



**SIMULACIÓN DE LOS EFECTOS
GENERADOS POR LA TEMPERATURA
DEL AIRE DE SUCCIÓN QUE INGRESA
AL COMPRESOR DE UNA TURBINA A
GAS SIEMENS.**

Autor
Nuñez G. Luis E.
C.I: 26.535.500

Urb. Yuma II, calle N° 3. Municipio San Diego
Teléfono: (0241) 8714240 (master) – Fax: (0241) 87123



REPÚBLICA BOLIVARIANA DE VENEZUELA
UNIVERSIDAD JOSÉ ANTONIO PÁEZ
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

**SIMULACIÓN DE LOS EFECTOS GENERADOS POR LA TEMPERATURA
DEL AIRE DE SUCCIÓN QUE INGRESA AL COMPRESOR DE UNA
TURBINA A GAS SIEMENS.**

Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título de
INGENIERO MECÁNICO.

Autor: Nuñez G. Luis E.
C.I: 26.535.500
Tutor: Prof. Ing. Alicia Yánez De Pizzella

San Diego, mayo 2020



FI-M -014-2020-2CE (TG)

Valencia, 11 de junio de 2020

Ciudadano:
Nuñez G., Luis E..
26.535.500
Presente-

Cumplo con informarle que la Comisión de Trabajo de Grado y Pasantías de la Facultad de Ingeniería en su reunión N° 01-2020 de fecha 08-06-2020 aprobó el proyecto de trabajo de grado titulado ***SIMULACIÓN DE LOS EFECTOS GENERADOS POR LA TEMPERATURA DEL AIRE DE SUCCIÓN QUE INGRESA AL COMPRESOR DE UNA TURBINA A GAS DE SIEMENS*** presentado por usted (es) como requisito para optar al título de Ingeniero Mecánico.

Se ratifica la designación de la Ing. Alicia Yáñez de Pizzella C.I: 4.598.880 como Tutora Académica que lo asesorara en el desarrollo de este proyecto.

Atentamente,



Prof. Luís Lira

Decano de la Facultad de Ingeniería

c.c. Coordinación de Pasantías y Trabajo de Grado (1).

L/a.a.



REPÚBLICA BOLIVARIANA DE VENEZUELA
UNIVERSIDAD JOSÉ ANTONIO PÁEZ
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

ACEPTACIÓN DEL TUTOR

Quien suscribe, Ingeniero Alicia Teresa Yáñez De Pizzella, portador(a) de la cédula de identidad N° V- 4.598.880, en mi carácter de tutor del Trabajo Especial de Grado, presentado por el ciudadano(a) Nuñez G. Luis E., portador(a) de la cédula de identidad N° V-26.535.500, titulado **SIMULACIÓN DE LOS EFECTOS GENERADOS POR LA TEMPERATURA DEL AIRE DE SUCCIÓN QUE INGRESA AL COMPRESOR DE UNA TURBINA A GAS SIEMENS** presentado como requisito parcial para optar al título de Ingeniero Mecánico, considero que dicho trabajo reúne los requisitos y méritos suficientes para ser sometido a la presentación pública y evaluación por parte del jurado examinador que se designe.

En San Diego, a los 23 días del mes de junio del año dos mil veinte

Ing. Alicia De Pizzella

C.I. 4.598.880

Tutor Académico

AGRADECIMIENTOS

A Dios, quien me dio el privilegio de vivir y de poder superar este escalón para obtener el título como profesional. Porque me ha guiado en cada paso que doy y porque me ha guardado día a día. Y por ofrecerme la oportunidad pese a todas las cosas que estamos viviendo de cumplir mis metas.

A mis padres por todo ese esfuerzo que han hecho para sacarme adelante dignamente. Por su dedicación, su amor, su comprensión e incondicionalidad. Les agradezco toda mi vida por lo que han hecho y por lo que han dejado a un lado por mi bienestar y por esos innumerables esfuerzos y sueños pospuestos por brindarme estabilidad.

A mis profesores, por su dedicación y por el esfuerzo que nos brindaron pese a las circunstancias para poder culminar este trabajo, y por entregarnos ese conocimiento al final de nuestra carrera y brindarnos la oportunidad de poder ser profesionales. A la profesora Alicia de Pizzella por aceptar el desafío de ser mi tutora y ayudarme a realizar esta investigación.

A mi hermana, que ha servido de un gran ejemplo de constancia y superación. Por estar presentes y darme siempre consejos cuando se necesitaban. Que a pesar de la distancia seguimos siempre presentes. A todos mis compañeros de clase, que durante estos casi cinco años de carrera hemos convivido y vivido experiencias que solo pasan en esta etapa universitaria. También, por dar de su ayuda cuando se necesitó

ÍNDICE

CONTENIDO	Pag.
ÍNDICE DE FIGURA	ix
ÍNDICE DE GRAFICOS	xi
RESUMEN	xii
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO	
I EL PROBLEMA	3
1.1 Planteamiento del Problema.....	3
1.2 Formulación.....	5
1.3 Objetivos de la Investigación.....	5
1.3.1Objetivo General.....	5
1.3.2Objetivos específicos.....	5
1.4 Justificación.....	6
1.5 Alcance.....	7
1.6 Limitaciones.....	7
II MARCO TEÓRICO	
2.1 Antecedentes.....	9
2.2 Bases Teóricas.....	11
2.2.1 Turbina de gas.....	11
2.2.2 Ciclo Termodinámicos.....	12
2.2.3 Partes de una Turbina de Gas.....	20
2.2.4 Siemens.....	22
2.2.5 SGT-700.....	22
2.2.6 Temperatura.....	23
2.2.7 Humedad.....	23
2.2.8 Densidad.....	24
2.2.9 Presión.....	24
2.2.10 Termodinámica.....	24
2.2.11 Número de Reynolds.....	25
2.2.12 Leyes de los Gases Ideales.....	26
2.2.13 Simulación.....	27
2.2.14 Sistemas CAD.....	28
2.2.15 Dinámica de Fluidos Computacional (CFD).....	28
2.2.16 Mallado o discreción numérica.....	29
2.2.17 Ansys Workbench.....	30
2.2.18 Ansys CFX.....	31
2.3 Definición de términos.....	32

III	MARCO METODOLÓGICO	
3.1	Tipo de Investigación.....	33
3.2	Diseño de la Investigación.....	33
3.3	Nivel de la Investigación.....	34
3.4	Población.....	34
3.5	Muestra.....	35
3.6	Técnicas e instrumentos de recolección de datos.....	35
3.6.1	La técnica.....	35
3.6	Fases de la investigación.....	36
IV	RESULTADOS	
4.1	Descripción y análisis del funcionamiento de una turbina Siemens.....	38
4.1.1	Descripción de los componentes internos de la turbina.....	39
4.1.1.1	Sistema de combustión DEL.....	40
4.1.1.2	Turbina de Potencia.....	46
4.1.1.3	Compresor.....	49
4.1.1.4	Sistema de entrada de aire y salida de gases.....	52
4.1.2	Descripción de funcionamiento de la turbina en condiciones ideales y adversas	54
4.1.2.1	Funcionamiento de la turbina en condiciones ideales.....	54
4.1.2.2	Funcionamiento de la turbina en condiciones adversas.....	55
4.2	Señalamiento de los efectos que generan las variaciones de temperatura del aire que ingresa al compresor y como afectan el rendimiento de la turbina.....	56
4.2.1	Efectos y fallas ocasionados debido a las variaciones de temperatura y condiciones del aire de entrada.....	57
4.2.1.1	Corrosión.....	57
4.2.1.2	Erosión.....	58
4.2.1.3	Ensuciamiento.....	60
4.2.1.4	Formación de hielo.....	62
4.3	Análisis de los efectos que suceden en el proceso de generación de energía de una turbina a gas con diferentes cambios de temperatura en el aire de succión del compresor...	63
4.3.1	Análisis del proceso de producción de energía a temperaturas bajas.....	64

4.3.2	Análisis del proceso de producción de energía a temperaturas ideales.....	67
4.3.3	Análisis del proceso de producción de energía a temperaturas elevadas.....	69
4.4	Simulación de los efectos generados por variaciones de temperatura en la entrada de aire al compresor de una turbina a gas Siemens.....	73
CONCLUSIONES		91
RECOMENDACIONES		93
BIBLIOGRAFÍA		94
ANEXOS		
A	The gas turbine engineering handbook	98
B	Asme basic gas turbines b133.2 publicado: 1977	99
C	Catálogo de turbina siemens sgt-700	100
D	Datos técnicos de sgt6- 5000f	102
E	Norma iso 13443	105
F	Catálogo de turbina sgt-750	106

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA		Pg
1	Diagrama P-v de un ciclo de Carnot.....	13
2	Diagrama T-s de un ciclo de Carnot.....	13
3	Ciclos real e ideal en motores de encendido por chispa y sus diagramas P-v.....	14
4	Diagrama P-v y T-s para el ciclo Diesel ideal.....	15
5	Ciclo Rankine ideal simple.....	16
6	Motor de turbina de gas de ciclo abierto.....	17
7	Diagrama T-s ciclo Brayton.....	17
8	Diagrama P-v ciclo Brayton.....	18
9	Turbina de gas y partes principales.....	21
10	Turbina de gas SGT-700.....	22
11	Mallado de una pieza.....	30
12	Esquema de funcionamiento.....	38
13	Componentes internos de turbina Siemens SGT-700.....	40
14	Cámara de combustión con flujo directo.....	41
15	Distribución de aire en una cámara de combustión típica.....	43
16	Combustores con quemadores DEL.....	43
17	Tendencias tecnológicas indican que el gas natural es el combustible elegido.....	44
18	Combustión en turbina Siemens SGT-700.....	46
19	Detalles de los agujeros de refrigeración en los alabes.....	47
20	Turbina de potencia libre de dos etapas del modelo SGT-700..	48
21	Características de rendimiento de diferentes tipos de compresores.....	49
22	Compresor axial de once etapas del modelo SGT-700.....	51
23	Sección de entrada de aire al compresor de turbina Siemens...	52
24	Sección de entrada de aire al compresor de turbina SGT-700..	53
25	Sección de salida de gases de turbina SGT-700.....	53
26	Gráfica de rendimiento nominal del modelo SGT-700.....	56
27	Corrosión en turbina de gas.....	58
28	Daños por erosión de una turbina de gas.....	59
29	Sistema de filtración del aire de entrada que ofrece el paquete de generación de energía de una turbina SGT-700.....	59
30	Ensuciamiento en compresor de turbina de gas.....	61
31	Efecto del ensuciamiento en una turbina de gas.....	61
32	Formación de hielo en las paredes internas del compresor.....	62
33	Formación de hielo en los álabes del compresor.....	63
34	Turbina SGT6-5000F.....	64
35	Referencias del SGT6-5000F.....	65
36	Consumo de combustible de la turbina SGT6-5000F con temperaturas y humedades variadas.....	66

37	Turbina SGT-750.....	68
38	Rendimiento de una turbina SGT-750.....	69
39	Rendimiento de una turbina SGT6-5000F con variación en la temperatura del aire que ingresa al compresor.....	70
40	Rendimiento de una turbina SGT6-5000F respecto a la humedad del ambiente.....	71
41	Generación de potencia de una turbina SGT6-5000F respecto a la humedad del ambiente.....	72
42	Generación de potencia de una turbina SGT6-5000F con variación en la temperatura del aire que ingresa al compresor.....	72
43	Compresor axial de turbina Siemens SGT-700.....	74
44	Compresor axial envuelto en cuerpo de estudio.....	74
45	Combinar sólidos.....	75
46	Corte longitudinal de solidos combinados.....	75
47	Ansys Workbench.....	76
48	Apertura de Edit Geometry in DesingModeler.....	77
49	Pieza cargada en Edit Geometry in DesingModeler.....	77
50	Modulo Mesh.....	78
51	Detalles de mallado.....	79
52	Pieza mallada.....	79
53	Proceso de asignación de parámetros.....	80
54	Configuración a Transient análisis.....	81
55	Parámetros de entrada de aire al compresor.....	82
56	Parámetros del compresor.....	83
57	Start Run.....	84
58	Countour de presión a 15°C en vista isométrica.....	85
59	Countour de presión a 15°C en vista lateral.....	85
60	Countour de velocidad en vista isométrica.....	87
61	Countour de presión a 10°C en vista isométrica.....	88
62	Countour de presión a 34°C en vista isométrica.....	88

ÍNDICE DE GRÁFICOS

GRÁFICO		Pg
1	Presión en el tiempo a 15°C	86
2	Interacciones de la simulación con la presión	89
3	Comparación de los resultados de la simulación con las distintas temperaturas.....	90

NOMENCLATURA

Símbolo

Q Calor



REPÚBLICA BOLIVARIANA DE VENEZUELA
UNIVERSIDAD JOSÉ ANTONIO PÁEZ
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

SIMULACIÓN DE LOS EFECTOS GENERADOS POR LA TEMPERATURA DEL AIRE DE SUCCIÓN QUE INGRESA AL COMPRESOR DE UNA TURBINA A GAS SIEMENS.

Autores: Luis Eduardo Nuñez Guevara

Tutor: Ing. Mecánico. Alicia Yánez

Año: 2020

RESUMEN

El presente trabajo de investigación tuvo como objetivo general observar y simular los diferentes efectos que se generan por la temperatura del aire que ingresa al compresor de una turbina de gas Siemens y como este afecta al compresor y las consecuencias que genera en el funcionamiento de la turbina. Para ello se tomaron las teorías de simulación, diseño y análisis termodinámico de las turbinas a gas y todas aquellas relacionadas al funcionamiento de estas bajo diversas temperaturas, tomando como fuente principal la información Suministrada por Siemens. La investigación es factible, documental, descriptiva apoyándose en investigaciones realizadas anteriormente, en la cual se evaluaron y analizaron el tipo de factores que intervienen en los compresores de turbinas de gas considerando los diferentes elementos que las componen. Mediante técnicas y herramientas de recolección de datos secundarios, se tomaron en cuenta otros trabajos de investigación en los cuales evaluaban los efectos del aire de succión en turbinas de gas. Se pretendió con el estudio en cuestión una simulación con tres valores distintos de temperatura en el aire de entrada al compresor, consiguiendo observar como la temperatura de admisión afecta el rendimiento del compresor. Por lo que es importante tener sistemas avanzados de control del aire que ingresa a las turbinas.

Palabras claves: temperatura, compresor, turbina de gas, fluido, presión, combustión interna, alabes, compresión, simulación, diseño.

INTRODUCCIÓN

El hombre en su constante búsqueda por avanzar ha creado una demanda de inventos que ayuden a este fin, se sabe que la humanidad ha buscado manipular las fuerzas de la naturaleza investigándola, conociéndola y usándola para su beneficio. De la interacción de la naturaleza y la investigación, se han desarrollado invenciones que han transformado la historia del hombre, una de ellas es la turbina.

Así mismo la generación de energía es uno de los pilares fundamentales para avanzar que ha visto mayor desarrollo en la historia. Como este mercado ha visto varias transformaciones que han ido mejorando y creando mayor variedad de opciones, para cumplir con esto se introdujo la generación de energía mediante turbinas de gas en ciclo simple o ciclo combinado con el fin de avanzar y mejorar.

Las turbinas son equipos utilizados en la transformación de energía calorífica en cinética y de ahí en potencia. Estas máquinas le han otorgado al avance de la generación de energía uno de sus tesoros más preciados. Para poder generar la electricidad y potencia en todo el mundo, las turbinas ejercen una labor muy fuerte que se ve muchas veces afectadas por diversos factores.

Hoy en día se siguen generando avances para la generación de energía apareciendo las energías limpias o renovables, de igual forma las turbinas de gas siguen representando una gran fuerza en el mercado de la energía, por lo cual fabricantes como GE, Alstom, Siemens, Solar entre otros, están en constante estudio para incrementar la potencia con la implementación de nuevos sistemas de escape, recubrimientos y materiales.

De esta manera como las turbinas representan una gran parte de la generación de energía y potencia en el mundo, se necesita que estas trabajen de forma ideal bajo distintas condiciones y exigencias. Es por ello que uno de los principales temas a considerar para el desempeño de estas máquinas es la temperatura del aire que ingresa al compresor de estas y como afecta en su rendimiento. Es por ello que el objetivo de

esta investigación fue señalar cual es el funcionamiento ideal de una turbina de gas mediante la simulación de los efectos que generan las variaciones de temperatura en el aire que ingresa al compresor de las mismas.

Considerando lo antes mencionado y teniendo en cuenta que este tipo de turbinas son muy utilizados en la generación de energía y potencia en la industria, ya que en los últimos años se ha incrementado el uso de estas, es necesario conocer sus condiciones óptimas de trabajo, ayudándonos a disminuir la contaminación ambiental y fallos. Esto se llevó a cabo a través de análisis paramétricos enfocados en la parte termodinámica, para luego general una simulación de como inciden las temperaturas que entran al compresor y conseguir posibles soluciones a cualquier problema generado.

En este sentido, el presente trabajo investigativo permitió llevar a la práctica gran parte del conocimiento adquirido a través del estudio de la carrera, así como también busca incentivar y facilitar futuras investigaciones que ayuden el comprendimiento del funcionamiento termodinámico de las turbinas de gas. El desarrollo de la simulación de los efectos de las variaciones de temperatura del aire que entra al compresor quedo estructurada en cuatro capítulos, los cuales son:

Capítulo I, El problema donde se encuentran: el planteamiento del problema, formulación del problema, objetivos de la investigación, justificación de la investigación, alcances y limitaciones de la investigación.

Capítulo II, Marco teórico donde se encuentran: los antecedentes de la investigación, bases teóricas y definición de términos.

Capítulo III, Marco metodológico donde se encuentran: el tipo de investigación, el diseño de investigación, el nivel de investigación, población, muestra, técnica e instrumentos de recolección de datos y las fases del proyecto.

Capítulo IV, Análisis e interpretación de resultados donde se encuentran: los resultados obtenidos durante el desarrollo de cada una de las fases del proyecto.

CAPÍTULO I

EL PROBLEMA

1.1 Planteamiento del problema

El mundo vive un aumento de la población a nivel global, lo que conlleva a una búsqueda exhaustiva de mecanismos, sistemas y soluciones con el objetivo de mejorar la calidad de vida de las personas y generar un mejor confort en la vida de la mayor cantidad de personas posibles. Como consecuencia las zonas urbanas e industriales modernas demandan cada vez más energía en sus diferentes formas, como electricidad, vapor y refrigeración.

De esta manera Dudley (2015) indica que uno de los aspectos fundamentales para el desarrollo constante de la humanidad es la administración consiente de los recursos energéticos existentes en el medio ambiente, dichos recursos son algunos de los que permiten la vida sostenida y adecuada de la generación actual y se desea que cumpla la misma función para las futuras generaciones de la población, siendo estos indispensables para proveer de una buena calidad de vida.

Al respecto Coira (2017) señala que los recursos energéticos son los mayores impulsores de la generación de energía eléctrica del mundo, algo que se ha vuelto vital para el día a día de cualquier industria, oficina, hogar o cualquier otro lugar donde los humanos realicen sus actividades cotidianas, volviéndose estos en parte fundamental de las actividades económicas y de la vida.

Así mismo, Nieves (2017) señala que el consumo de combustibles fósiles seguirá creciendo en los próximos años a pesar de la crisis del petróleo, de los altos precios del mismo y de la escasez de fuentes de energía no renovables que vivimos en la actualidad. En este orden de ideas, se hace necesaria la búsqueda de nuevas fuentes de energías que además de ser renovables no destruyan el medio ambiente, o buscar las formas de optimizar la generación de energía.

Sin embargo, esto representa un reto para la sociedad ya que la idea de lograr un modelo sostenible que le permita a la población vivir cómodamente presenta diversas dificultades. Por esta razón, las empresas y sus áreas encargadas de la planeación, tienen la importante labor de seleccionar, diseñar, disponer e instalar sistemas eficientes de generación de energía, los cuales deben no solo satisfacer el consumo de energía con la calidad deseada, sino también lograr el máximo ahorro de combustibles fósiles, la máxima eficiencia y las mínimas emisiones de dióxido de carbono a la atmosfera.

Se debe resaltar que una de las tecnologías más empleadas para la generación de energía eléctrica es por medio de la fabricación de centrales o plantas termoeléctricas, instalaciones que utilizan los combustibles fósiles a su favor para transformar y generar energía eléctrica. Estas centrales trabajan con una variedad diversa de combustibles, pero uno de los más eficientes y utilizados es por medio de las turbinas accionadas a gas.

Montilla (2017) define las turbinas a gas como turbomáquinas que forman parte del grupo de máquinas térmicas que operan en base al principio del ciclo Brayton, en donde aire comprimido es mezclado con combustible y quemado bajo condiciones de presión constante. El gas caliente producido por la combustión se le permite expandirse a través de la turbina y hacerla girar para llevar a cabo trabajo. En una turbina de gas con una eficiencia del 33%, aproximadamente $\frac{2}{3}$ del trabajo producido se usa comprimiendo el aire. El otro $\frac{1}{3}$ está disponible para generar electricidad, impulsar un dispositivo mecánico, entre otros.

Debido a que las turbinas a gas son un equipo que opera con la succión del aire proveniente del ambiente, su desempeño de acuerdo a Renovetec (2018) puede variar con cualquier factor que afecte el flujo de aire de admisión del compresor como la temperatura, densidad, humedad, presión atmosférica y el tipo de combustible.

Por otra parte, es fundamental mencionar que, los motores de las turbinas trabajan con combustión interna, entendiéndose que durante este proceso existen muchas variables, como la presión, temperatura, velocidad, nivel de oxígeno, entre otras, y que no solo dependen del trabajo que esté realizando, sino del ambiente en el cual se encuentre.

Esto hace que sean equipos muy eficientes, pero con poco rendimiento y que este se vea afectado por estos factores genera la necesidad de ver cuántos de ellos pueden ocasionar un porcentaje de pérdida significativo en el rendimiento, siendo uno de los más importantes la temperatura del aire que comprime el compresor y sus propiedades.

En este mismo orden de ideas, se tiene que entender que el problema no es solamente evitar la caída del rendimiento de los equipos, sino también, que las turbinas tengan un buen funcionamiento, evitando deficiencias en el servicio de generación de energía y colateralmente pérdidas materiales que se puedan generar por estas fallas.

1.2. Formulación del problema

¿Cómo afecta la temperatura del aire de succión que ingresa al compresor de una turbina a gas Siemens en su rendimiento?

1.3. Objetivos de la investigación

1.3.1 Objetivo General

Simular y analizar los efectos de la temperatura del aire de succión que ingresa al compresor de una turbina a gas Siemens.

1.3.2 Objetivos Específicos

Describir y analizar el funcionamiento de una turbina Siemens.

Encontrar los efectos que generan las variaciones de temperatura del aire que ingresa al compresor y como afectan el rendimiento de la turbina.

Analizar los efectos que suceden en el proceso de generación de energía de una turbina a gas con diferentes cambios de temperatura en el aire de succión del compresor.

Simular los efectos generados por variaciones de temperatura en la entrada de aire al compresor de una turbina a gas Siemens.

1.4. Justificación del problema

Debido a la gran demanda de avances en la producción de energía eléctrica en el mundo a motivo de dar respuesta al crecimiento de la población y su necesidad constante de mejorar la calidad de vida de estos durante el transcurrir del tiempo se ha generado una gran producción de energía eléctrica a base de combustibles fósiles los cuales son el método más común para generar energía eléctrica.

Pero muchas de estas grandes producciones se realizan con materiales no renovables y que afectan al medio ambiente lo cual genera la búsqueda constante de mejores y más eficientes formas de generar energía sin tener impacto en el medio ambiente, pero sin perder el rendimiento tan efectivo que tienen los métodos tradicionales como las centrales térmicas de ciclo Rankine de carbón que es la manera más antigua y de mayor uso en la actualidad.

Es por ello que el uso de las turbinas a gas en mayor escala sería un gran avance en el aspecto ambiental debido a que estas tienen un impacto 12 veces menor que las centrales que trabajan con productos energéticos derivados del petróleo o el carbón, al estar trabajando con gas natural que es menos contaminante y posee un tratamiento más económico y una extracción rápida.

Aunque no es una energía renovable es una alternativa fósil que tiene menos impacto ambiental y entrega mayor rendimiento que las energías renovables ya que a diferencia de estas puede mantener una producción de 24 horas que permite cubrir la alta demanda que existe en el mercado y tener poco impacto en el ambiente, es por esto que tiene importancia el estudio de cada factor que afecte el rendimiento de las turbinas a gas ya que con cada avance se podrán obtener mejores resultados de rendimiento al cubrir estos factores.

Mediante el desarrollo de esta investigación, se busca mejorar el funcionamiento de las turbinas a gas las cuales darán un mejor rendimiento de generación de energía eléctrica facilitando así la vida cotidiana de las personas, a su vez se busca promocionar el uso de estos equipos cada vez más en la industria debido a que estos son más amigables con el medio ambiente que otros dispositivos que generan muchos desechos o gases que destruyen la capa de ozono y afectan a la fauna silvestre.

Oportunamente desde la parte académica se justifica el presente trabajo de investigación ya que servirá de punto de partida o apoyo a futuras investigaciones relacionadas con el estudio de cómo afecta la temperatura del aire de succión que ingresa el compresor a una turbina a gas en su rendimiento.

1.5. Alcance de la investigación

La presente investigación tiene como propósito simular y estudiar los efectos o variables que hacen que se produzcan picos bajos de rendimiento en la generación de energía de una turbina a gas Siemens por la temperatura del aire de succión que ingresa al compresor, así como plantear recomendaciones que permitan minimizar los efectos de esta problemática en el rendimiento del equipo.

1.6. Limitaciones de la investigación

El presente trabajo se encontró con la dificultad de obtener información sobre estos equipos debido a que el área de la generación de energía tiene un mercado de alta competencia por las distintas compañías que se lucran de los altos beneficios de este, generando que la información recaudada sobre los equipos fuera algo escasa. De igual manera el trabajar con las diferentes condiciones que se pueden presentar en este equipo dificulta la explicación y el manejo de dichas condiciones por su gran variedad, dado que es compleja la tarea de obtener parámetros de calidad y funcionamiento por el gran secreto con el que las compañías fabricantes guardan sus procesos de análisis y estudio.

De igual manera, aunque los fabricantes proporcionan parámetros sobre estos equipos estos son muy limitados lo cual dificulta la demostración de la simulación mediante cálculos numéricos, si bien existen informes de estudio sobre estos equipos la gran mayoría de ellos enfoca sus conclusiones sobre resultados muy vagos de cómo se realizó el proceso que arrojó los resultados conseguidos.

Por otra parte, la computadora para el estudio debe soportar los requerimientos mínimos para el desarrollo y proceso de simulación de este, si no se cuenta con una computadora con una buena capacidad de procesamiento, puede afectar en el resultado final de la simulación y en el tiempo de procesamiento de datos, se necesita que sean lo más aproximado a lo real.

Aunado a esto se requiere de una gran destreza técnica para emplear de manera correcta el software de dinámica de fluidos computacional (CDF) que es mayor a la que se posee debido a la carencia de una asignatura en el pñsum de estudio de ingeniería mecánica en la universidad José Antonio Páez (UJAP) que se ocupe en explicar el uso de estos programas, esto trae como consecuencia la necesidad de asesorías y capacitaciones externas con el propósito de desarrollar las habilidades necesarias para realizar una simulación CFD y de igual manera estos software en Venezuela son de difícil acceso debido al costo de su licencia.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

El marco teórico es integrar el tema de la investigación con las teorías, enfoques teóricos, estudios y antecedentes en general que se refieren al problema de investigación. En tal sentido el marco teórico según Tamayo (2012) El marco teórico amplía la descripción del problema. Integra la teoría con la investigación y sus relaciones mutuas.

2.1. Antecedentes de la Investigación

Duque A (2016), quien realizo una investigación titulada **“Estudio del efecto de las condiciones atmosféricas sobre las prestaciones de una turbina de gas”**, para optar al título de Master en Ingeniería de la Energía realizado en la Universidad Politécnica de Madrid, la cual tiene como objetivo general Estudiar los efectos de las condiciones climáticas sobre las prestaciones de las turbinas de gas de centrales termoeléctricas de ciclo simple que operan en emplazamientos con elevada humedad y temperatura, señalo en su investigación que las turbinas a gas son una turbomáquina térmica que trabaja con un fluido de combustible de gas natural, empleadas para generar potencia mediante el ciclo Brayton donde es acoplada a un generador para producir energía eléctrica, en la investigación realizada por Duque A se estudiaran las turbinas a gas.

Desde esta investigación se busca maximizar el uso de estos equipos realizando un modelo de simulación y un estudio de las variaciones de las condiciones ambientales en un ciclo de turbina de gas para obtener los resultados de sus efectos sobre las prestaciones del equipo. Dando pie a la necesidad de emplear una simulación para obtener una estimación de las prestaciones de la turbina de gas con la finalidad de estudiar el comportamiento de las turbinas de gas en emplazamientos con condiciones ambientales muy diversas.

La investigación anteriormente mencionada posee una gran proximidad con el presente trabajo de grado ya que emplea una simulación de las condiciones ambientales en las que trabaja la turbina de gas y como estas afectan sus prestaciones, tomando en cuenta que se tiene un gran apego en esta investigación a cambios de condiciones ambientales en una zona geográfica específica para realizar la simulación y cálculos lo cual afecta el estudio en otras zonas o condiciones de igual manera deja al descubierto cual es el programa empleado para la simulación.

De igual manera, Nieves D (2017), en su investigación titulada **“Análisis de las tecnologías para disminuir la temperatura del aire en la succión del compresor y su influencia sobre los indicadores energéticos en una planta cogeneradora con turbina a gas (TG) y generador de vapor recuperador de calor (HRSG’S)”** para optar al título de Ingeniero Mecánico en la Universidad Tecnológica De Bolívar de Cartagena de Indias, Colombia. La investigación tuvo como objetivo realizar un estudio investigativo y teórico de lo que respecta al sistema de cogeneración y de todo lo que se compone, de los modelos termodinámicos y económicos que se pueden aplicar en dichos sistemas y de todas las tecnologías que existen para reducir la temperatura del aire de admisión en el compresor, estableciendo criterios técnicos y argumentos económicos que definen de cual sistema satisface de forma óptima el consumo de energía en la empresa tipo escogida para el presente estudio.

El trabajo de grado realizado por Nieves tiene aspectos en común con el tema de estudio como lo es la termodinámica y la influencia directa que esta tiene en las turbinas de gas, de igual manera la influencia de la temperatura de succión en el compresor y como esta afecta a la turbina de gas en su rendimiento. Adicionalmente en la investigación se hace una completa explicación acerca de las turbinas a gas y sus componentes.

Así mismo, Saiz M (2016), en su trabajo de grado titulado **“Desarrollo de un Simulador de Turbinas de Gas Fuera de Diseño”** para obtener el título de Ingeniero Industrial en la Universidad Politécnica de Madrid, España. El propósito de la investigación fue como ampliar las prestaciones de un programa de simulación ya existente, adaptándolo a la predicción de la actuación de turbinas de gas cuando se regula la potencia y cuando se modifican las condiciones ambientales.

El trabajo llevado a cabo por Saiz mantiene cierta relación con el tema a desarrollar en ámbitos críticos como un estudio de computadora en el desempeño de una turbina a gas bajo diferentes factores, de igual manera se realizan importantes menciones sobre los ciclos termodinámicos que se dan en una turbina y como también estos equipos se ven afectados por los cambios de temperaturas.

2.2. Bases Teóricas

Seguidamente se mencionan unos puntos que ayudan para dar aporte teórico a la investigación a realizar.

2.2.1 Turbina de gas

Una turbina de gas simple está compuesta de tres secciones principales: un compresor, un quemador y una turbina de potencia. Las turbinas de gas operan en base en el principio del ciclo Brayton, en donde aire comprimido es mezclado con combustible y quemado bajo condiciones de presión constante. El gas caliente producido por la combustión se le permite expandirse a través de la turbina y hacerla girar para llevar a cabo trabajo. En una turbina de gas con una eficiencia del 33%, aproximadamente $\frac{2}{3}$ del trabajo producido se usa comprimiendo el aire. El otro $\frac{1}{3}$ está disponible para generar electricidad, impulsar un dispositivo mecánico, etc.

En el campo de la generación de energía, estos equipos siempre han sido muy bien valorados por su capacidad de cubrir grandes picos de demanda de forma rápida y eficiente aunado a la poca inversión de obra civil necesaria para estos y por su baja necesidad de refrigeración lo que los convierte en máquinas de buenas prestaciones a la hora de generar energía de forma oportuna y rápida.

2.2.2. Ciclo Termodinámico

Se denomina ciclo termodinámico a cualquier serie de procesos termodinámicos tales que, al transcurso de todos ellos, el sistema regresa a su estado inicial; es decir, que la variación de las magnitudes termodinámicas propias del sistema se anula. No obstante, a las variables como el calor o el trabajo no es aplicable lo anteriormente dicho ya que éstas no son funciones de estado del sistema, sino transferencias de energía entre éste y su entorno. Un hecho característico de los ciclos termodinámicos es que la primera ley de la termodinámica dicta que: la suma de calor y trabajo recibidos por el sistema debe ser igual a la suma de calor y trabajo realizados por el sistema.

Ciclo de Carnot

En 1824, un ingeniero y físico francés, Nicolas Léonard Sadi Carnot avanzó el estudio de la segunda ley al formar un principio (también llamado la regla de Carnot) que especifica los límites de la máxima eficiencia que cualquier motor térmico puede obtener. En resumen, este principio establece que la eficiencia de un ciclo termodinámico depende únicamente de la diferencia entre los depósitos de temperatura caliente y fría. Es un ciclo que funciona a través de 4 etapas, la primera etapa es la encargada de entregar calor en el aire que se encuentra en el cilindro, manteniendo la temperatura constante e igual a la de la fuente a alta temperatura, provocando esto un aumento de volumen y de presión, por lo cual, todo el calor transferido es convertido en trabajo.

Durante la etapa dos, se experimenta la expansión adiabática sin intercambio de calor con el exterior, a fin de lograr disminuir la temperatura perdiendo presión. Luego en la etapa tres se pone en contacto el sistema con la fuente de calor a baja temperatura y el gas comienza a comprimirse sin aumentar su temperatura porque va cediendo calor a la fuente fría. Por último, en la etapa cuatro se mantiene aislado térmicamente el sistema mientras se comprime, con lo cual aumenta su temperatura hasta el estado inicial. (ver figura 1 y 2)

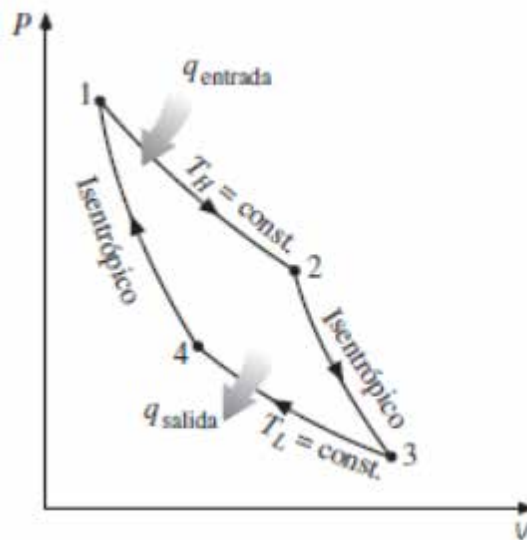


Figura 1. Diagrama P-v de un ciclo de Carnot.
Fuente: Cengel y Boles

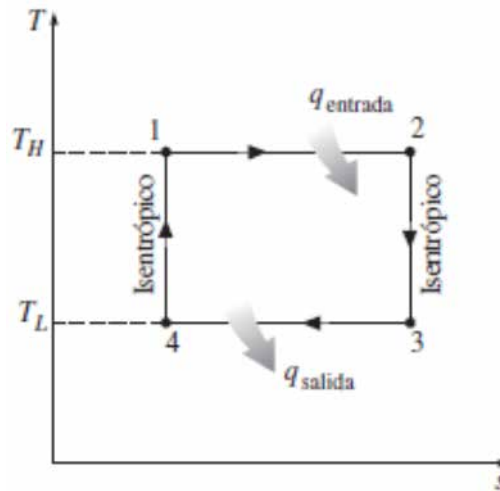


Figura 2. Diagrama T-s de un ciclo de Carnot.
Fuente: Cengel y Boles

Ciclo Otto

El ciclo de Otto es el ciclo ideal para las máquinas reciprocantes de encendido por chispa. Recibe ese nombre en honor a Nikolaus A. Otto quien, en 1876, en Alemania, construyó una exitosa máquina de cuatro tiempos utilizando el ciclo propuesto por el francés Beau de Rochas en 1862. En la mayoría de las máquinas de encendido por chispa el émbolo ejecuta cuatro tiempos completos (dos

ciclos mecánicos) dentro del cilindro, y el cigüeñal completa dos revoluciones por cada ciclo termodinámico. Estas máquinas son llamadas máquinas de combustión interna de cuatro tiempos (ver figura 3).

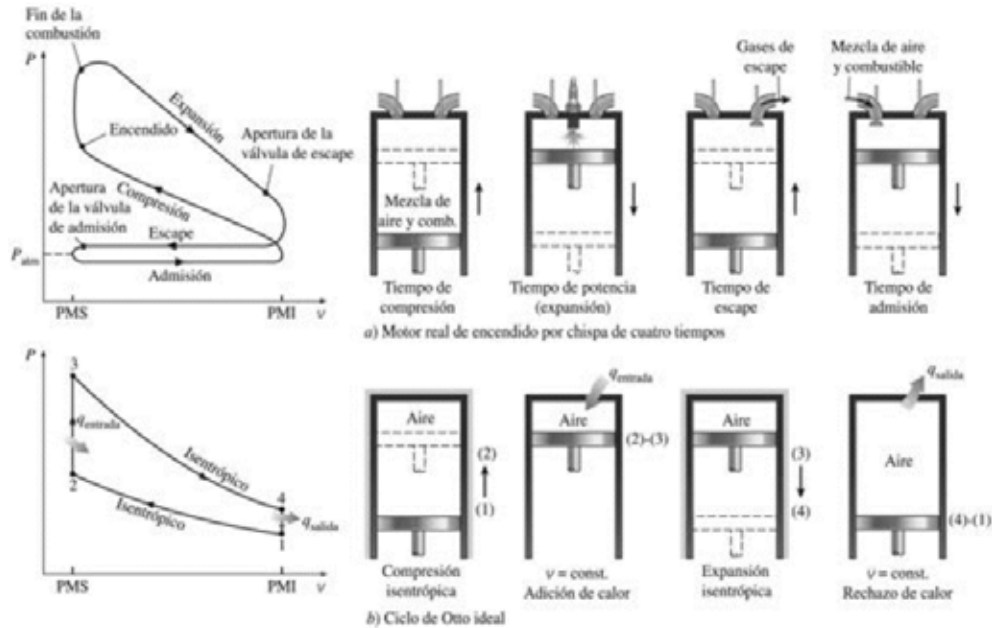


Figura 3. Ciclos real e ideal en motores de encendido por chispa y sus diagramas P-v.

Fuente: Cengel y Boles.

Ciclo Diesel

Es el ciclo ideal para maquinas reciprocantes, propuesto por Rudolph Diesel en la década de 1890. El combustible atomizado se inyecta en el cilindro a alta presión y cuando la compresión se completa hay un encendido sin necesidad de una chispa. En estos motores la bujía se sustituye por un inyector de combustible y tiene estos cuatro procesos internos, primero existe una compresión isentrópica para luego adicionar el calor a una presión constante, posteriormente hay una expansión isentrópica para por último tener un rechazo de calor a volumen constante. (ver figura 4)

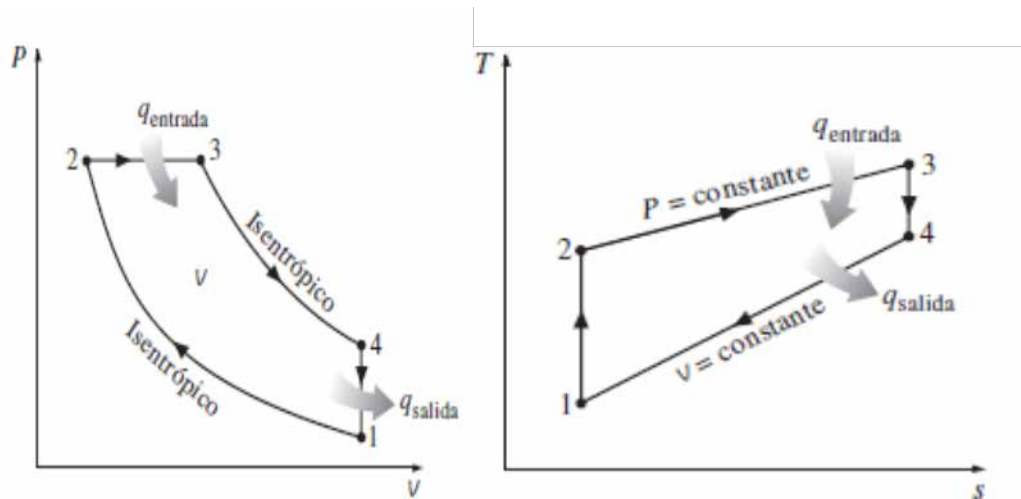


Figura 4. Diagrama P-v y T-s para el ciclo Diesel ideal.

Fuente: Cengel y Boles

Ciclo Rankine

El ciclo de Rankine es un ciclo termodinámico que contiene como objetivo la conversión de calor en trabajo, constituyendo de la misma forma lo que se denomina un ciclo de potencia. Como cualquier otro ciclo de potencia, su eficiencia está acotada por la eficiencia termodinámica de un ciclo de Carnot que operase entre los mismos focos térmicos. Debe su nombre a su desarrollador, el ingeniero y físico escocés William John Macquorn Rankine.

El ciclo Rankine opera con vapor, y es el utilizado en las centrales termoeléctricas. Consiste en calentar agua en una caldera hasta evaporarla y elevar la presión del vapor, que se hace incidir sobre los álabes de una turbina, donde pierde presión produciendo energía cinética. Prosigue el ciclo hacia un condensador donde el fluido se licúa, para posteriormente introducirlo en una bomba que de nuevo aumentará la presión, y ser de nuevo introducido en la caldera.

El ciclo Rankine ideal no incluye ninguna irreversibilidad interna y está compuesto de los siguientes cuatro procesos (ver figura 5):

- 1-2 Compresión isentrópica en una bomba.
- 2-3 Adición de calor a presión constante en una caldera.
- 3-4 Expansión isentrópica en una turbina.

4-1 Rechazo de calor a presión constante en un condensador.

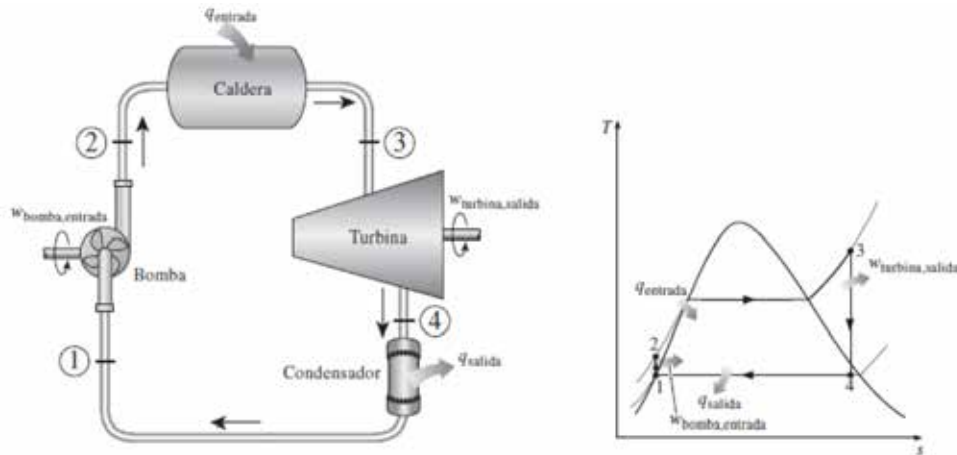


Figura 5. Ciclo Rankine ideal simple.

Fuente: Cengel y Boles.

Ciclo Brayton

Dicho lo anterior se entiende que las turbinas de gas funcionan mediante un ciclo de tipo Brayton, es un ciclo termodinámico de potencia de gas propuesto por George Brayton en 1870 que se utiliza generalmente para turbinas que operan con dicha sustancia de trabajo. El principal propósito del ciclo es la extracción de energía de un flujo aire-combustible para generar trabajo utilizable para aplicaciones mecánicas. Este ciclo puede ser abierto o cerrado, el abierto introduce aire fresco del ambiente en el compresor, donde su temperatura y presión se elevan.

Luego el aire de alta presión sigue hacia la cámara de combustión, donde se quema a presión constante. Los gases a altas temperaturas entran en la turbina y se expanden hasta la presión atmosférica, estos gases salen hacia afuera por ende no se recirculan y por eso se le clasifica como ciclo abierto. Por otra parte, durante el ciclo cerrado los procesos de compresión y expansión permanecen iguales, pero el proceso de combustión se sustituye por uno de adición de calor a presión constante por una fuerza externa, mientras que el proceso de escape se reemplaza por otro de rechazo de calor a presión constante. (ver figura 6)

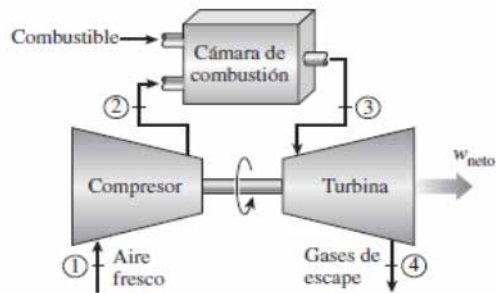


Figura 6. Motor de turbina de gas de ciclo abierto

Fuente: Cengel y Boles

El ciclo Brayton está conformado por cuatro etapas y/o procesos los cuales se describen a continuación (ver figura 7 y 8):

- 1-2: Compresión isentrópica.
- 2-3: Adición de calor a presión constante.
- 3-4: Expansión isentrópica.
- 4-1: Rechazo de calor a presión constante.

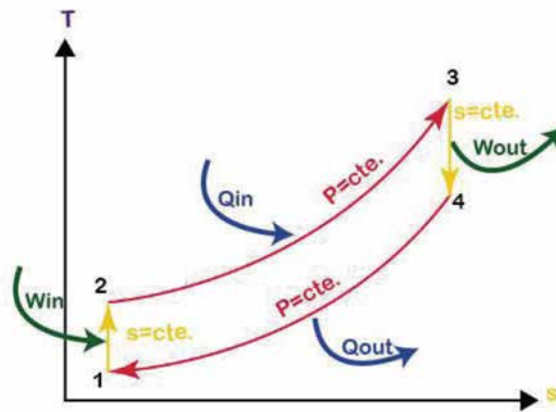


Figura 7. Diagrama T-s ciclo Brayton.

Fuente: Renovetec

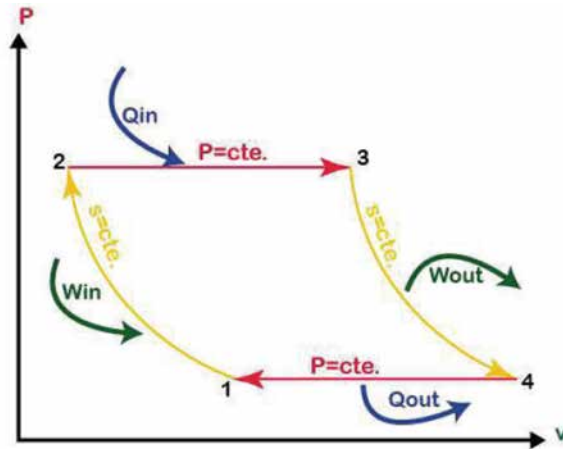


Figura 8. Diagrama P-v ciclo Brayton.

Fuente: Renovetec

Las dos principales áreas de aplicación de las turbinas de gas son la propulsión de aviones y la generación de energía eléctrica. Las turbinas de gas también se utilizan como centrales eléctricas estacionarias que producen energía eléctrica como unidades independientes o en conjunto con las centrales eléctricas de vapor en el lado de alta temperatura. En estas centrales los gases de escape de las turbinas de gas sirven como fuente de calor para el vapor. El ciclo de turbina de gas también puede ejecutarse como un ciclo cerrado para su utilización en centrales nucleares, en las que el fluido de trabajo no se limita al aire y puede emplearse un gas con características más convenientes (como el helio). (Cengel y Boles, 2009 p.513).

Donde el ciclo Brayton viene definido por la siguiente formula:

$$(Ec.1)$$

La eficiencia del ciclo se obtiene:

$$\frac{W_t - W_c}{Q_{cc}} \quad (Ec.2)$$

Donde:

$$W_c = - h_c = -C_p (T_c) \quad (Ec.3)$$

$$Q_{cc} = h_{cc} = C_p (T_{cc}) \quad (Ec.4)$$

$$W_t = h_t = C_p (T_t) \quad (\text{Ec.5})$$

Se considera el ratio de compresión:

$$r = \frac{P_4}{P_1} = \frac{P_6}{P_8} \quad (\text{Ec.6})$$

Relación de temperatura:

$$\frac{T_4}{T_1} = r^{-1} = \frac{T_6}{T_8} \quad (\text{Ec.7})$$

De esta forma el rendimiento también puede ser dado por:

$$\frac{W_t - W_c}{Q_{cc}} = 1 - \left(\frac{1}{r}\right)^{-1} \quad (\text{Ec.8})$$

La entalpia de estancamiento es:

$$h_0 = h + 0,5C^2 \quad (\text{Ec.9})$$

Si el fluido se considera un gas idea, la temperatura de estancamiento vendría a ser:

$$h = C_p T \quad (\text{Ec.10})$$

$$T_0 = T + \frac{c^2}{2C_p} \quad (\text{Ec.11})$$

Donde:

$$C_p = R(\gamma - 1) \quad (\text{Ec.12})$$

2.2.3. Partes de una Turbina de Gas

El ciclo Brayton expuesto previamente se traduce en la realidad de las turbinas de gas. Una turbina de gas, en su presentación más básica, posee un sistema de admisión de aire, un compresor, una cámara de combustión y una turbina de expansión (ver figura9). Pueden ser empleadas en distintos sectores y dependiendo de cuál sea el sector, la turbina de gas tendrá características diferentes. Resumidamente se explicarán con mayor detalle las partes de una turbina de gas que consta de los siguientes elementos:

Admisión de aire

El sistema de admisión de aire posee los elementos que se encargan de que el aire que ingresa del ambiente a la turbina tenga las mejores condiciones de limpieza y con escasas turbulencias. Para llevar a cabo esto cuenta con filtros que eliminan la suciedad que pueda arrastrar el aire y de alabes internos o sistemas con el propósito de que el flujo sea lo más laminar posible, agregando que se desea que ingrese la mayor cantidad posible del mismo.

Cámara de combustión

En ella tiene lugar la combustión a presión constante del gas combustible combinado con el aire. Esta combustión a presión obliga a que el combustible sea introducido a un nivel de presión adecuado, que oscila entre 16 y 50 bar. En consecuencia, de las altas temperaturas que pueden alcanzarse en la combustión y para no acortar demasiado la vida útil de los elementos componentes de la cámara, se trabaja con un exceso de aire alto, utilizando del 300 al 400% del aire teórico necesario, con lo que se consigue por un lado reducir la temperatura de llama y por otro refrigerar las partes más calientes de la cámara. (Opex Energy, 2016)

Parte del aire que proviene del compresor, se envía directamente hacia las paredes de la cámara de combustión para mantener su temperatura en valores convenientemente bajos. Otra parte se hace circular por el interior de los álabes de la turbina, saliendo por orificios en los bordes que crean una película sobre la superficie de los álabes.

Turbina de expansión

En la turbina es donde ocurre la conversión de la energía contenida en los gases de combustión, en forma de presión y temperatura elevada (entalpía), a potencia mecánica (en forma de rotación de un eje). Como se ha señalado antes, una parte significativa de esta potencia es absorbida directamente por el compresor. Al contrario de lo que sucede en el compresor, a medida que se avanza en la turbina en el sentido de entrada del aire, los alabes se alargan de modo que el área que atraviesa el aire es cada vez mayor. Esto compensa el descenso de densidad del aire, permitiendo una velocidad axial constante.

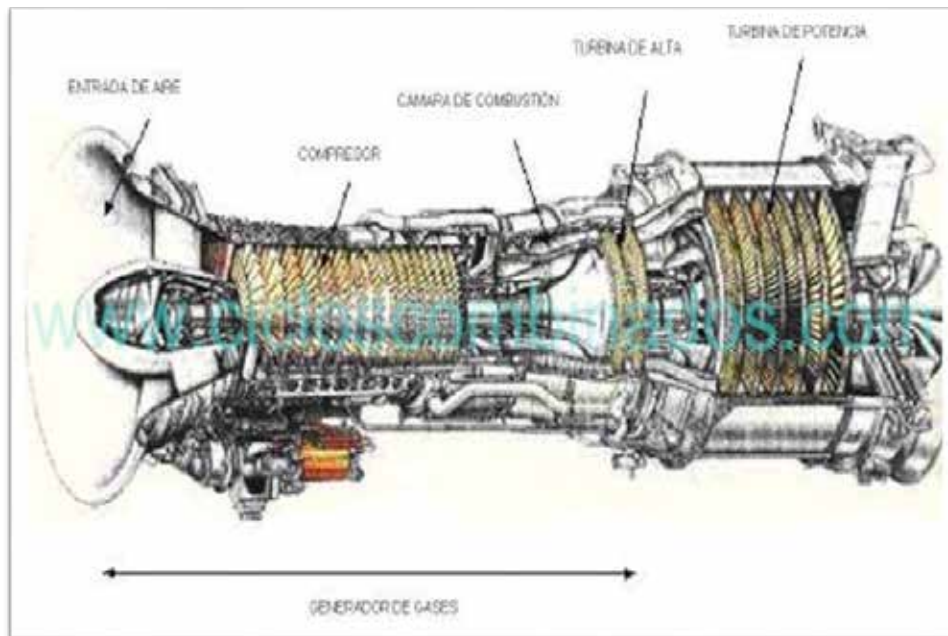


Figura 9. Turbina de gas y partes principales.

Fuente: Opex Energy

2.2.4. Siemens

La empresa fue fundada el 12 de octubre de 1847 en un piso interior de la calle Schöneberg N° 19, Berlín por Werner von Siemens y Johann Georg Halske 2, bajo el nombre de Telegraphen-Bauanstalt von Siemens & Halske; a partir de 1897, Siemens & Halske AG.

Siemens es un conglomerado de empresas alemana con sedes en Berlín y Múnich considerada como la mayor empresa de fabricación industrial de Europa con 190 sucursales a lo largo del mundo.

Siemens opera en cuatro sectores principales: el sector industrial, energético, de salud (Siemens Healthineers) y de infraestructuras y ciudades. La empresa se caracteriza por el desarrollo de equipamiento de diagnóstico médico generando un 12% de beneficios después de su división de automatización industrial. Siemens emplea 379.000 personas alrededor del mundo reportando ingresos globales de 83 mil millones de euros en el año 2018. El grupo está representado en 190 países y es una de las compañías más grandes del mundo en ingeniería eléctrica y electrónica.

2.2.5. SGT-700

EL SGT-700 (ver figura 10) se deriva del SGT-600 y está diseñado para ofrecer un mayor rendimiento y eficiencia, así como menores emisiones con una amplia capacidad de rango de combustible. Esta turbina de gas es ideal para aplicaciones de generación de energía y accionamiento mecánico. Con el alto calor de escape, también es excelente para la cogeneración, así como para aplicaciones de ciclo combinado.



Figura 10. Turbina de gas SGT-700
Fuente: Siemens

2.2.6. Temperatura

En 1664 Robert Hooke propuso que el punto de congelación del agua se usara como el punto cero, siendo las mismas medidas a partir de este punto. Un tiempo más adelante Ole Roemer vio la necesidad de tener dos puntos de referencias para tener la interpolación entre ellos, así es como nace el punto de ebullición. Unos años más tarde y bajo estos principios Anders Celsius propuso la escala de 0 a 100 grados Centígrados bajo la necesidad de poder tener referencia numérica de estos dos puntos. La temperatura es una magnitud referida a la noción de calor. Se define temperatura como la magnitud escalar relacionada con la energía interna de un sistema termodinámico o descrito de una forma más sencilla, el grado de calor en los cuerpos, la cual viene dada por el movimiento interno de las moléculas.

2.2.7. Humedad

La humedad es una propiedad que describe el contenido de vapor de agua presente en un gas, el cual se puede expresar en términos de varias magnitudes. Algunas de ellas se pueden medir directamente y otras se pueden calcular a partir de magnitudes medidas. La selección de una magnitud de humedad depende de la aplicación. En meteorología la humedad se expresa con la temperatura de bulbo húmedo, en cambio en un cilindro de gas, el contenido de humedad se expresa con la temperatura de punto de rocío. En otras aplicaciones como cámaras de humedad o cuartos limpios se usa la humedad relativa. (E Martines, 2017)

La humedad absoluta representa la proporción másica de vapor de agua entre la cantidad de aire seco, mientras que la humedad relativa indica la cantidad de vapor de agua real en el aire, comparada con la máxima cantidad de vapor de agua que dicho aire puede contener a una cierta temperatura, es decir, cuando la humedad relativa llega al 100% se dice que el aire está saturado, por lo que no puede contener más cantidad de vapor de agua. (Sammak, 2016)

2.2.8. Densidad

unidad de volumen. La densidad varía mucho en los gases, aumentando casi de forma proporcional a la presión. La densidad de los líquidos es casi constante; la densidad del agua (alrededor de 1000 kg/m³) tan sólo se incrementa en un 1 por 100 cuando la presión se multiplica por un factor de 220. Por lo tanto, la mayoría de los líquidos se pueden considerar casi «incompresibles».

2.2.9. Presión

Cengel y Boles definen la presión como la fuerza normal que ejerce un fluido por unidad de área. Se habla de presión sólo cuando se trata de gas o líquido, mientras que la contraparte de la presión en los sólidos es el esfuerzo normal. Puesto que la presión se define como la fuerza por unidad de área, tiene como unidad los newtons por metro cuadrado (N/m²), también conocida como pascal (Pa).

2.2.10 Termodinámica

La termodinámica se puede definir como la ciencia de la energía. Aunque todo el mundo tiene idea de lo que es la energía, es difícil definirla de forma precisa. La energía se puede considerar como la capacidad para causar cambios. El término termodinámica proviene de las palabras griegas therme (calor) y dynamis (fuerza), lo cual corresponde a lo más descriptivo de los primeros esfuerzos por convertir el calor en energía. En la actualidad, el concepto se interpreta de manera amplia para incluir los aspectos de energía y sus transformaciones, incluida la generación de potencia, la refrigeración y las relaciones entre las propiedades de la materia. (Cengel y Boles, 2009 p.2)

Ley cero de la termodinámica

La primera ley de la termodinámica, también conocida como ley cero de la termodinámica, establece que si dos partes de un sistema entran en contacto térmico en estos van a ocurrir cambios en sus propiedades hasta llegar a un equilibrio térmico. Para que un sistema se encuentre en equilibrio debe llegar al punto que ya no haya intercambio neto de calor entre los sistemas.

Primera ley de la termodinámica

Es simplemente una expresión del principio de conservación de la energía, y sostiene que la energía es una propiedad termodinámica. Visto de otra forma, esta ley permite definir el calor como la energía necesaria que debe intercambiar el sistema para compensar las diferencias entre trabajo y energía interna. En palabras simples: la energía total del universo se mantiene constante. No se crea ni se destruye, solo se transforma.

Tercera ley de la termodinámica

Este principio plantea que, si la entropía de un sistema fuera llevado al cero absoluto, esta sería una constante definida. Es decir, que si se lleva un proceso al cero absoluto la entropía del sistema tendrá un valor mínimo constante. Este principio se ve en los refrigeradores que congelan los alimentos para detener los procesos bioquímicos que ayudan a la descomposición de los mismos.

2.2.11 Número de Reynolds

White define esto como el parámetro primario que determina el comportamiento de los fluidos newtonianos es el número adimensional de Reynolds:

$$Re = \frac{v_s \cdot L_c}{\nu} \quad (\text{Ec.13})$$

Es un número adimensional utilizado en la mecánica de fluidos y fenómenos de transporte para caracterizar el movimiento de un fluido; como todo número adimensional es un cociente, una comparación. La importancia de este radica en que nos habla del régimen con que fluye un fluido, lo que es fundamental para el estudio del mismo.

2.2.12 Leyes de los Gases Ideales

Las primeras leyes de los gases fueron desarrolladas desde finales del siglo XVII, cuando los científicos empezaron a darse cuenta de que, en las relaciones, entre la presión, el volumen y la temperatura de una muestra de gas, en un sistema cerrado, se podría obtener una fórmula que sería válida para todos los gases. Estos se comportan de forma similar en una amplia variedad de condiciones debido a la buena aproximación que tienen las moléculas que se encuentran más separadas, y los gases se consideran como casos especiales de la ecuación del gas ideal, con una o varias de las variables constantes.

Ley de Charles

En 1787, Jack Charles estudió por primera vez la relación entre el volumen y la temperatura de una muestra de gas a presión constante y observó que cuando se aumentaba la temperatura el volumen del gas también aumentaba y que al enfriar el volumen disminuía. Lo que Charles descubrió es que, si la cantidad de gas y la presión permanecen constantes, el cociente entre el volumen y la temperatura siempre tiene el mismo valor.

Matemáticamente expresado así:

$$V=K_2T \quad (\text{Ec.14})$$

Ley de Gay-Lussac

Fue enunciada por Joseph Louis Gay-Lussac a principios de 1800. Establece la relación entre la temperatura y la presión de un gas cuando el volumen es constante. Al aumentar la temperatura las moléculas del gas se mueven más rápidamente y por tanto aumenta el número de choques contra las paredes, es decir aumenta la presión ya que el recipiente es de paredes fijas y su volumen no puede cambiar.

Gay-Lussac descubrió que, en cualquier momento de este proceso, el cociente entre la presión y la temperatura siempre tenía el mismo valor:

$$P=k_3T \quad (\text{Ec.15})$$

2.2.13 Simulación

En las ciencias, la simulación es el artificio contextual que referencia la investigación de una hipótesis o un conjunto de hipótesis de trabajo utilizando modelos un método perfecto para la enseñanza y aprendizaje. La simulación es aplicada en campos de la investigación como la química, la biología, la matemática y la física, estudios comparativos de elementos de la naturaleza necesitan experimentos en los que se evalué el comportamiento, lo mismo sucede en la sociedad y el entorno cotidiano. Cuando es un método científico se deben seguir una serie de procedimientos e indicaciones para cumplirlo:

Definición del sistema, en el que se establece cuáles son los elementos que se deben simular, incluyendo movimientos y aspectos relevantes.

Formulación del modelo, se crea o se imita el espacio en el que se produce el evento o fenómeno.

Colección de datos, al concluir el proceso de simulación, se tiene la información del proceso como si fuera el original o al menos el aproximado.

Verificación, comparación y comprobación de los datos obtenidos en la simulación y los datos de la versión original.

Interpretación, se evalúa y se le da uso a los datos obtenidos para así constatar que los datos obtenidos son en realidad los deseados.

Documentación, los científicos soportan la información obtenida como datos guardados para así servir como apoyo a nuevas generaciones de experimentos científicos que continúen la labor.

2.2.14 Sistemas CAD

El diseño asistido por ordenador (CAD) consiste en el uso de programas de ordenador para crear, modificar, analizar y documentar representaciones gráficas bidimensionales o tridimensionales (2D o 3D) de objetos físicos como una alternativa a los borradores manuales y a los prototipos de producto. El CAD se utiliza mucho en los efectos especiales en los medios y en la animación por ordenador, así como en el diseño industrial y de productos.

El CAD se utiliza a lo largo de todo el proceso de ingeniería, desde el diseño de productos conceptual y la estructura pasando por el análisis de ensambles hasta la definición del método de fabricación. El CAD permite a los ingenieros probar de forma interactiva las variantes de diseño con el número mínimo de prototipos físicos, con el objetivo de:

- Reducir los costes de desarrollo de productos
- Ganar velocidad
- Mejorar la productividad
- Asegurar la calidad
- Reducir el tiempo de lanzamiento al mercado

2.2.15 Dinámica de Fluidos Computacional (CFD)

La Dinámica de Fluidos Computacional o CFD (del inglés Computational Fluid Dynamics) es el área de conocimiento que trata sobre la simulación numérica de flujos fluidos, transferencia de calor y fenómenos relacionados tales como reacciones químicas, combustión, aeroacústica etc. El CFD tuvo origen a partir de la combinación de dos disciplinas: mecánica de los fluidos y cálculo numérico. Las ecuaciones que rigen el flujo fluido tienen origen en la mecánica de los fluidos y pueden ser resueltas por medio de diferentes métodos numéricos.

La Dinámica de Fluidos Computacional es ampliamente utilizada en los diferentes segmentos de la industria y soporta el proyecto y la fabricación de centenares de productos, tales como aviones, automóviles y navíos, así como los más diversos tipos de equipamientos industriales. La Mecánica de Fluidos Computacional puede ser utilizada desde la fase conceptual de un proyecto, ayudando a determinar la viabilidad y la mejor solución en producto, hasta la etapa de producción, permitiendo representar diversos escenarios. Con la ayuda de las herramientas de CFD es posible:

Simular difusión y convección de sustancias fluidas en los más diferentes ambientes.

Realizar la planificación y gestión de recursos hídricos.

Analizar la aerodinámica y aerotermodinámica de vehículos.

Evaluar la refrigeración de equipamientos, como reactores nucleares, motores etc.

Hacer estudios de caracterización de polución ambiental, dispersión de gases, análisis y simulación de lanzamiento de poluentes y contaminantes en corrientes hídricas.

Simular hidrodinámica y hemodinámica

Probar y desarrollar proyectos de sistemas propulsivos y de generación de energía en general.

2.2.16 Mallado o discreción numérica

El mallado también conocido como Mesh (ver figura 11) predice el comportamiento del modelo mediante la combinación de la información obtenida a partir de todos los elementos que conforman el modelo. Es un paso crucial en el análisis de diseño, el mallador automático en el software genera una malla basándose en un tamaño de elemento global, una tolerancia y especificaciones locales de control de malla. El control de malla le permite especificar diferentes tamaños de elementos de componentes, caras, aristas y vértices.

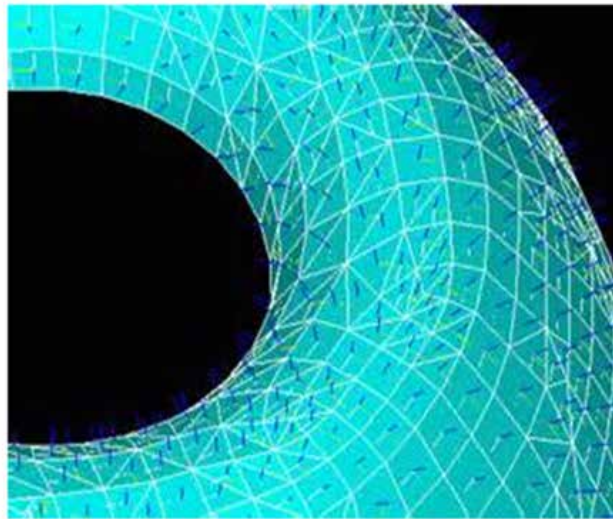


Figura 11. Mallado de una pieza

Fuente: Grupo Carman

2.2.17 Ansys Workbench

Es una plataforma de software desde donde se crean los proyectos de análisis CAE en diferentes disciplinas, Workbench despliega gráficamente el intento de la simulación en ingeniería y se establecen las relaciones entre fenómenos físicos y sus módulos incluyendo multi física. ANSYS está dividido en tres herramientas principales llamados módulos: preprocesador (creación de geometría y mallado), procesador y post-procesador. Tanto el preprocesador como el post-procesador están provistos de una interfaz gráfica.

Este procesador de elemento finito para la solución de problemas mecánicos incluye: análisis de estructuras dinámicas y estáticas (ambas para problemas lineales y no lineales), análisis de transferencia de calor y fluidodinámica, y también problemas de acústicas y de electromagnetismo. Normalmente el uso de estas herramientas se utiliza simultáneamente logrando mezclar problemas de estructuras junto a problemas de transferencia de calor como un todo. Este software es usado también en ingeniería civil y eléctrica, física y química.

2.2.18 Ansys CFX

Es un programa de análisis y simulación CFD (Computational Fluids Dynamics) de propósito general, usadas para problemas de fluidos, tiene herramientas de modelado , malleo y simulación en una interface moderna que da cabida a una amplia gama de resolución de problemas. Ansys CFX se integra con la plataforma Ansys Workbench de forma bidireccional para compartir información de modelado y mallas. Por ejemplo, un escenario de flujo puede ser usado como fronteras en un problema de diseño estructural.

2.3 Definición de términos

Mecánica de fluidos

Rama de la física comprendida dentro de la mecánica de medios continuos, estudia el movimiento de fluidos.

Sistema abierto

Es aquél que intercambia energía y materia con los alrededores.

Sistema cerrado

Es aquél que intercambia energía (calor y trabajo) pero no materia con los alrededores (su masa permanece constante).

Entropía

Grado de irreversibilidad que, en un sistema termodinámico, es alcanzado después de un proceso que implique la transformación de energía.

Compresión

Proceso físico o mecánico que somete a un cuerpo a la acción de dos fuerzas opuestas para así disminuir su volumen.

Expansión

Es la acción y efecto de extenderse o dilatarse.

Potencia

Es la acción y efecto de extenderse o dilatarse.

Volumen

Grado de irreversibilidad que, en un sistema termodinámico, es alcanzado después de un proceso que implique la transformación de energía.

CAPÍTULO III

MARCO METODOLÓGICO

El contexto metodológico constituye la parte medular de una investigación, y la misma implica un conjunto de procedimientos lógicos implícitos en todo el proceso. Arias (2012). Explica el marco metodológico como el “Conjunto de pasos, técnicas y procedimientos que se emplean para formular y resolver problemas” (p.16). Este método se basa en la formulación de hipótesis las cuales pueden ser confirmadas o descartadas por medios de investigaciones relacionadas al problema.

3.1. Tipo de investigación

Este estudio se apoyará en un proyecto factible, Arias, (2012), señala: “Que se trata de una propuesta de acción para resolver un problema practico o satisfacer una necesidad. Es indispensable que dicha propuesta se acompañe de una investigación, que demuestre su factibilidad o posibilidad de realización”- (p.134). Por lo tanto, el estudio permitirá percibir la información de una forma directa desde donde se desenvuelven los acontecimientos, efectuando las observaciones y anotaciones de los datos de las simulaciones en estudio para posteriormente efectuar el análisis de la problemática planteada y así poder llegar a detectar como afecta la temperatura que ingresa al compresor de una turbina a gas Siemens.

3.2. Diseño de investigación

Arias (2012, p.27) define el diseño de investigación como la estrategia general que adopta el investigador para responder al problema planteado. En atención al diseño, la investigación se clasifica en: documental, de campo y experimental. Así, se entiende como un plan que permite al investigador recoger datos para solucionar el problema de la investigación a solucionar. Este proyecto es de tipo de investigación documental, donde Arias (2012, p. 27) expresa lo siguiente:

La investigación documental es un proceso basado en la búsqueda, recuperación, análisis, crítica e interpretación de datos secundarios, es decir, los obtenidos y registrados por otros investigadores en fuentes documentales: impresas, audiovisuales o electrónicas. Como en toda investigación, el propósito de este diseño es el aporte de nuevos conocimientos.

La recopilación de datos de la investigación será de forma secundaria ya que serán obtenidos de otras investigaciones las cuales posean información sobre cómo afectan las diversas temperaturas del aire que ingresan al compresor de una turbina a gas en su rendimiento.

3.3. Nivel de la investigación

El presente trabajo está basado en la modalidad de una investigación descriptiva, ya que en la misma se busca definir cómo afecta la temperatura del aire que ingresa al compresor de una turbina Siemens para un posterior análisis de las variables, e interpretación de lo que esto ocasiona en la turbina y su rendimiento.

Sabino (2010), en su investigación titulada El Proceso de la Investigación, establece que “Para la investigación descriptiva, su preocupación primordial radica en descubrir algunas características fundamentales de conjuntos homogéneos de fenómenos, utilizando criterios sistemáticos que permitan poner de manifiesto su estructura o comportamiento. De esta forma se pueden obtener las notas que caracterizan a la realidad estudiada”. (p. 51)

3.4. Población

Según Hurtado y Toro (2005), señala que la población es el total de los individuos o elementos a quienes se refiere la investigación, es decir, todos los elementos que se van a estudiar, por ello también se le llama universo. Por lo que, para este estudio, la investigación estará sujeta a los procesos de generación de energía de las turbinas a gas.

3.5. Muestra

Tamayo y Tamayo (2012), afirma que la muestra es el grupo de individuos que se toma de la población, para estudiar un fenómeno estadístico. Para propósitos de esta investigación a realizar y con el fin de obtener resultados axiomáticos, se va a considerar solamente el compresor empleado por la turbina Siemens seleccionada para el estudio.

3.6. Técnicas e instrumentos de recolección de datos

Una vez delimitado el problema y definido el tipo, nivel y diseño de investigación a realizarse, se establecen los métodos, técnicas e instrumentos de recolección de datos que serán utilizados durante la ejecución de la investigación, en función de los objetivos planteados ya que serán estos los que permitirán el análisis del problema, para así emitir las conclusiones y recomendaciones para la solución de este.

3.6.1. La técnica

En la definición dada por Tamayo (2012), expresa que una técnica de recolección de datos es la forma de expresión operativa del diseño de investigación y que especifica concretamente como se hizo la investigación (p. 126). Por otro lado, Arias (2012) expresa que, se entenderá por técnica de investigación, el procedimiento o forma particular de obtener datos o información (p.67).

Como técnica a desarrollar para la investigación en curso se utilizarán los análisis de contenido y documental para la correcta elaboración del proyecto.

Instrumentos de recolección de datos

Según Arias (2012), "señala que los instrumentos son las herramientas que se utilizan para la recolección, almacenamiento y procesamiento de la información recogida." (p 44). Así mismo Tamayo y Tamayo (2012) define que: "Un instrumento de recolección de datos es cualquier recurso, dispositivo o formato (en papel o digital), que se utiliza para obtener, registrar o almacenar información" (p. 69).

La observación y sus instrumentos

Según Arias (2012, p.69) “La observación es una técnica que consiste en visualizar o captar mediante la vista, en forma sistemática, cualquier hecho, fenómeno o situación que se produzca en la naturaleza o en la sociedad, en función de unos objetivos de investigación preestablecidos.”

3.7. Fases de la investigación

Para la presente investigación se siguió un proceso lógico-metodológico en el cual se diseñaron varias fases a saber:

Fase I: Describir y analizar el funcionamiento de una turbina Siemens.

Descripción: Durante esta fase se describió el funcionamiento de la turbina seleccionada y como esta se desempeña durante su funcionamiento. Asimismo, se determinaron cuáles son los parámetros establecidos que permiten el buen funcionamiento de esta bajo condiciones normales o condiciones poco comunes.

Fase II: Encontrar los efectos que generan las variaciones de temperatura del aire que ingresa al compresor y como afectan el rendimiento de la turbina.

Descripción: Durante esta fase se indicaron los distintos factores que pueden afectar el aire que ingresa al compresor de la turbina a gas y como esta se ve afectada debido a estos factores.

Fase III: Analizar los efectos que suceden en el proceso de generación de energía de una turbina a gas con diferentes cambios de temperatura en el aire de succión del compresor.

Descripción: En esta fase se estudian los efectos en el funcionamiento de la turbina a gas con diferentes cambios de temperatura en el aire de succión del compresor definiendo así las variables a tomar en cuenta para poder llevar a cabo la simulación.

Fase IV: Simular los efectos generados por variaciones de temperatura en la entrada de aire al compresor de una turbina a gas Siemens.

Descripción: Durante la última fase del proyecto de investigación, ya habiendo recopilado todos los datos necesarios, se realiza la simulación de los efectos generados por la temperatura del aire que ingresa al compresor de una turbina Siemens. Esta se

lleva a cabo con la utilización de técnicas de CFD siendo sus siglas en ingles Computational Fluid Dynamics (Dinámica de Fluidos Computacional). Seleccionando el programa adecuado que cuente con esta herramienta, para ello se utiliza AutoDesk Flow Design, ANSYS Workbench y SimScale Workbench. Se analizará la información provista de la herramienta computacional a través de la simulación realizada y se estudiarán cada defecto de manera detallada para establecer condiciones importantes de como disminuirlos.

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

En el presente capítulo, se efectúa el desarrollo de las fases metodológicas mencionadas en el capítulo III de la presente investigación, de esta forma, se cumplen los objetivos relacionados con la simulación de los efectos generados por las variaciones de temperatura en la entrada de aire al compresor de una turbina a gas Siemens, empleando softwares especializados mencionados previamente en la investigación.

4.1. Descripción y análisis del funcionamiento de una turbina Siemens

Existen muchos componentes que intervienen para hacer funcionar la turbina a gas por medio del flujo de gases de combustión y el aire. El paso del gas comprende el pasaje que hacen desde la admisión del aire, atravesando el compresor, la sección de combustión y la turbina hacia la parte de descarga de la turbina, como se puede observar en la figura 12.

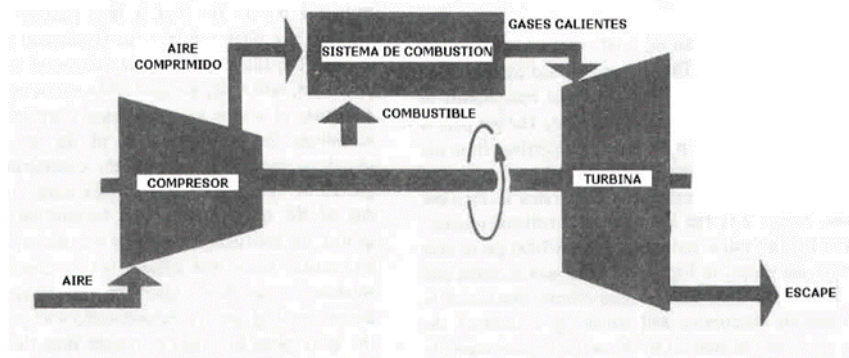


Figura 12. Esquema de funcionamiento
Fuente: Opex Energy

La turbina de gas industrial siempre ha enfatizado la larga vida y este conservador enfoque ha dado lugar a la turbina de gas industrial en muchos aspectos renunciando a un alto rendimiento para una operación resistente, ha sido conservador en la relación de presión y las temperaturas de cocción. Esto tiene todo un cambio en los últimos 10 años; estimulado por la introducción de la "Aero-Turbina de gas derivada", la turbina de gas industrial ha mejorado drásticamente su desempeño en todos los aspectos operativos.

De igual manera debido a que la turbina de gas es una máquina compleja, y su rendimiento y fiabilidad son gobernados por muchos estándares, se presentarán a continuación los componentes que intervienen en su funcionamiento y los parámetros que estos deben cumplir bajo condiciones ideales y como se desempeñan en condiciones poco comunes.

4.1.1. Descripción de los componentes internos de la turbina

La unidad a estudiar posee un diseño compacto en el cual se incluyen todos los componentes y equipos necesarios para llevar a cabo su funcionamiento como se puede ver en la figura 13, por lo cual en la presente etapa de la investigación se realizará una descripción de cada uno de ellos. Para cumplir este objetivo se divide la misma en tres etapas principales:

Sistema de combustión DLE

Turbina de potencia

Compresor

Además, cuenta con equipos como el sistema de entrada de aire y sistema de salida de gases de escape los cuales serán explicados de igual manera.

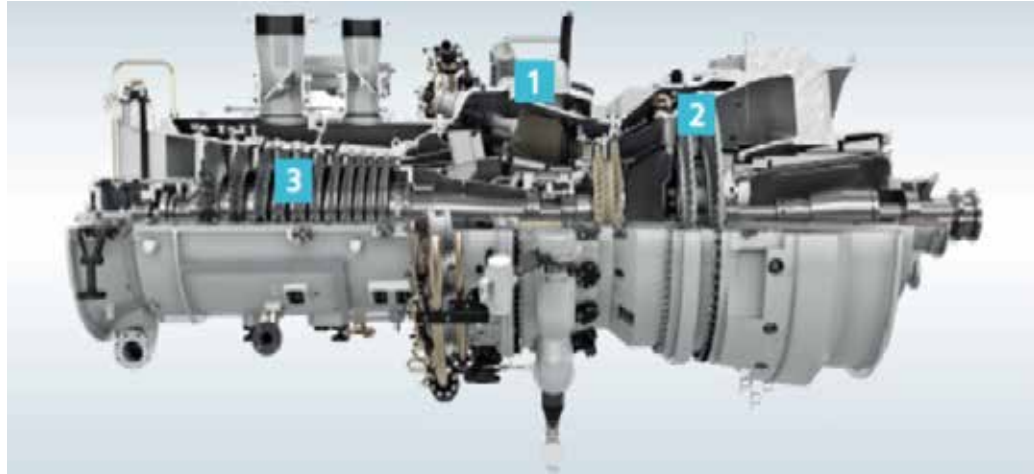


Figura 13. Componentes internos de turbina Siemens SGT-700
Fuente: Siemens

4.1.1.1. Sistema de combustión DEL

Todas las cámaras de combustión de turbinas de gas realizan la misma función: aumentan la temperatura del gas a alta presión. A su vez, la cámara de combustión tiene como misión transformar la energía química del combustible en calor, generando así un cambio de energía química a mecánica a través de la turbina, esto se logra elevando la temperatura y el volumen específico del flujo de aire que proviene del compresor, es muy importante mantener lo más cercano posible a constante la presión y la velocidad del flujo.

La cámara de combustión de turbina de gas utiliza muy poco de su aire (10%) en el proceso de combustión. El resto del aire se usa para enfriar y mezclar. Las nuevas cámaras de combustión también están circulando vapor con fines de enfriamiento. El aire del compresor debe difundirse antes de que ingrese al combustor.

En este orden de ideas para que la combustión tenga lugar totalmente dentro de la cámara de combustión, es necesario que todos los procesos se realicen con suficiente rapidez, ya que se tienen que efectuar en una corriente de aire a una velocidad determinada. Por esta razón, la combustión en estas cámaras sólo es posible cuando la velocidad de propagación de la llama sea del mismo orden que la velocidad de la corriente.

Es de relevancia mencionar que la velocidad del aire que sale del compresor es de aproximadamente 400–600 pies/s (122–183 m/s) y la velocidad en la cámara de combustión debe mantenerse por debajo de 50 pies/s (15,2 m/s) (ver anexo A). Incluso a estas velocidades bajas, se debe tener cuidado para evitar que la llama se transporte río abajo. Así mismo se debe comprender que el combustor es un calentador de aire de combustión directa en el que el combustible se quema casi estequiométricamente con un tercio o menos del aire de descarga del compresor. Los productos de combustión se mezclan con el aire restante para llegar a una temperatura adecuada a la entrada de la turbina.

Por otra parte, a pesar de existir muchas diferencias de diseño en las cámaras de combustión, todas las cámaras de combustión de turbinas de gas tienen tres características: (1) una zona de recirculación, (2) una zona de combustión (con una zona de recirculación, que se extiende a la región de dilución) y (3) una zona de dilución, como se ve en la Figura 14. El aire que ingresa a una cámara de combustión se divide para que el flujo se distribuya entre tres regiones principales: (1) Primario Zona, (2) Zona de dilución, y (3) Espacio anular entre el revestimiento y la carcasa (ver figura 14 y 15).

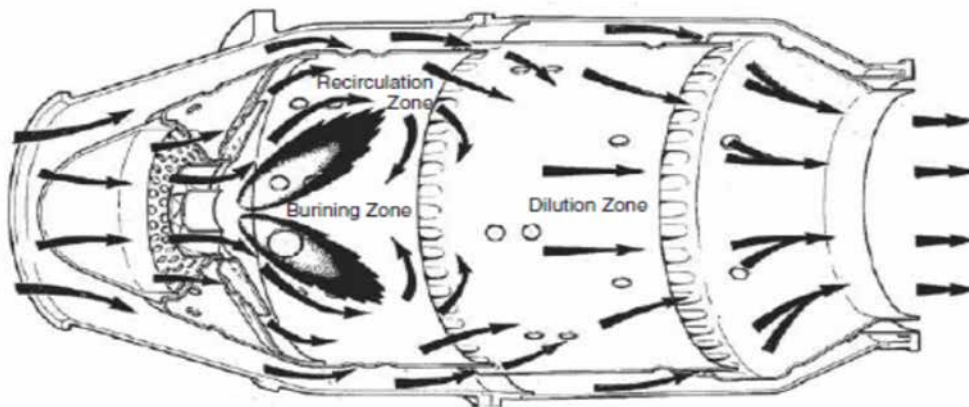


Figura 14. Cámara de combustión con flujo directo
Fuente: The Gas Turbine Engineering Handbook

La combustión en la cámara tiene lugar en la zona primaria. La combustión de gas natural es una reacción química que ocurre entre el carbono o hidrógeno y el oxígeno. El calor se desprende a medida que tiene lugar la reacción. Los productos de la combustión son dióxido de carbono y agua. La reacción es estequiométrica, lo que significa que las proporciones de los reactivos son tales que hay exactamente suficientes moléculas oxidantes para provocar una reacción completa a las formas moleculares estables en los productos.

El aire ingresa a la cámara de combustión en un flujo directo o flujo inverso. La mayoría de las unidades de tipo marco grande tienen flujo inverso. La función de la zona de recirculación es evaporar, quemar parcialmente y preparar el combustible para una combustión rápida dentro del resto de la zona de combustión. Idealmente, al final de la zona de combustión, todo el combustible debe quemarse para que la función de la zona de dilución sea únicamente mezclar el gas caliente con el aire de dilución. La mezcla que sale de la cámara debe tener una temperatura y distribución de velocidad aceptable para las paletas guía y la turbina.

Generalmente, la adición de aire de dilución es tan abrupta que, si la combustión no se completa al final de la zona de combustión, se produce un enfriamiento que impide su finalización. Sin embargo, existe evidencia con algunas cámaras de que, si la zona de combustión se desarrolla demasiado rápido, se produce cierta combustión dentro de la región de dilución. La figura 15 muestra la distribución del aire en las diversas regiones de la cámara de combustión.

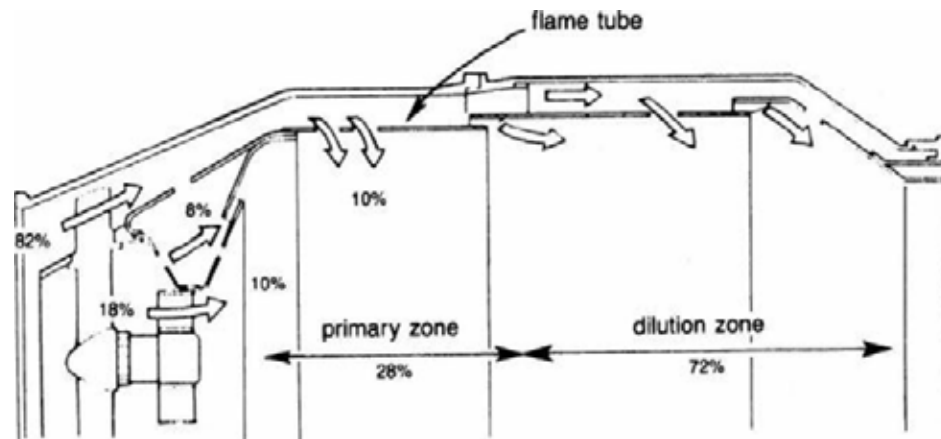


Figura 15. Distribución de aire en una cámara de combustión típica

Fuente: The Gas Turbine Engineering Handbook

Por otra parte, para el proceso de combustión se requiere de combustible, el equipo de estudio que se tiene posee un sistema moderno equipados con quemadores DEL como el que se aprecia en la figura 16, el cual les permite una amplia adaptabilidad a distintos tipos de combustibles (ver anexo B) pero, el gas natural es el combustible de elección donde sea que esté disponible debido a su combustión limpia y su precio competitivo.



Figura 16. Combustores con quemadores DEL

Fuente: Siemens

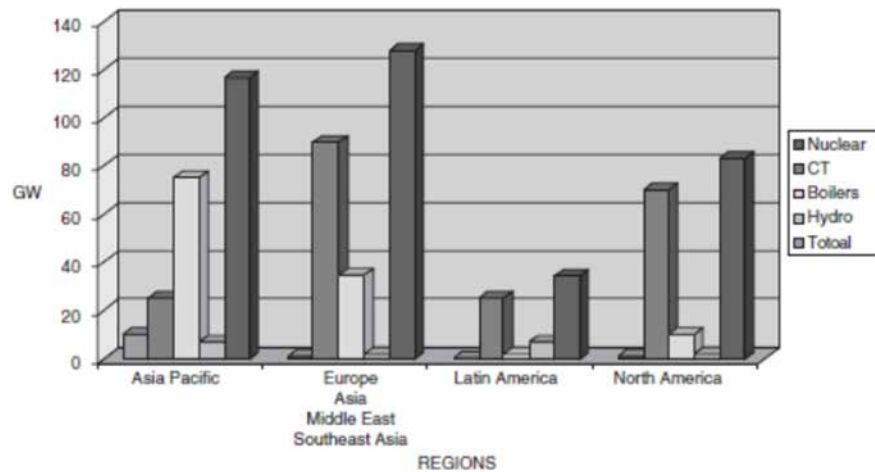


Figura 17. Tendencias tecnológicas indican que el gas natural es el combustible elegido

Fuente: The Gas Turbine Engineering Handbook

La Figura 17 muestra la preferencia del gas natural en todo el mundo. Esto es especialmente cierto en Europa, donde se espera que el 71% de la nueva energía sea alimentada por gas natural, América Latina, donde se espera que el 73% de la nueva energía sea alimentada por gas natural, y América del Norte, donde el 84% de la nueva energía se espera que sea alimentado por gas natural. Esto significa un crecimiento sustancial de las centrales eléctricas de ciclo combinado.

Así mismo se tienen que los principales óxidos de nitrógeno producidos en la combustión son NO, con el resto 10% como NO₂. Estos productos son muy preocupantes debido a su veneno, carácter y abundancia, especialmente en condiciones de carga completa. Por ello En 1977, la Agencia de Protección Ambiental (EPA) de los EE. UU. emitió normas propuestas que limitaban las emisiones de turbinas de gas nuevas, modificadas y reconstruidas a:

75 vppm NO_x con 15% de oxígeno (base seca)

150 vppm SO_x con 15% de oxígeno (base seca), controlado limitando el contenido de azufre en el combustible a menos de 0.8% en peso.

Dadas las condiciones antes expuestas ,con las cámaras de combustión DLE, el objetivo es que el equipo logre quemar la mayor parte del combustible muy pobre para evitar las zonas de alta temperatura de combustión que producen NOx y cumplir con las características que se exigen, así como seguir vigente en el ámbito de la innovación (ver figura 18). Por ende, las nuevas turbinas de gas utilizan cámaras de combustión de bajo NOx para reducir las emisiones de NOx, que de otro modo serían altas debido a la alta temperatura de combustión de aproximadamente 2300°F (1260°C). Esto le permite a la turbina Siemens SGT-700 con su sistema simple y robusto equipado con quemadores DLE que minimiza los óxidos de nitrógeno (NOx) en la cámara de combustión obtener beneficios asociados los cuales se señalan a continuación:

La reducción de emisiones aminora los costos para mantenerse actualizado y al mismo tiempo cumplir con los estándares de emisiones más estrictos en el futuro.

Las mejoras en la combustión añaden flexibilidad operacional y mantienen o incrementan la fiabilidad, disponibilidad y facilidad de mantenimiento.

Adaptabilidad para una amplia de combustibles, lo que proporciona mayor flexibilidad al momento de realizar operaciones en regiones aisladas donde no hay combustible.

Habilidad para usar combustibles más económicos.

Para tener un mejor entendimiento del trabajo que realizan los quemadores de tecnología de bajas emisiones seca (Dry Low Emission) se debe entender que las turbinas a gas Liberan Nox (Óxidos de nitrógeno) las cantidades generadas dependen de la temperatura de combustión. Si la temperatura de combustión es baja, entonces se pueden esperar menores emisiones. El combustor DLE funciona con un principio conocido como combustión premezclada magra esta tecnología seca de bajas emisiones se incorporó en las turbinas de gas para producir menores emisiones sin necesidad de vapor o agua para reducir la temperatura.

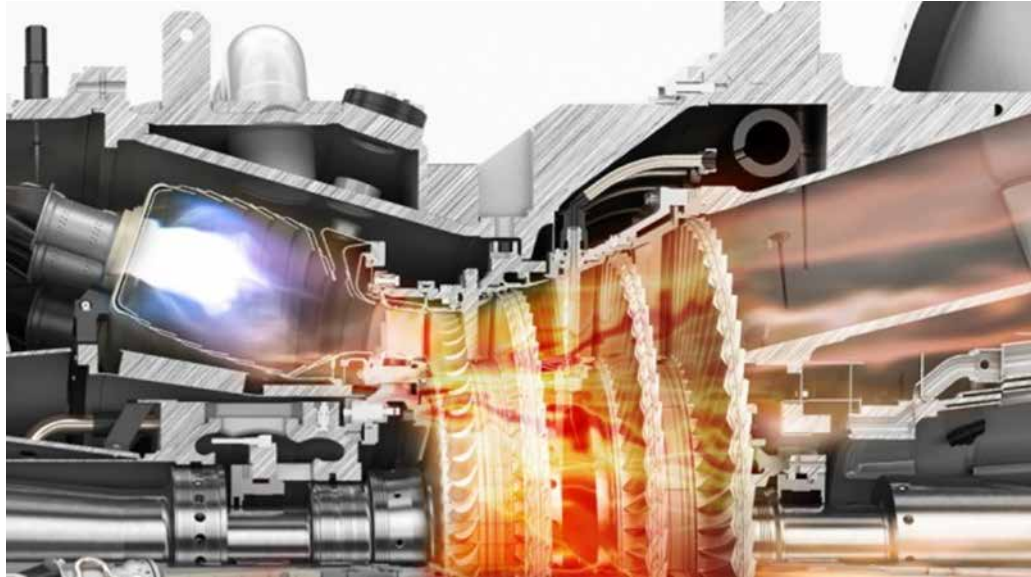


Figura 18. Combustión en turbina Siemens SGT-700

Fuente: Siemens

4.1.1.2. Turbina de Potencia

La turbina es el área donde tiene lugar la conversión de la energía contenida en los gases de combustión, en forma de presión y temperatura elevada (entalpía), a potencia mecánica (en forma de rotación de un eje) pero, una parte importante de esta potencia es absorbida directamente por el compresor. Por otra parte, hay dos tipos de turbinas siendo las de flujo axial las más empleadas en las turbinas de gas, habiéndose relegado las radiales a los sistemas de sobrealimentación en motores diesel y otros sistemas particulares de gas.

La turbina de flujo axial se utiliza en más del 95% de todas las aplicaciones, estas a su vez también están divididas en turbinas axiales de tipo impulso o reacción. La turbina de impulso tiene toda su caída de entalpía en la boquilla; por lo tanto, tiene una velocidad muy alta que ingresa al rotor. La turbina de reacción divide la caída de entalpía en la boquilla y el rotor.

Así mismo la turbina está formada por una serie de etapas, cada una de las cuales consta de una rejilla de álabes fijos (estator) y otra de álabes móviles (rodete o rotor). Los gases procedentes de la cámara de combustión circulan primero por los álabes fijos, donde la presión se transforma en velocidad debido a la sección convergente entre ellos. Al mismo tiempo, el flujo es desviado hacia los álabes del rodete o rotor, en los cuales se originan las fuerzas que provocan la rotación. Los álabes estacionarios están fijados a dos anillos concéntricos formando las llamadas toberas, de los cuales el exterior está fijo a la carcasa de la turbina y en ocasiones, es la misma carcasa.

Por su lado el rotor está formado por un disco móvil con álabes en su periferia. Debido a las elevadas temperaturas de los gases de escape es necesaria la refrigeración de los álabes de las turbinas, y para ello se redirecciona parte del aire tratado en el compresor y se dirige hacia los álabes saliendo al exterior por pequeños orificios practicados a lo largo de toda su superficie (ver figura 19).

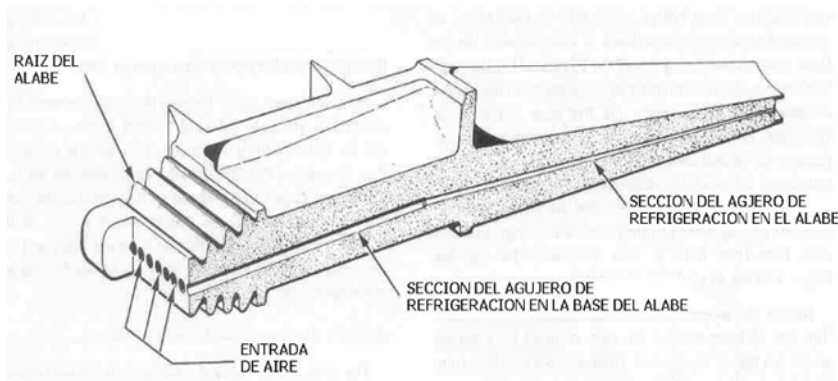


Figura 19. Detalles de los agujeros de refrigeración en los álabes.

Fuente: General Electric

Por otra parte, las altas temperaturas que ahora están disponibles en la sección de la turbina se deben a mejoras en la metalurgia de las palas en las turbinas. El desarrollo de palas solidificadas direccionalmente, así como las nuevas palas de cristal único, con los nuevos recubrimientos y los nuevos esquemas de enfriamiento, son responsables del aumento de las temperaturas de cocción. La relación de alta presión en el compresor también hace que el aire de refrigeración utilizado en las primeras etapas de la turbina esté muy caliente.

Así mismo el equipo de estudio posee una turbina de potencia que está equipada con cuchillas de perfil avanzado que mejoran el flujo de gas. La turbina de potencia de alta velocidad gratuita proporciona la transmisión directa de la tubería o el compresor de proceso, lo que elimina la necesidad de una caja de cambios (ver figura 20).



Figura 20. Turbina de potencia libre de dos etapas del modelo SGT-700
Fuente: Siemens.

4.1.1.3. Compresor

Un compresor es un dispositivo que presuriza un fluido de trabajo. Los tipos de compresores se dividen en tres categorías, como se muestra en la Figura 21. Los compresores de desplazamiento positivo se utilizan para bajo flujo y alta presión (cabeza), los compresores centrífugos son de flujo medio y cabeza media, y los compresores de flujo axial son de alto flujo y baja presión.

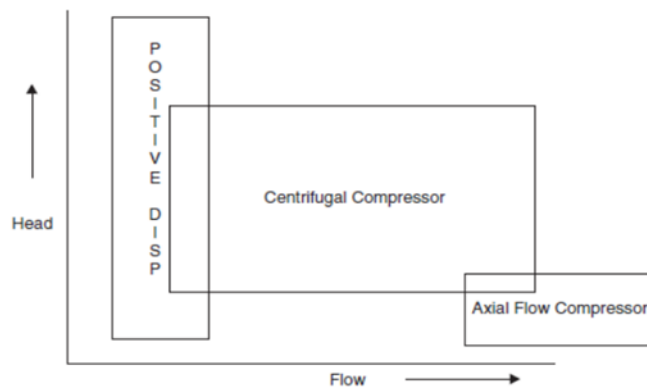


Figura 21. Características de rendimiento de diferentes tipos de compresores.

Fuente: The Gas Turbine Engineering Handbook.

Por esto se tiene que en las turbinas de gas se emplean los compresores de flujo centrífugo y de flujo axial, que son compresores de flujo continuo utilizados para comprimir el aire. Los compresores de desplazamiento positivo, como las unidades de engranajes, se utilizan para sistemas de lubricación en las turbinas de gas. Así mismo los compresores axiales y centrífugos se han clasificado en tres grupos: industrial, aeroespacial e investigación. Las turbinas de gas de la aeronave debido a sus consideraciones de relación empuje a peso tienen una carga muy alta para cada etapa del compresor. La relación de presión por cada etapa puede alcanzar hasta 1.4 por etapa.

En las turbinas de gas industriales, la carga por etapa es considerablemente menor y varía entre 1.05-1.3 por etapa. La eficiencia adiabática de los compresores también ha aumentado y se han logrado eficiencias en los años 80. De esta manera se debe comprender que la eficiencia del compresor es muy importante en el rendimiento general de la turbina de gas, ya que consume del 55 al 60% de la energía generada por la turbina de gas. De esta forma casi todas las turbinas de gas que producen más de 5 MW tienen compresores de flujo axial. Algunas turbinas de gas pequeñas emplean una combinación de un compresor axial seguido de una unidad centrífuga.

Por su parte un compresor de flujo axial comprime su fluido de trabajo acelerando primero el fluido y luego difundiéndolo para obtener un aumento de presión. El fluido es acelerado por una hilera de perfiles o palas giratorias (el rotor) y difundido por una hilera de palas estacionarias (el estator). La difusión en el estator convierte el aumento de velocidad obtenido en el rotor en un aumento de presión. Un rotor y un estator forman una etapa en un compresor.

Generalmente un compresor consta de múltiples etapas. Con frecuencia se usa una fila adicional de palas fijas (paletas de guía de entrada) en la entrada del compresor para garantizar que el aire ingrese a los rotores de la primera etapa en el ángulo deseado. Además de los estatores, un difusor adicional en la salida del compresor difunde aún más el fluido y controla su velocidad al entrar en las cámaras de combustión.

Por ende, hay que comprender que, en un compresor de flujo axial, el aire pasa de una etapa a la siguiente y cada etapa aumenta ligeramente la presión. Al producir aumentos de baja presión del orden de 1.1: 1–1.4: 1, se pueden obtener eficiencias muy altas. De esta forma el uso de múltiples etapas permite que la presión general aumente hasta 40: 1. La regla general para un compresor de turbina de gas de etapas múltiples sería que el aumento de energía por etapa sería constante en lugar del aumento de presión por etapa.

De esta manera el modelo de estudio SGT-700 que es una evolución de su antecesor el SGT-600, posee un compresor transónico de flujo axial de 11 etapas que incorpora la última aerodinámica, con paletas guía variables de acero inoxidable y de dos etapas para una operatividad robusta y un rendimiento optimizado en una amplia variedad de condiciones de funcionamiento, el mismo tiene un flujo de aire aumentado desde 80 kg/s hasta 91 kg/s al extender el perfil de perfilado del compresor e introducir una etapa de compresor adicional.

Así mismo los compresores siemens están diseñados para funcionar desde procesos estándar hasta aplicaciones de alta presión, los compresores de un solo eje son la solución ideal para una amplia gama de industrias y aplicaciones de procesos. Están diseñados para las especificaciones del cliente y las normas API 617 (ver figura 22).



Figura 22. Compresor axial de once etapas del modelo SGT-700
Fuente: Siemens

4.1.1.4. Sistema de entrada de aire y salida de gases

La sección de entrada de aire del equipo de estudio tiene como función principal dirigir el aire uniformemente hacia el compresor, además en esta sección se encuentra el grupo del cojinete N°1, los álabes guía de entrada de aire al compresor, los cuales dependiendo de su posición regulan el flujo de aire que va hacia el compresor y los sellos de aire de baja presión así mismo este diseño en forma de caracol permite que el aire siempre ingrese en forma axial al compresor manteniendo su eficiencia (ver figura 23 y 24).

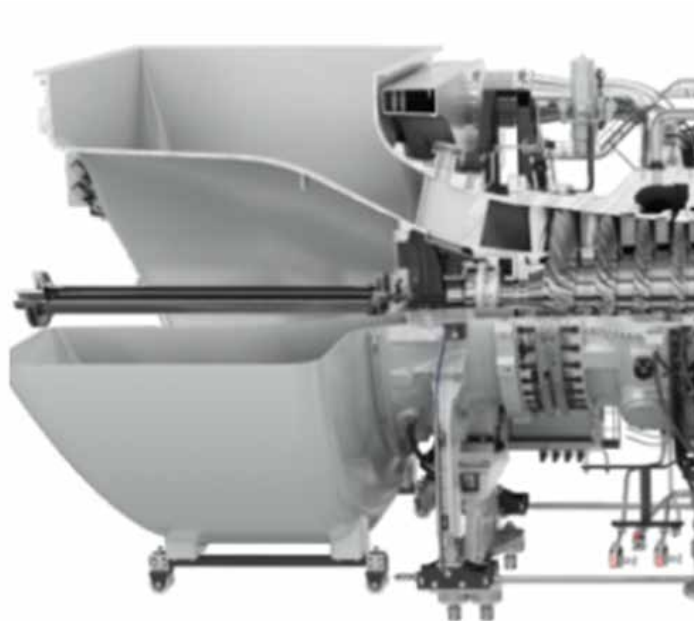


Figura 23. Sección de entrada de aire al compresor de turbina Siemens
Fuente: Siemens

Sección de entrada de aire



Figura 24. Sección de entrada de aire al compresor de turbina SGT-700
Fuente: Nuñez (2020)

Por otra parte, la sección de escape es la porción de la turbina en donde los gases usados para generar la potencia, son evacuados a través de una chimenea a la atmósfera, o a otro equipo-accesorio dependiendo de la aplicación de la turbina. El sistema de escape está formado por el plenum de escape, el ducto de transición, las juntas de expansión y la chimenea. Está diseñado acústica y dinámicamente para atenuar los niveles de ruido y dispersar los gases de escape (ver figura 25).



Figura 25. Sección de salida de gases de turbina SGT-700
Fuente: Siemens

4.1.2. Descripción de funcionamiento de la turbina en condiciones ideales y adversas

El funcionamiento o performance de las turbinas a gas es algo variable que depende directamente de una gran variedad de factores como la temperatura del aire exterior, la humedad relativa y la presión. De igual manera los fabricantes están en la obligación de entregar especificaciones de funcionamiento en condiciones ideales que se obtienen por la aplicación del examen de rendimiento que señalan las normas ASME (American Society of Mechanical Engineers) y API (American Petroleum Institute).

4.1.2.1. Funcionamiento de la turbina en condiciones ideales

Las turbinas de gas deben cumplir con los códigos de prueba de rendimiento de la Sociedad Americana de Ingenieros Mecánicos (ASME) que se han escrito para garantizar que las pruebas se realicen de una manera que garantice que todas las turbinas se prueben bajo el mismo conjunto de reglas y condiciones para garantizar que los resultados de la prueba se puedan comparar en una manera juiciosa. La fiabilidad de las turbinas depende de los códigos mecánicos que rigen el diseño de muchas turbinas de gas. Estos estándares y códigos mecánicos que han sido escritos tanto son una ayuda para especificar y seleccionar equipos.

La intención de estas especificaciones es facilitar el desarrollo de equipos de alta calidad con un alto grado de seguridad y estandarización. Así mismo, se tiene la norma ASME Basic Gas Turbines B133.2 Publicado: 1977 (ver anexo B) que presenta y describe características que el usuario debe conocer para seleccionar una turbina de gas que produzca un rendimiento, disponibilidad y confiabilidad satisfactorios. El estándar se limita a una consideración de la turbina de gas básica que incluye el compresor, el sistema de combustión y la turbina.

De esta forma el equipo de estudio cumple las normas y el fabricante ofrece una ficha técnica que se puede ver en el anexo C donde indica el rendimiento del modelo SGT-700 en un ciclo de generación de energía simple el cual indica los parámetros de un funcionamiento ideal, los cuales se presentan a continuación:

Potencia de salida: 32 MW

Combustible: Gas natural, combustible líquido y doble combustible

Frecuencia : 50/60 Hz

Eficiencia bruta: 37,2%

Velocidad de calentamiento: 9675 KJ/KWh

Velocidad de la turbina: 6500 rpm

Proporción de presión: 18,7: 1

Flujo de masa de escape: 95 Kg/s

Temperatura de escape: 533 °C (991 °F)

4.1.2.2. Funcionamiento de la turbina en condiciones adversas

Por otra parte, aunque el funcionamiento ideal de la turbina en un ciclo de generación simple ofrece una eficiencia de 37,2% esto puede variar debido a las condiciones antes mencionadas siendo una de las que posee mayor relevancia la temperatura del aire que ingresa a la temperatura (ver figura 26). Este puede ocasionar caídas en el rendimiento del equipo de entre 2 y 3% además de que puede ocasionar fallas en su funcionamiento y posibilidades de sobrecalentamiento.

Así mismo las turbinas de gas en funcionamiento adverso pueden no solo sufrir caídas de rendimiento, también pueden presentar daños en sus componentes interno debido al trabajo forzado en el que los equipos se pueden estar desempeñando debido a las condiciones. Esto puede ocasionar fallas fatales que significarían la pérdida total del equipo o en algunos casos no tan graves pérdidas de componentes que paralizarían la producción de energía lo cual a su vez se traduce en pérdidas monetarias.

De igual forma, el funcionamiento de las turbinas en condiciones adversas es difícil de predecir o estudiar ya que actualmente los fabricantes de estos equipos viven en una búsqueda constante de mejoras con el ideal de cumplir con el propósito de mejorar los equipos constantemente para minimizar sus fallas y aumentar su rendimiento.

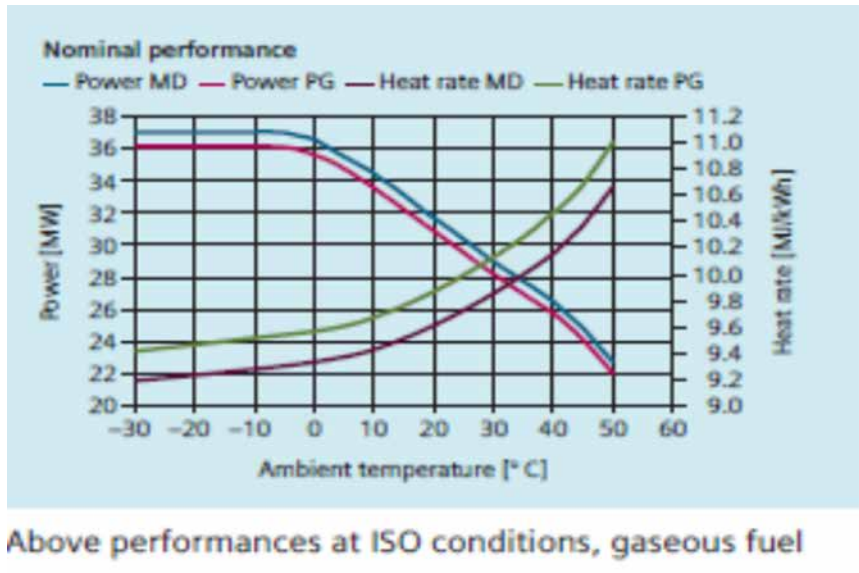


Figura 26. Gráfica de rendimiento nominal del modelo SGT-700
Fuente: Siemens

4.2. Señalamiento de los efectos que generan las variaciones de temperatura del aire que ingresa al compresor y como afectan el rendimiento de la turbina.

Las turbinas de gas están diseñadas para generar cantidades importantes de potencia que permitan producir energía eléctrica. Para cumplir con este propósito, los equipos deben operar con bajas temperaturas del aire de entrada para de esta forma tener un rendimiento ideal, así como ingresar un aire muy limpio para lograr una combustión eficiente.

Sin embargo, la realidad como ocurre con cualquier maquinaria dista de lo que se requiere del diseño ideal. Estos equipos en incontables ocasiones deben operar en condiciones adversas que van desde muy alta o muy bajas temperaturas, humedades relativas ambientales altas, aire contaminado y demás situaciones no deseadas. Al operar las turbinas en estas condiciones pueden ocasionarse fallos en su funcionamiento y a su vez ocasionar daños a los componentes internos de la misma, de esta forma a continuación se señalarán los efectos y las fallas que generan en las turbinas a gas y como afectan a su rendimiento.

4.2.1 Efectos y fallas ocasionados debido a las variaciones de temperatura y condiciones del aire de entrada.

Las turbinas de gas, son operadas prácticamente en todos los tipos de ambientes y lugares del mundo, en donde se enfrentan a climas tropicales, desiertos o zonas polares, es por esto que los equipos deben poseer una gran versatilidad de funcionamiento. Por otra parte, estos cambios drásticos de condiciones ambientales que soporta la turbina, pueden generar daños y efectos en los componentes de la misma.

Así mismo el aire se puede convertir en un enemigo para las turbinas cuando factores como las altas temperaturas, los contaminantes o partículas de diferentes tamaños se encuentran en este, así como altas humedades o la cantidad de vapor de agua, este último además de significar una disminución de la potencia generada, puede llegar a saturarse y transformarse en partículas de hielo que de forma directa afectan a los componentes internos de la turbina. De esta forma las fallas en las turbinas se pueden clasificar en tres categorías: fallas mecánicas, químicas y térmicas.

En este sentido, el compresor es el componente más susceptible a fallas mecánicas debido a la corrosión, erosión o ensuciamiento producto de los contaminantes del aire de entrada. Por otra parte, los daños químicos se presentan producto de la condensación del aire o por causa de la corrosión generada por las condiciones externas en humedades elevadas o ambientes marinos, y las fallas térmicas son primordialmente producto de la oxidación de los componentes.

4.2.1.1. Corrosión

La corrosión es probablemente una de las fallas más comunes en cualquier maquinaria o herramienta, ya que cualquier material busca regresar a su estado natural. Así mismo tenemos que en zonas tropicales o marinas como las que presentan las turbinas empleadas para el ámbito de la industria petrolera en las que la temperatura mínima del ambiente es de 20°C, la máxima de 30°C y la media de 27°C, además de esto la humedad o sal presente en el ambiente genera un desgaste continuo a los materiales de las turbinas.

De esta manera la disminución de la potencia a la salida del motor y el aumento del consumo de combustible ponen de manifiesto la degradación del funcionamiento de la turbina, esta falla la cual genera grandes pérdidas económicas y de igual forma puede generar debilidad en la estructura de los álabes que podría ocasionar una falla catastrófica en la turbina (ver figura 27).



Figura 27. Corrosión en turbina de gas.

Fuente: Sulzer (2016)

4.2.1.2 Erosión

Las fallas de erosión en las turbinas de gas tienen lugar principalmente en los álabes del compresor, debido a que es la primera instancia donde entra el aire del ambiente. Si este aire está contaminado con partículas abrasivas, como por ejemplo arena, en un breve período de tiempo estas partículas junto a la temperatura que se genera en el funcionamiento del compresor producirán daños importantes en la turbina ya que impactan de manera directa sobre la superficie de los componentes de la misma.

Así mismo, M. Wilcox (2018) explica que estas partículas de pequeño tamaño al chocar con el metal, desprenden pequeñas cantidades de metal de la superficie, que causan un cambio en la geometría de la misma, que luego puede producir desviaciones del flujo de aire, alteraciones en los acabados, y reducción del área de entrada en zonas con altos grados de carga (ver figura 28).



Figura 28. Daños por erosión de una turbina de gas
Fuente: Field Systems (2006).

En este sentido, la falla por erosión en los alabes del compresor es de gran riesgo debido a que este es sometido a esfuerzos y cargas térmicas de gran magnitud, mientras gira a altas velocidades. Esto se traduce en que los pequeños defectos por erosión, se puedan convertir en la rotura de un alabe lo cual generaría una falla destructiva en el interior de la turbina.

De esta forma, Engmark (2015) señala que, por este motivo se han diseñado a lo largo de los años gran cantidad de filtros (ver figura 29), donde se previenen precisamente la entrada de partículas de cierto tamaño que pueden ser muy peligrosas. Según la experiencia, si son mayores de 20 μm , serán perjudiciales para el equipo y además si son mayores de 30 μm también el peso de dichas partículas jugará un papel muy importante en los daños que puedan ocasionar.



Figura 29. Sistema de filtración del aire de entrada que ofrece el paquete de generación de energía de una turbina SGT-700.
Fuente: Siemens

4.2.1.3. Ensuciamiento

En una gran cantidad de los casos, el deterioro en el funcionamiento de la turbina de gas principal y más común mecanismo es el fouling o ensuciamiento del compresor. No obstante, el ensuciamiento puede de igual manera afectar a la turbina. Si el combustible empleado no es un combustible limpio, y contiene residuos o aditivos, el fouling en la turbina puede ser predominante e incluso más crítico.

Así mismo, esta falla en el compresor se ocasiona por la ingestión de partículas en suspensión que se encuentran mezcladas con el aire ambiente. Éstas se adhieren a la superficie de los álabes, al tambor y carcasa, afectando al comportamiento del compresor (ver figura 30). En concreto, hasta 2/3 de la potencial total generada por la turbina es consumida por el compresor, sus pérdidas son el doble que las que puedan ocasionarse en otras partes del motor, pudiendo llegar a ser responsable del 70-85% del total de pérdidas acumuladas durante el funcionamiento. Pérdidas de potencia de salida entre el 2% (bajo condiciones favorables) y el 15-20% (bajo condiciones adversas) se han experimentado en estudios de plantas en operación (Minco, Meher-Homji, 2009).

Por otra parte, aunque esta falla no se genera por altas temperaturas en el ambiente si se puede ver agravada por temperaturas bajo cero, ya que en condiciones árticas el principal culpable de ensuciamiento es la nieve y los cristales de hielo que se depositan en la entrada de aire de la turbina que dificultan el funcionamiento de esta. De esta manera, se señala que es una falla que afecta gravemente el rendimiento del compresor y la turbina.

La Figura 31 muestra el cambio en el rendimiento del compresor y en la tasa de calor a lo largo del tiempo debido al fouling en una turbina de 40 MW. De esta manera se señala como dato representativo, una turbina de gas promedio (46,5 MW) con un ensuciamiento normal en la que sólo se reduce un 3% la producción de energía y se incrementa en un 1% el consumo específico de calor, puede sufrir una pérdida de rendimiento que suponga más de 500.000 \$ cada año.



Figura 30. Ensuciamiento en compresor de turbina de gas.
Fuente: Turbotec

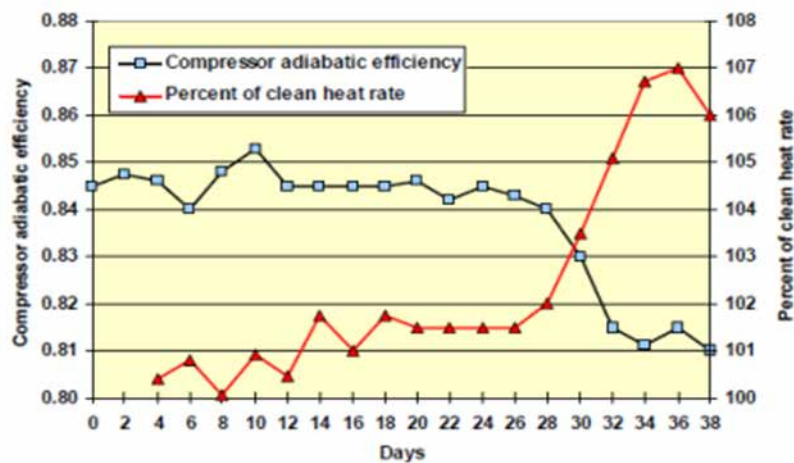


Figura 31. Efecto del ensuciamiento en una turbina de gas
Fuente: Minco

4.2.1.4. Formación de hielo

Una de las fallas más peligrosas y agresivas que pueden ocurrir en las turbinas de gas es la formación de hielo en la entrada de aire del equipo, este efecto tiene lugar en condiciones con bajas temperaturas y elevadas humedades relativas, así mismo también se puede dar lugar a este inconveniente cuando las temperaturas se encuentran trabajando cerca del punto de rocío, generado así que el aire se sature y se transforme en partículas de hielo (ver figura 32 y 33).

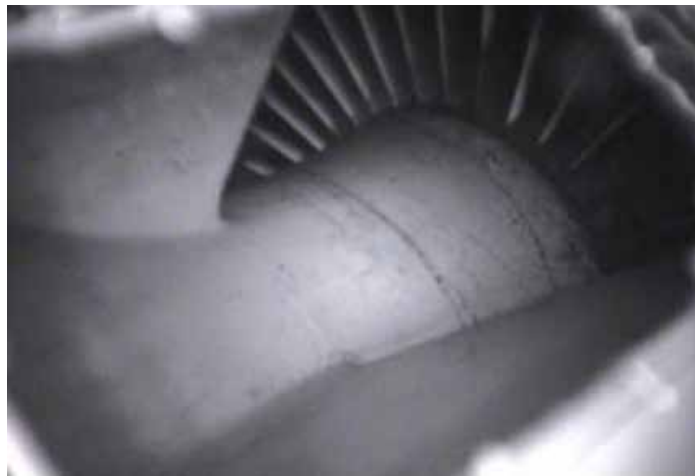


Figura 32. Formación de hielo en las paredes internas del compresor

Fuente: Mass & McCown (2007).

Así mismo, Sammak (2016) describe este fenómeno y explica que, en estas condiciones atmosféricas ocurre un fenómeno particular donde el aire se acelera en una magnitud tan grande justo en el punto de entrada de los alabes del compresor, pasando desde una baja velocidad a una velocidad muy elevada, lo que causa que exista una depresión estática de temperatura que puede ser de unos 15°C o incluso más dependiendo de la velocidad del aire.

De esta manera al formarse hielo en la entrada de la turbina se producen dos consecuencias de gran importancia. La primera es que este se va adhiriendo a las paredes internas formando una capa de hielo, esto trae como consecuencia que se reduzca el área de entrada del flujo masico de aire y generado así una pérdida considerable de potencia y eficiencia en el equipo. Por otra parte, la segunda

consecuencia tiene lugar cuando la formación de hielo puede transformar los pequeños cristales en partículas muy peligrosas que en conjunto con las altas velocidades y vibraciones de trabajo de la turbina pueden chocar con los álabes del compresor como una especie de balas a gran velocidad.



Figura 33. Formación de hielo en los álabes del compresor

Fuente: Nvuti.

4.3. Análisis de los efectos que suceden en el proceso de generación de energía de una turbina a gas con diferentes cambios de temperatura en el aire de succión del compresor.

En esta fase, se analizan como los efectos señalados anteriormente generan variaciones en el proceso de generación de energía de una turbina de gas de ciclo simple. De esta forma se muestran estadísticas que indican el rendimiento de turbinas de gas en el proceso de generación de energía que servirán de referencia para la simulación.

4.3.1. Análisis del proceso de producción de energía a temperaturas bajas.

En esta situación las prestaciones de la turbina mejoran obteniendo mayor potencia, para tener una ilustración detallada se utiliza como ejemplo el modelo de una turbina Siemens SGT6-5000F (ver figura 34), la cual ofrece una generación de energía económica con arranque rápido y cambios de carga rápidos para la carga máxima, la flota de estas turbinas opera en todo mundo según lo indicado por Siemens con una fiabilidad del 99% (ver figura 35).



Figura 34. Turbina SGT6-5000F
Fuente: Siemens



Figura 35. Referencias del SGT6-5000F.

Fuente: Siemens

Así mismo, este equipo como los otros fabricados por Siemens posee una ficha técnica (ver anexo D) según lo indican las normas en la cual se detallan datos de interés para el comprador que le permitirán seleccionar o no la turbina dependiendo su aplicación en la industria y la necesidad que desee satisfacer el usuario. De esta forma se presentan los siguientes datos:

Potencia de salida: 215 MW

Combustible: Gas natural, GNL, gases ácidos, GLP, aceite destilado, biodiesel, aceite crudo Arabian Super Light (ASL), aceite crudo Arabian Extra Light (AXL), queroseno, combustible para aviones, condensado.

Otros combustibles bajo petición.

Frecuencia: 60 Hz

Eficiencia bruta: 39,5%

Tasa de calor: 9.114 kJ/kWh (8.638 Btu/kWh)

Velocidad de la turbina: 3600 rpm

Relación de presión: 17:1

Flujo de masa de escape: 478 kg/s (1.054 lb/s)

Temperatura de escape: 612 °C (1.134 °F)

De esta manera, el funcionamiento del equipo en un rango de temperatura del aire que va de 0°C a 10°C se traduce como lo señala Duque A (2016) en su investigación en una mayor potencia que alcanza valores de 154 MW, así mismo se genera un mayor rendimiento con un 33,2% el cual se aleja de la eficiencia bruta que proporciona Siemens en su ficha técnica. Por otra parte, con estos datos se puede apreciar que existe una diferencia entre los datos ideales ofrecidos por el fabricante y los datos reales obtenidos de un equipo en funcionamiento.

Así mismo se debe añadir otro factor que influye en la generación de energía como la humedad relativa, la cual es inversamente proporcional a la temperatura, esto genera que mientras mayor sea la humedad relativa del aire que ingresa al compresor la turbina tendrá un mayor consumo de combustible de gas natural (ver figura 36) lo cual significa un mayor gasto económico para la producción de energía.

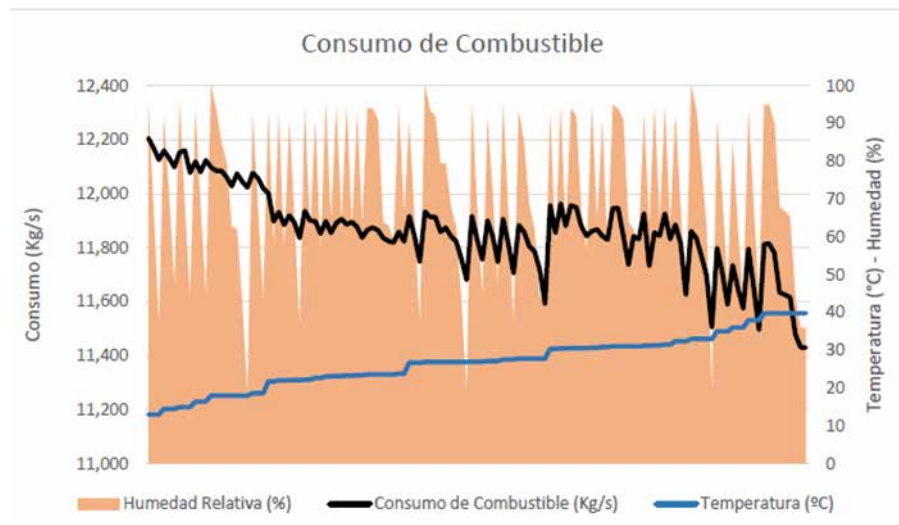


Figura 36. Consumo de combustible de la turbina SGT6-5000F con temperaturas y humedades variadas.

Fuente: Duque. A (2016)

De igual forma bajo estas condiciones la turbina es propensa a verse afectada por dos de los posibles efectos mencionados anteriormente como lo son la generación de hielo justo en la entrada de los alabes del compresor o ensuciamiento en el compresor, el primer efecto se puede propiciar debido a temperaturas bajas y elevadas humedades y el segundo efecto se puede presentar en situaciones de trabajo de temperatura extremadamente bajas o bajo cero en las cuales esté presente la nieve en el aire del ambiente.

4.3.2. Análisis del proceso de producción de energía a temperaturas ideales

En esta situación las condiciones de referencia normalizadas que los fabricantes emplean se basan en el uso de la norma ISO 13443 (ver anexo E) la cual establece una temperatura ideal de 15°C y una presión de una atmósfera. Estas condiciones normalizadas de temperatura y presión son necesarias para definir las condiciones de referencia estándar de los equipos. Es por ello que para el análisis del proceso ideal se emplearán únicamente los datos de Siemens que al ser datos ideales se debe tener en cuenta que estos en la práctica real nunca se cumplen debido a que siempre existen factores externos que afectan el rendimiento de los equipos.

Así mismo para dar referencia al funcionamiento ideal se empleará el ejemplo del modelo SGT-750 de Siemens (ver figura 37) una turbina de gas industrial fabricada con un rendimiento de primera clase para la industria del petróleo y el gas, la cual es la versión mejorada del modelo de estudio empleado en la presente investigación el SGT-700.



Figura 37. Turbina SGT-750

Fuente: Siemens

Por otra parte, se tiene que el SGT-750 alcanza una eficiencia ideal del 40,3% en un ciclo simple de generación de energía el cual es indicado por Siemens en su ficha técnica (ver anexo F). De igual manera, como con sus otros equipos Siemens ofrece una ficha técnica de datos ideales bajo condiciones óptimas ISO del rendimiento de la turbina en un ciclo simple de generación de energía los cuales serán indicados a continuación:

Potencia de salida: 39,8 MW

Combustible: Gas natural, combustible líquido , combustible dual.

Frecuencia 50/60 Hz

Eficiencia bruta: 40,3%

Tasa de calor: 8.922 kJ/kWh

Velocidad de la turbina: 6.100 rpm

Relación de presión: 24,3 : 1

Flujo de masa de escape: 115,4 kg/s

Temperatura de escape 468 °C (875 °F)

Así mismo, se debe señalar que, aunque el fabricante ofrece datos ideales que son prácticamente irrepetibles en cualquier ámbito de trabajo real también ofrece datos del rendimiento dependiendo de la temperatura del aire que se encuentra en el ambiente lo cual ofrece una realidad más cercana al trabajo de generación de energía en la industria (ver figura 38). Por otra parte, se debe entender que bajo estándares ideales la turbina tendrá el máximo rendimiento posible y las únicas fallas que se podría presentar es por falta de mantenimiento del equipo o fallas del diseño de fábrica.

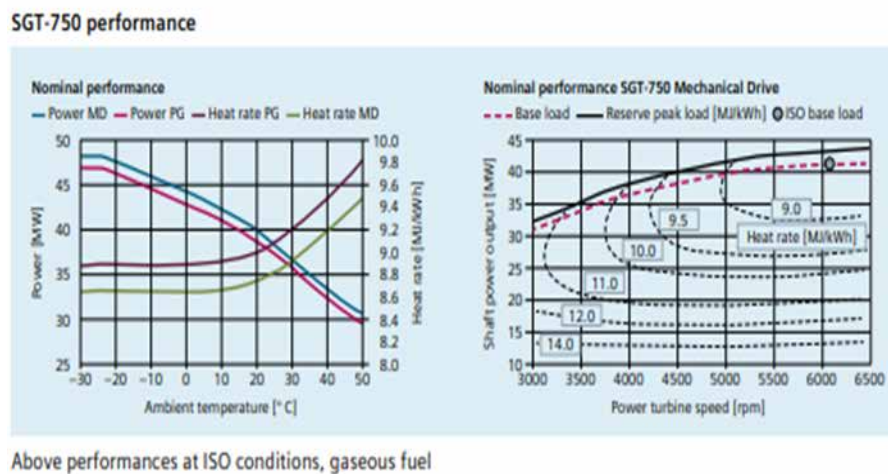


Figura 38. Rendimiento de una turbina SGT-750

Fuente: Siemens

4.3.3. Análisis del proceso de producción de energía a temperaturas elevadas

En esta situación las turbinas tienden a tener un rendimiento menor al esperado o distinto del para el que fueron diseñadas, esto se debe a que las condiciones de temperaturas elevadas difieren de las condiciones a temperaturas bajas en la cuales anteriormente fue analizado que a menor temperatura un gradiente mayor permite al compresor realizar una mejor compresión del aire y alcanzar un mejor rendimiento, por el contrario a temperaturas elevadas el compresor ve afectada su capacidad al realizar su tarea de comprimir el aire.

Así mismo, para obtener un ejemplo de esto se procedió a analizar el comportamiento de la SGT6-5000F mientras se genera la producción de energía a temperaturas elevadas. Por otra parte, con lo antes mencionado en el análisis de temperaturas bajas se podrá realizar una comparación de su trabajo a temperaturas bajas respecto a las elevadas y verificar como este fenómeno de la variación de temperatura afecta las prestaciones de la turbina.

De esta manera al analizar la investigación de Duque. A (2016) el funcionamiento de una turbina igual a la empleada para el análisis en bajas temperaturas arroja como resultado que a una temperatura mayor de aproximadamente 40° en el aire que ingresa al compresor la turbina ve afectadas sus prestaciones con un valor significativo al reducir su rendimiento en 1,6% respecto a la temperatura más baja empleada en el estudio (ver figura 39 y 40).

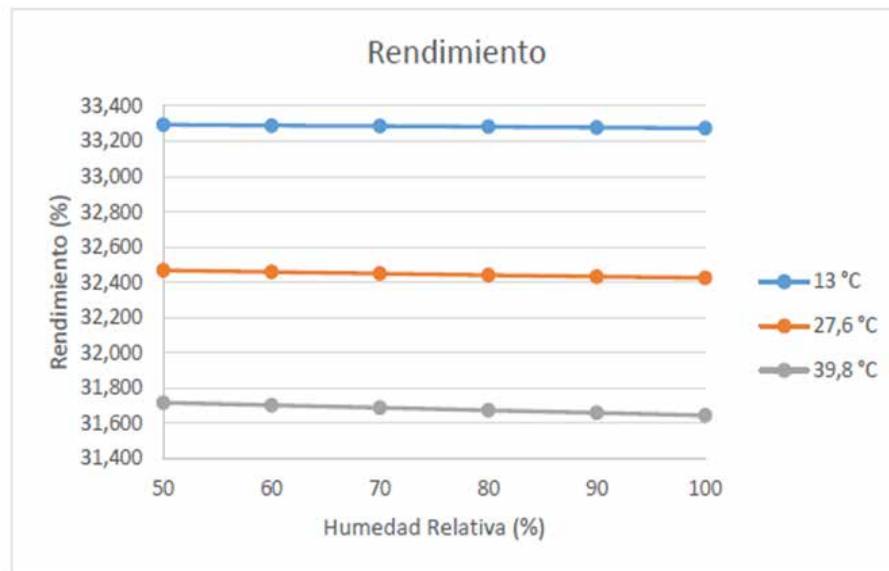


Figura 39. Rendimiento de una turbina SGT6-5000F con variación en la temperatura del aire que ingresa al compresor

Fuente: Duque A (2016)

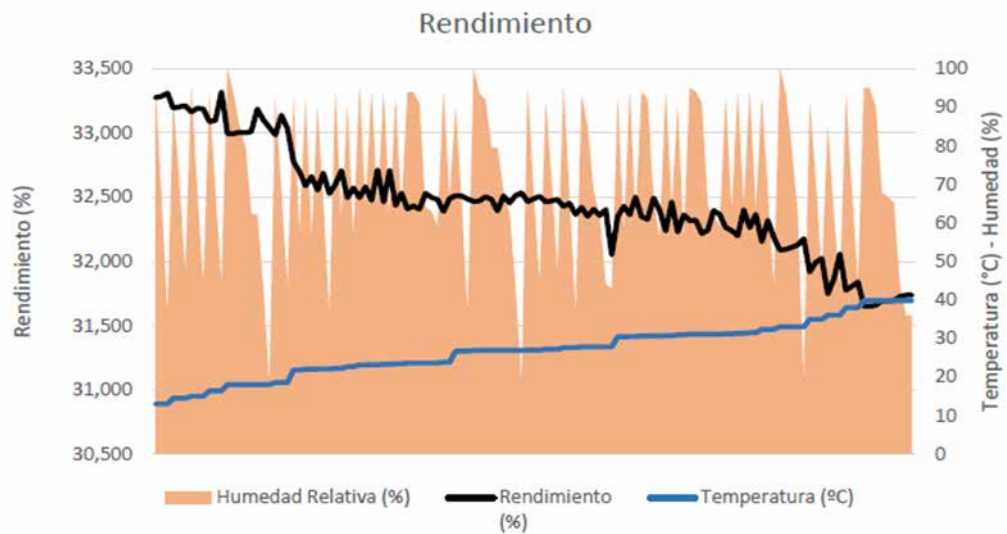


Figura 40. Rendimiento de una turbina SGT6-5000F respecto a la humedad del ambiente.

Fuente: Duque A (2016)

De esta manera, se ve reflejado que mientras mayor sea la temperatura del aire que ingresa del ambiente al compresor de la turbina, esta perderá también efectividad en su rendimiento como de igual forma capacidad de generar potencia (ver figura 41 y 42). Por otra parte, el factor de la humedad relativa en el ambiente en combinación con altas temperaturas afecta en el rendimiento de la turbina, pero de manera compensatoria, esto se debe a que como fue descrito anteriormente mientras mayor sea la humedad relativa esta ayuda de una pequeña forma al rendimiento de la turbina.

Así mismo, anteriormente fue descrito que mientras sea mayor la humedad relativa del ambiente el equipo requerirá de un consumo mayor de gas natural combustible el cual va acompañado de un incremento en el costo de producción de la energía eléctrica, en el caso del estudio realizado por Duque se aprecia que esto se cumple pero, de igual manera mientras mayor es la temperatura menor es el consumo de combustible aunque esto puede variar según las condiciones del lugar donde desempeñe su trabajo la turbina.

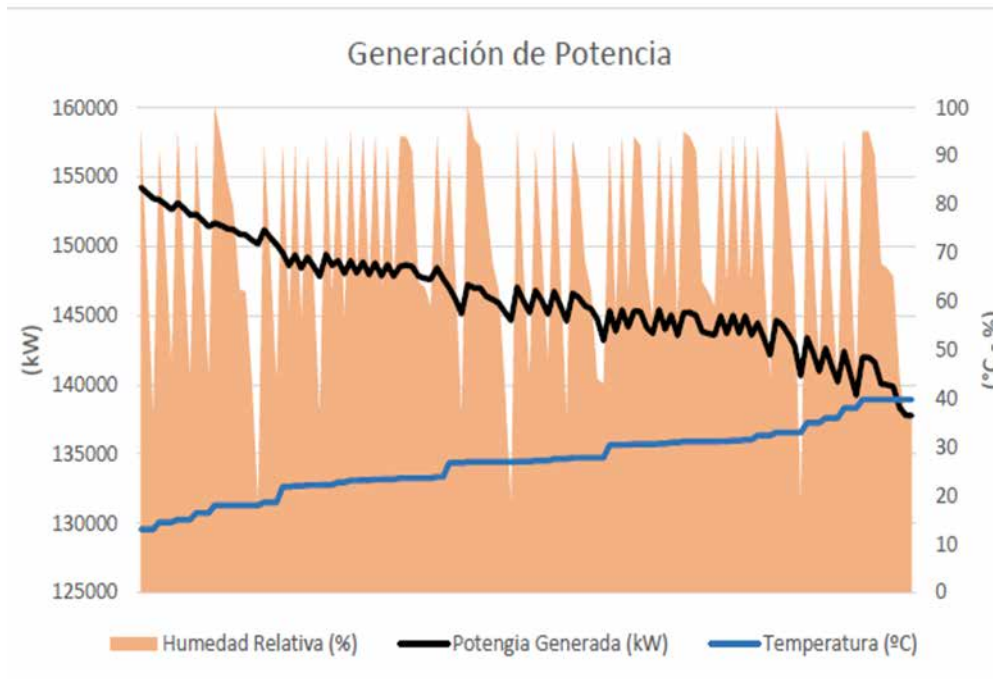


Figura 41. Generación de potencia de una turbina SGT6-5000F respecto a la humedad del ambiente.

Fuente: Duque A (2016)

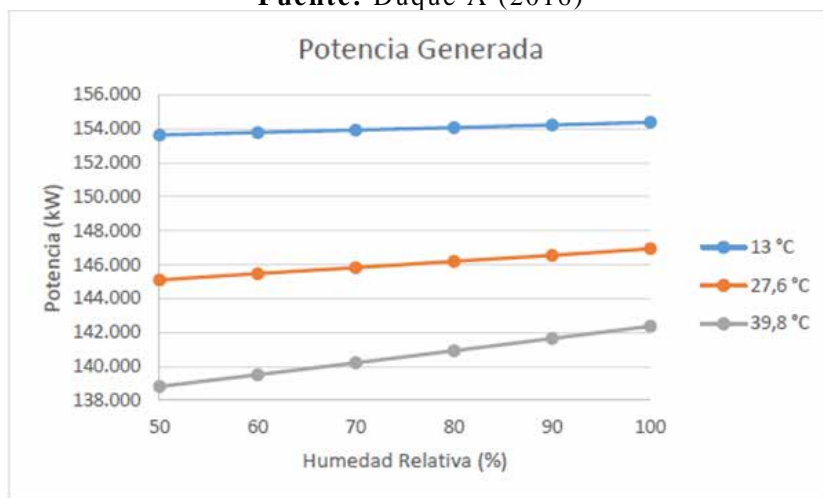


Figura 42. Generación de potencia de una turbina SGT6-5000F con variación en la temperatura del aire que ingresa al compresor.

Fuente: Duque A (2016)

Por otra parte, bajo estas condiciones la turbina se ve expuesta a posibles efectos como la corrosión en los alabes debido a las temperaturas de trabajo elevadas, así como consecuencias ante la humedad relativa de esta ser alta, así mismo se puede presentar la erosión en los alabes del compresor que es uno de los efectos más comunes consecuencia de las altas temperaturas y el flujo de aire que ingresa en la turbina. De esta manera, siendo tomadas en cuentas las consideraciones anteriores es de importancia indicar que estos estudios pueden variar de manera muy significativa dependiendo de las condiciones de trabajo del equipo, ya que la realidad del trabajo de la turbina se aleja holgadamente de las prestaciones ideales que ofrece su fabricante en las fichas técnicas o folletos del equipo.

4.4. Simulación de los efectos generados por variaciones de temperatura en la entrada de aire al compresor de una turbina a gas Siemens.

La finalidad de la presente investigación fue lograr visualizar como afecta la temperatura del aire de entrada al compresor de una turbina de gas Siemens, para cumplir con esto se realizó la simulación de un compresor axial de una turbina Siemens modelo SGT-700. De esta forma para obtener el resultado más cercano a la realidad se procedió a buscar en la librería de diseños 3D llamada Grabcad Community, el diseño de este donde se consiguió una pieza diseñada por Rainer Rösch y seguidamente se descargó, para luego introducir el diseño al software de diseño asistido por computadora Inventor 2021, donde se realizan las operaciones requeridas y así lograr el modelado en 3D deseado para el estudio (ver figura 43). Por ende, se empleó para la simulación tres temperaturas de aire distintas en la entrada del compresor, para ser comparadas entre sí.

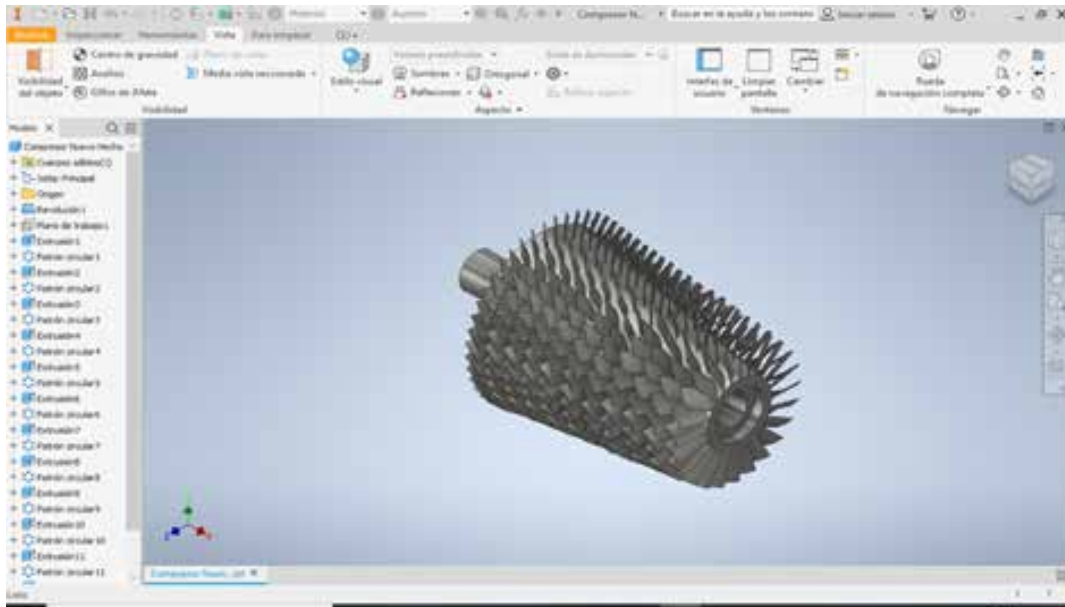


Figura 43. Compresor axial de turbina Siemens SGT-700
Fuente: Nuñez (2020)

De esta forma una vez teniendo la pieza se procede a crear un volumen de control que desempeñará la función de actuar como el aire que entra y sale del compresor axial, este procedimiento se realiza creando una circunferencia que envuelva la pieza en su totalidad y realizando la operación extruir un nuevo sólido (ver figura 44).

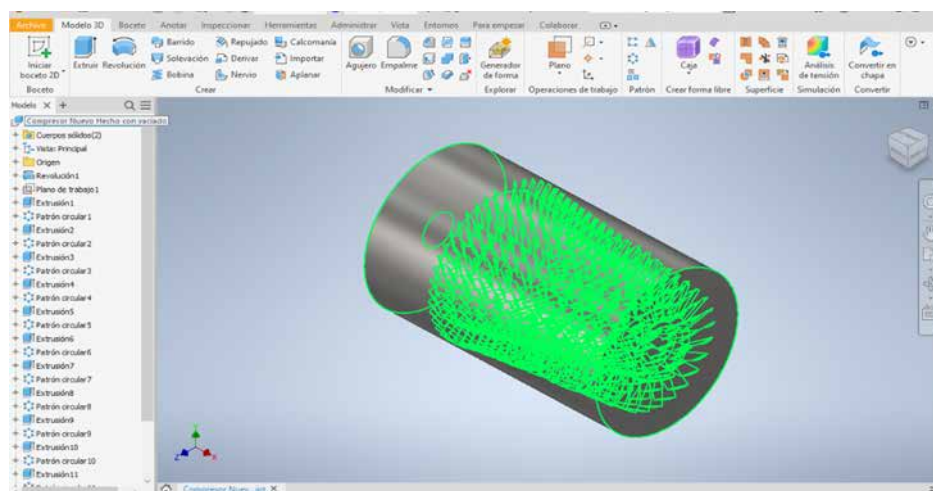


Figura 44. Compresor axial envuelto en cuerpo de estudio
Fuente: Nuñez (2020)

Luego se procede a formar un solo solido con la opción combinar y substraer (ver figura 45 y 46).

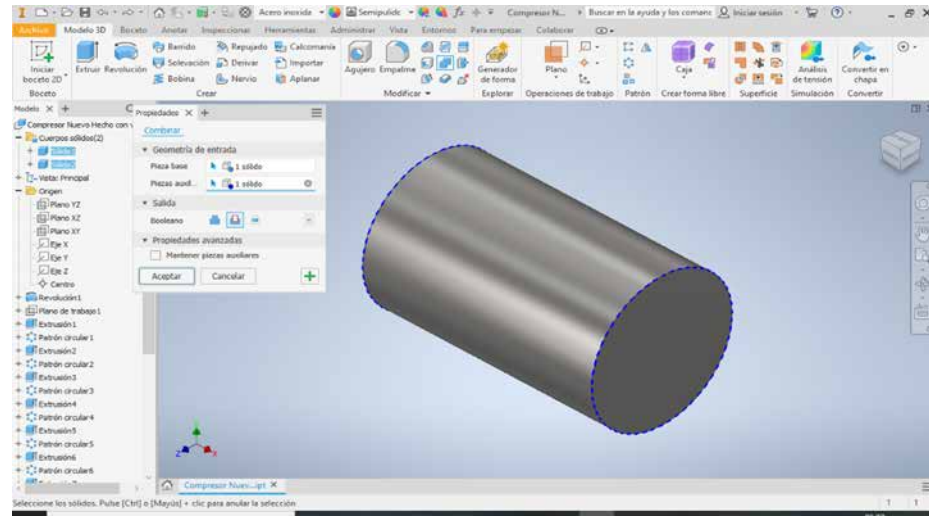


Figura 45. Combinar sólidos
Fuente: Nuñez (2020)

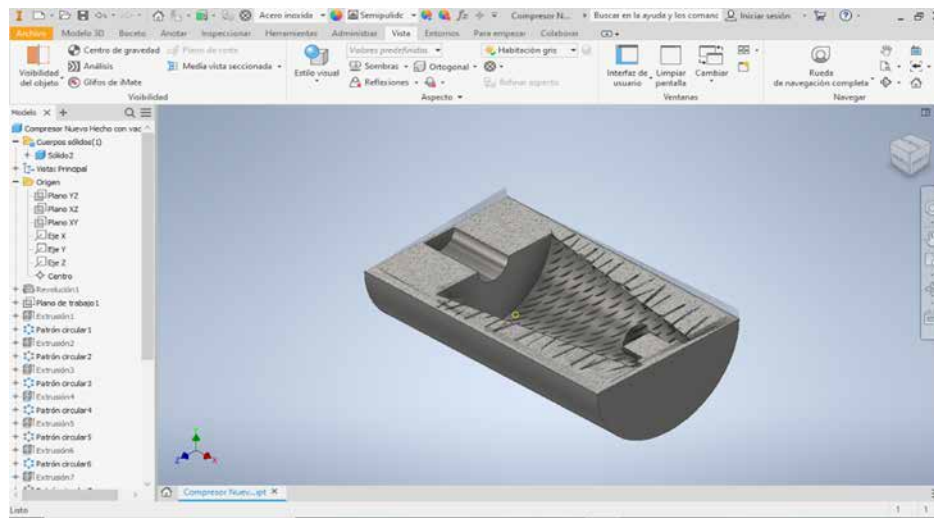


Figura 46. Corte longitudinal de solidos combinados
Fuente: Nuñez (2020)

De esta forma una vez habiendo sido verificada la geometría de la pieza con la finalidad de evitar errores en la simulación por estos parámetros, se procede a guardar la pieza en formato IGS(.igs) con el objetivo de mantener las características de su geometría para seguidamente exportarla al programa Ansys WorkBench. Subsiguientemente a tener la pieza se ejecuta el programa Ansys y se selecciona la opción Import para cargar la pieza a simular en el programa (ver figura 47).

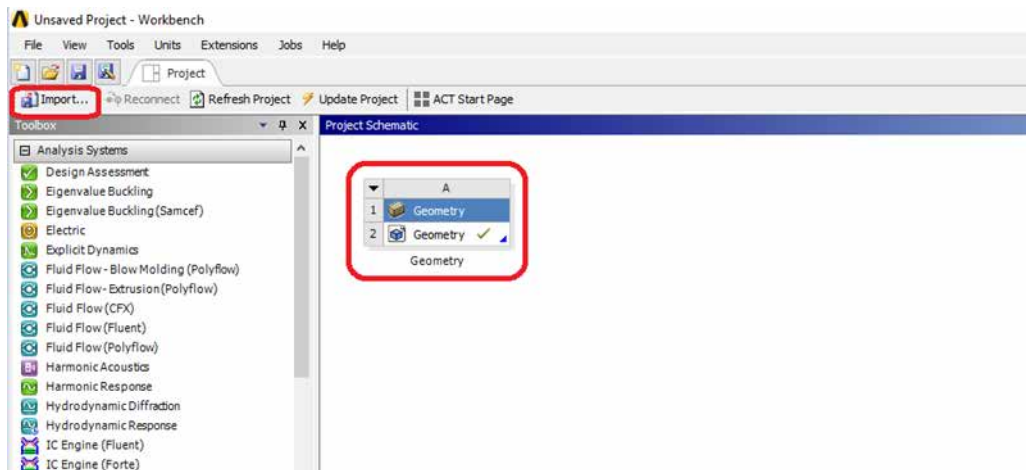


Figura 47. Ansys Workbench
Fuente: Nuñez (2020)

Una vez aquí se procede a dar click derecho sobre geometry y marcando la opción Edit Geometry in DesingModeler (ver figura 48) para abrir la geometría de la pieza y asignarle un nombre a las caras del cuerpo que cumplirán una función en el proceso de mallado y posteriormente en la simulación Fluid Flow (CFX). De esta forma una vez abierta la ventana de Edit Geometry in DesingModeler se procede a seleccionar la opción Generate la cual cargara la pieza en el espacio de trabajo y nos permitirá asignar nombre a caras del cuerpo en estudio (ver figura 49).

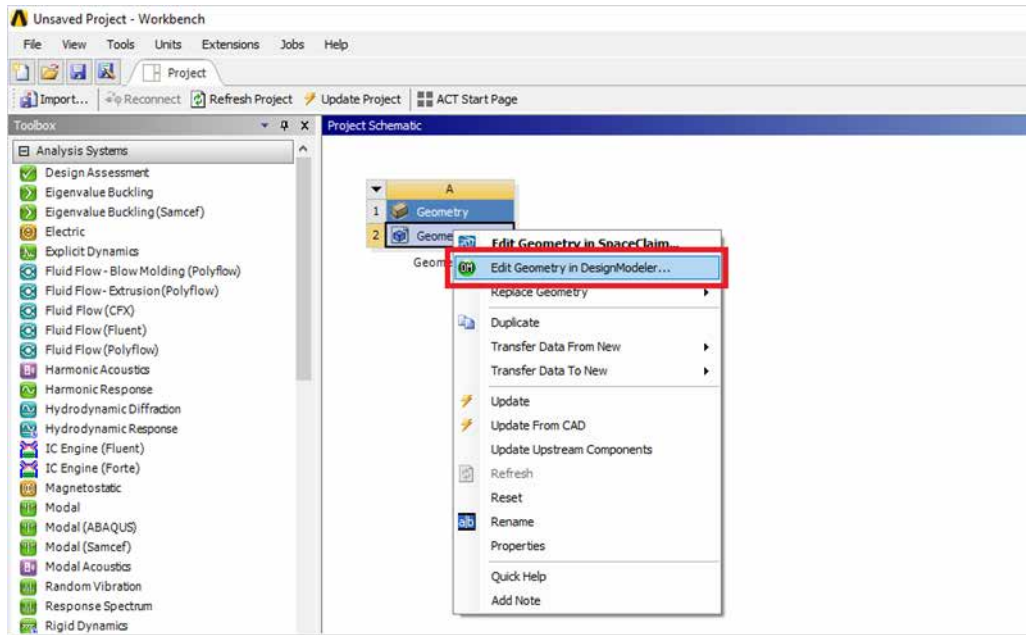


Figura 48. Apertura de Edit Geometry in DesingModeler
Fuente: Nuñez (2020)

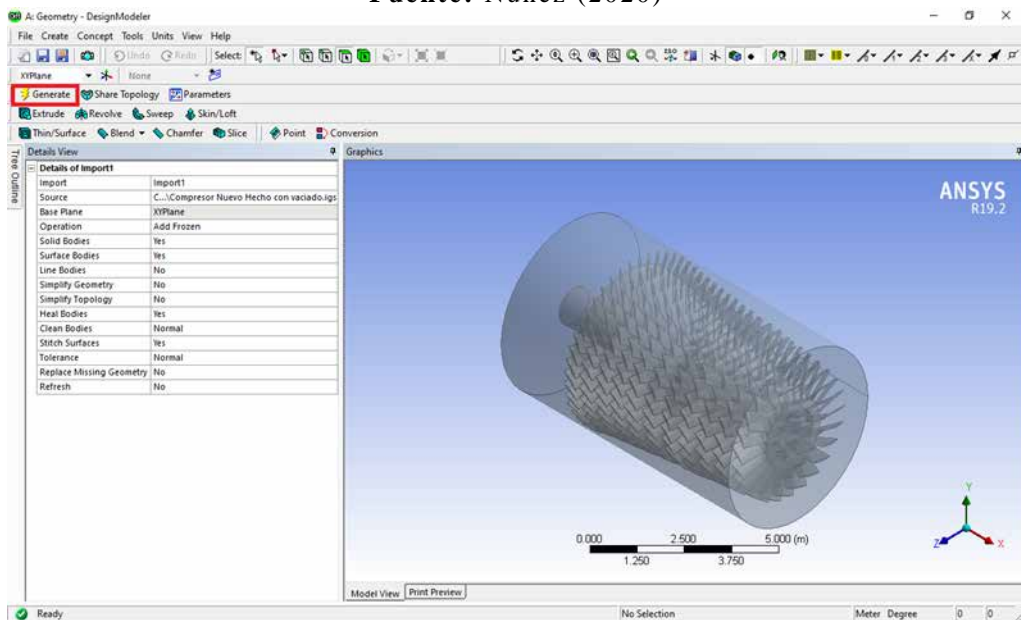


Figura 49. Pieza cargada en Edit Geometry in DesingModeler
Fuente: Nuñez (2020)

Posteriormente se procede a realizar el mallado de la pieza, esto se realiza arrastrando de módulo de Analysis Systems la opción Mesh y soltándola en el espacio de trabajo del proyecto, se procede a arrastrar la casilla de Geometry a la casilla de Mesh lo que nos permitirá tener separado los procesos y así poder realizar cambios sin ocurriese un error sin tener que afectar desde el inicio la simulación (ver figura 50).

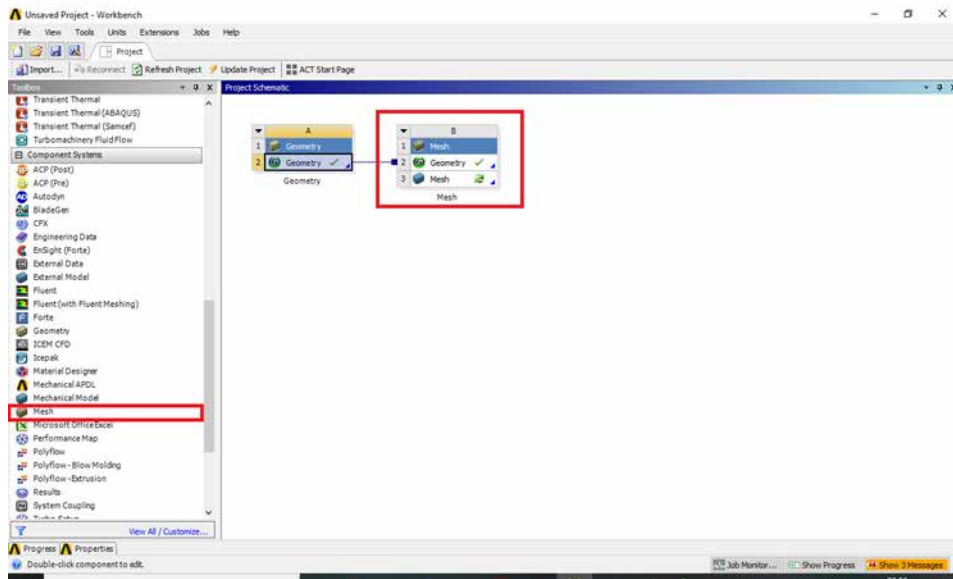


Figura 50. Modulo Mesh

Fuente: Nuñez (2020)

Una vez abierta la pieza se procede a verificar los detalles de mallado, cambiando el valor por defecto para estudios mecánicos a CFD y marcando la opción Generate Mesh para generar la malla del cuerpo en estudio (ver figura 51 y 52). Una vez finalizado el mallado se podrán visualizar los nombres que fueron asignados a las caras de la pieza y la malla del diseño.

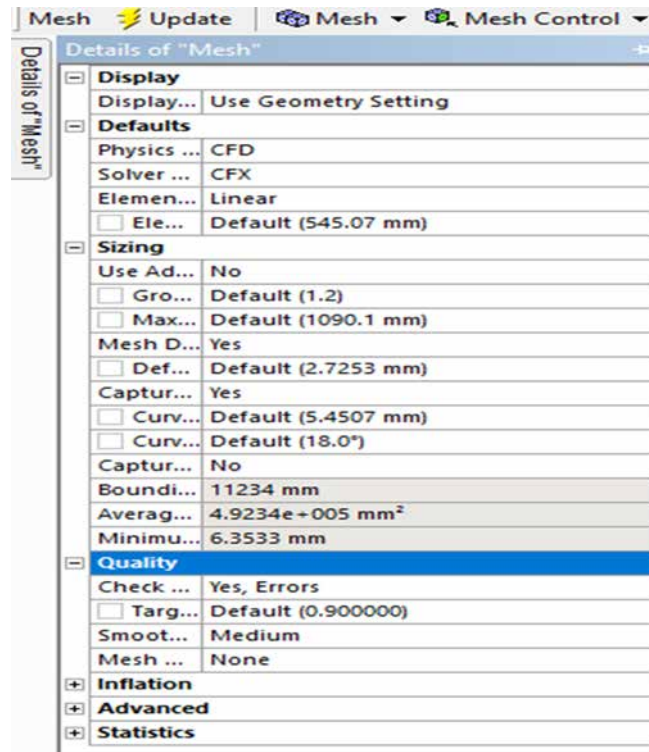


Figura 51. Detalles de mallado
Fuente: Nuñez (2020)

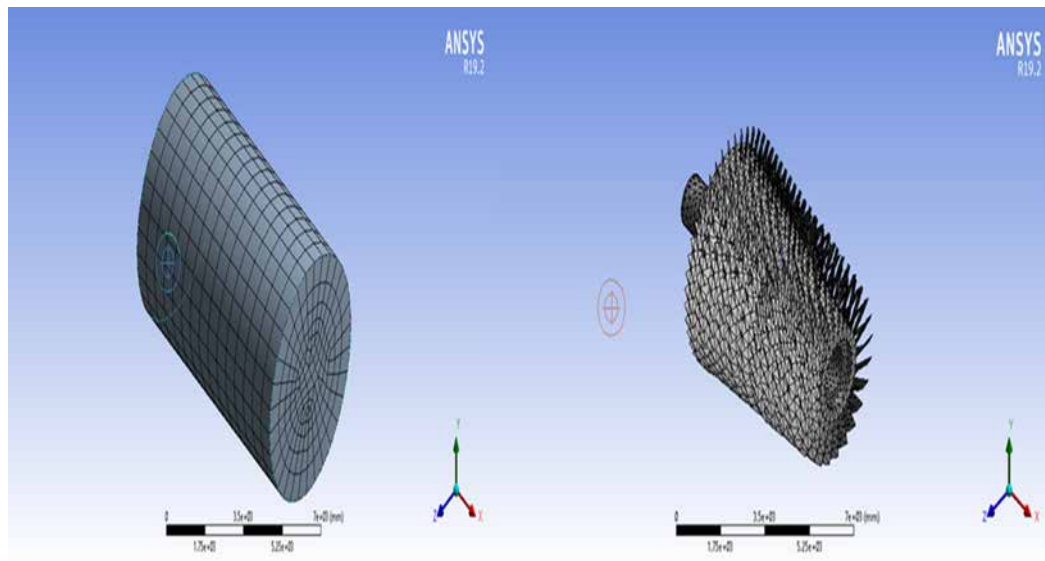


Figura 52. Pieza mallada
Fuente: Nuñez (2020)

Una vez se tenga listo el mallado, cerramos la ventana presionamos click derecho sobre el mallado y seleccionamos Update para guardar los cambios efectuados a la pieza, seguidamente buscamos en el módulo la opción CFX y la arrastramos al espacio de trabajo del proyecto, como en los pasos anteriores se arrastra el resultado del mallado hacia el espacio de CFX para luego marcar con doble click la opción Setup para poner las condiciones de trabajo con las que se simulara (ver figura 53).

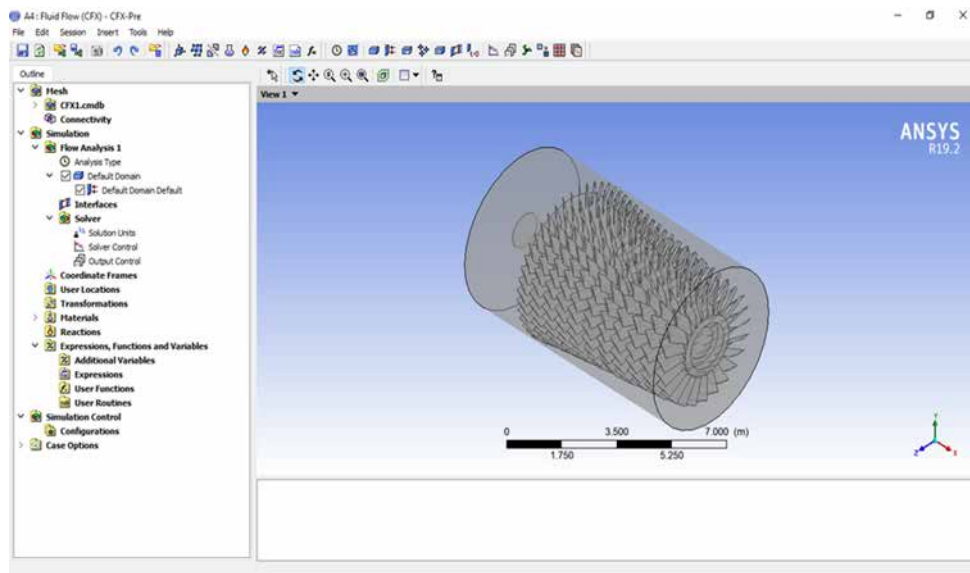


Figura 53. Proceso de asignación de parámetros
Fuente: Nuñez (2020)

Se procede en cada limite a indicar la condición a la cual estos se van a someter para dar inicio a la simulación. De igual forma es primordial indicar bajo qué condiciones se va a encontrar el sistema, si en Steady o en Transient análisis, en este caso se usa Transient ya que el caso a estudiar requiere la variación de presión que sufre el compresor a través del tiempo mientras que en el Steady la presión no variara. Por otra parte, se debe de tener en cuenta la cantidad de veces que se quiere evaluar el proceso, en este caso seleccionaremos 20 ya que son trabajos que requieren de exactitud pero que de seleccionar un número de interacciones muy elevado generara una demora tiempo importante en realizar la computadora el análisis (ver figura 54).

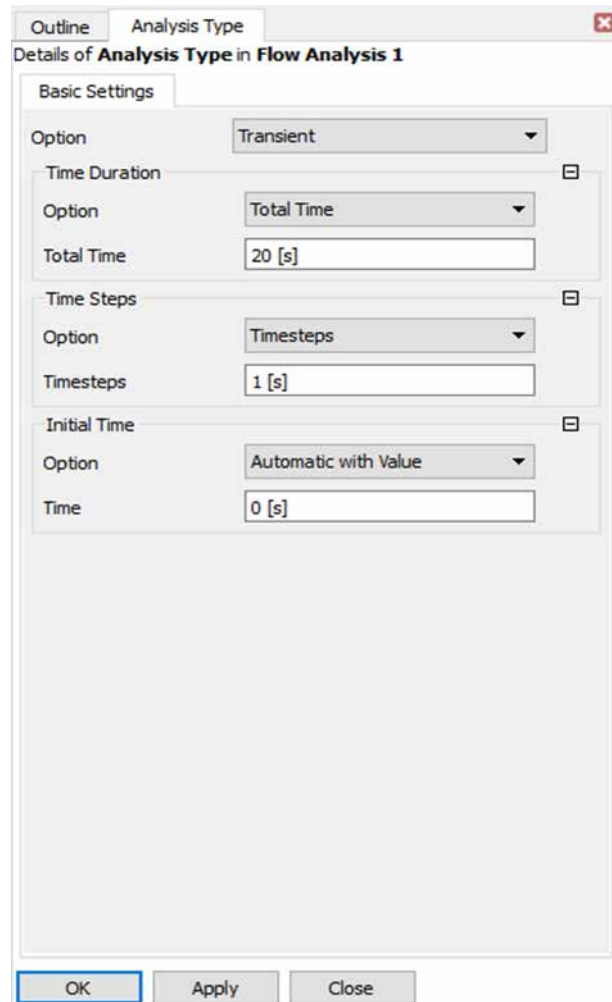


Figura 54. Configuración a Transient análisis

Fuente: Nuñez (2020)

De esta forma, luego de haber configurado el tipo de análisis a realizar se escogerán los parámetros y condiciones bajo las cuales trabajara el compresor axial durante la simulación tomando como condición inicial en el aire de entrada a una temperatura de 15°C que es la temperatura ideal para estos equipos (ver anexo E), de igual forma se selecciona 1 atmosfera de valor y una velocidad de entrada de 1 m/s (ver figura 55).

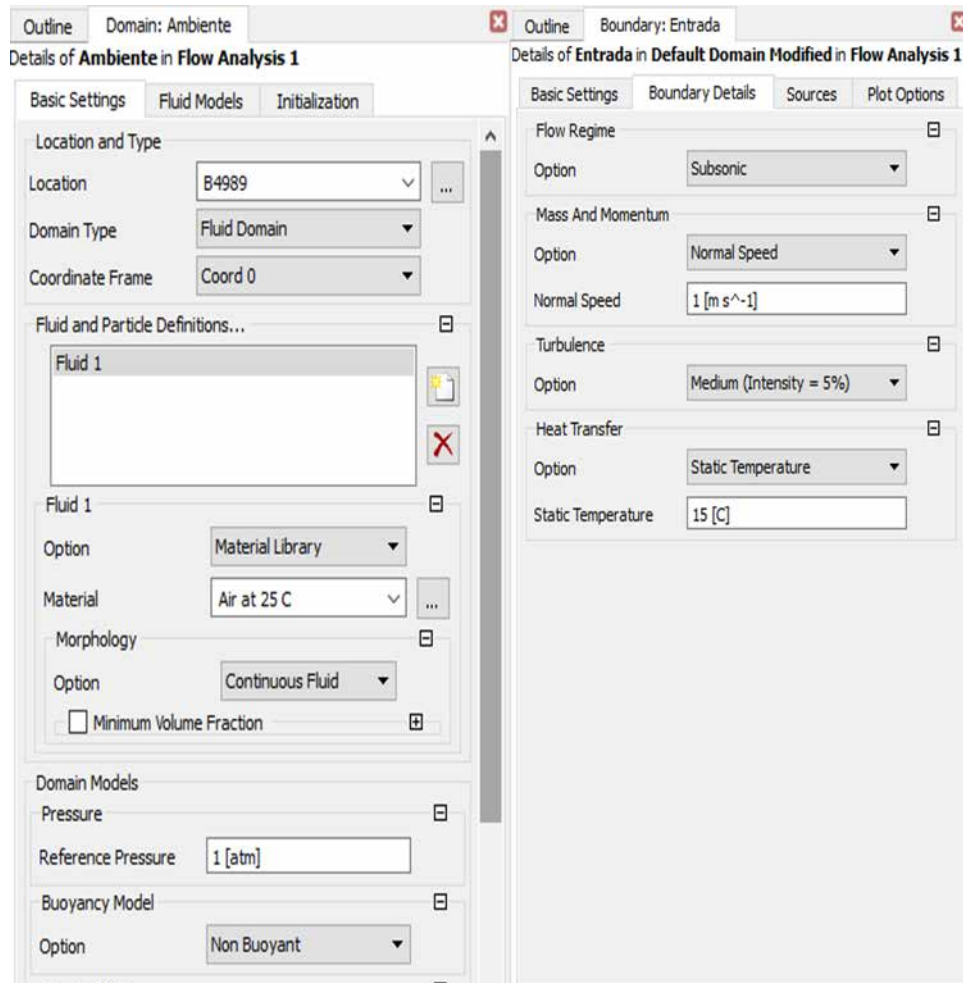


Figura 55. Parámetros de entrada de aire al compresor
Fuente: Nuñez (2020)

Como últimos parámetros se establecieron en la salida que el flujo de escape sería el indicado en el anexo C donde Siemens indica que para este equipo el flujo de escape es 115.4 Kg/s y la velocidad de giro del equipo es de 6100 rpm (680 rad/s) (ver figura 56).

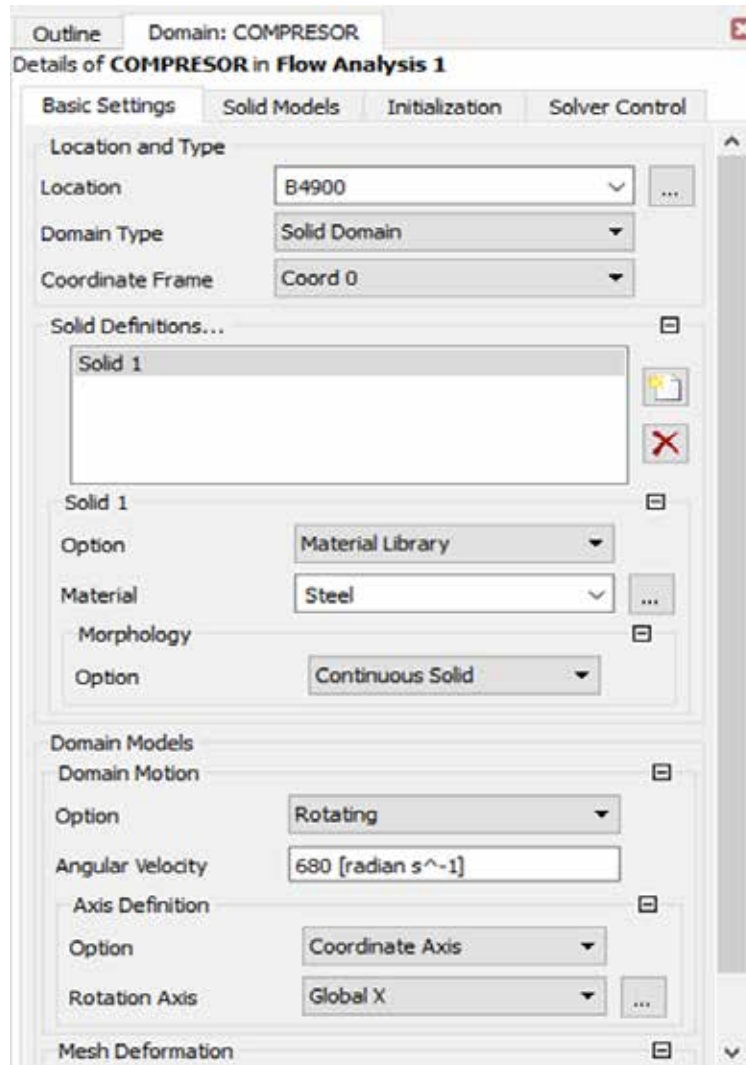


Figura 56. Parámetros del compresor

Fuente: Nuñez (2020)

De esta manera como último paso se cierra la ventana de parámetro y nos dirigimos a la ventana principal del proyecto en el Workbench donde vamos a seleccionar resultados. Esperamos a que cargue y saldrá una pestaña en la cual se va a seleccionar "Double Presicion" y posteriormente "Start Run" (ver figura 57). Este es el proceso que más demora, debido a que aquí es donde tiene lugar la simulación, se deja la computadora mientras el programa corre, los resultados se obtuvieron luego de casi 3 horas de análisis.

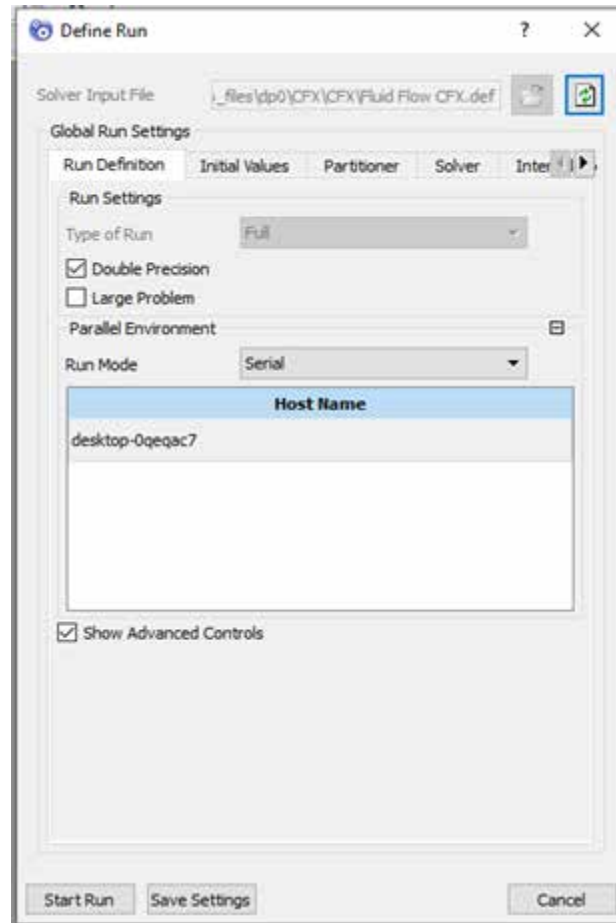


Figura 57. Start Run

Fuente: Nuñez (2020)

En consecuencia, de los análisis generados por la simulación del programa una vez están listos, se abren los resultados obtenidos en donde aparecen las diferentes variables que podemos observar como resultado de la simulación, en este caso la variable a estudiar es la variación de presión que sufren el compresor por efecto de la temperatura del aire de entrada. Se realiza un Countour de presión de vista isométrica y lateral sobre el compresor para mostrar cómo se ve la variación de presión sobre este y el valor máximo que alcanzo a la salida de este en sus últimas etapas a una temperatura de entrada de 15°C (ver figura 58 y 59).

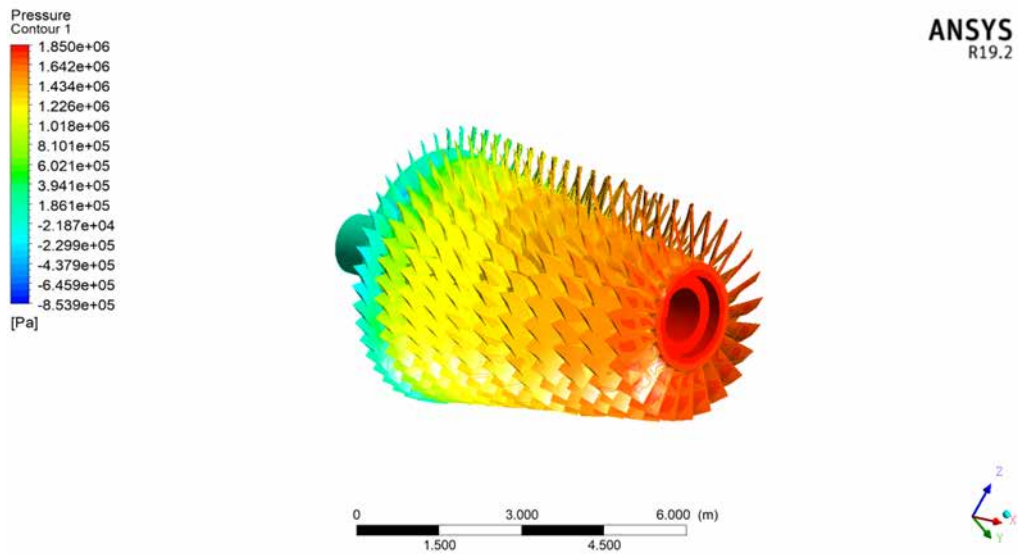


Figura 58. Countour de presión a 15°C en vista isométrica
Fuente: Nuñez (2020)

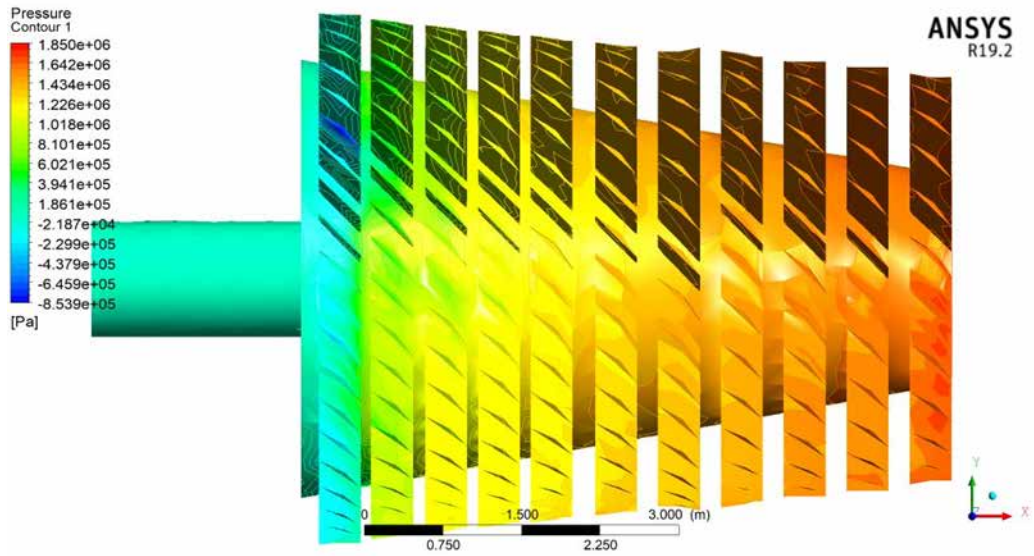


Figura 59. Countour de presión a 15°C en vista lateral
Fuente: Nuñez (2020)

Así mismo el programa provee un gráfico de presión respecto al tiempo donde se pudo visualizar como el aire es comprimido a medida que avanza por las etapas del equipo aportando sustento a las imágenes que se obtuvieron del estudio (ver gráfico 1), esto junto con las figuras 58 y 59 permitió visualizar como el compresor realiza su trabajo en el proceso de compresión con parámetro ideales arrojando una presión de salida de 18,5 bar al final de su etapa número 11, así mismo se aprecia como el aire es comprimido uniformemente al pasar por las 11 etapas del compresor, intensificándose esto en la sexta etapa del mismo. Por otra parte, con los resultados de velocidad obtenidos de la simulación (ver figura 60) se pudo constatar el incremento de velocidad del aire al irse comprimiendo en el compresor alcanzando una velocidad de 251 m/s.

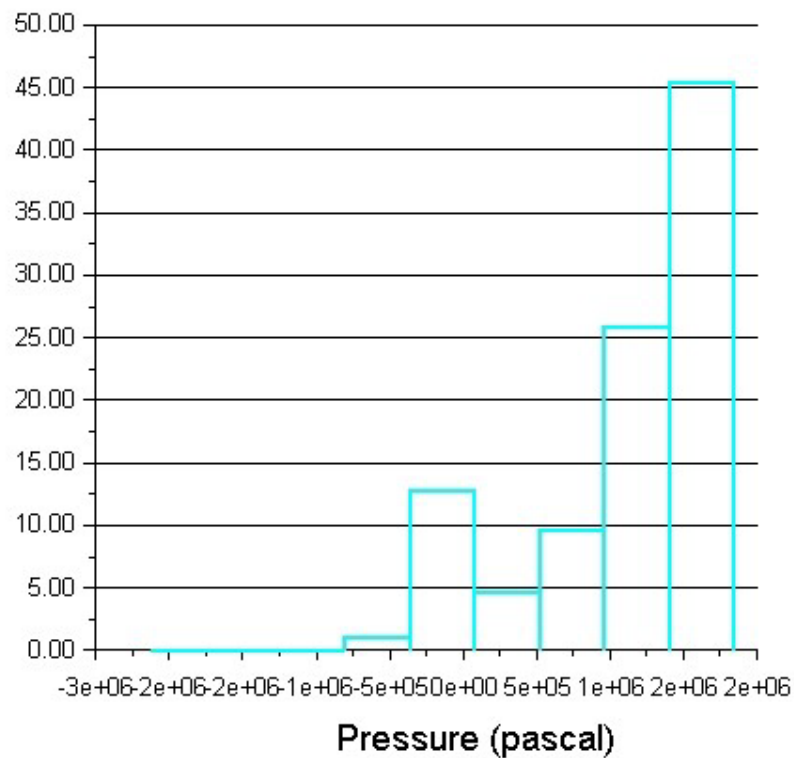


Gráfico 1. Presión en el tiempo a 15°C
Fuente: Nuñez (2020)

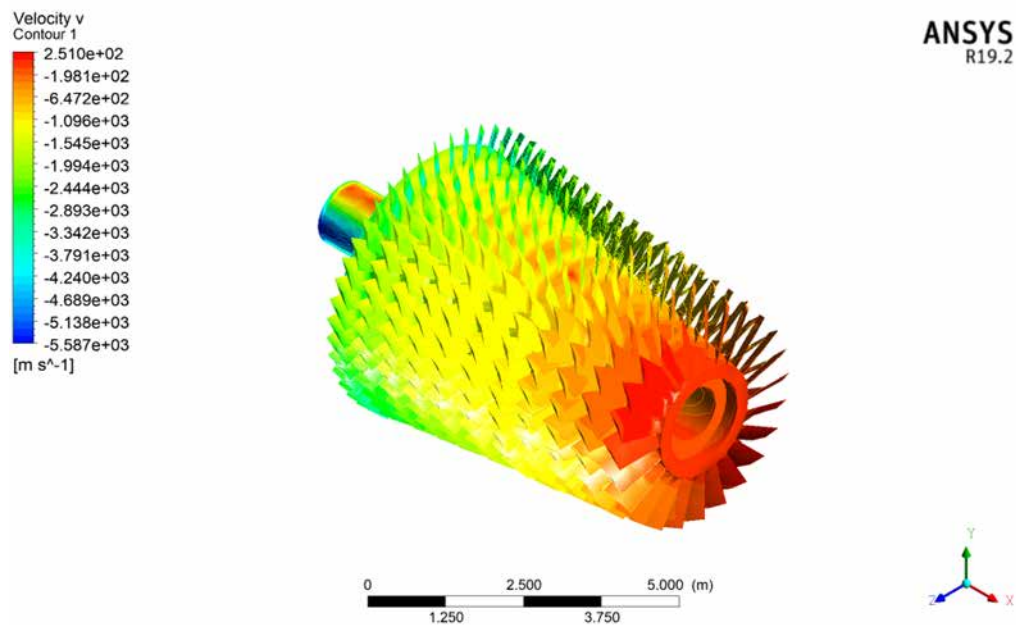


Figura 60. Countour de velocidad en vista isométrica

Fuente: Nuñez (2020)

Una vez obtenidos los resultados de la primera simulación se procedió a realizar el mismo procedimiento dos veces más con un valor de temperatura relativamente más bajo a la primera simulación y uno considerablemente más alto posteriormente, siendo estos 10°C y 34°C respectivamente con la finalidad de comparar las variaciones de presión que pueda sufrir el compresor por efecto de estas temperaturas de entrada (ver figura 61 y 62).

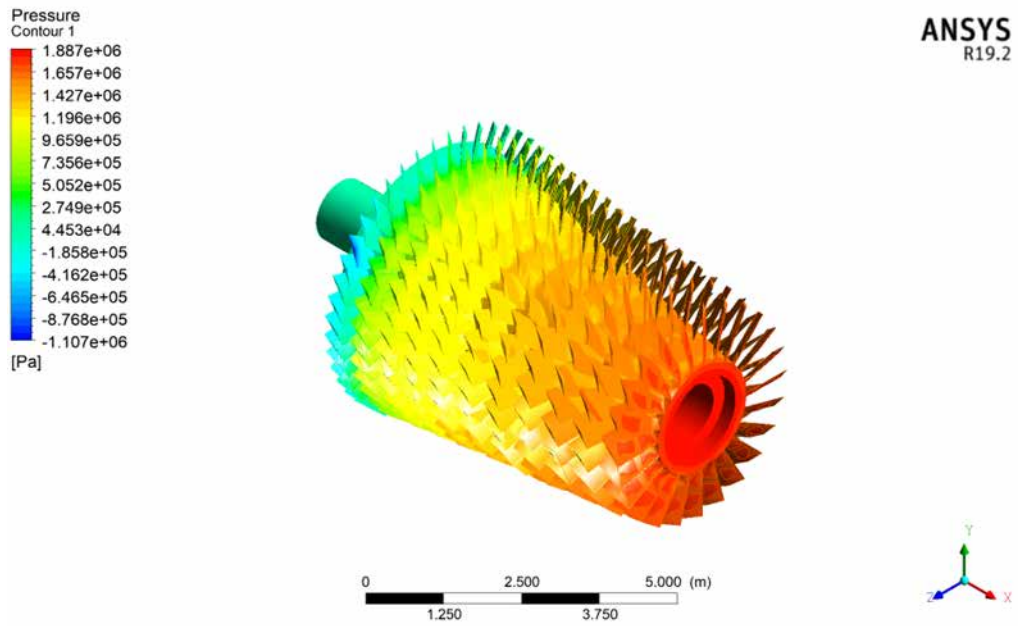


Figura 61. Countour de presión a 10°C en vista isométrica
Fuente: Nuñez (2020)

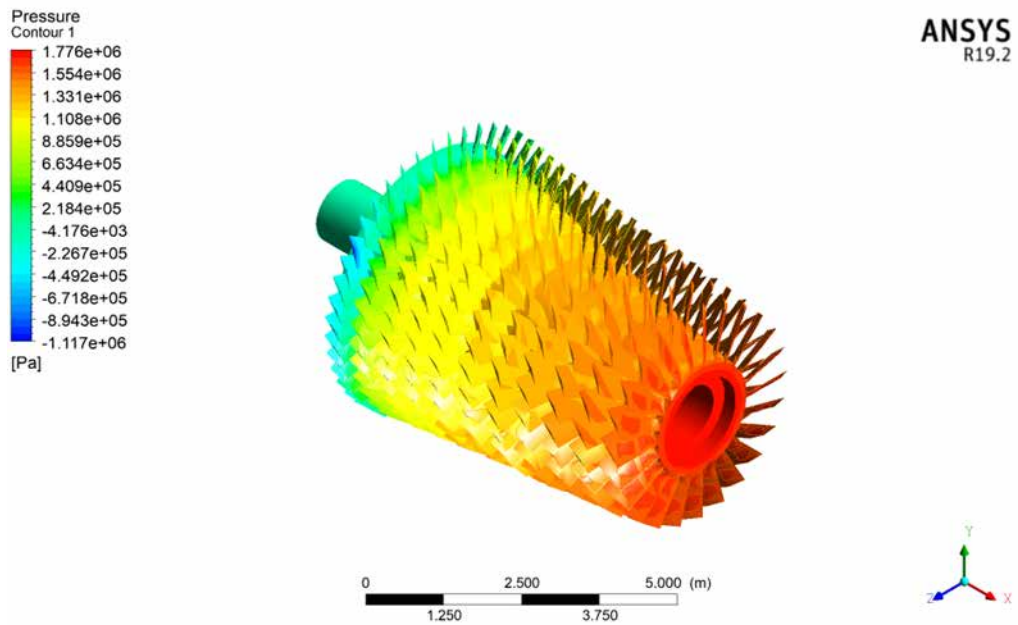


Figura 62. Countour de presión a 34°C en vista isométrica
Fuente: Nuñez (2020)

Una vez obtenidos los resultados de los últimos dos procesos de simulación (ver gráfico 2) se procedió a comparar todos los resultados de nuestra simulación en donde se aprecia que las variaciones de temperatura tienen un efecto notorio en la eficacia del compresor, ya que a una temperatura más baja de 10°C el compresor tiene un leve aumento de presión respecto a la temperatura empleada inicialmente de 15°C.

Por otra parte, se apreció que con una temperatura más elevada de 34°C el compresor ve una caída en su eficacia algo significativa al compararse con los resultados de las otras dos temperaturas evaluadas (ver gráfico 3). De esta forma se debe tener en cuenta que es importante controlar la temperatura de entrada del aire al compresor de la turbina de gas debido a que tiene un impacto en su rendimiento y en el de la turbina.

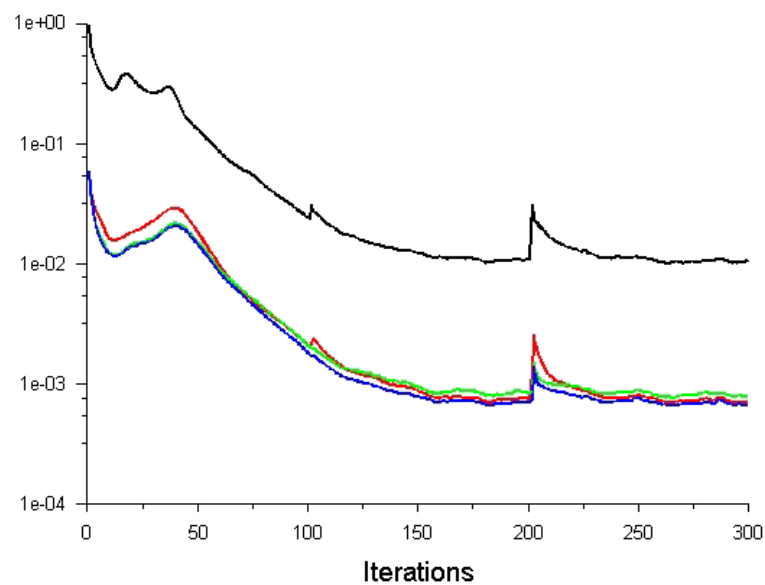


Gráfico 2. Interacciones de la simulación con la presión
Fuente: Nuñez (2020)

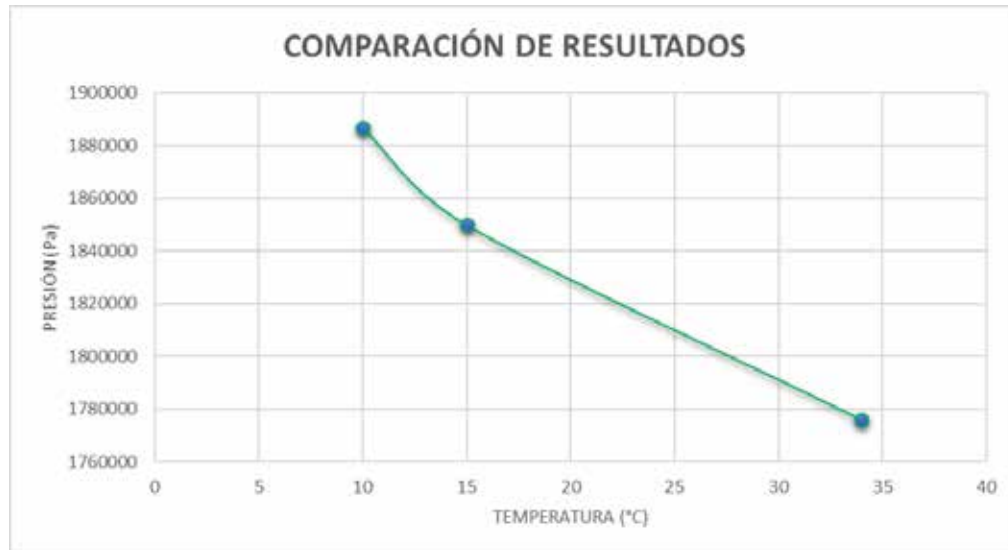


Gráfico 3. Comparación de los resultados de la simulación con las distintas temperaturas

Fuente: Nuñez (2020)

CONCLUSIONES

El presente trabajo de investigación tuvo como objetivo general, la simulación de los efectos generados por la temperatura del aire de succión que ingresa al compresor de una turbina a gas siemens. Para cumplir con dicho objetivo se emplearon una serie de fases y actividades, que facilitaron la elaboración de la investigación propuesta. De esta manera, se procedió en primer lugar a realizar la descripción y análisis del funcionamiento de una turbina Siemens y sus componentes. Seguidamente, se procedió a encontrar los efectos más comunes que tienen lugar en las turbinas de gas debido a las variaciones de temperaturas con las que ingresa el aire y como afectan el rendimiento de la turbina.

Por otra parte, se realizó un análisis de los efectos que suceden en el proceso de generación de energía de una turbina a gas con diferentes cambios de temperatura en el aire de succión del compresor. Por último, se empleó una simulación con tres temperaturas de entradas diferentes en el compresor axial de 11 etapas de una turbina de gas Siemens modelo SGT-750.

En tal sentido, se pudo observar que las temperaturas variables pueden tener un gran efecto en las prestaciones de turbina y del compresor de la misma, además de ser las principales causantes de efectos tales como: la corrosión, erosión y ensuciamiento interno de los componentes del equipo. Es por ello que hoy en día las turbinas de gas están equipadas con tecnologías que permiten el monitoreo continuo de las condiciones ambientales con la finalidad de evitar daños internos a sus componentes producto de las condiciones estudiadas y de igual forma registrar el rendimiento de los equipos para posibles mejoras.

Posteriormente, con la implementación de softwares de diseño y análisis como Autodesk Inventor y Ansys Workbench 19.2, los cuales proporcionan las herramientas para la realización de modelados 3D y estudios de aproximación numérica CFD, se realizó una simulación en el compresor axial de 11 etapas de turbina de gas Siemens modelo SGT-750. Esta simulación se llevó a cabo determinando los parámetros a evaluar, en este caso, la presión, en condiciones reales para obtener un resultado fiable. Estos parámetros de trabajo se recopilaron en diferentes documentos para proceder a ingresarlos en Ansys y conseguir los resultados.

En conclusión, con la implementación de la simulación y del análisis de los resultados que este arrojó, se obtuvo que la temperatura de entrada al compresor es un factor determinante en el funcionamiento de los equipos, encontrando que a menor temperatura el compresor realiza un mejor proceso al comprimir el fluido y por consiguiente aumenta el rendimiento de la turbina. Así mismo a mayor temperatura se ve que el compresor tiene una menor eficiencia en su trabajo lo cual se traduce en una caída en las prestaciones del equipo. De igual forma es importante destacar la eficiencia del diseño que poseen estos equipos el cual les permite trabajar en diversas condiciones.

RECOMENDACIONES

En una industria donde se busca una constante mejora de los equipos para cumplir con las demandas exigidas por los usuarios ya sean para propósitos de generación mecánica o de generación de electricidad se recomienda optimizar los diseños con el fin de controlar las condiciones de entrada del aire al compresor para así mejorar los rendimientos que se obtienen de estos equipos y evitar algún tipo de falla. Al mismo tiempo, lograr erradicar, o minimizar, los accidentes ocurridos por errores humanos incentivando a las industrias a cumplir con los estándares internacionales, así como también, realizar el correspondiente mantenimiento de sus componentes. Esto haciéndoles entender que, hacer funcionar el equipo continuamente sin mantenimiento o bajo condiciones distintas a las recomendadas se pueden producir daños irreparables al mismo y generar grandes gastos económicos.

Cabe destacar que para obtener una veracidad mayor de los resultados se recomienda emplear una simulación con todos los componentes que intervienen en el proceso de admisión de aire al compresor axial de la turbina, esto ayudaría a tener valores más exactos sobre el funcionamiento de este equipo y realizar un análisis más completo del mismo. De igual forma, para cumplir con esto se necesita un ordenador con una alta capacidad de procesamiento, ya que serían cálculos de gran complejidad que tomarían un tiempo importante en resolverse mediante la simulación.

Finalmente, a la Universidad José Antonio Páez, se le recomienda añadir una materia en la cual se estudie y explique el uso de las simulaciones dinámicas y de fluidos. Debido a que para los ingenieros mecánicos esta sería una herramienta de gran importancia para llevar a cabo proyectos de alta relevancia en cualquier industria.

BIBLIOGRAFÍA

Arias, Fidas (2012). **Proyecto de Investigación: Introducción a la Metodología. Edición N°5. Caracas: Editorial Episteme.**

Carlos Sabino (2010). **El proceso de investigación.** Edición N°6.

Cengel y Boles (2012). **Termodinámica.** Séptima Edición. Editorial Mc Graw Hill.

Duque A (2016). **“Estudio del efecto de las condiciones atmosféricas sobre las prestaciones de una turbina de gas”.** Tesis de grado. Universidad Politécnica de Madrid

Dudley, B. (2015). **BP’s Energy Outlook 2035.**

E Martines (2017). **La humedad en la atmósfera.** Universidad de Colima

Engmark, D (2015). **Airborne contaminants and their impacto on gas turbine.** Linkoping University.

Field Systems (2006). Turbine Damage. Visitado 12/05/20. Disponible en: <http://www.fieldsystems.com/turbine-overhauls>

Grupo Carman (2016). **Mallado por elementos finitos.** Visitado 30/03/20 Disponible: <https://grupocarman.com/blog/2014/10/30/mallado-por-elementos-finitos/>

General Electric Aviation. The GE90 Engine. Visitado 14/05/2020 Disponible en: <https://www.geaviation.com/commercial/engines/ge90-engine>

Hurtado y Toro (2005) **.Paradigmas Y Métodos De Investigación en tiempo de cambio.** Edición N°5

Mario Tamayo y Tamayo (2012). **El proceso de la investigación científica.** Edición N°4.

- Montilla (2017). **Turbina de gas**. Visitado 30/03/20. Disponible en:
https://issuu.com/hectormontilla8/docs/turbina_de_gas_revista_2.docx
- Meherwan P. Boyce (2006). **Gas Turbine Engineering Handbook**. Edición N°3
- Minco (2009). **Descripción del fouling**. Visitado 12/05/20. Disponible en:
<http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/5030/fichero/2.+Cap%C3%ADtulo+2+-+Descripci%C3%B3n+del+fouling.pdf>
- Meher-Homji (2009). El ensuciamiento de los compresores de flujo axial: causas, efectos, susceptibilidad y sensibilidad. Universidad de Florida
- Nieves D (2017).“**Análisis de las tecnologías para disminuir la temperatura del aire en la succión del compresor y su influencia sobre los indicadores energéticos en una planta cogeneradora con turbina a gas (TG) y generador de vapor recuperador de calor (HRSG’S)**”. Tesis de grado. Universidad Tecnológica de Bolívar
- Opex Energy (2016). **Principios de la Turbina de Gas**. Visitado 28/04/20. Disponible en:
http://opex-energy.com/ciclos/principios_de_Gas_CTCC.html
- Robert Mott (2013). **Mecánica de Fluidos**. Edición N°6
- Renovectec (2018). **Turbinas de gas: Montaje, puesta en marcha, operación y mantenimiento**. Primera edición. Editorial Renovectec
- Siemens Global. **SGT- 700 industrial gas turbine**. Visitado 30/03/2020. Disponible en: <https://new.siemens.com/mx/es/productos/energia/generacion/turbinas-de-gas/sgt-700.html>

Saiz M (2016). **“Desarrollo de un Simulador de Turbinas de Gas Fuera de Diseño”**.

Tesis de grado. Universidad Politécnica de Madrid

Sammak, M. (2016). **Anti- Icing in Gas Turbines. Lund: Lund Institute of Technology.**

Sulzer (2016). **Corrosión en turbinas de gas.** Visitado 12/05/20. Disponible en:

[https://www.sulzer.com/es/Products-and-](https://www.sulzer.com/es/Products-and-Services/Turbomachinery-Services/Engineering-and-Technical-Support/Lifetime-Assessments)

[Services/Turbomachinery-Services/Engineering-and-Technical-Support/Lifetime-Assessments](https://www.sulzer.com/es/Products-and-Services/Turbomachinery-Services/Engineering-and-Technical-Support/Lifetime-Assessments)

Turbotec (2014). Estudio Teórico y Práctico del Fenómeno de Fouling en Turbocompresores Axiales. Visitado 12/05/20. Disponible en:

<https://turbotec.fi/>

ANEXOS

ANEXO A

THE GAS TURBINE ENGINEERING HANDBOOK

Combustors

All gas turbine combustors perform the same function: they increase the temperature of the high-pressure gas. The gas turbine combustor uses very little of its air (10%) in the combustion process. The rest of the air is used for cooling and mixing. New combustors are also circulating steam for cooling purposes. The air from the compressor must be diffused before it enters the combustor. The velocity of the air leaving the compressor is about 400–600 ft/sec (122–183 m/sec) and the velocity in the combustor must be maintained below 50 ft/sec (15.2 m/sec). Even at these low velocities care must be taken to avoid the flame to be carried on downstream.

ANEXO B
ASME BASIC GAS TURBINES B133.2 PUBLICADO: 1977

ASME Basic Gas Turbines B133.2 Published: 1977
(Reaffirmed Year: 1997)

This standard presents and describes features that are desirable for the user to specify in order to select a gas turbine that will yield satisfactory performance, availability, and reliability. The standard is limited to a consideration of the basic gas turbine including the compressor, combustion system, and turbine.

ANEXO C CATÁLOGO DE TURBINA SIEMENS SGT-700



Gas turbine SGT-700

For power generation and mechanical drive applications

The SGT-700 is derived from the SGT-600 and is designed for higher output/efficiency and lower emissions with a wide fuel range capability. The SGT-700 is an ideal fit for power generation and mechanical drive. With the high exhaust heat, it is also excellent for cogen as well as for combined cycle.

High fuel flexibility

- Third-generation dual fuel DLE system
- Gaseous and liquid fuels on-load changeover
- Best-in-class NO_x emission levels
- Best-in-class with fuel flexibility on DLE

Important features

- Low emissions maintained on different fuels
- Maximized uptime
- Robust industrial design
- Small environmental footprint
- High lifetime profitability

Customer service and maintenance

- 24-hour core engine swap
- Maximized serviceability – on-site maintenance or gas generator removal for off-site maintenance
- Service plan with just 17 scheduled maintenance days over a 15-year service cycle
- Remote diagnostic service with online monitoring, expert performance data analysis, and fleet data comparisons
- 24-hour global help desk



Easy to maintain, reliable, and robust twin-shaft design for mechanical drive and power generation

Key benefits

- 32.8 MW(e) and 33.7 MW mechanical drive gas turbine
- 38.2% simple cycle efficiency
- More than 75 units sold (> 1.7 million equivalent operating hours)
- Robust, reliable design
- High fuel flexibility
- High exhaust energy
- Well-proven dry low emissions (DLE) combustion system
- < 15 ppmvd NO_x
- On-load fuel changeover (gas to liquid fuel and liquid fuel to gas)
- Low lifecycle costs
- High availability and reliability

- 1 DLE combustion system**
Well-proven and reliable dry low emissions (DLE) combustor with low emissions.
- 2 Power turbine**
Two-stage uncooled free power turbine offers nominal shaft speed up to 6,500 rpm. For mechanical drive, it may operate at 50 to 100 percent of the nominal speed. The Power Turbine can be matched for optimal performance at different ambient conditions.
- 3 Compressor**
11-stage axial-flow transonic compressor incorporating the latest aerodynamics, with variable guide vanes for robust operability and optimized performance over a wide range of operating conditions.

siemens.com/gasturbines



Power generation package using the identical driver as the mechanical drive package

Power generation package

The SGT-700 is ideal for simple cycle, combined cycle, cogeneration, and other heating applications thanks to its high exhaust temperature and the ability to handle sudden load changes.

- Low space requirements
- Modular design for high versatility
- Optimized for easy transportation

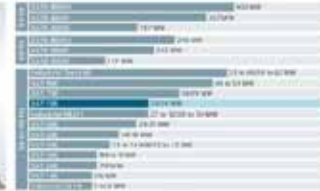


Oil and gas mechanical drive package – very high availability

Mechanical drive package

Extreme desert and arctic climates, or harsh industrial environments are not expected to impair the SGT-700 mechanical drive package's long service life:

- Variable power turbine speed: 50 to 105%
- High load on low power turbine speed
- Extended life time on part load operation
- Low partial load emissions



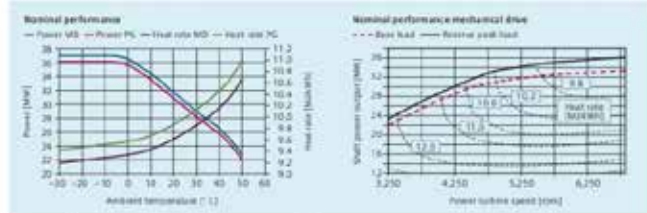
Gas turbines from 4 to 400 MW

	Simple cycle power generation	Mechanical drive applications
Power output	32.8 MW(e)	33.7 MW
Fuel	Natural gas, liquid fuel, dual fuel	
Frequency	50/60 Hz	
Gross efficiency	27.2%	28.2%
Heat rate	9,675 kJ/kWh	9,424 kJ/kWh
Turbine speed	6,500 rpm	
Pressure ratio	18.7 : 1	
Exhaust gas flow	95 kg/s	
Exhaust temperature	533° C (991° F)	
NO _x emissions	a 15 ppmvd at 15% O ₂ on fuel gas (with DLE)	

	Physical dimensions	
	Power generation package	Mechanical drive package
Approx. weight	169,000 kg (372,581 lb)	63,000 kg (138,891 lb)
Length	18.8 m (61.7 ft)	11.7 m (38.4 ft)
Width	4.6 m (15.0 ft)	4.0 m (13.1 ft)
Height	4.0 m (13.1 ft)	4.0 m (13.1 ft)

	Combined cycle power generation	SCC-700 2 x 1
Siemens combined cycle power plant	SCC-700 1 x 1	SCC-700 2 x 1
Net power output	45.2 MW(e)	91.6 MW(e)
Net plant efficiency	52.3%	53.1%
Net heat rate	6,876 kJ/kWh	6,770 kJ/kWh
Number of gas turbines	1	2

SGT-700 performance



Above performances at ISO conditions, gaseous fuel

Published by
Siemens AG 2016

Power and Gas Division
Distributed Generation
Freyeslebenstrasse 1
91058 Erlangen, Germany

Article No. PGDG-T1 0028-00-7600
Printed in Germany
Dispo 34806
TH 566-160259 FS 0916

Subject to change and errors.
The information given in this document only contains general data. Technical data and performance features which may not exactly comply with those described in this document may be subject to change in the course of further developments of the product. The required performance features are binding only when they are expressly agreed upon in the associated contract.

Note: All technical data and dimensions in this document are given in metric units. All dimensions include tolerances and surface finish. For power generation, all generators are included for gas turbines in this order equipment is excluded.

ANEXO D DATOS TÉCNICOS DE SGT6- 5000F

Datos de rendimiento para la generación de energía de ciclo simple

	Versión de 215 MW	Versión de 260 MW
Salida de potencia	215 MW (e)	260 MW (e)
Combustible (ejemplos)	Gas natural, GNL, gases ácidos, GLP, aceite destilado, biodiésel, petróleo crudo súper ligero árabe (ASL), petróleo crudo extra ligero árabe (AEL), queroseno, combustible para reactores, condensado. Otros combustibles bajo pedido	Gas natural, GNL, gases ácidos, GLP, aceite destilado, biodiésel, petróleo crudo súper ligero árabe (ASL), petróleo crudo extra ligero árabe (AEL), queroseno, combustible para reactores, condensado. Otros combustibles bajo pedido
Frecuencia	60 Hz	60 Hz
Eficiencia bruta	39,5%	40,0%
Velocidad de calentamiento	9.114 kJ / kWh (8.638 Btu / kWh)	9.000 kJ / kWh (8.530 Btu / kWh)
Velocidad de la turbina	3.600 rpm	3.600 rpm
Proporción de presión	17.0: 1	19.5: 1
Flujo de masa de escape	478 kg / s (1.054 lb / s)	586 kg / s (1.292 lb / s)
Temperatura de escape	612 ° C (1.134 ° F)	592 ° C (1.098 ° F)
Emisiones de NO_x en el gas combustible	≤ 9 ppmvd (sin inyección de agua para control de NO _x)	≤ 9 ppmvd (sin inyección de agua para control de NO _x)
Emisiones de NO_x en el fuel oil	≤ 25 ppmvd (con inyección de agua para control de NO _x)	≤ 25 ppmvd (con inyección de agua para control de NO _x)

SCC6-5000F: Datos de rendimiento para la central eléctrica de ciclo combinado 1x1

	Versión de 215 MW	Versión de 260 MW
Potencia neta de la planta	325 MW (e)	387 MW (e)
Eficiencia neta de la planta	59,5%	59,6%
Tasa de calor neto	6.050 kJ / kWh (5.735 Btu / kWh)	6.040 kJ / kWh (5.725 Btu / kWh)
Número de turbinas de gas.	1	1
Presión / recalentamiento	Triple / Si	Triple / Si

SCC6-5000F: Datos de rendimiento para la central eléctrica de ciclo combinado 2x1

	Versión de 215 MW	Versión de 260 MW
Potencia neta de la planta	650 MW (e)	775 MW (e)
Eficiencia neta de la planta	59,6%	59,7%
Tasa de calor neto	6.040 kJ / kWh (5.725 Btu / kWh)	6.030 kJ / kWh (5.715 Btu / kWh)
Número de turbinas de gas.	2	2
Presión / recalentamiento	Triple / Si	Triple / Si

Dimensiones físicas y peso

	Motor Core versión 215 MW	Versión de motor central de 260 MW
Aprox. peso	185,900 kg (410,000 lb)	219,000 kg (483,000 lb)
Longitud	9,1 m (30 pies)	10,1 m (33 pies)
Anchura	4,6 m (15 pies)	4,6 m (15 pies)
Altura	4,0 m (13 pies)	4,0 m (13 pies)

Las dimensiones excluyen las cámaras de combustión.

ANEXO E

NORMA ISO 13443

- **TEMPERATURA Y PRESIÓN NORMALES** (TPN, o NTP POR SUS SIGLAS EN INGLÉS): UNA TEMPERATURA DE 20 °C Y UNA PRESIÓN ABSOLUTA DE 1 ATM.

LA NORMA **ISO 13443** PARA EL GAS NATURAL ESTABLECE LAS SIGUIENTES CONDICIONES:

- **CONDICIONES DE REFERENCIA NORMALIZADAS:** TEMPERATURA DE 15 °C Y PRESIÓN DE 1 ATM.

ANEXO F CATÁLOGO DE TURBINA SGT-750

SIEMENS
Ingenuity for life



Industrial gas turbine SGT-750

Power generation: 38.1 MW(e)

Gen set efficiency: 40.2%
Heat rate: 9,255 kJ/kWh (26,085 Btu/kWh)
Turbo life span: 6,100 rpm
Pressure ratio: 23.8:1
Exhaust mass flow: 153.8 kg/s (250.9 lb/s)
Exhaust temperature: 458°C

Mechanical drive: 39.3 MW

Gen set efficiency: 41.5%
Heat rate: 8,250 kJ/kWh (24,257 Btu/kWh)
Turbo life span: 3,050 - 6,400 rpm
Pressure ratio: 23.8:1
Exhaust mass flow: 153.8 kg/s (250.9 lb/s)
Exhaust temperature: 458°C

siemens.com/gasturbines



SIEMENS

Industrial Gas Turbines

SGT-750 Gas Turbine

Proven technology. Verified results.

Power Generation: ISO 37.03 MW(e) · Mechanical Drive: 38.19 MW

Scan the
QR code with
the QR code
reader in
your mobile!



[siemens.com/gasturbines](https://www.siemens.com/gasturbines)



SGT-750 Industrial Gas Turbine

The Siemens SGT-750 set new standards for efficiency and reliability in the industrial gas turbine segment. It was designed to deliver top-class performance, with a compact footprint, combined with extreme robustness and optimized serviceability. Now, after proving itself during years of operation, it stands out as an absolute industry benchmark, reaching for higher levels of lifetime customer value.

High efficiency and high power output

Having been thoroughly tested and tried, the overall performance of the SGT-750 exceeds the initial launch data in all aspects. The SGT-750 has the highest power and efficiency combined with Dry Low Emissions (DLE) and is proven to be one of the most ecofriendly turbines in the world.

Maximized uptime

From the smallest detail to package layout, the SGT-750 is designed to deliver high performance. Day in, day out. The sheer robustness and build quality makes for outstanding longevity, while the unique, built-in serviceability and smart maintenance program based on true load operation offer reliability and availability in a league of its own.

Unprecedented flexibility

Use it where you want, hot or cold conditions, onshore or offshore, for distributed power or mechanical drive. The SGT-750 is remarkably flexible when it comes to coping with harsh conditions and different fuels. Using pre-engineered options, the package is easily tailored to any specific demand in terms of application, ambient conditions, load, code and standards. The low-weight design and small footprint makes it easy to fit in – and easy to get in place.

Flexibility facts

- Highest performance at extreme conditions, from arctic to desert conditions, from -60 °C to 55 °C
- Fast start capability, full load in less than 10 minutes
- DLE burners offer dual fuel with online switchover capability
- Wide fuel range

In May 2013 the first SGT-750 went online at the combined heat and power plant in Lubmin, near Greifswald, Germany. Gas from the Rors Stream pipeline needs to be reheated for further distribution.

Front page: The SGT-750 combined heat and power plant in Altamira, Mexico, generates electricity and process steam for manufacturing synthetic textile fibers.





The SGT-750 gas generator can be swapped in less than 24 hours. The gas generator is rolled out with standard maintenance tools.

Service and Maintenance Concept

The design of the SGT-750 was created with maximized serviceability and minimized load-to-load downtime in absolute focus. This ambition has resulted in a market-leading availability, based on a service plan with just 17 scheduled maintenance days over a 17 year service cycle. All in all, this means bankable productivity and faster return on investment.

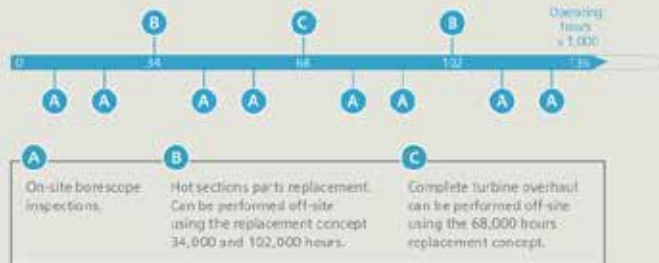
Online monitoring and remote diagnostics
All SGT-750 are mapped with infrared (IR) cameras during engine delivery test and during regular scheduled inspections.

The IR cameras enable early, non-destructive detection of possible deviations, helping to keep the turbine in a good, healthy condition. The IR images also speed up the service procedure by giving accurate diagnostic information to technicians. Online monitoring, expert performance data analysis and fleet data comparisons form a solid foundation for such evaluations.



All customers benefit from our 24-Hour Global Helpdesk Service and dedicated project management. In combination with remote diagnostic service you will increase your turbines availability, reliability and operating performance for maximized life cycle profit.

Maintenance Cycle



Offsite Maintenance

- 1 day A-inspection (BoreScope)
- 2 days B-inspection (Gas Generator Exchange)
- 5 days C-inspection (Gas Generator Exchange with Power Turbine Inspection)

Onsite Maintenance

- 1 day A-inspection (BoreScope)
- 12 days B-inspection (Hot Section Inspection)
- 16 days C-inspection (Major Overhaul)

Onsite and offsite maintenance is the two alternatives of doing planned service for the SGT-750. For offsite maintenance the crane that will be served is swapped keeping the downtime of your equipment to an absolute minimum. For onsite maintenance the crane will be served and the service can be made on site or in a local workshop. The typical four years of base load operation before the machinery is spent the first time, is an outstanding, market leading figure in itself. Yet, with lower loads and fully customer-managed inspections, time between overhauls can be easily increased by several thousands of hours.

Maximized Uptime – 17 Maintenance Days in 17 Years

Maintenance cycle

The maintenance cycle, based on onsite and offsite maintenance, gives a recommendation for preventive maintenance where all aspects are covered regarding replacement parts and manpower. It includes all auxiliaries and driven equipment as well accounting for load variations, site conditions and fuel quality.

Optimized spare part consumption

An optimized replacement schedule including component refurbishment ensures maximum usage of hot gas path components and lowest life cycle cost. On-site parts storage is optimized to include only operation consumables and operation back-up parts, since components needed for planned maintenance are delivered from Siemens in time for the respective maintenance outages.

Customer availability

Siemens has extensive experience in the maintenance and field service of gas turbines spanning over 50 years. Project management is our speciality. Our experience gained in hundreds of successful projects enables us to plan each inspection exactly. And we never leave a site until everything is up and running properly.



Availability facts

- Robust DLE system, does not require tuning of combustion system due to seasonal changes
- 17 days in 17 years maintenance concept
- 24 hour gas generator swap from load to load
- Option to choose between on- or offsite maintenance
- 34,000 operating hours between hot parts inspection and 68,000 operating hours between major overhaul for base load operation

5

SGT-750 Technology and Performance

■ Single rigid compressor rotor body

The rigid rotor body is the foundation of the rotor stability in the SGT-750. This stability enables more uniform and smoother run-ups in all conditions.

■ Horizontal and vertical split casings

Horizontal split for unbeatable accessibility in the compressor and vertical split for optimized clearances and stability in the turbine. This combination of casing design unites the best qualities of two concepts into one.

■ Variable guide vanes

Two variable guide vanes in the compressor offer optimized performance even in the most extreme conditions.

■ 13-stage axial-flow compressor

The compressor is a 13-stage axial flow compressor with a 23.8:1 pressure ratio. It offers a controlled diffusion airfoil for high efficiency. The axial blade attachment grooves allow complete compressor reblading without rotor removal.

■ Bearings and balancing planes

The rotor is supported by mineral-oil-lubricated long-life tilting pad bearings. Five easy-to-reach balancing planes allow field balancing without disassembly.



■ **Can combustors with DLE burners**

The can combustion chamber system consists of eight cans with a double skin serial-cooled design and eight transition ducts of double-skin parallel-cooled design, suitable for both liquid and gaseous fuels. This can design provides for excellent maintainability and easy-access exchangeability without casing disassembly.

■ **Two-stage compressor turbine**

The two-stage compressor turbine blades are made of state-of-the-art proven materials with several years of confirmed performance. The blades and guide vanes are cooled with a combination of internal convective cooling and film cooling.

■ **Online monitoring**

All SGT-750 are mapped with infrared (IR) cameras during engine delivery test and during regular scheduled inspections.

■ **Early warning – faster maintenance**

The IR cameras enable early detection of possible deviations, helping to keep the turbine in a good, healthy condition. The IR images also speed up the service procedure by giving accurate diagnostic information to technicians.

■ **Two-stage high-speed free power turbine**

The free turbine is a two-stage high-speed module, nominally running at 6,100 rpm.



SGT-750 for Power Generation

Compact and reliable

The SGT-750 makes a perfect option for power generation applications. The fast start-up and cycling capability both support intermediate to continuous operation with improved turndown capability. Through the use of a free power turbine, the SGT-750 is also well suited where grid requirements call for maintained power in case of frequency drop. Siemens Dry Low Emission combustion system optimizes fuel use and minimizes NO_x emissions, all to contribute to highest profitability and lowest environmental impact.

- Lightweight construction offers leading weight-to-power ratio
- Small footprint means easy fitting
- Modular and flexible package design
- Single-lift capability
- Reliability >99%

Applications for power generation

Siemens offers a wide range of solutions for power generation, from stand-alone installations to complete power plants.

Industrial power generation

- Simple-cycle and combined-cycle power plants for base load, standby power and peak lopping.
- Cogeneration for industrial plants with high heat load and district heating schemes.

Power generation in the oil and gas industry

- Onshore: for oil field service, refinery applications, emergency and standby power generation, including highly efficient cogeneration solutions for oil & gas applications.
- Offshore: on oil platforms and FPSO (Floating Production, Storage & Offloading) vessels.



The power gen package measures 20.3 x 4.8 m.

Power output: 37.03 MW(e)

- Fuel: Natural gas
- Frequency: 50/60 Hz
- Electrical efficiency: 39.5 %
- Heat rate: 9,120 kJ/kWh (8,644 Btu/kWh)
- Compressor pressure ratio: 23.8:1
- Exhaust gas flow: 114.2 kg/s (251.8 lbs/s)
- Exhaust temperature: 459° C (858° F)
- NO_x emissions: ≤ 15 ppmV (DLE, corrected to 15 % O₂, dry)

The SGT-750 gas turbine train comes mounted on a base frame with single-lift capability and a base-frame split between driver and driven equipment. For onshore applications, driven equipment can also be located on a separate concrete foundation. The lubrication oil system is installed inside the package and all auxiliary systems are mounted on the base frame. Liquid fuel, water rejection and fire fighting systems are kept separate.

SGT-750 for Mechanical Drive

Robust and reliable

The SGT-750 with its twin shaft configuration is designed for mechanical drive, driving compressor or pumps either onshore or offshore. The free power turbine enables the turbine to start with a minimum of starting power even when connected to fully pressurized compressor loops. The robustness and built-in serviceability provides minimum downtime days and ensure maximum customer value.

- Minimized starting power
- High starting torque
- Variable compressor speed, 50-105%
- High load on low power turbine speed
- Reliability >99%

Applications for mechanical drive

Siemens offers a full range of extended scope and turnkey solutions for mechanical drive applications. Utilizing decades of experience, no application in any environment is impossible.

Compressor applications

- Gas injection, gas processing, LNG, pipelines as well as other oil & gas applications.
- Air separation and petrochemical industry.

Pump applications

- Water injection and fluid transmission applications.

The driver package footprint measures 12.8 x 4.3 m.

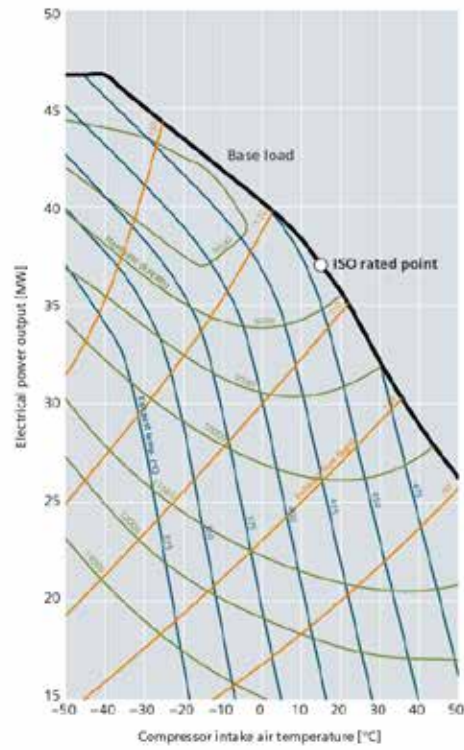
Shaft power:

51,213 bhp (38.19 MW)

- Fuel: Natural gas
- Efficiency: 40.7 %
- Heat rate: 9,840 kJ/kWh (6,248 Btu/bhp)
- Turbine speed: 3,050–6,405 rpm (50-105%)
- Compressor pressure ratio: 23.8:1
- Exhaust gas flow: 114.2 kg/s (251.8 lbs/s)
- Temperature: 459° C (858° F)
- NO_x emissions: < 15 ppm/V (DLE, corrected to 15 % O₂ dry)



SGT-750 Performance Data

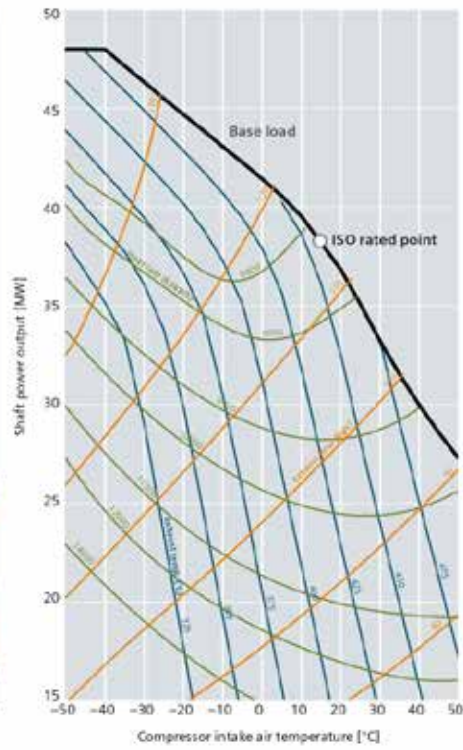


Nominal performance SGT-750 Power Generation

Gaseous fuel

ISO Operating conditions:

Ambient pressure	1.013 bar (a)
Relative humidity	60%
Power turbine speed	6,100 rpm
Gas	100% CH ₄
Inlet duct press. loss	0 mbar
Outlet duct press. loss	0 mbar
Generator frequency	50 Hz
Power factor	0.9

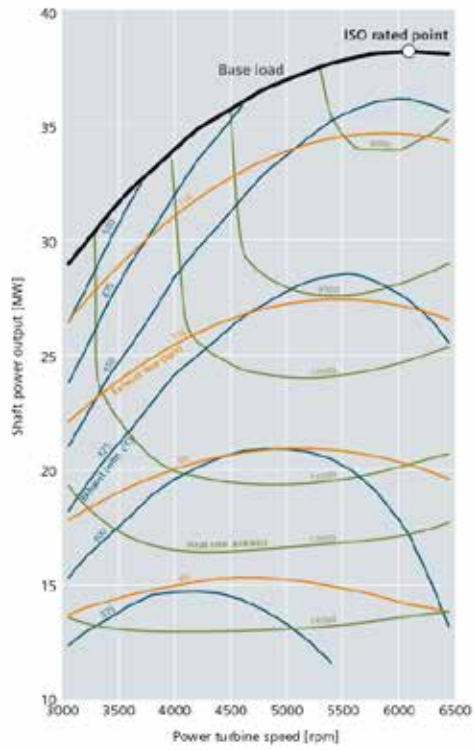


Nominal performance SGT-750 Mechanical Drive

Gaseous fuel

ISO Operating conditions:

Ambient pressure	1.013 bar (a)
Relative humidity	60%
Power turbine speed	6,100 rpm
Gas	100% CH ₄
Inlet duct press. loss	0 mbar
Outlet duct press. loss	0 mbar



Nominal performance
SGT-750 Mechanical Drive
 Gaseous fuel

ISO Operating conditions:

Ambient pressure	1.013 bar (a)
Ambient temperature	15°C
Relative humidity	60%
Gas	100% CH ₄
Inlet duct press. loss	0 mbar
Outlet duct press. loss	0 mbar



**Published by
Siemens AG 2015**

Power and Gas Division
Distributed Generation
Freyeslebenstrasse 1
91058 Erlangen, Germany

For more information, please contact
our Customer Support Center.
Phone: +49 180 524 70 00
Fax: +49 180 524 24 71
(Charges depending on provider)
E-mail: support.energy@siemens.com

Article-No. PGDG-810001-00-7600
Printed in Germany
Dispo 34806
K12 130014, WS 071515

All rights reserved. Trademarks mentioned in
this document are the property of Siemens AG,
its affiliates, or their respective owners.

Subject to changes and errors. The information given
in this document only contains general descriptions
and/or performance features which may not always
specifically reflect those described, or which may
undergo modification in the course of further develop-
ment of the products. The requested performance
features are binding only when they are expressly
agreed upon in the concluded contract.