

# GUIA DE USUARIO

## WHR-Engine

---

Guillermo Valencia Ochoa, Edwin Espinel Blanco, Jorge Duarte Forero  
Universidad del Atlántico  
Barranquilla Colombia, mayo 2020

### CONTENIDO

|                                            |   |
|--------------------------------------------|---|
| 1. INTRODUCCION. ....                      | 0 |
| 2. PASOS PARA EJECUCION DEL PROGRAMA ..... | 1 |
| 3. FUNCIONALIDAD DE LA HERRAMIENTA. ....   | 9 |

### 1. INTRODUCCION.

WHR-Engine es un software desarrollado en ambiente Matlab que permite la evaluación del desempeño termodinámico, económico y exergo-económico de un sistema de recuperación de gas de escape acoplado a un motor de combustión interna industrial de 2 MW. El software se ha diseñado para ser usado como herramienta de apoyo a los estudiantes de Ingeniería Mecánica, Química y a fines para tener una mayor comprensión sobre los principios termodinámicos, económicos que están involucrados en estos sistemas de generación de energía eléctrica a partir de calor residual. Así mismo, el software fue diseñado con el propósito de ofrecer una herramienta fácil de usar y accesible al usuario tratando de abarcar los principios físicos-matemáticos que rigen los procesos de transferencia de calor, balance de masas, mediante visualizaciones gráficas todo completamente documentado y disponible en el software.

El software está dividido en varias ventanas (o espacios de trabajos) que permiten realizar casos de estudios. La primera ventana denominada “*Energy and Exergy Analysis*” permite realizar la evaluación del desempeño termodinámico, y exergético del sistema considerando variables de salida como la eficiencia térmica, exergética, y potencia neta producida de sistema. La segunda ventana llamada “*Thermo-Economic Analysis*” realiza estudios económicos y permite determinar los periodos de recuperación de la inversión (PBP, por sus siglas en ingles), el costo nivelado de la energía (LCOE, por sus siglas en ingles), entre otros. Una tercera ventana denominada “*Exergo-Economic Analysis*” en la que se evalúa el costo del insumo-producto de cada uno de los componentes del sistema, las exergías destruidas, además de parámetros exergo-económicos como el factor exergo-económico ( $f_k$ ), y la diferencia del costo relativo  $r_k$

Finalmente, el software cuenta con una base de tres fluidos de trabajo que pueden ser sometidos a estudio. Además, permite la realización de casos de estudio y generar resultados gráficos que permiten analizar su comportamiento y tomar decisiones de mejora.

## 2. PASOS PARA EJECUCION DEL PROGRAMA

Para usuario que tiene Matlab instalado en su Pc, se debe verificar si en el computador está instalado el RunTime 8.5 (R2015a), escribiendo mcrinstaller en el Command Windows. Esto le permite mostrar la versión vigente que tengan instalado del Runtime. Se puede presentar los siguientes casos:

1. El Runtime instalado por defecto en el Matlab es una versión diferente a la 8.5.
2. El computador del usuario no tiene Matlab instalado.

En estas circunstancias diríjase hacia la siguiente página oficial para descargarlo:

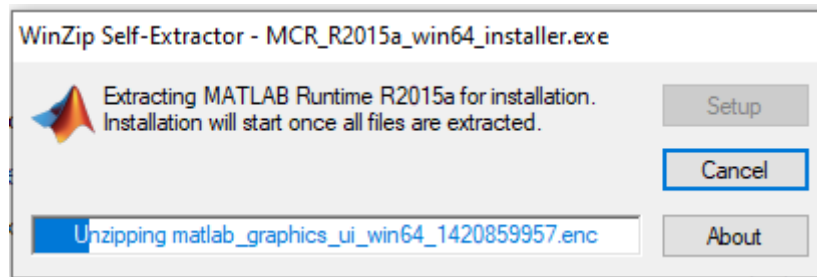
<https://es.mathworks.com/products/compiler/mcr.html>

Ubicado en la página, aparecerá un cuadro con las versiones disponibles de Matlab para la descarga del Runtime. Seleccione la versión R2015a (8.5), el sistema operativo al cual corresponda y los Bits de su Pc. Observe la Figura 1.

| Release (MATLAB Runtime Version#) | Windows                                                                                                                               | Linux           | Mac                   |
|-----------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|-----------------------|
| R2020a (9.8)                      | 64-bit                                                                                                                                | 64-bit          | Intel 64-bit          |
| R2019b (9.7)                      | 64-bit                                                                                                                                | 64-bit          | Intel 64-bit          |
| R2019a (9.6)                      | 64-bit                                                                                                                                | 64-bit          | Intel 64-bit          |
| R2018b (9.5)                      | 64-bit                                                                                                                                | 64-bit          | Intel 64-bit          |
| R2018a (9.4)                      | 64-bit                                                                                                                                | 64-bit          | Intel 64-bit          |
| R2017b (9.3)                      | 64-bit                                                                                                                                | 64-bit          | Intel 64-bit          |
| R2017a (9.2)                      | 64-bit   Update                                                                                                                       | 64-bit   Update | Intel 64-bit   Update |
| R2016b (9.1)                      | 64-bit   Update                                                                                                                       | 64-bit   Update | Intel 64-bit   Update |
| R2016a (9.0.1) <sup>1,2</sup>     | 64-bit   Update                                                                                                                       | 64-bit   Update | Intel 64-bit   Update |
| R2015b (9.0) <sup>1,2,3</sup>     | 32-bit / 64-bit                                                                                                                       | 64-bit          | Intel 64-bit          |
| R2015aSP1 (8.5.1) <sup>1</sup>    | 32-bit / 64-bit                                                                                                                       | 64-bit          | Intel 64-bit          |
| R2015a (8.5) <sup>1</sup>         | 32-bit / 64-bit                                                                                                                       | 64-bit          | Intel 64-bit          |
| R2014b (8.4) <sup>1</sup>         | 32-bit / 64-bit                                                                                                                       | 64-bit          | Intel 64-bit          |
| R2014a (8.3) <sup>1</sup>         | 32-bit / 64-bit                                                                                                                       | 64-bit          | Intel 64-bit          |
| R2013b (8.2)                      | 32-bit / 64-bit                                                                                                                       | 64-bit          | Intel 64-bit          |
| R2013a (8.1)                      | 32-bit / 64-bit                                                                                                                       | 64-bit          | Intel 64-bit          |
| R2012b (8.0)                      | 32-bit / 64-bit                                                                                                                       | 64-bit          | Intel 64-bit          |
| R2012a (7.17)                     | 32-bit / 64-bit                                                                                                                       | 32-bit / 64-bit | Intel 64-bit          |
| R2011b y anteriores <sup>4</sup>  | Abra MATLAB y ejecute el comando mcrinstaller con el fin de ubicar MATLAB Runtime para redistribución con sus componentes compilados. |                 |                       |

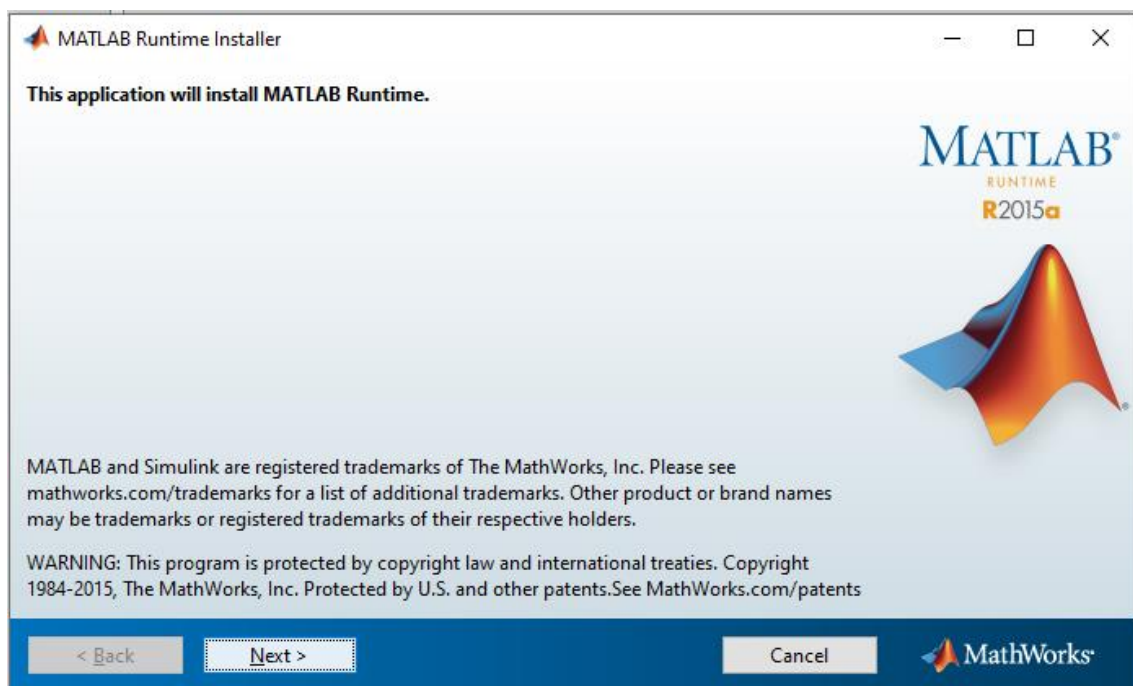
**Figura 1.** Selección de Runtime R2015a (8.5) para la descarga.

Espere mientras se inicia la descarga. Una vez finalizado el proceso, busque el archivo descargado y ábralo para extraer todos los archivos necesarios para iniciar la instalación. Observe la Figura 2



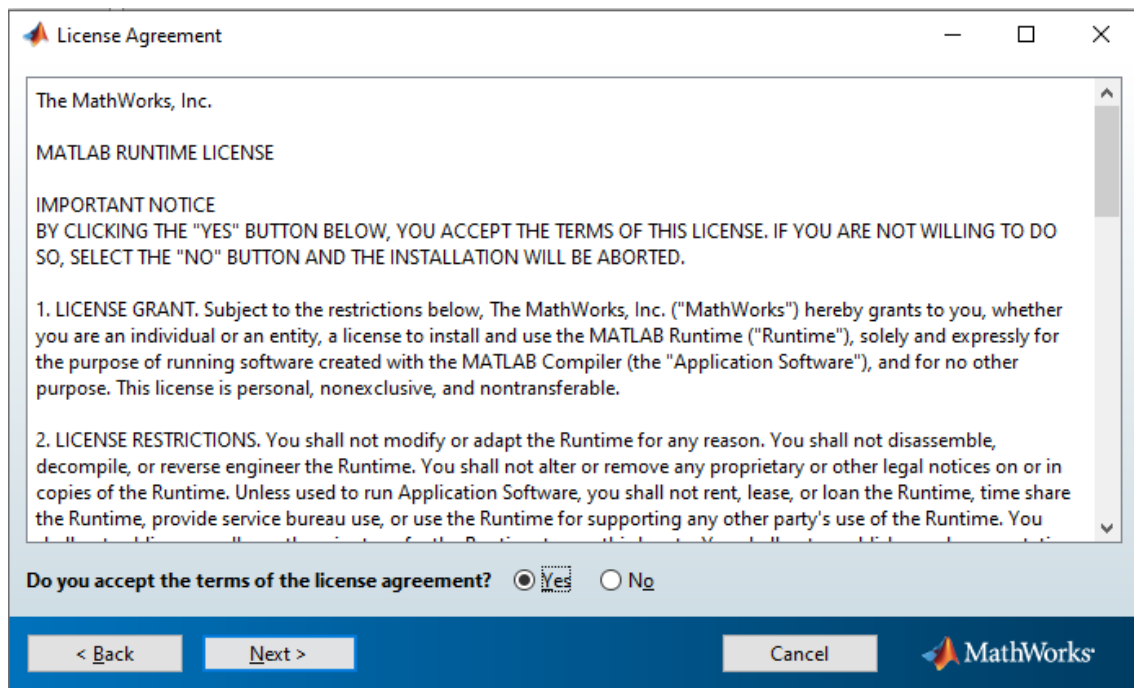
**Figura 2.** Extracción archivo Matlab Compiler Runtime.

Una vez completada la extracción se iniciará automáticamente el proceso de instalación (Ver Figura 3). Luego de clic en “Next” para iniciar el proceso de instalación.



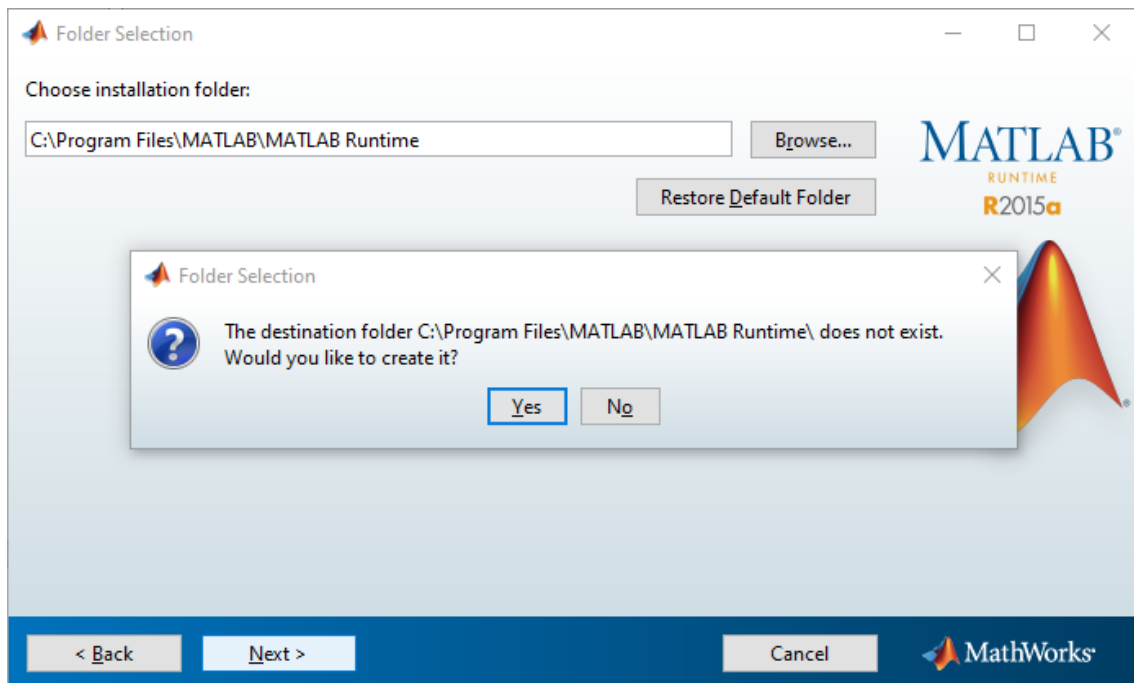
**Figura 3.** Pasos para la instalación MCR.

Luego acepte los términos y condiciones y continúe con los pasos que le muestre el asistente Figura 4.



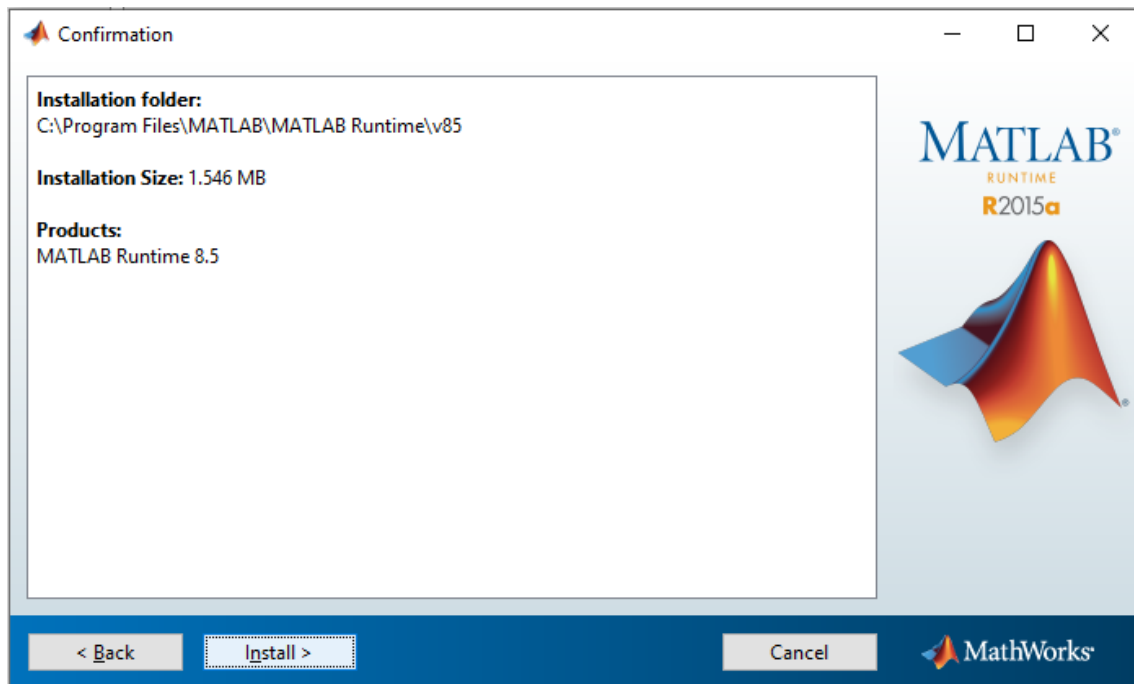
**Figura 4.** Aceptar términos de licencia de la aplicación.

Luego de marcar la casilla “Yes”, presione “Next”. Posteriormente, aparecerá una ventana como se observa en la Figura 5. Presione “Next” para dejar por defecto la carpeta en la cual se ubicará la aplicación y luego “Yes”.



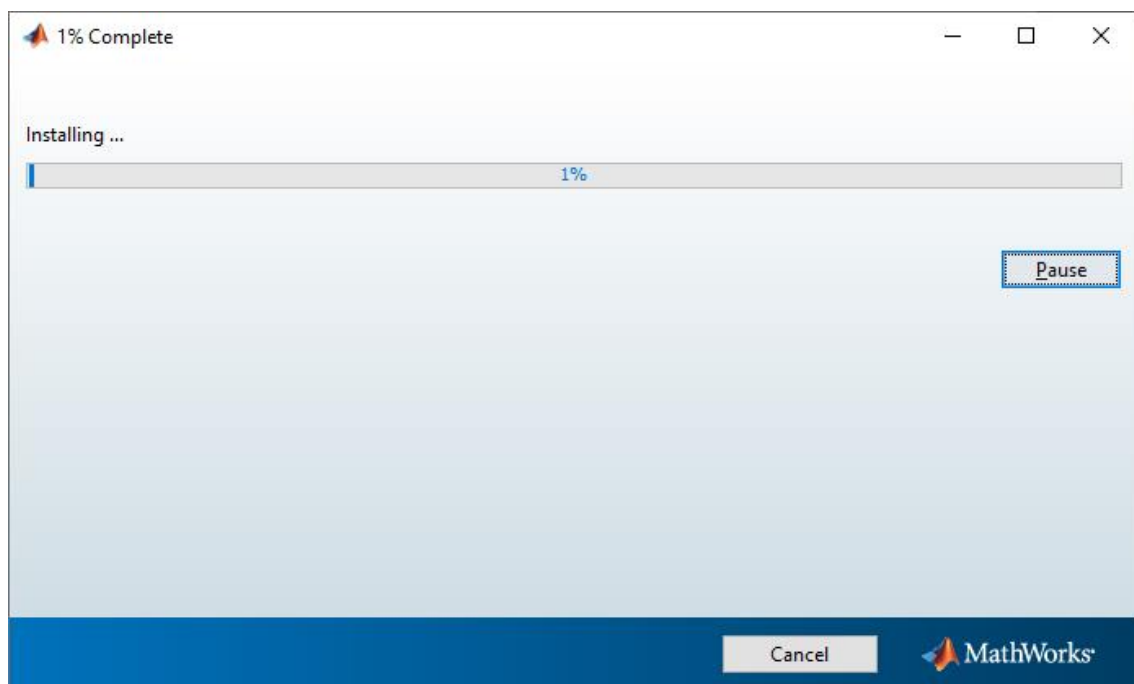
**Figura 5.** Proceso de instalación MCR.

Seguidamente, se despliega una ventana como se observa en la Figura 6. Presione “Install”.



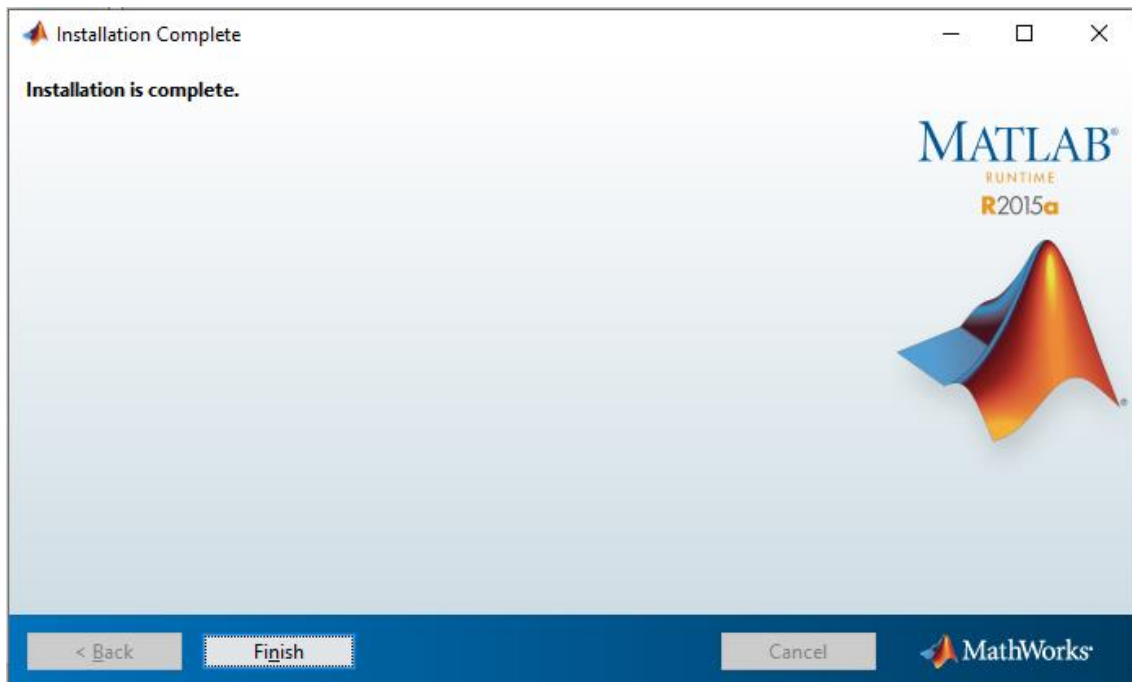
**Figura 6.** Ventana instalación del folder del producto.

Finalmente, iniciara el proceso de instalación como se observa en la Figura 7. Espere unos minutos mientras culmina el proceso.



**Figura 7.** Ventana de avance de instalación de la aplicación.

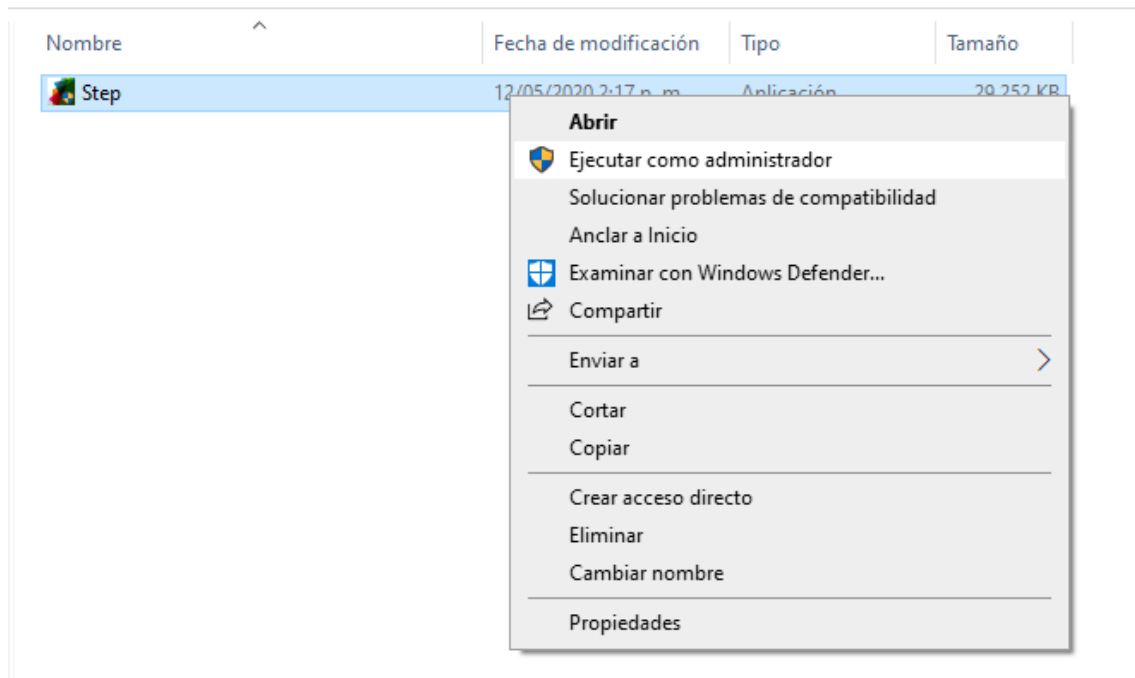
Después de realizada la instalación se mostrará una ventana como se observa en la Figura 8. Presione “*Finish*” para cerrarla.



**Figura 8.** Finalización del proceso de instalación de la aplicación Matlab Runtime 8.5a.

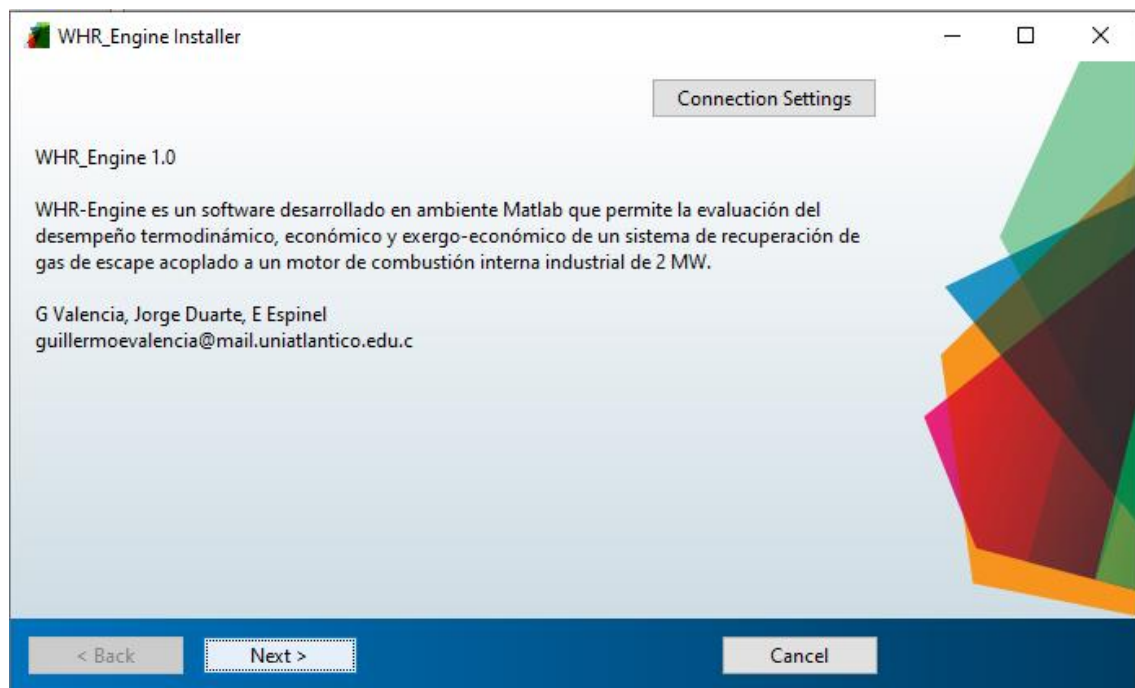
Después de haber instalado el Matlab Runtime 8.5, es necesario instalar un complemento que permiten la ejecución de la herramienta. Para ello, diríjase hacia la carpeta WHR\_Engine, y copie la carpeta llamada REFPROP, luego ubíquese en la unidad del disco local C, abra la carpeta Archivo de programa y pegue allí la carpeta de REFPROP. Realice el mismo procedimiento copiando la carpeta REFPROP pegándola ahora en Archivos de Programa (x86). El sistema pedirá autorización del administrador, en este caso acepte para realizar el proceso de pegado

Hasta este punto, se han instalado todos los requerimientos necesarios para una correcta ejecución del software. Ahora, diríjase hacia la carpeta WHR\_Engine y abra la carpeta llamada “for\_redistribution”, encontrará un ejecutable, ábralo como se observa en la Figura 9.



**Figura 9.** Pasos para ejecutar el Instalador.

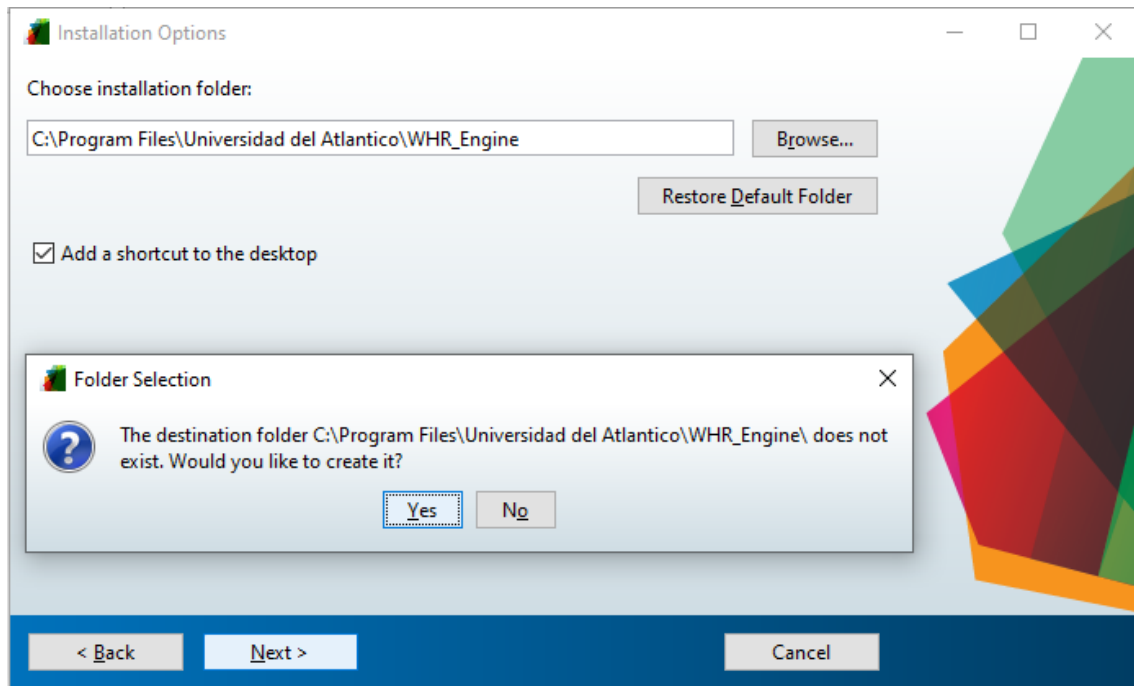
El control de cuentas de usuario le preguntará si desea que la aplicación realice cambios en su equipo. Seleccione la casilla “Sí”. Luego aparecerá una ventana como se observa en la Figura 10. De clic en “Next”. Espere unos minutos mientras el asistente realiza configuraciones.



**Figura 10.** Ajustes para conexiones.

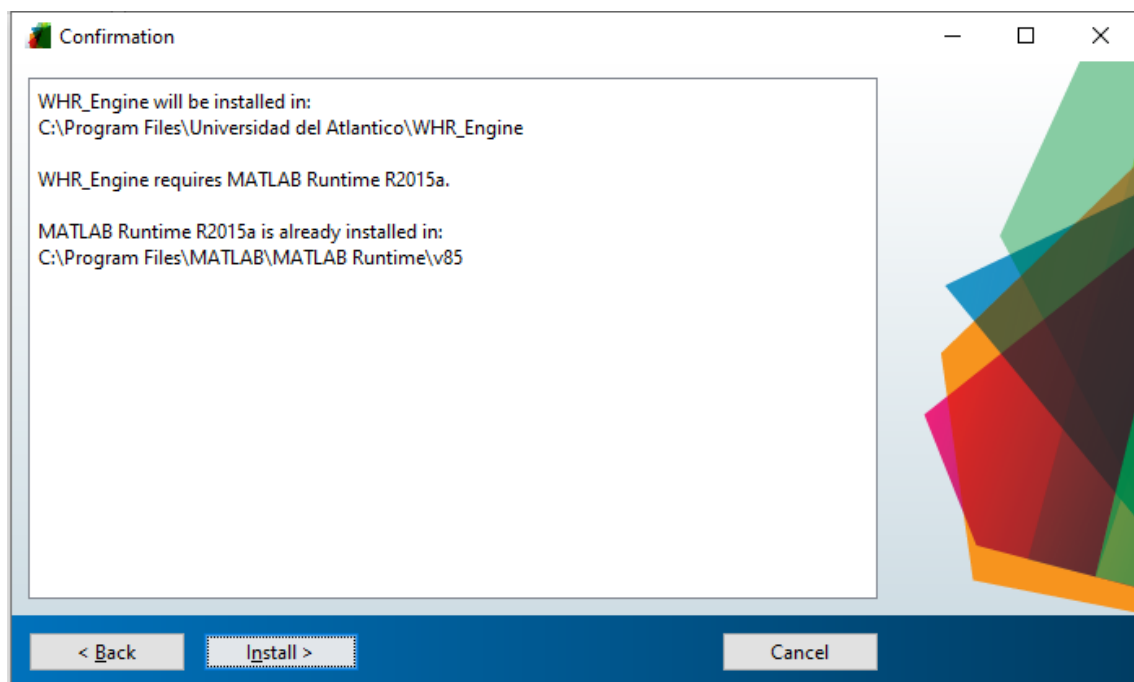
Luego aparecerá una ventana como se observa en la Figura 11. Por defecto el asistente crea un folder de instalación. Si el usuario desea puede dar clic en “Browse” y

especificar uno diferente. Marque la Casilla “Add Shortcut to the desktop”, para crear acceso directo en el escritorio. Luego de clic en “Next” y posteriormente en “Yes”



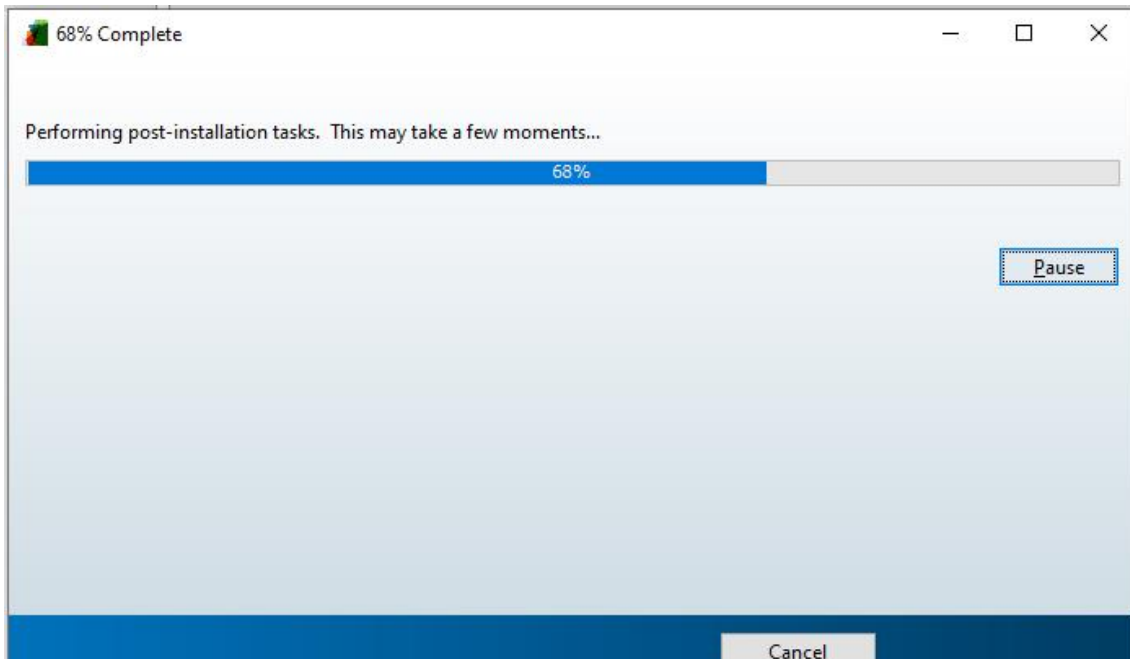
**Figura 11.** Especificación de la ruta de instalación y acceso directo.

Finalmente aparecerá una ventana como se muestra en la Figura 12. En este punto se confirma la instalación del programa especificando la ruta. También, los requerimientos del Runtime para la ejecución de dicho programa, el cual ya ha sido instalado. De clic en “Install” para continuar en el proceso.



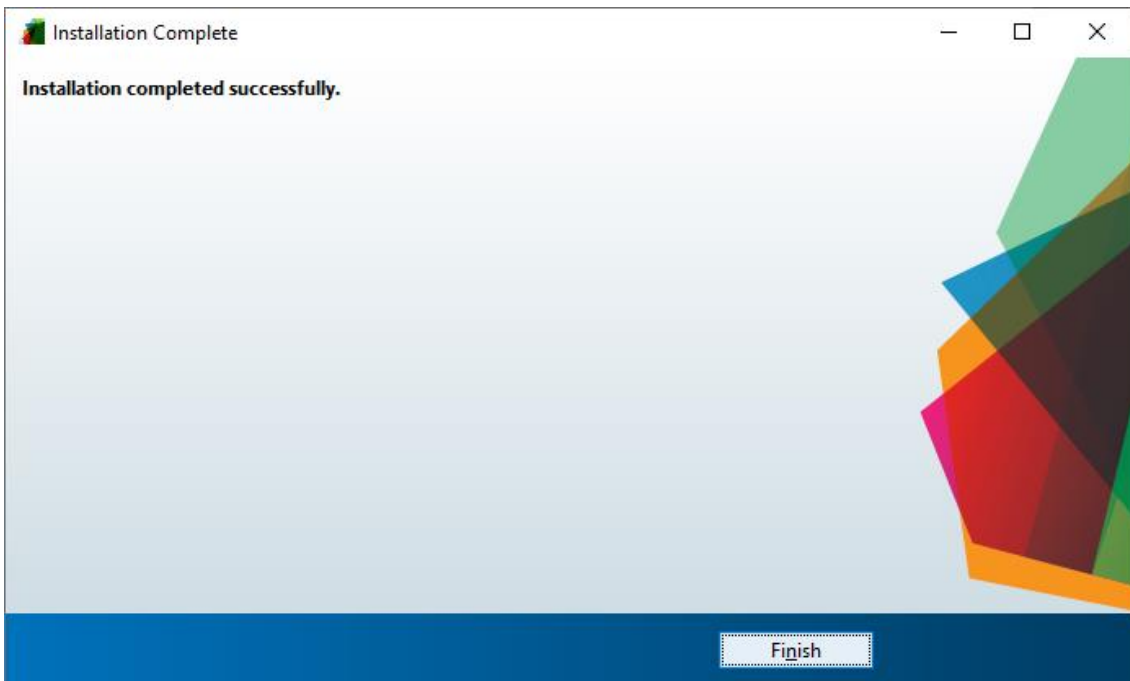
**Figura 12.** Confirmación de la instalación del software WHR-Engine.

Luego, se iniciará el proceso de instalación como se muestra en la Figura 13.



**Figura 13.** Progreso de instalación del software.

Finalmente, el Software habrá sido instalado con éxito como se observa en la Figura 14. Presione “*Finish*” para cerrar la ventana.



**Figura 14.** Finalización del proceso de instalación del Software WHR-Engine.

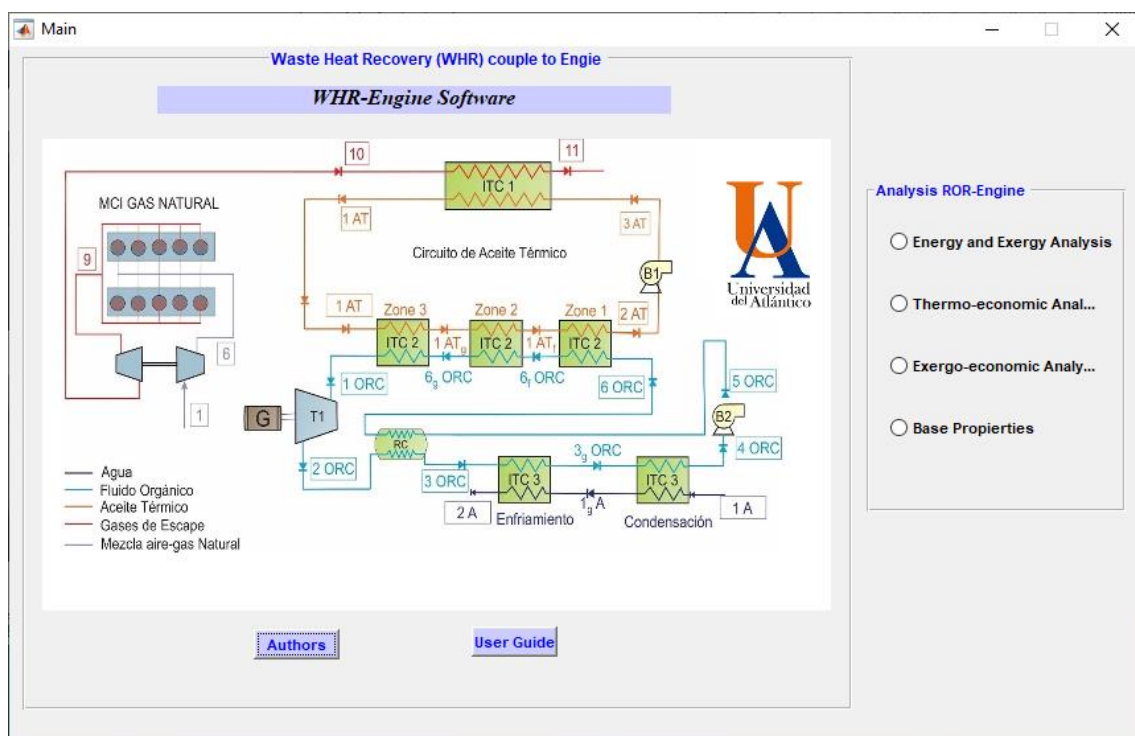
Después de haber finalizado el proceso de instalación, la aplicación quedará por defecto en el escritorio con acceso directo escritorio como se observa en la Figura 15. De doble clic y se abrirá la ventana principal de la herramienta.



**Figura 15.** Shortcut del software en el escritorio.

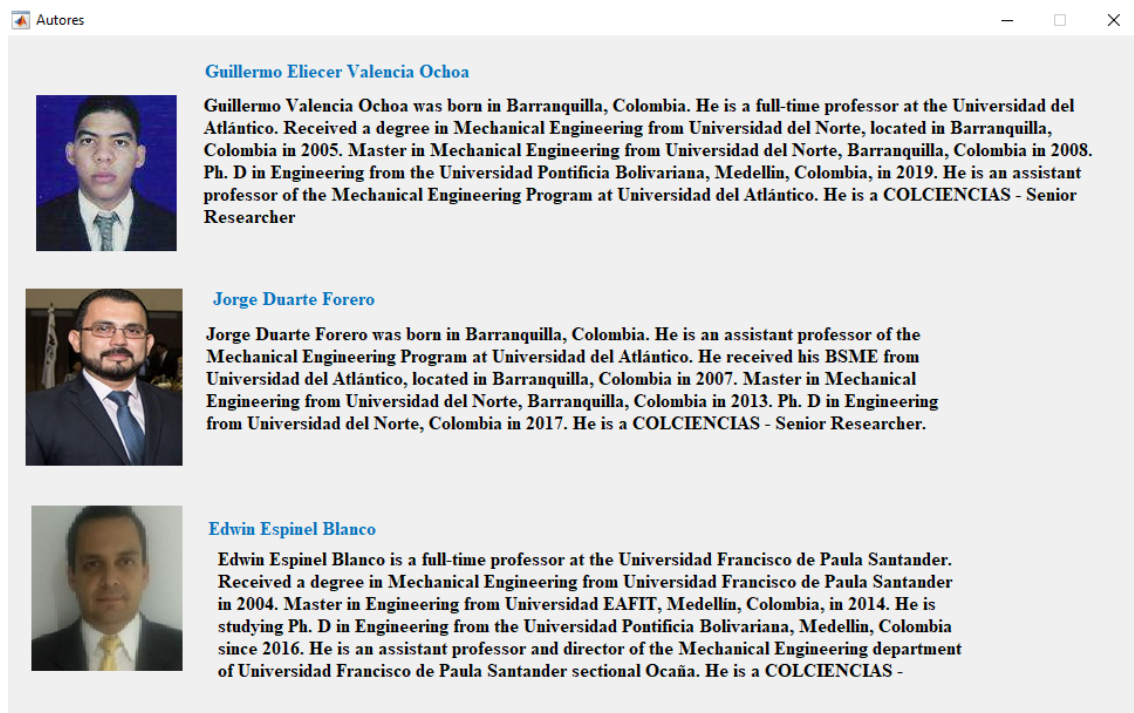
### 3. FUNCIONALIDAD DE LA HERRAMIENTA.

Con el fin de mostrar la funcionalidad de la herramienta desarrollada se realiza la descripción de sus funciones con casos de estudios prácticos. Después de haber realizado de manera exitosa el proceso de instalación, abra la aplicación como se observa en la Figura 16.



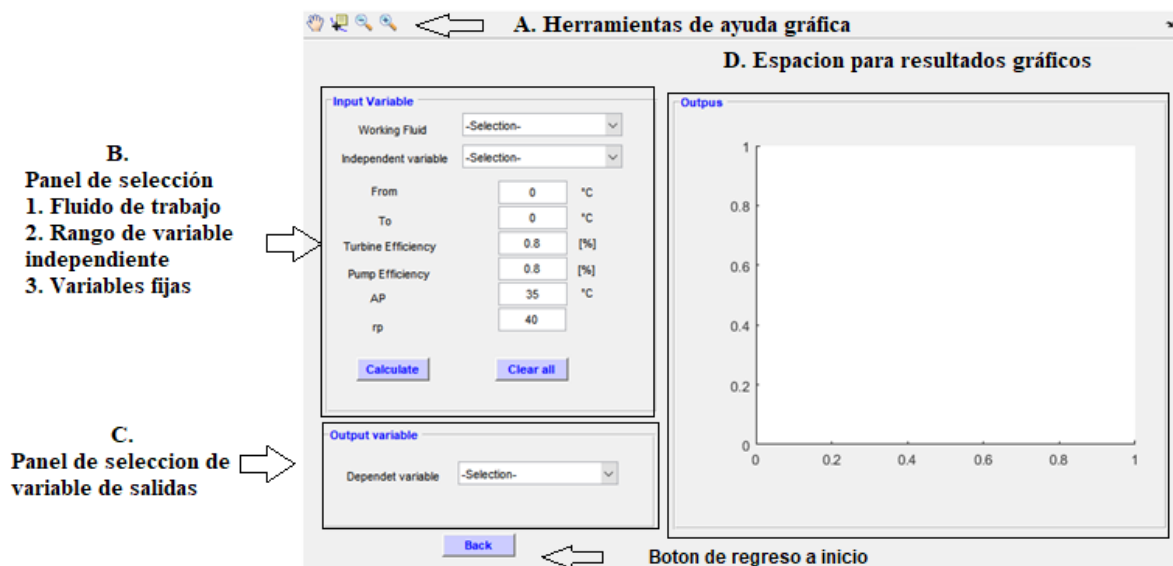
**Figura 16.** Ventana principal de la herramienta.

La Figura 16, muestra la ventana principal de la herramienta WHE-Engine. En el botón “Authors” contiene la descripción de los autores involucrados en el desarrollo del software. El botón “User Guide”, contiene información referente al manejo de la interfaz. En la Figura 17 se muestra la información de los autores.



**Figura 17.** Ventana de autores.

Por otro lado, en la parte superior derecha, se encuentra un panel llamado “*Analysis RORC-Engine*”. Aquí, el usuario encuentra los cuatros ambientes de trabajo que dispone el software. La primera de ella,” *Energy and Exergy Analysis*”, contiene un ambiente en el cual el usuario puede realizar estudios del desempeño energético y exergético del sistema integrado ORC-Motor como se observa en la Figura 18.



**Figura 18.** Espacio de trabajo “*Energy and Exergy Analysis*”

En la Figura 18, se observa las diferentes áreas de trabajo. En el panel “*Input Variable*”, se encuentra habilitado para ingresar los valores de entrada que necesita el

programa para su funcionamiento. En el pop-menú de la casilla “*Working Fluid*”, se despliega un listado de tres fluidos de trabajo para el estudio: Toluene, Acetone, y Cyclohexen. El segundo pop-menu “*Independet variable*”, el usuario tiene a disposición cuatros variables para realizar los casos de estudio: Turbine Efficiency ( $\eta_t$ ), Pump Efficiency ( $\eta_p$ ), Pinch point Evaporator (AP), Relation Pressure (rp).

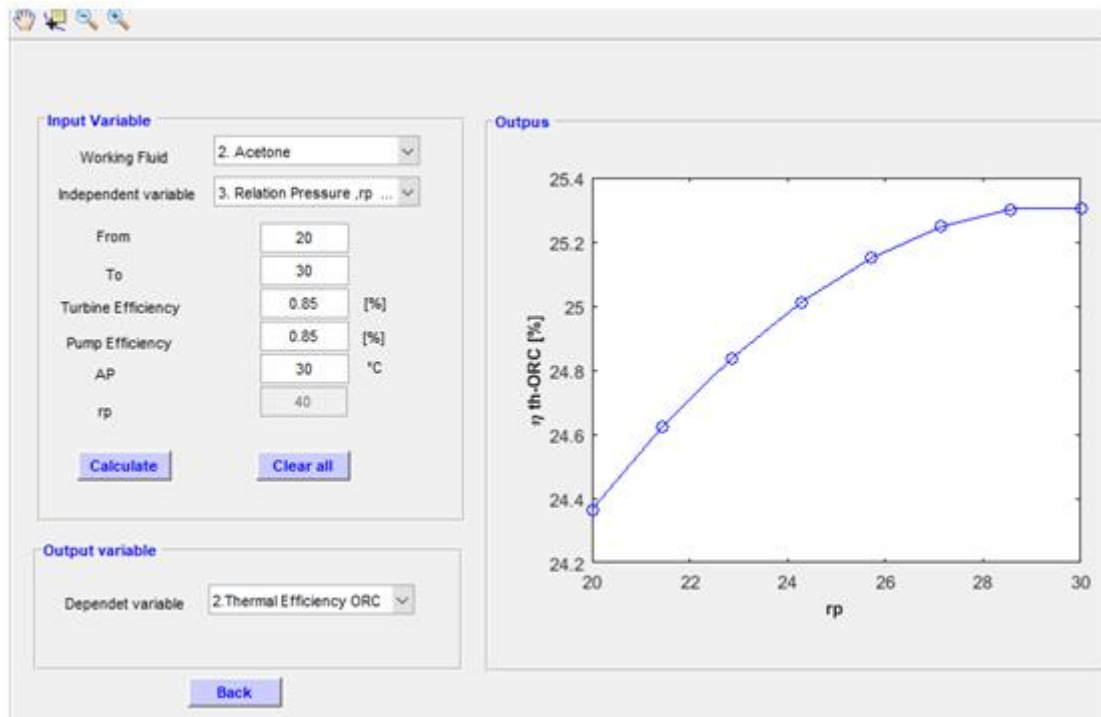
La casilla “*From*”, se introduce el valor mínimo de la variable independiente, y en la casilla “*To*” el valor máximo. El software por defecto ha sido diseñado, para general particiones de 8 valores en el rango de seleccionado. En las demás casillas se introduce los valores restantes según corresponda. El botón “*Calculate*” da inicio al proceso iterativo.

### **CASO DE ESTUDIO 1: ANALISIS ENERGETICO Y EXERGETICO DEL SISTEMA**

Considere el caso en el que se desea analizar el rendimiento energético y exerгético del sistema de recuperación (RORC) usando acetona como fluido de trabajo, variando la relación de presión de 20 hasta 30, con una eficiencia del 85% para la turbina y bomba con una temperatura Pinch del evaporador (AP) de 30°C.

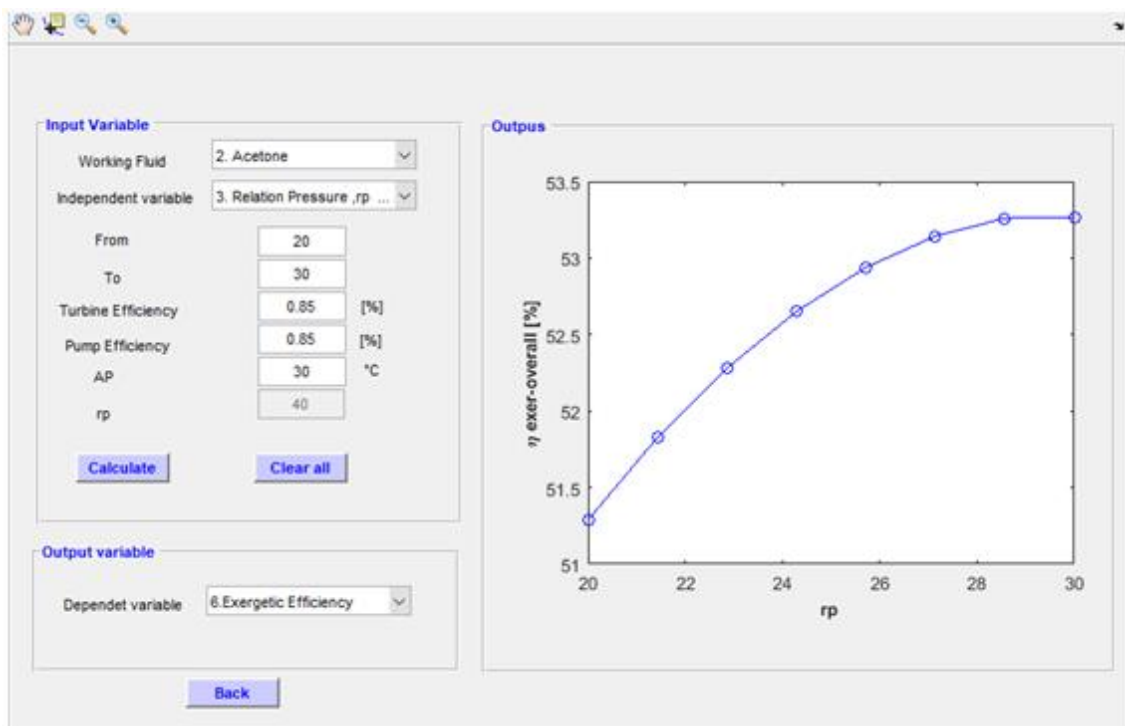
Luego de introducir los datos, presione el botón “*Calculate*”, el software dará inicio a un proceso iterativo para generar todas las salidas correspondientes. Una vez finalizada las iteraciones, en el panel “*Output Variables*”, se escoge la variable de salida de interés. En este caso, se selecciona la eficiencia térmica del ORC (Thermal Efficiency ORC) y el programa mostrara el perfil resultante en el área de gráficos, como se observa en la Figura 19.

En la Figura 19 se observa el comportamiento de la eficiencia térmica del ORC a medida que aumenta la relación. Se evidencia que el efecto del aumento de la rp es incrementar la eficiencia del sistema de recuperación.



**Figura 19.** Resultado grafico de la eficiencia térmica en función de rp.

Ahora considere el caso para la eficiencia exergética global, cuyo resultado se observa en la Figura 20.



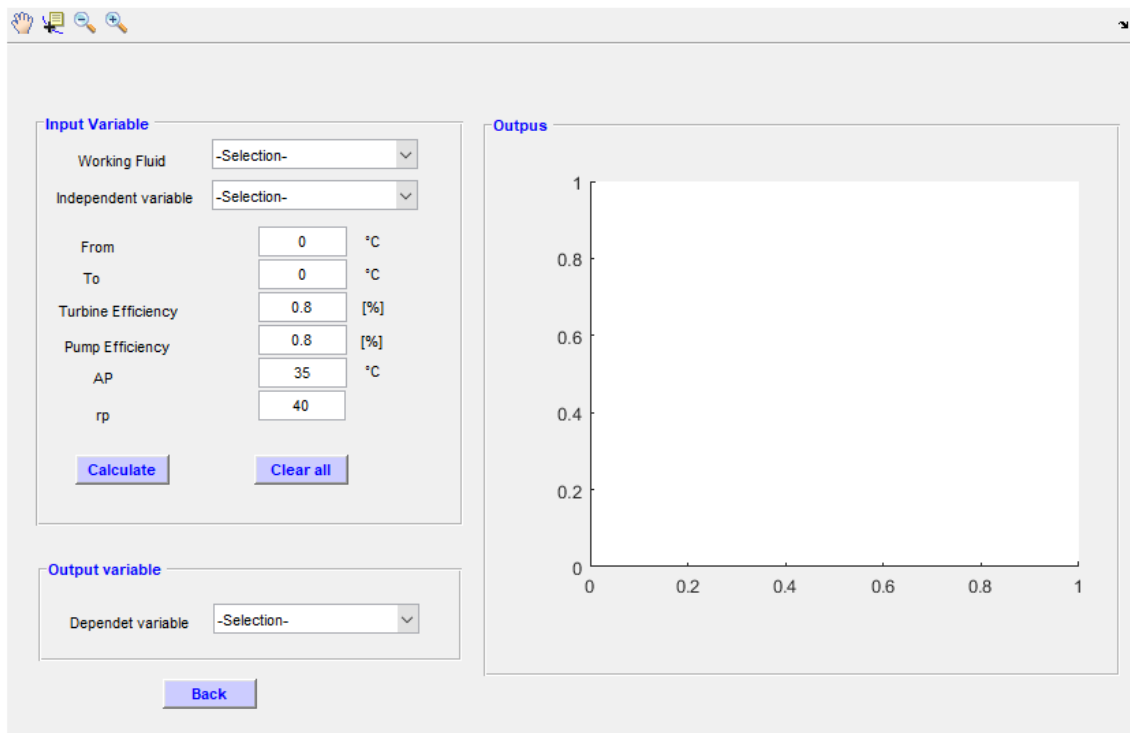
**Figura 20.** Eficiencia exergética en función de la relación de presión

Al igual que el caso anterior, el efecto del incremento la rp es aumentar la eficiencia del exergética del sistema

El usuario puede hacer uso de las herramientas ubicadas en la barra superior. Estas se han incluido para un mejor aprovechamiento a la gráfica, por medio de la ampliación, reducción del área de gráfico, desplazamiento, y cursor de datos.

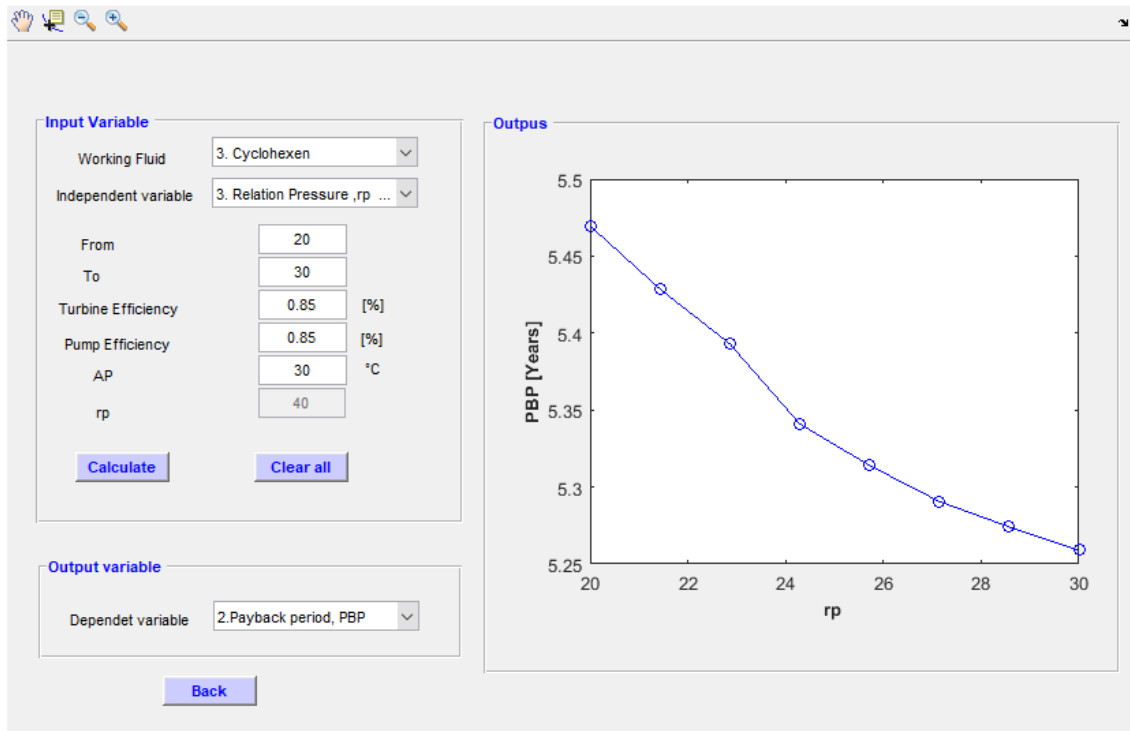
## CASO DE ESTUDIO 2: ANALISIS DEL DESEMPEÑO ECONOMICO DEL SISTEMA

En la ventana principal del software ubíquese en la parte superior derecha en el panel “*Analysis RORC-Engine*”, luego seleccione la opción “*Thermoeconomic Analysis*”. Aparecerá una ventana como se observa en la Figura 21.



**Figura 21.** Ventana de simulación “*ThermoEconomic Analysis*”

La ventana mostrada en la Figura 21, contiene las mismas opciones que las descritas en la sección “*Energy and exergy Analysis*”. Siga los pasos mencionados anteriormente, introduciendo los mismos valores de entrada al sistema. Para este caso seleccione “*Cyclohexen*”, y luego presione el botón “*Calcular*”. Finalmente, cuando el software termine el proceso de iteración, diríjase hacia el panel “*Output Variable*” y escoja la variable de salida “*Payback Period (PBO)*”. Los resultados se muestran en la Figura 22.



**Figura 22.** Resultados PBP en función de la relación de presión (rp)

En la Figura 22, se observa que el efecto de aumentar la relación de presión, es disminuir el periodo de retorno de la inversión. El usuario puede ver el comportamiento de las demás variables de salida cambiando la opción del popmenu “*Dependet variable*”

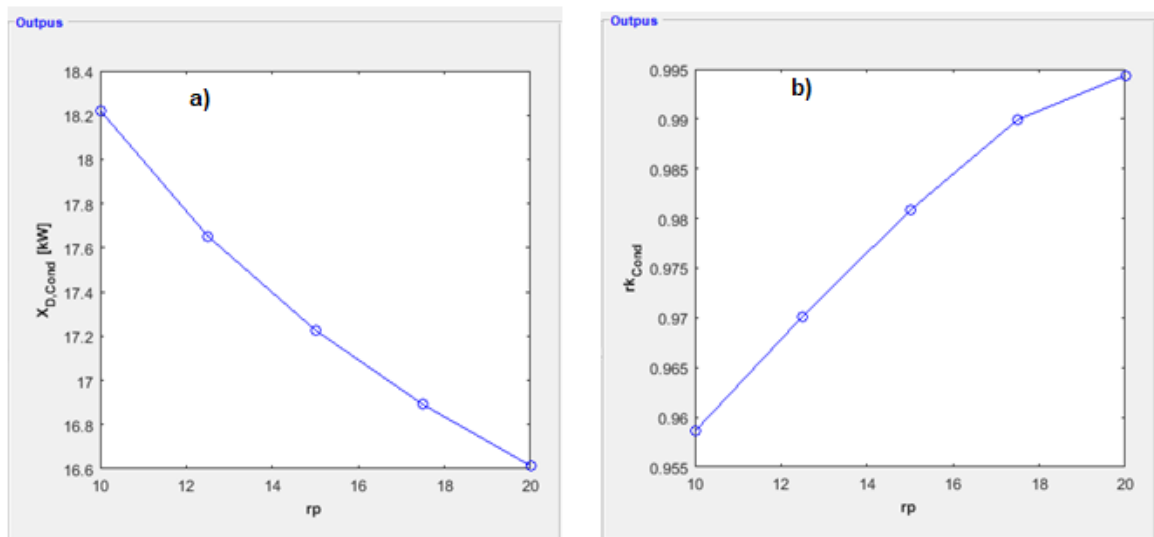
### CASO DE ESTUDIO: ANALISIS EXERGEOECONOMICO DEL SISTEMA.

En la ventana principal del software en el panel “*Analysis ROR-Engine*”, marque la opción “*Exergo-Economic Analysis*”, luego aparecerá una ventana como se muestra en la Figura 23.

En la Figura 23, se muestra la ventana del espacio de trabajo para el análisis Exergo-Económico del sistema. La sección del panel “*Input variable*”, es idéntica a los casos anteriores. Sin embargo, la sección del panel “*Output variable*”, contiene más opciones que permiten desplegar un mayor número de variables de salida según corresponda.

**Figura 23.** Ventana de trabajo “Exergo-Economic Analysis”

Considera los mismos valores de entrada dados inicialmente. Se desea estudiar el efecto que tiene la variación de la relación de presión sobre la exergía destruida (XD) y el “relative cost difference (rk)”. Los resultados obtenidos se muestran en la Figura 24.

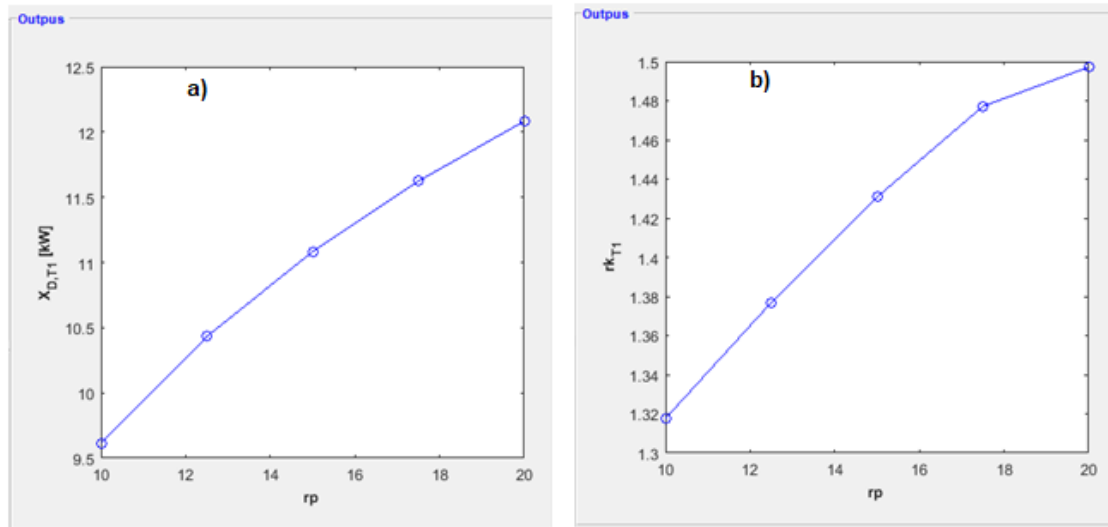


**Figura 24.** Variación de la exergía destruida (XD) y “relative cost difference (rk)” en función de la relación de presión para el condensador

En la Figura 24 se observa que el efecto de incrementar la relación de presión es reducir la tasa de destrucción de exergía en el condensar (Fig. 23a) y un aumento en el factor rk para este equipo.

La Figura 25 muestra los resultados obtenidos para la Turbina, en la que se observa que el efecto de incrementar la relación de presión, en ocasionar un aumento en la tasa de

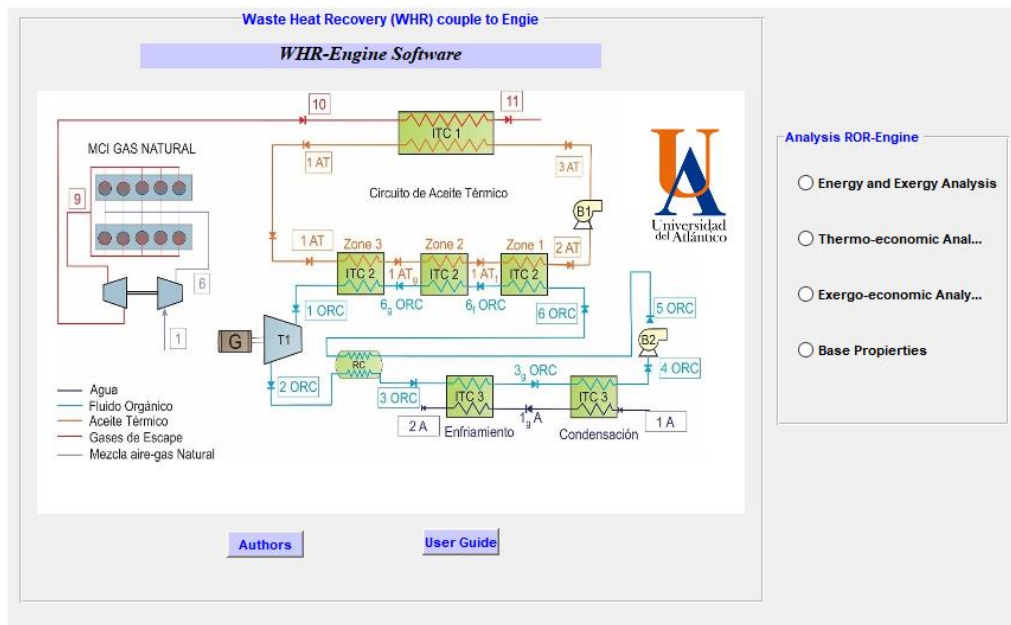
destrucción de exergía y del facto  $rk$  para este componente. El usuario, puede analizar el comportamiento de todos los componentes de sistema seleccionado cualquier variable de salida dentro del panel “Output variable”



**Figura 25.** Variación de la exergía destruida (XD) y “relative cost difference (rk)” en función de la relación de presión para el condensador.

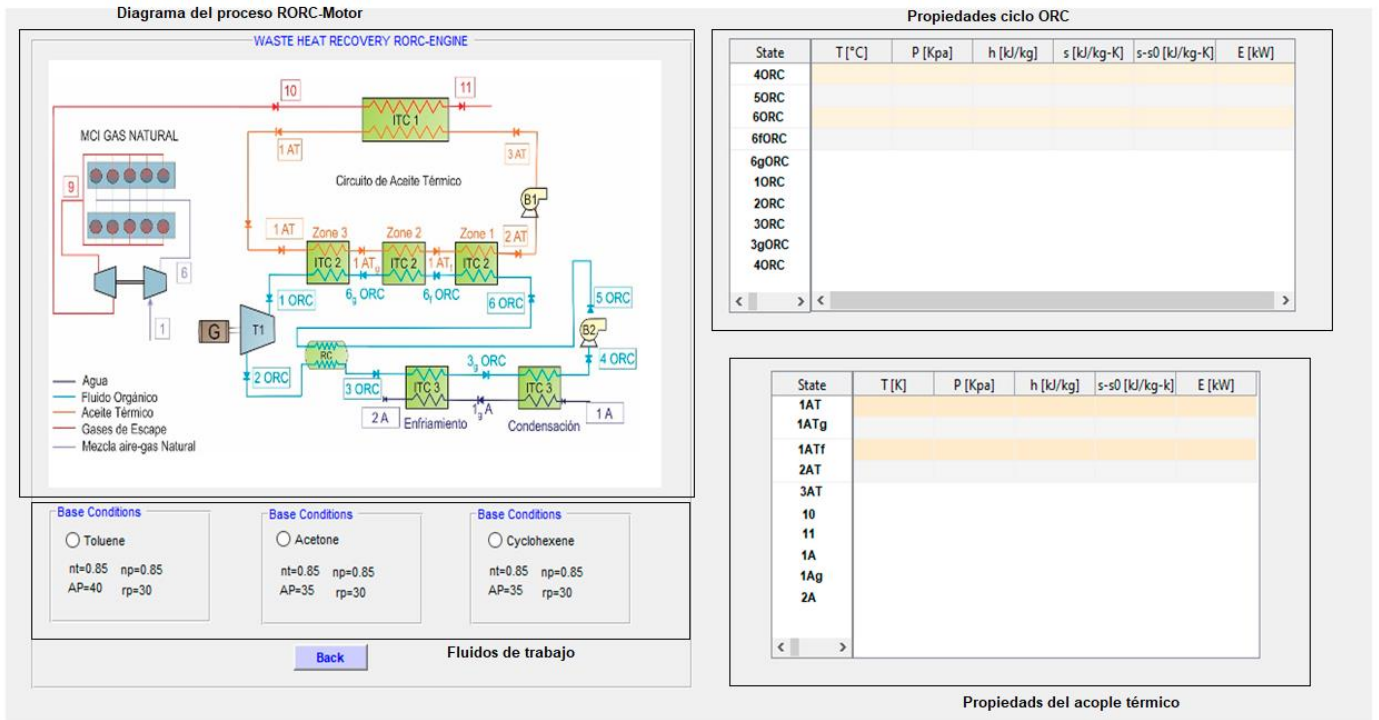
#### CASO DE ESTUDIO 4: CALCULO DE PROPIEDADES BASE DEL SISTEMA

En la Figura 26, se muestra el diagrama del ciclo RORC con sus respectivos estados. En este punto, se desea conocer las principales propiedades termodinámica para cada uno de los estados del sistema.



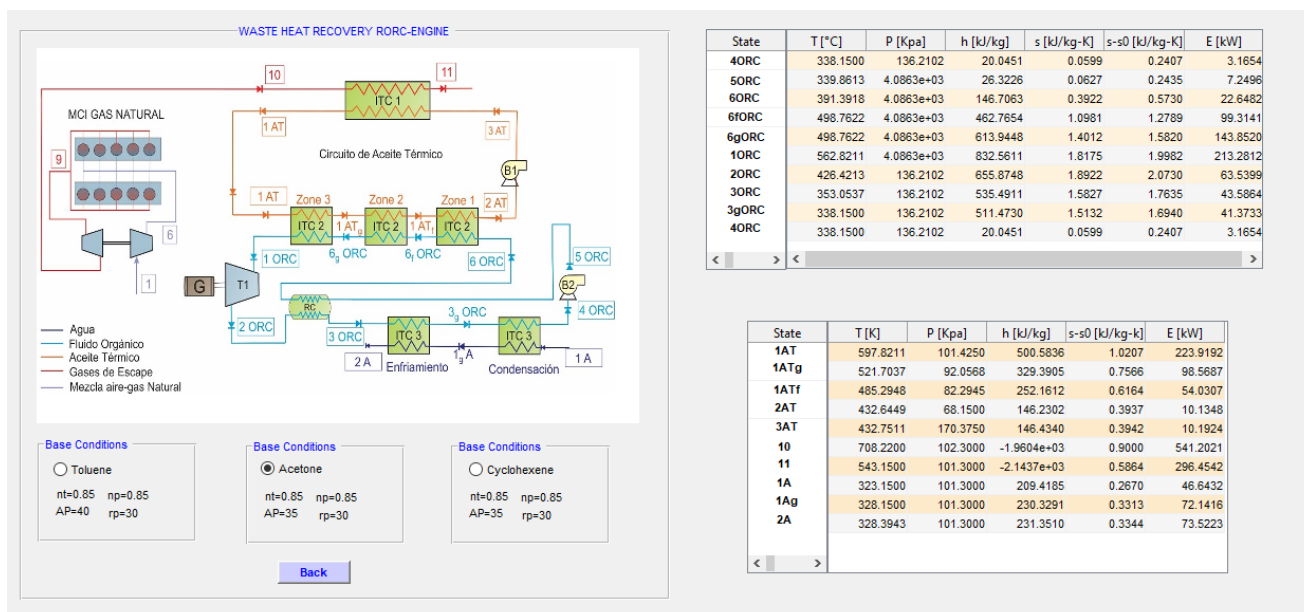
**Figura 26.** Ventana principal del software WHR-Engine

Para tal fin, marque la casilla “*Base Propiedades*” y aparecerá una ventana como se observa en Figura 27.



**Figura 27.** Ventana “*Base Propiedades*”

En la Figura 28 se observa el ambiente de trabajo de la ventana “*Base Propiedades*”. Allí, se encuentra el espacio donde se muestra la representación gráfica del sistema RORC-Motor. En la parte derecha se encuentran las tablas donde se muestran los estados junto con las propiedades termodinámicas para las corrientes del ciclo RORC y acople. Finalmente, en la parte inferior izquierda se hallan los tres paneles “*Base propiedades*” con las especificaciones de los valores base usado para cada fluido. Se toma a manera de ejemplo seleccionado a la acetona para visualizar sus propiedades. Los resultados se muestran en la Figura 28



**Figura 28.** Propiedades termodinámicas de la acetona.