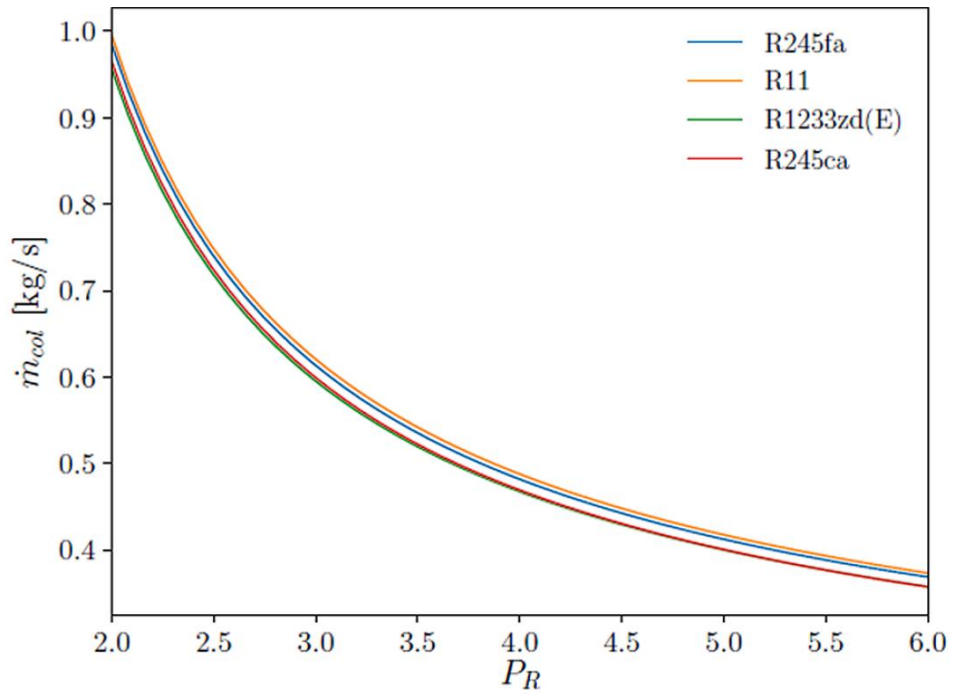


Figura 3. Flujo másico en el ORC para los 4 fluidos de trabajo

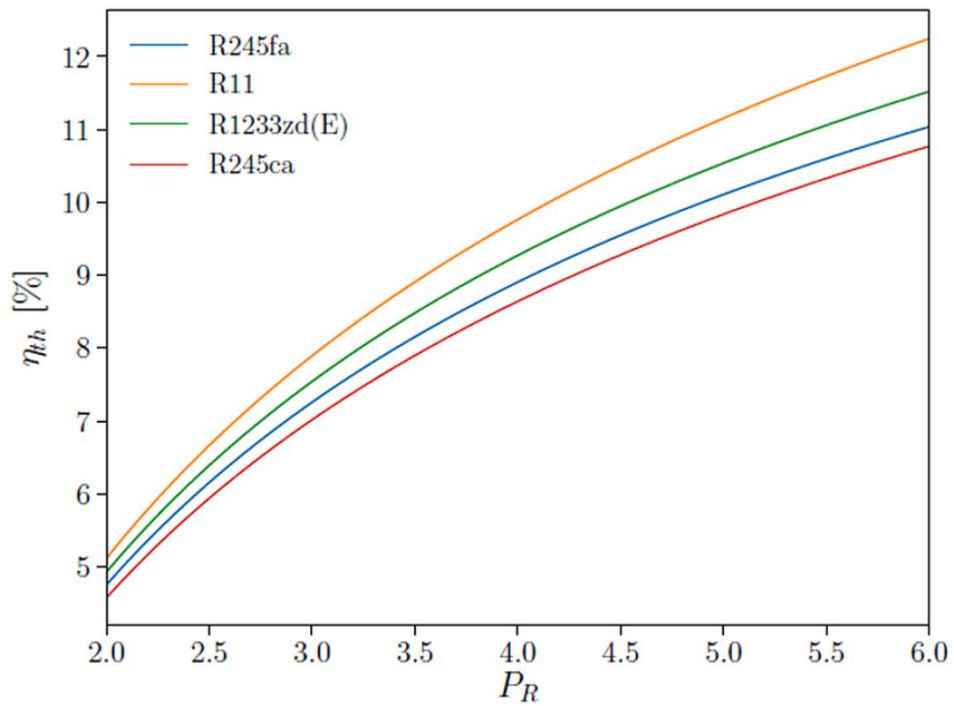
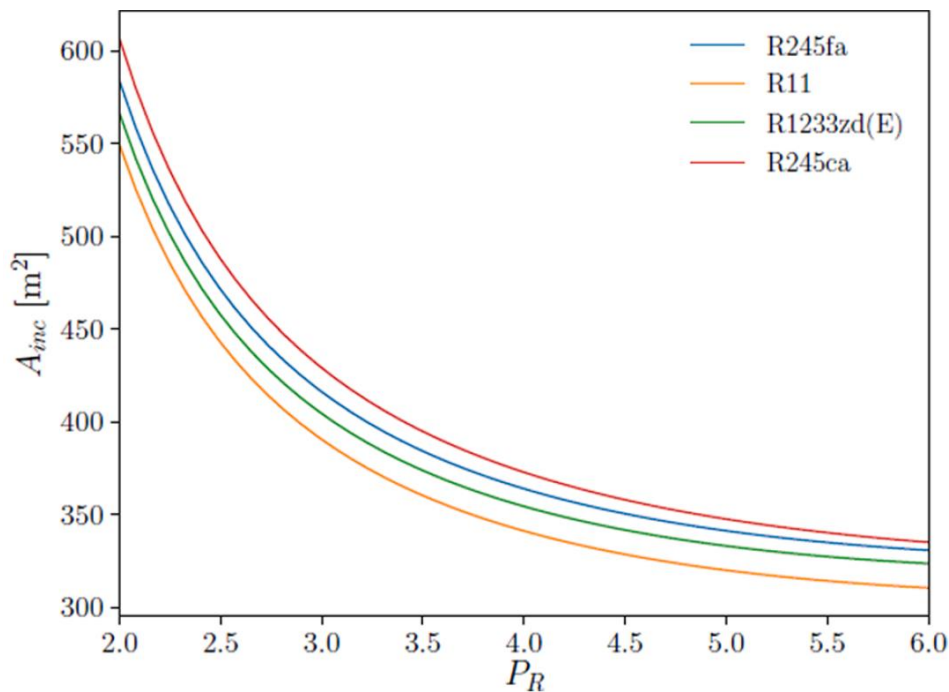


Figura 4. Eficiencia térmica del ORC para los 4 fluidos de trabajo



**Figura 5. Superficie de incidencia para los 3 fluidos de trabajo**

Se observa que la eficiencia del colector disminuye conforme aumenta el valor de  $P_R$ , siendo el R245ca el fluido que siempre mantiene la mayor eficiencia en el colector. En lo que respecta a el flujo másico del ORC, éste disminuye conforme  $P_R$  aumenta. Esto resulta importante ya que disminuye el volumen de los tanques. En este parámetro, el R1233zd(E) es el que resulta con los valores más bajos. Para la eficiencia térmica se observa que aumenta conforme  $P_R$  también crece, siendo que la tasa de incremento disminuye conforme  $P_R$  es más alto. Aquí el R11 resulta en el que presenta los valores más altos. Finalmente, la superficie de incidencia tiene una tendencia a disminuir conforme  $P_R$  incrementa y el R11 resulta en el fluido con menor superficie de incidencia requerida

De acuerdo con los resultados del análisis termodinámico, las condiciones de operación que mejor se ajustan al sistema ORC se obtienen con  $P_R=4$ . Usando este valor en el estudio del volumen de fluido en los tanques se obtiene que, a lo largo de la operación de un día, el volumen en los tanques TST y PST es lo mostrado en las Figs. 6 y 7 respectivamente.

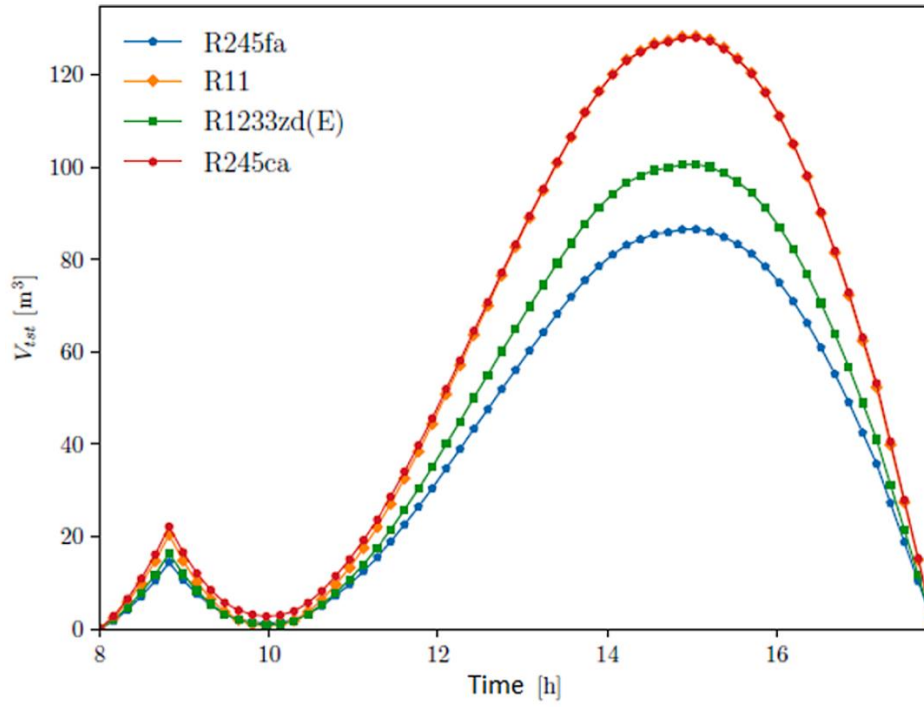


Figura 6. Volumen de fluido en el TST para los 4 fluidos de trabajo

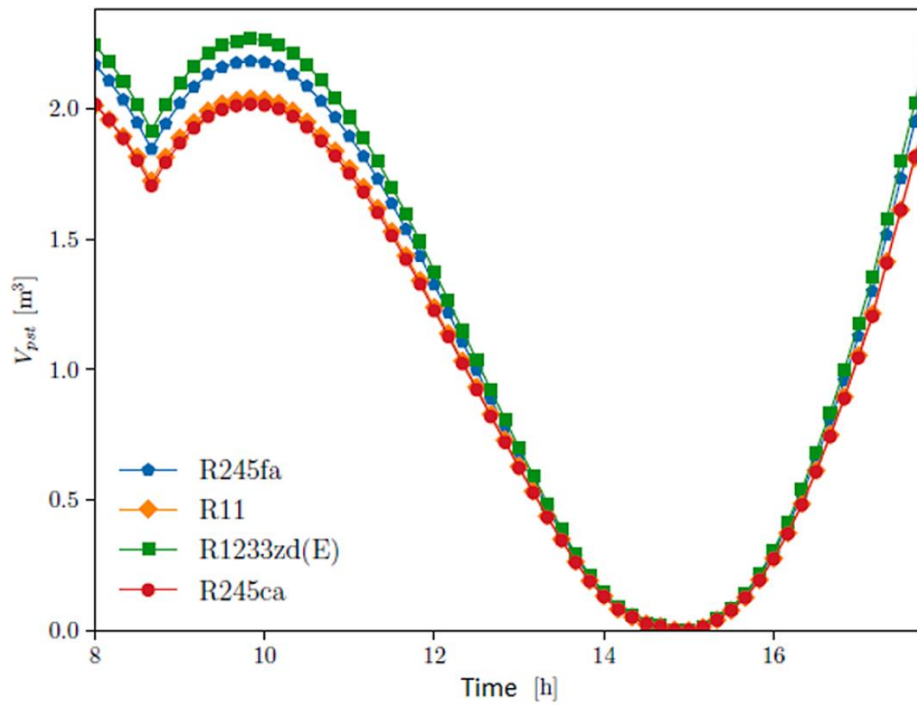


Figura 7. Volumen de fluido en el PST para los 4 fluidos de trabajo

## 7. Productos generados

Con este proyecto **2 estudiantes de licenciatura** pudieron desarrollar y concluir su proyecto de titulación. Además, se publicó **un artículo en una revista indexada** y se logró la **participación en un congreso internacional**

## 8. Conclusiones

Con los resultados de este proyecto se seleccionan los parámetros de presión de compresión y flujo másico de fluido orgánico para operar un sistema de ciclo Rankine orgánico basado en radiación solar y además se define una metodología para generar la geometría básica de una turbina radial que pueda operar de manera eficiente durante el proceso energético

## 9. Mecanismos de transferencia. (Si aplica)

No aplica

## 10. Contribución e impacto del proyecto

Los resultados obtenidos en este proyecto permiten sentar las bases para continuar la investigación de esta prometedora alternativa energética. Áreas con el estudio y caracterización de la radiación solar a partir de datos de estaciones solarimétricas, diseño termodinámico de sistemas ORC, estudio de generación de entropía en turbinas y análisis tecno-económicos pueden ser desarrollados a partir de la información obtenida como resultado de este proyecto

## 11. Impacto económico, social y/o ambiental en la región

Debido a la alta incidencia radiativa que se tiene en la región fronteriza, la implementación de sistemas ORC se tiene como una alternativa factible para la generación de energía a pequeña escala, para uso doméstico, comercial, alumbrado público, entre otros. Es claro que se requiere un mayor trabajo de investigación con un equipo multidisciplinario. Sin embargo, el impacto económico, social y ambiental radica en lo importante que el consumo y uso eficiente de los recursos energéticos es para el desarrollo y crecimiento de una sociedad como lo es la fronteriza.

## 12. Referencias (bibliografía)

13. [1] Delgado-Torres, Agustín M., and Lourdes García-Rodríguez. "Analysis and optimization of the low-temperature solar organic Rankine cycle (ORC)." *Energy conversion and Management* 51.12 (2010): 2846-2856.
14. [2] Wang, Man, et al. "Thermodynamic analysis and optimization of a solar-driven regenerative organic Rankine cycle (ORC) based on flat-plate solar collectors." *Applied Thermal Engineering* 50.1 (2013): 816-825.
15. [3] Bellos, Evangelos, and Christos Tzivanidis. "Investigation of a hybrid ORC driven by waste heat and solar energy." *Energy conversion and management* 156 (2018): 427-439.
16. [4] Quoilin, Sylvain, et al. "Thermo-economic optimization of waste heat recovery Organic Rankine Cycles." *Applied thermal engineering* 31.14-15 (2011): 2885-2893.
17. [5] Quoilin, Sylvain, et al. "Performance and design optimization of a low-cost solar organic Rankine cycle for remote power generation." *Solar energy* 85.5 (2011): 955-966.
18. [6] Quoilin, Sylvain, et al. "Dynamic modeling and optimal control strategy of waste heat recovery Organic Rankine Cycles." *Applied energy* 88.6 (2011): 2183-2190.
19. [7] Quoilin, Sylvain, et al. "Techno-economic survey of Organic Rankine Cycle (ORC) systems." *Renewable and sustainable energy reviews* 22 (2013): 168-186.
20. [8] Bell, Ian H., et al. "Pure and pseudo-pure fluid thermophysical property evaluation and the open-source thermophysical property library CoolProp." *Industrial & engineering chemistry research* 53.6 (2014): 2498-2508.
21. [9] Zhai, Huixing, et al. "Categorization and analysis of heat sources for organic Rankine cycle systems." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 64 (2016): 790-805.

## 22. Anexos

# Instituto de Ingeniería y Tecnología

Ciudad Juárez Chihuahua a los 18 días del mes de noviembre del 2020, siendo las 15:00 horas, se reúnen de manera virtual los integrantes del jurado:

Presidente del jurado: Mtro. Manuel Alejandro Lira Martínez  
Sinodal 1: Dr. Francisco Carrillo Pereira  
Sinodal 2: Dr. José Omar Dávalos Ramírez

Se procede a efectuar la evaluación del proyecto de titulación que presenta el **C. SOSA SULUB HECTOR EDUARDO**, con matrícula **148654** alumno del programa de **Ingeniería en Aeronáutica**, asesorado por el Dr. Uzziel Caldiño Herrera y co-asesorado por el Dr. Delfino Cornejo Monroy

Tomando en cuenta los miembros del jurado el contenido del proyecto cuyo tema es: **Diseño preliminar y generación de superficies primitivas de una turbina de flujo radial para un ciclo Rankine orgánico** y la réplica del mismo, dictamina que es: **Aprobado**

El presidente del jurado hace saber a el sustentante el resultado obtenido.

Se da por terminado el Acto a las 15:50 horas, y una vez escrita, leída y aprobada la forman para dar constancia las personas que en el acto intervienen.

Dr. Francisco Carrillo Pereira  
Sinodal 1

Dr. Diego Moisés Almazo Pérez  
Lector

Dr. José Omar Dávalos Ramírez  
Sinodal 2

Dr. Uzziel Caldiño Herrera  
Asesor Técnico



UACJ  
DEPARTAMENTO DE  
INGENIERÍA INDUSTRIAL  
Y MANUFACTURA

Dr. Delfino Cornejo Monroy  
Co-Asesor Técnico

Mtro. Carlos Alberto Gómez Álvarez  
Coordinador de la Academia  
De Ingeniería Aeronáutica

Mtro. Manuel Alejandro Lira Martínez  
Profesor de la asignatura

Mtro. Manuel Alejandro Lira Martínez  
Coordinador del Programa  
De Ingeniería Aeronáutica

# Instituto de Ingeniería y Tecnología

Ciudad Juárez Chihuahua a los 19 días del mes de mayo del 2020, siendo las 11:00 horas, se reúnen de manera virtual los integrantes del jurado:

Presidente del jurado: Mtro. Manuel Alejandro Lira Martínez

Sinodal 1: Dr. Francisco Carrillo Pereyra

Sinodal 2: Dr. Delfino Comejo Monroy

Se procede a efectuar la evaluación del proyecto de titulación que presenta la **C. Maricela Hinojo Barrios**, con matrícula **140463**, alumno del programa de **Ingeniería en Aeronáutica**, asesorado por Dr. Uzziel Caldiño Herrera y co-asesorado por el Dr. Shehret Tilvaldyev

Tomando en cuenta los miembros del jurado el contenido del proyecto cuyo tema es: **Optimización de Ciclo Rankine Orgánico (ORC) impulsado por sistema de concentración solar mediante el análisis y selección del fluido de trabajo** y la réplica del mismo, dictamina que es: **Aprobado**

El presidente del jurado hace saber a la sustentante el resultado obtenido.

Se da por terminado el Acto a las 11:50 horas, y una vez escrita, leída y aprobada la forman para dar constancia las personas que en el acto intervienen.



Dr. Francisco Carrillo Pereyra  
Sinodal 1



Dr. Francisco Carrillo Pereyra  
Lector



Dr. Delfino Comejo Monroy  
Sinodal 2

Dr. Uzziel Caldiño Herrera  
Asesor Técnico



Mtro. Carlos Alberto Gómez Álvarez  
Coordinador de la Academia  
De Ingeniería Aeronáutica



Mtro. Manuel Alejandro Lira Martínez  
Profesor de la asignatura

Dr. Shehret Tilvaldyev  
Co-Asesor Técnico



Mtro. Manuel Alejandro Lira Martínez  
Coordinador del Programa  
De Ingeniería Aeronáutica



GT2019-90163

**RADIAL INFLOW TURBINE GEOMETRY GENERATION METHOD USING THIRD ORDER BEZIER CURVES FOR BLADE DESIGN**

**U. Caldiño-Herrera**

Universidad Autónoma de Ciudad Juárez  
 Ciudad Juárez, Chihuahua, México

**J.C. García**

Universidad Autónoma del Estado de Morelos  
 Cuernavaca, Morelos, México

**F. Sierra-Espinosa**

Center For Research & Applied  
 Sciences  
 Cuernavaca, Morelos, México

**JO Dávalos**

Universidad Autónoma de  
 Ciudad Juárez  
 Ciudad Juárez, Chihuahua,  
 México

**M. A. Lira**

Universidad Autónoma de  
 Ciudad Juárez  
 Ciudad Juárez, Chihuahua,  
 México

**ABSTRACT**

Radial inflow turbines offer larger efficiency performance for small power applications due to its geometric configuration in which flow varies its radial position along the flow path.

The geometry configuration of radial-inflow turbines demands a careful and adequate design of the flow path, since a 90° change of direction occurs from the radial inflow to the axial outflow. The blade camberline also requires attention since it defines the tangential flow direction along the meridional coordinate and any variation in its geometry affects the turbine performance.

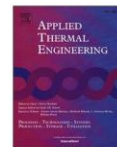
In this paper, a method for meridional profile and camberline geometry generation is proposed and tested through CFD. The method consists in using fourth order Bezier curves for defining the hub, shroud and mid-height blade meridional profile and third order Bezier curves for defining the relative flow velocity angle along the meridional coordinate, which leads to the camberline angular position in the rotor considering radial fibered blades. The blade thickness is set to vary linearly along the meridional coordinate and along the blade height. Different configurations of blade geometry are proposed and analyzed. These configurations are fixed to satisfy the design parameters.

The code is programed in Python and adjusts the geometry data in files that are readable by meshing software. Thereby numerical calculations are performed to verify which configuration of camberline results in better performance. The calculations are done in models with the same boundary conditions and geometric data except for the variation of relative flow velocity angle along the meridional coordinate but setting the inlet and outlet angle to a fixed value. This way, the most

suitable camberline geometry can be selected. The CDF model used for this analysis was validated with the experimental results reported by Kang et al. [1]

**NOMENCLATURE**

$A$	Flow area
$b$	Blade height
$C$	Absolute velocity
$D_s$	Specific diameter
$h$	Enthalpy
$L_z$	Rotor axial length
$r$	Radius
$t$	Blade thickness
$m$	Meridional coordinate
$\dot{m}$	Mass flow rate
$N_R$	Number of blades
$N_s$	Specific speed
$P$	Anchor points for Bezier curves
$U$	Blade velocity
$z$	Axial direction
$\alpha$	Absolute velocity angle
$\beta$	Relative velocity angle
$\eta$	Efficiency
$\rho$	Density
$\theta$	Blade angular position
$\omega$	Rotational speed



## Enhanced thermal efficiency organic Rankine cycle for renewable power generation

U. Caldiño Herrera<sup>a</sup>, J.C. García<sup>b</sup>, F.Z. Sierra-Espinosa<sup>b,\*</sup>, J.A. Rodríguez<sup>b</sup>, O.A. Jaramillo<sup>c</sup>, O. De Santiago<sup>d</sup>, S. Tilvaldiev<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, Av. Plutarco Elías Calles 1210, Ciudad Juárez, Chihuahua 32310, Mexico

<sup>b</sup> Universidad Autónoma del Estado de Morelos, Av. Universidad 1001, UAEM, Cuernavaca, Morelos 62209, Mexico

<sup>c</sup> Instituto de Energías Renovables, Universidad Nacional Autónoma de México, Priv. Xochicalco s/n, Temixco, Morelos 62580, Mexico

<sup>d</sup> ETU I+D, Cuauhtémoc 3, Ind. San Pedrito Peñuelas, Querétaro 76148, Mexico

### ARTICLE INFO

#### Keywords:

Solar assisted ORC  
Single-loop ORC  
R245fa organic fluid  
Radial income turbine  
ORC plant output

### ABSTRACT

The Organic Rankine Cycle (ORC) technology is recognized to supply electricity from low temperature waste heat and solar energy sources. When the ORC system is heated by solar energy it uses two-fluids and two-loops, producing a relatively low thermal efficiency. To increase the ORC applicability, a solar energy assisted ORC system of single loop is proposed. The aim is to reduce the ORC heat transfer losses, minimize the equipment initial and maintenance cost and enhance the thermal efficiency. This is achieved by using bladder tanks which may improve drastically the ORC technical and economic performance. This method allows the heating to vary in the collector keeping the turbine inlet condition as a constant, impacting on the heat transfer losses and simplifying the configuration. The paper shows that an ORC of a single fluid can keep a constant turbine inlet despite the mass flow rate variations due to the suns radiation incidence, therefore, reducing the risk of likely faults in the turbine caused by high frequency vibration. An ORC enhanced 10.54% thermal efficiency is obtained with 0.5 kg/s of R1233zd(E) and a pressure ratio = 5, powered by parabolic trough collectors to generate 10 kW during eight hours per day. The ORC competitiveness is dictated by a total generation cost of 54.3 \$/MWh and the advantages of a single working-fluid single loop simplicity for overall configuration.

### 1. Introduction

Global demand for energy consumption increases despite the variable prices of fossil fuel and its negative effects on the environment. The consequence is that the ratio of using conventional energy sources to alternative technologies for a variety of applications is continuously reducing [1]. Low-grade heat sources like solar, geothermal, biomass, surface seawater, and waste heat are thus clean and sustainable alternatives [2–6], suitable as for driving an organic Rankine cycle (ORC) with multipurpose applications [7,8]. Focusing on the generation of electricity, examples of installed plants worldwide use this technology, which also demonstrate their cost-effective potential [3,6,7,9]. Achievement of these goals means that several constraints must be overcome: the expander to drive the electrical generator, typically a turbine, directly affects the efficiency of the system given that its designed for the working fluid properties, energy source temperature, flow rate, condensing pressure and goal power output [10]. Also, the

best operating condition for the highest turbine efficiency demands a high speed [5,6,10]. This situation leads to unsuitability for the direct coupling to a grid synchronous running speed [11]. Regarding the working fluid, it must be specifically selected according to the source of heating, the site climate conditions and load conditions [5,6,12–16]. For instance, R245fa is used with flat plate solar collectors in a layout of rolling piston expander to obtain 1.73 kW and thermal efficiency of 3.2% [17]. With evacuated solar collectors the system reaches an isentropic expander efficiency of 45.2% and a thermal efficiency of 4.2%. Instead, with a regenerator the thermal efficiency goes to 3.67% [18], which may still improve if the mass flow of the working fluid could offset the influence from unsteady solar radiation. Another solution for increasing the applicability of the ORC technology is the use of thermal energy storage (TES), because it allows the ORC to operate with low solar radiation, or even running using a different R123 working fluid, and powering with parabolic trough or flat plate solar collectors [19,20]. The TES approach basically allows to overcome the variable nature of solar radiation using heat storage materials to interact through

\* Corresponding author.

E-mail address: [fse@uaem.mx](mailto:fse@uaem.mx) (F.Z. Sierra-Espinosa).

<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2021.116706>

Received 23 August 2020; Received in revised form 20 January 2021; Accepted 5 February 2021

Available online 20 February 2021

1359-4311/© 2021 Elsevier Ltd. All rights reserved.

## 22.1 Taxonomía de los Roles de Colaborador (con las actividades logradas)

Roles	Definición de los roles	Nombre de él(la) investigador(a)	Figura	Grado de contribución	Actividades logradas durante el proyecto	Tiempo promedio semanal (en horas) dedicado al proyecto
Responsabilidad de la dirección del proyecto	Coordinar la planificación y ejecución de la actividad de investigación. Organiza los roles de cada colaborador, tiene la habilidad de identificar potenciales de cada individuo para generar una sinergia de equipo colaborativo	Uzziel Caldiño Herrera	Director(a) del proyecto	Principal		8
Responsabilidad de supervisión	Elaborar la planificación de las actividades de la investigación (cronogramas y controles de seguimiento), describe los roles identificados por el director del proyecto y facilita el apoyo constante a todos los roles para conseguir un trabajo integral, coherente y que llegue a buen término.	Alfredo Villanueva Montellano	Supervisor(a) del proyecto	De apoyo		4
Recopilación / recolección de datos e información	Ejecuta las estrategias propuestas en acciones encaminadas a obtener la información, haciendo la recopilación de datos y la inclusión de la evidencia en el proceso.	Arturo Paz Pérez	Recopilador de datos	De apoyo		4
Recopilación / recolección de datos e información	Ejecuta las estrategias propuestas en acciones encaminadas a obtener la información, haciendo la recopilación de datos y la inclusión de la evidencia en el proceso.	Diego Moises Almazo Pérez	Recopilador de datos	De apoyo		4

### 22.1.1 Estudiantes participantes en el proyecto

Nombre de estudiante(s)	Matrícula	Tiempo promedio semanal (en horas) dedicado al proyecto	Actividades logradas en la ejecución del proyecto
-------------------------	-----------	---	---

Maricela Hinojo Barrios	140463	8	Titulación como ingeniero aeronáutico
Héctor Sosa Sulub	148654	8	Titulación como ingeniero aeronáutico