

Vol. 9 N° 2 • Julio - Diciembre 2019



## PLANTA PILOTO PARA LA PRODUCCIÓN DE CALOR, ELECTRICIDAD Y FRÍO A PARTIR DE TRIGENERACIÓN

(Pilot plant for combined cooling, heat and power generation)

**Rodolfo Morales**

Universidad Privada Dr. Rafael Belloso Chacín, Maracaibo-Venezuela  
moralesmeleanrodolfo@gmail.com

### RESUMEN

La presente investigación tuvo como objetivo principal proponer una planta piloto para la producción de calor, electricidad y frío a partir de trigeneración. La misma estuvo sustentada teóricamente por autores como Cengel y Boles (2009), Creus (2011) y Dixon (1978). La metodología empleada muestra que fue de tipo descriptiva-proyectiva con un diseño no experimental. Esta estuvo conformada por cinco (5) fases las cuales comprenden la descripción de los procesos convencionales, establecer los parámetros y requerimientos, los diseños a realizar, la selección de tecnologías a emplear y la validación de la planta mediante la herramienta computacional. Entre los resultados obtenidos se tienen que la planta está conformada por un ciclo combinado con cogeneración en adición de un sistema de refrigeración por absorción, la cual cuenta con una producción total de 32MW de electricidad, 12MW de calor en forma de agua caliente y una carga de refrigeración de 105KW con una eficiencia del 47.85%, siendo esta última comparada con otros sistemas de generación mediante curvas de comportamiento dentro de los mismos parámetros de operación, quedando como la opción más óptima y eficiente entre las cuatro configuraciones. Por último, se desarrolló una HMI mediante programación G para simular la operación del sistema en orden secuencial mediante interruptores para accionar cada proceso así como ciclo de generación.

**Palabras clave:** Trigeneración, planta piloto, eficiencia.

### ABSTRACT

The main objective of the present investigation was to propose a pilot plant for the production of heat, electricity and cold from trigeneration. The same was theoretically supported by authors such as Cengel and Boles (2009), Creus (2011) and Dixon (1978). The methodology used shows that it was descriptive-projective with a non-experimental design. This was made up of five (5) phases which comprise the description of the conventional processes, establishing the parameters and requirements, the designs to be carried out, the selection of technologies to be used and the validation of the plant using the computational tool. Among the results obtained, the plant is made up of a combined cycle with cogeneration in addition to an absorption refrigeration system, which has a total production of 32MW of electricity, 12MW of heat in the form of hot water and a load 105KW cooling system with an efficiency of 47.85%, the latter being compared to other generation systems through performance curves within the same operating parameters, remaining as the most optimal and efficient option among the four configurations. Finally, an HMI was developed using G programming to simulate the operation of the system in sequential order using switches to activate each process as well as the generation cycle.

**Keywords:** Trigeneration, pilot plant, efficiency.

---

**Recibido:** 31/01/2019 **Aceptado:** 09/05/2019

## INTRODUCCIÓN

Con el paso de los años el creciente aumento de la población ha tenido como consecuencia un impacto alarmante en la demanda de energía en sus diversas formas, debido a eso se ha hecho necesaria la planificación y construcción de plantas de generación con el fin de satisfacer estas demandas, las cuales a su vez, debido a la quema de los combustibles requeridos para su funcionamiento contribuyen a la continua contaminación tanto del aire atmosférico como del agua de los lagos, ríos u océanos dependiendo de su localización.

Buscando formas de obtener una mayor eficiencia que permita reducir el consumo de combustible se ha optado por realizar modificaciones tanto a las turbinas a gas como a las centrales de vapor mediante una configuración de ciclo combinado aumentando la producción de electricidad. Además de eso han surgido plantas de cogeneración para adicionar la obtención de energía en forma de calor de acuerdo a la demanda requerida.

Ahora una tercera forma a considerar es la refrigeración o la producción de frío para almacenar productos de diversos tipos a bajas temperaturas así como la climatización de edificios asegurando un ambiente adecuado, estos por lo general tienden a ser propuestos como plantas o equipos independientes a los de cogeneración para electricidad y calor, por lo tanto al unir estas formas de energía en un solo ciclo se tienen los sistemas de trigeneración los cuales funcionan a partir de una sola fuente de combustible.

Debido a todo lo anterior, en la presente investigación se establece como objetivo de la misma realizar el desarrollo de una planta piloto a partir de un sistema de trigeneración, para la producción continua de electricidad, calor y frío la cual empieza describiendo la metodología a emplear considerando el tipo de investigación así como el diseño correspondiente para su posterior desarrollo, todo esto tomando en consideración el aporte realizado por los diversos autores que permiten justificar dicha metodología.

Por último, se tienen los resultados de la investigación que parten de la descripción de los métodos convencionales para la producción de electricidad, calor y frío, sumado a eso se determinan los pará-

metros y requerimientos necesarios citando diversas referencias, para luego llevar a cabo el diseño de la planta a partir de los mismos, siendo seguido entonces por la selección de los equipos a utilizar y finalmente la validación de la propuesta mediante la simulación computacional.

## OBJETIVO

Proponer una planta piloto para la producción de calor, electricidad y frío a partir de trigeneración.

## METODOLOGÍA

Esta investigación se considera de tipo descriptiva, la cual Cortes e Iglesias (2004) definen como aquella que busca especificar las propiedades, las características y los perfiles importantes de personas, grupos, comunidades o cualquier otro fenómeno que se someta a un análisis. Describe situaciones, eventos o hechos, recolectando datos sobre una serie de cuestiones y se efectúan mediciones sobre ellas, buscan especificar propiedades, características y rasgos importantes del fenómeno que se analice. Estos estudios presentan correlaciones muy incipientes o poco elaboradas.

En virtud de lo anterior, se considera de tipo descriptiva al proponer una planta piloto a partir de un sistema de trigeneración, dado a que este requiere especificar las propiedades además de características de los ciclos que conforman dicho proceso, de manera que puedan ser sometidas a un análisis que permita establecer de acuerdo a criterios que los elementos de electricidad, calor y refrigeración pueden trabajar en conjunto mediante estudios termodinámicos, cuyo funcionamiento pueda ser evaluado con la aplicación de simulaciones.

Sumado a eso, como un segundo tipo a considerar se tiene la investigación proyectiva que según Hurtado (2010) esta se define como la elaboración de una propuesta o de un modelo, como solución a un problema o necesidad de tipo práctico, ya sea de un grupo social, o de una institución, en un área particular del conocimiento, a partir de un diagnóstico preciso de las necesidades del momento, los procesos explicativos o generadores involucrados y las tendencias futuras.

Ahora de acuerdo a la anterior, la investigación se considera también de tipo proyectiva además de

descriptiva al tomar en cuenta la innovación que representa la propuesta de una planta piloto a partir de un sistema de trigeneración, esto con el propósito de obtener nuevas tecnologías con una mejor eficiencia energética sumado a una menor contaminación en beneficio del sector ambiental e industrial, a su vez desarrollar nuevas técnicas para la ingeniería en el control y la automatización de los procesos que conforman el ciclo completo.

En el diseño de la investigación, de acuerdo con Hernández, Fernández y Baptista (2010) el diseño no experimental es aquel que se realiza sin manipular deliberadamente las variables. Es decir, se trata de estudios donde no se hace variar en forma intencional las variables independientes para ver su efecto sobre otras variables. Lo que se hace en la investigación no experimental es observar fenómenos tal como se dan en su entorno natural, para posteriormente analizarlos.

A su vez, Gómez (2006) expresa que la investigación no experimental podría definirse como la investigación que se realiza sin manipular deliberadamente variables. Lo que se hace es observar fenómenos tal y como se dan en su contexto natural, para después ser analizados. En la investigación no experimental no es posible asignar aleatoriamente a los participantes o tratamientos. De hecho, no hay condiciones o estímulos a los cuales se expongan los sujetos de estudio.

De acuerdo a lo planteado, esta investigación es de diseño no experimental debido a que la planta piloto a partir de un sistema de trigeneración es una propuesta de un proceso a escala sin contar con un modelo real en operación, cuyas variables se observan en escenarios o condiciones nulas que se puedan estudiar, por lo que se procede a analizar el comportamiento de estas en un entorno natural mediante el uso de la herramienta computacional en simulaciones y validar su funcionamiento, lo que hace imposible su manipulación en su contorno deliberadamente.

## RESULTADOS

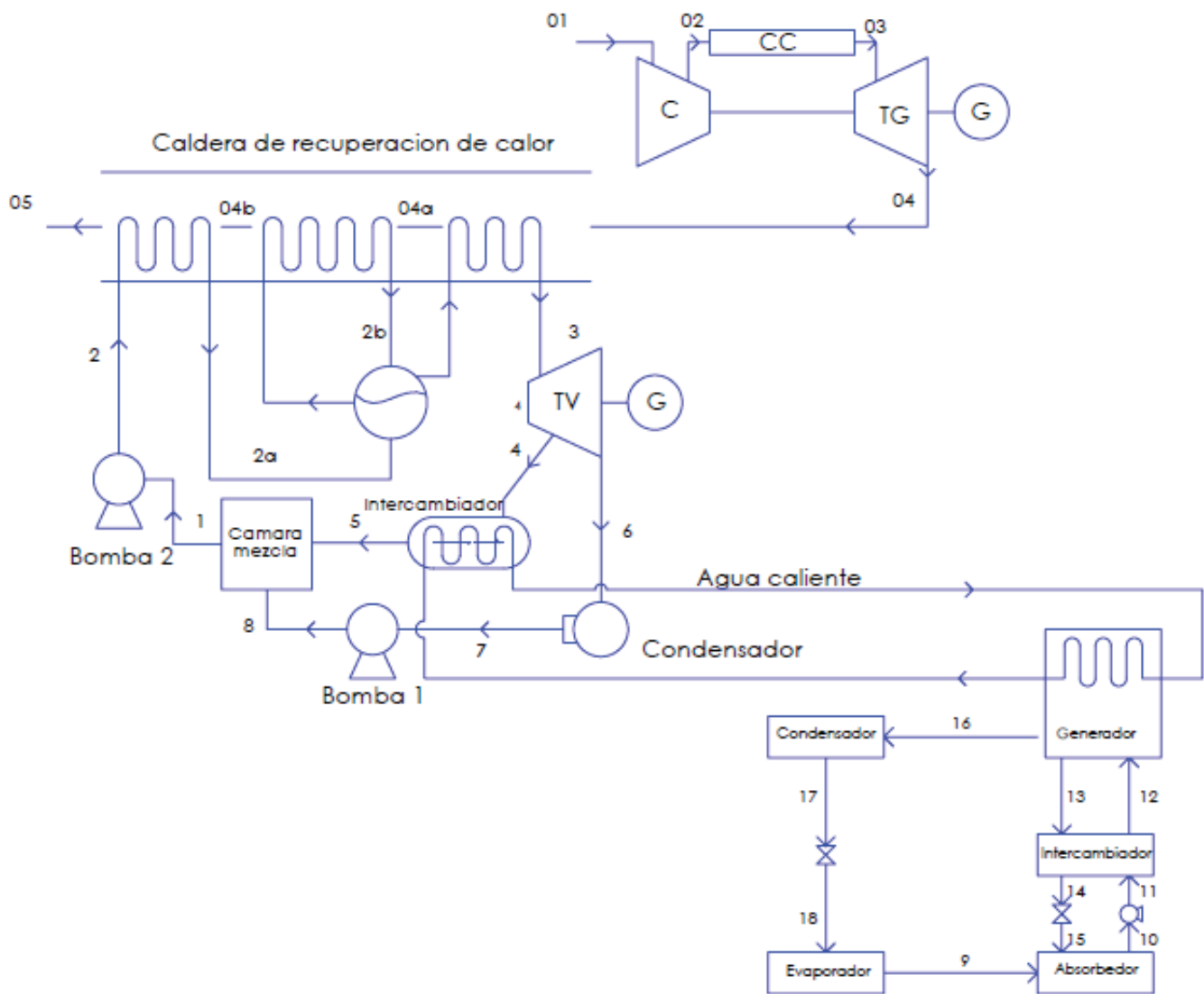
A continuación se presentan los resultados obtenidos en la investigación, los cuales muestran cómo se llevan a cabo los procesos convencionales para la obtención de calor, electricidad y frío de

acuerdo a los parámetros de operación necesarios a tomar en cuenta en el momento en que se realiza el diseño del sistema de trigeneración, seguidos por el diagrama de procesos de la misma así como su validación con la herramienta computacional.

Para efectos de la investigación se tiene que la producción de electricidad se lleva a cabo a partir de una ciclo combinado entre una turbina a gas y una de vapor, tomando en cuenta que a partir de diversas referencias como artículos científicos, trabajos de grado, o plantas reales de generación se estima que los gases calientes que salen de la expansión de la turbina a gas se encuentran a 542 al momento de ingresar en la caldera de recuperación de calor, la cual genera vapor a una temperatura de 480 con una presión de 8MPa y una salida de 75KPa que permita una generación de 32MW siendo 8MW del sistema de vapor, mientras que los 24MW restantes se obtienen a partir de la turbina a gas.

Ahora en el proceso de producción de calor, se realiza una extracción controlada en la turbina de vapor a una presión de 1MPa la cual es dirigida hacia un intercambiador de calor con el propósito de calentar el agua que pase por los tubos del mismo a una razón de 12MW permitiendo que el agua caliente llega a temperaturas de aproximadamente 95, la cual puede ser usada como agua caliente sanitaria (ACS) o como una fuente de calor de proceso de acuerdo a su aplicación ya sea esta industrial o no.

Por último, en la producción de frío se utilizan sistemas de refrigeración por absorción amoníaco-agua con una capacidad total estimada de 105KW, es decir aproximadamente unas 30 toneladas de refrigeración los cuales usan fuentes de energía térmica (como el vapor de proceso) que no requieran estar a elevadas temperaturas para accionar el proceso de absorción. Por lo tanto, a partir de todo lo mencionado anteriormente se puede observar en la siguiente figura el diagrama de procesos correspondiente al sistema de trigeneración.



**Figura 1. Diagrama de procesos de la planta piloto a partir de trigeneración**

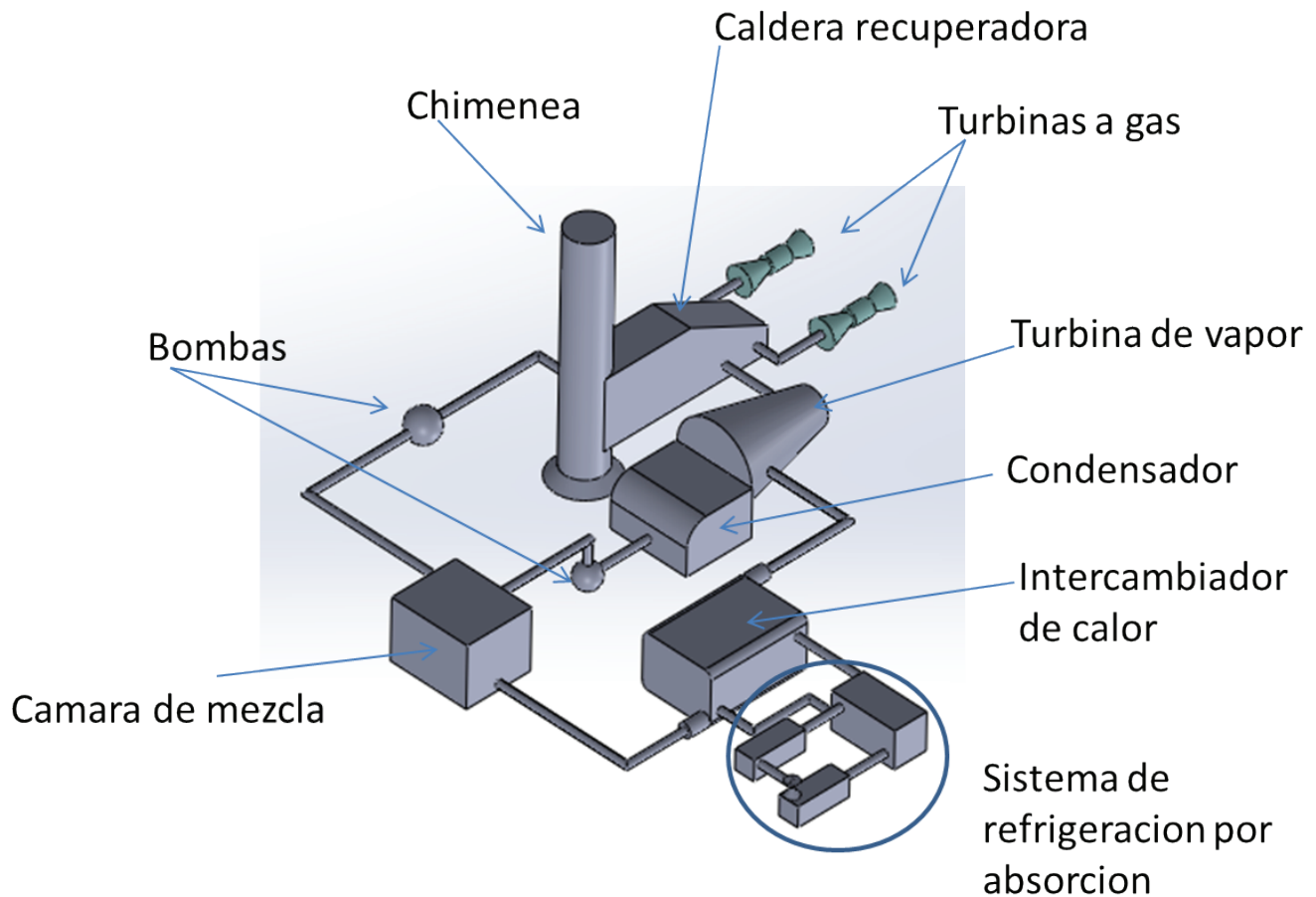
Fuente: Morales (2019).

De acuerdo a lo anterior, se puede observar en la figura que se cuenta con el ciclo combinado entre la turbina a gas y la de vapor, sumado a que la extracción controlada que se realiza en la segunda permite calentar el agua que pasa por el intercambiador la cual puede ser usada como la fuente de energía térmica que requiere el sistema de refrigeración por absorción.

A partir de este diagrama y de los límites de operación en cuanto a presión, temperatura y generación establecidas anteriormente se determinan las propiedades termodinámicas correspondientes a este sistema, entre las cuales resaltan la temperatura máxima a la cual trabaja el ciclo que es de 1004.34 a la salida de la cámara de combustión así

como la calidad al final de la expansión de la turbina de vapor que es de 0.9518 indicando que hay muy poca presencia de humedad lo que asegura un buen funcionamiento.

Sumado a lo anterior, el flujo de vapor total que se maneja dentro del sistema de generación es de 13.86 donde unos 5.55 están siendo usados para la extracción controlada. Además a partir de un análisis de transferencia de calor en la caldera se determina que para obtener esta generación de vapor se requieren unos 108.06, el cual al ser un flujo de gas muy grande este se divide en dos turbinas a gas con una generación de 12MW cada una. En la siguiente figura se puede observar un modelo en 3D con la distribución de la planta piloto.



**Figura 2. Parasolidos de la planta piloto a partir de trigeneración**

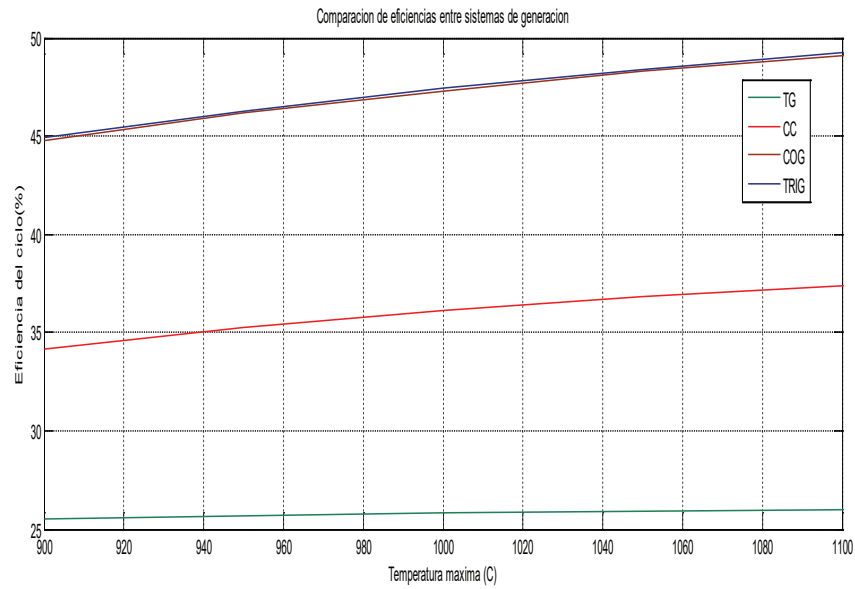
Fuente: Morales (2019).

Como se observa en la figura los gases calientes que salen de ambas turbinas son dirigidos hacia la caldera de recuperación y una vez, estos son usados para generar el vapor son expulsados hacia la atmosfera por medio de la chimenea a una temperatura de 228.9, es decir que estos gases se enfriaron en más de 200 grados al pasar por los distintos elementos de transferencia de la caldera que van desde el sobrecalentador hasta llegar al economizador.

Ahora para validar el funcionamiento de la planta piloto se hace una comparación entre diferentes sistemas de generación, comenzando por una tur-

bina a gas en ciclo simple seguida por un ciclo combinado al agregar la turbina de vapor sin considerar ninguna extracción, luego se toma en cuenta la cogeneración mediante la producción de calor por medio del agua caliente.

Por último, la trigeneración al sumar el sistema de refrigeración por absorción. Estos son analizados dentro de los mismos parámetros de operación variando únicamente la temperatura máxima que se maneja a la salida de la cámara de combustión dentro de un rango que va desde 900 a 1100 con el propósito de generar unas curvas de eficiencia como se observan a continuación.

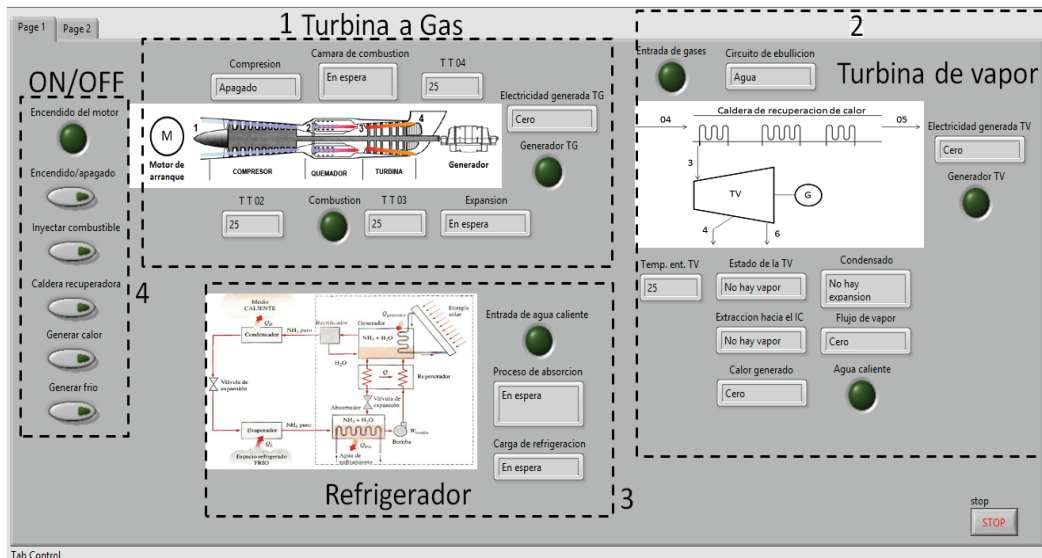


**Figura 3. Gráfica de comparación de Eficiencia vs Temperatura máxima**  
**Fuente: Morales (2019).**

Como se puede observar en la gráfica la turbina a gas simple no se acerca al 30% de eficiencia mientras que al formar un ciclo combinado con la turbina de vapor se logran obtener valores superiores al 35% pero inferiores al 40%, los cuales son superados al llevar a cabo la cogeneración adicionando la generación de calor al sistema pero al considerar la producción de frío del sistema de refrigeración (trigeneración) se observa que la diferencia entre curvas es muy pequeña pero que representa un gran aumento debido a que esta es una generación en régimen permanente, es decir

que se puede obtener una producción continua (régimen permanente) de las tres formas de energía durante todo el tiempo de operación de la planta.

Adicionalmente, se puede mostrar el funcionamiento de la planta mediante la simulación de un control ON/OFF donde se puede controlar el encendido y apagado de cada uno de los elementos que forman parte del sistema de trigeneración utilizando cinco interruptores en orden secuencial donde cada uno depende del anterior para cumplir su función. Estos se observan en la siguiente figura.



**Figura 4. Panel frontal de la planta piloto a partir de trigeneración**  
**Fuente: Morales (2019).**

Como se observa en la figura, el primer interruptor inicia el encendido de los motores de arranque de la planta mientras que el segundo realiza la inyección de combustible sin generación de vapor dado que el tercero envía los gases calientes después de la expansión hacia la caldera de recuperación de calor, tomando en cuenta que el cuarto maneja la extracción controlada hacia el intercambiador para obtener el agua caliente que finalmente el quinto usa para activar los sistemas de refrigeración por absorción.

Por último, como discusión se puede tomar en cuenta que el sistema de trigeneración es viable desde el punto de vista termodinámico considerando que sus parámetros de operación fueron obtenidos a partir de los datos de plantas reales en funcionamiento, y que estos a su vez mediante las ecuaciones termodinámicas permitieron realizar las curvas de eficiencia con el propósito de comparar el desempeño de cada sistema de generación.

## CONCLUSIONES

Luego de llevar a cabo la investigación, se han obtenido diversas conclusiones entre las que se tiene que el rango de la temperatura máxima que maneja la turbina a gas en la realización de las curvas de eficiencia, juega un papel importante en el comportamiento de las configuraciones dado que para valores por debajo de 900°C el ciclo únicamente puede operar como un sistema simple, mientras que si es mayor a los 1100°C las temperaturas obtenidas en la entrada de la turbina de vapor son demasiado altas para los límites de operación que suelen manejar los fabricantes.

Para concluir, de entre todas las configuraciones estudiadas dentro de los mismos parámetros de operación, la más eficiente fue la trigeneración

cuyo desempeño permitió obtener una generación simultánea de potencia eléctrica, agua caliente y una carga de refrigeración durante todo el tiempo de operación de la planta una vez esta configuración entra en total funcionamiento.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Cengel, Y. (2007). *Transferencia de calor y masa*. (ed.). Reno, Estados Unidos: Mc Graw Hill.
- Cengel, Y., y Boles, M. (2009). *Termodinámica*. (ed.). Reno, Estados Unidos: Mc Graw Hill.
- Cohen, H., Rogers, G., y Saravanamuttoo, H. (1983). *Teoría de las turbinas a gas*. (ed.). Longman Group Limited.
- Cortes, M., e Iglesias, M. (2004). *Generalidades sobre Metodología de la Investigación*. Universidad Autónoma del Carmen.
- Creus, A. (2011). *Instrumentación industrial*. (ed.). Barcelona, España: Marcombo.
- Dixon, S. (1978). *Turbodinámica de las turbomaquinas*. Liverpool, Estados Unidos: Dossat S.A.
- Gómez, M. (2006). *Introducción a la Metodología de la Investigación Científica*
- González C. (2014, 2 de noviembre). *Propuesta de un sistema de refrigeración por absorción para la climatización del edificio administrativo de la termoeléctrica de Felton*. *Ciencia & Futuro*.
- Hernández, R., Fernández, C., y Baptista, P. (2010). *Metodología de la Investigación*.
- Hurtado, J. (2010). *El Proyecto de Investigación: Comprensión Holística de la Metodología y la Investigación*.