

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS

FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS E INGENIERÍA

CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN INGENIERÍA
Y CIENCIAS APLICADAS

ESTIMACIÓN DE LOS ESFUERZOS TÉRMICOS EN UNA CÁMARA DE COMBUSTIÓN

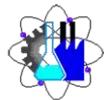
PARA OBTENER EL GRADO DE:
INGENIERO MECÁNICO

PRESENTA:
DIAZ MEDINA RODRIGO

ASESOR:
DR. JUAN CARLOS GARCÍA CASTREJÓN

CUERNAVACA MOR.

NOVIEMBRE 2020



Facultad de Ciencias
Químicas e Ingeniería

Cuernavaca, Mor., a 14 de SEPTIEMBRE del 2020.

**FORMA T-4A
NOMBRAMIENTO COMITÉ REVISOR**

**DR. ARTURO MOLINA OCAMPO
DR. JOSE ALFREDO ARIZA ESPINOZA
DR. MARIO ACOSTA FLORES
DRA. MIRIAM NAVARRETE PROCOPIO
DR. JUAN CARLOS GARCIA CASTREJON
P R E S E N T E S**

Me permito comunicarles que han sido designados integrantes del **COMITÉ REVISOR** del trabajo de:

TESIS

Titulado:

ESTIMACIÓN DE LOS ESFUERZOS TÉRMICOS EN UNA CÁMARA DE COMBUSTIÓN

Que presenta el **C. DIAZ MEDINA RODRIGO**

Del programa educativo de: **INGENIERÍA MECÁNICA**

A T E N T A M E N T E
Por una humanidad culta

**DRA. VIRIDIANA AYDEÉ LEÓN HERNÁNDEZ
DIRECTORA**

(SE ANEXA FIRMA ELECTRÓNICA)

D I C T A M E N

**DRA. VIRIDIANA AYDEÉ LEÓN HERNÁNDEZ
DIRECTORA DE LA FCQeI
P R E S E N T E**

En respuesta a su amable solicitud para emitir DICTAMEN sobre el trabajo que se menciona, me permito informarle que nuestro voto es:

VOTO	NOMBRE	FIRMA
*	DR. ARTURO MOLINA OCAMPO	
*	DR. JOSE ALFREDO ARIZA ESPINOZA	
*	DR. MARIO ACOSTA FLORES	
*	DRA. MIRIAM NAVARRETE PROCOPIO	
*	DR. JUAN CARLOS GARCIA CASTREJON	

**Aprobado por el comité revisor, se anexan firmas electrónicas*

SRPM

Se expide el presente documento firmado electrónicamente de conformidad con el ACUERDO GENERAL PARA LA CONTINUIDAD DEL FUNCIONAMIENTO DE LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS DURANTE LA EMERGENCIA SANITARIA PROVOCADA POR EL VIRUS SARS-COV2 (COVID-19) emitido el 27 de abril del 2020.

El presente documento cuenta con la firma electrónica UAEM del funcionario universitario competente, amparada por un certificado vigente a la fecha de su elaboración y es válido de conformidad con los LINEAMIENTOS EN MATERIA DE FIRMA ELECTRÓNICA PARA LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE ESTADO DE MORELOS emitidos el 13 de noviembre del 2019 mediante circular No. 32.

Sello electrónico

VIRIDIANA AYDEE LEON HERNANDEZ | Fecha:2020-09-14 20:26:45 | Firmante

ZBigXyMsKzw7xZAJNCfz6XogfVgFRw4vJDq5qvlWf1Qd4ceXhNRa3G2HNpQxAt+hKazJyxEFNnQuS5KO7sMQMQoMqe5AReGHFDILHLkpwYeykFchwUoenq03gkBpiHHp0JJ4b
nlDxvzYuybgITRoDNVnDsL8d+dndus+yuLfdt8bvz6gkcrFeiDrUUltqhM5JIS0I4h9y/lLVqOz7i14cNgE55t7itpVzOg6pQ4PkZ505AZ7UizAhF8xXOrnZvKD9CHFYoyiJmvRxqgfjL7Yk
45JxvKRNRPTq7e/OKg8iKbeFyvvUUGgteu0j3+D5RLjpfIAAqph8hMW/pxQhX7/A==

Puede verificar la autenticidad del documento en la siguiente dirección electrónica o
escaneando el código QR ingresando la siguiente clave:



w2NJVj

<https://efirma.uaem.mx/noRepudio/APBLfbqRnFLQaHxtbnouTsCscA2bqgsI>



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS

Se expide el presente documento firmado electrónicamente de conformidad con el ACUERDO GENERAL PARA LA CONTINUIDAD DEL FUNCIONAMIENTO DE LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS DURANTE LA EMERGENCIA SANITARIA PROVOCADA POR EL VIRUS SARS-COV2 (COVID-19) emitido el 27 de abril del 2020.

El presente documento cuenta con la firma electrónica UAEM del funcionario universitario competente, amparada por un certificado vigente a la fecha de su elaboración y es válido de conformidad con los LINEAMIENTOS EN MATERIA DE FIRMA ELECTRÓNICA PARA LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE ESTADO DE MORELOS emitidos el 13 de noviembre del 2019 mediante circular No. 32.

Sello electrónico

MIRIAM NAVARRETE PROCOPIO | Fecha:2020-09-18 12:42:00 | Firmante

OMIC9xR9s/iRj70H04U68Yes9yF+zD9BdM9btQIEdmMpDZhJahHiHlyX1TbWtr96pUScYgubFSGnlm3MGSvaP7tStZn689A9Qnz8l2m3deVly0x7x5+5S/kMP/ggSTmT/XHTRy7rMtid7c3ctGZahMtxox5pesw5ZzIB2QwYUqbOTGiXfDJBfgAHeNCPN8eFtQTnYWGryfmi9v0vC3mrlaccNASash+Q3W0Ek7g0R96U3iRp1B0pmmjKlz+Ev2pASHLJVZs3Qsv9jY2YFbh5AR1REIsWolzG0DdP4jEUHjQusr0fIWBHRZSvmw2+Y81Ymiw+b/X1OVDvWPhcZsiw==

JUAN CARLOS GARCIA CASTREJON | Fecha:2020-09-18 13:19:07 | Firmante

a/9yCfGjyzqhOaKptxrcjChHFAt2g1AsZ/SOHPNK8UU8qn+gwAkcFnwEz4IbG/FuVd+LOHqqW4aQwRgNuO4wHwKB+mL8coEMGKE1al2vQ9+oj5OxvVUB5lp9wc02JeAzWY+I/Sauk0GPcLClj1G/SsZl3NXGG+qOsuUJc/jY9EvS0e8ic+2dA0P+loiVfucG7K9NqxWuTgdI/a3jyw6ePk3dVOT3aXVLPjPlzZDsToSMk2FAhmoGmyaNJwBApe2tNtJlhHwLk9GEm/wzHASzbt3hSOYg6mQtdjwblPmNvUkg4yNEXlYrKf2yIfB4ecEMSqfFrmv8TFwS2eHufRHCA==

MARIO ACOSTA FLORES | Fecha:2020-09-18 14:16:25 | Firmante

W+GUyWs5pxB0zMO7tUndD3e7RFTkBrafiBvPnVxDPhT+ZGIH6sLajjUDCfRgBUJO/8KPeWwSfHgdFbNyyASSduWf8lrqKPBwVxy/zEL8eNEvPZaqJ1dCXPI/YUIOpLWtAOZCoSQjXu5yuURydczqQwXLJUB5cAR7GN64WBwT6Vvcnxe6HfVeOdPyU0ymqRHolUcKu7F/Zl49q3C9ipYDoAaEWypwGS0cmCsoAuz7iCtyCRiDAUeijEDp4ncV3Bv/Fhwe6c22V6EBjPofFih8Ti2VMS8BKFZM/POat5ANKgK5kwSEfMXBFqRvm2x2KKzWaDm7+RaN6O958T5nLeLw==

ARTURO MOLINA OCAMPO | Fecha:2020-09-18 17:45:58 | Firmante

b3cWhSEhiVYhJrxuStA3Mu9IkftY+Ia+hxumpATS8/KbMnbxm8zStBRLAZuFACY1kjXBiuGSI80cEhIrgTTzh6nytOHjtbBB7Lc7xBKQJ4SHWdgcJ1Hlee7S3sxHnOeGwwe2JlpOiNI/zPsZ/YSWbkfA8AhXUeWbcv86X6/zlpNx51SQ5IsWu0yaquX3+10Ah0xW/NZkm2CAF/kZrv775npKy0BQ+d7oWhh0trjZYlpGAbZePsCS6/S/YNijlK/z3D7QYR81QkHqTb5jxbeXGYE3HKCDh00YRzdzLJClcuyhBYTeVfYwPRrGrehDy619FtskJ0CubpAiZlHdw==

JOSE ALFREDO ARIZA ESPINOZA | Fecha:2020-09-19 23:55:08 | Firmante

G4AAR4znHudQmoY3/6S6ELWklq0WTJ6JKzXUrQFGPUVYMrFEIbZ5N+uKTwdffMFTFqS18k5eiPDy1VehWDwiHy5XQL7hjvP6St1FbWfNmbxv5+zn8HJtdg5fBk1fuHp0arwheT5houGAa9waZQHsSEnhFYmUPMIJOxYfzt0EU2XqLQkiNcme8fU+NIHyIv2bp47eNrEWSV0wlSXVCUCeTuU6Htin/uwyrBguCLnSwY/sancDw9Wgg3wOdPCSaLZBBdUTqJfGchReDmL4nFse1yPYjKsIEtprNqm4ZqQK7Uv/YuCu6w3yZOFxUxUQsoSeXk518PRmF+FYHQREQGg==

Puede verificar la autenticidad del documento en la siguiente dirección electrónica o escaneando el código QR ingresando la siguiente clave:



ifU3tz

<https://efirma.uaem.mx/noRepudio/YAqtM9q8NvYrgZ7u5EYNPUqCAeBTe2lp>



RESUMEN

Gracias a los avances tecnológicos, se han creado fuentes de energía para usos cotidianos más limpios, esto ayudando a reducir los gases contaminantes y frenar el efecto invernadero que está afectado a nuestro medio ambiente. Científicos implementan maquinas más eficientes, el cual son llamadas maquinas ecológicas.

Una de las maquinas implementadas es la microturbina de gas, que hoy en día es uno de los artefactos más usados para la generación de electricidad, sin embargo, se ha necesitado de muchas investigaciones para la microturbina de gas y sus componentes ya que su funcionamiento va ligado a altas temperaturas creadas por la quema de combustible dentro de la cámara de combustión.

En este trabajo se realizó el cálculo numérico de los esfuerzos térmicos generados por las altas temperaturas provenientes de la combustión y a su vez como se ve afectado el material.

Mediante herramientas computacionales se realizó el fenómeno de combustión por medio de dinámica de fluidos computacional (CFD) una vez que se obtuvieron las temperaturas, se calcularon las tensiones generadas en la carcasa de la cámara de combustión mediante el método de elemento finito (FEM).

Los resultados obtenidos ayudaron a identificar donde se crean los altos esfuerzos térmicos, en este caso los esfuerzos más altos se obtuvieron en la zona primaria que es donde se crean remolinos, retardando el flujo, así también en esta zona es donde se mantiene la llama directa.

DEDICATORIA

A mis padres RICARDO Y ELISA por darme lo necesario para llegar hasta este punto de mi vida, por guiarme en todo momento hacia un camino de éxito y educación, por recibirme con los brazos abiertos en cada fracaso y por qué siempre están cuando los requiero.

A mis hermanos ANTONIO Y VÍCTOR por su compañía y consejos que me han brindado.

A SUSY SOLÍS por su cariño amor y comprensión a lo largo de toda esta trayectoria.

A mis amigos que estuvieron presentes para concluir este proyecto.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Autónoma del Estado de Morelos (UAEM) quien me abrió sus puertas para ofrecerme sus conocimientos.

Al Dr. Juan Carlos García Castrejón por las facilidades otorgadas para el desarrollo de esta tesis, así como sus conocimientos compartidos a lo largo del tiempo de conocerlo.

Al Centro de Investigación en Ingeniería y Ciencias Aplicadas (CIICAP)

A todos los profesores que me brindaron sus apoyos y conocimientos a lo largo de la carrera de ingeniería.

LISTA DE FIGURAS

2.1	Tobera divergente o difusor típico; (Kurt C. Rolle. 2006).	7
2.2	Deflector para crear una estabilización de la llama;(Power Generation Handbook. 2002).	8
2.3	Estabilización de la llama creada por arremolinamiento (Power Generation Handbook. 2002).	8
2.4	Esquema de cámara de combustión tipo tubular (A.G. Rivas 2003).	11
2.5	Esquema de cámara de combustión tipo tuboanular (A.G. Rivas 2003).	12
2.6	Esquema de una micro-cámara de combustión (A.G. Rivas 2003).	14
2.7	Etapas para la solución de problemas en CFD.	25
2.8	Esquema de una malla estructurada.	26
2.9	Esquema de una malla no estructurada.	27
3.1	Diagrama de acoplamiento entre CFD y FEM.	43
3.2	Esquema del quemador convencional; [Roback & Johnson 1983].	44
3.3	Perfil y dimensiones de la CC con acotaciones en mm.	44
3.4	Geometría modificada fluido-sólido, donde A) corresponde al sólido, B) fluido, C) la unión de fluido-sólido seccionada.	45
3.5	Discretización de fluido-sólido, donde la figura A) corresponde al fluido, B) sólido y C), D) la unión de los dos volúmenes.	46
3.6	Discretización no estructurada de la carcasa de la CC.	49
3.7	Elemento SOLID 226.	50
3.8	Sistema de coordenadas en la entrada del flujo oxidante.	52
3.9	Vectores de flujo en la entrada del oxidante.	53
3.10	Restricción de la cámara de combustión.	55
3.11	Comando para realizar el cambio de un elemento estructural SOLID 186 a SOLID 226.	55
4.1	Monitores a lo largo de la carcasa de la CC.	57
4.2	Contornos de temperaturas en la carcasa de la (CC), dirección de flujo es en el eje + X.	58
4.3	Contornos de temperaturas en corte axial y transversal al 50% de altura de la CC, dirección de flujo es en el eje + X	59
4.4	Contornos de presión en un corte axial de la CC, dirección de flujo es en el eje + X	60
4.5	Contornos de velocidad en un corte axial de la CC, dirección de flujo es en el eje + X.	61
4.6	Gráfica de los esfuerzos máximos generados en la carcasa de la CC	62
4.7	Contorno de esfuerzos térmicos durante dos segundos, dirección de flujo es en el eje + X	63
4.8	Esfuerzos térmicos a lo largo de la CC.	64
4.9	Contornos de desplazamientos dirección de flujo es en el eje + X.	65

LISTA DE TABLAS

3.1	Condiciones experimentales para las llamas N_2 diluidas de $O_2 - CH_4$. El caudal de CH_4 es de 0.047 mol/s y el caudal total es de 0.654 mol/s para cada condición	40
3.2	Mallas generadas para el análisis de convergencia	47
3.3	Índice de convergencia de malla	48
3.4	Propiedades Alloy 188 a 600°C	51

NOMENCLATURA

A = Área de flujo

D = Diámetro

E = Módulo de elasticidad

E = Energía

F = Fuerza

G = Módulo cortante

GCI = Índice de convergencia de malla

g = Aceleración gravitacional

H = Entalpía

h = Coeficiente de transferencia de calor

Q = Calor

q = Flujo de calor

T = Temperatura

P = Potencia

V = Volumen

XYZ = Grados de libertad

k_{eff} = Conductividad térmica

k_t = Conductividad térmica turbulenta

\vec{J}_j = Difusión de especies

CARACTERES GRIEGOS

α = *Coficiente de expansión térmica*

γ = *Relación entre elementos de malla*

ε = *Deformación*

ϵ = *Tensor*

k = *Conductividad térmica*

μ = *Viscosidad*

ρ = *Densidad*

σ = *Esfuerzo*

ν = *Relación de Poisson*

ξ = *Error relativo*

ω = *Velocidad angular*

ÍNDICE

	RESUMEN	I
	DEDICATORIA	II
	AGRADECIMIENTOS	III
	LISTA DE FIGURAS	IV
	LISTA DE TABLAS	V
	NOMENCLATURA	VI
	CARACTERES GRIEGOS	VII
1	INTRODUCCIÓN	1
1.1	Estado del arte	3
1.2	Justificación	4
1.3	Alcance	5
1.4	Objetivo general	5
1.5	Objetivos específicos	5
2	MARCO TEÓRICO	6
2.1	Cámara de combustión	6
2.2	Elementos de la cámara de combustión	7
2.3	Tipos de cámaras	10
2.3.1	Cámara tubular	10
2.3.2	Cámara tuboanular	11
2.3.3	Cámara anular	12
2.4	Micro cámaras de combustión	13
2.5	Combustión	14
2.6	Esfuerzo	16
2.7	Esfuerzos térmicos	17
2.7.1	Esfuerzos térmicos en los componentes de la microturbina de gas	21
2.8	Dinámica de fluidos y CFD	24
2.8.1	Etapas de una simulación CFD	25
2.8.2	Ecuaciones gobernantes	28
2.8.3	Modelos de turbulencia	30
2.8.3.1	Modelo de turbulencia $\kappa - \varepsilon$	31
2.9	Conjugado de transferencia de calor	32
2.10	Análisis por elementos finitos	34
2.10.1	Ecuaciones gobernantes	35

2.10.2	Etapas de una simulación FEA	38
3	CÁLCULO NUMÉRICO	39
3.1	Análisis termoquímico	39
3.2	Acoplamiento entre CFD y FEM	43
3.3	Pre-proceso de CFD y FEM	43
3.3.1	Generación de geometría	43
3.3.2	Discretización de geometría	45
3.3.3	Análisis de convergencia de malla	46
3.3.4	Discretización FEM	48
3.3.4.1	Selección de elemento	49
3.4	Proceso	50
3.4.1	Desarrollo del modelado de CFD	50
3.4.1.1	Definición de las condiciones de trabajo	50
3.4.1.2	Definición del modelo numérico	53
3.4.1.3	Parámetros para la solución numérica	54
3.4.2	Definición de las condiciones de trabajo FEM	54
4	ANÁLISIS DE RESULTADOS	56
4.1	Resultados CFD	56
4.1.1	Distribución de temperaturas	56
4.1.2	Contorno de presión	60
4.1.3	Contorno de velocidad	61
4.2	Resultados FEM	62
4.2.1	Esfuerzo térmico	62
5	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	66
5.1	Conclusiones	66
5.2	Recomendaciones	67
6	BIBLIOGRAFÍA	68

CAPÍTULO

1

INTRODUCCIÓN

En los últimos años, entre los problemas que preocupan a la sociedad se encuentra la escasez de los combustibles fósiles. Si bien sabemos que los principales contaminantes en nuestra atmósfera provienen de la quema de ellos también producen la energía que utilizamos para satisfacer diversas necesidades de nuestra vida diaria. Algunos investigadores promueven acciones para reducir el efecto del calentamiento global con el uso de máquinas ecológicas y utilizando fuentes de generación de energía limpia y renovable con la finalidad de reducir la producción de gases de invernadero.

Actualmente se desea crear o mejorar máquinas más eficientes para ser utilizadas en la generación de energía eléctrica. Una de estas máquinas con dichas especificaciones es la microturbina de gas que se ha convertido en una opción viable para la generación de energía eléctrica.

La microturbina es un generador de energía acoplado a una turbina de gas a pequeña escala capaz de suministrar energía eléctrica de forma local desde unos pocos kW hasta algunos centenares de kW, sus características son el bajo nivel de emisiones, ruido, peso reducido y dimensiones de la instalación. Por ello, pueden ser colocadas en sitios donde se requiera la producción de energía eléctrica, o en lugares sensibles a la contaminación ambiental o acústica.

Cuando la microturbina de gas (MTG) está en función soporta temperaturas muy altas debido a los gases provenientes de una cámara de combustión. De tal

manera que la cámara de combustión (CC) de un sistema de una MTG es un factor sumamente importante, ya que es donde se lleva a cabo la transformación de la energía del combustible incrementando la entalpía del aire y de los gases de combustión. Además, es donde se controlan las temperaturas y la producción de gases contaminantes. Estas altas temperaturas, provocan esfuerzos térmicos poniendo en riesgo la integridad del sistema que pueden reducir la vida útil de sus componentes.

Los esfuerzos térmicos se presentan cuando el objeto se encuentra restringido y se varía la temperatura en un lapso de tiempo mínimo, se incrementan cuando hay cambios de carga (temperatura o velocidad) por ejemplo, cuando en el ciclo de arranque hay un exceso puede provocar la aparición de grietas o fracturas en el material. Es por ello que el análisis de los esfuerzos térmicos en una MTG es muy importante.

Las desventajas que se tienen en el diseño de una MTG son: el elevado costo y el tiempo que se emplea en pruebas experimentales, por lo que existe la técnica CFD (Dinámica de Fluidos Computacional) y FEM (Método de Elemento Finito), ambos son utilizados para el desarrollo de este trabajo.

En este trabajo se analiza numéricamente la presencia de esfuerzos térmicos dentro de una cámara de combustión, el cálculo de tales esfuerzos térmicos llevados a cabo con dos tipos de análisis: térmico y estructural. La finalidad del análisis térmico es la obtención de la distribución de temperaturas en el material. Mientras que el análisis estructural se encarga del cálculo de los esfuerzos térmicos.

1.1 ESTADO DEL ARTE

Las microturbinas de gas han pasado de ser solo un sistema de investigación, a un sistema de utilización diaria, debido al interés en las últimas décadas que varias áreas mostraron el uso y aplicación de estas máquinas.

En la actualidad existen algunas limitantes en su desarrollo, tal como los materiales a utilizar en su manufactura los cuales deben soportar esfuerzos a altas temperaturas provenientes de la combustión.

A medida que la tecnología avanza, ha sido capaz de desarrollar un proceso de combustión más eficiente. Gracias a los materiales que soportan altas temperaturas, pues la potencia de salida y la eficiencia térmica en una turbina de gas están fuertemente ligadas con la temperatura de funcionamiento; es decir, para un rendimiento mayor de la turbina de gas se necesitaran valores de temperatura más altas.

La cámara de combustión es fundamental para una microturbina de gas tanto su diseño como su buen funcionamiento ya que tiene la tarea de controlar la quema de grandes cantidades de combustible y aire, liberando calor con temperaturas que pueden dañar permanentemente los componentes de la microturbina.

En los últimos años el implemento de herramientas computacionales ha facilitado el trabajo de los ingenieros y la solución de problemas. Hoy en día con esta implementación se puede resolver un sinfín de problemas ligados a la ingeniería como es el caso de turbomaquinaria. Actualmente esta herramienta computacional, se han desarrollado estudios ligados a los esfuerzos térmicos en diferentes componentes de MTG. Tal es el caso del artículo publicado en el año 2013 por Tenango P. Oscar et. Al, donde se llevaron a cabo el cálculo de los esfuerzos térmicos en los alabes del rotor de una microturbina de gas. El análisis se realizó en dos etapas, la primera con CFD donde se calcula la distribución de temperaturas y la segunda con FEM donde se obtuvieron los esfuerzos térmicos. Muchos autores han empleado el método de elemento finito para calcular esfuerzos térmicos. Entre ellos podemos mencionar los siguientes: [C Rajesh

Babu 2014], [Lucjan Witek et. al 2010], [Geewook Song et. al 2011] y [Mustafa A.H. et. al 2006].

Mientras L.S.V.Prasad et. Al, 2014 realizaron un análisis termo-estructural en un tubo de llama de una turbina de gas utilizando el mismo método, con el fin de analizar el esfuerzo generado por las altas temperaturas que son sometidos estos elementos. Un aspecto muy importante a destacar en este análisis son las concentraciones térmicas dentro y fuera del tubo de llama. Encontrando que la concentración de temperatura es alta en las zonas de precombustión y combustión dentro del tubo de llama.

En 2014, Hokyu Moon et. al, utilizaron el FEM para el cálculo del esfuerzo térmico en un revestimiento de una turbina de gas posteriormente fue calculada la vida útil para una combustión completa. J.O. Dávalos et. al en 2011 realizaron un análisis numérico-experimental de esfuerzos térmicos en un cilindro hueco posteriormente dicho trabajo fue validado mediante FEM.

1.2 JUSTIFICACIÓN

El tema de investigación propuesto, surge debido a la generación de esfuerzos térmicos que se presentan durante el arranque y paro de las microturbinas de gas (MTG) los cuales son causados por las altas temperaturas de los gases de combustión producidos en la cámara de combustión. Se conoce que el cambio de temperaturas en un determinado tiempo puede cambiar las propiedades de los materiales, produciendo grandes esfuerzos, creando deformaciones o rupturas en el material. La cámara de combustión trabaja con fluido, un combustible que tiene la capacidad de arder en presencia de un comburente (oxígeno en la mayoría de los casos) en una cámara de combustión, mediante la aplicación de una energía de activación, que puede ser una chispa. Las combinaciones de estos elementos dan como resultado una combustión llevada a cabo a temperaturas muy altas,

esto sumado al pequeño tamaño de la MTG da como resultado una transferencia de calor alta, afectado así a sus componentes y su rendimiento.

1.3 ALCANCE

En este proyecto se estudia de forma teórica el comportamiento de las temperaturas que se generan en una combustión llevada a cabo dentro de una (CC) durante su arranque, obteniendo así el cambio de temperatura que se observa dentro de la cámara de combustión para visualizar los cambios significativos que tiene la interacción fluido-estructura mediante la transferencia de calor. También se obtendrán los esfuerzos térmicos que surgen en la carcasa de la (CC).

1.4 OBJETIVO GENERAL

- Calcular los esfuerzos térmicos en una cámara de combustión de una microturbina de gas.

1.4.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Calcular con CFD la distribución de temperaturas en la cámara de combustión.
- Obtener los esfuerzos térmicos utilizando FEM con las temperaturas obtenidas con CFD.

CAPÍTULO

2

MARCO TEÓRICO

En este capítulo se mencionan algunos conceptos básicos para desarrollar y entender el trabajo realizado como: cámaras de combustión, esfuerzos térmicos, transferencia de calor, análisis por elemento finito, entre otros. También se menciona las ecuaciones involucradas para la solución del fenómeno en estudio.

2.1 CÁMARAS DE COMBUSTIÓN

Una cámara combustión es un recipiente que ingresa aire comprimido proveniente del compresor, al cual se añade por medio de un inyector, el combustible, que quemará en forma ininterrumpida. El producto de la combustión, en este caso los gases, dejan la cámara de combustión (CC) a una alta temperatura. Por ello, la adecuada combustión es uno de los principales factores de estos sistemas, pues gracias a ella se lleva a cabo la transformación de la energía del fluido en energía cinética. El proceso de combustión debe controlarse y contar con ciertas características para lograr que la flama permanezca encendida. También debe cumplir con las siguientes especificaciones para lograr su óptimo funcionamiento: Combustión completa, estabilidad de la combustión, una distribución satisfactoria de la temperatura de salida, una larga vida útil y facilidad de mantenimiento, entre otras [Srinivasa Sharma et. al 2015].

2.2 ELEMENTOS DE UNA CÁMARA DE COMBUSTIÓN

Un dispositivo de combustión estándar consta de al menos un difusor, una boquilla de inyección de combustible y una carcasa. Una cámara de combustión está dividida en tres zonas: una zona primaria, intermedia y la zona de dilución.

- **DIFUSOR**

La función principal de un difusor es reducir la velocidad de entrada del aire que viene del compresor con una pérdida de presión aceptable. Una cámara sin difusor prácticamente no cumpliría los requerimientos de una cámara de combustión, ya que la alta velocidad no favorece la combustión. En la Figura 2.1 Se observa un difusor común utilizado en cámaras de combustión empleado para reducir la velocidad y crear alta presión.

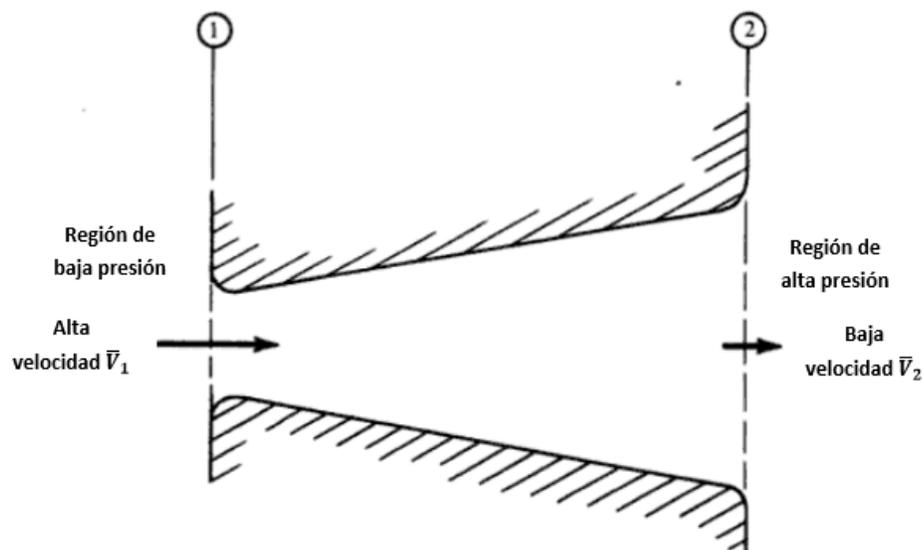


Figura 2.1 Tobera divergente o difusor típico (*Kurt C. Rolle, 2006*)

- **ZONA PRIMARIA**

La función de esta zona es anclar la flama por medio de vórtices, los cuales son creados instalando un deflector (Figura 2.2), que realiza una segunda función: reducir aún más la velocidad para permitir una combustión estable. Con ayuda del deflector se crea un flujo toroidal en reversa detrás del deflector, haciendo que los

gases sean quemados completamente, obteniendo así una circulación constante de flujo, ayudando a que la llama sea estabilizada y aporte una ignición continua.

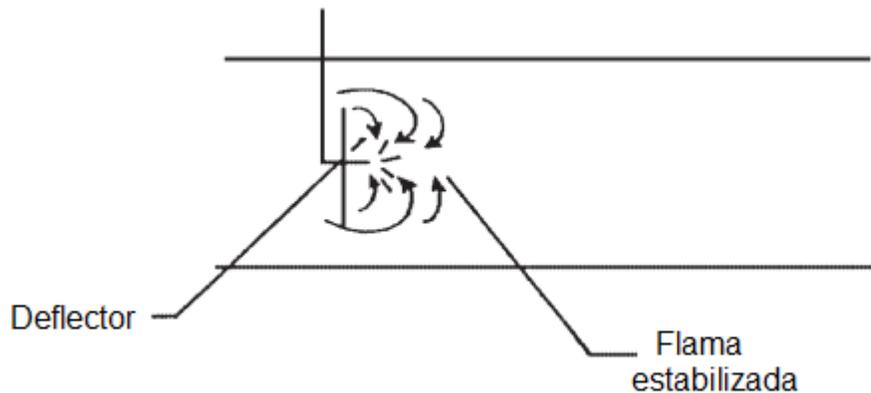


Figura 2.2 Deflector para crear una estabilización de llama (Power Generation Handbook 2002).

Se han utilizado otros métodos para estabilizar la llama, por ejemplo, mediante la acción de un vórtice de gran magnitud que es creado por aletas con un determinado ángulo alrededor de la boquilla del combustible, conocido como estabilizador por arremolinamiento, algunos estudios han mostrado que este tipo de configuración tiene una gran eficiencia en cuanto el ahorro de combustible y bajas emisiones [Minsung Choi et. Al, 2016, H. S. Zhen et. A,l 2013, T. Parra et. Al, 2013]. Mientras, otros estudios revelan que este estabilizador crea zonas de recirculación, produciendo una retención de calor y altos niveles de transferencia de calor [Teresa Parra et. al,2015, Valera-Medina et. al, 2009].

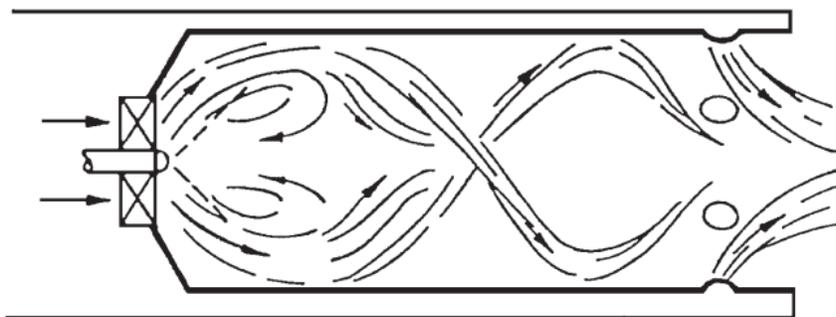


Figura 2.3 Estabilización de la llama creada por arremolinamiento (Power Generation Handbook 2002).

- **ZONA INTERMEDIA**

La función de la zona intermedia es disminuir la temperatura de la zona primaria, de lo contrario, si el fluido proveniente de la zona primaria es muy alto, la reacción de disociación presentaría concentraciones significativas de monóxido de carbono (CO) e hidrógeno (H₂) en los gases de flujo. En caso de que estos gases pasen directamente a la zona de dilución y se enfriaran rápidamente por la adición de grandes cantidades de aire, la composición del gas se "congelaría", y el CO, podría no quemarse, haciendo al sistema ineficiente, perjudicaría también en la combustión y a la atmósfera al ser un contaminante.

- **ZONA DE DILUCIÓN**

El trabajo de la zona de dilución es admitir los gases que quedan después de la combustión y proporcionar un flujo de salida con una distribución de temperatura aceptable para la turbina.

- **CARCASA**

La carcasa de una turbina está diseñada para proteger y dar soporte a las partes internas que la componen, está compuesta por un conjunto de piezas duras y resistentes. La carcasa además de proteger aísla el interior de la turbina y la divide en 3 secciones longitudinales:

- Carcasa del compresor: Está compuesta por una sola capa que brinda soporte a los alabes fijos y conduce el aire de refrigeración a etapas posteriores en la turbina de gas.
- Carcasa de la cámara de combustión: Su finalidad es soportar altas temperaturas, el material seleccionado para las cámaras de combustión (CC) normalmente presenta una alta fatiga, razón por la que se debe construir de acero o de material refractario para protección térmica y

mecánica. La sustentación del armazón interior debe permitir la libertad de las dilataciones.

- Carcasa de la turbina de expansión: Cuenta al menos con 2 capas, una interna de sujeción para los alabes fijos y otra externa para distribuir el aire de refrigeración por el interior de los alabes. Debe también proveer protección térmica frente al exterior que puede ser de acero ferrífico.

2.3 TIPOS DE CÁMARAS

En la actualidad se usan tres tipos principales de cámaras de combustión para los motores de turbina de gas: Cámara múltiple, también llamada tubular, la de bote anular o turbo anular y la cámara anular. A continuación, se describe su operación y los principales arreglos que pueden presentar.

2.3.1 CÁMARAS TUBULARES

Este tipo de cámara de combustión (CC) se emplea en motores de compresor centrífugo y en los primeros tipos de motores de compresor de flujo axial. Las cámaras están dispuestas alrededor del eje y el aire entregado por el compresor se dirige por medio de conductos hacia el interior de las cámaras individuales. Constan cada una de ellas de su propio inyector procedente de una línea de suministro común, cada cámara tiene un tubo de llama interior alrededor del cual hay una carcasa de aire.

El aire pasa a través de la boca de entrada del tubo de llama y también entre el tubo y la carcasa exterior. Los tubos de llama independientes están todos interconectados. Esto permite que todos los tubos funcionen a la misma presión y que la combustión se propague alrededor de los tubos de llama durante el arranque del motor. Cuenta con un solo encendido por bujía, una vez que el proceso se ha

llevado a cabo no necesita encendido permanente, ya que la inyección de combustible continuo mantiene la estabilidad del proceso. Estas cámaras de combustión (CC), poseen una buena resistencia estructural y ligereza de peso, además de un mantenimiento más sencillo, además son muy adecuadas para turbinas de gas que trabajan con compresores centrífugos, en los que el flujo de aire es dividido por los álabes del difusor en corrientes separadas, alimentando cada una de ellas la cámara tubular correspondiente (ver Figura 2.4).

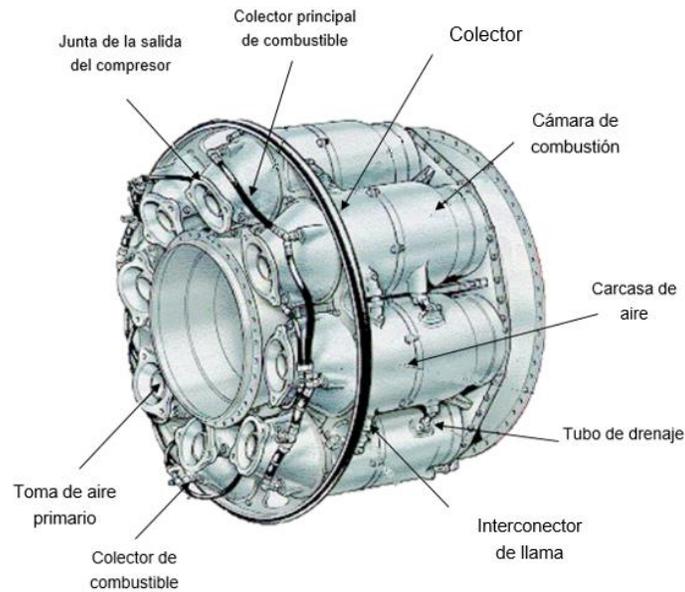


Figura 2.4 Esquema de cámara de combustión tipo tubular (A.G. Rivas, 2003)

2.3.2 CÁMARA TUBOANULAR

La cámara de combustión de bote anular es una combinación de los tipos múltiples y anulares. En esta cámara, varios tubos de llama están montados dentro de una carcasa de aire común, el flujo de aire es similar al ya descrito y esta disposición combina la facilidad para el mantenimiento y prueba del sistema múltiple con lo conciso del sistema anular. Una serie de tubos distribuidos alrededor del eje de forma uniforme conforman este diseño de cámara de combustión. Cada una posee un único inyector y bujía, las cuales tienen mejor resistencia estructural que las anulares, pero menor rendimiento y mayor peso. Además, si una de ellas deja de

funcionar sin ser detectada, pueden producirse grandes diferencias de temperaturas en la estructura. La pieza de transición, que es la que recoge todos los gases de combustión para dirigirlos a la turbina de expansión es una parte delicada de la instalación (ver Figura 2.5).

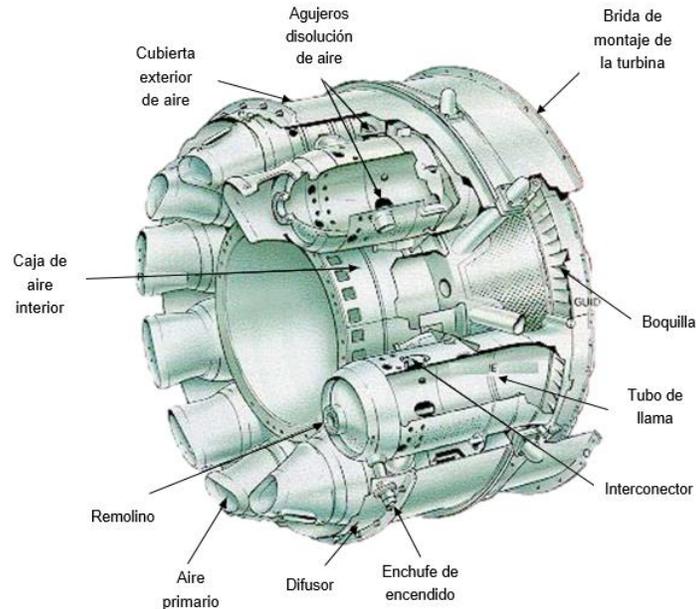


Figura 2.5 Esquema de cámara de combustión tipo tuboanular (A.G. Rivas 2003)

2.3.3 CÁMARA ANULAR

Este tipo de cámara de combustión (CC) consta de un solo tubo de llama, con forma anular, que está contenido entre dos carcasas, una interior y otra exterior, alrededor del conjunto de la turbina. El aire primario se mezcla con el combustible para la combustión llamada combustión no-premezclada, y los aires de refrigeración y dilución reducen la temperatura de los gases calientes que llegan a los álabes guía en la primera etapa de entrada en la turbina por lo que tienen un rendimiento más alto, pues el área de la pared de la cámara anular es mucho menor, así que la cantidad de aire de refrigeración requerido para evitar que la pared del tubo de llama se queme es menor, esta reducción del aire de refrigeración eleva la eficiencia de la combustión eliminando prácticamente el combustible no quemado, reduciendo

así la contaminación del aire. Por lo tanto, esta cámara de combustión relaciona mejor la mezcla aire-combustible y presenta menores pérdidas de presión.

Por otro lado, en este tipo de cámara la distribución uniforme de combustible-aire resulta difícil de lograr. A consecuencia de lo anterior, la distribución de temperaturas a la salida no es uniforme. Pese a sus buenas características estas cámaras son susceptibles a los esfuerzos térmicos generados por la mala uniformidad de las temperaturas, provocando la deformación de las paredes del tubo de llama.

2.4 MICRO CÁMARAS DE COMBUSTIÓN

Hoy en día las nuevas tecnologías han optado por la generación de energía a baja escala para satisfacer las crecientes demandas de dispositivos portátiles de energía desarrollando sistemas de generación de micro energía basados en la combustión [Y. Ju, K. Maruta, 2011]. El tamaño de las microturbinas es la característica que define la categoría del dispositivo. Son llamadas microturbinas por su tamaño comparado con las turbinas de gas de gran potencia, sin que esto signifique que sean modelos a escala ya que su diseño conlleva a resolver retos técnicos, tales como inflamabilidad reducida, baja estabilidad de llama, baja eficiencia de combustión y para realizar análisis aerodinámicos con bajo número Reynolds y no simplemente para escalar planos de grandes turbinas [Jun Li et. al 2016]. Por lo que los dispositivos de combustión de estos sistemas siempre se encuentran en una mejora continua, convirtiendo el estudio de las cámaras de combustión en un caso particular para cada sistema de tamaño micro, ya que su principal defecto son las altas temperaturas con las que opera.

Sin embargo, también presenta ventajas importantes, que no solo es su tamaño, sino la capacidad de disminuir las emisiones contaminantes, trabajar con otros combustibles y ocupar flujos pequeños de combustible. Además minimiza la inversión inicial, los costos operativos y el impacto ambiental [Firdaus Basrawia et. al, 2016, Eduardo Alvarez et. al 2016].

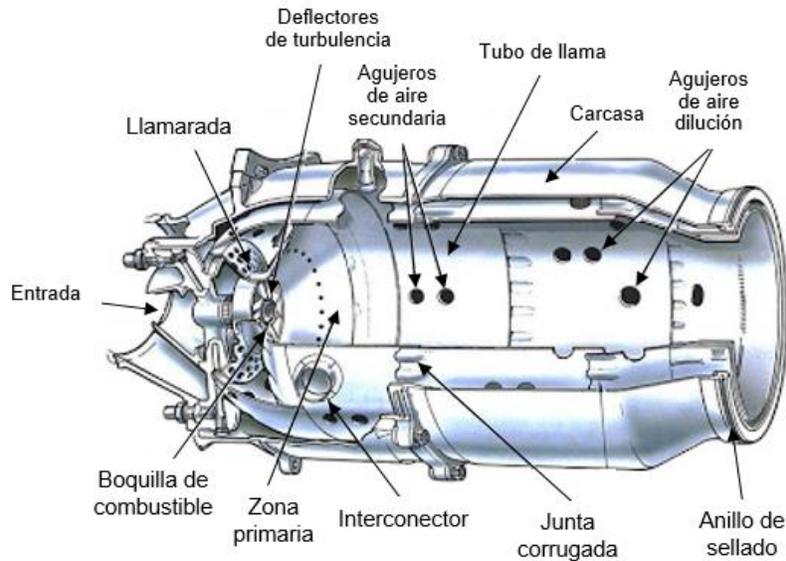


Figura 2.6 Esquema de una micro-cámara de combustión (A.G. Rivas 2003)

Las microturbinas de gas son sistemas de conversión de energía que se clasifican así por la cantidad de potencia que producen, deben su nombre no solo a su tamaño, sino a sus microcomponentes con las dimensiones adecuadas tal como la micro-cámara de combustión. Por ser una nueva tecnología, el sistema de micro energía se ha enfocado a investigar la micro-combustión y los problemas que ocurren durante su operación los cuales pueden ser la pérdida de calor y la combustión inestable. [Richard A. Yetter et. al, 2007].

2.5 COMBUSTIÓN

El proceso de combustión es probablemente, de todos los procesos químicos, el más importante, puesto que en él se basó el desarrollo de la civilización actual. Una combustión es un conjunto de procesos fisicoquímicos por los cuales se libera controladamente parte de la energía interna del combustible. Una parte de esa

energía se manifiesta en forma de emisión de luz, la segunda parte, en forma de calor siendo este de interés para el desarrollo de este proyecto.

Se conoce que la reacción de un elemento químico con el oxígeno se llama oxidación. La combustión no es más que una reacción de oxidación, en la que normalmente se va a liberar una gran cantidad de calor el cual se determina por el incremento de entalpía (Ecuación 2.1).

$$Q = \Delta H \qquad \text{Ec. 2.1}$$

Donde: $Q = \text{Calor sumado.}$

$H = \text{Entalpía.}$

Inicialmente para que se pueda llevar a cabo la combustión, deben mezclarse dos sustancias, en este caso un fluido oxidante y un fluido comburente, es decir, una mezcla aire-combustible.

El proceso de combustión en un sistema de una microturbina de gas (MTG), se lleva a cabo dentro de la cámara de combustión (CC) donde se deben controlar las temperaturas a fin de evitar que los álabes de la turbina se expongan de forma directa con las temperaturas de la flama, lo cual no sucede con la carcasa de la cámara de combustión o tubo de llama, ya que esta estará sometida a altas temperaturas. Es por ello que la combustión es un tema que requiere sólidas bases en termodinámica, mecánica de los fluidos y transferencia de calor, en todas sus manifestaciones. Por otra parte, el incremento constante de energía exige que el proceso se lleva a cabo con la mayor eficiencia y menor daño al medio ambiente. De ahí que exista una demanda creciente de ingenieros y científicos capaces de comprender, controlar y mejorar los procesos de combustión.

2.6 ESFUERZO

En la rama de la mecánica aplicada se ubica la mecánica de los materiales que entre otras cosas estudia las relaciones entre las cargas externas aplicadas a un cuerpo deformable y la intensidad de la fuerza interna que actúan dentro de un cuerpo. Esta disciplina implica también calcular las deformaciones en un estudio sobre la estabilidad de este, cuando está sometido a fuerzas externas.

En el diseño de cualquier estructura o máquina, es necesario primero, usar los principios de la estática para determinar las fuerzas que actúan sobre y dentro de ellos. Sus deflexiones y su estabilidad dependen no sólo de las cargas internas, sino también del tipo de material del que están hechos. En consecuencia, una determinación precisa y una comprensión básica del comportamiento del material serán de importancia vital para desarrollar las ecuaciones necesarias para cada tipo de caso.

El esfuerzo se define como la fuerza que actúa sobre un cuerpo para deformarlo, el esfuerzo se define en términos de fuerza por unidad de área (Ecuación 2.2).

$$Esfuerzo = \sigma = \frac{Fuerza}{\text{área}} \quad \text{Ec.2.2}$$

El comportamiento de la materia variará dependiendo de cómo se aplique esta fuerza. Así, ésta puede causar diferentes deformaciones en los cuerpos, por ejemplo:

- Estirarlo (esfuerzo de tracción)
- Aplastarlo (esfuerzo de compresión)
- Doblarlo (esfuerzo de flexión)
- Cortarlo (esfuerzo cortante o de corte)
- Retorcerlo (esfuerzo de torsión)

A través de los años, los problemas fundamentales de la mecánica de materiales han sido resueltos, fue necesario usar matemáticas avanzadas y técnicas de computación para resolver problemas más complejos, como resultado el uso de esta disciplinas se extendió a otras áreas de la mecánica como la teoría de la elasticidad que estudia el comportamiento de los cuerpos sólidos deformables ante la aplicación de cargas o efectos térmicos, entre muchas otras situaciones que se pueden presentar. Siendo así, el cambio de forma de un cuerpo, o de su temperatura y/o humedad, entre otras causas. se deben principalmente al esfuerzo [R. C. Hibbeler,2006].

2.7 ESFUERZOS TÉRMICOS

Se sabe que los materiales cambian sus propiedades con la temperatura. Cuando un bloque de cierto material se fija rígidamente y se varía su temperatura, aparecen grandes esfuerzos de compresión o de tracción llamados esfuerzos térmicos. Estos pueden provocar deformaciones importantes en una microturbina, e incluso favorecer la ruptura del material debido a un alto gradiente de temperatura [Heeyoon Chung et. al, 2016, Kyung Min Kim et. Al, 2011]. Es por ello, que se debe diseñar con precaución y dedicación cualquier elemento o estructura que vaya a estar sometido a altas cargas térmicas y así mismo evitar que el esfuerzo térmico disminuya su vida útil. [Yaohui Lu et. Al, 2017].

Un esfuerzo térmico se produce en un material que sufre una dilatación o contracción térmica, no siempre se necesita aplicar fuerzas sobre el material para que éste sufra una deformación. Por ejemplo, cuando un sólido absorbe agua, éste se hincha, así también cuando un cuerpo se calienta habitualmente este calentamiento puede causar un cambio en sus dimensiones. Si la temperatura aumenta, generalmente un material se dilata, mientras que ante una disminución de temperatura el material se contraerá. Ordinariamente esta dilatación o contracción esta linealmente relacionada con el incremento o disminución de temperatura que se presenta principalmente en las ecuaciones gobernantes de la termoelasticidad a través de la ley constitutiva.

Existe una relación entre tensiones y deformaciones, así mismo, los campos de temperatura y tensión/deformación están acoplados. Por ello, si se calienta un cuerpo éste se deforma y a veces aparecen en él tensiones. En ciertos materiales se observa que incluso una deformación elástica produce cambios de temperatura, este problema acoplado es considerado muy complejo, pero únicamente si se considera el acoplamiento en un sentido. Un esfuerzo térmico puede ser resuelto como un problema de elasticidad isotérmica de forma que los gradientes térmicos sean considerados como fuerzas de cuerpo. A continuación, se definirán las ecuaciones gobernantes suponiendo un material termo elástico, homogéneo, isotrópico y con propiedades constantes.

En la teoría de la termoelasticidad los componentes del tensor de tensión son funciones lineales de los componentes del tensor de esfuerzo y los componentes del tensor de tensión debidos a un cambio de temperatura. Es decir, que cuando se calienta un sólido elástico que se encuentra sometido a deformación y a un cambio de temperatura, las tensiones tienen dos componentes, una de origen térmico y otra de origen mecánico o elástico (Ecuación 2.3)

$$\epsilon_{ij} = \epsilon_{ij}^e + \epsilon_{ij}^{\tau} \quad \text{Ec. 2.3}$$

Donde: $\epsilon_{ij}^e = \text{Tensión elástica.}$

$\epsilon_{ij}^{\tau} = \text{Tensión térmica.}$

Considerando un elemento cúbico libre de restricciones cuya temperatura es elevada desde un instante donde los esfuerzos y tensiones son cero, la tensión térmica debido al cambio de temperatura se calcula con la ecuación 2.4:

$$\epsilon_{ij}^{\tau} = \alpha(T - T_0)\delta_{IJ} \quad \text{Ec. 2.4}$$

Donde: $(T - T_0) = \text{Cambio de temperatura.}$

$\alpha = \text{Coeficiente de expansión térmica.}$

Mientras tanto, la tensión elástica es linealmente proporcional al tensor de esfuerzo (Ecuación 2.5):

$$\epsilon_{ij}^e = \frac{1}{2G} \left(\sigma_{ij} - \frac{\nu}{1+\nu} \sigma_{kk} \delta_{ij} \right) \quad \text{Ec. 2.5}$$

Donde: $G = \text{Módulo cortante}$

$\nu = \text{Relación de Poisson}$

La Ecuación 2.5 es conocida como la ley constitutiva de la elasticidad lineal o Ley de Hooke. Entonces la Ecuación 2.4 es el tensor total de tensiones o también denominado la ley constitutiva de termoelasticidad lineal y puede escribirse como en la ecuación. 2.6:

$$\epsilon_{ij} = \frac{1}{2G} \left(\sigma_{ij} - \frac{\nu}{1+\nu} \sigma_{kk} \epsilon_{ij} \right) + \alpha(T - T_0) \epsilon_{ij} \quad \text{Ec. 2.6}$$

Cuando un material es calentado, pero no existen restricciones a su expansión térmica por ninguna de sus fronteras en ninguna dirección no hay producción de esfuerzos térmicos. Es decir, que la temperatura por sí sola no genera esfuerzos térmicos (Ecuación 2.7):

$$\frac{\partial^2 T}{\partial_x \partial_y} = \frac{\partial^2 T}{\partial_y \partial_z} = \frac{\partial^2 T}{\partial_z \partial_x} = \nabla^2 T = 0 \quad \text{Ec. 2.7}$$

Por otro lado, la relación tensión-desplazamiento es la mostrada en la ecuación. 2.8:

$$\epsilon_{ij} = \frac{1}{2} (u_{i,j} + u_{j,i}) \quad \text{Ec. 2.8}$$

Las componentes de desplazamiento correspondientes a la distribución de temperaturas son obtenidas de la relación tensión-desplazamiento. Como no hay esfuerzos, entonces las deformaciones se representan en las siguientes ecuaciones 2.9, 2.10 y 2.11.

$$\epsilon_{xx} = \frac{\partial u}{\partial x} = \alpha(T - T_0) = \alpha(a + bx + cy + dz) \quad \text{Ec. 2.9}$$

$$\epsilon_{yy} = \frac{\partial u}{\partial y} = \alpha(T - T_0) = \alpha(a + bx + cy + dz) \quad \text{Ec. 2.10}$$

$$\epsilon_{zz} = \frac{\partial u}{\partial z} = \alpha(T - T_0) = \alpha(a + bx + cy + dz) \quad \text{Ec. 2.11}$$

Donde: a, b, c y $d = \text{Constantes arbitrarias de integración.}$

En términos de desplazamientos, las ecuaciones 2.9, 2.10 y 2.11 se expresan como la ecuación. 2.12:

$$\frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} = \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} = \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} = 0 \quad \text{Ec. 2.12}$$

Las Ecuaciones 2.9, 2.10, 2.11 y 2.12 representan las ecuaciones de equilibrio en ausencia de fuerzas de cuerpo. Los problemas de esfuerzos térmicos pueden ser resueltos asumiendo los gradientes de temperatura como fuerzas de cuerpo reduciendo el problema a un problema elástico en la presencia de fuerzas de cuerpo.

La distribución de temperaturas para problemas tridimensionales en los cuales los desplazamientos térmicos son cero se obtiene considerando $u = v = w = 0$, de forma que se obtiene la ecuación 2.13:

$$\epsilon_{xx} = \epsilon_{yy} = \epsilon_{zz} = \epsilon_{xy} = \epsilon_{yz} = \epsilon_{zx} = \sigma_{xy} = \sigma_{yz} = \sigma_{zx} = 0 \quad \text{Ec. 2.13}$$

Por otro lado, la relación tensión-esfuerzo es como muestra la ecuación 2.14:

$$\sigma_{ij} = 2G \left[\epsilon_{ij} + \frac{\nu}{1 - 2\nu} (\epsilon_{kk} - \frac{1 + \nu}{\nu} \alpha(T - T_0)) \delta_{ij} \right] \quad \text{Ec. 2.14}$$

Entonces se deducen los correspondientes esfuerzos térmicos los cuales son (Ecuación 2.15):

$$\sigma_{xx} = \sigma_{yy} = \sigma_{zz} = \frac{E\alpha(T - T_0)}{1 - 2\nu} \quad \text{Ec. 2.15}$$

Este resultado equivale al estado de esfuerzo hidrostático para un material incompresible donde los componentes normales de esfuerzo en cualquier dirección son iguales. Esta situación ocurre cuando un cuerpo es calentado y se impide su expansión en cualquier dirección.

2.7.1 ESFUERZOS TÉRMICOS EN LOS COMPONENTES DE LA MICROTUBINA DE GAS

Uno de los principales objetivos que se espera obtener en un sistema de microturbina de gas es la alta eficiencia. Para lograrlo, es necesario elevar la temperatura, ya que éstas dos variantes están fuertemente relacionadas. Lo que se espera con el aumento de temperatura es tener un gradiente de temperatura más alto por lo que los esfuerzos térmicos serán más notables, entonces el funcionamiento de una microturbina de gas MTG, conlleva a la presencia de esfuerzos térmicos.

El esfuerzo térmico puede aumentar con los repetitivos procesos de puesta en marcha, paro o cambio de carga, debido a una diferencia de temperatura mayor en los componentes [Kyung Min Kim et. al 2010]. Durante el arranque, los componentes

de las turbinas son sometidos a severos esfuerzos térmicos inducidos por las altas temperaturas de los gases de combustión [Kosman et. al, 2009, Carter TJ, 2005].

Dichos esfuerzos térmicos se deben a que los componentes están fríos al inicio y luego cambian de bajas a altas temperaturas por el contacto con los gases calientes. Posteriormente, la temperatura en los componentes comienza a incrementarse por lo que las elongaciones decrecen. Cuando se alcanza la velocidad nominal, el periodo de calentamiento termina y las temperaturas se estabilizan provocando que las elongaciones se estabilicen y alcancen un estado estacionario [Song et. al, 2011].

Cuando una turbina está en operación estable, hay una diferencia de temperatura entre sus componentes lo que lleva a distintas elongaciones en éstos. Esto se debe a que la transferencia del calor no es uniforme provocando que haya diferencias de temperaturas en la dirección radial y longitudinal de la cámara de combustión. De manera que, la transferencia de calor, se convierte en un problema para el diseño de una microturbina de gas de alto rendimiento [Je-Chin Han, 2013].

Los principales componentes de la microturbina de gas (MTG), por ejemplo, los álabes, rotor y la CC están expuestos a temperaturas extremadamente altas, que pueden sobrepasar las temperaturas admisibles de los materiales, Tales temperaturas reducen la vida útil de estos componentes, por ello, el tipo y selección del material de los componentes de la MTG es sumamente importante.

Gracias a los avances en tecnología se han desarrollado nuevos y mejores materiales, existen actualmente materiales basados en aleaciones de acero y níquel llamados súper aleaciones. Estos materiales son capaces de operar a altas temperaturas permitiendo que sean puestos a elevadas cargas térmicas y soportando esfuerzos térmicos. Aunque el campo de temperatura de los componentes de la MTG se ha investigado ampliamente, estas súper aleaciones también pueden fallar, por ello que la investigación respecto al campo de temperatura sigue teniendo gran interés.

Otras variantes que puede llevar al fallo de los materiales es el enfriamiento inadecuado, aunque la mayor parte de las máquinas que trabajan con temperaturas

altas y constantes por lo regular cuentan con un sistema de enfriamiento, si está mal diseñado, puede crear esfuerzos térmicos provocando grietas y fallas estructurales y reduciendo la resistencia del material [Min Kim et al, 2010].

Hoy en día la mayor parte de las cámaras de combustión (CC) de una microturbina de gas (MTG) son utilizadas con un revestimiento térmico con la finalidad de aumentar la temperatura haciendo que el combustible sea quemado completamente y reduciendo al mismo tiempo los niveles de emisión y las pérdidas de presión logrando un sistema más eficiente [Fengjun Lv et. al,2010, A.H. Lefebvre, 1993], Sin embargo estos revestimientos se ven afectados al igual que los materiales de la cámara de combustión (CC) por los cambios repentinos de la temperatura, es por ello que las investigaciones se centran en la predicción de la vida útil de los revestimientos térmicos con el fin de no ver afectado el material de la cámara de combustión (CC) que puede fallar en pleno funcionamiento, debido a las altas temperaturas a las que son elevados estos sistemas [Hokyu Moon et. al, 2015, Massimo Laraia et. al, 2013].

Para el cálculo de los esfuerzos térmicos es necesario estimar las distribuciones de temperatura en los materiales, y así poder visualizar las piezas de la microturbina de gas (MTG) que son más propensas al fallo, por ejemplo, las cámaras de combustión, álabes, rotor, entre otros. Los resultados computacionales son de gran utilidad para el desarrollo de los temas a tratar este proyecto, tanto para el análisis térmico como para el cálculo de esfuerzos térmicos. Investigadores han reportado que el software comercial ha sido adecuado en cuanto a la utilización de análisis termo-estructural de la turbina de gas, otros han realizado proyectos de transferencia de calor mediante CFD reportando resultados favorables [Kyung Min Kim et. al, 2010, S. Matarazzo et. al, 2011, Tenango P. Oscar et. al,2013, Hokyu Moon et. Al, 2015, Heeyoon Chung et. al, 2016].

2.8 DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL

Ciertas ramas de la ingeniería han tratado de establecer de manera práctica el comportamiento de los fluidos, tales como el aire o el agua, en una gran diversidad de aplicaciones, como la aerodinámica, turbomáquinaria, entre otras. Por ello la utilización de herramientas CFD está muy desarrollada en algunos campos de la ingeniería.

Desde años anteriores se incrementó su uso por parte de los ingenieros de programas de simulación numérica o CFD (Computational Fluid Dynamic), debido al rápido avance tecnológico que sufren los ordenadores, que hace de dicha técnica la más económica y rápida. No obstante, esta requiere un software especializado capaz de realizar los millones de cálculos necesarios para simular la interacción de líquidos y gases en superficies definidas por las condiciones de contorno y un alto conocimiento del mismo por parte del usuario.

CFD resuelve problemas que involucran dinámica de fluidos, transferencia de calor y de masa, reacciones químicas, entre otros. Esta técnica utiliza el método de volumen finito que consiste en emplear las ecuaciones de conservación en su forma integral en cada uno de los poliedros o tetraedros generados con la discretización. Además, tiene la ventaja de que es mucho más flexible para implementarse en mallas estructuradas y no estructuradas, por lo tanto, es el método más empleado en la resolución de modelos con geometrías complejas.

Es importante saber que los resultados obtenidos con CFD y los fenómenos mostrados para la solución de problemas de flujo de fluidos y transferencia de son aproximados y existe un pequeño margen de error entre el fenómeno experimental y el numérico. Los resultados se interpretan de manera sencilla visualizándolos por medio de gráficas, mapas de contorno, mapas de vectores y líneas de trayectoria.

2.8.1 ETAPAS DE UNA SIMULACIÓN DE CFD

Una simulación CFD está dividida en tres herramientas principales llamadas módulos: pre-proceso, proceso y post-proceso teniendo que cumplir cada una de ellas satisfactoriamente para pasar al siguiente módulo.

- Pre-proceso

Es la etapa donde se realiza el diseño de la geometría del problema creando líneas, áreas o volúmenes. Esta parte del pre-proceso es opcional, dado que la ubicación de la geometría puede provenir de otras aplicaciones de diseño. Asimismo, se definen los materiales a ser usados sobre la base de la geometría, donde a todo elemento se le asigna un material particular.

También se da paso a la discretización que consiste en cambiar modelos matemáticos complejos por otros más simples tales como ecuaciones algebraicas. Y para resolver estos problemas se auxilia de una malla para discretizar las ecuaciones gobernantes. La generación del mallado consiste en subdividir el dominio geométrico del flujo en subdominios pequeños, evitando empalmes entre ellos, cuidando la calidad, estos subdominios reciben los nombres de celdas, elementos, volúmenes de control o nodos. De tal manera que la ecuación es aproximada reemplazando las derivadas parciales por aproximaciones en términos de los valores nodales de la función. La malla puede generarse usando las herramientas de generación automática que puede ser estructurada o no estructurada.



Figura 2.7 Etapas para la solución de problemas en CFD.

En la malla estructurada los volúmenes de control están ordenados y tienen forma hexaédrica, en la Figura 2.8 se muestra un ejemplo. La principal ventaja de las mallas estructuradas es que están direccionadas en el espacio por los índices i, j, k , esta propiedad permite un acceso fácil y rápido a los puntos de la malla, y hace que la solución en nuestro ordenador sea más rápida. El mallado estructurado consta de cuadriláteros en 2D y hexaedros en 3D.

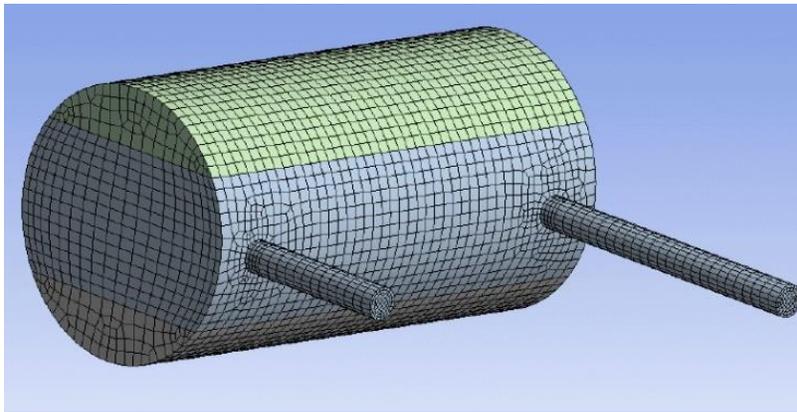


Figura 2.8 Esquema de una malla estructurada [Fluent Theory Guide, 2015].

La malla no estructurada no tiene un orden en particular, consiste de una mezcla de cuadriláteros y triángulos en 2D y tetraedros y hexaedros en 3D como la mostrada en la Figura 2.9, la desventaja de ésta es que puede requerir considerable intervención del usuario para producir una malla con resolución local aceptable con un mínimo de distorsión en los elementos. Tiende a incrementar los errores numéricos, sin embargo, la malla no estructurada ofrece una mayor flexibilidad al tratar geometrías complejas.

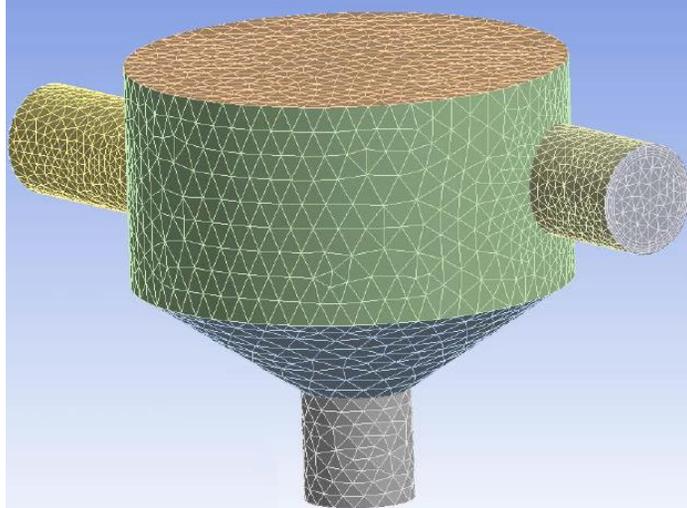


Figura 2.9 Esquema de una malla no estructurada [Fluent Theory Guide, 2015].

- Proceso

En esta sección se resuelven numéricamente las ecuaciones que gobiernan el sistema aplicadas a los dominios resultantes de la discretización mediante métodos iterativos.

También se dan ajustes de solución, configuración del resolvidor y se definen condiciones de frontera y, por último, la inicialización de nuestra solución.

Un criterio de convergencia indica si el proceso de solución se ha terminado o no, tomando en cuenta la precisión y eficiencia del modelo empleado. Los resultados obtenidos corresponden a los valores en cada punto de la malla conseguidos con la resolución de las ecuaciones algebraicas.

- Post-proceso

En esta etapa se analizan los resultados y se obtienen conclusiones sobre el fenómeno estudiado, es la etapa más importante del post-procesamiento. Los resultados se visualizan, por ejemplo: como dibujo de la geometría deformada del problema, un listado de resultados o como datos en forma de una tabla, gráficas, etc. Los resultados son interpretados con base al fenómeno en estudio y la relación que tienen con éste.

También incluye la validación la cual consiste en la comparación de los resultados obtenidos con otros realizados con anterioridad. La comparación se puede hacer con otros análisis de CFD realizados, otros métodos numéricos, que pueden ser analíticos y/o experimentales.

2.8.2 ECUACIONES GOBERNANTES

Todo fenómeno físico que se desea estudiar generalmente suele ser expresado en forma de ecuaciones. En el caso de la dinámica de fluidos computacional (CFD) las más comunes suelen ser tres: la Ecuación de Continuidad (conservación de masa), Ecuación Navier-Stokes (conservación del momento o Segunda Ley de Newton), y la Ecuación de la Energía (ecuación de conservación de la energía o Primera Ley de la Termodinámica). Estas ecuaciones pueden usarse en su formulación integral o en su forma diferencial, dependiendo del problema.

- Ecuación de la Continuidad (Ecuación. 2.16).

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0$$

Ec. 2.16

$$\vec{v} = \left[\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y}, \frac{\partial}{\partial z} \right]$$

Donde: $\rho = \text{Densidad.}$

$\vec{v} = \text{Velocidad.}$

- Ecuación de conservación de momento o de Navier-Stokes (N-S) (Ecuación 2.17)

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{v}) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \vec{v}_i \vec{v}) = \rho g_i - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial \vec{v}_i}{\partial x_j} \right) + \frac{1}{3} \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\mu \frac{\partial \vec{v}}{\partial x_j} \right) \quad \text{Ec. 2.17}$$

Donde: $P = \text{Presion estatica}$

$\mu = \text{Viscosidad}$

$g_i = \text{Aceleración gravitacional}$

Cuando un fluido es compresible, al ser analizado éste presentara variaciones de presión y densidad que causarán a su vez una cierta variación de temperatura. En esta situación es necesario la ayuda de la ecuación de estado la cual toma en consideración la termodinámica del sistema enlazando tres variables (Ecuación 2.18).

- Ecuación de la energía.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \nabla \cdot (\vec{v}(\rho E + p)) = \nabla \cdot \left[k_{eff} \nabla T - \sum_i H_j \vec{J}_j \bar{v}_{eff} \cdot \vec{v} \right] + S_h \quad \text{Ec. 2.18}$$

Donde:

$k_{eff} = \text{Conductividad efectiva}$

$k_t = \text{Conductividad térmica turbulenta}$

$\vec{J}_j = \text{Flujo de difusión de las especies.}$

Los tres primeros términos en el lado derecho de la Ecuación 2.18 representan la transferencia de energía debido a la conducción, la difusión de especies, y la disipación viscosa, respectivamente. Incluye el calor de la reacción química, y cualquier otra fuente de calor volumétricas que se haya definido. Cabe mencionar

que la conductividad térmica turbulenta, se define de acuerdo con el modelo de turbulencia que se utiliza. [Fluent Theory Guide, 2015].

Mientras que si el flujo es no viscoso tenemos la ecuación 2.19:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \nabla \cdot (\vec{v}(\rho E + p)) = \nabla \cdot [\sum_i H_j J_j] + S_h \quad \text{Ec. 2.19}$$

Donde: $E = \text{Energía total o de activación}$

$H = \text{Entalpia sensible}$

$Y_j = \text{fracción de especies}$

2.8.3 MODELO DE TURBULENCIA

En la mecánica de fluidos hay dos modalidades de flujo: A) laminar, ordenado y suave y B) turbulento, oscilante y desordenado. Para un flujo laminar hay menos dificultades en cuanto a la resolución de problemas, muchas de las soluciones son analíticas, pero un problema que presenta turbulencia es sumamente complejo este caso se cuenta con la ventaja de conocer las ecuaciones de la mecánica de fluido o ecuaciones gobernantes del movimiento de un fluido.

La solución de las ecuaciones gobernantes no representa ninguna dificultad en los casos de flujos no viscosos o laminares. Sin embargo, la simulación de flujos turbulentos representa un problema significativo, por ello, el modificar las ecuaciones gobernantes será la solución viable. Cuando se modifican las ecuaciones gobernantes se obtienen variables desconocidas. La determinación de estas variables y el tipo de aproximación matemática para la resolución de las ecuaciones diferenciales es la que da origen a los distintos modelos de turbulencia.

En el campo de CFD encontramos diversos modelos para el cálculo de la turbulencia. La elección del modelo depende de la clase específica del problema y nivel de precisión que se requiere. El objetivo de este proyecto es calcular los esfuerzos térmicos en cámaras de combustión (CC), como ya se mencionó anteriormente, así como obtener una distribución de temperaturas en el sólido es uno de los objetivos, por lo tanto el modelo de turbulencia seleccionado fue $\kappa - \varepsilon$ porque ha tomado una popularidad en simulaciones de transferencia de calor, por otro lado, cuando una combustión es denominada turbulenta, el modelo mantiene un buen margen para la solución de problemas relacionados con este tipo de situación [Fluent Theory Guide, 2016].

2.8.3.1 MODELO DE TURBULENCIA $K - \varepsilon$ ESTÁNDAR

Es un modelo bastante preciso en un amplio rango de flujos turbulentos, por lo que es muy usado en la solución de flujo de fluidos. Fue propuesto por Launder y Spalding en el año de 1972. Es el modelo completo más simple de turbulencia. Cuenta con sólo dos ecuaciones de transporte para la energía cinética de turbulencia k y su tasa de disipación ε . Este modelo asume que el flujo es completamente turbulento y los efectos de la viscosidad molecular son despreciables, por este motivo su aplicación es común para flujos turbulentos.

La energía cinética de turbulencia, y su tasa de disipación, se obtienen a partir de las siguientes ecuaciones de transporte (Ecuaciones 2.20 y 2.21):

- Ecuación cinética de turbulencia.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad \text{Ec. 2.20}$$

- Ecuación de disipación.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho\varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial_k}{\partial x_j} \right] C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} + (G_K + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \quad \text{Ec. 2.21}$$

Donde:

G_k es la generación de energía cinética turbulenta debida a los gradientes de la velocidad media, G_b Generación de energía cinética turbulenta debida a la flotabilidad, Y_M es la contribución de la dilatación que fluctúa en turbulencia compresible en relación a la tasa total de disipación, $C_{1\varepsilon}, C_{2\varepsilon}, C_{3\varepsilon}$ son constantes, σ_k y σ_ε es el Número de Prandtl turbulento para ε y k , respectivamente S_ε y S_k son términos fuentes definidos por el usuario y μ_t es la viscosidad turbulenta [Fluent Theory Guide, 2016].

2.9 CONJUGADO DE TRASFERENCIA DE CALOR

La transferencia de calor conjugado (CHT por sus siglas en inglés), es la combinación de transferencia de calor entre fluidos y sólidos o viceversa dependiendo del tipo del problema. Esta aplicación de transferencia se ha observado en muchas situaciones. Por ejemplo, en calefacción, ventilación, aire acondicionado, combustión, quemadores, diseño de alabes, entre muchos más.

Existen tres formas de transferencia de calor, una de ellas es la conducción, que se produce a través de un medio estacionario que puede ser un sólido cuando existe una diferencia de temperatura. El caso simplificado de transferencia de calor unidimensional está determinada por la ley de Fourier, que establece que el flujo de transferencia de calor por conducción en un medio isótropo es proporcional y de sentido contrario al gradiente de temperatura en esa dirección (Ecuación 2.22):

$$q = -k \cdot \nabla T \quad \text{Ec. 2.22}$$

Donde:

k = Coeficiente de conducción del material [W/mk]

q = Flujo de calor por unidad de superficie [W/m^2]

∇T = Gradiente de temperatura en las tres direcciones cartesianas [k/m].

Mientras que el resolovedor CFD fluent utiliza la ecuación de energía para regiones sólidas (Ecuación 2.23):

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho h) + \nabla \cdot (\vec{v} \rho H) = \nabla \cdot (k \nabla T) + S_h \quad \text{Ec. 2.23}$$

Donde: S_h = Fuente de calor volumétrica.

El primer término del lado derecho de la ecuación (2.23) indica el flujo de calor mientras que el segundo término representa la transferencia de energía convectiva que es producto del movimiento rotacional o translacional del sólido.

La radiación transmite la energía por medio de la emisión de ondas electromagnéticas o fotones, la emisión de radiación puede ser el proceso dominante cuando los cuerpos están relativamente aislados del entorno o cuando están a temperaturas muy elevadas. Así, un cuerpo muy caliente emitirá, gran cantidad de ondas electromagnéticas. La cantidad de energía radiante emitida o calor radiado viene dada por la Ley de Stefan-Boltzmann. De acuerdo con esta ley, dicho calor radiado es proporcional a su temperatura absoluta elevada a la cuarta potencia (Ecuación 24).

$$P = \alpha(\sigma T^4)S \quad \text{Ec. 2.24}$$

Donde: P = Potencia radiada.

α = Coeficiente dependiente de la naturaleza del cuerpo.

S = Área de la superficie que radia

$\sigma = \text{Constante de Stefan – Boltzmann de } 5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$

$T = \text{Temperatura absoluta}$

Mientras que la convección se produce por medio de un fluido ya sea líquido o gas que al estar en movimiento entre zonas con diferentes temperaturas ocurre una transferencia de calor representada por la Ley de enfriamiento de Newton (Ecuación 2.25):

$$q = hA(T_s - T_f) \quad \text{Ec. 2.25}$$

Donde: $h = \text{Coeficiente de transferencia de calor [W/m}^2\text{k]}$.

$T_s = \text{Temperatura de la superficie.}$

$T_f = \text{Temperatura del fluido.}$

El coeficiente de transferencia de calor h indica la resistencia térmica de la capa límite y depende del flujo y de las propiedades del fluido.

Para determinar la transferencia de calor por convección primero es necesario: Obtener la temperatura en la superficie del material, para lograrlo, el resolovedor CFD fluent debe calcular la transferencia de calor por la interacción fluido-estructura donde se utilizan los números de Biot y Nusselt.

2.10 ANÁLISIS POR ELEMENTO FINITO

El análisis de elementos finitos (FEA por sus siglas en inglés), está especialmente pensado para usarse en ordenadores, consistiendo así en el empleo de los métodos numéricos para resolver problemas que involucran un alto grado de complejidad. Este método numérico permite obtener una solución numérica aproximada sobre un cuerpo, estructura o dominio (medio continuo), dividiéndolo en un número elevado

de subdominios denominados elementos finitos. Dentro de cada elemento se distinguen una serie de puntos representativos llamados nodos. El conjunto de nodos se conoce como malla. Sobre esta malla se realizarán los cálculos correspondientes para solucionar diferentes problemas entre ellos el de campo de desplazamientos, deformaciones y tensiones, problemas de mecánica de sólidos deformables o más generalmente un problema de mecánica de medios continuos. Dada la imposibilidad práctica de encontrar la solución analítica de estos problemas, este método de los elementos finitos se convierte en una alternativa para resolver problemas sumamente complejos como la termoelasticidad que se analiza en este proyecto.

2.10.1 ECUACIONES GOBERNANTES

La ecuación 2.26 rige el método de elemento finito para un análisis estructural:

$$\{R\} = [K]\{D\} - \{F\} \quad \text{Ec. 2.26}$$

Donde: $\{R\} = \text{Matriz de reacción.}$

$[K] = \text{Matriz de rigidez.}$

$\{D\} = \text{Matriz de desplazamiento.}$

$\{F\} = \text{Matriz de cargas.}$

Cabe aclarar que la ecuación (2.26) se obtiene una vez aplicadas las condiciones de frontera las cuales consiste en cargas nodales y fijaciones o restricciones nodales.

Para el caso de un análisis de transferencia del calor, la ecuación 2.26 puede escribirse de la forma (Ecuación 2.27):

$$[K]\{T\} - \{q\} \quad \text{Ec. 2.27}$$

Donde: $\{T\} = \text{Matriz de temperaturas.}$

$\{q\} = \text{Matriz de flujo de calor.}$

En este caso, las temperaturas pueden ser importadas desde un análisis de CFD y aplicarlas como condición de frontera, o bien, se pueden asignar al modelo de elemento finito como constantes.

La deformación térmica se presenta cuando una carga de temperatura es aplicada y se especifica el coeficiente de expansión térmica. En cada componente, la tensión térmica se calcula con la Ecuación 2.28:

$$\varepsilon^{th} = \alpha^{se}(T - T_{ref}) \quad \text{Ec. 2.28}$$

Donde: ε^{th} = Deformación térmica en cualquiera de las direcciones X , Y o Z .

α^{se} = El coeficiente secante de expansión térmica.

T_{ref} = Temperatura de referencia.

Cabe mencionar que α^{se} es definido como una propiedad del material y T_{ref} es la temperatura de referencia también denominada “libre de esfuerzo”, puede ser especificada utilizando el campo de temperatura de referencia de análisis estáticos o transitorios estructurales. En este caso, se define en cada punto temporal como si se tratara de un análisis estacionario.

Los esfuerzos se relacionan con la tensión como muestra la ecuación 2.29:

$$\{\sigma\} = [D]\{\varepsilon_{ij}\} \quad \text{Ec. 2.29}$$

Donde; $\{\sigma\}$ es el tensor de esfuerzo y $[D]$ es la matriz elástica. En secciones anteriores se definió al tensor de tensiones como (Ecuación 2.30):

$$\varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ij}^e + \varepsilon_{ij}^\tau \quad \text{Ec. 2.30}$$

Sustituyendo la ecuación 2.29 en la ecuación 2.30 se obtiene una nueva relación para el tensor total de tensiones (Ecuación 2.31):

$$\{\epsilon_{ij}\} = [D]^{-1}\{\sigma\} + \epsilon_{ij}^{\tau} \quad \text{Ec. 2.31}$$

Un análisis tridimensional incluye tres esfuerzos normales y tres esfuerzos cortantes. Los esfuerzos principales y esfuerzos cortantes máximos están disponibles como resultados individuales. El esfuerzo equivalente, también llamado Esfuerzos de Von Mises está relacionado a los esfuerzos principales por la ecuación 2.32:

$$\sigma_e = \left[\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2} \right]^{1/2} \quad \text{Ec. 2.32}$$

Los esfuerzos principales son utilizados en diseños porque permiten que cualquier estado de esfuerzos tridimensional sea representado por un solo valor de esfuerzo positivo. El esfuerzo equivalente es parte de la teoría de falla del esfuerzo equivalente máximo utilizado para predecir la cedencia de un material. El Von Mises o tensión equivalente es calculada con la ecuación 2.33:

$$\sigma_e = \frac{1}{\sqrt{2}} \left[(\epsilon_1 - \epsilon_2)^2 + (\epsilon_2 - \epsilon_3)^2 + (\epsilon_3 - \epsilon_1)^2 \right]^{1/2} \quad \text{Ec. 2.33}$$

Donde: $\nu = \text{Relación de Poisson}$.

2.10.2 ETAPAS DE UNA SIMULACIÓN FEA

Este método de análisis por elementos finitos (FEA) permite resolver ecuaciones diferenciales asociadas a un problema físico sobre geometrías complicadas mediante pasos dentro de programas computacionales. Estos pasos, para llevar a cabo la solución del problema por FEA es casi idéntico al de una simulación CFD solo variando ecuaciones y la selección de elementos para el estudio adecuado.

El primer paso llamado pre-proceso consiste en construir la estructura a ser analizada, posteriormente se realiza la discretización o modelado de dicha estructura dividiéndola en subdominios también llamados malla, así mismo se definirá las propiedades del elemento, se aplican las cargas y se definen las condiciones de frontera. El siguiente paso llamado procesamiento consiste en que FEA realice todo el cálculo, aquí se selecciona a el tipo de análisis, si es transitorio o estático. Se realiza la configuración de los parámetros del cálculo seleccionando los intervalos de tiempo, y número de interacciones, y por último se inicia el cálculo donde el programa empieza a transferir las cargas al modelo, genera matrices de rigidez, resuelve el sistema de ecuaciones y genera la solución. En el tercer paso llamado post-proceso, se muestran los resultados obtenidos mediante la resolución de las ecuaciones que son procesadas de forma conveniente con el fin de permitir un análisis y visualización gráfica de ellas. Esto permite la extracción de resultados los cuales contienen información tales como esfuerzos y deformaciones.

CAPÍTULO

3

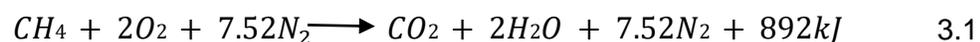
CÁLCULO NUMÉRICO

3 ANÁLISIS TEÓRICO

3.1 ANÁLISIS TERMOQUÍMICO

En este proyecto se tomó en cuenta el proceso químico y la reacción de los gases que se llevó a cabo dentro de la cámara de combustión (CC). Analizar la cantidad de combustible que será inyectado dentro de la CC es sumamente importante, pues con este dato se determina la cantidad de calor generado por la mezcla aire-metano la temperatura teórica generada y por consiguiente, verificar si el material de la CC cumple con las condiciones de dicha combustión.

Desde el equilibrio químico de la mezcla aire-metano se tiene la Ecuación 3.1:



La Ecuación 3.1 representa la forma química estequiométrica de la reacción. Para la mezcla es posible determinar la cantidad de gas combustible que será inyectado en el combustor para un flujo total de 0.01825 kg/s . En la Tabla 3.1 se muestran los valores de la mezcla aire-metano que fueron adquiridos de investigaciones previas [R. Marsh et al. 2015].

Tabla 3.1 Condiciones experimentales para las llamas N_2 diluidas de $O_2 - CH_4$. El caudal de CH_4 es de 0.047 mol/s y el caudal total es de 0.654 mol/s para cada condición.

Experimento	Flujo $N_2 \text{ mol/s}$	Flujo $O_2 \text{ mol/s}$	$O_2:CH_4$	AFT (K)
N1	0.479	0.127	2.72	1903

De modo que nuestra ecuación de reacción quedó de la siguiente manera (Ecuación 3.2).



Por otra parte, desde la Ecuación (3.2) se calculó el peso molecular para cada especie (Ecuación 3.3), en gramos (g/mol):

$$16.0387 + 31.9988 + 28.0134 \rightarrow 44.0095 + 18.0134 + 28.0134 \text{ (}^g/mol\text{)} \quad 3.3$$

De modo que el flujo molar por segundo fue conocido y se tuvo el peso molecular de la mezcla, solamente restó multiplicar la Ecuaciones 3.2 y 3.3 para conocer el flujo de cada especie. Lo que dió como resultado la Ecuación 3.4:

$$0.7538 + 4.0638 + 13.4184 \rightarrow 2.0684 + 0.2287 + 13.4184 \text{ (}^g/s\text{)} \quad 3.4$$

De tal forma que la ecuación 3.4 especificó que se necesitaría 0.0007538 kg/s de metano para satisfacer un flujo de aire de 0.01749 kg/s

Por otra parte, la reacción en equilibrio de la Ecuación (3.1) indicó una generación de 892 kJ de energía. De modo que se contempló la cantidad de energía que generara 0.0007538 kg/s de metano. Esto fue para establecer que las condiciones de mezcla aseguraran, que los parámetros de operación fueran adecuados dentro de la cámara de combustión.

Por lo tanto

$$Q = \frac{(0.0007538 \text{ kg})(892 \text{ kJ})}{16.0387 \text{ kg}} = 42.0243 \text{ kJ} \quad 3.5$$

De acuerdo con la teoría, el calor generado es proporcional a la diferencia de la temperatura. Se calculó la temperatura máxima para $Q = 42.0243 \text{ kJ}$, con la Ecuación 3.6:

$$Q = \dot{m}C_p T \quad 3.6$$

Dónde: Q es el calor generado, producto del flujo de masa, \dot{m} el calor específico del fluido (C_p) y la diferencia de temperaturas ($T = T_f - T_i$) de la cámara de combustión. De tal forma que de la Ecuación (3.6) se despejó para la temperatura de salida T_f de la cámara de combustión obteniéndose la Ecuación 3.7:

$$T_f = \frac{Q}{\dot{m}C_p} + T_i \quad 3.7$$

Por lo tanto, aplicando la Ecuación 3.7 se obtuvo:

$$T_f = \frac{42.0243 \text{ kJ},}{(0.01824 \text{ kg/s}) \left(1.02038176 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}\right)} + 300 \text{ K} = 2257.9429 \text{ k}$$

Como consecuencia, al resolver la Ecuación 3.7 se obtuvo una $T_f = 2257.9429 \text{ K}$.

Entonces se podría decir que el flujo másico de 0.0007538 kg/s de metano generará niveles altos de temperatura que podrá dañar severamente un sistema de una microturbina [Luis Mixquititla, 2015].

Para bajar la temperatura se realizaron nuevos cálculos partiendo de la temperatura promedio adecuada para una microturbina de gas esta temperatura es considerada de 1100 K. Aplicando la Ecuación (3.6) para Q , y tomando en cuenta el nivel de temperatura necesario. El resultado es:

$$Q = (0.01824 \text{ kg/s})(1.02038176 \text{ kJ/kgK})(1100 \text{ K} - 300\text{K}) = 14.8894 \text{ kJ/s}$$

Con la nueva información (Q), se calculó la cantidad de combustible (m) necesaria requerida por la cámara de combustión, es decir con exceso de aire en la mezcla. Contemplando los datos estequiométricos, se utilizó la Ecuación 3.8:

$$m = \frac{m_{st} \cdot Q}{Q_{st}} \quad 3.8$$

$$\dot{m} = \frac{(0.016 \frac{\text{kg}}{\text{s}})(14.8894 \text{ kJ})}{892 \text{ kJ}} = 0.00026707 \text{ Kg/s}$$

Con estos nuevos valores de flujo másico de metano se calculó la temperatura final usando la Ecuación 3.7

$$T_f = \frac{14.8894 \text{ kJ}}{(0.01824 \text{ kg/s}) \left(1.02038176 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}} \right)} + 300 \text{ K} = 1099.99 \text{ K}$$

De esta forma concluimos que la temperatura de los gases al final de la cámara de combustión tendrá un valor de 1099.99 K, con este dato se realizó la búsqueda de metales diseñados para resistir altas temperaturas y posteriormente se calculan los esfuerzos térmicos.

3.2 ACOPLAMIENTO ENTRE CFD Y FEM

El estudio realizado entre el análisis de CFD y FEM se llevó a cabo mediante el acoplamiento ANSYS Workbench. Como se muestra en la Figura 3.1, donde se resolvió el fenómeno de combustión y posteriormente la transferencia de calor entre el fluido y la estructura mediante el módulo Fluent. Posteriormente las cargas térmicas de la CC obtenidos por la simulación CFD son importadas secuencialmente, con un cierto intervalo de tiempo, por medio de una interconexión entre el módulo Ansys mechanical, donde se resolvieron las tensiones térmicas y los desplazamientos generados por las deformaciones.

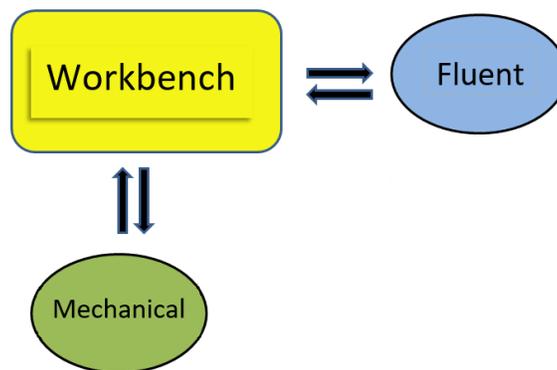


Figura 3.1 Diagrama del acoplamiento entre CFD y FEM.

3.3 PRE-PROCESO DE CFD Y FEM

3.3.1 GENERACIÓN DE GEOMETRÍA

El diseño de una CC es complicado, requiere dedicación y tiempo para lograr un funcionamiento óptimo. Por lo tanto, se utilizó una geometría realizada en investigaciones previas [Roback y Johnson,1983], el quemador está compuesto por dos boquillas coaxiales, un generador de turbulencia (un número de álabes fijos en la boquilla anular) y la cámara combustión (ver Figura 3.2), posteriormente se realizaron modificaciones y adaptaciones para este proyecto.

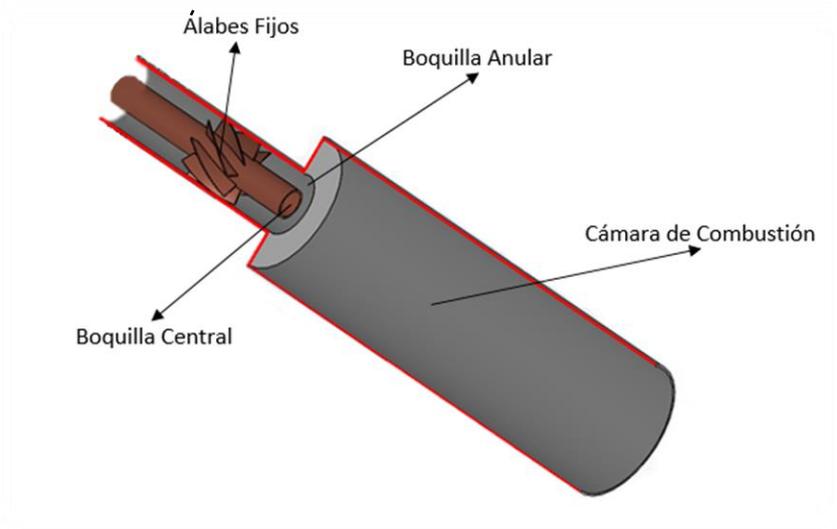


Figura 3.2 Esquema del quemador convencional; [Roback y Johnson,1983].

Se modificó la geometría original, esto para minimizar el tiempo de cómputo en cuanto a las simulaciones posteriores, eliminando la parte de los álabes fijos. La geometría se realizó usando la paquetería SolidWorks y posteriormente fue acotado en la Figura 3.3 se muestra los límites de la figura modificada.

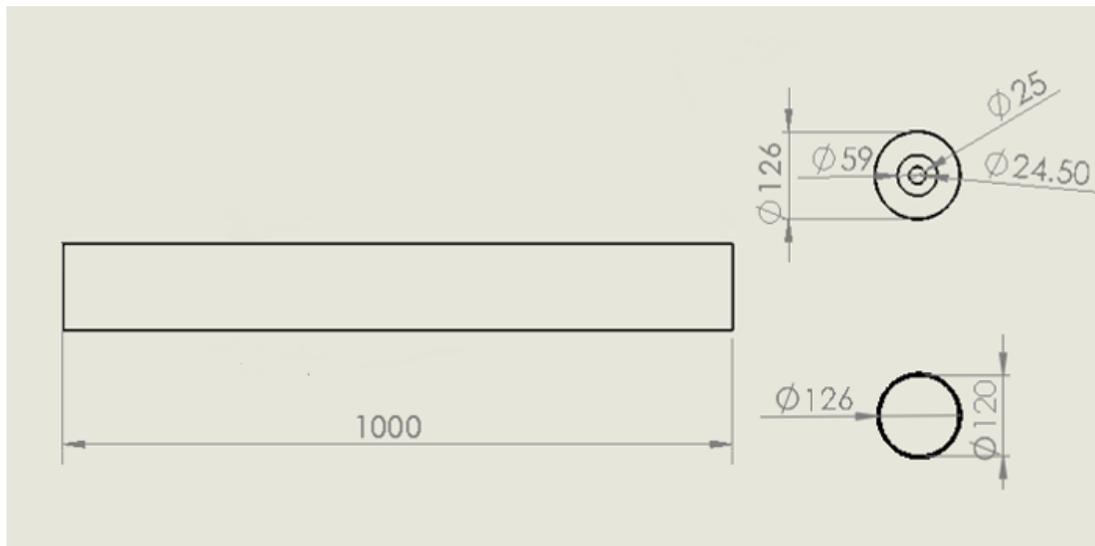


Figura 3.3 Perfil y dimensiones de la CC con acotaciones en mm.

Para realizar una simulación usando la paquetería Ansys se realizaron dos volúmenes: uno corresponde al sólido y otro al fluido; la Figura 3.4 muestra los dos volúmenes ensamblados en un solo cuerpo.

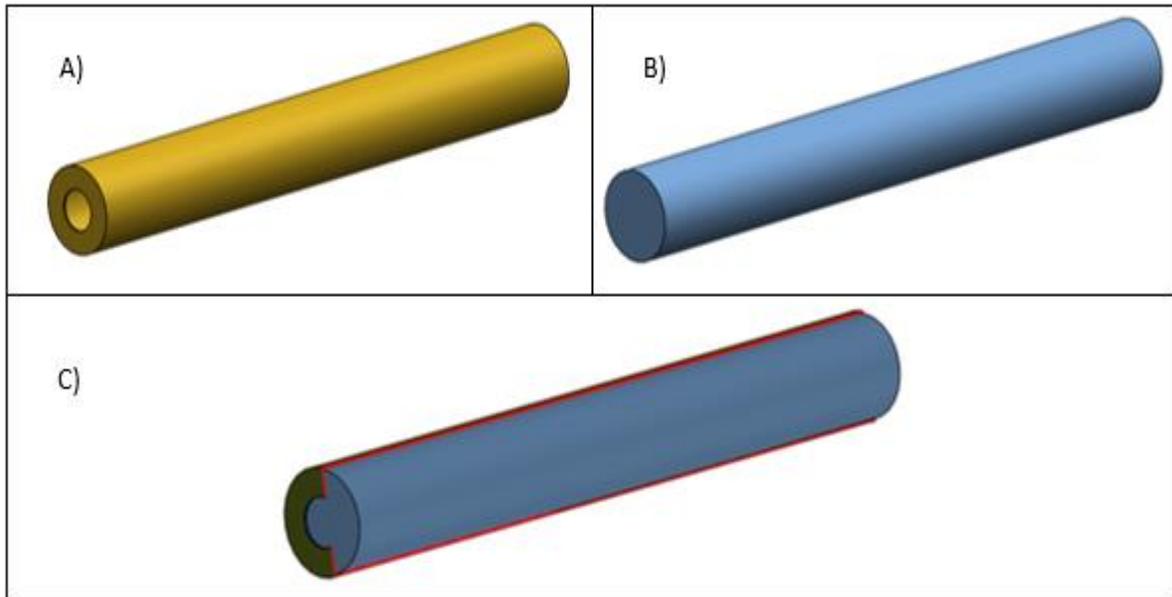


Figura 3.4 Geometría modificada fluido-sólido, donde A) corresponde al sólido, B) fluido, C) la unión de fluido-sólido seccionada.

3.3.2 DISCRETIZACIÓN DE GEOMETRÍA

Una vez obtenida la geometría final se llevó al software para ser discretizada, actualmente se cuenta con varios programas de cómputo para la discretización de campos de fluidos, para este trabajo se optó por utilizar el mallador Workbench versión 15.0 de Ansys Inc; por presentar entre otras ventajas es la facilidad de manejo y funcionalidad de interconexión entre sus módulos.

Obtenida la geometría en el mallador, el siguiente paso fue definir las condiciones de frontera tales como entrada de aire y combustible, salida de gases de escape y condiciones de pared. Posteriormente, se seleccionó el tipo de elemento de malla y el tamaño de elemento, así como también el material de cada geometría.

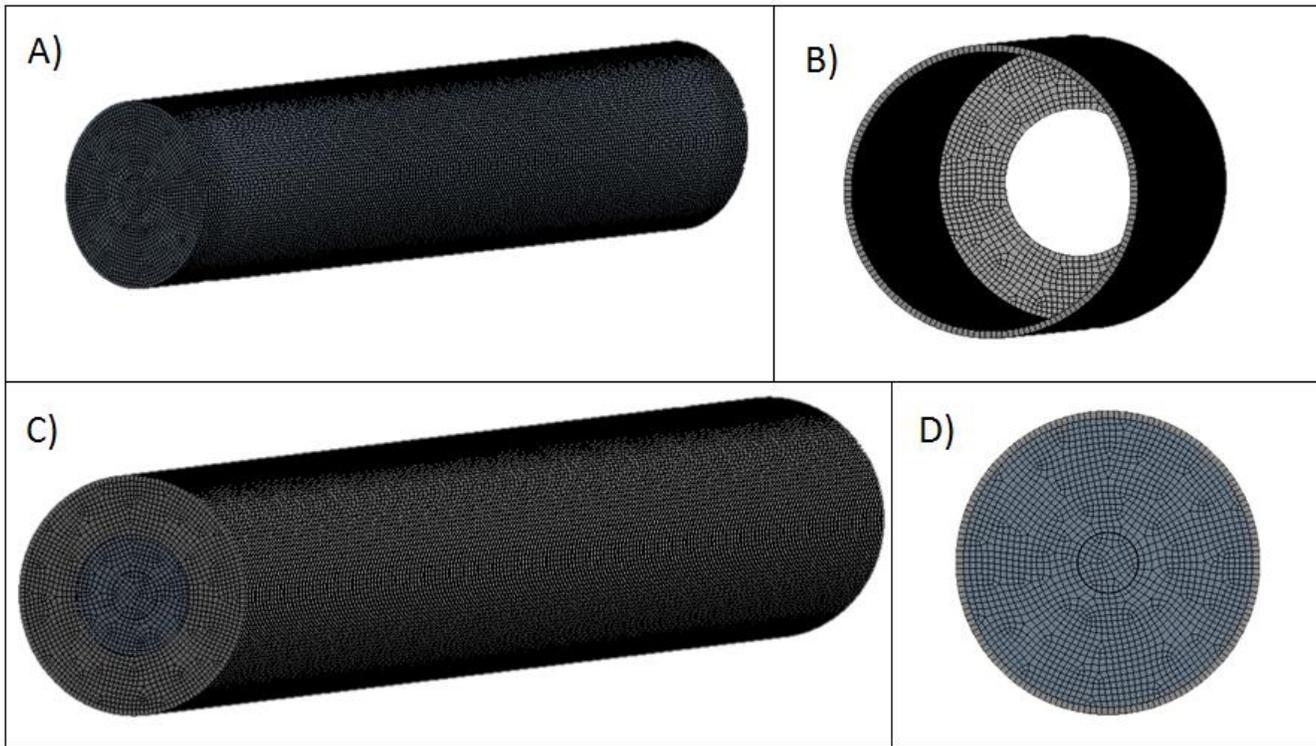


Figura 3.5 Discretización de fluido-sólido, donde la figura A) corresponde al fluido, B) sólido y C), D) la unión de los dos volúmenes.

Recordemos que se tiene un campo sólido y un fluido interconectado en una sola pieza, en esta sección no se le asigna ninguna propiedad. En la Figura 3.5 se visualiza el tipo de mallado de la CC.

3.3.3 ANÁLISIS DE CONVERGENCIA DE MALLA

Uno de los puntos más importantes en cuanto a la convergencia de malla es encontrar una relación satisfactoria entre el tiempo de cómputo, los resultados y la aproximación que estos resultados tienen con la realidad. Siendo así, para elegir una malla con características adecuadas se utiliza el índice de convergencia de malla (GCI por sus siglas en inglés) con el cual se estima el porcentaje de error en la solución [Castro, 2008; Roache P., 1998]. Para la resolución del GCI se realizaron varias mallas (Tabla 3.2) y se resolvió el fenómeno de combustión en

estado estacionario. De tal manera que el factor de importancia al evaluar los resultados obtenidos mediante dicho mallado, es la temperatura. Para evaluar dichas mallas se utilizan las Ecuaciones 3.9 y 3.10:

$$GCI = \frac{3|\xi|}{\gamma^p - 1} \quad 3.9$$

$$\gamma = \frac{h_2}{h_1} \quad 3.10$$

$$\xi = \frac{f_2 - f_1}{f_1} \quad 3.11$$

Donde: ξ es el error relativo entre los datos obtenidos, γ es la relación que existe entre el tamaño de los elementos de las mallas, y p es el orden del método de discretización. La mayoría de los casos discretizan en segundo orden. Para este estudio se realizaron 4 mallas (Tabla 3.3), considerando la malla fina con un total de elementos 795043, mientras que la malla más burda contó con 282185.

Tabla 3.2 Mallas generadas para el análisis de convergencia

Parámetro	Tipo de mallado	Número de elementos
Malla 1	Estructurado	795043
Malla 2	Estructurado	598686
Malla 3	Estructurado	472959
Malla 4	Estructurado	282185

Siguiendo la metodología de Roache P. se concluyó que las mallas 2 y 3 tienen un porcentaje de error menor a 1% (véase Tabla 3.3). Sin embargo, la malla seleccionada para llevar a cabo las simulaciones fue la malla 3 porque demanda menos recursos computacionales que la malla 2. Dicha malla contiene 472,959 elementos de los cuales 80,134 elementos corresponden al dominio de los sólidos y 392,818 elementos corresponden al dominio del fluido.

Tabla 3.3 Índice de convergencia de malla.

Parámetro	Tamaño de elemento (m)	Magnitud Temperatura (K)	ξ	Υ	%GCI
Malla 1	0.0025	648.8991			
Malla 2	0.003	648.9582	9.10773×10^{-5}	1.2	0.06209818
Malla 3	0.004	649.6783	0.001109625	1.333333	0.42799807
Malla 4	0.005	655.4531	0.008888707	1.25	4.74064369

3.3.4 DISCRETIZACIÓN FEM

Cuando se tiene una simulación FEM solo es utilizada la parte sólida de modo que es suprimida la geometría del fluido, como se muestra en la anterior figura 3.4 inciso A), de igual forma es mallado, solo que en este caso se decidió hacer una malla no estructurada por las propiedades del elemento asignado. La figura 3.6 se muestra la malla del sólido para FEM.

El mallado de la carcasa de la CC consta con 171,534 nodos y un total de 85,526 elementos, el tipo de mallado es tetraédrico con refinamiento en la parte interna y un tamaño de elemento de 0.01 m. esto con la finalidad de obtener resultados precisos y generar los esfuerzos generados por las temperaturas provenientes de la combustión.

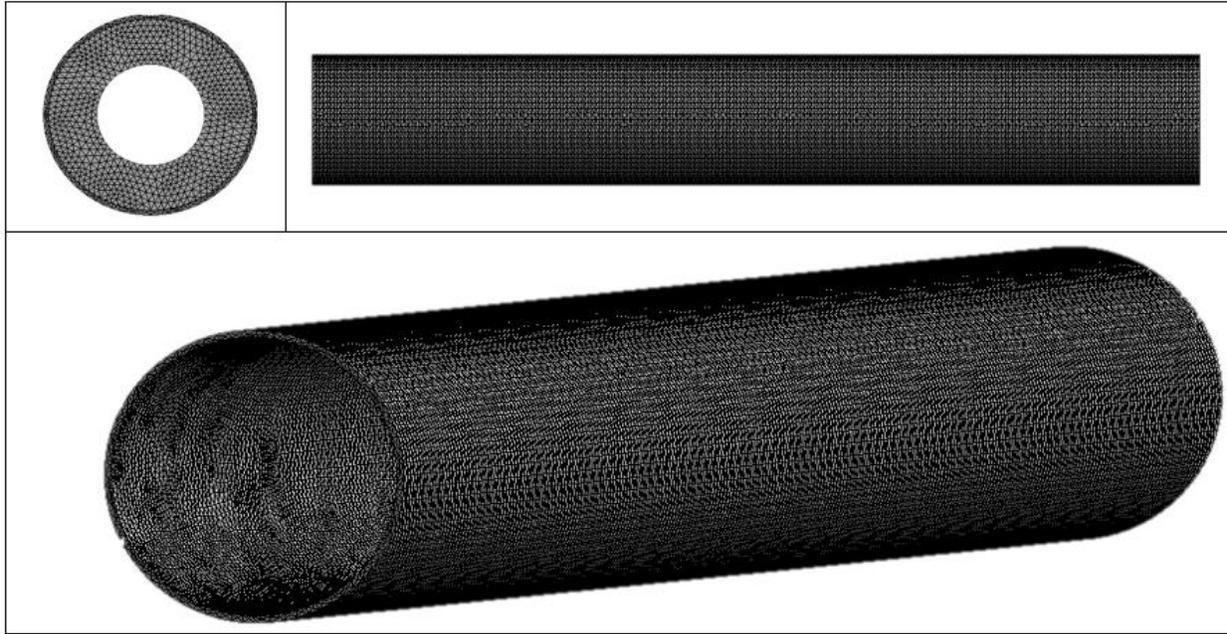


Figura 3.6 Discretización no estructurada de la carcasa de la CC.

3.3.4.1 SELECCIÓN DE ELEMENTO

Para llevar a cabo los cálculos, es necesario seleccionar el tipo de elemento adecuado al análisis correspondiente y las propiedades de malla con los que se cuenta. En este trabajo particular se seleccionó el elemento SOLID 226. Este elemento, de acuerdo a la guía de usuario, tiene la capacidad de resolver deformación, expansión térmica, elasticidad, esfuerzos térmicos, entre otros. Este elemento también cuenta con veinte nodos y hasta cinco grados de libertad por nodo. La geometría de SOLID 226 se muestra en la Figura 3.7.

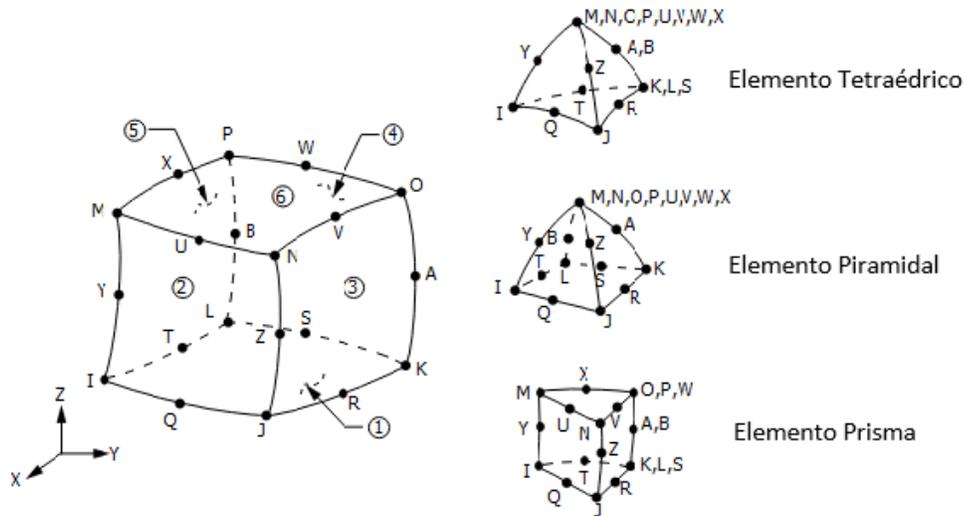


Figura 3.7 Elemento SOLID 226, Ansys Fluent 16.1 Theory guide, 2016, Ansys Inc.

3.4 PROCESO

3.4.1 DESARROLLO DEL MODELADO DE CFD

Una vez que se discretizó el modelo, el siguiente paso es resolver el problema de distribución de temperaturas mediante CFD, se trabajó en Ansys Inc; mediante el uso de la interfase de trabajo del software Fluent versión 15.0.

3.4.1.1 DEFINICIÓN DE LAS CONDICIONES DE TRABAJO

El estudio realizado en el presente trabajo, es de un problema transitorio, esto quiere decir que las ecuaciones de trabajo son resueltas en el espacio y tiempo. De esta forma se calculó el campo de temperaturas mediante la transferencia de calor en la CC ocurrida durante la combustión aire-metano. De modo que para resolver la transferencia de calor por conducción (CTH por sus siglas en inglés) las condiciones entre el fluido-sólido se declaró como acoplados, el material utilizado en la carcasa de la CC es una aleación que se compone principalmente de cobalto, este material posee una combinación de resistencia a temperaturas

elevadas y a la oxidación hasta los 1093°C. Esta aleación mantiene su ductilidad después de una exposición prolongada a altas temperaturas.

La aleación 188 (Alloy 188) cumple con los requerimientos críticos de alta temperatura para aplicaciones de turbinas de gas, por lo que puede utilizarse para fabricar cámaras de combustión, conductos de transición, soportes de llama y los revestimientos de postcombustión en los motores a reacción. En la Tabla 3.4 se muestran las propiedades de dicho material.

Tabla 3.4 Propiedades Alloy 188 a 600°C

Propiedades de Alloy 188	
Densidad ρ	9139 Kg/m ³
Calor específico C_p	540 J/kg · °C
Conductividad térmica k	21.1 W/m · °C
Módulo de Young E	180 GPa
Relación de poisson ν	0.3
Coefficiente de expansión térmica α	15.0 x10 ⁻⁶ m/m/°C
Límite elástico	730 MPa
Resistencia a la tracción	1045 MPa

Para conocer la velocidad de entrada se utilizó la ecuación de la continuidad (Ecuación 3.12).

3.12

$$\dot{m} = V\rho A$$

Donde, V es la velocidad del fluido y A el área de la sección por donde pasa dicho fluido. Por lo tanto, al despejar queda la siguiente ecuación:

$$V = \frac{\dot{m}}{\rho A}$$

3.13

De modo que, si se conoce el flujo másico de aire, el área de la sección de entrada y la temperatura, se puede calcular la velocidad axial.

$$A = 2.219252466 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$\dot{m} = 0.01749 \text{ kg/s}$$

$$\rho = (25 \text{ }^\circ\text{C}, 1 \text{ atm}) 1.184 \text{ Kg/m}^3$$

$$V_A = \frac{0.01749 \text{ kg/s}}{(1.184 \text{ Kg/m}^3)(2.7339 \times 10^{-3} \text{ m}^2)} = \frac{0.01749}{2.62759492 \times 10^{-3}} = 6.6562 \text{ m/s}$$

El flujo antes de llegar al remolinador, se conoce como velocidad axial V_A posteriormente una vez entrando al remolinador el flujo cambia de dirección con un ángulo de $\beta = 54^\circ$ que fue seleccionado con base a lo reportado en la literatura científica [Teresa Parra et al. 2015].

Una vez que el flujo sale del remolinador la velocidad ahora tiene una inclinación que provoca que gire, creando un remolino. Con el ángulo y con la magnitud que se conoce, podemos crear otras componentes y así obtener la velocidad tangencial V_T , y posteriormente calcular la velocidad V_ω .

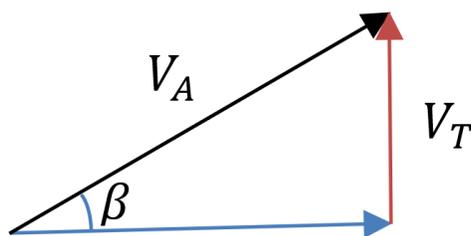


Figura 3.8 Sistema de coordenadas en la entrada del flujo oxidante.

Por lo tanto

$$V_T = V_A \text{ sen}(\beta) = (6.6562 \text{ m/s}) \text{ sen}(54) = 5.3849 \text{ m/s}$$

Mientras que la velocidad angular se calculó con la Ecuación 3.14 donde r es el radio de la circunferencia donde sale el fluido.

$$\omega = \frac{V_T}{r} \quad 3.14$$

Resolviendo dicha ecuación.

$$\omega = \frac{(6.6562 \frac{m}{s})}{(0.0295m)} = 225.63 \text{ rad/s}$$

De modo que, al introducir las tres variables al software, le da las condiciones de giro mostradas en la figura 3.9 la cual muestra los vectores de flujo en la entrada del oxidante.

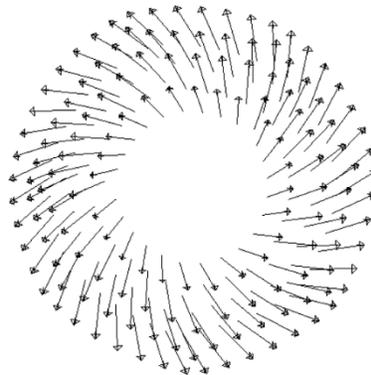


Figura 3.9 Vectores de flujo en la entrada del oxidante.

3.4.1.2 DEFINICIÓN DEL MODELO NUMÉRICO

Para resolver el fenómeno de combustión en estudio, fueron usadas las ecuaciones que resuelven dicho fenómeno, así pues son resueltas las ecuaciones de masa, momento y energía. También se resolvió la turbulencia, se eligió el modelo de turbulencia $\kappa - \epsilon$ estándar. Fue seleccionado este modelo por su bajo

consumo de recurso computacional y su estabilidad numérica en la predicción de fenómenos [Camaretti et. al 2013].

También fue resuelta la ecuación de transferencia radiativa donde es utilizado el modelo $P - 1$ y por último se dio paso al modelo de especies, donde se seleccionó el submodelo de combustión no premezclada.

3.4.1.3 PARÁMETROS PARA LA SOLUCIÓN NUMÉRICA

Fluent versión 15.0, cuenta con dos solucionadores: uno basado en presión y otro basado en la densidad. En este proyecto fue utilizado el resolvidor basado en la presión porque resuelven varios modelos físicos, entre ellos la combustión no premezclada.

En los métodos de solución fue utilizado el algoritmo PISO como método de acoplamiento presión-velocidad. Este algoritmo es recomendable para cálculos en estado transitorio. Además, permite utilizar pasos temporales grandes y factores de relajación inferiores de 1.0 para momento y energía [Fluent Theory Guide, 2016].

También es utilizado el método de los mínimos cuadrados basados en celdas (Least Square Cell-Based) para el cálculo de los gradientes del esquema de discretización espacial, donde para las ecuaciones de la presión, momento, especies de reacción química y la energía se utilizó un esquema de segundo orden. Mientras que, para la turbulencia, fue utilizado un esquema de primer orden. Finalmente, los valores de relajación se redujeron para facilitar la convergencia.

3.4.2 DEFINICIÓN DE LAS CONDICIONES DE TRABAJO FEM

Para realizar una simulación FEM fue necesario introducir las propiedades del material en este caso es una aleación (Alloy 188) cuyas propiedades son

mostradas en la Tabla 3.4. Una vez seleccionado el material, se da paso a las restricciones de la CC.

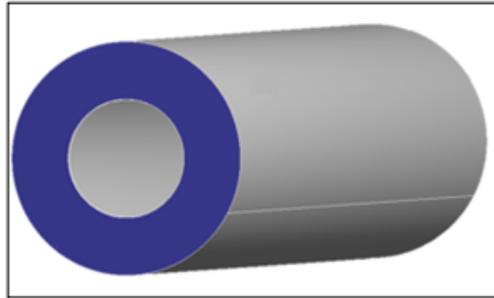


Figura 3.10 Restricción de la cámara de combustión.

En la Figura 3.10 se muestra la sujeción de color azul esta corresponde al lado del compresor de modo que al estar sujeto de un solo extremo tiene tres grados de libertad **X**, **Y** y **Z**.

Por otro lado, fue insertado un comando con el fin de cambiar los elementos estructurales SOLID186 a SOLID226 de modo que se tiene los grados de libertad térmico-estructurales. En la Figura 3.11 se muestra el comando introducido para realizar dicho cambio.

```
/prep7

! Get max element type number
*get,etype_num,etyp,0,num,max

! Define coupled field elements with
thermal-structural DOF
et,etype_num+1,solid226,11

! Change solid186 to solid226
esel,s,ename,,186
emodif,all,type,etype_num+1

! Select all elements
esel,all

/solu
```

Figura 3.11 Comando para realizar el cambio de un elemento estructural SOLID 186 a SOLID 226

CAPÍTULO

4

RESULTADOS

En este capítulo se muestran los resultados obtenidos mediante CFD y FEM. Para determinar los esfuerzos térmicos en la CC. Se calculó usando CFD, el campo de temperaturas de la pared causado por el calor que genera la combustión, posteriormente el campo de temperaturas se transfiere al modelo de elemento finito para el cálculo de los esfuerzos generados durante el calentamiento de la carcasa de la CC.

4 POST-PROCESO

4.1 RESULTADOS CFD

4.1.1 DISTRIBUCIÓN DE TEMPERATURAS

Para conocer el comportamiento de las temperaturas a lo largo de la CC se instalaron monitores en las principales secciones de la CC, en la Figura 4.1 se muestra las diferentes temperaturas obtenidas en un tiempo de simulación de 15 segundos, en esa figura se muestra que hay diferencias de temperaturas en los primeros segundos, a los 0.5 s, la temperatura más alta (346 K) se encontró en la zona primaria, mientras la temperatura más baja se registró en la zona de dilución con un valor de 326 K. Posteriormente conforme transcurre el tiempo las temperaturas se van estabilizando, alcanzando una temperatura constante en las cuatro zonas alrededor de los 8 segundos.

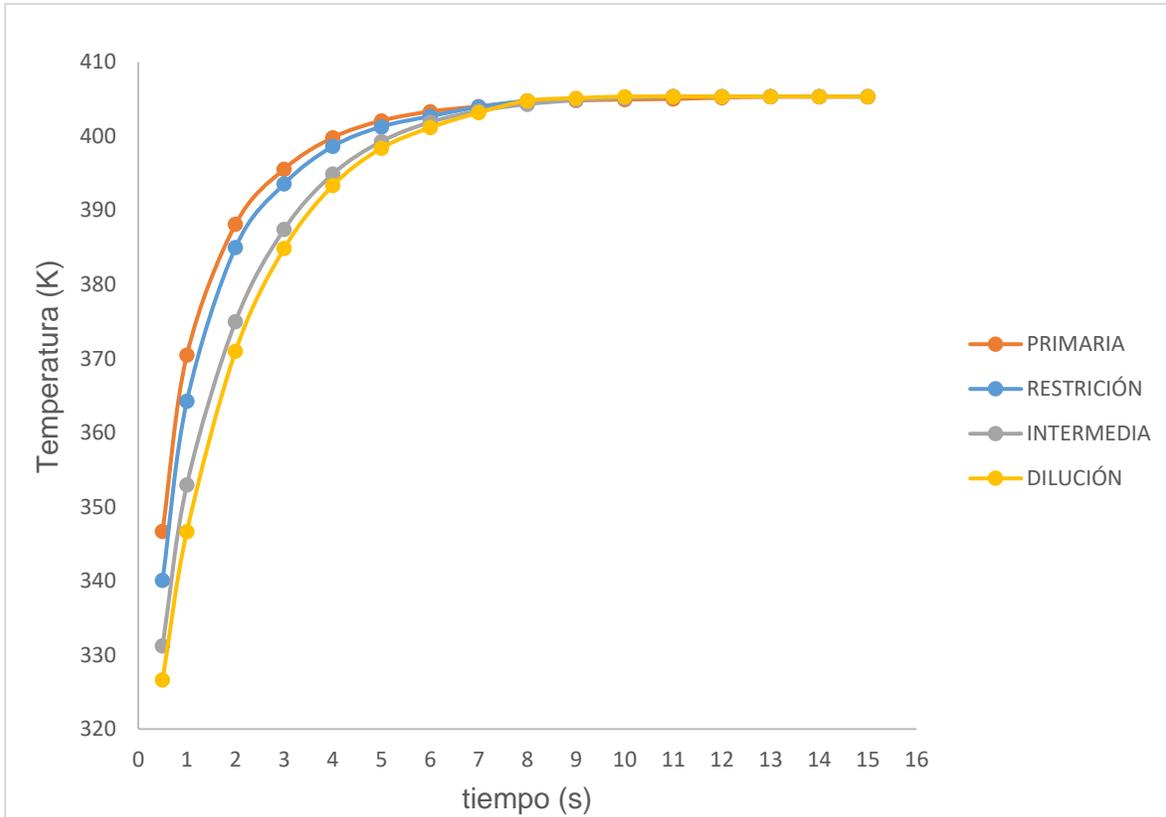


Figura 4.1 Monitores a lo largo de la carcasa de la CC.

En la Figura 4.2 se ilustran los contornos de temperaturas en 3D a lo largo de la carcasa de la CC, es apreciable que las temperaturas no son simétricas, esto se debe a que los gases calientes provenientes de la combustión tienen cierta rotación haciendo que los primeros instantes de tiempo los gases presentan diferencia de temperaturas, de tal manera que se presentan gradientes de temperatura. El análisis de estos gradientes se realizó mediante FEM. Posteriormente, mientras el tiempo transcurre, la temperatura de la CC alcanza el valor máximo de 405.8 K.

La Figura 4.3 muestra el contorno de temperaturas de los dos dominios (la pared y el fluido), además de un corte del 50% de altura a lo largo de la CC, donde la temperatura máxima alcanzada se encuentra en la zona primaria, sitio donde se crean zonas de recirculación reteniendo altas temperaturas en el centro de la flama con 2162.186 K.

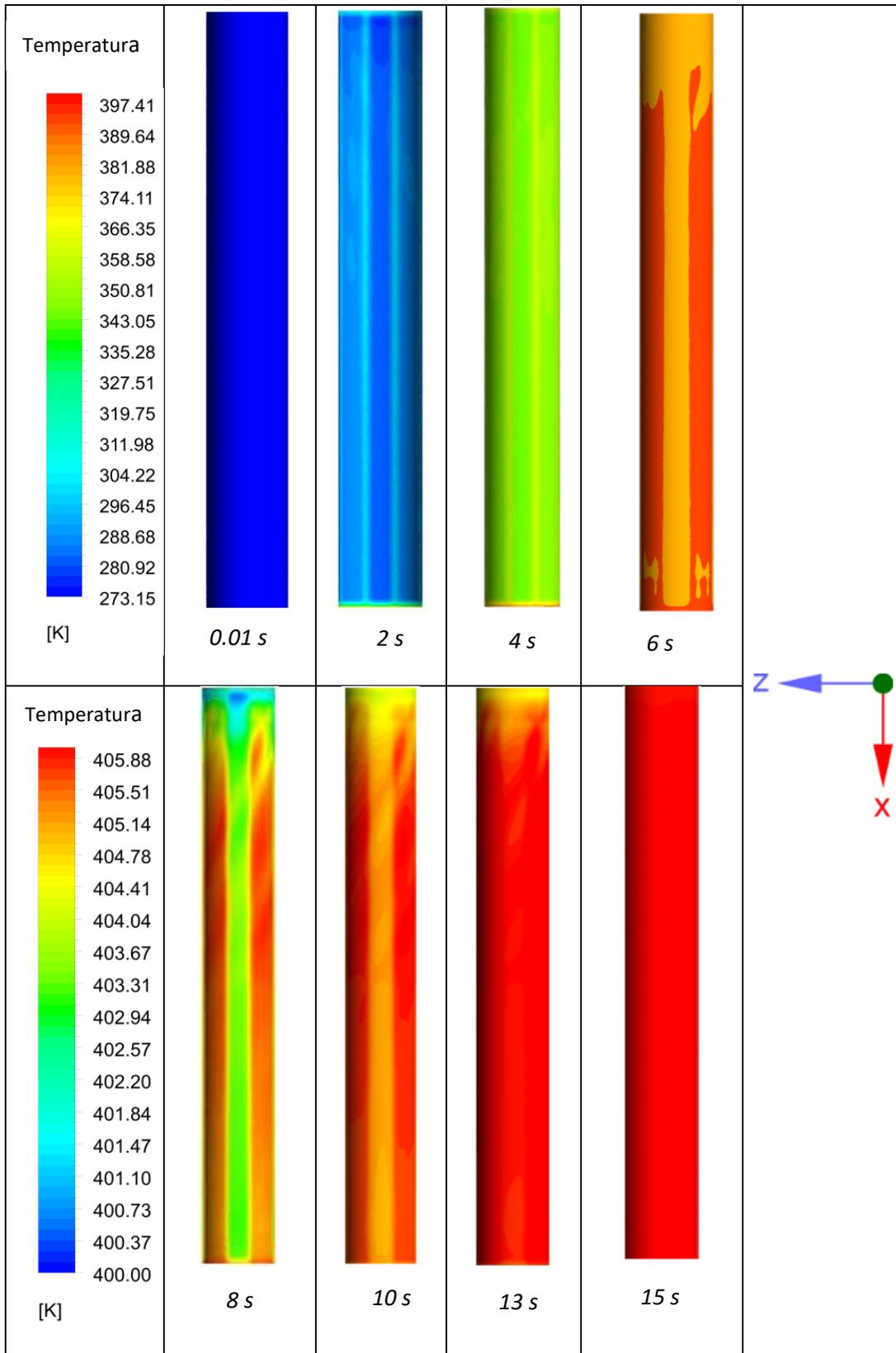


Figura 4.2 Contornos de temperaturas en la carcasa de la (CC), dirección de flujo es en el eje + X.

Las temperaturas decrecen axialmente un 61% en la zona intermedia y en la zona de dilución hasta un 52% respecto a la temperatura máxima, esto gracias al exceso de aire que se emplea en el sistema.

Mientras que cerca de la pared de la CC, se obtiene un decremento radial de temperatura promedio de 765.54 K, en la superficie de salida una temperatura promedio de 951.76 K mientras que la temperatura máxima de salida es de 1137.98 K.

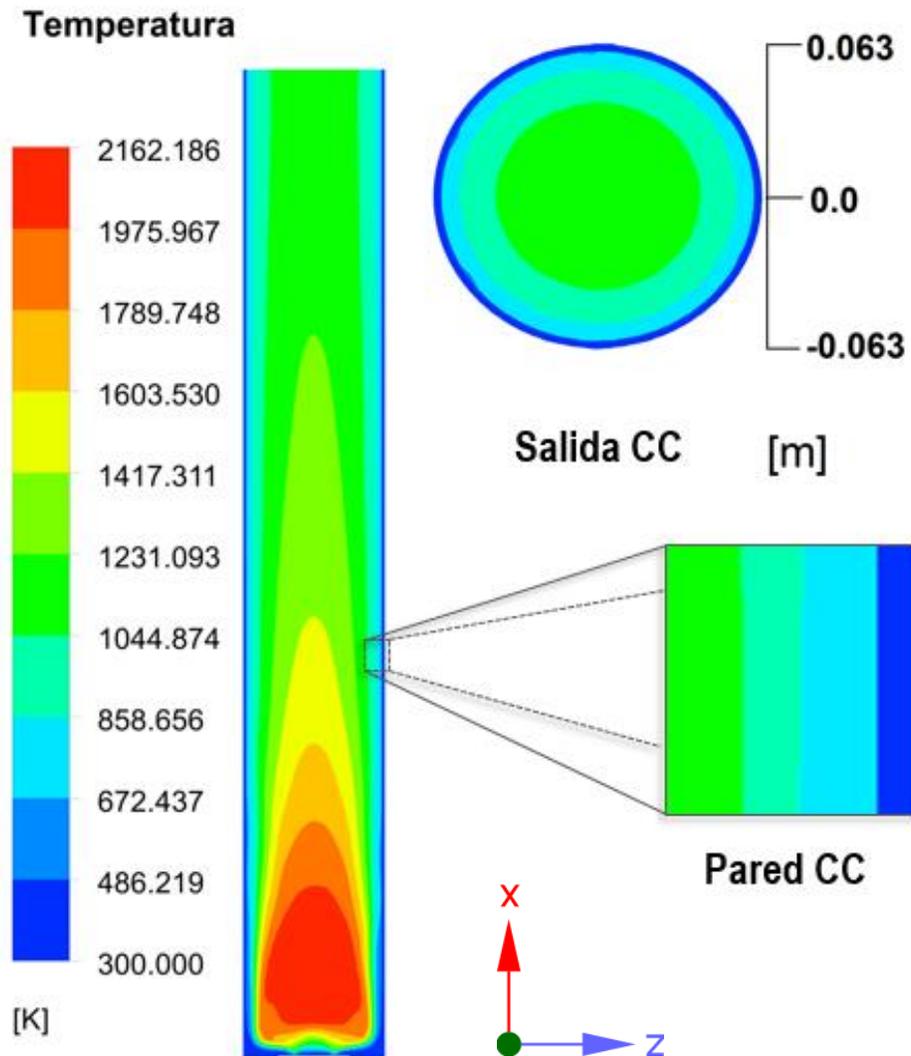


Figura 4.3 Contornos de temperaturas en corte axial y transversal al 50% de altura de la CC, dirección de flujo es en el eje + X.

4.1.2 CONTORNO DE PRESIÓN

La figura 4.4 muestra los contornos de presión absoluta generados por los diferentes cambios de velocidades a lo largo de la CC, la presión más alta se generó en los extremos de la zona primaria con un valor de 101348 Pa, esto se debe a que el flujo de aire entra a gran velocidad proveniente del estabilizador y mientras reduce la velocidad aumenta la presión. En la zona intermedia la presión disminuyó a 101330 Pa y en la salida de la CC la presión se redujo hasta 101322 Pa.

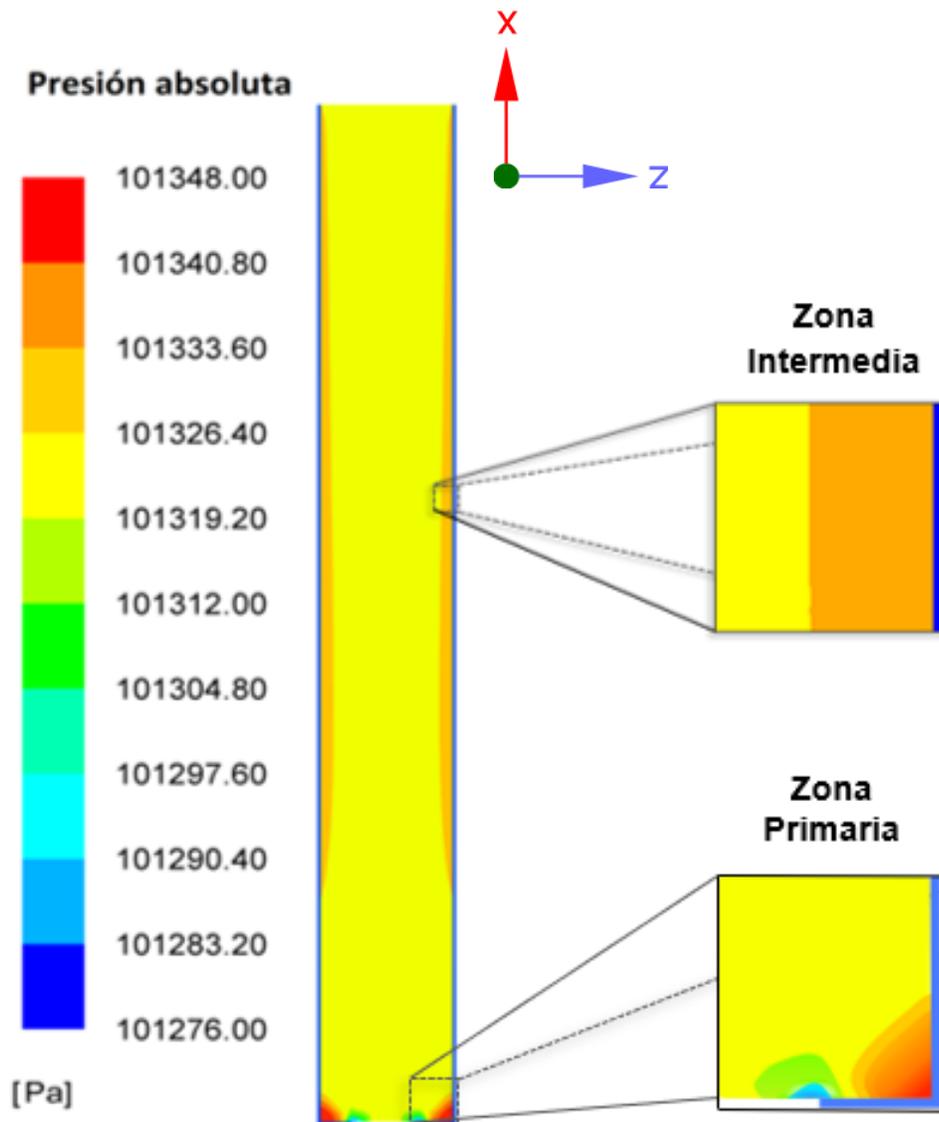


Figura 4.4 Contornos de presión en un corte axial de la CC, dirección de flujo es en el eje + X.

En la carcasa de la CC se tiene una presión promedio ejercida por el choque de fluido en las paredes de 101279 Pa.

4.1.3 CONTORNO DE VELOCIDAD

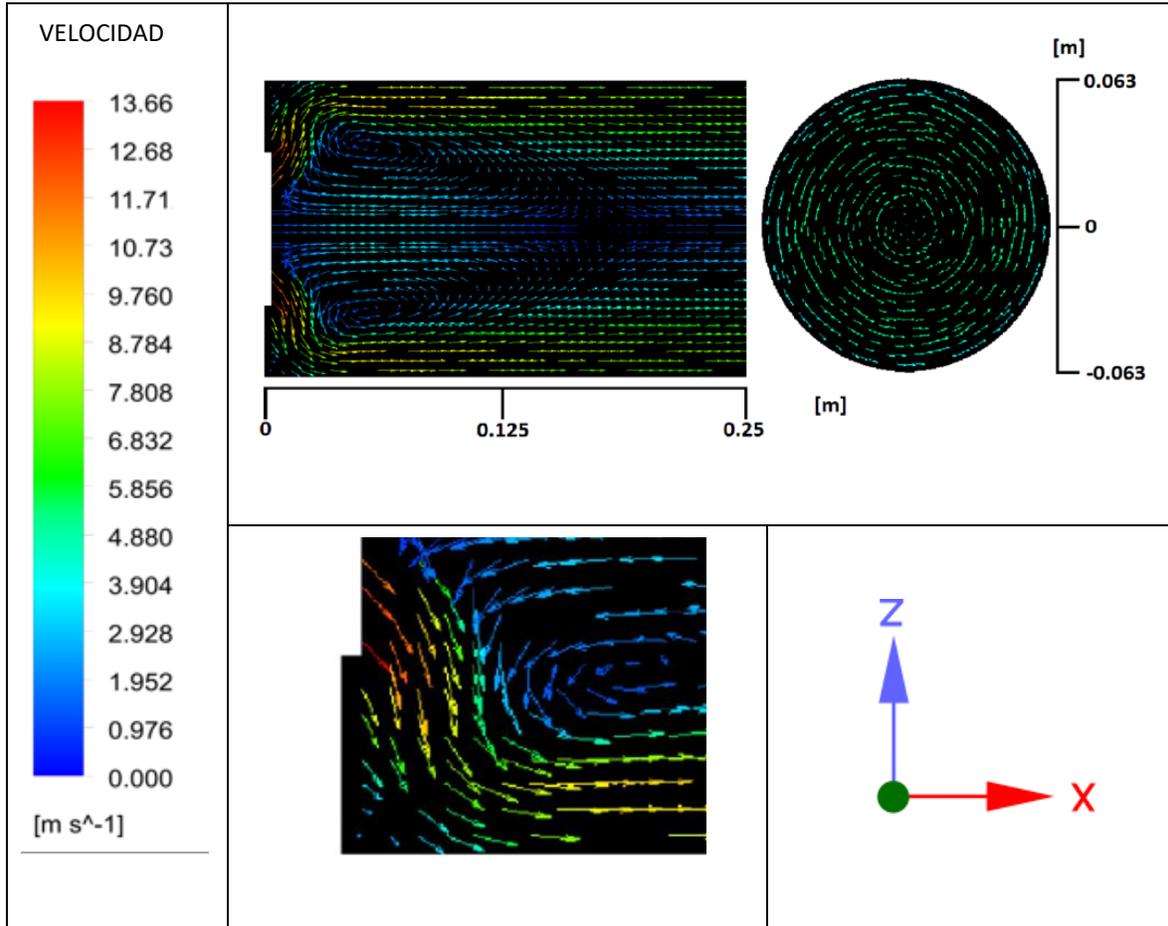


Figura 4.5 Contornos de velocidad en un corte axial de la CC, dirección de flujo es en el eje + X.

En la figura 4.5 se observa los vectores de velocidad del fluido en un corte axial, observado un fluido acelerado proveniente del estabilizador a una velocidad de 13.66 m/s y posteriormente baja la velocidad hasta 4.8 m/s muy cercano a la esquina de CC, creando una zona de baja velocidad, por lo cual ejerce una presión máxima como se aprecia en la figura 4.4. Posteriormente vuelve a ganar velocidad a lo largo de CC.

También se aprecia los vórtices creados por el deflector, el propósito de generar estos vórtices, es tener una combustión más eficiente y reducir los gases contaminantes.

4.2 RESULTADOS FEM

4.2.1 ESFUERZO TÉRMICO

La figura 4.6 ilustra el comportamiento del esfuerzo máximo en la carcasa de la CC, este esfuerzo se generó durante el tiempo de arranque, mientras la temperatura en la pared llega a un estado estable. Los esfuerzos se calcularon para los puntos de máximos gradientes de temperatura, sin tomar en consideración su localización.

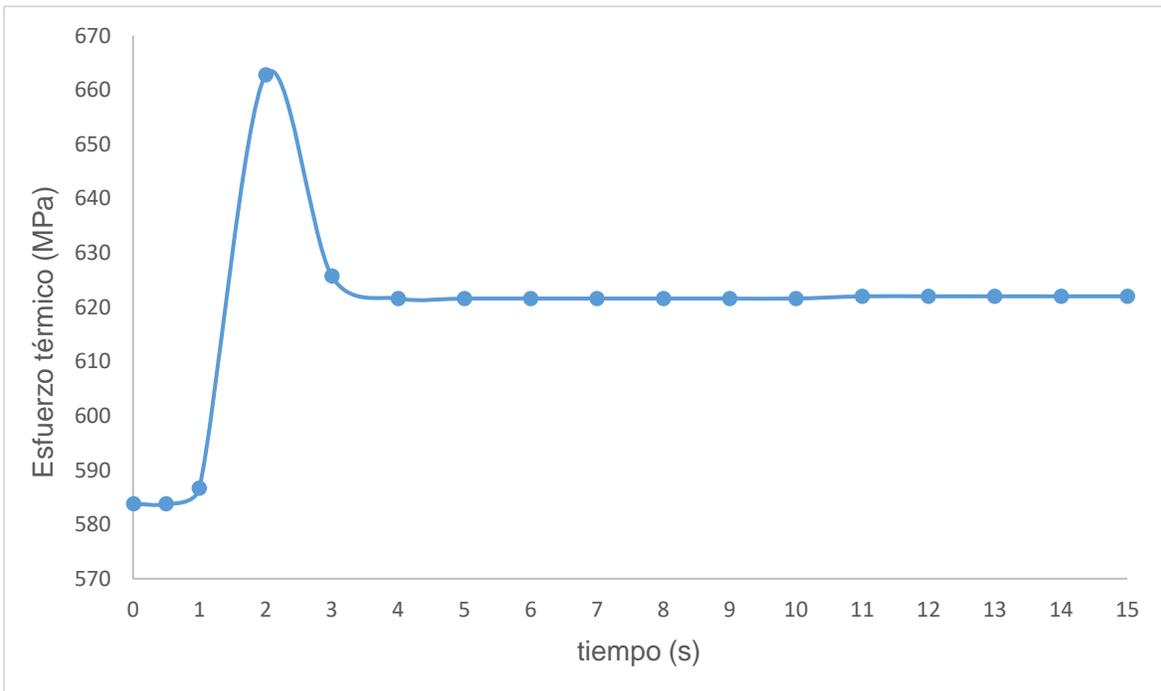


Figura 4.6: Gráfica de los esfuerzos máximos generados en la carcasa de la CC

Mediante esta gráfica se determina el instante en que los esfuerzos térmicos alcanzan sus valores más altos.

Los esfuerzos térmicos más altos se obtuvieron a un tiempo de simulación de dos y tres segundos. Iniciando con un esfuerzo de 584 MPa, posteriormente, conforme avanza el tiempo van incrementándose, alcanzando un esfuerzo máximo de 663 MPa. Una vez que la temperatura se va estabilizando a lo largo de la CC los esfuerzos se reducen, de tal manera que la CC queda sometida a un esfuerzo constante de 622 MPa.

A continuación, se muestran en la Figura 4.7 los contornos de los esfuerzos térmicos y la ubicación del esfuerzo más grande con la representación de los esfuerzos de Von Mises

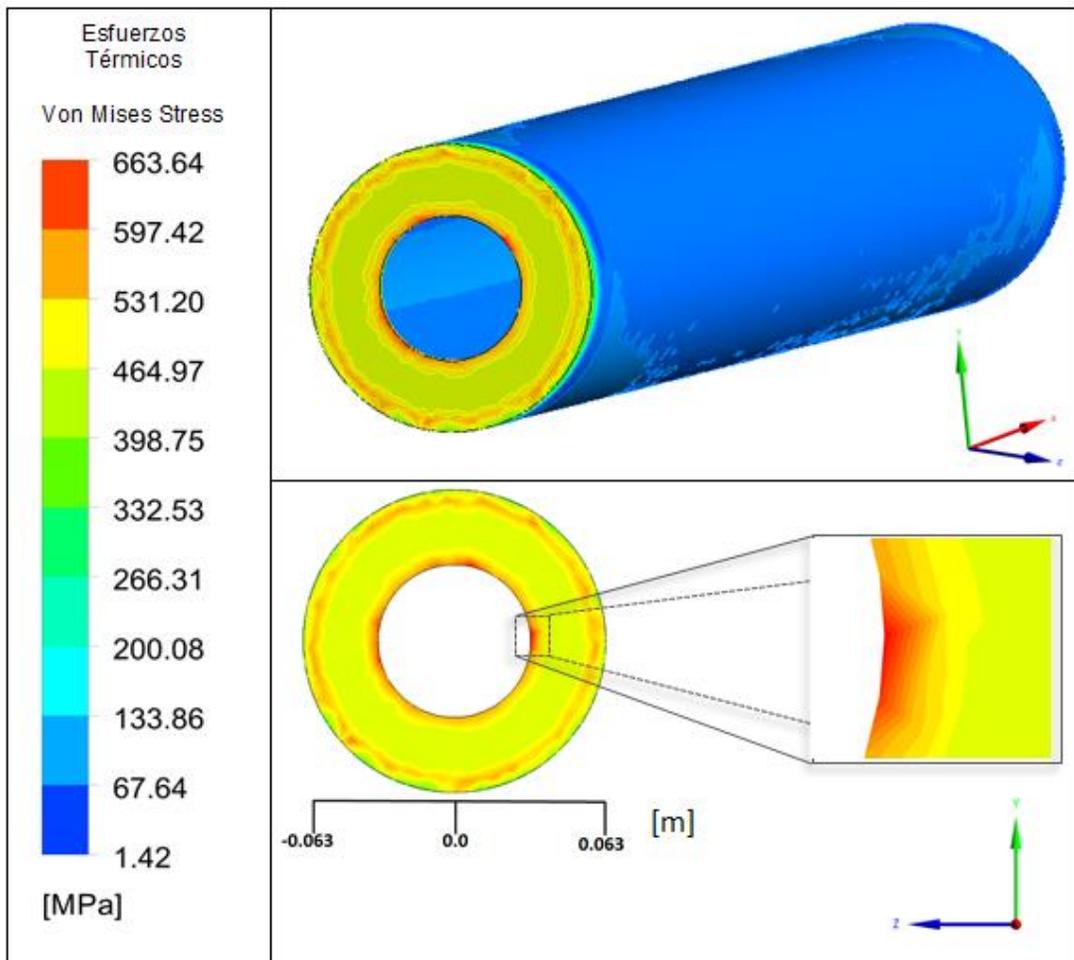


Figura 4.7 Contorno de esfuerzos térmicos durante dos segundos, dirección de flujo es en el eje + X.

Los esfuerzos más grandes se localizaron en los extremos de la zona primaria donde se encontró una gran diferencia de temperatura y posteriormente la restricción, también se localizó una presión en los extremos ejercida por el fluido, dando lugar a una concentración de esfuerzo en esta zona.

La Figura 4.8 muestra los esfuerzos térmicos generados a lo largo de la CC, para su medición se instalaron 3 monitores los cuales corresponden a las diferentes zonas de la cámara, se tomaron los valores más grandes de cada zona generados durante el tiempo de simulación. Como se observa el esfuerzo más grande se registró en la zona primaria en un tiempo de dos segundos con un valor de 478 MPa, posteriormente esta reduce y queda sometida a un esfuerzo constante de 449 MPa.

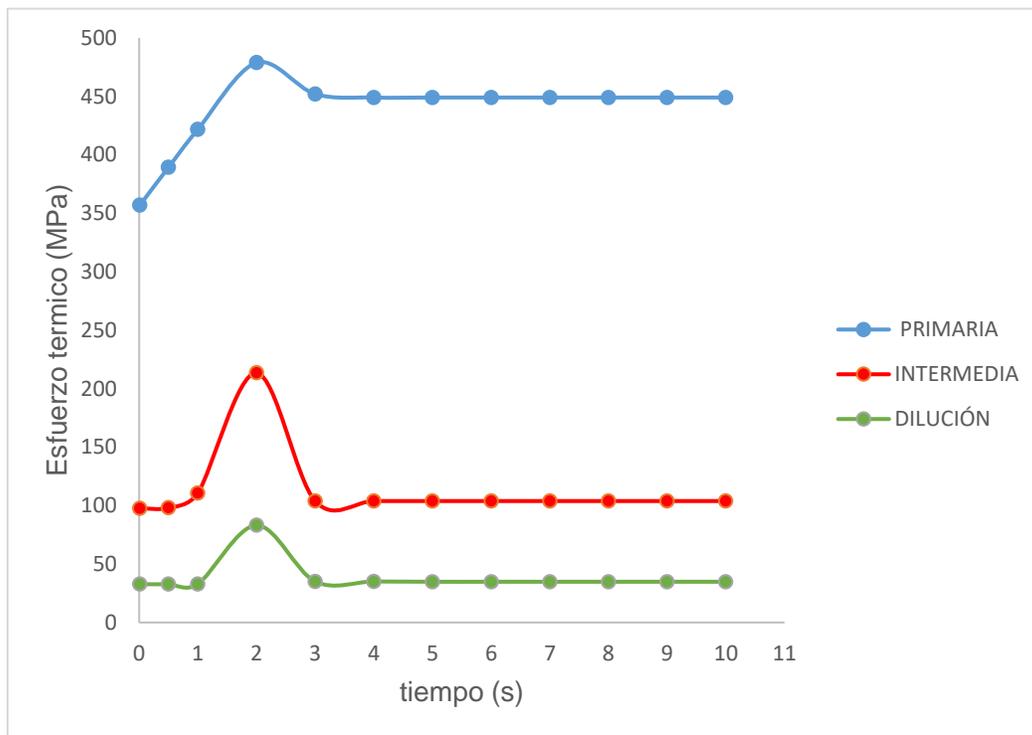


Figura 4.8 Esfuerzo térmicos a lo largo de la CC.

Mientras que en la zona intermedia el valor máximo alcanzado fue de 213 MPa y sometido a un esfuerzo constante de 103 MPa y finalmente, en la zona de dilución su valor máximo fue de 83 MPa y sometido a un esfuerzo constante de 35 MPa.

El trabajar con altas temperaturas, hace que el material de la CC tienda a deformarse por la expansión que sufre durante el tiempo de calentamiento, el visualizar las deformaciones en un diseño de una CC, hace que otros componentes de MTG no se vean afectados durante el funcionamiento.

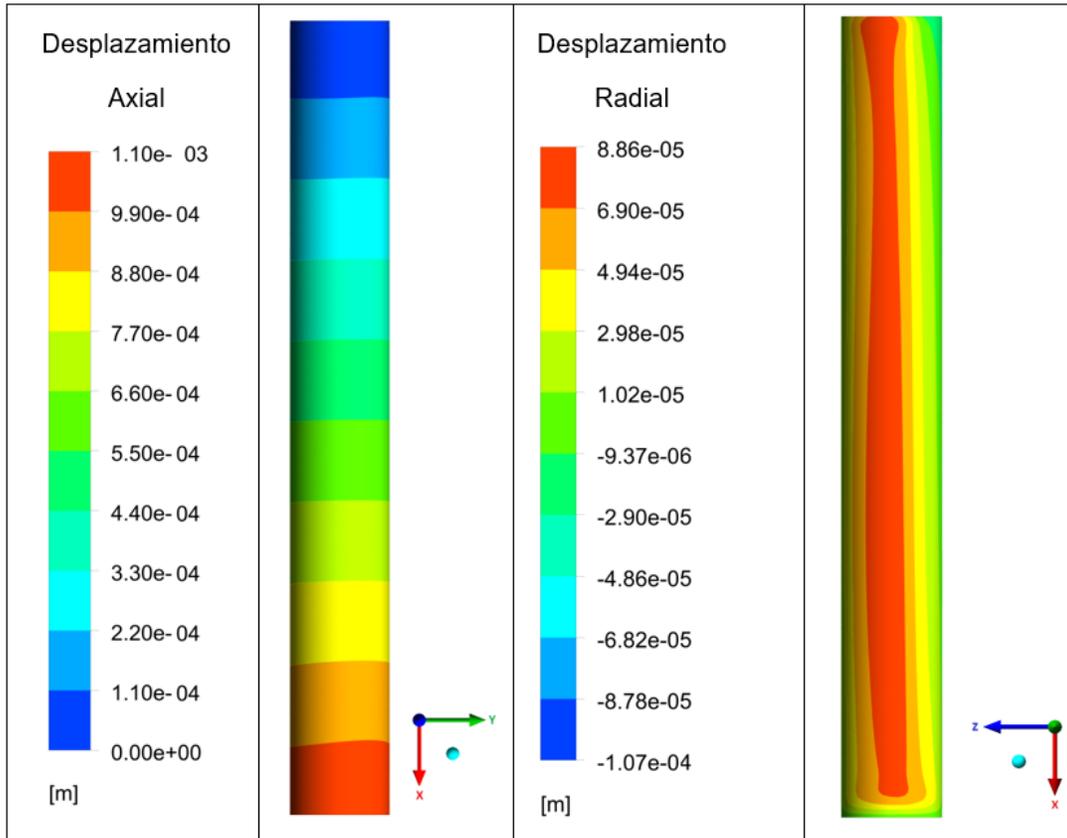


Figura 4.9 Contornos de desplazamientos dirección de flujo es en el eje + X.

La Figura 4.9 muestra los contornos de desplazamientos generados por los efectos de la expansión térmica. El mayor desplazamiento fue generado en dirección axial con valor máximo de $1.10 \times 10^{-03} \text{ m}$, debido a que la CC solo se encuentra restringido en un extremo, dejando el desplazamiento a lo largo de CC con dirección a la turbina, mientras que en la dirección radial se obtuvo un desplazamiento de $8.86 \times 10^{-05} \text{ m}$.

CAPÍTULO

5

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES

Con base en los análisis de los resultados se concluye lo siguiente:

Los cálculos realizados y el análisis de los resultados obtenidos en este trabajo permitieron evaluar la transferencia de calor que tiene lugar en una cámara de combustión de una microturbina de gas. El estudio se llevó a cabo mediante el análisis de los flujos de gases calientes, generados durante la combustión de aire-metano, que interactúan con el metal de la carcasa de la CC, posteriormente con la ayuda del análisis térmico, se obtuvo la distribución de temperaturas.

Los resultados del análisis térmico se llevaron a cabo durante un lapso de tiempo igual a 15 segundos, alcanzando una temperatura máxima y constante de 405 K, cabe mencionar que durante los primeros instantes de tiempo se generaron diferencias de temperaturas que causaron gradientes a lo largo de la CC. Los gradientes de temperatura más altos se generaron en un tiempo igual a uno hasta dos segundos, debido a que en esos primeros instantes la CC se encuentra a una temperatura inferior a la que se encuentran los gases de la combustión, la temperatura máxima generada en la flama es de 2162 K.

El material utilizado para realizar el proyecto fue una aleación a base de cobalto llamado Alloy 188, el cual está diseñado para operar a temperaturas de 1255 K, sin embargo, las propiedades del material influyen mucho en cuanto a la transferencia de calor y solo fue utilizado un 32% de su capacidad para soportar temperaturas, por lo tanto, resulta viable y recomendable el empleo de este material

Los resultados de los esfuerzos térmicos más grandes, se obtuvieron en la zona primaria con un valor estable de 663 MPa, alcanzada en un tiempo de dos segundos, mismo tiempo al cual son generados los gradientes de temperaturas. De acuerdo con los resultados obtenidos, la aleación Alloy 188 puede soportar un esfuerzo continuo de hasta 730 MPa por lo que el valor alcanzado está 9.2 % por debajo de este límite.

Finalmente, cuando la temperatura se mantiene constante los esfuerzos se reducen quedando sometida la CC a un esfuerzo continuo de 622 MPa que equivale a un 14.8 % por debajo del límite de cedencia.

5.2 RECOMENDACIONES

- Para trabajos posteriores es recomendable realizar simulaciones con diferentes tipos de mallado para realizar una comparativa de cómo se ve afectan los resultados, en cuestión al tipo de elemento asignado y tamaño del elemento.
- Comparativa de error entre cálculos numéricos y cálculos físicos.
- Realizar diferentes simulaciones relacionadas a la turbulencia, con el propósito de reducir el impacto de temperatura, a las paredes de la cámara de combustión.
- Estimar la vida útil del material asignado.

BIBLIOGRAFÍA

Ansys Fluent 16.1 Theory guide, 2016, Ansys Inc.

Ansys Fluent 15.Theory guide, 2015, Ansys Inc.

Cameretti, M. C., Tuccillo, R. & Piazzesi, R. (2013). Study of an exhaust gas recirculation equipped micro gas turbine supplied with bio-fuels. *Applied Thermal Engineering*, vol. 59, pp. 162-173.

Castro G. Laura L., Urquiza Beltrán G. & Kubiak Sziszka J., 2008, "Estudio numérico del flujo en componentes de una turbina hidráulica", Memorias del XIV Congreso Anual de la SOMIM, Puebla, México.

C Rajesh Babu, (2014). "Thermal stress analysis of a gas turbine casing using FEA". *Journal of Mechanical and Civil Engineering*, vol. 11, pp. 32-37.

Eduardo A., Manuel R., Daniel F., Antonio J. & Joaquín F. (2016). "Obtaining energy from tidal microturbines: A practical example in the Nalón River". *Applied Energy*, vol. 183, pp. 100-112.

Fengjun Lv., Quan Li. & Guoru Fu., (2010). "Failure analysis of an aero-engine combustor liner". *Engineering Failure Analysis*, vol. 17, pp. 1094-1101.

Firdaus B., Thamir K., Khairul H. & Takanobu Y. (2016). "Effect of operation strategies on the economic and environmental performance of a micro gas turbine trigeneration system in a tropical región", *Energy*, vol. 97, pp. 262-272.

Heeyoon Chung, Ho-Seong Sohn, Jun Su Park, Kyung Min Kim & Hyung Hee Cho, (2017). "Thermo-structural analysis of cracks on gas turbine vane segment having multiple airfoils", *Energy*, vol. 118, pp. 1275–1285.

Hokyu Moon, Kyung Min Kim, Yun Heung Jeon , Sangwoo Shin , Jun Su Park & Hyung Hee Cho, (2015). "Effect of thermal stress on creep lifetime for a gas turbine combustion liner". *Engineering Failure Analysis*, vol. 47, pp. 34-40.

H. S. Zhen, C. S. Cheung, C.W. Leung & H.B. Li, (2013) "Thermal and heat transfer behaviors of an inverse diffusion flame with induced swirl", *Fuel*, vol. 103, pp. 212–219.

J.O. Dávalos, G. Urquiza, J.A. Ramírez, M.A. Basurto, J.C. García & F. Sierra, (2011). "Análisis numérico-experimental de esfuerzos térmicos en un cilindro hueco". MEMORIAS DEL XVII CONGRESO INTERNACIONAL ANUAL DE LA SOMIM, SAN LUIS POTOSÍ, MÉXICO.

Jun Li, Qingqing Li, Junrui Shi, Xueling Liu & Zhaoli Guo, (2016). "Numerical study on heat recirculation in a porous micro-combustor", *Combustion and Flame*, vol. 171, pp. 152-161.

Kosman Wojciech, (2010). "Thermal analysis of cooled supercritical steam turbine components", *Journal of Energy*, vol. 5, pp. 1181-1187.

Kyung Min Kim, Jun Su Park, Dong Hyun Lee, Tack Woon Lee & Hyung Hee Cho, (2011). "Analysis of conjugated heat transfer, stress and failure in a gas turbine blade with circular cooling passages", *Engineering Failure Analysis*, vol. 18, pp. 1212-1222, ISSN 1350-6307.

Lefebvre, A., Ballal, & D., Bahr, D., (2010). "Gas turbine combustión: alternative fuels and emissions". Third Edition. Boca Raton: Taylor and Francis Group. pp. 10-18.

Mixquititla Luis C., 2015, "Cálculo numérico de la combustión y del campo de flujo en cámara de combustión para aplicaciones de microturbinas de gas", Tesis de Maestría, CIICAp- UAEM, Mor., México.

L.S.V.Prasad & K.Rajesh Chandra, (2014). "Thermo Structural Analysis on a Marine Gas Turbine Flame Tube", *International Journal of Engineering, Business and Enterprise Applications*. IJEBEA 14, p. 83.

Massimo Laraia, Marcello Manna, Giuseppe Cinque & Pasquale Di Martino, (2013). "A combustor liner cooling system design methodology based on a fluid/structure approach". *Applied Thermal Engineering*, vol. 60, pp. 105-121.

Ming-hsunWu, YanxingWang, VigorYang & Richard A.Yetter, (2007). "Combustion in meso-scale vortex chambers". *Proceedings of the Combustion Institute*, vol. 31, pp. 3235-3242.

Minsung Choi, Yonmo Sung, Myungjun Won, Yeseul Park, Minkuk Kim, Gyungmin Choi & Duckjool Kim, (2017). "Effect of fuel distribution on turbulence and combustion characteristics of a micro gas turbine combustor", *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, vol. 48, pp. 24-35.

Mustafa A.H., Hashmi M.S.J., Yilbas B.S. & Sunar M., (2006), "Thermal stress analysis in annular duct resembling gas turbine transition piece", *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 171, pp. 285-294.

Norton, D.G., Vlachos, D.G, (2003). "Combustion characteristics and flame stability at the microscale: A CFD study of premixed methane/air mixtures". *Chemical Engineering Science*, vol. 58, pp. 4871-4882.

R. Marsh , J. Runyon, A. Giles, S. Morris, D. Pugh, A. Valera-Medina & P. Bowen, (2017). "Premixed methane oxycombustion in nitrogen and carbon dioxide atmospheres: measurement of operating limits, flame location and emissions. *Proceedings of the Combustion Institute*". *Proceedings of the Combustion Institute*, vol. 36, pp. 3949–3958.

R. C. Hibbeler. (2006) *Mecánica de materiales*. Sexta edición. Pearson educación, México, pp. 3-100.

R. Roback & B.V. Johnson, (1983). "Mass and momentum turbulent transport experiments with confined swirling coaxial jets," *Interim Report*.

Roche P.J. (1998). "Verification and validation in Computational science and engineering. Hermosa Publishers, Albuquerque New Mexico.

Song Geewook, Kim Bumshin & Chang Sungho, (2011), "Fatigue Life Evaluation for Turbine Rotor Using Green's Function", *Procedia Engineering*, vol.10, pp. 2292-2297.

Srinivasa S., M.V.S. Murali, & D.N.Reddy ψ , (2015). "Design and analysis of gas turbine combustion chamber for producer gas as working fuel". *International Journal of Current Engineering and Technology* Vol.5.

Tenango P.Oscar, García J.C., SierraF. Z., Rodríguez JoséAlfredo, Castro G. Laura L. & Basurto M., (2013). "Numerical Calculation of Thermal stresses in a micro gas turbine". MEMORIAS DEL XIX CONGRESO INTERNACIONAL ANUAL DE LA SOMIM, PACHUCA, HIDALGO, MÉXICO.

Teresa Parra, Ruben P., Miguel A. Rodriguez, Francisco C.,Robert Z. Szasz & Artur G. (2015) "Numerical simulation of swirling flows -heat transfer enhancement". *Journal of Fluid Flow, Heat and Mass Transfer*, vol. 2, pp. 1-6.

T. Parra, R. Z. Szasz, C. Duwig, R. Pérez, V. Mendoza & F. Castro, (2013). "Acoustic instabilities on swirling flames". *International Journal of Mechanical Engineering*, vol. 7, no. 9, pp. 742-745.

Valera-Medina, A., Syred, N., Griffiths, A. (2009). "Visualisation of isothermal large coherent structures in a swirl burner". *Combustion and Flame*, vol. 156, issue 9, pp. 1723-1734.

Witek Lucjan, Orkisz Marek, Wygonik Piotr, Musili Daniel N. & Kowalski Tadeusz, (2011), "Fracture analysis of a Turbine casing". *Journal of Engineering Failure Analysis*, Vol. 18, pp. 914-923.

Yaohui Lu, Xing Zhang, Penglin Xiang & Dawei Dong, (2017). "Analysis of thermal temperature fields and thermal stress under steady temperature field of diesel engine piston". *Applied Thermal Engineering*, vol. 113, pp. 796-812.

YiguangJu, KaoruMaruta, (2011)."Microscale combustion: Technology development and fundamental research". *Progress in Energy and Combustion Science*, vol. 37, pp. 669-715

Ziaei Tabatabaei, S., Hashemi, A., Meysami, A. & Zolghadr Shojai, A. (2012)."The thermofluids design of a 100 KW, single-shaft prototype microturbine as a new distributed generation method in Iran". *Energy Procedia*, vol. 14, pp. 1903-1910.
