



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



ESCUELA TÉCNICA
SUPERIOR INGENIEROS
INDUSTRIALES VALENCIA

TRABAJO FIN DE GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

VALIDACIÓN DE UN MODELO DE TURBOCOMPRESOR DE SOBREALIMENTACIÓN CUASI-2D EN CONDICIONES DE FLUJO PULSANTE

AUTOR: PABLO NAVARRO GARCÍA

TUTOR: JOSÉ GALINDO LUCAS

COTUTOR: FRANCISCO JOSÉ ARNAU MARTINEZ

Curso Académico: 2015-16



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

Autor: Pablo Navarro García

Tutor: José Galindo Lucas

Cotutor: Francisco José Arnau Martínez

Validación de un modelo de turbocompresor de
sobrealimentación cuasi 2-D en condiciones de flujo
pulsante



RESUMEN

Actualmente se presenta una situación en la que las necesidades de transporte de la sociedad aumentan constantemente a la vez que la capacidad de las industrias a la hora de obtener combustibles fósiles se reduce a mayor velocidad.

Esta situación ha llevado a la reducción del consumo de dichos combustibles, a la reducción de las emisiones y con ello a la mejora de los equipos de sobrealimentación de los motores de combustión interna alternativos.

Debido a la necesidad de optimización últimamente se ha optado por la simulación de los mismos, para con ello obtener resultados de una manera más rápida y precisa que mediante ensayos experimentales.

En el documento que se presenta a continuación se expone la validación de un turbocompresor en el que se ha ido ajustando un modelo hasta alcanzar con mayor precisión unos valores experimentales. Se presenta un modelo de la turbina con el objetivo de ser utilizado para la predicción de la propagación de las ondas sonoras a través del turbocompresor.

En primer lugar, se ha llevado a cabo una validación de la turbina bajo condiciones unidimensionales en las que la voluta de la turbina se simplifica a un conducto rectilíneo de volumen igual al de la voluta en sí. Debido a que se observan errores considerables a partir de ciertas frecuencias, se plantea la simulación de la turbina del turbocompresor en condiciones cuasi-bidimensionales en las que la turbina ya no se modela con un conducto rectilíneo de flujo constante, sino que se tienen en cuenta las desviaciones de caudal de aire a lo largo de la voluta debidas a su geometría en forma de voluta y de sección decreciente.

DOCUMENTO I MEMORIA
DOCUMENTO II PLIEGO DE CONDICIONES
DOCUMENTO III PRESUPUESTO

ÍNDICE GENERAL

I MEMORIA

1 INTRODUCCIÓN	1
1.1 DESCRIPCIÓN GENERAL.....	1
1.2 ANTECEDENTES, MOTIVACIÓN Y JUSTIFICACIÓN	3
1.3 OBJETIVOS Y ALCANCE	3
1.4 PROCEDIMIENTO.....	3
2 MODELADO DE MOTORES	6
2.1 CONCEPTO Y CLASIFICACIÓN	6
2.2 MODELADO DEL FLUJO DE GASES.....	6
2.2.1 Modelo unidimensional de acción de ondas	7
2.2.2 Modelos cerodimensionales de llenado y vaciado	8
2.2.3 Modelo del valor medio	9
3 HERRAMIENTAS Y DATOS EXPERIMENTALES	10
3.1.1 GT-POWER.....	10
3.1.2 Matlab	10
3.1.3 Microsoft Excel	11
3.2 DATOS EXPERIMENTALES.....	11
4 DESCRIPCIÓN DE LOS MODELOS	12
4.1 MODELO GT-POWER	12
4.2 MODELO CMT.....	14
5.VALIDACIÓN DE LOS MODELOS	18
5.1 VALIDACIÓN DE LA TURBINA 1D	18
5.1.1 Introducción	18
5.1.2 Procedimiento	18
5.1.3 Resultados	20
5.2 VALIDACION CUASI 2D	36
5.2.1 Introducción	36
5.2.2 Procedimiento.....	36
5.2.3 Resultados:.....	37
6.CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS	40
7. REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFIA	41

II PLIEGO DE CONDICIONES

1 INTRODUCCIÓN	47
2 CONDICIONES GENERALES	47
2.1 CONDICIONES GENERALES FACULTATIVAS	47
2.1.1 Promotor del proyecto:.....	47
2.1.2 Obligaciones y derechos del proyectista:	47
2.1.3 Facultades del promotor del proyecto:.....	48
2.1.4 Condiciones Generales de la ejecución del proyecto:	48
2.2 CONDICIONES GENERALES LEGALES	48
2.2.1 Marcas Registradas:	48
2.2.2 Derechos de autor:.....	48
2.2.3 Causas de la rescisión del proyecto:	48
3 CONDICIONES PARA EL DESARROLLO DEL TRABAJO.....	49
3.1 CONDICIONES PROGRAMAS UTILIZADOS	49

III PRESUPUESTO

III PRESUPUESTO	52
1 DESCRIPCION GENERAL.....	53
1.1 INTRODUCCIÓN.....	53
1.2 ACTIVIDADES	53
1.2.1 Elaboración de scripts para el pos procesado:.....	53
1.2.2 Simulación y adaptación de los modelos:	53
1.2.3 Análisis y validación de los resultados:	54
1.2.4 Elaboración de informes:	54
1.3 RECURSOS	54
1.3.1 Costes mano de obra:	54
1.3.2 Costes de los Recursos materiales	55
2 PRESUPUESTOS	55
2.1 PRESUPUESTOS PARCIALES	55
2.2 PRESUPUESTO GLOBAL	57

DOCUMENTO I MEMORIA

ÍNDICE MEMORIA

<u>1 INTRODUCCIÓN</u>	1
<u>1.1 DESCRIPCIÓN GENERAL</u>	1
<u>1.2 ANTECEDENTES, MOTIVACIÓN Y JUSTIFICACIÓN</u>	3
<u>1.3 OBJETIVOS Y ALCANCE</u>	3
<u>1.4 PROCEDIMIENTO</u>	3
<u>2 MODELADO DE MOTORES</u>	6
<u>2.1 CONCEPTO Y CLASIFICACIÓN</u>	6
<u>2.2 MODELADO DEL FLUJO DE GASES</u>	6
<u>2.2.1 Modelo unidimensional de acción de ondas</u>	7
<u>2.2.2 Modelos cerodimensionales de llenado y vaciado</u>	8
<u>2.2.3 Modelo del valor medio</u>	9
<u>3 HERRAMIENTAS Y DATOS EXPERIMENTALES</u>	10
<u>3.1.1 GT-POWER</u>	10
<u>3.1.2 Matlab</u>	10
<u>3.1.3 Microsoft Excel</u>	11
<u>3.2 DATOS EXPERIMENTALES</u>	11
<u>4 DESCRIPCIÓN DE LOS MODELOS</u>	12
<u>4.1 MODELO GT-POWER</u>	12
<u>4.2 MODELO CMT</u>	14
<u>5.VALIDACIÓN DE LOS MODELOS</u>	18
<u>5.1 VALIDACIÓN DE LA TURBINA 1D</u>	18
<u>5.1.1 Introducción</u>	18
<u>5.1.2 Procedimiento</u>	18
<u>5.1.3 Resultados</u>	20
<u>5.2 VALIDACION CUASI 2D</u>	36
<u>5.2.1 Introducción</u>	36
<u>5.2.2 Procedimiento</u>	36
<u>5.2.3 Resultados:</u>	37
<u>6.CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS</u>	40
<u>7. REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFIA</u>	41

INDICE DE FIGURAS

Figura 1 Mapa del Turbocompresor modelado en GT-POWER	2
Figura 2 Mapa del Turbocompresor CMT	2
Figura 3 Esquema de obtención de datos experimentales	3
Figura 4 Modelo Turbina GT-POWER	12
Figura 5 Parametro Geometricos Modelo GT-POWER	13
Figura 6 Parámetros térmicos modelo GT-POWER.....	13
Figura 7 Turbina Modelo CMT.....	14
Figura 8 Esquema transmisión de calor	15
Figura 9 Parámetros Geométricos Interfaz	16
Figura 10 Geometría Turbina	17
Figura 11 Puntos Funcionamiento de la Turbina	19
Figura 12 Caso 2 Onda Incidente.....	21
Figura 13 Caso 2 Onda Incidente 600 Hz.....	21
Figura 14 Caso 2 Onda Incidente 2000 Hz.....	21
Figura 15 Caso 2 Onda Reflejada.....	22
Figura 16 Caso 2 Onda Reflejada 600 Hz.....	22
Figura 17 Caso 2 Onda Reflejada 2000Hz.....	22
Figura 19 Caso 2 Onda Transmitida 600 Hz.....	23
Figura 21 Caso 2 Segunda Reflexión	24
Figura 22 Caso 2 Segunda Reflexión 600Hz	24
Figura 23 Caso 2 Segunda Reflexión 2000Hz	24
Figura 24 Descomposición Ondas Interior de la turbina.....	25
Figura 25 Caso 4 Onda Incidente.....	26
Figura 26 Caso 4 Onda Incidente 600Hz	26
Figura 27 Caso 4 Onda Incidente 2000Hz	26
Figura 28 Caso 4 Onda Reflejada.....	27
Figura 29 Caso 4 Onda Reflejada 600Hz.....	27
Figura 30 Caso 4 Onda Reflejada 2000Hz.....	27
Figura 31 Caso 4 Onda Transmitida.....	28
Figura 32 Caso 4 Onda Transmitida 600 Hz.....	28
Figura 33 Caso 4 Onda Transmitida 2000Hz	28
Figura 34 Caso 4 Segunda Reflexión	29
Figura 35 Caso 4 Segunda Reflexión 600Hz	29
Figura 36 Caso 4 Segunda Reflexión 2000Hz	29
Figura 37 Caso 7 Onda Incidente.....	31
Figura 38 Caso 7 Onda Incidente 600 Hz.....	31
Figura 39 Caso 7 Onda Incidente 2000Hz	31
Figura 40 Caso 7 Onda Reflejada.....	32
Figura 41 Caso 7 Onda Reflejada 600Hz.....	32
Figura 44 Caso 7 Onda Transmitida 600Hz	33
Figura 45 Caso 7 Onda Transmitida 2000Hz	33
Figura 46 Caso 7 Segunda Reflexión	34
Figura 47 Caso 7 Segunda Reflexión 2000Hz	34
Figura 48 Flujo a través de la voluta.....	36

Figura 49 Caso 2 Onda Reflejada 1D vs Q2D.....	37
Figura 50 Caso 2 Onda Transmitida 1D vs Q2D.....	37
Figura 51 Caso 4 Onda Reflejada 1D vs Q2D.....	38
Figura 52 Caso 4 Onda Transmitida 1D vs Q2D.....	38
Figura 53 Caso 7 Onda Reflejada 1D vs Q2D.....	39
Figura 54 Caso 7 Onda Transmitida 1D vs Q2D.....	39

1 INTRODUCCIÓN

1.1 DESCRIPCIÓN GENERAL

El siguiente Trabajo Final de Grado que se presenta forma parte de un proyecto realizado en el Centro de Motores Térmicos CMT de la Universidad Politécnica de Valencia para la empresa Jaguar Land Rover. El contenido del siguiente Trabajo Final de Grado consiste en la validación de un modelo de turbocompresor con el objetivo de proveer a la empresa contratante del proyecto de un modelo que se ajuste mejor que el propio modelo creado a partir de librerías del programa GT-POWER. La finalidad de este modelo es poder predecir cómo las ondas de presión son transmitidas y reflejadas en el interior del turbocompresor, esto es necesario para estudiar el comportamiento acústico del turbocompresor, es decir cómo se transmite a través de él el ruido producido por el motor cuando este está en funcionamiento.

Para llevar a cabo la validación de los modelos, previamente se han obtenido en banco de ensayo unos datos experimentales a los cuales se espera que los modelos se ajusten con la mayor precisión posible. Estos datos son las ondas producidas por los pulsos de presión tanto a la entrada como a la salida de turbina y compresor.

La validación de los modelos se ha dividido en dos grandes bloques, validando el compresor y la turbina de forma independiente, para ello se han realizado ensayos a diferentes regímenes de funcionamiento y distintos grados de carga. La principal función de los modelos ha sido obtener los parámetros de Presión Temperatura y velocidad del flujo tanto en la entrada como en la salida de turbina y compresor con el objetivo de calcular a partir de estos parámetros las ondas incidente, reflejada, transmitida y segunda reflexión y compararse con los datos experimentales previamente obtenidos.

En ambas validaciones tanto para el caso del compresor como el de la turbina se ha llevado a cabo la simulación a dos modelos diferentes en GT-POWER, la primera realizada mediante mapas del propio programa, utilizando sus librerías tanto para condiciones de contorno, tuberías y el propio compresor y turbina, el segundo consta de una propia interfaz realizada en el CMT y los resultados de su simulación también serán comparados con los datos experimentales y con los mapas de GT-POWER, a continuación se muestran una imagen de cada caso.

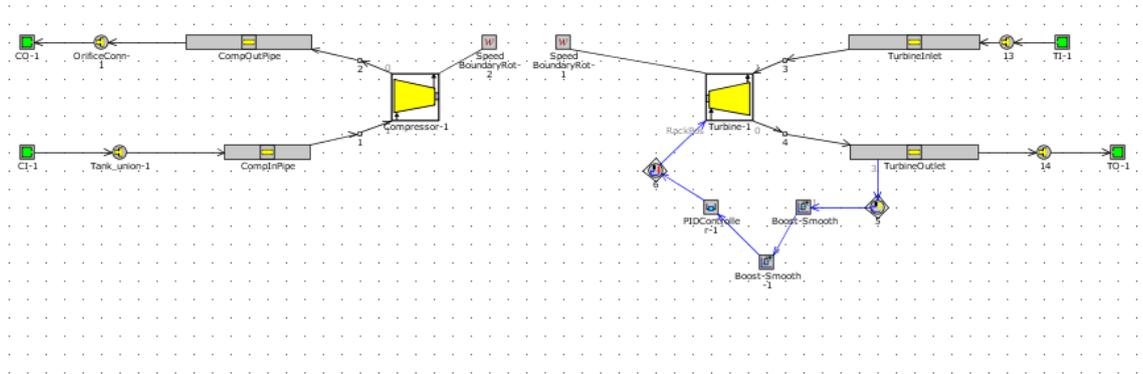


Figura 1 Mapa del Turbocompresor modelado en GT-POWER

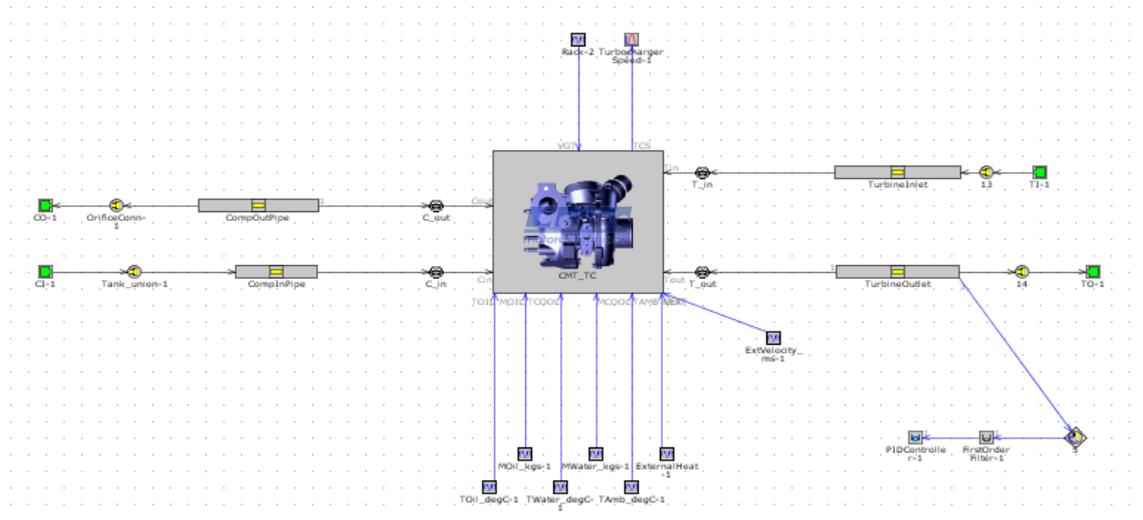


Figura 2 Mapa del Turbocompresor CMT

Ambos casos han sido simulados individualmente, comparados con los valores experimentales y enfrentados entre ellos con el objetivo de conocer cuál de los dos se aproxima mejor a los valores experimentales, cabe destacar que el modelo de CMT utiliza una conexión a una interfaz creada en el mismo CMT y es en ella donde consta la geometría de los componentes, condiciones de transmisión de calor y mapas tanto de la turbina como del compresor.

Aunque no ha formado parte del siguiente Trabajo Final de Grado, además de las simulaciones con GT_POWER, también forma parte del proyecto entre el CMT y Jaguar Land Rover la validación de otro modelo del turbocompresor en un programa de software diferente, se trata del programa Wave de la empresa Ricardo Software.

En el Trabajo Final de Grado que se presenta, debido a que forma parte de un proyecto llevado a cabo por más miembros, solo se muestran las validaciones correspondientes al modelo de la turbina.

Finalmente, y aprovechando Trabajos previos realizados con anterioridad en el Centro de Motores Térmicos, se presenta una mejora de la turbina en la que su voluta ha sido simulada en condiciones cuasi-bidimensionales en lugar de en condiciones unidimensionales que es el método de simulación utilizado por GT-POWER, dicha mejora se explicará con más detalle en su capítulo correspondiente.

1.2 ANTECEDENTES, MOTIVACIÓN Y JUSTIFICACIÓN

Durante los últimos años el modelado de motores se ha convertido en una herramienta fundamental para el diseño y el análisis de motores de combustión interna alternativos, ya que debido a avances en la velocidad computacional se pueden obtener cálculos en 1D en tiempos considerablemente rápidos. Por esta razón son utilizados con un grado alto de fiabilidad para predecir el comportamiento de los motores.

1.3 OBJETIVOS Y ALCANCE

Este proyecto tiene como objetivo la validación de unos modelos de turbina simulados en el dominio unidimensional y observar la mejora del modelo llevado a cabo en el Centro de Motores Térmicos, además en el caso del modelado de la turbina se proveerá a la empresa Jaguar Land Rover de un modelo de turbina cuasi-bidimensional del que ya se espera un mejor comportamiento en determinadas condiciones de funcionamiento por haber sido ya comprobado en proyectos anteriores.

1.4 PROCEDIMIENTO

El procedimiento llevado a cabo para la validación de los modelos de turbina del turbocompresor ha consistido en obtener unos datos experimentales, estos datos experimentales están formados por la onda incidente reflejada transmitida y segunda reflexión y han sido obtenidos en banco de ensayo de la siguiente manera:

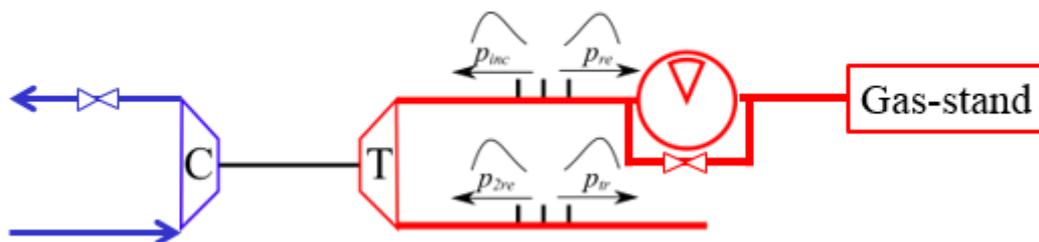


Figura 3 Esquema de obtención de datos experimentales

En la entrada de la turbina se ha introducido un flujo pulsante, generado mediante una válvula de disco rotativo, mediante un circuito by-paseado se modula la amplitud del pulso, seguidamente mediante 3 sensores en la entrada se captan las señales de las ondas incidente y reflejada y de igual forma en la salida para captar las ondas transmitida y segunda reflexión.

En una fase más avanzada del proyecto se ha llevado a cabo la obtención de datos experimentales mediante CFD. Debido a su alto coste computacional solo han sido ensayados dos casos de funcionamiento a 3000 y a 3900 RPM. Estos datos han servido también para la validación de los modelos a alto régimen de funcionamiento, aunque no ha formado parte de este Trabajo Final de Grado la obtención de los mismos

La segunda parte ha consistido en modelar en GT-POWER los modelos correspondientes al turbocompresor en los dos casos tanto en el modelado con librerías de GT -POWER como el modelado que utiliza conexión externa a la interfaz creada en el CMT, ambos modelados se explican en el capítulo 3.

En el caso de la turbina se ha impuesto un flujo pulsante en la entrada y mediante el programa se han obtenido los datos de presión, temperatura y velocidad del flujo tanto en la entrada como en la salida. Debido a que el programa no ofrece la posibilidad de obtener directamente las ondas, estas se han calculado a partir de los anteriores parámetros de la siguiente manera:

Entrada:

A partir de las presiones temperaturas y velocidades en la entrada de la turbina se han calculado las ondas incidente y reflejada a partir de las siguientes expresiones:

Onda Incidente:

$$\left(\frac{P_i}{P_{ref}}\right)^{\frac{\gamma-1}{2\gamma}} = \frac{1}{2} \left(1 + \left(\frac{P}{P_{ref}}\right)^{\frac{\gamma-1}{2\gamma}} + \frac{\gamma-1}{2} \cdot \frac{n}{a_{ref}} \right) \quad [1]$$

Onda Reflejada:

$$\left(\frac{P_i}{P_{ref}}\right)^{\frac{\gamma-1}{2\gamma}} = \frac{1}{2} \left(1 + \left(\frac{P}{P_{ref}}\right)^{\frac{\gamma-1}{2\gamma}} - \frac{\gamma-1}{2} \cdot \frac{n}{a_{ref}} \right) \quad [2]$$

Salida:

Onda Transmitida:

$$\left(\frac{P_{tr}}{P_{ref}}\right)^{\frac{\gamma-1}{2\gamma}} = \frac{1}{2} \left(1 + \left(\frac{P}{P_{ref}}\right)^{\frac{\gamma-1}{2\gamma}} + \frac{\gamma-1}{2} \cdot \frac{n}{a_{ref}} \right) \quad [3]$$

Segunda Reflexión:

$$\left(\frac{P_{2r}}{P_{ref}}\right)^{\frac{\gamma-1}{2\gamma}} = \frac{1}{2} \left(1 + \left(\frac{P}{P_{ref}}\right)^{\frac{\gamma-1}{2\gamma}} - \frac{\gamma-1}{2} \cdot \frac{n}{a_{ref}} \right) \quad [4]$$

n= Velocidad del flujo
 P=Presión
 Pi= Presión incidente
 Pr = Presión reflejada
 $\gamma = \frac{C_p}{C_v} \approx 1.4$
 aref = 343.14 m/s

Para el cálculo de la onda transmitida y segunda reflexión se utilizan las mismas ecuaciones que en el caso de la entrada, pero con los parámetros de presión temperatura y velocidad correspondientes a la salida de la turbina, estos cálculos como se ha comentado anteriormente se han llevado a cabo mediante el programa de cálculo Matlab con una resolución de aproximadamente 0,00001 segundos con lo cual la precisión y el margen de error son bastante aceptables.

Además de ser utilizado para el cálculo, el programa mediante Matlab se ha utilizado para mostrar gráficamente los cálculos previamente realizados, ya que como se ha comentado anteriormente los cálculos han sido llevados a cabo con una resolución temporal muy grande. También ha sido necesario trabajar con datos en el dominio de la frecuencia, para ello mediante la función “periodogram” incorporada en Matlab se han transformado los datos desde un dominio temporal a un dominio de frecuencias a 600Hz y 2000Hz. Seguidamente, los datos han sido graficados en una misma imagen con el objetivo de comparar los dos modelos y los datos experimentales previamente obtenidos.

Finalmente se ha llevado a cabo un análisis de los datos obtenidos de los modelos, se han analizado las ondas en el dominio temporal a una frecuencia de muestreo de 600Hz y de 2000 Hz con el objetivo de dar por validos dichos modelos.

2 MODELADO DE MOTORES

2.1 CONCEPTO Y CLASIFICACIÓN

Mediante el modelo matemático es posible resolver las ecuaciones que con mayor o menor aproximación representan aquellos fenómenos más relevantes que se llevan a cabo en un motor de combustión. De esta manera mediante los modelos es posible analizar las diferentes alternativas de diseño, predecir las prestaciones que puede alcanzar nuestro motor, analizar aquellos fenómenos físicos que ocurren dentro de él ya que es posible identificar las variables que intervienen en cada proceso. De esta manera mediante los estudios paramétricos se pueden identificar tanto las tendencias como la sensibilidad de las variables de salida cuando existen modificaciones en las variables de entrada.

Actualmente la función de los modelos es calcular la evolución de un flujo por el interior de conductos de admisión o escape, además del proceso llevado a cabo en el interior de los cilindros. Se utilizan métodos e hipótesis simplificadoras diferentes en función del proceso o del sistema físico que se necesite resolver. Atendiendo a los diferentes procesos o sistemas físicos están en primer lugar los modelos encargados de resolver el flujo de gases, modelos encargados de resolver el proceso de renovación de la carga y modelos que se encargan de resolver el proceso de combustión en el interior de los cilindros.

La teoría del modelado de motores ha sido posible gracias a las mejoras en cuanto a potencia computacional y, aunque es una disciplina bastante novedosa, está en continuo crecimiento ya que el aumento de velocidad, capacidad de cálculo y precisión van ligados al aumento de potencia en los computadores. El aumento de esta disciplina también es debido a las nuevas normativas anticontaminantes ya que mediante técnicas de modelado es posible diseñar motores más optimizados en cuanto a emisiones.

Uno de los principales usos del modelado de motores, y el principal objetivo del trabajo que se presenta es la validación, proceso que consiste en validar ciertos resultados de un modelo comprándolos con unos ensayos experimentales; siendo ambas actividades complementarias a la hora de diseñar un motor o componentes de este como es el caso del turbocompresor en este proyecto.

2.2 MODELADO DEL FLUJO DE GASES

El modelado del flujo de gases se encarga de realizar cálculos de flujos no reactivos dentro del motor, los principales factores a tener en cuenta en un modelado de gases son: Las pérdidas de carga en cualquier punto del motor, pero en especial en puntos o elementos en las que estas son mayores como en intercooler. En segundo lugar, pérdidas de energía debidas a la transmisión de calor, siendo estas mayores en elementos como intercambiadores de calor o conductos de escape. También se tienen en cuenta efectos de compresibilidad, en especial en aquellas zonas donde se alcanzan velocidades de flujo elevadas como pueden ser las válvulas o cambios de sección. Por último, es de elevada importancia el flujo pulsante debido a la apertura de válvulas de admisión y escape y que se transmiten a los distintos elementos, este flujo pulsante interviene de manera directa en el rendimiento volumétrico.

A continuación, se describen los modelos más utilizados de flujo de gases como el modelo de acción de ondas, valor medio y llenado y vaciado, cada modelo de los anteriores tiene un grado de precisión y un coste computacional diferente, los modelos utilizados son el modelo unidimensional de acción de ondas, modelo del valor medio y modelos de llenado y vaciado.

2.2.1 Modelo unidimensional de acción de ondas

El modelo unidimensional de acción de ondas es el más utilizado para el diseño y análisis de los sistemas de renovación de la carga en los motores térmicos. Este modelo se basa en el cálculo en conductos teniendo en cuenta efectos como la transmisión de ondas y la inercia del flujo. Algunas de las hipótesis y características del modelo se describen a continuación:

- El flujo se asume unidimensional en los conductos, esta hipótesis implica que todos los parámetros físicos se mantienen constantes en una misma sección, esta simplificación se mantiene en casos en los que la curvatura o el cambio de sección no son excesivos. Será de especial interés y una de las claves del proyecto el error cometido por esta simplificación ya que en la voluta de la turbina se han considerado primero condiciones unidimensionales y posteriormente debido a la geometría curva de esta se han adaptado las hipótesis de flujo cuasi-bidimensional, por esta razón se muestra en su capítulo correspondiente la mejora de una simulación respecto de la otra.
- Las ecuaciones correspondientes a los modelos se resuelven bajo la hipótesis de flujo no estacionario, esto implica que se asume que los parámetros físicos pueden variar en función del tiempo dentro de la misma sección
- Debido a que se consideran pérdidas de cantidad de movimiento por la fricción entre el flujo y las paredes y pérdidas de energía por transmisión de calor se considera el flujo no-homentrópico. Aunque se consideren pérdidas debidas a la fricción con las paredes y conductos no se consideran pérdidas por fricción interna del gas ya que la viscosidad de este no se ha considerado.
- Se utilizan modelos 0-dimensionales en los que se considera un parámetro constante dentro de un volumen cerrado pero variante con el tiempo, esta simplificación se utiliza por ejemplo en el interior de un cilindro.

La base del modelo de acción de ondas es un modelo de conducto en el que se introducen como variables de entrada la geometría y las condiciones del flujo en los extremos del conducto, siendo las variables de salida los valores de los parámetros correspondientes a presión, temperatura velocidad del fluido y densidad todos ellos en función del tiempo y de la posición dentro del conducto.

Las ecuaciones que son resueltas son las de conservación de la cantidad de movimiento, conservación de la masa y energía. Se resuelve un sistema de ecuaciones de Euler el cual es un caso particular de las ecuaciones de Navier Stokes para un fluido ideal no viscoso y dentro de un dominio cuasi unidimensional.

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \rho \frac{\partial u}{\partial x} + u \frac{\partial \rho}{\partial x} + \frac{\rho u}{S} \frac{dS}{dx} = 0 \quad [5]$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + G = 0 \text{ siendo } G = f \frac{u^2}{2} \frac{u}{|u|} \frac{4}{D} \quad [6]$$

$$\frac{\partial(\rho e_o)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u h_o)}{\partial x} + \frac{\rho u h_o}{S} + \frac{dS}{dx} - \rho q + \Delta H_{react} = 0 \quad [7]$$

$$h_o = \frac{p}{\rho} \text{ y } e_o = e + \frac{u^2}{2} \quad [8]$$

Siendo S la sección transversal de tubo, G corresponde al término que tiene en cuenta la fricción con las paredes del tubo, q las pérdidas de calor a través de las paredes, h_o la entalpia y e_o la energía interna específica de parada.

Atendiendo a las ecuaciones anteriores se tiene un sistema formado por tres ecuaciones con cuatro incógnitas con lo que es necesario una cuarta ecuación, para ello se supone el fluido como gas perfecto y calor específico constante con ambas hipótesis obtenemos las ecuaciones siguientes necesarias para dar solución al sistema:

$$\text{Gas ideal } \frac{p}{\rho} = RT \quad \text{Energía interna } e = C_v T$$

Para resolver el problema matemático en primer lugar se discretizan las derivadas y se expresa en forma matricial, finalmente se emplean métodos numéricos basados en diferencias y volúmenes finitos, este último es el utilizado en GT-POWER.

2.2.2 Modelos cerodimensionales de llenado y vaciado

Los modelos cero-dimensionales de llenado y vaciado permiten calcular fenómenos de acumulación en elementos del motor. De esta manera un modelo de motor cero-dimensional está formado por una combinación de depósitos conectados entre sí mediante elementos modelados a partir de mapas de comportamiento.

Estos modelos se basan en la hipótesis de considerar un depósito como un sistema abierto que intercambia flujo con otros sistemas del motor, este sistema puede ser de volumen variable y transmitir calor y se considera el flujo temporalmente estacionario en cada instante del cálculo sin tener en cuenta la dinámica de ondas

Para el modelado de motores una práctica muy habitual consiste en modelos que utilizan la acción de ondas para el proceso de renovación de la carga, combinados con submodelos que calculan la acumulación de masa en el interior de los cilindros. Las siguientes ecuaciones son las utilizadas para resolver dichos submodelos en el caso de un cilindro:

$$d(m \cdot u)_{cyl} = \sum(h_{oinlet} \cdot dm_{inlet}) - \sum(h_{oinlet} \cdot dm_{outlet}) + dQ_{cyl} - dW_{cyl} \quad [9]$$

Siendo:

$$dQ_{cyl} = dQ_{heattransf} + dQ_{comb} \quad dW_{cyl} = p_{cyl} \cdot dV_{cyl} \quad u_{cyl} = C_v \cdot T_{cyl} \quad [10]$$

En el anterior balance de energía se considera el proceso de combustión en el interior del cilindro de dos maneras diferentes. En primer lugar, se considera el flujo de calor liberado por el proceso de combustión como un flujo de calor procedente del entorno, en este caso el término Q tiene dos componentes, la primera correspondiente al calor liberado durante la combustión y el segundo debido a la transmisión de calor.

En segundo lugar, debido a que la combustión implica un cambio en la composición de los componentes conservando su masa, si la energía de los reactivos y de los productos se expresa en forma absoluta, no es necesario considerarse como un término adicional la conversión de energía química en térmica, esto implica que el término $d(\mu)$ incluya tanto la variación de energía debida a cambios en la temperatura del sistema como el calor que se libera durante el proceso de combustión.

2.2.3 Modelo del valor medio

Los modelos del valor medio se basan en asumir la hipótesis de que el flujo de gases es constante durante el ciclo del motor, se trabaja con valores medios durante el ciclo y en cada punto del motor, la mayoría de los cálculos están basados en correlaciones empíricas o semiempíricas, por esta razón el tiempo de cálculo necesario se reduce ya que no son necesarias las ecuaciones de conservación del flujo. Las hipótesis más relevantes de este modelo son:

- Se asume comportamiento estacionario o cuasiestacionario.
- No se considera la acumulación de ondas ni de masa.
- Se debe disponer de información experimental.

3 HERRAMIENTAS Y DATOS EXPERIMENTALES

Para el desarrollo del proyecto se han utilizado diferentes programas de software, siendo el principal el programa de modelado GT-POWER y en segundo lugar los programas utilizados para el pos procesado de datos y la manipulación de los mismos.

3.1.1 GT-POWER

Ha sido el programa de mayor importancia en el proyecto ya que gran parte del mismo ha consistido en crear un modelo del turbocompresor en este programa.

GT-POWER es un software de modelado de motores en condiciones unidimensionales desarrollado por la empresa Gamma Technologies y basado en el modelo de acción de ondas. Mediante este programa es posible modelar los fenómenos físicos que ocurren en los fluidos en el interior de los conductos, resolviendo las ecuaciones correspondientes mediante volúmenes finitos.

El programa tiene implementado submodelos para poder calcular los fenómenos físicos en cada elemento del motor como la transmisión de calor en el interior del cilindro o condiciones sónicas en las válvulas.

Como aplicaciones fundamentales para el estudio y diseño de los motores podemos destacar las siguientes:

- Sistema de sobrealimentación
- Inyección del combustible
- Cálculo y predicción de la combustión
- Sistemas de post-tratamiento
- Sistemas de EGR (recirculación gases de escape)
- Sistemas de refrigeración
- Co-simulación con CFD
- Transmisiones mecánicas
- Simulación en tiempo real
- Simulaciones en condiciones transitorias

El programa permite la obtención de un gran número de parámetros medios o instantáneos como presiones, temperaturas velocidad del flujo, par motor etc. También dispone de la versión GT-POST utilizada para el tratamiento y análisis de resultados, aunque en este proyecto por la gran cantidad de datos obtenidos, y debido a que a partir de estos datos era necesario realizar los correspondientes cálculos estos se han exportado mediante la herramienta disponible en GT-POST para seguidamente trabajar con ellos en Matlab.

3.1.2 Matlab

Consiste en una herramienta de software matemático que utiliza un lenguaje de programación propio (.m), se trata de una herramienta pensada para trabajar con matrices y vectores, capaz de leer ficheros en diferentes formatos como los proporcionados por GT_POST (*.dat) o los propios de una hoja de Excel (*.xlsx):

Como se ha comentado anteriormente la función del programa consiste en la carga de unos datos obtenidos mediante GT-POST y a partir de ellos realizar los cálculos necesarios, estos datos se han almacenado en vectores de aproximadamente 10000 datos para su posterior representación en gráficos, cabe recordar que al estar comparando diferentes modelos la posibilidad de obtener gráficos de diferentes vectores facilita la comparación entre ambos. Todo ello se ha llevado a cabo gracias a la creación previa de scripts creados específicamente para el tratamiento de dichos datos con el objetivo de tener la mayor parte del proceso automatizado.

Como principales funciones del programa utilizadas en los scripts cabe destacar algunas como la función "interp1" utilizada para interpolar vectores equiespaciados, la función "importdata" imprescindible para la importación de datos desde ficheros .txt ó .xlsx o la función "periodogram" utilizada para pasar del dominio temporal al dominio de la frecuencia ya que como se ha comentado se ha trabajado en ambos dominios

3.1.3 Microsoft Excel

Se trata de una herramienta de Microsoft office para manipular datos , esta herramienta ha sido imprescindible para el tratamiento de estos ya que permite por ejemplo ordenar valores de mayor a menor o viceversa , también ha sido fundamental a la hora de trabajar con los mapas de la turbina , ya que estos trabajaban en unidades diferentes en el caso del modelo de GT-POWER y en el de CMT , además la interfaz del modelo CMT no acepta valores desordenados con lo que la herramienta ordenar ha sido fundamental

3.2 DATOS EXPERIMENTALES

Los datos experimentales han sido la base sobre la que se han ido ajustando los modelos, ya que la función de los modelos es que los resultados proporcionados se ajusten en la mayor medida de lo posible a estos datos experimentales, los datos experimentales han sido obtenidos en un banco de ensayo tal como se explica en el capítulo 1 en la parte de procedimiento, aunque este trabajo no ha tomado parte en la obtención de los mismos ya que fueron entregados por el personal correspondiente.

Como se ha comentado en el capítulo de introducción estos datos son los correspondientes a la descomposición de ondas en el interior de los conductos de entrada y salida de la turbina, esta descomposición corresponde a la onda incidente y reflejada en el conducto de entrada y a la onda transmitida y segunda reflexión en el conducto de salida.

4 DESCRIPCIÓN DE LOS MODELOS

Para llevar a cabo la validación, como se ha comentado en el capítulo de introducción se han creado dos modelos del turbocompresor con el objetivo de hacer del modelo de CMT un modelo más ajustado. En ambos modelos son comunes las condiciones de entrada a la turbina y las tuberías de entrada y de salida de esta. Ambos modelos han sido comparados con el objetivo de hacer del modelo CMT un modelo mejor.

4.1 MODELO GT-POWER

En este modelo se han simulado las condiciones del flujo en el interior de la turbina a través del modelado de esta y de sus condiciones de entrada y salida a través de los propios mapas de GT-POWER, modelando la turbina y sus condiciones de contorno mediante las librerías del programa, la figura mostrada a continuación representa el modelado de esta.

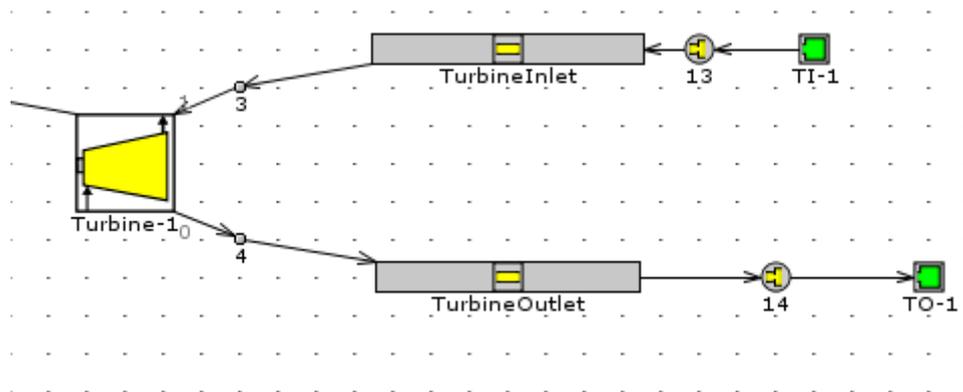


Figura 4 Modelo Turbina GT-POWER

Las condiciones de entrada a la turbina quedan representadas mediante los componentes TI-1 que representa las condiciones de entrada a la turbina, en él se fija un pulso de presión de entrada, la temperatura del fluido a la entrada y su composición que en este caso es aire. El objeto 13 corresponde al orificio de entrada y conecta las condiciones de entrada con el conducto por el cual el fluido entra a la turbina.

Mediante el objeto Turbine Inlet queda representado el conducto por el cual el fluido entra en la turbina, en este se deben especificar las geometrías del conducto en cuanto a diámetro de entrada, diámetro de salida y longitud, por tratarse de conductos rectos las curvaturas y ángulos de doblado se ignoran. También se incluyen parámetros en cuanto a rugosidad del material. Las características geométricas del conducto de entrada de flujo a la turbina quedan fijadas tal como se muestra en la siguiente imagen:

Attribute	Unit	Object Value
Basic Geometry and Initial Conditions		
Diameter at Inlet End	mm	35 ...
Diameter at Outlet End	mm	35 ...
Length	mm	385 ...
Discretization Length	mm	20 ...
Initial State Name		Init_CT ...
Surface Finish		
<input checked="" type="radio"/> Smooth		
<input type="radio"/> Roughness from Material		steel
<input type="radio"/> Sand Roughness	mm	0
Additional Geometry Options		
Radius of Bend	mm	ign ...
Angle of Bend	deg	ign ...
Pipe Elevation Change	mm	ign ...
Number of Identical Pipes		def (=1.0) ...

Figura 5 Parametro Geometricos Modelo GT-POWER

Además de las características geométricas del conducto, también se deben especificar las condiciones térmicas de este, incluyéndose de esta manera parámetros como las condiciones de temperatura iniciales en el conducto y el método de resolución para los parámetros térmicos dentro de este. A continuación, se muestra una imagen con las nombradas condiciones:

Attribute	Unit	Object Value	TurbineInlet override
Wall Temperature Method			
<input type="radio"/> Imposed Wall Temperature	K		
<input type="radio"/> Calculated Wall Temperature			
<input checked="" type="radio"/> Wall Temperature Solver Object		ext-therm-tur	...
Initial Wall Temperature	See Cas...	550	[TET] ...
<input type="radio"/> Wall Temperature from Connected Thermal Primitive			
<input type="radio"/> Adiabatic			
Additional Thermal Options			
Heat Transfer Multiplier		0	...
Heat Input Rate	W	ign	...
Thermocouple Object		ign	...
<input checked="" type="radio"/> Heat Transfer Correlation (Colburn)			
<input type="radio"/> User Defined Heat Transfer Model		ign	
<input type="radio"/> Heat Transfer Coefficient	W/(m ² ·K)		
Condense/Evaporate Water Vapor (Non-Refrigerant Circuits)		off	No Override

Figura 6 Parámetros térmicos modelo GT-POWER

También se especifican en este objeto las pérdidas mecánicas del flujo al pasar a través del conducto, aunque en este caso no se han tenido en cuenta las pérdidas mecánicas por fricción y también se ha ignorado el efecto de condensación del flujo de aire.

En el caso de la salida el procedimiento ha sido similar, se han fijado unas condiciones del flujo de aire a la salida de los conductos y en el tubo de salida se han realizado las medidas correspondientes a los parámetros de presión temperatura y velocidad del flujo.

El siguiente objeto es el que diferencia el modelo del GT con el modelo de CMT ya que como se ha comentado anteriormente las condiciones de entrada y los conductos son similares en ambos casos. En el caso del modelado de la turbina. En este objeto se indica que las presiones de entrada y salida de la turbina son totales y no estáticas, esto implica que se tiene en cuenta un ligero aumento de la presión debido a la velocidad del flujo.

Es en esta parte donde se especifica la posición del Rack de la turbina, ya que al tratarse de una VGT (turbina geometría variable) la posición de los álabes del estator es variable, esta posición es determinante a la hora de utilizar unos mapas de la turbina u otros.

En esta parte y en paralelo al ajuste del modelo se ha incorporado un controlador PID a la turbina con el objetivo de fijar un gasto en función de la posición de los álabes del estator. La puesta del controlador ha sido posible gracias a diferentes opciones que ofrece el programa como la colocación de sensores, filtros para eliminar el ruido y finalmente el controlador, la colocación de estos elementos resulta mucho más simple en un modelo informático que en un modelo real, además de poder llevar a cabo las simulaciones de manera mucho más rápido.

Cabe resaltar que el PID necesita una solución de compromiso entre los diferentes casos de simulación ya que como se ha nombrado en el capítulo de introducción se han llevado a cabo 7 casos de simulación y a cada uno de ellos le corresponde una posición de los alabes diferente.

4.2 MODELO CMT

Este modelo tiene como objetivo una mejor aproximación a los datos experimentales, las condiciones de entrada son las mismas que en el caso explicado anteriormente para el modelo de GT, pero es en el modelado de la turbina donde aparecen las diferencias en cuanto a información del flujo para hacer de este un modelo más completo que el que se podría llevar a cabo simplemente con librerías del programa. La siguiente imagen muestra el resultado del modelado de la turbina en el modelo CMT.

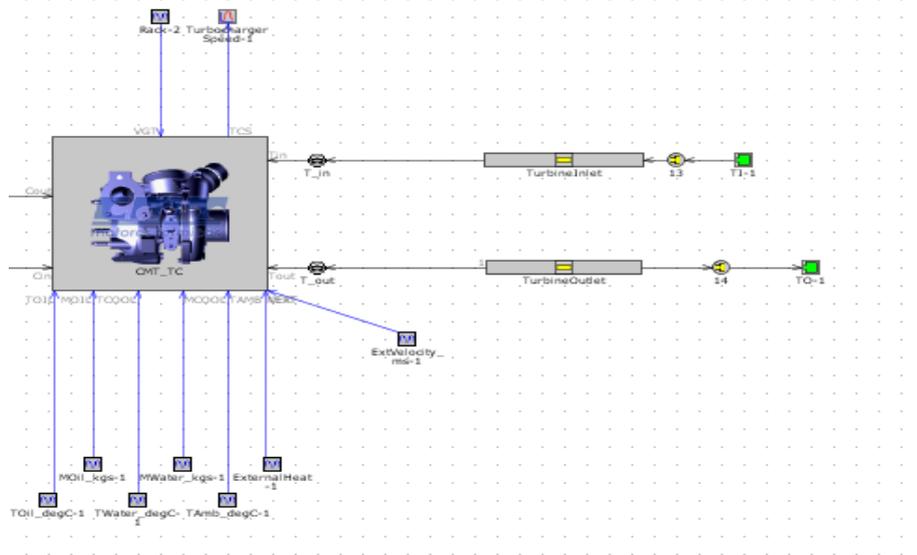


Figura 7 Turbina Modelo CMT

Como se observa las partes correspondientes a la entrada y salida son comunes al otro modelo, pero no es así en el caso de la turbina y compresor.

Durante las simulaciones con el modelo CMT se realiza una conexión a una interfaz externa al programa, en esta se aporta la información correspondiente a efectos de transmisión de calor con el ambiente, con fluidos refrigerantes y entre los propios elementos, se aporta información acerca de las condiciones de fluidos como el aceite y agua de refrigeración.

A continuación, se muestra un esquema de la transferencia de calor en el turbocompresor en el que constan los parámetros mencionados anteriormente, en él se observan los diferentes tipos de transmisión de calor que se dan en el turbocompresor.

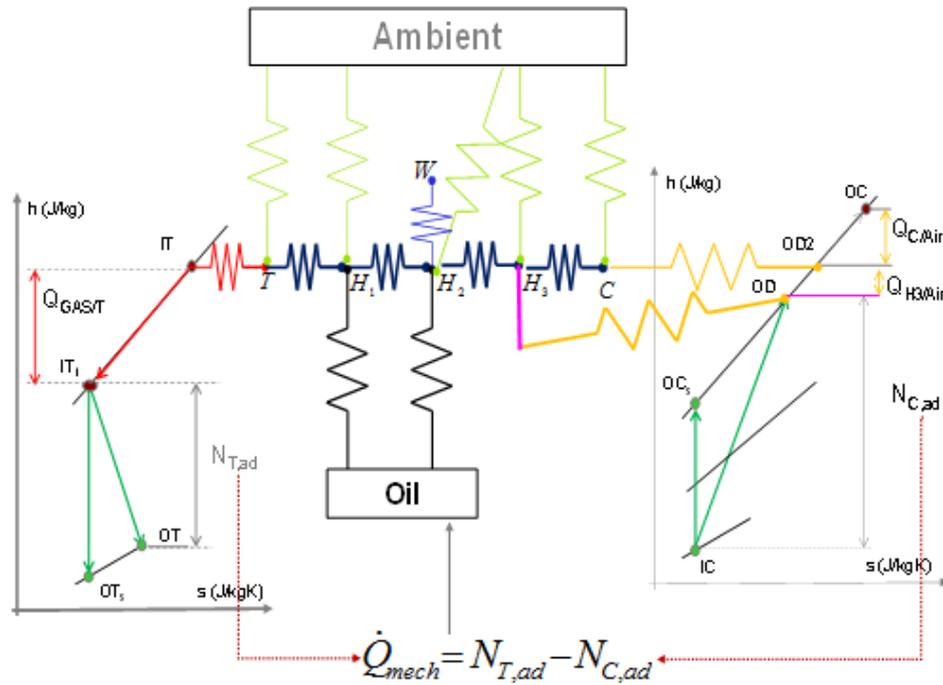


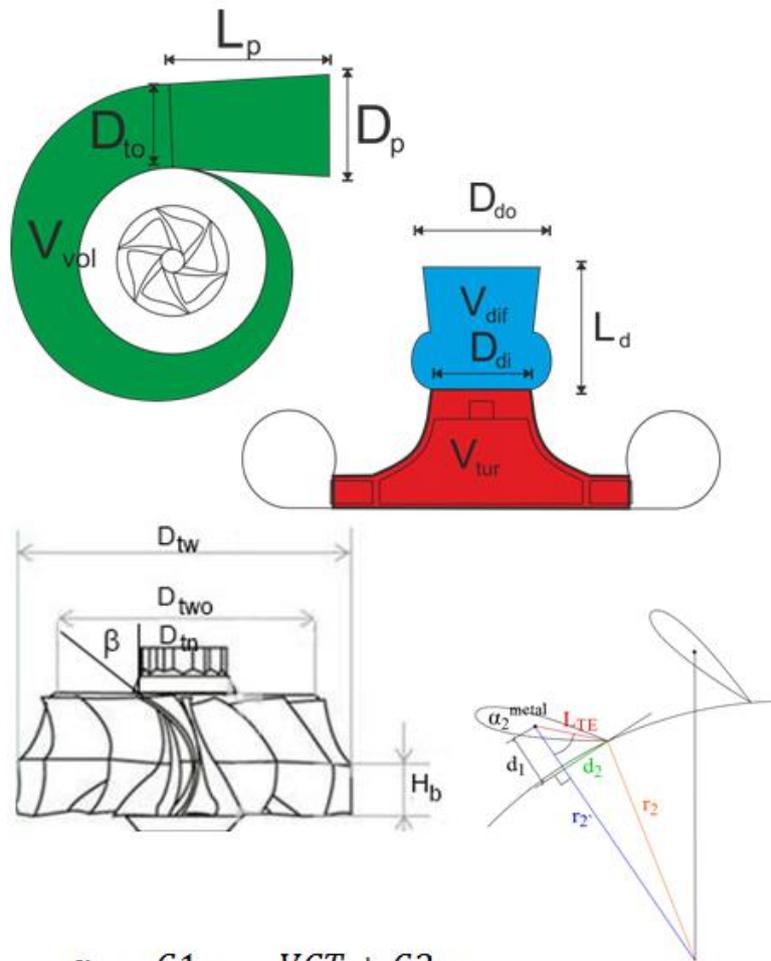
Figura 8 Esquema transmisión de calor

Capítulo 4 Descripción de los modelos

En la interfaz externa también constan los valores geométricos de la turbina, entre ellos los correspondientes a la geometría de la voluta, diámetros del difusor y geometrías del estator y del rotor siendo las siguientes:

VOLUTE			
Volute volume (Vvol)	<input type="text" value="146"/>	cm ³	
Diameter at the tongue (Dto)	<input type="text" value="28"/>	mm	
VOLUMES			
Turbine volume (Vtur)	<input type="text" value="99.99999"/>	cm ³	
Difusor volume (Vdif)	<input type="text" value="51.55963"/>	cm ³	
TURBINE INLET PORT			
Inlet port diameter (Dp)	<input type="text" value="30"/>	mm	
Port length (Lp)	<input type="text" value="75.3"/>	mm	
DIFFUSER			
Diffuser inlet diameter (Ddi)	<input type="text" value="38.6"/>	mm	
Diffuser outlet diameter (Ddo)	<input type="text" value="40"/>	mm	
Diffuser length (Ld)	<input type="text" value="42.5"/>	mm	
WHEEL DIMENSIONS			
Wheel diameter (Dtw)	<input type="text" value="38.6"/>	mm	Nut diameter (Dtn) <input type="text" value="11.5"/> mm
Wheel diameter outlet (Dtwo)	<input type="text" value="32.8"/>	mm	Blade height (Hb) <input type="text" value="5.45"/> mm
Beta angle (β)	<input type="text" value="56.68"/>	°	
STATOR DIMENSIONS			
Vaneless?	<input type="text" value="N/A"/>		L_{TE} <input type="text" value="8.725"/> mm
$C1_{VGT}$	<input type="text" value="-0.077"/>	rad/opening	Number of blades <input type="text" value="6"/>
$C2_{VGT}$	<input type="text" value="1.3509"/>	rad	r_2' <input type="text" value="29.44"/> mm

Figura 9 Parámetros Geométricos Interfaz



$$\alpha_2 = C1_{VGT} \cdot VGT + C2_{VGT}$$

Figura 10 Geometría Turbina

En la interfaz también constan los mapas tanto del compresor como de la turbina, la obtención de estos mapas ha sido externa, pero sí se ha llevado a cabo la ordenación de los valores y los correspondientes cambios de unidades necesarios ya que la interfaz trabajaba en unidades diferentes a las proporcionadas.

Los mapas se introducen en función de la posición del Rack de la turbina, ya que esta es de geometría variable, para cada posición previamente establecida del rack se introducen los valores correspondientes a la velocidad reducida de la turbina, el gasto reducido, el coeficiente de expansión y la eficiencia.

5.VALIDACIÓN DE LOS MODELOS

Como se explicó en el capítulo de introducción la validación del turbocompresor se ha dividido en dos grandes bloques, el primero corresponde a la validación del compresor y el segundo corresponde a la validación de la turbina, en ambos casos la validación ha consistido en comprobar mediante software que las ondas incidente, transmitida, reflejada y segunda reflexión se aproximan considerablemente a los valores obtenidos experimentalmente.

la validación de la turbina objeto principal del Trabajo Final de grado se divide en dos grandes bloques en cuanto al tipo de simulación habiéndose llevado a cabo primero la validación mediante un modelo 1D de la turbina y finalmente un modelo cuasi 2-D con el objetivo de observar las mejoras entre un tipo de modelo y otro.

5.1 VALIDACIÓN DE LA TURBINA 1D

5.1.1 Introducción

La validación de la turbina se divide en dos grandes bloques en cuanto al tipo de simulación llevada a cabo, en el primer bloque las simulaciones se han realizado bajo el dominio unidimensional y en el segundo se ha simulado una turbina en condiciones cuasi bidimensionales.

En el caso de la simulación 1D se asume que la voluta de esta es un conducto rectilíneo con el mismo volumen de la voluta original y con la mitad de la longitud de esta.

Esto es debido a que la sección de la voluta va reduciéndose de manera progresiva a lo largo del conducto, por esta razón el modelo se simplifica a un conducto con el diámetro correspondiente a la lengua de la voluta y de longitud igual a la mitad de la total, de esta manera se mantiene el volumen original de la voluta.

5.1.2 Procedimiento

Para la validación de la turbina en 1D se han llevado a cabo ensayos a diferentes regímenes de giro y diferentes grados de carga. El principal objetivo ha sido validar los datos obtenidos experimentalmente con el software GT-POWER, como se ha comentado anteriormente para la comprobación de dichos datos experimentales se han simulado dos modelos, el primero consiste en el modelado del turbocompresor con librerías del propio

programa y el segundo con un modelo propio del CMT. Los diferentes puntos de ensayos son los que se muestran a continuación:

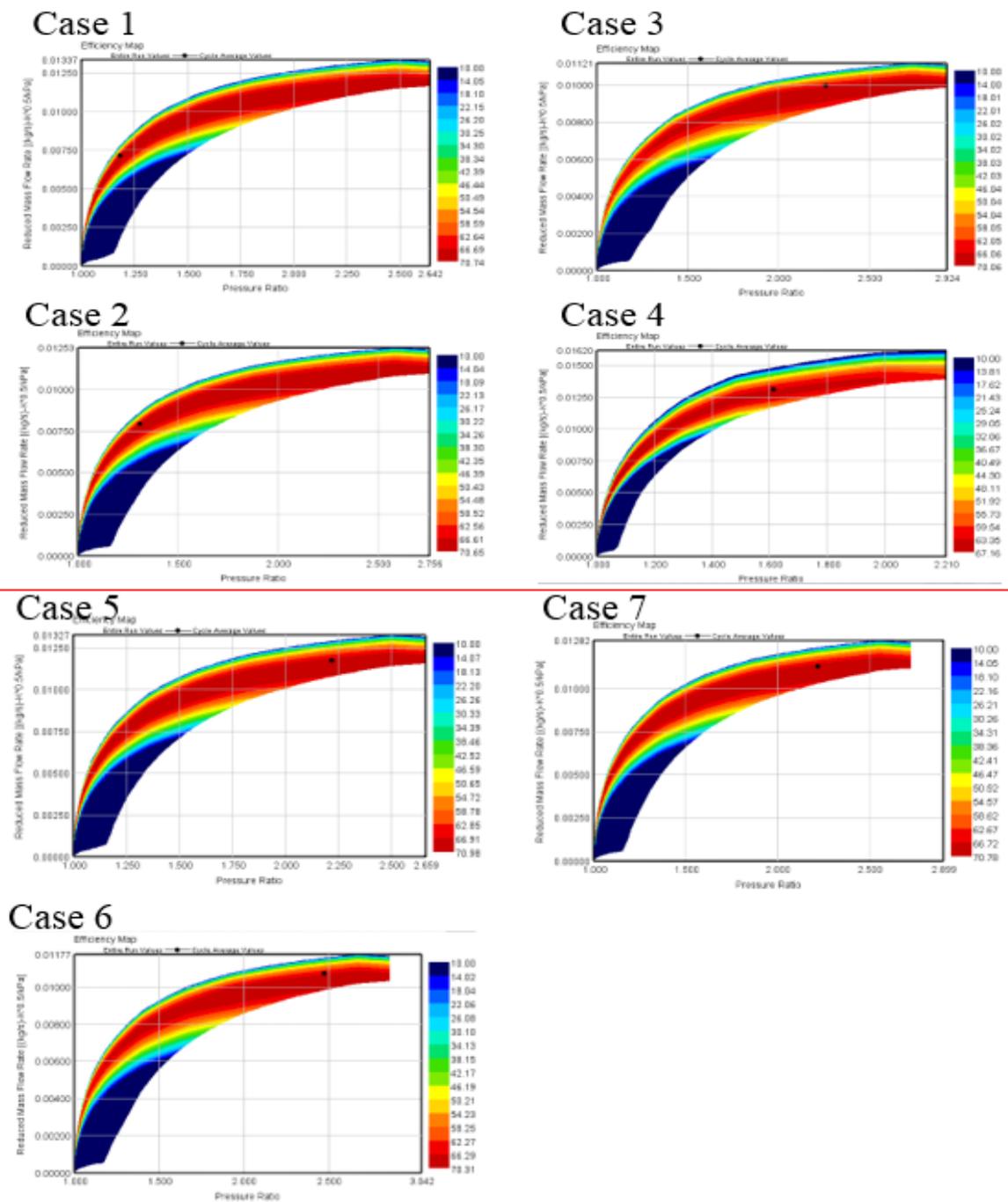


Figura 11 Puntos Funcionamiento de la Turbina

- Caso 1: 2000 rpm, grado de carga muy bajo
- Caso 2: 2000 rpm, grado de carga bajo
- Caso 3: 2000 rpm, grado de carga elevado
- Caso 4: 3000 rpm, grado de carga medio
- Caso 5: 3000 rpm, grado de carga elevado
- Caso 6: 3000 RPM, plena carga
- Caso 7: 3500 RPM, plena carga

En cada punto de los anteriores se han obtenido datos de presiones temperaturas y velocidades del flujo de aire tanto para entrada como para salida de la turbina, a partir de ellos y mediante las ecuaciones correspondientes se han obtenido las correspondientes ondas en el dominio temporal y en el dominio de la frecuencia tanto a 600Hz como a 2000Hz, cabe recordar que las ondas han sido calculadas en los modelos, mientras que en los datos experimentales se obtenían directamente.

Para el caso de la turbina a partir de los parámetros en la entrada se han calculado las ondas incidente y reflejada mientras que a partir de los parámetros de salida se han obtenido las ondas transmitida y segunda reflexión.

5.1.3 Resultados

A continuación, se muestran las ondas incidente reflejada transmitida y segunda reflexión correspondientes a los casos 2, 4 y 7; 3 casos representativos de lo que ha sido el análisis completo a diferentes regímenes y grados de carga.

En las siguientes imágenes se muestran a la vez los resultados de los dos modelos comparándolos con los valores previamente obtenidos en banco de ensayos, a continuación de los gráficos se ha llevado a cabo un breve análisis sobre los gráficos, en los que se analiza qué modelo de los dos ajusta mejor para los gráficos temporales y los erros más significativos de estos en decibelios en los gráficos correspondientes al dominio de frecuencias.

5.1.3.1 *Caso2: 2000 rpm, grado de carga bajo:*

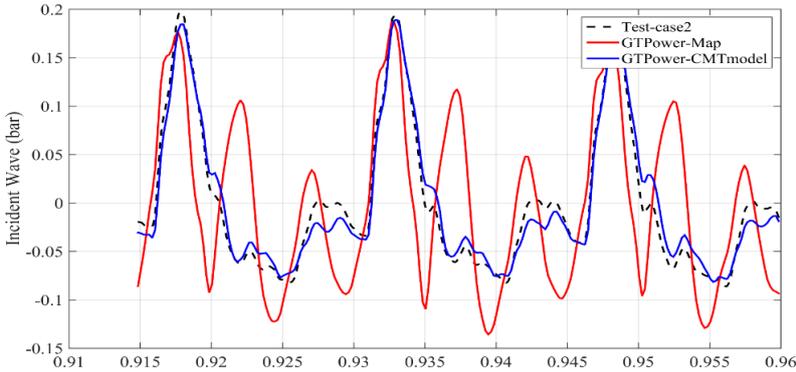


Figura 12 Caso 2 Onda Incidente

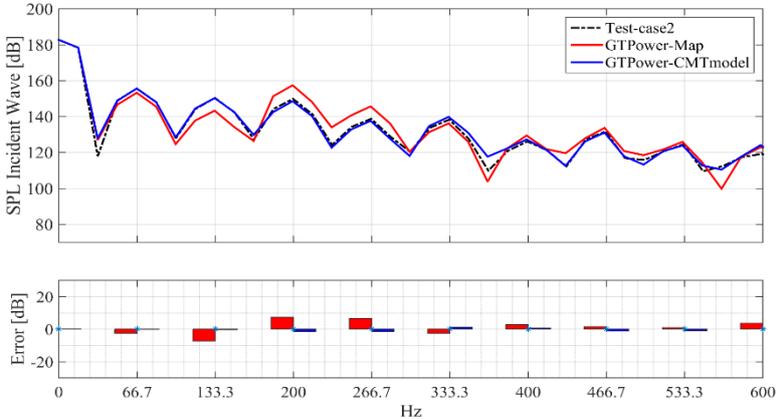


Figura 13 Caso 2 Onda Incidente 600 Hz

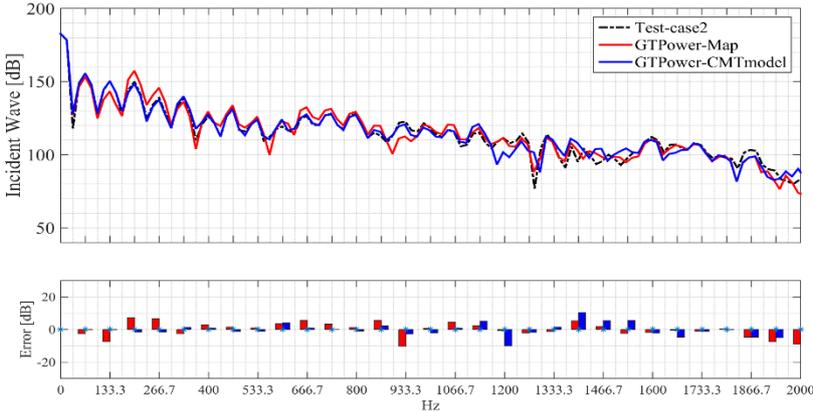


Figura 14 Caso 2 Onda Incidente 2000 Hz

Capítulo 5 Validación de los modelos

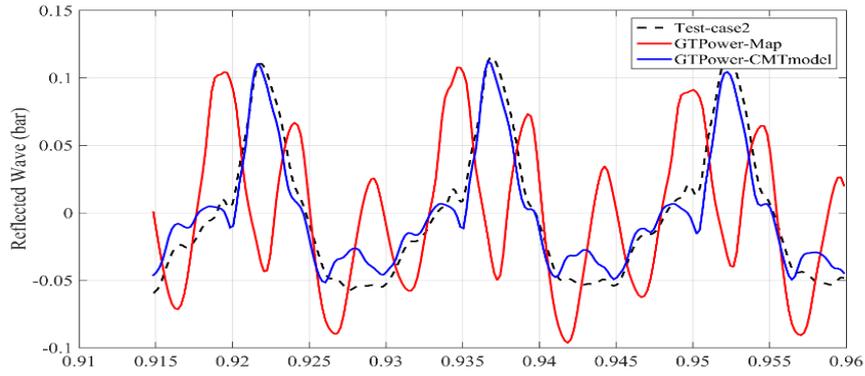


Figura 15 Caso 2 Onda Reflejada

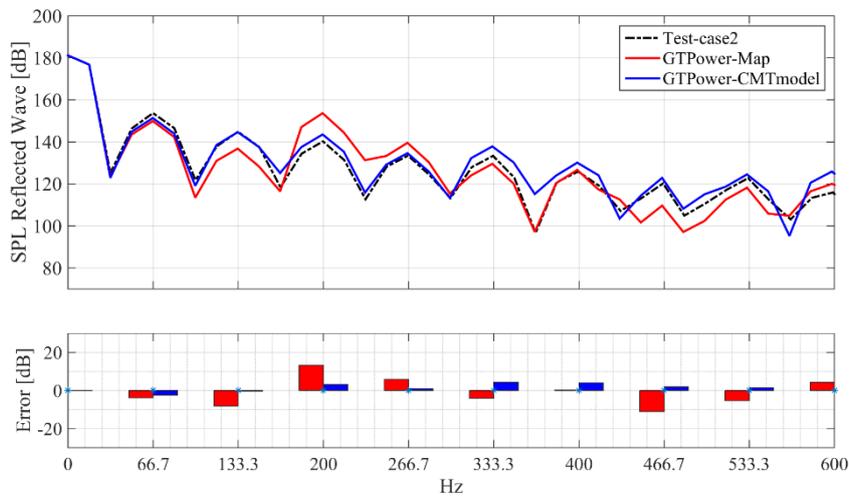


Figura 16 Caso 2 Onda Reflejada 600 Hz

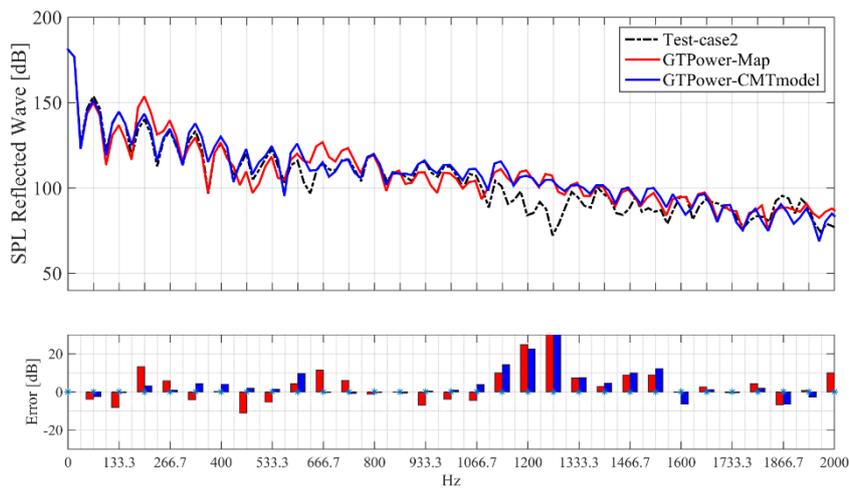


Figura 17 Caso 2 Onda Reflejada 2000Hz

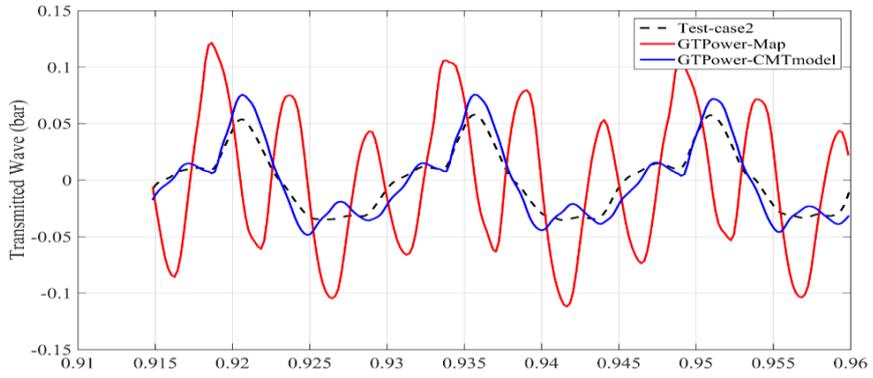


Figura Caso 2 Onda Transmitida

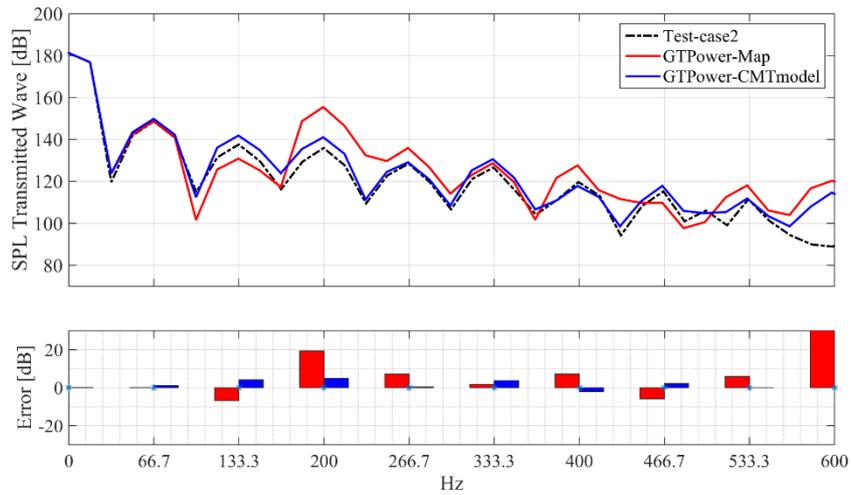


Figura 18 Caso 2 Onda Transmitida 600 Hz

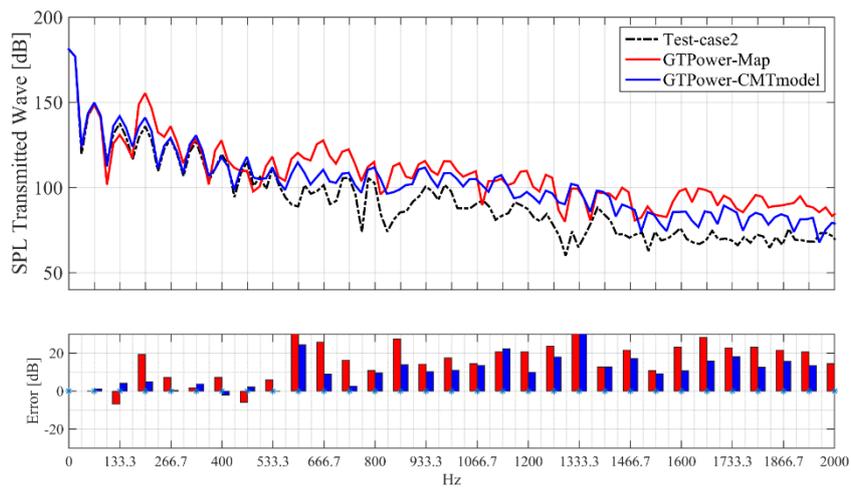


Figura Caso 2 Onda Transmitida 2000Hz

Capítulo 5 Validación de los modelos

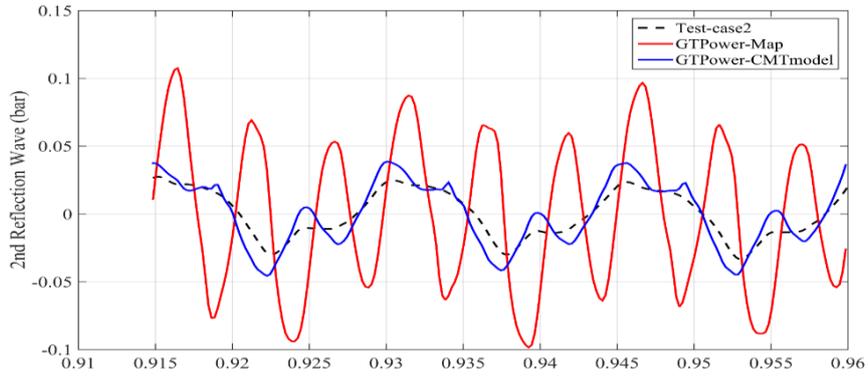


Figura 19 Caso 2 Segunda Reflexión

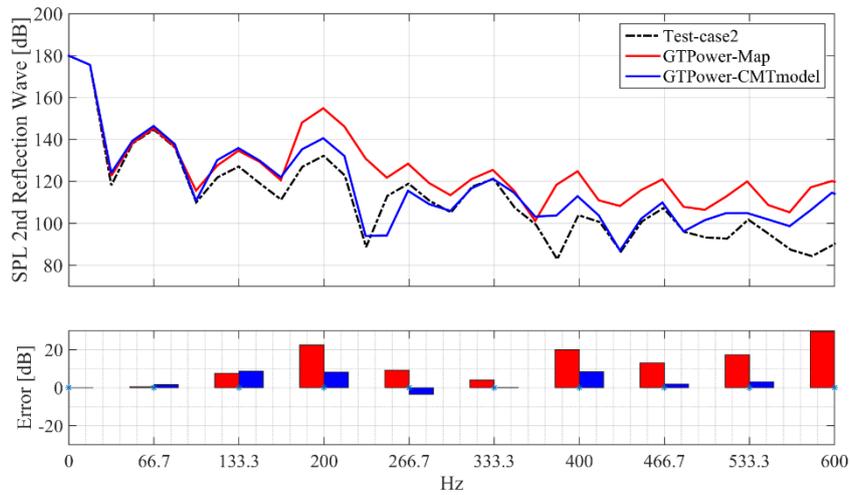


Figura 20 Caso 2 Segunda Reflexión 600Hz

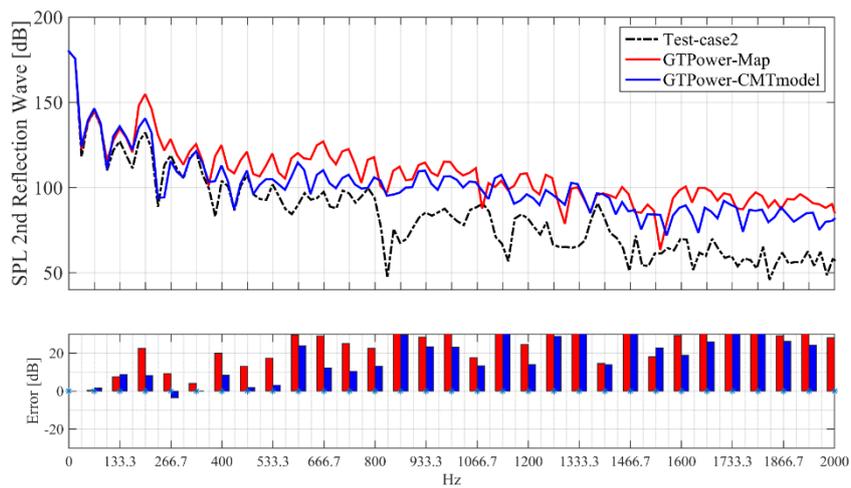


Figura 21 Caso 2 Segunda Reflexión 2000Hz

Análisis Caso 2: 2000 RPM Grado de carga bajo:

El caso 2 correspondiente a un régimen de giro de 2000rpm y un grado de carga bajo, a partir de la imposición de un flujo pulsante, se han obtenido la descomposición de ondas mostrada en los anteriores gráficos en dominio temporal y de frecuencias. La descomposición y cómo se transmiten las ondas en el interior de la turbina se muestran de forma esquematizada en la siguiente figura:

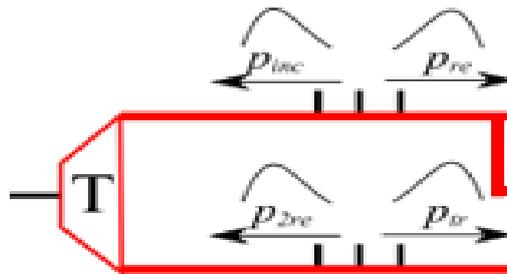


Figura 22 Descomposición Ondas Interior de la turbina

De los gráficos correspondientes al dominio temporal, se observa que el modelo de CMT se ajusta con mayor precisión a los valores obtenidos experimentalmente.

De los gráficos correspondientes al dominio de la frecuencia se observa que los modelos se ajustan bien salvo pequeños errores en el modelo de GT-POWER de alrededor de 5 dB para frecuencias alrededor de los 900dB en la onda incidente.

En cuanto a la onda reflejada aparecen errores mayores que para el caso anterior, para frecuencias de alrededor de 1200Hz aparecen errores mayores de alrededor de 20dB.

En la onda transmitida ambos modelos se ajustan bien hasta frecuencias de 500 Hz, a partir de aquí, aunque el modelo de CMT se ajusta mejor en ambos aparecen errores de casi 20dB. También es así en la segunda reflexión, ambos modelos proporcionan valores próximos a los valores experimentales hasta una frecuencia de 500Hz.

5.1.3.2 *Caso4: 3000 rpm, grado de carga medio*

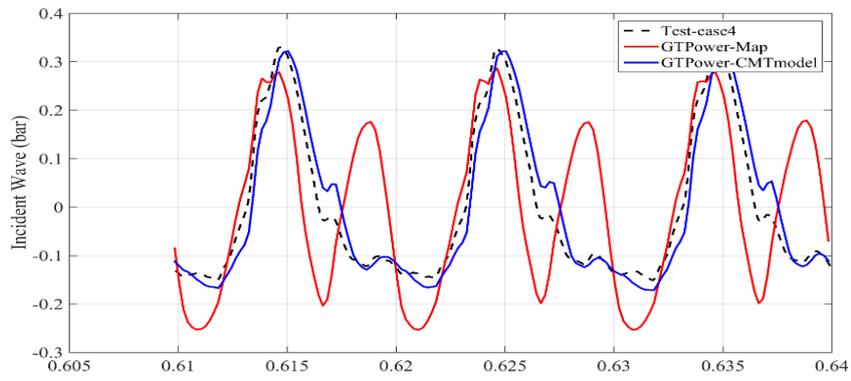


Figura 23 Caso 4 Onda Incidente

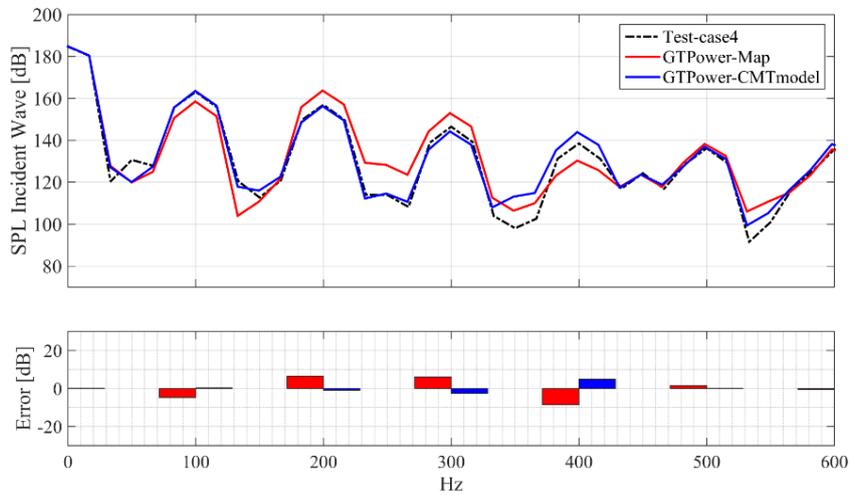


Figura 24 Caso 4 Onda Incidente 600Hz

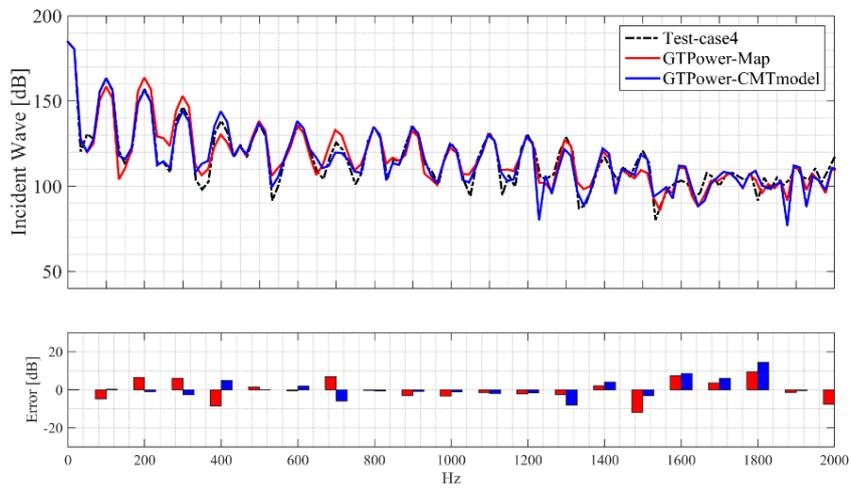


Figura 25 Caso 4 Onda Incidente 2000Hz

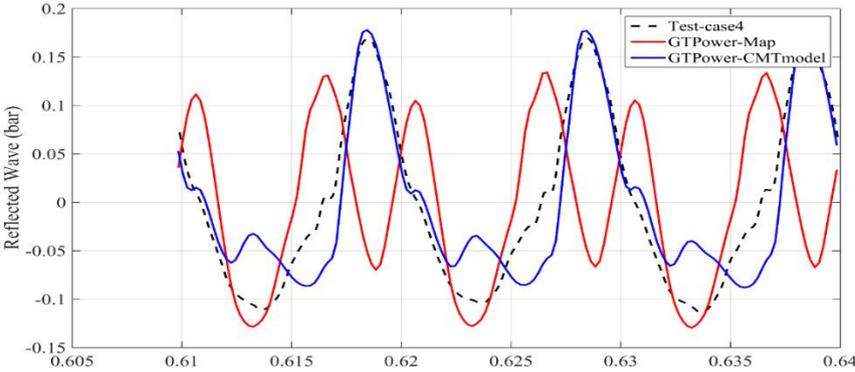


Figura 26 Caso 4 Onda Reflejada

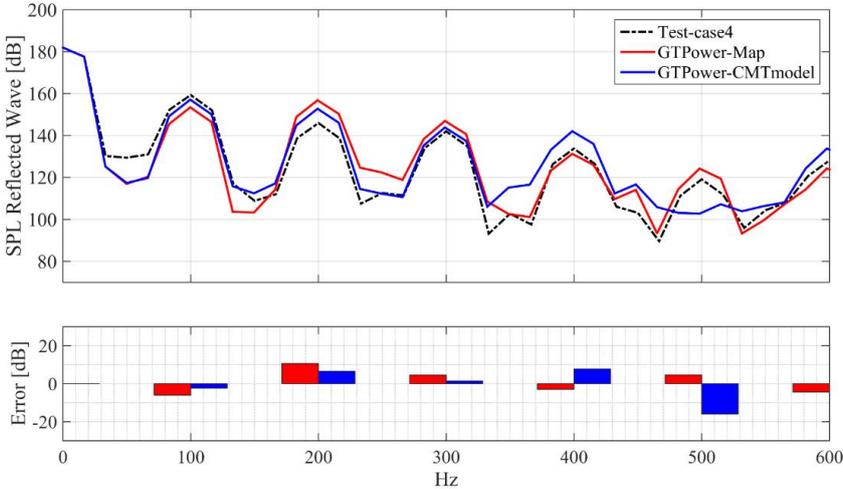


Figura 27 Caso 4 Onda Reflejada 600Hz

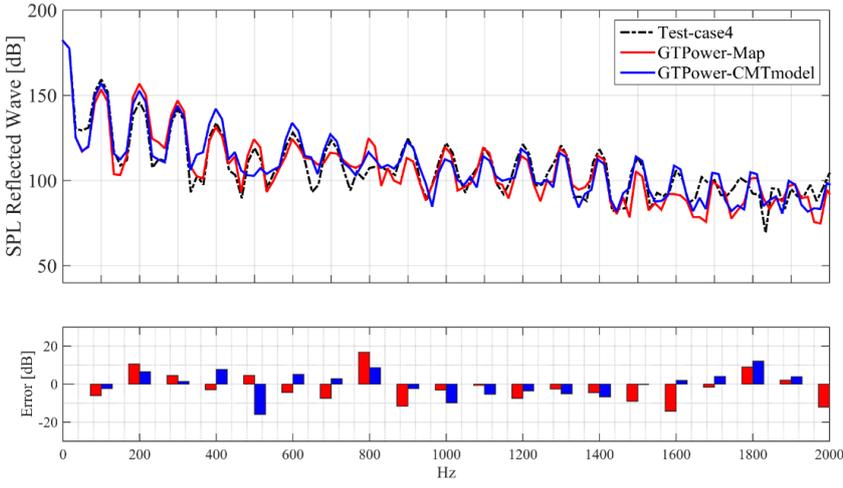


Figura 28 Caso 4 Onda Reflejada 2000Hz

Capítulo 5 Validación de los modelos

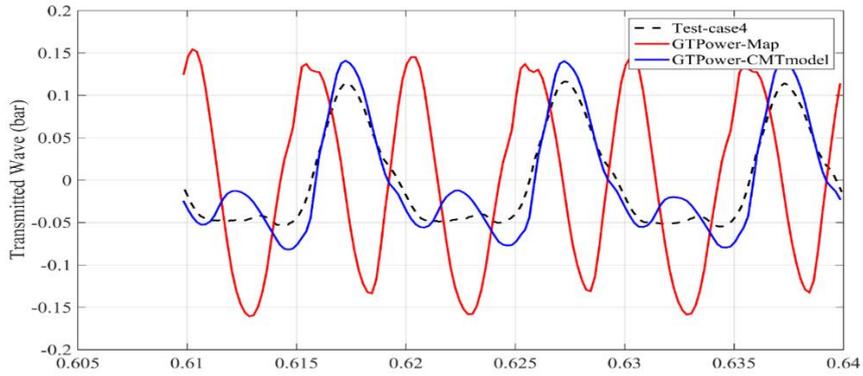


Figura 29 Caso 4 Onda Transmitida

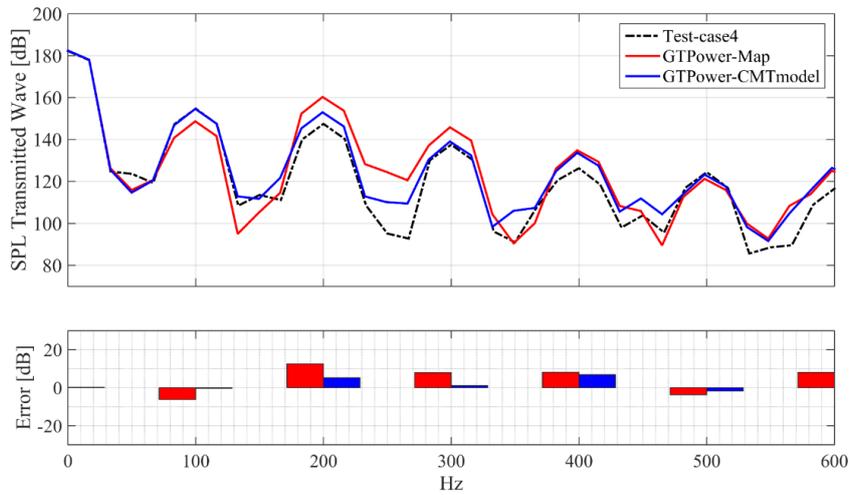


Figura 30 Onda Transmitida 600 Hz

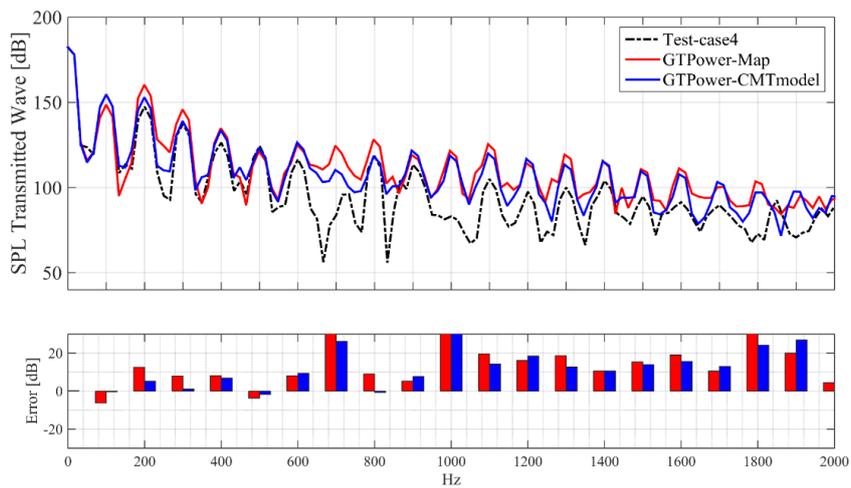


Figura 31 Onda Transmitida 2000Hz

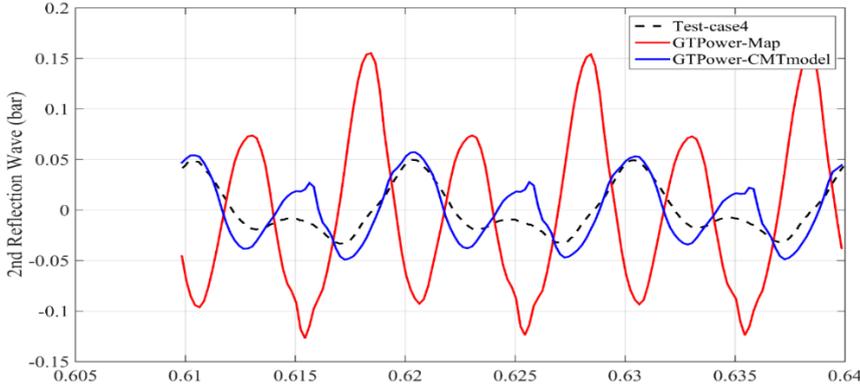


Figura 32 Caso 4 Segunda Reflexión

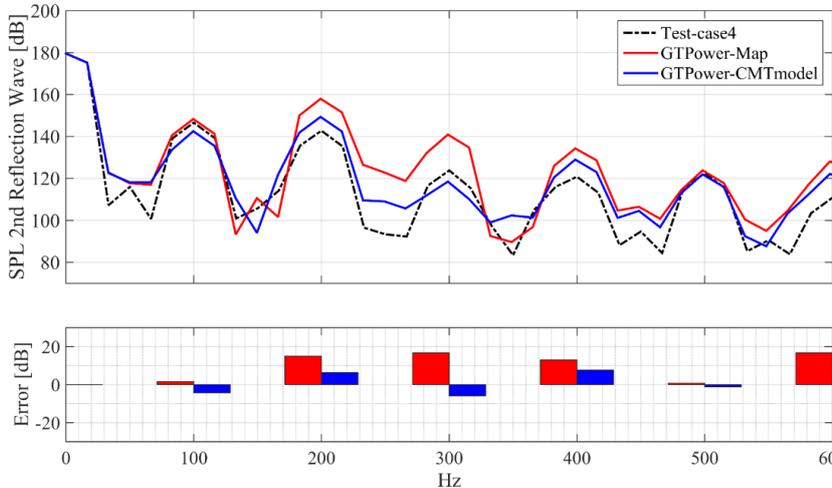


Figura 33 Caso 4 Segunda Reflexión 600Hz

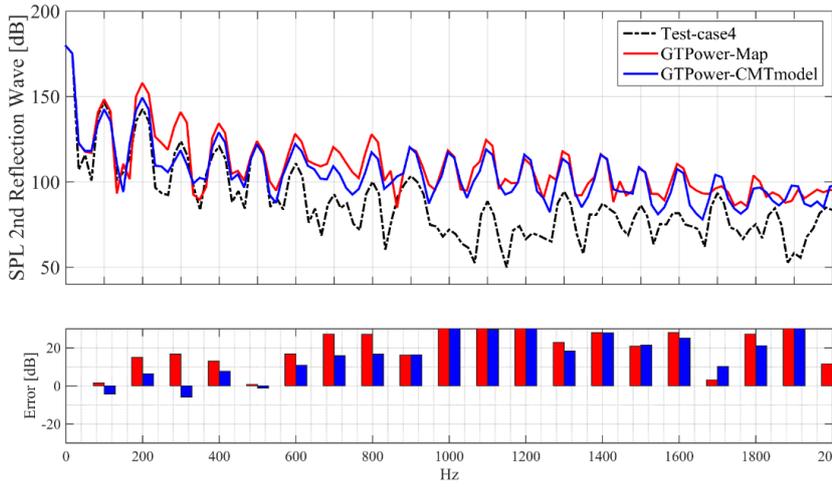


Figura 34 Caso 4 Segunda Reflexión 2000Hz

Análisis Caso 4: 3000 RPM Grado de carga medio:

En el caso 4 correspondiente a un régimen de giro de 3000 rpm y un grado de carga medio para los gráficos temporales se observa que el modelo de CMT se ajusta con mayor exactitud a los valores experimentales.

En los gráficos correspondientes a la frecuencia la onda incidente no presenta errores notables. La onda reflejada se ajusta considerablemente excepto a 500 Hz en el modelo de CMT donde existe un error de aproximadamente 12 dB.

En la onda transmitida se ajustan ambos modelos a bajas frecuencias, pero es a partir de frecuencias de 600 Hz donde aparecen errores en ambos modelos llegando a superar los 20 dB.

Los gráficos correspondientes a la segunda reflexión de la onda muestran errores de los modelos a partir de 600 Hz siendo los errores crecientes con la frecuencia ya que, a partir de los 1000 Hz, estos errores igual que para el caso anterior, serán reducidos con el modelo cuasi-2D de la voluta

5.1.3.3 Caso7: 3500 rpm, plena carga:

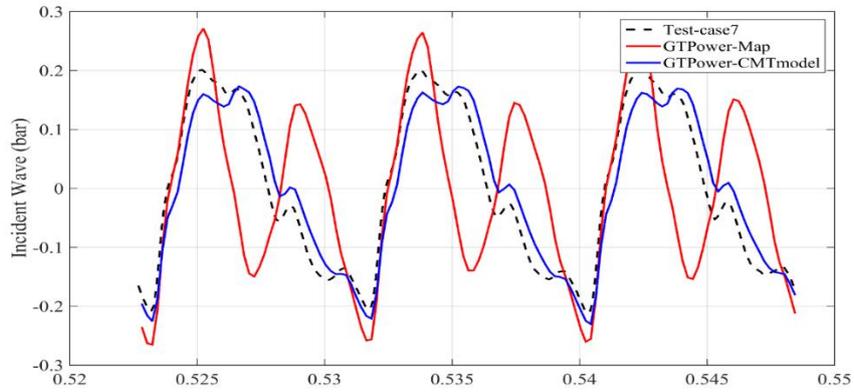


Figura 35 Caso 7 Onda Incidente

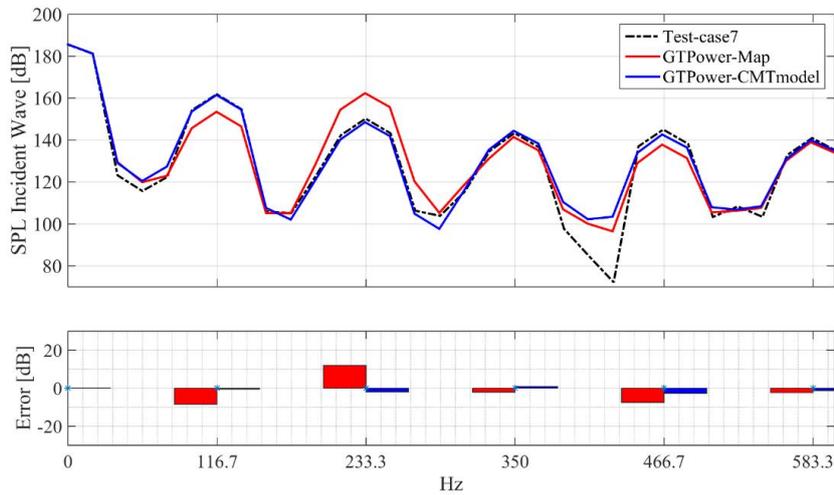


Figura 36 Caso 7 Onda Incidente 600 Hz

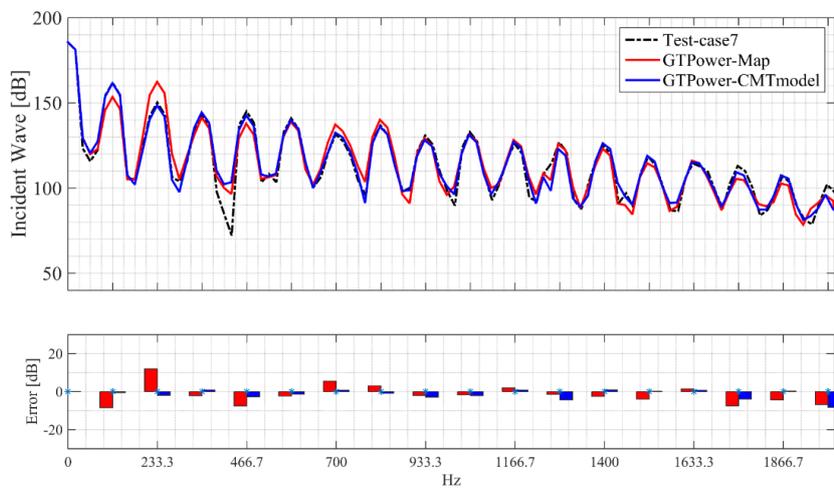


Figura 37 Caso 7 Onda Incidente 2000Hz

Capítulo 5 Validación de los modelos

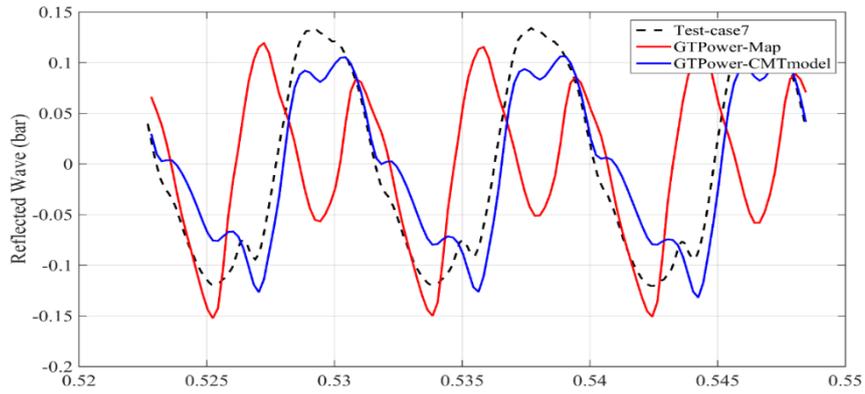


Figura 38 Caso 7 Onda Reflejada

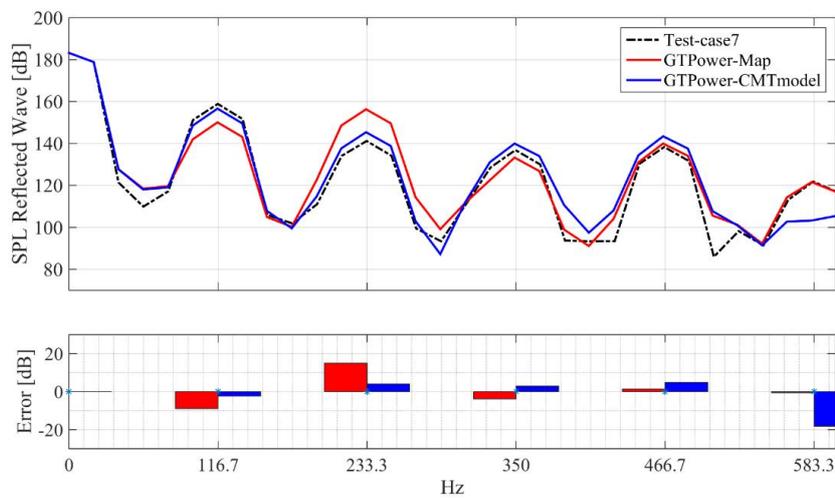


Figura 39 Caso 7 Onda Reflejada 600Hz

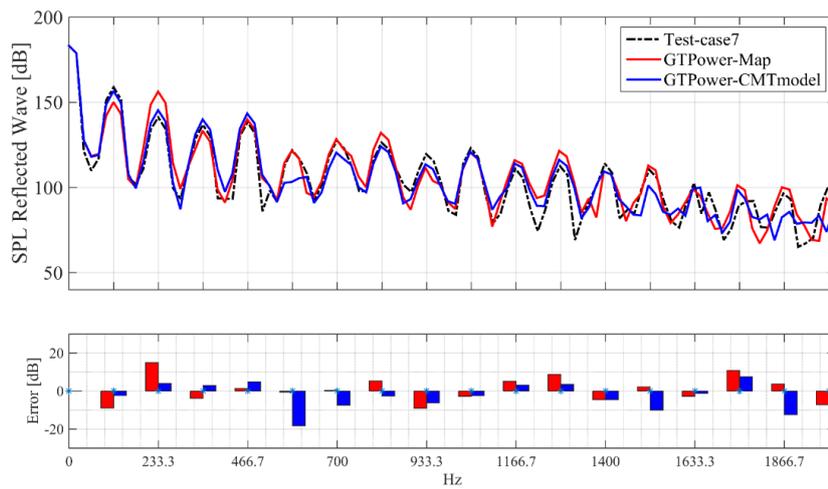


Figura42 Caso 7 Onda Reflejada 2000Hz

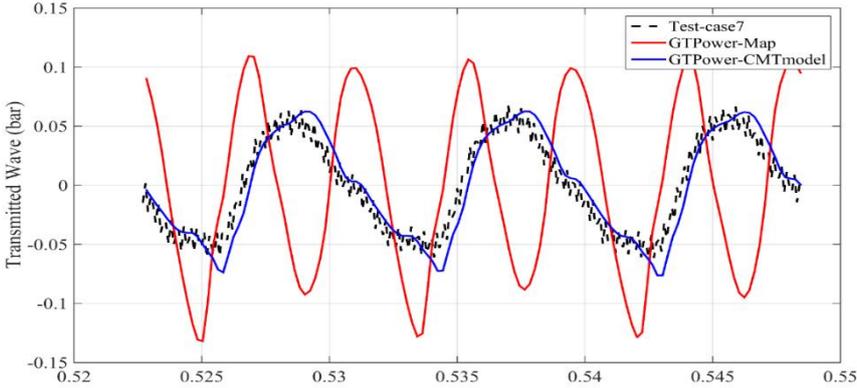


Figura43 Caso 7 Onda Transmitida

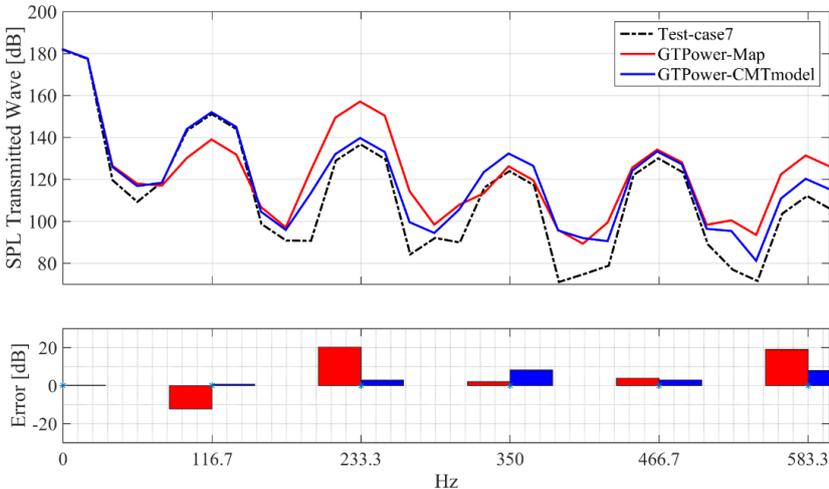


Figura 40 Caso 7 Onda Transmitida 600Hz

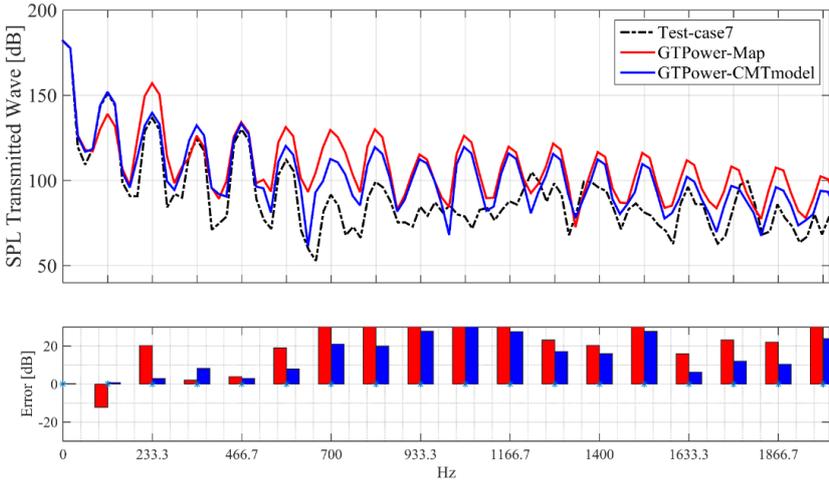


Figura 41 Caso 7 Onda Transmitida 2000Hz

Capítulo 5 Validación de los modelos

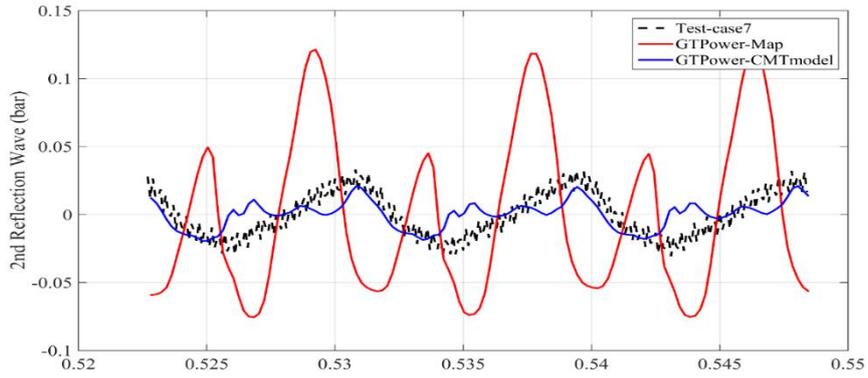


Figura 42 Caso 7 Segunda Reflexión

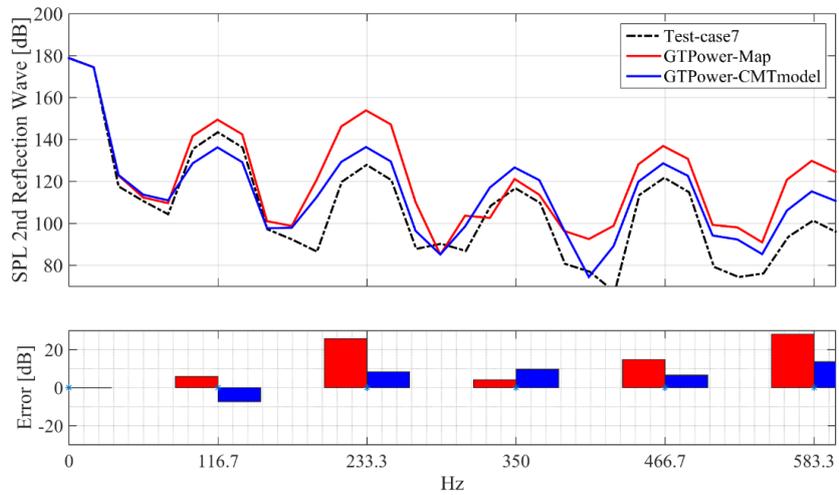


Figura 35 Caso 7 Segunda Reflexión 600Hz

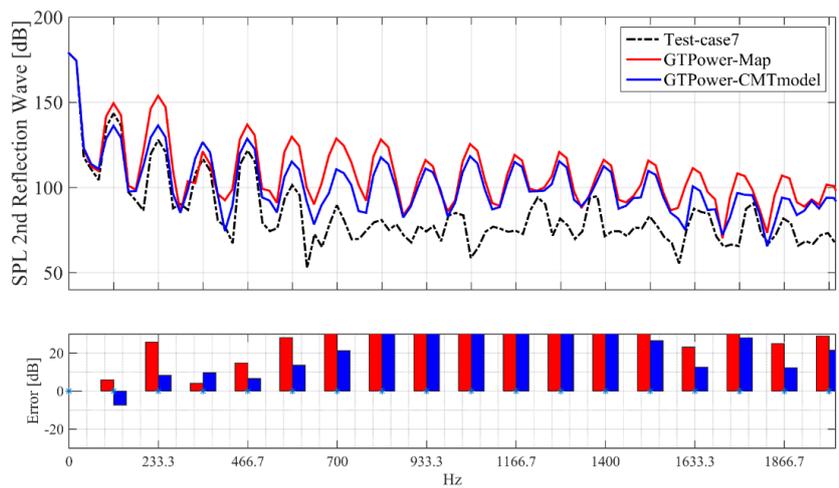


Figura 43 Caso 7 Segunda Reflexión 2000Hz

Análisis Caso 7: 3500 RPM Plena carga:

El caso de simulación 7 corresponde a un régimen de giro de 3500 RPM y plena carga. Como en los casos anteriores el modelo de CMT ajusta con mayor precisión que el modelo del cual se partía inicialmente con lo que podemos concluir que el modelo CMT es más aproximado que el modelo credo solo con librerías de GT-POWER, además confirma la validación del modelo ya que se ajusta en 3 casos de funcionamiento diferentes.

De igual manera que en los casos anteriores se observan las discrepancias a partir de unos 600 Hz aproximadamente y discrepancias mucho mayores a partir de los 1000 Hz. Como se verá en el capítulo posterior estas discrepancias serán corregidas considerablemente con el nuevo modelo de la voluta validado en [1].

5.2 VALIDACION CUASI 2D

5.2.1 Introducción

Debido a que con el modelo unidimensional a partir de amplitudes próximas a la longitud de la voluta se observa que las diferencias entre los valores obtenidos y los datos experimentales discrepan más de lo normal el trabajo realizado por [1], aporta un nuevo modelo en el que la voluta de la turbina ya no se considera como un conducto unidimensional, sino que se consideran condiciones cuasi-bidimensionales, esto afecta principalmente a las condiciones del flujo que pasa a través de voluta, ya que como se observa en la siguiente imagen el flujo no pasa a través de un conducto rectilíneo y uniforme, sino por un conducto con cierta curvatura en la que su sección va disminuyendo a lo largo del mismo.

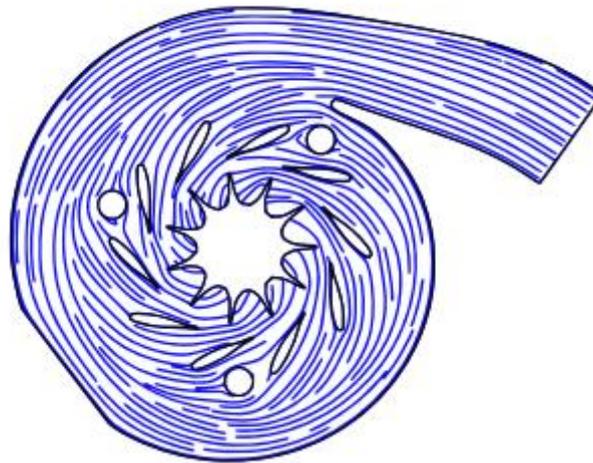


Figura 44 Flujo a través de la voluta: [1]

El modelo que se presenta, supone una mejora con respecto al modelo unidimensional, en este modelo la voluta de la turbina no es considerada como un conducto recto por el cual el flujo es constante, sino que se consideran desviaciones del caudal debidas a su componente radial, en este caso la precisión es mayor que en el caso 1-Dimensional.

5.2.2 Procedimiento

Para la validación del modelo cuasi 2D en un principio se adoptó el mismo procedimiento que para el caso unidimensional, es decir imponer condiciones compuestas en cuanto a presión y temperatura tanto en la entrada como en la salida y posteriormente calcular a partir de ellas la descomposición de las ondas. Sin embargo, se observó que los resultados no eran los esperados y fue necesario cambiar de estrategia.

El nuevo procedimiento ha consistido en imponer directamente en la entrada la onda incidente y en la salida la onda correspondiente a la segunda reflexión y a partir de ellos estudiar el comportamiento del modelo en cuanto a onda reflejada y transmitida. Como se ha comentado anteriormente el programa utilizado GT-POWER no ofrece la posibilidad de imponer ninguna componente de las ondas de presión, por eso ha sido necesario recurrir al programa OPEN-WAM, este programa si que permite aplicar directamente la descomposición de las ondas de presión sin necesidad de ser calculadas posteriormente.

5.2.3 Resultados:

En los resultados mostrados a continuación aparecen los gráficos correspondientes a las ondas reflejada y transmitida para los mismos casos que se han mostrado en el caso unidimensional, por ser objetivo del proyecto la comparativa entre ambos modelos en los gráficos aparecen comparados entre ellos con el objetivo de observar la mejor respuesta en el caso cuasi-bidimensional.

5.2.3.1 Caso 2: 2000RPM, grado de carga bajo:

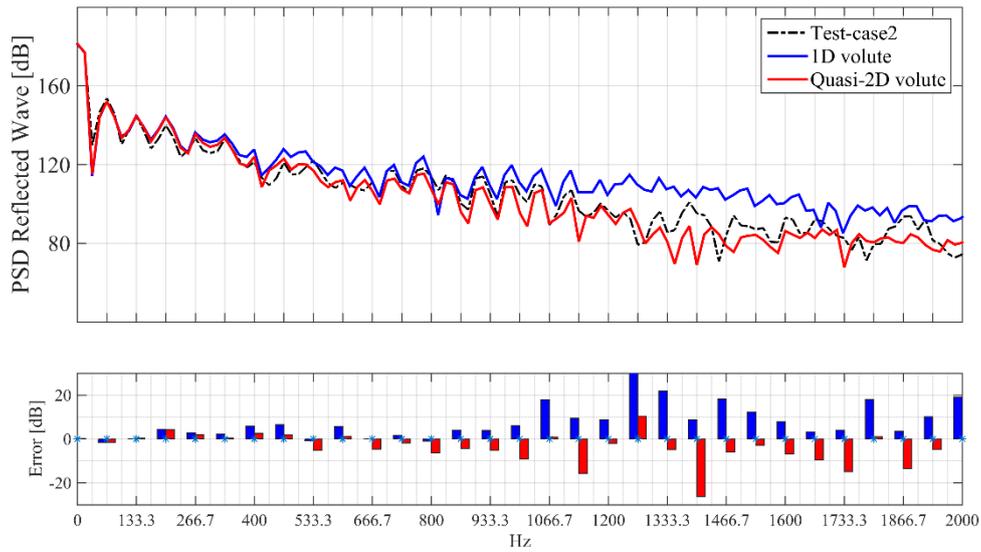


Figura 45 Caso 2 Onda Reflejada 1D vs Q2D

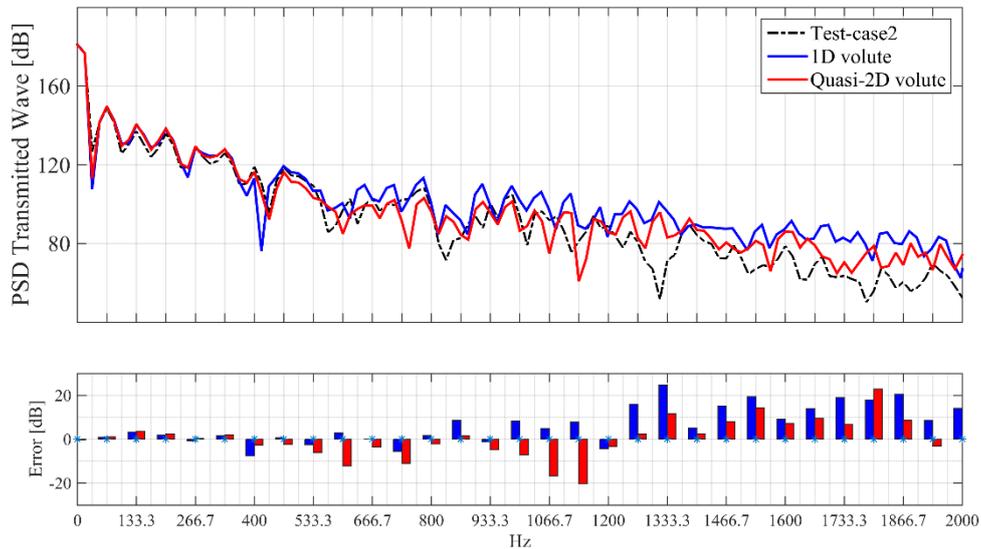


Figura 46 Caso 2 Onda Transmitida 1D vs Q2D

5.2.3.2 Caso 4: 3000RPM, grado de carga medio:

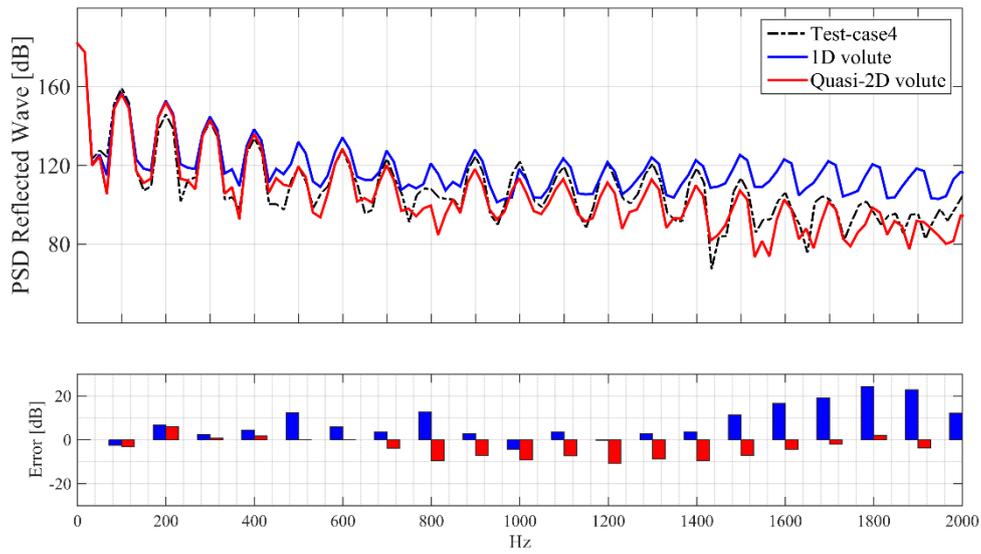


Figura 47 Caso 4 Onda Reflejada 1D vs Q2D

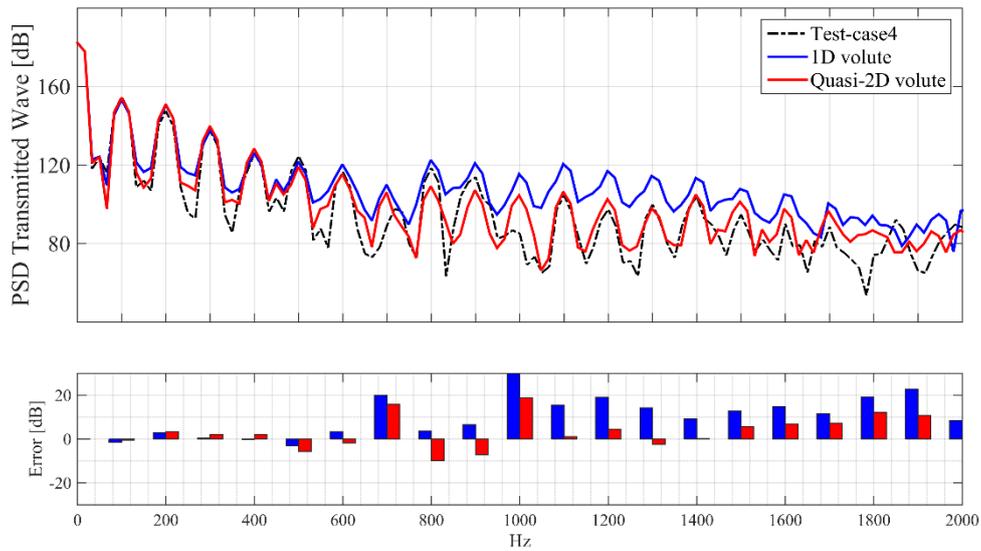


Figura 48 Caso 4 Onda Transmitida 1D vs Q2D

5.2.3.3 Caso 7: 3500RPM, plena carga:

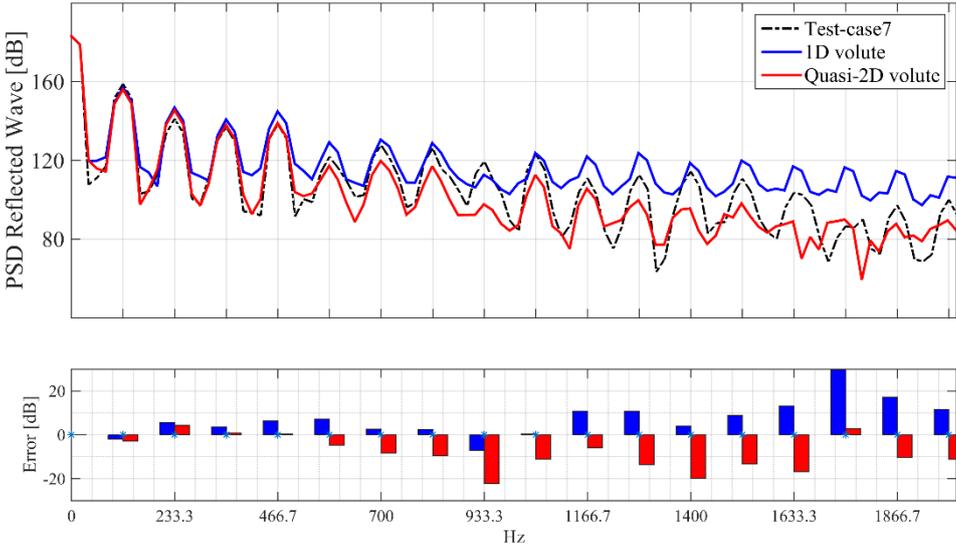


Figura 49 Caso 7 Onda Reflejada 1D vs Q2D

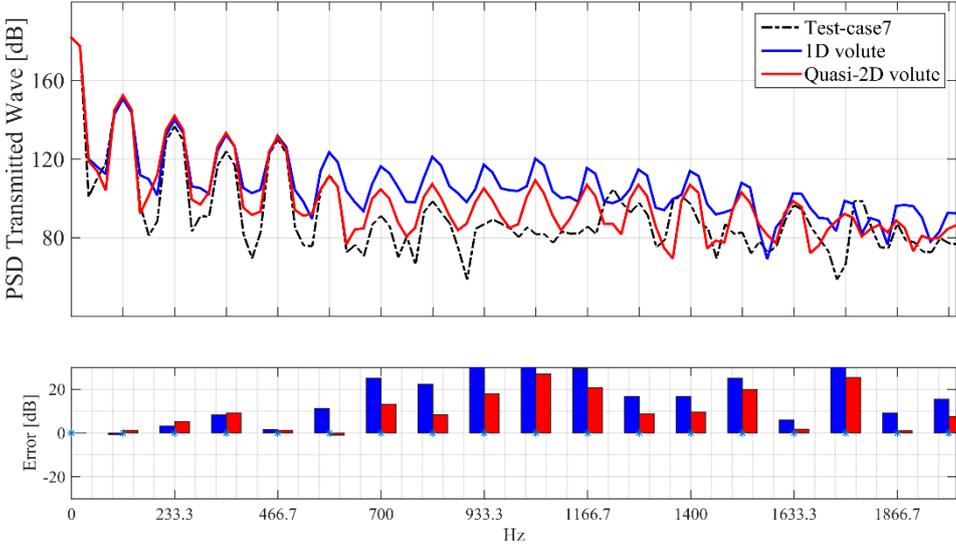


Figura 50 Caso 7 Onda Transmitida 1D vs Q2D

6.CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

En primer lugar y para el caso de las simulaciones en 1D se presentaban dos tipos de modelos del turbo, a partir de los resultados obtenidos se observa claramente que el modelo desarrollado en el Centro de Motores Térmicos se aproxima con mayor exactitud a los valores experimentales, dichas comprobaciones se ven claramente cuando se muestran las gráficas de las ondas en el dominio temporal.

En segundo lugar, en los gráficos correspondientes al dominio de la frecuencia, en el caso de simulaciones unidimensionales a partir de ciertas frecuencias se empiezan a observar ciertas discrepancias de los valores calculados frente a los obtenidos en el banco de ensayo, esto es debido a que cuando la amplitud es próxima a la longitud real de la voluta pueden aparecer resonancias que alteren las predicciones del modelo. Por esta razón se presenta un modelo de voluta cuasi-bidimensional con el objetivo de obtener una mayor precisión.

En los gráficos mostrados anteriormente se aprecia que a partir de frecuencias próximas a los 1000Hz el modelo cuasi-bidimensional se aproxima con mayor exactitud a los valores experimentales.

Como trabajos futuros se plantea, de igual forma que ha sido llevado a cabo en [1]; la creación de un modelo de compresor cuasi-bidimensional en el que el comportamiento del mismo pueda realizarse con mayor exactitud.

7. REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFIA

[1] Garcia Cuevas L.M “Experiments and Modelling of Automotive Turbochargers under Unsteady Conditions” 2014

BIBLIOGRAFIA:

- Motores de combustión interna alternativos, F. Payri, J.M. Desantes, (editores). 2011, Editorial Reverté.
- Procesos y tecnología de máquinas y motores térmicos, J. Arrègle, J.A. Broatch, J. Galindo, J.M. Luján, J.V. Pastor, R. Payri, J.R. Serrano, A.J. Torregrosa. 2008, Editorial UPV.

DOCUMENTO II. PLIEGO DE CONDICIONES

ÍNDICE PLIEGO DE CONDICIONES

II PLIEGO DE CONDICIONES

<u>1 INTRODUCCIÓN</u>	47
<u>2 CONDICIONES GENERALES</u>	47
<u>2.1 CONDICIONES GENERALES FACULTATIVAS</u>	47
<u>2.1.1 Promotor del proyecto:</u>	47
<u>2.1.2 Obligaciones y derechos del proyectista:</u>	47
<u>2.1.3 Facultades del promotor del proyecto:</u>	48
<u>2.1.4 Condiciones Generales de la ejecución del proyecto:</u>	48
<u>2.2 CONDICIONES GENERALES LEGALES</u>	48
<u>2.2.1 Marcas Registradas:</u>	48
<u>2.2.2 Derechos de autor:</u>	48
<u>2.2.3 Causas de la rescisión del proyecto:</u>	48
<u>3 CONDICIONES PARA EL DESARROLLO DEL TRABAJO</u>	49
<u>3.1 CONDICIONES PROGRAMAS UTILIZADOS</u>	49

1 INTRODUCCIÓN

En el presente documento se establecen las condiciones y requerimientos de condición técnica y legal que deben cumplirse durante la realización del proyecto. Debido a que los datos experimentales no han sido obtenidos por el grupo de trabajo del autor no se muestra aquello que hace referencia a las instalaciones en la que dichos datos han sido obtenidos.

De esta manera se incluye en el documento II pliego de condiciones, las herramientas e instalaciones utilizadas para aquellas partes del proyecto en las que el autor ha formado parte del equipo del autor como el hardware, software y las condiciones que se deben de cumplir en el puesto de trabajo para llevar a cabo un correcto desarrollo del mismo.

2 CONDICIONES GENERALES

2.1 CONDICIONES GENERALES FACULTATIVAS

2.1.1 Promotor del proyecto:

En el proyecto establecido entre CMT y la Empresa Jaguar Land Rover se identifica como promotor a la empresa Jaguar Land Rover.

2.1.2 Obligaciones y derechos del proyectista:

El proyectista estará sometido a una serie de obligaciones y con lo siguiente también dispondrá de una serie de derechos que se describen a continuación:

El proyectista está sometido a las siguientes obligaciones:

- Cumplimiento de la legislación vigente.
- Realzar el proyecto atendiendo las ordenes e indicaciones establecidas por el promotor del proyecto.
- Cumplimiento de la normativa sobre Trabajos Finales de Grado de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales (ETSII) de la Universidad Politécnica de Valencia.
- Respetar cualquier ley sobre los derechos de autor.
- Consultar con el promotor cualquier cambio en las especificaciones establecidas inicialmente y proponer soluciones a cualquier problema que pueda surgir durante la ejecución del proyecto.
- Informar sobre el progreso del proyecto al promotor.

El proyectista gozará de los siguientes derechos:

- Disponibilidad del equipo adecuado para la realización del proyecto.
- Recibir información por parte del promotor acerca de los derechos legales acerca del proyecto.
- Posibilidad de asesoramiento o consultas a la empresa proveedora del software Gamma Technologies.
- Soporte técnico ante cualquier fallo del programa.

2.1.3 Facultades del promotor del proyecto:

El promotor del proyecto dispone de las facultades que le otorga la ley vigente durante el periodo de realización del proyecto.

El promotor también podrá modificar las especificaciones del proyecto siempre que dicho cambio no perjudique al proyectista ni al trabajo que este haya podido ejecutar anteriormente, para evitar dicha situación cualquier modificación será consultada con el proyectista.

Finalmente, se le otorga al promotor la facultad de decidir sobre los plazos de entrega del proyecto.

2.1.4 Condiciones Generales de la ejecución del proyecto:

En las condiciones generales del proyecto se indica que el inicio de este será indicado por el promotor y en caso de aparecer discrepancias sobre la fecha se tomará como fecha de inicio del proyecto la fecha en la que el título fue aprobado por la comisión de proyectos.

El ritmo de trabajo será el establecido por mutuo acuerdo por ambas partes, atendiendo a la disponibilidad de tiempo justificada por el proyectista, el plazo de entrega y las condiciones generales se acordarán entre ambas partes.

2.2 CONDICIONES GENERALES LEGALES

2.2.1 Marcas Registradas:

El proyectista y el promotor reconocen las marcas registradas que han sido utilizadas durante la ejecución del proyecto, así como los derechos de autor y la biografía consultada durante la ejecución del proyecto

2.2.2 Derechos de autor:

Los derechos de autor del presente proyecto son aquellos que se fijan la ley y la reglamentación vigente en la fecha del inicio del proyecto.

2.2.3 Causas de la rescisión del proyecto:

Las causas por las cuales el promotor del proyecto podrá rescindir el mismo son las siguientes:

- Retraso excesivo sin justificación en la ejecución
- Abandono del proyecto sin causa justificada
- Mutuo acuerdo entre ambas partes

Ante cualquier discrepancia se resolverá el conflicto según la legalidad vigente.

3 CONDICIONES PARA EL DESARROLLO DEL TRABAJO

En este apartado se presentan las necesidades para el correcto desarrollo del proyecto:

- **Equipos:** Para llevar a cabo las tareas desempeñadas en el proyecto ha sido necesaria la disposición de un equipo informático para el modelado y para el procesado de los datos que este proporciona. Ha sido suficiente con un equipo portátil ya que el coste computacional no ha sido muy elevado.
- **Programas:** Como se ha comentado en el capítulo 3 el principal programa ha sido GT-POWER de la empresa Gamma Technologies, y para el procesado y manipulación de datos se ha trabajado con Matlab y Microsoft Excel.
- **Puesto Trabajo:** Debido a que en el proyecto trabajan más miembros, se acordó previamente a empezar el Trabajo Final de Grado que el alumno acudiría diariamente al Centro de Motores Térmicos, en el que se le habilitaría un puesto junto a los demás miembros del equipo para de esta forma facilitar la comunicación y una mejora del trabajo en equipo.

3.1 CONDICIONES PROGRAMAS UTILIZADOS

Para el desarrollo del proyecto ha sido necesaria la adquisición de la licencia correspondiente al programa GT-POWER cuyos costes y duración de las mismas se muestran en el capítulo del presupuesto. De igual manera para las licencias del Matlab y de Microsoft office.

DOCUMENTO III. PRESUPUESTO

ÍNDICE PRESUPUESTO

III PRESUPUESTO

<u>1 DESCRIPCIÓN GENERAL</u>	53
<u>1.1 INTRODUCCIÓN</u>	53
<u>1.2 ACTIVIDADES</u>	53
<u>1.2.1 Elaboración de scripts para el pos procesado:</u>	53
<u>1.2.2 Simulación y adaptación de los modelos:</u>	53
<u>1.2.3 Análisis y validación de los resultados:</u>	54
<u>1.2.4 Elaboración de informes:</u>	54
<u>1.3 RECURSOS</u>	54
<u>1.3.1 Costes mano de obra:</u>	55
<u>1.3.2 Costes de los Recursos materiales</u>	55
<u>2 PRESUPUESTOS</u>	55
<u>2.1 PRESUPUESTOS PARCIALES</u>	55
<u>2.2 PRESUPUESTO GLOBAL</u>	57

1 DESCRIPCIÓN GENERAL

1.1 INTRODUCCIÓN

En el documento presupuesto se expone el coste de la realización del proyecto, en él solo consta el coste de la participación del autor, ya que este empezó a formar parte del proyecto una vez ya empezado este.

Como unidades de obra se diferencian dos claramente, la primera es la correspondiente a la elaboración de los scripts para poder tener un pos procesado de la información lo más automatizado posible y la segunda corresponde a las horas de simulación y lanzamiento de casos en el programa GT-POWER.

Debido a que se trata de un proyecto de simulación y procesado de datos con ordenador, el presupuesto está basado en cubrir los costes asociados al personal encargado de llevar a cabo las simulaciones y los análisis, así como de las licencias de los programas utilizados para este fin, por esta razón los costes de material fungible son nulos.

Cabe añadir, que, aunque los datos experimentales son una parte fundamental del proyecto, su coste no se tiene en cuenta en el siguiente trabajo debido a que la obtención de los mismos ya fue realizada en proyectos anteriores llevados a cabo en el Centro de Motores Térmicos y al autor del Trabajo Final de Grado le fueron ya facilitados.

1.2 ACTIVIDADES

A continuación, se resumen las actividades que han sido necesarias para la realización del proyecto y en las que el autor del trabajo ha participado de forma directa.

1.2.1 Elaboración de scripts para el pos procesado:

La elaboración de los scripts ha sido una parte fundamental, ya que mediante estos se procesaban todos los datos y se graficaban para su mejor interpretación, además como en el proyecto se simulaban varios casos y varios modelos con el objetivo de ser enfrentados, la elaboración de estos scripts ha permitido una mayor automatización del proceso, en la elaboración de los mismos ha intervenido un ingeniero en prácticas.

1.2.2 Simulación y adaptación de los modelos:

En esta actividad constan las horas empleadas en simular los diferentes casos y la adaptación de los modelos para su simulación, ya que por ejemplo en algunos casos ha sido necesario modificar mapas de la turbina debido a que el programa no los aceptaba a la hora de simular, también se han modificado parámetros de la geometría en casos en los que se ha observado discrepancias notables en los resultados debidas a estos fenómenos.

En esta actividad han intervenido el ingeniero en prácticas, el ingeniero industrial y el director del proyecto.

1.2.3 Análisis y validación de los resultados:

En esta actividad se han realizado los análisis correspondientes para dar por válidos los resultados de los modelos, en esta actividad se han reunido el ingeniero industrial y el director del proyecto.

1.2.4 Elaboración de informes:

Como se establece en el pliego de condiciones el proyectista realizará un informe mensual sobre el progreso del proyecto, este informe constará de una presentación en la que constan los resultados obtenidos hasta la fecha. En esta actividad toman parte el ingeniero en prácticas el ingeniero industrial bajo la supervisión final del director del proyecto.

1.3 RECURSOS

Los recursos necesarios se han clasificado en dos grupos principales:

- Recursos materiales: En este grupo se incluyen las licencias del software utilizado y el material fungible que en este caso es nulo.
- Recursos humanos: Dentro de este grupo se incluye al director del proyecto, un ingeniero industrial y un ingeniero en prácticas (autor del documento).

1.3.1 Costes mano de obra:

Por costes de mano de obra se entiende el salario del personal implicado en el proyecto, por tratarse de un proyecto privado los salarios han sido acordados y no se han adoptado los valores establecidos por el Boletín Oficial del estado, aunque si se han tenido en cuenta las expresiones para su cálculo establecidas por la consellería de empleo industria y comercio.

Ingeniero Industrial

- Horas trabajadas al año: $[52 \text{ semanas/año} - (4 \text{ semanas vacaciones/año} - 2 \text{ semanas festivas/año})] \times 38 \text{ horas/semana} = 1748 \text{ horas/año}$
- Salario anual: 34867 €/año • Coste Seguridad Social (23.6% salario anual): 8228.612 €/año
- Salario bruto medio anual: $34867 + 8228.61 = 43095.61 \text{ €}$
- Coste por hora trabajada = $43095.61/1748 = 24.65 \text{ €/hora}$

Aunque se han utilizado las mismas expresiones los salarios establecidos con la empresa JLR los salarios han sido establecidos atendiendo al grado de responsabilidad en el proyecto y son los siguientes:

Rango	Coste por hora (€/hora)
Director del proyecto	88
Ingeniero Industrial	63
Ingeniero Prácticas	21

1.3.2 Costes de los Recursos materiales

Los costes de las licencias de los programas utilizados se han establecido en 6 meses, que ha sido el tiempo invertido por el autor del documento en el proyecto y son los siguientes:

Programa	Unidades	Coste 6 meses (€/6 meses)
GT-POWER	1	12000
Matlab	1	1250
Office	1	600

2 PRESUPUESTOS

2.1 PRESUPUESTOS PARCIALES

A continuación, se muestra el coste de cada unidad de obra, como se ha explicado anteriormente son cuatro unidades de obra correspondientes a elaboración de scripts, simulación y adaptación de los modelos, análisis y validación y elaboración de informes, que junto con los costes materiales formaran el presupuesto total.

Actividad 1

Descripción	unidades (h)	coste unitario(€/hora)	Importe (€)
Ingeniero Practicas	80	21	1680
Ingeniero Industrial	10	63	630
Director Proyecto	0	88	0
Total			2310

Presupuesto actividad 1

Actividad 2

Descripción	unidades (h)	coste unitario(€/hora)	Importe (€)
Ingeniero Practicas	120	21	2520
Ingeniero Industrial	90	63	5670
Director Proyecto	10	88	880
Total			9070

Presupuesto actividad 2

Actividad 3

Descripción	unidades (h)	coste unitario(€/hora)	Importe (€)
Ingeniero Practicas	50	21	1050
Ingeniero Industrial	50	63	3150
Director Proyecto	10	88	880
Total			5080

Presupuesto actividad 3

Actividad 4

Descripción	unidades (h)	coste unitario(€/hora)	Importe (€)
Ingeniero Practicas	50	21	1050
Ingeniero Industrial	50	63	3150
Director Proyecto	10	88	880
Total			5080

Presupuesto actividad 4

A continuación, se muestran los costes asociados a las licencias de los programas utilizados:

Recursos Materiales

Descripción	unidades (h)	coste unitario(€/6meses)	Importe(€)
Licencia GT-POWER	1	12000	12000
Licencia Matlab	1	1200	1200
Licencia Office	1	600	600
Total			13800

Presupuesto Recursos Materiales

2.2 PRESUPUESTO GLOBAL

A continuación, se presenta el coste total del proyecto siendo este la suma de los presupuestos parciales de cada actividad más los recursos materiales necesarios. Para la mano de obra se aplica unos costes indirectos que ascienden a un 30%.

Descripción	Importe
M.O actividad 1	2310
M.O actividad 2	9070
M.O actividad 3	5080
M.O actividad 4	5080
Coste Total Mano de Obra	21540
Costes indirectos sobre mano de obra (30%)	6462
Recursos Materiales	13800
TOTAL, Presupuesto Ejecución Material (Mano de obra + CI+Recursos Materiales)	63342

Presupuesto de Ejecución Material

Descripción	Importe
Presupuesto Ejecución Material	63342
IVA (21%)	13301.82
TOTAL	76643.82

Presupuesto Global

El presupuesto Total asciende a la cantidad de:

SETENTA Y SIES MIL SESEISCIENTOS CUARENTA Y TRES EUROS CON OCHENTA Y DOS CENTIMOS