

DISEÑAR Y CONSTRUIR UNA CENTRAL DE CICLO COMBINADO BAJO LA OPERACIÓN DE UN TURBO CARGADOR

DESIGN AND BUILT A COMBINED CICLE POWER PLANT UNDER A TURBO CHARGER OPERATION

Por: Jefferson Zambrano Angel

ABSTRACT: The present article of reflection, describes why the first motor of reaction from Fundación Universitaria Los Libertadores was built under the turbo charger operation, with similar work to a motor of aviation with structural modifications, The final objective of this project is to design and built a combined cycle power plant using as chemical oil energy source "AV-GAS", or by default Bio-GAS that will be extracted from farms wastes or human wastes, this focused on the furthest places of our country, where the energy hasn't arrived due to geographical problems. The process passed by a preliminary design, that established the first parameters of motor operation, these parameters let developing a thermal-gasdynamic analysis to set up the specific trust and the adiabatic maximum temperature with the goal of determine which are the adequate dimensions and materials for an efficient work of the motor.

The final focus of this Project is the generation of energy implementing a combined cycle at motor reaction that was developed in Fundación Universitaria Los Libertadores, which would be able of supplying about 35 MW or 47.000 hp of energy approximately, enough to supply a territory with more than 50 houses. In this sense, the Project would have an impact not only at academical level but also on those regions of the country that the state doesn't provide energy.

Key Words: Central of mixed cycle, Pear, Turbo charger, Sustainable energetic system, turbo jet, Regenerative cycle.

RESUMEN: El actual artículo de reflexión describe el por qué se construyó el primer motor de reacción de la Fundación Universitaria Los Libertadores bajo la operación de un turbo cargador, con operación similar a un motor de aviación con modificaciones estructurales, el objetivo final de este proyecto es diseñar y construir una central de ciclo combinado utilizando como fuente de energía química combustible "AV-GAS", o por defecto Bio-GAS que se extraerá de desechos de granjas de animales o desechos humanos, esto enfocado en los lugares más alejados de nuestro país, donde la energía no ha llegado debido a problemas geográficos. El proceso paso por el diseño preliminar se estableció los parámetros iniciales de operación del motor, estos permiten desarrollar un análisis termogasdínámico para determinar el empuje específico y la temperatura máxima adiabática con el fin de establecer cuáles son las dimensiones y materiales adecuados para un funcionamiento eficiente del motor.

El enfoque final, de este proyecto es la generación de energía implementando un ciclo combinado al motor a reacción que se desarrolló en la Fundación Universitaria Los Libertadores, el cual estaría en la capacidad de suministrar alrededor de 35 MW o 47.000 HP de energía aproximadamente, suficientes para abastecer un territorio con más de 50 casas. En este sentido el proyecto tendría un impacto no solo a nivel académico sino en aquellas regiones del país en las que no se presta servicio de energía, por parte del estado.

Palabras clave: Central de ciclo combinado, Pera, Turbo jet, Sistema energético sostenible, Turbo compresor, Ciclo regenerativo.

Fecha de recepción: 20 de noviembre de 2014

Fecha de aprobación: 28 de noviembre de 2014

Máster en Ingeniería el Mantenimiento, Universidad Politécnica de Valencia, España, Ingeniero Aeronáutico Universidad de San Buena ventura Bogotá, Colombia, Docente Investigador Fundación Universitaria los Libertadores.

PROBLEMÁTICA

La industria aeronáutica en Colombia no ha tenido un desarrollo avanzado en distintas áreas en comparación con la industria en general, esto en gran parte por sus procesos ya que se ven ajenos a las demás áreas de la industria sin tener en cuenta que son beneficiosos para el desarrollo de nuevas tecnologías, un ejemplo es la aplicación de las turbinas en centrales nucleares, la energía eólica, las centrales de ciclo combinado, etc. Y como se ve en cada una de estas centrales de generación de energía se tiene como constantes sistemas que hacen parte de la aeronáutica, como son las turbinas de una central nuclear que funcionan con vapor a alta presión igual como lo hacen las turbinas de impulso de algunos motores de aviación, las palas de los generadores eólicos que hacen parte de un estudio aerodinámico en sus palas, los motores a reacción de una central de ciclo combinado que funcionan bajo el ciclo Brayton, igual que un motor de avión, y otra serie de singularidades que vinculan a la industria aeronáutica directa e indirectamente en el sector productivo/energético y que en algunos casos la aplicación de sus técnicas ayude o mejoren la operación de estos sistemas en su funcionamiento.

Uno de los pasos más importantes para investigar en la ingeniería es diseñar y construir, ya que esto permite probar muchas de las teorías y da pie para involucrarse en nuevos proyectos y nuevas ideas, que permitan innovar en áreas como son la energética que trae consigo beneficios no solo para el investigador y para la institución si no que se apuesta al beneficio del país puntualmente a sectores más necesitados donde existe pobreza y carencia de recursos. Así pues la Universidad apostará, al desarrollo de un proyecto que consiste en la creación de una central de ciclo combinado para generación de energía, bajo el funcionamiento de un turbo reactor (proyecto desarrollado y en operación actual en la Universidad los libertadores), fusionado con un sistema de turbinas a vapor para extracción y generación de energía eléctrica, este proyecto seguirá operando con gas ya que es uno de los combustibles fósiles menos contaminantes en comparación con los otros hidrocarburos, así también el proyecto permitirá operar con biocombustibles que se está desarrollando en la universidad

con desechos orgánicos e inorgánicos que permiten que bajen aún más la contaminación, en el caso de tocar el tema de contaminación ambiental Versus otros combustibles fósiles. Este proyecto abarca una interdisciplinariedad entre diferentes áreas de la ingeniería permitiendo que se involucre áreas de la ingeniería del sector eléctrico, mecánico, industrial y de sistemas entre otras facultades, con el fin de mejorar las características del proyecto, pudiendo crear un producto final que pueda tener uso en una población que tenga la necesidad de un sistema eléctrico a bajo costo. A todo se suma la siguiente pregunta;

¿CÓMO DISEÑAR Y CONSTRUIR BAJO LA OPERACIÓN DEL RGG1 UNA CENTRAL DE CICLO COMBINADO?

Justificación

Este proyecto se realizará con fin de seguir aportando a la investigación de motores a reacción en Colombia, y la visión de ingresar gracias a esto en el área energética, debido a que se han diseñado y construido pocos prototipos bajo este principio. Es importante que la investigación en el país tenga sus inicios en los centros educativos, Por este motivo la facultad de ingeniería aeronáutica de la Fundación Universitaria los Libertadores es un medio para lograr este objetivo. Este proyecto posicionará a la Fundación Universitaria Los Libertadores y sus estudiantes como pioneros en diseño y construcción de dispositivos de propulsión y extracción de energía, abriendo puertas en el sector energético del país siendo los primeros en involucrar gran parte de las ingenierías con el fin de ingresar en el sector energético en el país abarcando el tema de centrales energéticas con desarrollos y beneficios para la sociedad.

En cualquier área del saber es importante aplicar los conocimientos adquiridos a través del proceso de aprendizaje para afianzarlos y utilizar estos para innovar. El prototipo que se va a construir permite a los estudiantes interrelacionar áreas de vital importancia para la ingeniería aeronáutica como: motores a reacción, transferencia de calor, termodinámica e implementación de nuevas tecnologías en la parte térmica.

Así también este proyecto permite innovar en esta área y será la primera central de ciclo combinado que

opere bajo el funcionamiento de un turbo cargador, diseñado y construido en la Fundación Universitaria los Libertadores también será un gran beneficio para la Universidad porque va a servir como una ayuda didáctica para los estudiantes de Ingeniería aeronáutica, Ingeniería mecánica, Ingeniería Industrial, Ingeniería electrónica e Ingeniería de sistemas, con el fin de desarrollar nuevos proyectos en corto, mediano y largo plazo.

Un factor muy importante en el desarrollo de este proyecto es su aplicabilidad, ya que será una fuente de energía eléctrica para los sectores más necesitados.

MARCO TEÓRICO

Motor de combustión

Es una máquina que funciona mediante un ciclo termodinámico y ciclo mecánico, produciendo trabajo debido a la liberación de energía química presente en el combustible suministrado.

Un ciclo se denomina termodinámico cuando sucede una serie de cambios de estado, de tal forma que la masa gaseosa que se ve afectada por los diferentes procesos retorna a las condiciones iniciales.

Un ciclo se denomina mecánico cuando se repiten una serie de procesos sin que el fluido regrese a las condiciones iniciales; el ciclo comienza con condiciones iguales al ciclo anterior pero con un fluido diferente ¹.

Turbo Jet

El primer tipo de motor a propulsión fue el turbo jet, un turbo jet esta hecho de los siguientes componentes:

- Toma de aire
- Compresor
- Cámara de combustión
- Turbina
- Tobera

El aire primero entra por la toma de aire la cual entrega un flujo suave y uniforme al compresor. El compresor es un dispositivo mecánico que tiene como ta-

rea elevar la presión del aire, pero no solo la presión cambia, también la temperatura y la densidad se ven afectadas.

Después de la descarga del compresor el aire comprimido entra a la cámara de combustión, donde el combustible es inyectado y quemado, añadiendo de esta manera una gran cantidad de energía química al flujo de aire; esta transferencia se logra por reacción química. En el proceso de combustión se incrementa la temperatura manteniendo una presión constante, esto es un proceso ideal.

Seguidamente la energía liberada es absorbida por la turbina, la cual está unida por un eje al compresor y su tarea es la convertir la energía cinética del gas en trabajo mecánico para mover el compresor y algunos accesorios necesarios para la operación del motor.²

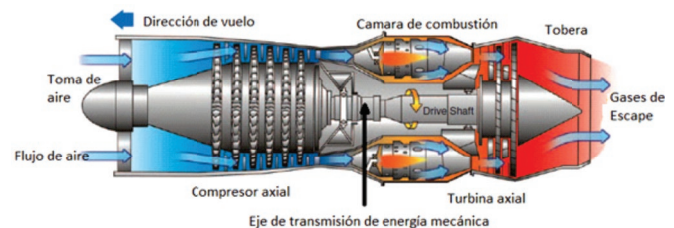


Figura 1. Motor turbo jet

Fuente: <http://talkaviation.com/images/Books/afh/chapter-15/basic%20turbo-jet%20engine.jpg>

El principio de funcionamiento de un motor de reacción es un sistema propulsivo el cual está basado en la aplicación de la segunda y tercera Ley de Newton.

Segunda Ley de Newton: el incremento de la cantidad de movimiento es igual a la impulsión de la fuerza aplicada y tiene la misma dirección que aquella. Puede expresarse también diciendo que la fuerza total ejercida sobre un cuerpo es igual al producto de su masa por la aceleración.

Tercera Ley de Newton: a toda acción de una fuerza, hay una reacción igual actuando en la misma dirección pero en sentido contrario³.

Empuje en un motor a reacción.

¹ CUESTA ÁLVAREZ, Martín. Motores de reacción. Quinta edición. España. Paraninfo. 1980. 552p.

² HUNECKE, Klaus. Jet Engines, fundamentals of theory, design and operation. Sexta edición. Inglaterra. Biddles Ltd. 2003. 235p.

³ CUESTA ÁLVAREZ, Martín. Motores de reacción. Quinta edición. España. Paraninfo. 1980. 552p.

Para obtener el empuje de un motor utilizando las leyes de Newton tenemos:

Incremento de cantidad de movimiento:

$$E = m(V_s - V_e)$$

Siendo:

m = Masa

V_s = Velocidad de salida

V_e = Velocidad de entrada

E = Empuje generado

Al aplicar la segunda ley de Newton nos proporciona lo siguiente: impulso de la fuerza F aplicada durante un tiempo t .

$$Ft = m(V_s - V_e)$$

En donde la fuerza sería igual a:

$$F = m \frac{(V_s - V_e)}{t}$$

Ahora al aplicar la tercera ley de Newton decimos que:

$$E = -F$$

Este valor de empuje puede escribirse en función del gasto de aire que atraviesa el motor por unidad de tiempo y de la variación de velocidades entre la entrada y la salida.

Así llamando \dot{m} al gasto másico de aire por unidad de tiempo, y G al gasto en peso de aire por unidad de tiempo, el valor absoluto del empuje resulta:

$$E = m \frac{(V_s - V_e)}{t} = \dot{m}(V_s - V_e) = \frac{G}{g}(V_s - V_e)$$

Siendo g la aceleración de la gravedad.

$$E = \frac{G}{g}(V_s - V_e)$$

Ciclo termodinámico "ciclo Brayton" de un turbo jet

El comportamiento del flujo en un motor a reacción es similar al que se observa en un motor recíproco, la diferencia es que los cuatro tiempos del motor recíproco suceden sobre el pistón, en cambio en un motor a reacción cada proceso sucede en cada una de las partes de este motor.

El ciclo que mejor describe este proceso en los motores a reacción es el ciclo Brayton.

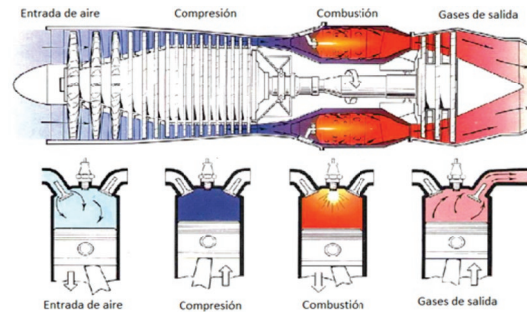


Figura 2. Comparación entre el ciclo de trabajo de un motor a reacción y uno recíproco.

Fuente: *The jet engine, Roll Royce*

El ciclo de trabajo de un motor a reacción se puede representar con el siguiente diagrama de presión versus volumen.

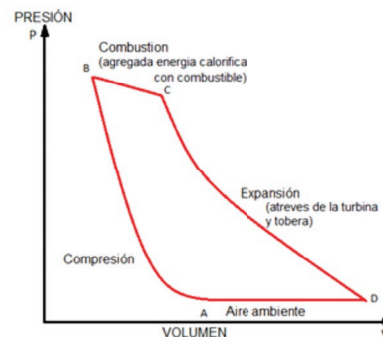


Figura 3. Diagrama del ciclo Brayton

Fuente: *Modificado de The jet engine, Roll Royce*

Estos cambios son indicados como se ve en la figura anterior partiendo desde el punto A que representa el aire a presión atmosférica que es comprimido a lo largo de la línea AB donde hay un proceso adiabático, siguiente a esto De B a C se introduce y quema combustible a una presión constante por lo tanto el proceso se asume como isobárico, allí hay un considerable incremento de volumen y una mínima pérdida de presión del gas en la cámara de combustión, siguiente al proceso de combustión en los puntos que van de C a D los gases resultantes de la combustión se expanden a través de la turbina y la tobera regresando a la atmósfera esto ocurre bajo un proceso adiabático. Durante esta parte del ciclo, alguna de la energía en la expansión de los gases es tomada por la turbina para la realimentación del sistema⁴.

⁴ ROLLS-ROYCE PLC. The jet engine. Quinta edición. Inglaterra. Renault Printing Co Ltd. 1996. 278p.

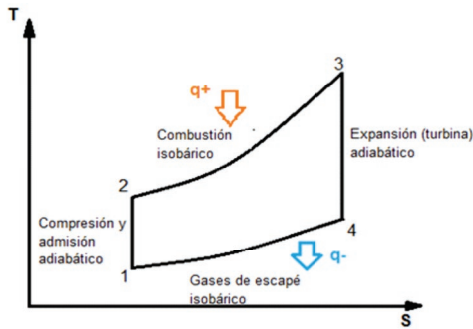


Figura 4. Diagrama temperatura vs entropía
Fuente: Modificado de http://gl.wikipedia.org/wiki/Ciclo_Brayton

El comportamiento de un motor a reacción se observa con la variación de la temperatura y la entropía en las diferentes etapas; de 1 a 2 en la compresión la temperatura aumenta manteniendo la entropía constante. Cuando se agrega calor en la combustión de 2 a 3 la temperatura y entropía se incrementan de manera casi uniforme y en la expansión de 3 a 4 la temperatura decrece permaneciendo constante la entropía.

CICLO RANKINE

El ciclo Rankine es un ciclo de potencia representativo del proceso termodinámico que tiene lugar en una central térmica de vapor. Como se ve en la figura 6, que utiliza un fluido de trabajo que alternativamente evapora y condensa, típicamente agua (si bien existen otros tipos de sustancias que pueden ser utilizados, como en los ciclos Rankine orgánicos). Mediante la quema de un combustible, el vapor de agua es producido en una caldera a alta presión para luego ser llevado a una turbina donde se expande para generar trabajo mecánico en su eje (este eje, solidariamente unido al de un generador eléctrico, es el que generará la electricidad en la central térmica). El vapor de baja presión que sale de la turbina se introduce en un condensador, equipo donde el vapor condensa y cambia al estado líquido (habitualmente el calor es evacuado mediante una corriente de refrigeración procedente del mar, de un río o de un lago). Posteriormente, una bomba se encarga de aumentar la presión del fluido en fase líquida para volver a introducirlo nuevamente en la caldera, cerrando de esta manera el ciclo.

Existen algunas mejoras al ciclo descrito que permiten mejorar su eficiencia, como por ejemplo sobrecalentamiento

del vapor a la entrada de la turbina, recalentamiento entre etapas de turbina o regeneración del agua de alimentación a caldera como se ve en la figura 5.

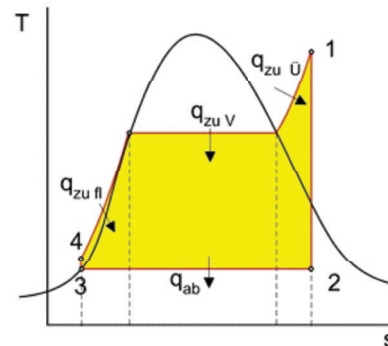


Figura 5. Diagrama temperatura vs entropía
Fuente: http://es.wikipedia.org/wiki/Ciclo_de_Rankine

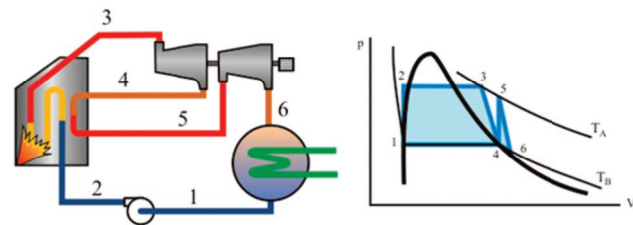


Figura 6. Diagrama presión vs volumen
Fuente: http://educativa.catedu.es/44700165/aula/archivos/repositorio/4750/4931/html/64_ciclo_de_rankine.html

- ⁵En la transformación 1-2 aumenta la presión del líquido sin pérdidas de calor, por medio de un compresor, con aportación de un trabajo mecánico externo.
- En la transformación 2-3 se aporta calor al fluido a presión constante en una caldera, con lo que se evapora todo el líquido elevándose la temperatura del vapor al máximo.
- La transformación 3-4 es una expansión adiabática, con lo que el vapor a alta presión realiza un trabajo en la turbina.
- La transformación 4-1 consiste en refrigerar el fluido vaporizado a presión constante en el condensador hasta volver a convertirlo en líquido, y comenzar de nuevo el ciclo.

Para optimizar el aprovechamiento del combustible, se somete al fluido a ciertos procesos, para

⁵ http://educativa.catedu.es/44700165/aula/archivos/repositorio/4750/4931/html/64_ciclo_de_rankine.html

tratar de incrementar el área encerrada en el diagrama p-V.

- Precalentamiento del agua comprimida 4-5 aprovechando el calor de los gases que salen por la chimenea de la caldera. Con esto no se aumenta el área del diagrama, pero se reduce el calor que hay que introducir al ciclo.
- Recalentamiento del vapor que ha pasado por la turbina 5-6 haciéndolo pasar por la caldera y después por otra turbina de baja presión.

CENTRAL DE CICLO COMBINADO

Es una central en la que la energía térmica del combustible es transformada en electricidad mediante dos ciclos termodinámicos: el correspondiente a una turbina de gas (ciclo Brayton) y el convencional de agua/turbina vapor (ciclo Rankine).

La turbina de gas consta de un compresor de aire, una cámara de combustión y la cámara de expansión. El compresor comprime el aire a alta presión para mezclarlo posteriormente en la cámara de combustión con el gas. En esta cámara se produce la combustión del combustible en unas condiciones de temperatura y presión que permiten mejorar el rendimiento del proceso, con el menor impacto ambiental posible.

A continuación, los gases de combustión se conducen hasta la turbina de gas (2) para su expansión. La energía se transforma, a través de los álabes, en energía mecánica de rotación que se transmite a su eje. Parte de esta potencia es consumida en arrastrar el compresor (aproximadamente los dos tercios) y el resto mueve el generador eléctrico (4), que está acoplado a la turbina de gas para la producción de electricidad. El rendimiento de la turbina aumenta con la temperatura de entrada de los gases, que alcanzan unos 1.300 °C, y que salen de la última etapa de expansión en la turbina a unos 600 °C. Por tanto, para aprovechar la energía que todavía tienen, se conducen a la caldera de recuperación (7) para su utilización.

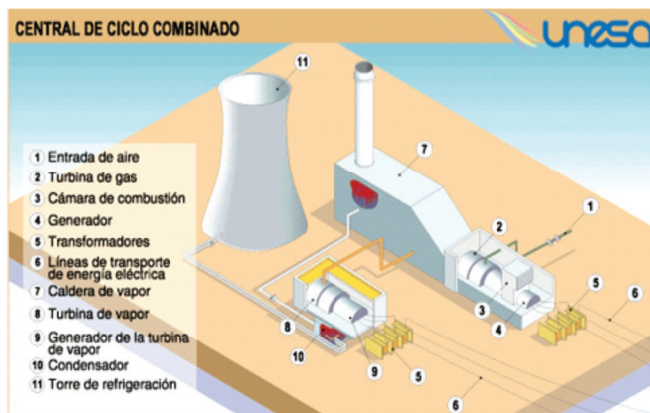
La caldera de recuperación tiene los mismos componentes que una caldera convencional (precalentador, economizador, etc.), y, en ella, los gases de escape de la turbina de gas transfieren su energía a un fluido, que en este caso es el agua, que circula por el interior de los tubos para su transformación en vapor de agua.

A partir de este momento se pasa a un ciclo convencional de vapor/agua. Por consiguiente, este vapor se

expande en una turbina de vapor (8) que acciona, a través de su eje, el rotor de un generador eléctrico (9) que, a su vez, transforma la energía mecánica rotatoria en electricidad de media tensión y alta intensidad. A fin de disminuir las pérdidas de transporte, al igual que ocurre con la electricidad producida en el generador de la turbina de gas, se eleva su tensión en los transformadores (5), para ser llevada a la red general mediante las líneas de transporte (6).

El vapor saliente de la turbina pasa al condensador (10) para su licuación mediante agua fría que proviene de un río o del mar. El agua de refrigeración se devuelve posteriormente a su origen, río o mar (ciclo abierto), o se hace pasar a través de torres de refrigeración (11) para su enfriamiento, en el caso de ser un sistema de ciclo cerrado.

Conviene señalar que el desarrollo actual de esta tecnología tiende a acoplar las turbinas de gas y de vapor al mismo eje, accionando así conjuntamente el mismo generador eléctrico.



Fuente: <http://www.unesa.es/sector-electrico/funcionamiento-de-las-centrales-electricas/1343-central-ciclo-combinado>

Metodología

Para diseñar la Central de Ciclo Combinado es necesario establecer los parámetros y condiciones en los que va a operar la central de ciclo combinado, en este paso se asumirán datos relacionados con la presión, densidad y temperatura atmosféricas que se tomarán de la tabla de atmósfera estándar.

Adicionalmente se analizará los procesos termodinámicos y comportamientos de los componentes en función de las presiones y temperaturas a lo largo de todos los ciclos y con esto se determinará la cantidad de energía que suministra esta central, con esto se calculará el con-

sumo específico de combustible, y tener como resultado el beneficio Vs consumo que brindara esta central.

Para construir la central de ciclo combinado, hay que saber el comportamiento termodinámico en cada una de las partes y así determinar las dimensiones y propiedades de los materiales que se van a utilizar. Para este fin se integran varias áreas de conocimiento como termodinámica, mecánica de fluidos, transferencia de calor, motores recíprocos y motores a reacción, que son parte del programa de ingeniería aeronáutica y que aplican para la construcción de la central de ciclo combinado.

Considerando que la cámara de combustión, el intercambiador de calor y el sistema de recuperación, son las partes de la central, que están expuestas a elevadas temperaturas es necesario que se utilicen materiales adecuados que cumplan con estas exigencias de soportar altas temperaturas y altas presiones, este diseño se llevara a cabo con la ayuda de los software (solidedge, ansys) que permiten validar datos de comportamiento de los materiales en función de la operación con la presión y alta temperatura. También para su construcción se utilizaran herramientas y maquinaria tales como: torno, fresadora, equipo de soldadura, taladro, pulidora, equipo de pintura, entre otras para todo el proceso de manufactura.

Para garantizar el buen funcionamiento de la central de ciclo combinado debe ser ensamblado y calculado dependiendo de sus especificaciones técnicas, para tal fin se utilizara; bombas de agua y aceite, un intercambiador de calor de alta presión, sistema de tuberías de alta presión, un sistema de alimentación de combustible, un sistema de recuperación, entre otros. Con esto se iniciara el diseño realizando cálculos del caudal para determinar el diámetro de la tubería, teniendo en cuenta que operaran a una elevada temperatura y presión, con el fin de garantizar la vida útil de la central y la seguridad de operación de la misma.

El sistema de operación se diseñara con el fin de garantizar una transferencia homogénea y eficiente de calor para aprovechamiento energético, para esto se utilizara sistemas diseñados y calculados que cumplan esta labor manteniendo la presión requerida permitiendo extraer la máxima energía de cada uno de los dos ciclos.

Después de construir los componentes de la central de ciclo combinado y seleccionar todos los equipos se procede a realizar el ensamble con base en los planos

y de la simulación de todo el conjunto de la central, garantizando que los componentes se acoplen de la forma correcta, teniendo en cuenta que para el encendido de la central se deben tener condiciones de seguridad altas y al efectuar los ajustes se procederá a realizar la operación de dicha central de ciclo combinado.

CONCLUSIONES

- La primera fase del proyecto arrojo que la mejor forma de encendido de sistema de motor a reacción, se logra a 1150°C, temperatura de salida de los gases de escape de la cámara.
- La mejor forma de lubricación del sistema se debe hacer por medio de un sistema de reservorio bajo "De capacidad mayor a recorrido de sistema".
- El sistema de encendido debe realizarse por medio de un sistema eléctrico que permita alcanzar el flujo másico mínimo que garantice la combustión en la cámara.
- La presión de inyección y el inyector se deben calcular dependiendo la densidad y presión de inyección del combustible.
- El sistema de extracción de potencia "turbina libre" debe ser calculado, según la energía requerida para la operación del sistema.
- El ciclo combinado deberá ir en función de los cálculos gasodinámicos y los materiales para así tener la menor cantidad de pérdidas, y mayor eficiencia.

BIBLIOGRAFÍA

- ROLLS-ROYCE PLC. The jet engine. Quinta edición. Inglaterra. Renault Printing Co Ltd. 1996. 278p.
- CUESTA ÁLVAREZ, Martín. Motores de reacción. Quinta edición. España. Paraninfo. 1980. 552p
- HUNECKE, Klaus. Jet Engines, fundamentals of theory, design and operation. Sexta edición. Inglaterra. Biddles Ltd. 2003. 235p.
- CUESTA ÁLVAREZ, Martín. Motores de reacción. Quinta edición. España. Paraninfo. 1980. 552p.
- <http://www.unesa.es/sector-electrico/funcionamiento-de-las-centrales-electricas/1343-central-ciclo-combinado>.