

**ESTUDIO DE IMPACTO PARA EL CONTROL Y DISMINUCION DE LAS
EMISIONES DE GASES EN LOS MOTORES DE LOS AVIONES, QUE
CONTRIBUYEN AL EFECTO INVERNADERO EN EL CLIMA DE BOGOTA.**

FRANCISCO JAVIER GONZALEZ CRUZ

ROBERTO TALERO ACOSTA

UNIVERSIDAD DE MANIZALES

CENTRO DE INVESTIGACIONES EN MEDIO AMBIENTE Y DESARROLLO –

CIMAD

MAESTRIA EN DESARROLLO SOSTENIBLE Y MEDIO AMBIENTE

BOGOTÁ D.C

2014

**ESTUDIO DE IMPACTO PARA EL CONTROL Y DISMINUCION DE LAS
EMISIONES DE GASES EN LOS MOTORES DE LOS AVIONES, QUE
CONTRIBUYEN AL EFECTO INVERNADERO EN EL CLIMA DE BOGOTA.**

FRANCISCO JAVIER GONZALEZ CRUZ

ROBERTO TALERO ACOSTA

**Trabajo de grado para optar el Título de
“Maestría en Desarrollo Sostenible y Medio Ambiente”**

Director del Proyecto

M.Sc. Luis Eduardo Baquero Rey

**UNIVERSIDAD DE MANIZALES
CENTRO DE INVESTIGACIONES EN MEDIO AMBIENTE Y DESARROLLO –
CIMAD
MAESTRIA EN DESARROLLO SOSTENIBLE Y MEDIO AMBIENTE
BOGOTÁ D.C**

2014

Nota de Aceptación

Presidente del Jurado

Jurado

Jurado

Director

Bogotá D.C., Agosto 2 de 2014

A mis padres María y Abraham, siempre han sido el motor en mi vida con su apoyo incondicional a lo largo de todos mis estudios.

A mi hermana Diana y a mi sobrina Valentina por estar pendientes de mí y alegrarme la vida.

Francisco

A mi esposa Amparo Cubillos Fortunati y mis hijos Paula Andrea y Santiago Talero C, por su amor, motivación constante y fuerzas para avanzar y haberme permitido la realización de esta investigación.

A mi hermano Antonio Talero Acosta, por su apoyo permanente

Colaboración comprensión y soporte emocional.

A mis padres, por su amor, y presencia moral y espiritual.

Roberto

Agradecimientos

A Dios, que nos guía por el sendero correcto por la gracia de su nombre.

A la Universidad de Manizales, por el conocimiento que nos brindó a lo largo de los periodos académicos de la maestría.

Al tutor Oscar Fernando Gómez, por su apoyo y colaboración incondicional en el transcurso de la maestría.

A la Fundación Universitaria Los Libertadores de Bogotá, por facilitar cortésmente los equipos de laboratorio necesarios para la realización del proyecto.

Al Dr. Luis Eduardo Baquero, por sus asesorías y observaciones en el desarrollo del presente proyecto.

A nuestro colega y amigo Oscar Chamarravi por sus valiosos apuntes y observaciones en el desarrollo del Diseño Metodológico.

A los Ingenieros Aeronáuticos Luis Miguel Castaño, Jorge Herrera y Jhon Díaz de la empresa Avianca S.A, por su gran colaboración en el proceso de toma de datos en los motores.

Al Ingeniero Aeronáutico Oscar Tinjaca de la empresa Satena S.A, por su gran colaboración en el proceso de toma de datos en los motores.

A la Ingeniera Industrial Paola Castro por sus asesorías en el desarrollo de gráficas para el Análisis de Resultados.

Al Ingeniero Aeronáutico Fabio Saavedra de Aeronáutica Civil de Colombia, por la información brindada para el desarrollo del presente proyecto.

A la Ingeniera Gloria Camargo Gerente Técnico de Urigo S.A, por sus asesorías en el manejo del equipo Gas Alert Max XT y del software fleet MANAGER.

Resumen

La presente investigación muestra el proceso para determinar el impacto ambiental, ocasionado por la contaminación de los motores a reacción, los cuales contribuyen al efecto invernadero en el clima de Bogotá, específicamente en el área de acción de los aviones en el Aeropuerto El Dorado. En el presente documento, se dan a conocer los métodos que se siguieron para la obtención de resultados tales como el índice de humo reglamentario de los motores, los cálculos de las emisiones de gases reglamentarias según la Organización de Aviación Civil Internacional, los cálculos de las emisiones gaseosas reglamentarias según las normas ambientales OSHA y del Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Para el proceso se realizó un estudio de los tipos de motores de las aeronaves y de la cantidad de operaciones aeronáuticas que se generan diariamente en el aeropuerto, con el fin de determinar el tamaño de la muestra a analizar según la población existente; posteriormente se realizaron toma de datos de los contenidos porcentuales de gases emitidos por los motores mediante la utilización de un analizador de gases.

Los análisis de las emisiones gaseosas se efectuaron en tres tipos de motores a reacción que son muy utilizados por las aerolíneas comerciales y se realizaron comparativos entre los valores obtenidos y los valores reglamentarios según las normas nacionales e internacionales.

Palabras clave: Impacto ambiental, Motores a reacción, Índice de humo, Emisiones gaseosas, Efecto invernadero, Forzamiento radioactivo, Combustión interna.

Abstract

This research shows the process for determining the environmental impact caused by pollution from jet engines, which contribute to the greenhouse effect of atmosphere of Bogotá, specifically in the area of ElDorado airport. The research shows the methods followed for obtaining results such as the smoke index engine regulatory, calculations of allowed gas emissions by the International Civil Aviation Organization, calculations of allowed gaseous emissions by the OSHA environmental standards and the Ministry of Environment, Housing and Territorial Development. To process a study of the types of aircraft engine is carried and also an analysis of the number of aircraft operations generated daily in the airport, in order to determine the size of the sample according to the existing population; subsequently data collection of the percentage content of gases emitted by the engines were made using a gas analyzer.

The analysis of gaseous emissions were performed on the three types of jet engines that are widely used by commercial airlines and were made comparatives between the values obtained and regulatory values according to national and international standards.

Key words: Environmental impact, Jet engine, Smoke index, Gaseous emissions, Greenhouse effect, Radioactive forcing, Internal combustion.

Contenido

	pág.
Introducción	1
1. Justificación	3
2. Diseño Teórico	6
2.1 Título de la Investigación	6
2.2 Formulación del Problema y planteamiento de la pregunta de investigación	6
2.3 Descripción del Área Problemática	7
2.4 Antecedentes Investigativos	8
2.4.1 Procesos de Investigación que se han Generado.	11
2.5 Objetivos	16
2.5.1 Objetivo General	16
2.5.2 Objetivos Específicos	16
2.6 Hipótesis y Supuestos	16
2.7 Técnicas e Instrumentos	17
2.8 Impactos Esperados	20
2.8.1 Aspecto Científico	20

2.8.2 Aspecto Técnico	20
2.8.3 Aspecto Ambiental.	20
2.8.4 Aspecto Económico	20
2.8.5 Aspecto Social.	20
2.8.6 Aspecto Cultural	21
3. Referente Teórico	22
3.1 Motores a Reacción	22
3.1.2 Partes del Motor a Reacción	25
3.1.2.1 Dispositivo de admisión	26
3.1.2.2 Compresor o etapas de compresión	27
3.1.2.3 Cámara de combustión	28
3.1.2.4 Turbina.	29
3.1.3 Funcionamiento del Motor a Reacción	31
3.1.3.1 Ciclo Brayton	32
3.1.3.2 Fuerza de Empuje	35
3.2 Sostenibilidad ambiental	36
3.3 Contaminación atmosférica	37
3.4 Efecto invernadero	42
3.4.1 Gases de efecto invernadero	45
3.4.2 Forzamiento Radiactivo	48
3.5 Proceso de la combustión en los motores a reacción	50
3.5.1 Producción de gases	55

3.5.1.1 Emisiones nocivas	58
3.5.1.1.1 Anhídrido carbónico o dióxido de carbono (CO ₂).	60
3.5.1.1.2 Vapor de agua (H ₂ O).	62
3.5.1.1.3 Óxidos de nitrógeno (NO _x).	62
3.5.1.1.4 Hidrocarburos sin quemar	63
3.5.1.1.5 Humos.	63
3.5.1.1.6 Óxidos sulfurosos (SO ₂).	63
3.5.1.1.7 Monóxido de carbono (CO).	64
3.5.1.1.8 Residuos de productos aditivos al combustible	64
3.6 Leyes y normas para el control de la contaminación ambiental ocasionada por motores a reacción.	65
3.6.1 Leyes y normas internacionales	66
3.6.1.1 Leyes y normas ICAO sobre emisiones en motores a reacción	67
4. Diseño Metodológico	73
4.1 Unidad de análisis y número de operaciones diarias en el aeropuerto El Dorado.	73
4.2 Tipo de funcionamiento y régimen de trabajo de los motores	77
4.2.1 Aeronaves que transitan en el Aeropuerto el Dorado	78
4.3 Ficha técnica de los motores y certificación ambiental	81
4.3.1 Certificación ambiental	83
4.4 Tipo de investigación	88
4.5 Procedimiento	89
4.5.1 Tamaño de la muestra	91

4.5.2 Prueba piloto	99
4.5.3 Pruebas en Satena S.A y Avianca S.A.	103
4.6 Técnicas e instrumentos de recolección de la información	106
5. Estudio Económico	108
6. Análisis de Resultados	109
6.1 Antecedentes al anexo 16, volumen II.	109
6.2 Certificación respecto a las emisiones según ICAO anexo 16, volumen II.	110
6.2.1 Aplicación de las ecuaciones que certifican las emisiones de los motores del estudio	111
6.2.1.1 Cálculo del índice de humo reglamentario para los motores.	112
6.2.1.2 Cálculo de las emisiones gaseosas reglamentarias para los motores según la ICAO	117
6.2.1.2.1 Cálculo de la relación D_p/F_{00} para el Monóxido de carbono (CO) del motor Turbofan CFM56-5B	117
6.2.1.2.2 Cálculo de la relación D_p/F_{00} para el Monóxido de carbono (CO) del motor Turbofan RR Trent 700	123
6.2.1.2.3 Cálculo de la relación D_p/F_{00} para el Monóxido de carbono (CO) del motor Turbohélice PW 127M.	128
6.2.1.2.4 Cálculo de la relación D_p/F_{00} para los Hidrocarburos sin quemar (HC) en los tres motores del estudio.	134
6.2.1.2.5 Cálculo de la relación D_p/F_{00} para los Óxidos de Nitrógeno (NO _x) del motor Turbofan CFM56-5B.	136

6.2.1.2.6 Cálculo de la relación D_p/F_{00} para los Óxidos de Nitrógeno (NO_x) del motor Turbofan RR Trent 700.	138
6.2.1.2.7 Cálculo de la relación D_p/F_{00} para los Óxidos de Nitrógeno (NO_x) del motor Turbohélice PW 127M.	140
6.2.1.3 Análisis de las emisiones gaseosas reglamentarias según normas OSHA 29CFR 1910.146 y Resolución 601 del 4 de abril de 2006 del Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial.	141
6.2.1.3.1 Análisis de las emisiones gaseosas realizadas en la prueba piloto	141
6.2.1.3.2 Análisis de las emisiones gaseosas realizadas en el motor Turbofan CFM56-5B.	147
6.2.1.3.3 Análisis de las emisiones gaseosas realizadas en el motor Turbofan RR Trent 700	153
6.2.1.3.4 Análisis de las emisiones gaseosas realizadas en el motor Turbohélice PW 127M.	161
6.3 Concentración de gases emitidos por los motores a reacción de acuerdo a la frecuencia de las operaciones aéreas en el Aeropuerto El Dorado.	168
6.4 Análisis de la producción de gases de efecto invernadero en los motores a reacción	176
7. Conclusiones	179
8. Recomendaciones	184
Referencias Bibliográficas	186
Anexos	191

Lista de Figuras

	pág.
Figura 1. Emisiones de CO ₂ en el 2004	10
Figura 2. Motores objeto del estudio	17
Figura 3. Equipo analizador de gases	19
Figura 4. Motor a reacción Rolls Royce	23
Figura 5. Clasificación de los motores a reacción	24
Figura 6. Motores a reacción de compresión mecánica	25
Figura 7. Partes del motor a reacción	25
Figura 8. Dispositivos de admisión (Inlets)	26
Figura 9. Compresor centrifugo	27
Figura 10. Componentes del compresor axial. Motores de reacción	28
Figura 11. Cámaras de combustión	29
Figura 12. Turbina axial	30
Figura 13. Toberas.	31
Figura 14. Comportamiento del fluido dentro del motor	32
Figura 15. Ciclo ideal Brayton grafica P Vs V	33
Figura 16. Ciclo ideal Brayton grafica T Vs S	34
Figura 17. Áreas del desarrollo sostenible	36

Figura 18. Efecto invernadero	43
Figura 19. Balance anual de energía de la tierra de la NCAR en 2008 en w/m^2	45
Figura 20. Estelas de vapor de agua	47
Figura 21. Componentes del forzamiento radiactivo	49
Figura 22. Calculo proporcional del flujo de aire	52
Figura 23. Estabilización de llama y patrón de flujo de aire en general	53
Figura 24. Fuerza radiante de las aeronaves en 1992 y para 2050	56
Figura 25. Admisión y gases de escape del motor a reacción	61
Figura 26. Motor Turbofan CFM56-5B	84
Figura 27. Motor Turbofan RR Trent 700	85
Figura 28. Motor Turbohélice Pratt & Whitney	86
Figura 29. Motor Turbo helice Pratt & Whitney PT6-A	90
Figura 30. Prueba piloto	100
Figura 31. Pruebas en Satena S.A	104
Figura 32. Pruebas en Avianca S.A	106
Figura 33. Números de smoke Vs tipos de motor	116
Figura 34. D_p/F_{00} para el CO Vs tipos de motor	134
Figura 35. D_p/F_{00} para el HC Vs tipos de motor	136
Figura 36. D_p/F_{00} para el NO_x Vs tipos de motor	138
Figura 37. D_p/F_{00} para el NO_x Vs tipos de motor	139
Figura 38. D_p/F_{00} para el NO_x Vs tipos de motor	141
Figura 39. Ppm para el CO con el motor PT6-A (prueba piloto) Vs normas.	145

Figura 40. Porcentaje (%) para el O ₂ con el motor PT6-A (prueba piloto) Vs niveles permisibles OSHA	145
Figura 41. Ppm para el H ₂ S con el motor PT6-A (prueba piloto) Vs niveles permisibles	146
Figura 42. Porcentaje (%) CH ₄ con el motor PT6-A (prueba piloto) Vs Límite Inferior de Explosividad (LEL)- OSHA	147
Figura 43. Ppm para el CO con el motor CFM 56-5B Vs normas	151
Figura 44. Porcentaje (%) para el O ₂ con el motor CFM56-5B Vs niveles permisibles	152
Figura 45. Ppm para el H ₂ S con el motor Turbofan CFM56 – 5B Vs niveles permisibles	152
Figura 46. Porcentaje (%) CH ₄ con el motor CFM56 – 5B Vs Límite Inferior de Explosividad (LEL)- OSHA	153
Figura 47. Ppm para el CO con el motor RR Trent 700 Vs normas	159
Figura 48. Porcentaje (%) para el O ₂ con el motor RR Trent 700 Vs niveles permisibles	159
Figura 49. Ppm para el H ₂ S con el motor TurbofanTrent 700 Vs niveles permisibles	160
Figura 50. Porcentaje (%) CH ₄ con el motor RR Trent 700 Vs Límite Inferior de Explosividad (LEL)- OSHA	160
Figura 51. Ppm para el CO con el motor PW 127M Vs normas	166
Figura 52. Porcentaje (%) para el O ₂ con el motor PW 127M Vs niveles permisibles	167
Figura 53. Ppm para el H ₂ S con el motor PW 127M Vs niveles permisibles OSHA.	167
Figura 54. Porcentaje (%) CH ₄ con el motor PW 127M Vs Límite Inferior de Explosividad (LEL)- OSHA	168
Figura 55. Cantidad de emisión de gases diaria durante la fase carreteo-salida en los primeros 5 minutos.	175

Figura 56. Cantidad de emisión de gases anual durante la fase carreteo-salida en los primeros 5 minutos	176
Figura 57. Numero de motores que operan en el Aeropuerto El Dorado.	178
Figura 58. Configuración externa	244
Figura 59. Display	244
Figura 60. Configuración interna	245
Figura 61. Pantalla y botón	246
Figura 62. Alarmas visuales	247
Figura 63. Alarmas sonora	247
Figura 64. Alarma vibratoria	248
Figura 65. Sensor de LEL	248
Figura 66. Sensor de O ₂	249
Figura 67. Sensor de CO	249
Figura 68. Sensor de H ₂ S	250
Figura 69. Entrada de la bomba	250
Figura 70. Puerto infrarrojo	251
Figura 71. Arranque	252
Figura 72. Prueba de alarmas y firmware	253
Figura 73. Arranque y prueba de la bomba	254
Figura 74. Desbloqueo y funcionamiento de la bomba	255
Figura 75. Valores de activación de la alarma TWA y STEL	256
Figura 76. Valores de activación de las alarmas de alto y bajo nivel	257
Figura 77. Autodiagnóstico y ejecución	258
Figura 78. Cero automático y operación normal	259
Figura 79. Ingreso software fleet MANAGER	260

Figura 80. Importar registro de datos	261
Figura 81. Selección del dispositivo	261
Figura 82. Configuración del sensor H ₂ S	262
Figura 83. Configuración del sensor CO	262
Figura 84. Configuración del sensor O ₂	263
Figura 85. Configuración del sensor LEL	263
Figura 86. Vista de registros y resultados	264
Figura 87. Datos exportados a una hoja de excel	265

Lista de Tablas

	pág.
Tabla 1. Porcentajes de productos de emisión en motores. Motores de reacción	64
Tabla 2. Control de gases contaminantes	69
Tabla 3. Fases y regímenes de motor para la determinación de los índices de contaminación en el entorno de aeropuerto	71
Tabla 4. Aviones y compañías que utilizan los motores de análisis	74
Tabla 5. Resumen de operaciones aeronáuticas nacionales efectuadas en el mes de febrero de 2014 emitido por Aerocivil	75
Tabla 6. Resumen de operaciones aeronáuticas nacionales e internacionales efectuadas en el primer trimestre de 2014 emitido por OPAIN S.A	76
Tabla 7. Flotas de las aerolíneas y motores utilizado	79
Tabla 8. Características de la variable	93
Tabla 9. Tabla para determinar el nivel de confianza y el error, según el porcentaje de certeza	94
Tabla 10. Concentraciones permitidas de los contaminantes atmosféricos para Colombia	100
Tabla 11. Estudio Económico	108
Tabla 12. Datos de partículas por millón (ppm) del CO, tomados del equipo Gas Alert Max XT para el motor CFM565B	120

Tabla 13. Datos de partículas por millón (ppm) del CO, tomados del equipo Gas Alert Max XT para el motor RR Trent 700.	125
Tabla 14. Datos de partículas por millón (ppm) del CO, tomados del equipo Gas Alert Max XT para el motor PW 127M	130
Tabla 15. Datos de gases, tomados del equipo Gas Alert Max XT para la prueba piloto con el moto PT6-A	142
Tabla 16. Datos de gases, tomados del equipo Gas Alert Max XT para el motor CFM56-5B	147
Tabla 17. Datos de gases, tomados del equipo Gas Alert Max XT para el motor RR Trent 700	154
Tabla 18. Datos de gases, tomados del equipo Gas Alert Max XT para el motor PW 127M.	161
Tabla 19. Datos y promedio de las masas del gas CO emitidos por los motores	169
Tabla 20. Datos y promedio de las masas del gas HC emitidos por los motores	171
Tabla 21. Datos y promedio de las masas del gas NO _x emitidos por los motores	174

Lista de Anexos

	pág.
Anexo A. Cartas de solicitud a las aerolíneas para la toma de datos	191
Anexo B. Ficha técnica del combustible Jet A-1	193
Anexo C. Reporte operacional en el aeropuerto El Dorado para el día 28 de Febrero de 2014 por Aerocivil y tabla resumen para el mes de Febrero de 2014.	195
Anexo D. Reporte operacional en el aeropuerto El Dorado para el primer trimestre del 2014 por OPAIN S.A	197
Anexo E. Certificado tipo para el motor Turbofan CFM56-5	198
Anexo F. Certificado tipo para el motor TurbofanTrent 700	207
Anexo G. Certificado tipo para el motor Turbohélice PW 127M	217
Anexo H. Ficha de recolección de datos para las emisiones de escape de los motores por ICAO y hoja de cálculo de las lecturas del equipo Gas Alert Max XT	233
Anexo I. Certificado de calibración y análisis del equipo Gas Alert Max XT	239
Anexo J. Lecturas del equipo Gas Alert Max XT para la prueba piloto	241
Anexo K. Protocolo de Medición Equipo Gas Alert Max XT	243
Anexo L. Lecturas del equipo Gas Alert Max XT para los motores Turbofan CFM56-5B y RR Trent 700	267
Anexo M. Lecturas del equipo Gas Alert Max XT para el motor Turbohélice PW 127M	275

Anexo N. Base de datos de la ICAO en cuanto a las emisiones de los motores de los aviones	279
Anexo O. Normas OSHA 29CFR 1910.146, nota de aplicación AP206. Guía de comprobación atmosférica en espacios reducidos.	286
Anexo P. Fichas de recolección de datos para las emisiones de escape de los motores CFM56-5B, Trent 700 y PW 127M	291

Glosario

ABSORCION INFRARROJA NO DISPERSIVA: método que se utiliza para detectar y analizar continuamente los gases poliatómicos que tienen una banda de absorción de infrarrojos comprendida entre 2 y 10 μ m, excepto los gases diatómicos que no tienen banda de absorción de infrarrojos (O_2 , N_2 , H_2 ...).

AERONAVEGABILIDAD: aptitud técnica y legal que deberá tener una aeronave para volar en condiciones de operación segura.

ANALIZADOR DE GASES: instrumento capaz de medir en porcentajes determinados, compuestos químicos contenidos en las masas de los productos gaseosos emitidos por el escape de un motor de combustión interna.

CALENTAMIENTO GLOBAL: aumento de la temperatura media global de la atmosfera terrestre y de los océanos por causa de cambios climatológicos y por la acción del hombre.

CAMARA DE COMBUSTION ANULAR: cámara de combustión muy utilizada en motores a reacción, en ella ocurre el proceso de la combustión y la absorción de la energía calorífica del combustible. La cantidad de gases que se genera en dicha cámara es la encargada de accionar las etapas de turbina del motor. Es una única cámara en forma de anillo que rodea al eje del compresor-turbina; dicha cama consta de un solo tubo de llama, también anular y una serie de inyectores cuyo número puede oscilar entre 12 y 25 repartidos a lo largo de toda la circunferencia que describe la cámara.

CERTIFICADO TIPO: certificado que se otorga por la autoridad aeronáutica del estado de diseño para un producto aeronáutico, cuando se ha determinado el cumplimiento de todas las condiciones de aeronavegabilidad y operación, establecidas para tal producto (RAC).

CICLO TERMODINAMICO: serie de procesos termodinámicos y transformaciones de un fluido, en un sistema que retorna a las condiciones iniciales, después de haber realizado un trabajo.

CIRRUS: tipos de nubes compuestas de cristales de hielo caracterizadas por bandas delgadas y finas; estas nubes contribuyen a atrapar el calor emitido por la tierra hacia el espacio como a reflejar la luz del sol.

COMBUSTIBLES FOSILES: son combustibles que se formaron hace millones de años a partir de restos orgánicos dejados por plantas y animales muertos; esto ocurrió durante los miles de años de evolución del planeta. Los combustibles fósiles son petróleo, carbón y gas natural, también son recursos no renovables, ya que no se reponen por procesos biológicos.

CONDENSACION: proceso en el cual se produce el cambio de estado de la materia que se encuentra en estado gaseoso y pasa a estado líquido; es también el proceso opuesto al de la vaporización.

CONSUMO ESPECÍFICO DE COMBUSTIBLE: en un motor a reacción es el consumo que tiene dicho motor en cuanto al gasto de masa de combustible por unidad de tiempo, con respecto a la fuerza de empuje que se desarrolla. En el sistema internacional sus unidades son Kg/Nh .

CONTAMINACION ATMOSFERICA: presencia en el aire de materias que generan riesgo, daño o molestias graves en las personas, así como que sean causantes del deterioro de materiales, reducción de la visibilidad o producción de olores desagradables.

CONTAMINANTES: son fenómenos físicos o sustancias o elementos en estado sólido, líquido o gaseoso, causantes de efectos adversos en el medio ambiente, los recursos naturales renovables y la salud humana que solos, o en combinación, o como productos de reacción, se emiten al aire como resultado de actividades humanas, de causas naturales, o de una combinación de estas (Decreto 948, 1995).

EFICIENCIA DE LA COMBUSTION: parámetro que determina el porcentaje total de quemado del combustible en una cámara de combustión. Esta eficiencia depende de la relación total aire/combustible en la cámara.

EMISIONES: fluidos gaseosos puros o con sustancias en suspensión, que emanan como residuos o productos de la actividad humana o natural provenientes de una fuente móvil o fija.

EMPUJE NOMINAL: con respecto a las emisiones de los motores a reacción, es el empuje de despegue máximo aprobado por la autoridad encargada de la certificación que ha de aplicarse en condiciones normales de operación y en condiciones estáticas a nivel del mar, a la atmosfera tipo internacional (ISA), y sin utilizar inyección de agua. El empuje se expresa en kilonewtons (Anexo 16, ICAO).

FASE CARRETEO – SALIDA: fases de utilización que comprenden el rodaje o el funcionamiento a bajo régimen desde la puesta en marcha inicial del motor o motores de propulsión hasta la iniciación del recorrido de despegue, y entre el momento de salida de la pista.

FECHA DE FABRICACION: la fecha en la cual se haya librado el correspondiente documento que atestigüe que el motor o la aeronave en cuestión se ajustan a las exigencias correspondientes al tipo de motor de que se trata, o la fecha de libramiento de algún documento análogo (Anexo 16, ICAO).

FLUJO MASICO: es la magnitud física que expresa la variación de la masa en el

tiempo; se utiliza frecuentemente en sistemas termodinámicos tales como tuberías, toberas, difusores compresores y turbinas ya que estos actúan sobre un fluido que lo atraviesa. La unidad fundamental en el sistema internacional es el Kg/s.

GASES DE INVERNADERO: son gases que se encuentran presentes en la atmosfera terrestre y dan lugar al fenómeno denominado efecto invernadero. Estos gases contribuyen a retener parte de la energía que la superficie del planeta emite por calentamiento del sol, ocasionando el calentamiento global. Los gases más importantes son: Dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4), óxido nitroso (NO_2), clorofluorocarbonos (CFC) y ozono O_3 .

HIDROCARBUROS NO QUEMADOS: compuestos químicos que aparecen en la combustión incompleta de un proceso de combustión, cuando la cantidad oxígeno es deficiente en dicho proceso. Estos pueden ser carbón (C), hidrogeno (H) y monóxido de carbono (CO).

HOLLIN: partículas sólidas pequeñas suspendidas en el ambiente; en su mayoría compuestas de carbono impuro, pulverizado resultantes de la combustión incompleta de un material, como por ejemplo de la combustión del metano.

MATERIAL PARTICULADO: cualquier sustancia presente en la atmosfera en estado sólido o líquido, generada a partir de alguna actividad natural o causada por el hombre.

MUESTREO: herramienta de investigación científica, cuya función es determinar qué parte de una población debe ser examinada, con la finalidad de hacer análisis que reproduzcan de la mejor manera los rasgos esenciales de dicha población.

NUMERO DE SMOKE: termino adimensional que cuantifica las emisiones de humo en los motores a reacción, guiándose por la mancha resultante en un filtro por la masa de referencia de la muestra de gases de escape, y graduados en una escala de 0 a 100 (Anexo 16, ICAO).

OPERACIONES AERONAUTICAS: son las salidas y llegadas de los aviones en los aeropuertos. Estas operaciones son registradas para determinar su número diario.

PODER CALORIFICO: cantidad de energía que la unidad de masa puede desprender, al producir una oxidación química de oxidación.

PROTOCOLO: es un conjunto de procedimientos que describen un experimento científico, un plan escrito o estandarizan, un comportamiento humano frente a una situación específica.

RALENTI: régimen mínimo de revoluciones por minuto a las que se ajusta un motor de combustión interna para que funcione de forma estable sin necesidad de accionar el mecanismo de inyección de combustible.

RAYOS ULTRAVIOLETA: líneas de energía que se producen en un cierto punto y se propagan en una determinada dirección cuya longitud de onda está comprendida aproximadamente entre los 400nm y los 15 nm; su radiación es parte integrante de los rayos solares y produce varios efectos en la salud.

REFLEXOMETRO: instrumento utilizado para medir el coeficiente de reflexión y la relación de onda estacionaria en líneas de transmisión. En principio mide la onda de voltaje incidente y la onda reflejada, también el tiempo que tarda un pulso en ir y volver al punto de entrada.

RELACION DE PRESION: relación entre la presión total media en el último plano de descarga del compresor y la presión total media en el plano de entrada del compresor, cuando el motor a reacción desarrolla el empuje nominal de despegue en condiciones estáticas, al nivel del mar.

RUIDO: ambientalmente se define como el sonido no deseado que interfiere en la comunicación entre personas o en sus actividades.

SMOGE: tipo de contaminación del aire derivada de las emisiones vehiculares de los motores de combustión interna y de los gases industriales que reaccionan con la atmosfera; es una mezcla de humo y niebla la cual se origina a partir de la combinación del aire con contaminantes durante un largo periodo de altas presiones.

SMOKE: suspensión en el aire de pequeñas partículas sólidas que resultan de la combustión incompleta de un combustible. Aparece en la combustión de fogatas, brasas y motores de combustión interna.

TURBOFAN: motor a reacción caracterizado por disponer de un gran fan o ventilador en la parte frontal, con el fin de dividir el aire en dos flujos para consumir menos combustible; esto lo hace más económico, más ambiental, menos sonoro y más eficiente.

TURBOHELICE: motor a reacción caracterizado por disponer de una caja reductora y una hélice en la parte frontal; el grupo de turbinas del motor acciona los engranajes de la caja reductora y esta a su vez la hélice, proporcionado el empuje del motor.

TURBOJET: motor a reacción el cual descarga un chorro de fluido a gran velocidad para generar una fuerza de empuje según las leyes de Newton. Esta máquina termodinámica transforma la energía química del combustible oxidante en energía cinética debida a la presión.

TORBELLINADORES: dispositivos que poseen las cámaras de combustión de los motores a reacción, con el fin de deflectar turbulentamente el combustible pulverizado que sale de los inyectores, esto permite obtener una llama estable en la cámara.

TROPOPAUSA: zona de transición entre la troposfera y la estratosfera; define el límite superior de la troposfera, sobre la cual la temperatura se mantiene constante antes de comenzar nuevamente a aumentar sobre los 20 Km sobre el nivel del mar.

TROPOSFERA: capa de la atmosfera terrestre que está en contacto con la superficie de la tierra, en ella ocurre todos los fenómenos meteorológicos que influyen en los seres vivos.

VAPOR DE AGUA: gas que se obtiene por evaporización o ebullición del agua líquida o por sublimación del hielo. Es el gas que más contribuye al efecto invernadero debido a la absorción de los rayos infrarrojos.

Símbolos y Abreviaturas

RAC	: Reglamentos Aeronáuticos de Colombia
CO₂	: Dióxido de carbono.
IPCC	: Intergovernmental Panel on Climate Change (Panel Intergubernamental Sobre el Cambio Climático)
IDEAM	: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales
N₂O	: Óxido de nitrógeno
CH₄	: Metano
ICAO	: International Civil Aviation Organization (Organización de Aviación Civil Internacional)
FAA	: Federal Aviation Administration (Administración de Aviación Federal)
FAR	: Federal Aviation Regulations (Regulaciones Federales de Aviación)
CFC	: Clorofluorocarbonos
CO	: Monóxido de carbono
N_yO_x	: Óxidos de nitrógeno
SO₂	: Dióxido de azufre
O₃	: Ozono
°C	: Grados Celsius

%	: Porcentaje
BTU	: British Thermal Unit (Unidades Térmicas Británicas)
MCI	: Motores de Combustión Interna
PPM	: Partes Por Millón
SINA	: Sistema Nacional Ambiental
NTC	: Norma Técnica Colombiana
ICONTEC	: Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación
LTO	: Takeoff – Landing (Ciclo Despegue – Aterrizaje)
EPA	: Environmental Protection Agency (Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos)
UAEAC	: Unidad Administrativa Especial de Aeronáutica Civil de Colombia
EASA	: European Aviation Safety Agency (Agencia Europea de Seguridad Aérea)
H₂S	: Sulfuro de hidrogeno
RPM	: Revoluciones Por Minuto
O₂	: Oxígeno
OSHA	: Occupational Safety and Health Administration (Administración de Seguridad y Salud Ocupacional)
LEL	: Límite Inferior de Explosividad
UEL	: Límite Superior de Explosividad
HC	: Hidrocarburos sin quemar
ISA	: International Standard Atmosphere (Atmosfera Estándar)

	Internacional)
EI	: Emission Index (Índice de emisión)
SFC	: Specific Fuel Consumption (Consumo Especifico de Combustible)
D_p	: Masa de gas contaminante en gramos
W_f	: Flujo másico de combustible en Kg/s
F₀₀	: Empuje Nominal
SN	: Smoke Index (Índice de humo)
DAMA	: Departamento Administrativo del Medio Ambiente
CAEE	: Comité sobre Emisiones de los Motores de las Aeronaves
NASA	: National Aeronautics and Space Administration (Administración Nacional de la Aeronáutica y del Espacio)
NCAR	: National Center for Atmospheric Research (Centro Nacional de Investigación Atmosférica)
ATR	: Avions de Transport Regional (Aviones de Transporte Regional)
OPAIN	: Operadora Aeroportuaria Internacional
EPSRC	: Engineering and Physical Sciences Research Council

Introducción

La calidad del aire se ha convertido en un tema de gran importancia en el mundo; la contaminación ambiental ha ocasionado alteraciones y efectos nocivos en la salud de los seres vivos y también en las propiedades físicas de algunos elementos materiales. Hoy en día los principales mecanismos de contaminación ambiental están dados por procesos industriales, automóviles, aviones, sistemas de calefacción entre otros (Briggs,D., 2003); estos generan combustión y producen dióxido y monóxido de carbono, óxidos de nitrógeno y azufre, los cuales son contaminantes con efectos altamente negativos como lo es el incrementar el efecto invernadero, destruir la capa de ozono y por supuesto afectar la salud de las personas.

Colombia es un país en vía de desarrollo aeronáutico, en la actualidad las aerolíneas colombianas han disminuido el precio de los tickets y aumentado las frecuencias de sus vuelos lo que con lleva a la adquisición de aeronaves para suplir esta alta demanda; detrás de este tema aparece entonces la problemática ambiental en donde debido a la utilización a gran escala de las aeronaves y por ende de sus motores, ocurre contaminación por la producción del CO₂ y la generación de ruido, produciendo cambios climáticos creados por el efecto invernadero y molestias auditivas respectivamente.

En el reglamento aeronáutico colombiano (RAC) parte Decimo primera, dedicada a las normas ambientales, no se contempla la contaminación ambiental por emisión de gases de los motores a reacción; en este apartado se habla solamente de las normas para el ruido de las aeronaves, siendo esta última no muy clara en cuanto a la aplicación de la legislación.

En el contexto internacional los expertos de este tema (IPCC, 2007), afirman que el 2% de CO₂ lo produce el sector aeronáutico y que la proyección para el 2050 será del 3% (IPCC, 2007)

Por tal motivo la Organización Internacional de Aviación Civil (ICAO) se ha comprometido para limitar o reducir la cantidad de personas afectadas por el ruido de las aeronaves, limitar o reducir el impacto de las emisiones de las aeronaves en la calidad del aire local y limitar o reducir el impacto de las emisiones de gases con efecto invernadero en el clima mundial. (Organización Internacional de Aviación Civil, ICAO, 2007; IPCC, 2007)

Por lo anterior, es importante realizar una investigación que se centre en el análisis del estado actual de las normas, su aplicación al cuidado del medio ambiente y los controles respectivos a las aerolíneas que poseen aeronaves con este tipo de motores, especialmente en la ciudad de Bogotá (aeropuerto El Dorado) en donde se presenta un mayor tráfico aéreo. Esta investigación se basa en realizar una estimación del impacto ambiental, que determine las cantidades de gases contaminantes generadas en la pista del aeropuerto El Dorado, durante la fase de carreteo – salida de los aviones en los primeros 5 minutos de operación, este análisis permitiría mostrar los grados de contaminación y que tipos de motores los causan o si por el contrario, estos niveles son permisibles comparados con los datos internacionales bajo las mismas circunstancias. Por otra parte, según los resultados obtenidos en el estudio se puede sugerir a la Aeronáutica Civil Colombiana procedimientos, planes de inspección, medición y procesos de operación de los motores aeronáuticos que sean avalados por entes regulatorios internacionales, con el fin de disminuir los contenidos porcentuales de contaminación producidos diariamente en el aeropuerto.

1. Justificación

El proyecto de investigación posee los siguientes componentes que contribuyen a mejorar y a organizar los procedimientos en las áreas del Desarrollo Sostenible, dedicadas a la conservación y desarrollo apropiado de los ecosistemas, así como del cuidado del medio ambiente desde un punto de vista económico y social:

- Generar conocimientos sobre los impactos de las emisiones de gases de los motores de las aeronaves, con fines de protección del medio ambiente.
- Mediante el estudio que se realice, determinar el comportamiento e impacto ambiental de los motores de los aviones cuando emiten grandes cantidades de gases producidos por la combustión.
- Analizar el estado actual del control realizado a las aeronaves en cuanto a las emisiones de gases.
- Proponer nuevos procedimientos para el control de las emisiones de gases.
- A partir de los resultados obtenidos de los análisis, se propondrá un plan de mejoramiento para la disminución del efecto invernadero que producen estos gases y así mejorar la calidad del aire local.

Los precios bajos en tiquetes aéreos y la compra masiva de aeronaves por las aerolíneas han generado un incremento en los vuelos de dichas aeronaves, ocasionando un aumento también de las emisiones de gases de efecto invernadero y alta concentración de ruido en los aeropuertos. En el aeropuerto El Dorado existe aproximadamente 800 operaciones diarias que se traducen en

salidas y llegadas de las aeronaves; en el mes de Febrero del 2014 se realizaron 11.607 salidas reales y 11.538 llegadas reales de las aeronaves (Aerocivil, 2014). Los datos estadísticos de la Aeronáutica Civil de Colombia, muestran que en el año 2004 en el aeropuerto, hubo 21.507 aterrizajes internacionales y 75.102 aterrizajes nacionales y que en el año 2009 existieron 28.868 aterrizajes internacionales y 102.756 aterrizajes nacionales. Esto indica que el crecimiento de operaciones aéreas para este intervalo de tiempo que son 5 años fue del 25.49% para los aterrizajes internacionales y del 26.91% para los aterrizajes nacionales. (Aerocivil, 2009).

En el aeropuerto El Dorado operan diariamente 222 aviones, de 19 aerolíneas comerciales, las cuales no llevan registro o pruebas de mantenimiento que incluyan análisis de gases contaminantes o procesos para el control de los mismos.

Las proyecciones indican que las emisiones de dióxido de carbono de las aeronaves aumentarán considerablemente y que en el 2050 serán de 0.23 a 1.45 Giga toneladas de carbono por año (Gt C/año). (Grupo Intergubernamental de Expertos Sobre el cambio Climático, IPCC., 1999)

Teniendo en cuenta los datos del inventario de gases de efecto invernadero que se producen en Bogotá, en la ciudad se emiten al año 10.873.331 toneladas de dióxido de carbono (CO₂); este gas es el principal actor del calentamiento global en el mundo (IDEAM, 2012). Para el estudio del inventario se realizó una división de la ciudad de Bogotá en cuatro módulos, los cuales son:

- Energía: Estos son establecimientos y maquinas que usan combustibles.
- Procesos sin combustión: Estos son establecimientos que realizan procesos industriales sin usar combustibles.
- Agricultura.

- Residuos: Rellenos sanitarios.

El módulo que corresponde a energía es que genera la mayor cantidad en toneladas de CO₂, unas 7.879.293 toneladas, es decir un 72.46% del total de las emisiones. En este grupo el mayor productor es el transporte terrestre el cual emite más de 4.000.000 de toneladas, es decir un 60.15%, le siguen el comercio con un 15.9%, las industrias manufactureras y de construcción con un 14.2%, las zonas residenciales con un 6.7% y para el caso del estudio, el transporte aéreo genera dentro de este grupo un 2.8%, es decir 304.471 toneladas de CO₂ al año (IDEAM, 2012).

Es importante realizar este estudio de impacto ya que las ciudades colombianas, especialmente Bogotá, se están viendo afectadas por la contaminación ambiental que generan los motores de los automóviles y ahora de las aeronaves, así como de la contaminación por ruido de estos últimos. Esta problemática se centra en la mala calidad de aire y afecciones respiratorias que puedan tener las personas que residen en los sectores aledaños a los aeropuertos; sin mencionar aun el efecto invernadero producido que ayuda en un porcentaje al calentamiento global.

El propósito de este proyecto es el de realizar un estudio que muestre la problemática actual de la contaminación ambiental generada por los motores de los aviones especialmente en el aeropuerto el Dorado. De esta manera se pretende concientizar a los entes encargados de las regulaciones aeronáuticas de Bogotá, sugiriendo la creación de leyes y procedimientos que controlen estas emisiones.

2. Diseño Teórico

2.1 Título de la Investigación

“ESTUDIO DE IMPACTO PARA EL CONTROL Y DISMINUCION DE LAS EMISIONES DE GASES EN LOS MOTORES DE LOS AVIONES, QUE CONTRIBUYEN AL EFECTO INVERNADERO EN EL CLIMA DE BOGOTA.”

2.2 Formulación del Problema y planteamiento de la pregunta de investigación

Uno de los principales problemas encontrados es la falta de políticas o normas claras para el control de emisiones de gases en los motores a reacción de las aeronaves, pues para ello no existe una normatividad en el RAC (Reglamento Aeronáutico Colombiano) que se dedique a dicho control. Faltan métodos tecnológicos para la estimación de emisión de gases en los motores a reacción, dichos métodos son aplicados en aeropuertos de Estados Unidos y Europa. En la actualidad no existen bases de datos relevantes y precisas para el uso del combustible utilizado en los motores a reacción, estas servirían para determinar las emisiones de óxido nitroso (N_2O) y metano (CH_4) y de esta forma realizar un control sobre dichas emisiones.

Actualmente el único control de contaminación realizado en el aeropuerto de Bogotá, es la medición de contaminación de todas las fuentes que generan gases dañinos para la atmosfera en esta área de acción; enviándose posteriormente un reporte al IDEAM que corrobore un nivel

de contaminación aceptable. Existen procedimientos para controlar la contaminación ambiental generada por los motores avalada y supervisada por la ICAO (International Civil Aviation Organization - Organización de Aviación Civil Internacional), pero muchos de los procedimientos propuestos fueron omitidos ya que los controles de emisión de gases van dirigidos hacia los fabricantes de los motores, con recomendaciones de procesos de mantenimiento a los explotadores (aerolíneas). Estos procedimientos propuestos por la ICAO para el control, no son de tipo obligatorio para las aerolíneas, lo que hace que sean sugerencias a nivel de información del cómo controlar las emisiones de gases de sus motores.

De esta problemática surge la pregunta:

¿QUE IMPACTOS AMBIENTALES GENERAN LAS EMISIONES DE GASES DE LOS MOTORES DE LOS AVIONES, EN LA COMUNIDAD ALEDAÑA AL AEROPUERTO EL DORADO DE LA CIUDAD DE BOGOTA?

2.3 Descripción del Área Problemática

Descripción de la Población Afectada por la problemática. El aeropuerto el Dorado se encuentra en concesión para su administración, explotación comercial, mantenimiento y ampliación del mismo, de igual manera se espera que la capacidad de pasajeros y carga se incremente notablemente. Este nuevo proyecto hace que la contaminación tanto de emisión de gases y ruido, afecte a las personas que viven, transiten y trabajen en el área de acción del funcionamiento de las aeronaves que salen y llegan al aeropuerto.

La población que se encuentra directamente afectada por esta problemática son las localidades de Engativá y Fontibón; vecinos del aeropuerto. El municipio de Funza también se

encuentra afectado especialmente sus zonas agrícolas, debido a los nuevos procesos de planeación del aeropuerto. De la misma manera aunque a menor escala por estar geográficamente distantes del aeropuerto los Municipios de Mosquera y Cota, se encuentran afectados.

2.4 Antecedentes Investigativos

El desarrollo mundial, la implementación de la tecnología, los nuevos diseños y el uso masivo del transporte, desde el punto de vista aeronáutico han generado la creación de nuevas leyes que rigen la operación y el control de emisiones de gases y ruido de los motores a reacción de las aeronaves civiles.

Las empresas colombianas dedicadas a la aviación comercial, en los últimos 5 años han adquirido flotas de aeronaves las cuales utilizan este tipo de motores, tal es el caso de Avianca, empresa insignia de nuestro país y dedicada al transporte masivo de pasajeros, la cual adquirió 23 aeronaves nuevas de la casa fabricante Airbus en el 2011 y en Enero del 2012 firmó un acuerdo con esta misma empresa por 51 aviones (Diario El Colombiano, 2012)

En este mismo orden de ideas, Avianca recibirá una flota de 15 aviones con motores Turbohélice este año de la empresa fabricante ATR (Diario El Poratfolio, 2013)

La problemática se centra entonces en la utilización a gran escala de estas aeronaves en donde las frecuencias de vuelo se han elevado y la generación de ruido y CO₂ también, en Colombia lamentablemente no existen políticas y leyes claras que permitan el control adecuado de las emisiones de gases; la Aeronáutica Civil de Colombia el 19 de agosto de 2004, realizo una actualización en el RAC (Reglamento Aeronáutico Colombiano) en la parte decimoprimer, la

cual se dedica a las normas ambientales para la aviación. En estas normas solamente se encuentran las reglamentaciones para el ruido en las aeronaves, pero no existen las reglamentaciones dedicadas al control de emisión de gases.

Es claro que la aviación debido a su velocidad y confiabilidad en el transporte, es el medio principal para el desplazamiento entre las ciudades. El crecimiento de la economía mundial hace también que exista un crecimiento en la demanda del tráfico aéreo; la aviación propicia entonces el crecimiento económico especialmente en países en desarrollo como lo es Colombia. Esta demanda del tráfico aéreo por los factores anteriormente mencionados hace que se emitan leyes y normas para alcanzar las reducciones y estabilización de las emisiones de CO₂ para que no pongan en peligro el ambiente del planeta. La Organización Internacional de Aviación Civil (ICAO), trabaja para hallar soluciones globales al problema de emisión de gases y control de ruido, su principal función en este campo es la que se designó en la asamblea A36-22 donde la organización se comprometió a lograr la mayor compatibilidad posible entre el desarrollo seguro y ordenado de la aviación civil y la calidad del medio ambiente; en dicha asamblea se enunciaron los siguientes objetivos.

- Limitar o reducir la cantidad de personas afectadas por el ruido de las aeronaves
- Limitar o reducir el impacto de las emisiones de las aeronaves en la calidad del aire local
- Limitar o reducir el impacto de las aeronaves en las emisiones de gases con efecto invernadero en el clima mundial

Estos objetivos deben ser logrados también en Colombia, es importante que la Aeronáutica Civil implemente una normatividad acorde, teniendo en cuenta la cantidad de aeronaves que funcionaran muy pronto en el país.

En la figura 1, se muestra como en el 2004 las emisiones de CO₂ y el efecto invernadero, afectaron el medio ambiente denotando los siguientes porcentajes en la aviación (ICAO, 2007).

- Efecto invernadero global: Para los medios de transporte el 13%
- Emisiones de CO₂ para las aeronaves: 2% de la emisiones globales
- Emisiones de CO₂ para los medios de transporte: 13% generado por las aeronaves

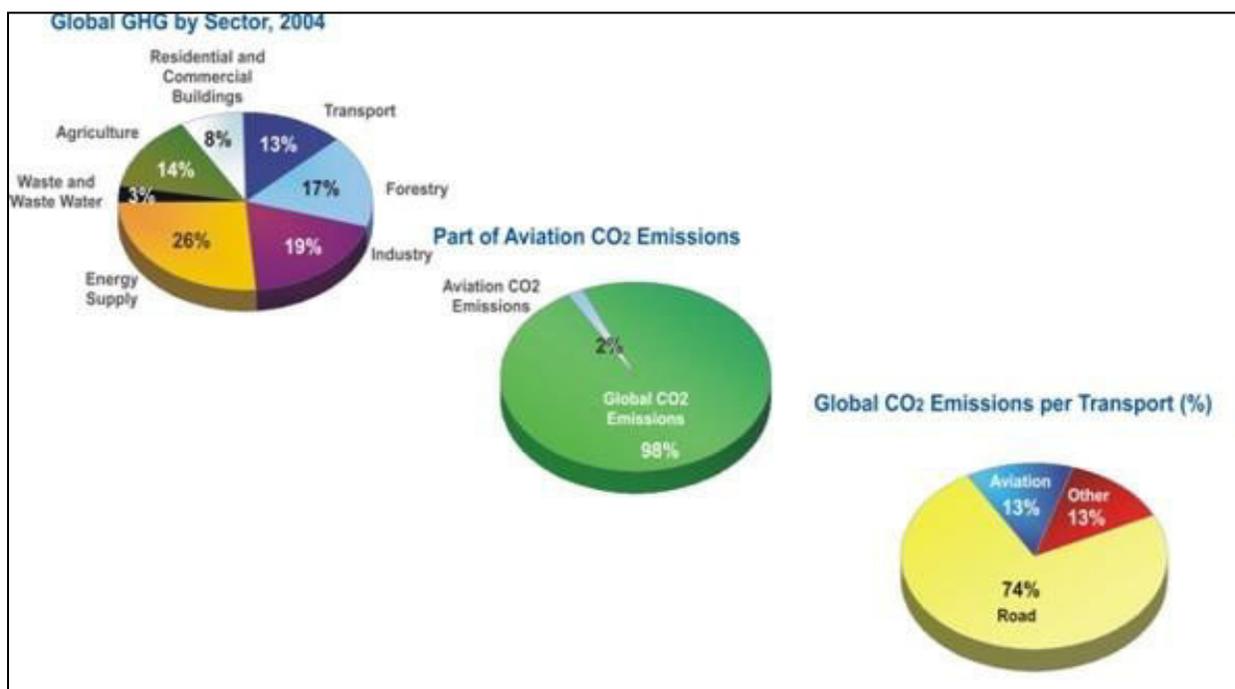


Figura 1. **Emisiones de CO₂ en el 2004.** Datos obtenidos de (Organización Internacional de Aviación Civil, ICAO, 2007)

En cuanto a la problemática del ruido de los motores a reacción en Colombia, la aeronáutica civil ha desarrollado una normatividad dedicada a este ítem como se mencionó anteriormente, pero al parecer la aplicación ha sido deficiente. Para este tema la Organización Internacional de Aviación Civil (ICAO), desarrollo un documento guía el cual fue publicado en el 2004 y revisado en el 2007 (Guidance on the balanced approach to Aircraft Noise Management), con este documento se busca solucionar los problemas relacionados al ruido de

aeronaves en aeropuertos específicos, en un medio ambiente dado y de una manera económicamente viable.

2.4.1 Procesos de Investigación que se han Generado. Los estudios enfocados a los efectos del aumento de contaminación por parte de los aviones sobre el clima se han venido desarrollando en la última década; las emisiones de los gases de los motores han crecido un 85% entre 1994 y 2004. El IPCC estimó que el sector aeronáutico podría causar el 15% de las emisiones mundiales de gases de invernadero a mitades de este siglo (IPCC, 1999). Existen otros estudios como el de la unión europea el cual afirma que este impacto ambiental en el 2030 (Airportwatch, 2013), será el causante de la cuarta parte de la contaminación atmosférica.

Debido a esta problemática se ha impulsado el desarrollo de nuevas tecnologías, que reduzcan los efectos negativos de los motores de los aviones para el medio ambiente. La asociación Británica de aviación sostenible, está desarrollando un motor que reduce las emisiones de CO₂ en un 50% , óxidos de Nitrógeno en un 80% y en un 50% el efecto del ruido (Consumer, 2005).

El departamento de Física e Ingeniería Civil y medioambiental del Imperial College de Londres, adelantan estudios de simulación de tráfico aéreo para poder predecir la formación de nubes por vapor de agua y así reducirlas (EPSRC, 2011). El Instituto Tecnológico de Georgia desarrollo una cámara de combustión que emite niveles muy bajos de óxido de nitrógeno y monóxido de carbono (ScienceDaily, 2006); esta cámara de combustión está diseñada para motores de turbina a gas, especialmente para los aviones.

A continuación se citan algunos trabajos de investigación en el mundo sobre el tema de la contaminación ambiental y el efecto sonoro que emiten los motores de los aviones.

- Climate for a transport change. TERM 2008: indicators tracking transport and environment in the European Union: Este es un documento de la EEU (Agencia Europea del Medio Ambiente), que muestra un análisis en forma de reporte donde aparecen datos del incremento de transporte de pasajeros, incluyendo el transporte terrestre y aéreo en la unión europea, también muestra un análisis de las emisiones de gases de invernadero en cuanto a su incremento por el uso masivo del transporte; en Colombia este tipo de investigaciones solo se limita al inventario de emisiones de gases efecto invernadero que emite el IDEAM, pero solo se toma como referente para análisis sin que se asuman medidas al respecto, mientras que la EEU lleva un reporte específico centrado en el transporte por aire donde se incluyen tablas de datos de la demanda de transporte de pasajeros, emisiones de gases de invernadero e inversión de infraestructura de aeropuertos; permitiendo realizar auditorías sobre estos procesos.

La Agencia Europea del medio ambiente posee una página donde publica todos los reportes y estudios relacionados con la producción de contaminación ambiental; allí muestra con estadísticas lo que sucede en esta área refiriéndose a la unión europea. (European Environment Agency, 2013)

- Bradley (2007). En su artículo, describe las características y el funcionamiento de una pila de combustible para alimentar aeronaves. Se basa en la utilización de hidrogeno comprimido en un prototipo de avión, la utilización de hidrogeno comprimido hace que la aeronave reduzca en un porcentaje considerable la contaminación vs las aeronaves convencionales. Este tipo de investigaciones son importantes para el desarrollo de energías alternativas que contribuyan a la protección del ambiente y a la disminución de la contaminación provocada por los motores aeronáuticos; en nuestro país la falta de presupuesto en las universidades hace que las investigaciones de este tipo queden relegadas solamente a su formulación.

Las actuaciones de la aeronave y el motor se analizan a partir de datos procedentes de los vuelos y pruebas de laboratorio. La eficacia y el consumo de energía, componentes del sistema de combustible de propulsión de célula se miden a una variedad de condiciones de vuelo. Este trabajo representa uno de los primeros estudios de aeronaves de células de combustible alimentado a resultar en una aeronave de demostración. Como tal, los resultados de este estudio son de interés práctico para realizar diseños de nuevos motores de tipo ecológico en aeronáutica.

- Greenhouse gas emissions from aviation. Este es un artículo del centro temático europeo sobre aire y cambio climático; en este artículo se recopilan datos fiables sobre los efectos de la aviación en el cambio climático a manera de información para discutir la mitigación de gases de efecto invernadero de este sector; se ofrece una visión general de los efectos de las emisiones del tráfico aéreo sobre el clima, con un enfoque especial en gases distintos del CO₂ y contiene datos más recientes sobre emisiones históricas y proyecciones de las organizaciones de gobierno, ciencia y los negocios (Graichen, J & Gugele, B., 2006). Es importante resaltar que la aerocivil y el ministerio de medio ambiente diseñen bancos de datos referentes a las emisiones de gases de efecto invernadero, con el fin de poder estudiar los fenómenos de contaminación y poder dar solución a problemas como lo hace el centro temático europeo.

Al igual que la agencia europea, el centro temático europeo sobre el aire y cambio climático, tiene una página donde publica los reportes y estudios relacionados con estos temas.

<http://acm.eionet.europa.eu/>

- Air pollution by ozone across Europe during summer 2011 –EEU
- Movilidad y Sostenibilidad en el Transporte Aéreo: Las Compañías de Bajo Coste en los destinos turísticos de España y Baleares (Revista Transporte y Territorio, 2011)

- Comisión Europea. Las emisiones de los aviones se limitarán para combatir el cambio climático(Comisión Europea, 2006)
- EasyJet. EasyJet ecoJet para reducir las emisiones de CO2 en un 50% en 2015. (Easy jet, 2009)
- El transporte aéreo duplicará sus emisiones de dióxido de carbono en 2030, pese a los aviones más eficientes.(Actualidad 24 horas, 2014)
- Implicaciones de las propuestas de limitación de emisiones de CO2- IPCC
- OACI, - Protección del Medio Ambiente - Anexo 16 al Convenio sobre Aviación Civil Internacional - Volumen I: Ruido de las Aeronaves”. Organización de Aviación Civil Internacional. Montreal, Canadá, 1993. (Organización Internacional de Aviación Civil, ICAO, 2007)
- OACI, Método recomendado para calcular las Curvas de Nivel de Ruido en la Vecindad de los Aeropuertos. Circular 205-AN/1/25. Organización de Aviación Civil Internacional. Montreal, Canadá, 1988.(Organización Internacional de Aviación Civil, ICAO, 2007)
- ISO 9613-1:1993 Acoustics - Attenuation of sound during propagation outdoors – Part 1: Calculation of the absorption of sound by the atmosphere.
- ISO 9613-2:1996 Acoustics - Attenuation of sound during propagation outdoors - Part 2: General method of calculation.
- Ferguson, Brian, “A ground-based narrow-band passive acoustic technique for estimating the altitude and speed of a propeller-driven aircraft”. Journal of the Acoustical Society of America, 92 (3), September 1992.

- Ferguson, Brian; Quinn, Barry, “Application of the short-time Fourier transform and the Wigner-Ville distribution to the acoustic localization of aircraft”. *Journal of the Acoustical Society of America*, 96 (2), Part 1, August 1994.

En Colombia se han realizado estudios muy someros en cuanto a la contaminación ambiental que provocan los motores a reacción; la aeronáutica civil de Colombia en su reglamento aeronáutico colombiano (RAC); solo emite normas ambientales para el ruido de las aeronaves (RAC-11). A continuación se enuncian algunos documentos y estudios relacionados en esta área.

- RAC – Parte 11 Normas ambientales para la aviación civil – Ruido de las Aeronaves.(Aerocivil, 2014).

- Proyecto de acuerdo por medio del cual se adopta y se adecúa la ley 1083 de 2006 y se implementa la resolución 180158 de febrero de 2007 de los ministerios de minas y energía, de la protección social y de ambiente, vivienda y desarrollo territorial, para el distrito capital - Lineamientos para la formulación de la política de prevención y control de la contaminación del aire.

- Política de prevención y control de la contaminación del aire – Ministerio de Ambiente 2010.

- Caracterización urbanística, social y ambiental del entorno del aeropuerto internacional El dorado - Vicepresidencia de Gestión Cívica y Social Dirección de Proyectos y Gestión Urbana (Cámara de comercio de Bogotá) Bogotá, D.C., junio de 2008.

2.5 Objetivos

2.5.1 Objetivo General. Realizar un estudio de impacto ambiental que analice las emisiones de gases en los motores de los aviones, los cuales contribuyen al efecto invernadero en el clima de Bogotá.

2.5.2 Objetivos Específicos

- Estimar el comportamiento e impacto ambiental ocasionado por los motores a reacción de las aeronaves, en función de las emisiones de gases.
- Analizar el estado actual del control de emisiones de gases de los motores a reacción que se lleva a cabo en el aeropuerto el Dorado.
- Identificar los procedimientos para el control de las emisiones de gases en las aeronaves de las aerolíneas.
- Determinar las concentraciones de gases contaminantes ocasionadas, de acuerdo a la frecuencia de las operaciones aéreas en el aeropuerto.

2.6 Hipótesis y Supuestos

La realización de esta investigación mostraría el estado actual de los grados de contaminación emitidos por los motores a reacción de los aviones en el aeropuerto el Dorado.

Esta información será obtenida mediante procedimientos y metodologías para la medición cuantitativa de los gases por medio de instrumentos electrónicos (analizadores porcentuales de gases contaminantes); lo cual permitirá sugerir a los entes regulatorios de las normas aeronáuticas del país y las autoridades ambientales, procedimientos para el control de esta contaminación ocasionada por los motores de los aviones de las aerolíneas. Se lograría establecer las concentraciones de gases de invernadero según las frecuencias de las operaciones aéreas del aeropuerto

De esta manera se fomentaría el cuidado del medio ambiente, reduciendo el efecto invernadero y mejorando la calidad del aire local para la comunidad aledaña al aeropuerto El Dorado de la ciudad de Bogotá.

2.7 Técnicas e Instrumentos

Los sujetos o muestras a quienes se aplica la técnica son motores de los aviones de la compañía Avianca S.A y Satena S.A (ver figura 2). Estos motores específicamente son:

- Motores a reacción Turbofan de alto By-pass CFM-56
- Motores a reacción Turbofan de alto By-pass RR-Tren 700
- Motores Turbohélice Pratt & WhitneyPW 127M

También se utilizará un Motor a Reacción de instrucción turbohélice PT6-A (ver figura 2), el cual tiene las mismas propiedades físicas y operativas de un motor convencional. Este motor es propiedad de la Universidad Los Libertadores y será prestado a los Maestranteros solamente para fines investigativos.



Figura 2. **Motores objeto del estudio.** Elaborado por los Autores

Debido a que en Colombia no existe una reglamentación clara por parte de la Aeronáutica Civil de Colombia y por parte de la Secretaria Distrital del Medio Ambiente, en cuanto a la calidad del aire y la evaluación de gases de escape de los motores de los aviones; se utilizarán las normas que se aplican en los Estados Unidos, las cuales se remiten al anexo 16, Volumen II, protección ambiental, emisiones de los motores de avión, publicado por la ICAO (Organización Internacional de Aviación Civil). Estas normas son las FAR/AMT (Federal Aviation Regulations For Aviation Maintenance Technicians), las cuales en la parte 34 de su contenido se dedican a los requerimientos de purga de combustible y a las emisiones de escape para aeronaves propulsadas por motores de turbina.

En las normas FAR parte 34, se encuentran las regulaciones que se aplican para las emisiones de escape de los motores a reacción, los procedimientos de prueba tanto para emisiones de gases como para smoke y los procedimientos analíticos y de muestreo.

Para el proceso de medición se empleara un analizador de gases GAS ALERT MAX XT (ver figura 3), debidamente calibrado y con certificado reciente; este equipo es propiedad de la Universidad Los Libertadores y será prestado a los maestrantes solamente con fines investigativos. La técnica que se utilizara será un muestreo y como instrumento se utilizaran fichas de recolección de información (ver anexo P).



Figura 3. Equipo analizador de gases. Elaborado por los Autores

2.8 Impactos Esperados

2.8.1 Aspecto Científico. El proyecto desarrollaría las bases para implementar procedimientos de análisis de gases en motores a reacción en el país, con el fin de mejorar la calidad del aire local en las comunidades aledañas a los aeropuertos.

2.8.2 Aspecto Técnico. Se lograría establecer para las aerolíneas dentro de sus procedimientos de mantenimiento un ítem dedicado al análisis porcentual de gases, esto implicaría la adquisición de equipos especializados. Como retribución para estas compañías se tendría el mejoramiento de la eficiencia de los motores y un consumo adecuado del combustible traducido en una disminución de costos.

2.8.3 Aspecto Ambiental. Se espera que el proyecto proporcione una información importante a la Aeronáutica Civil de Colombia y a la Secretaria Distrital del Medio Ambiente, en cuanto análisis y contenidos porcentuales de gases contaminantes y de efecto invernadero, producidos por los motores a reacción de las aeronaves; con el fin de que se establezcan los reglamentos que controlarían dichas emisiones y que ayudarían a la mejora del aire local para las comunidades aledañas al aeropuerto, además del cuidado del medio ambiente.

2.8.4 Aspecto Económico. La implementación de regulaciones sugeridas a partir del desarrollo de este proyecto, reduciría el consumo específico de combustible de estos motores a reacción o se utilizarían combustibles a partir de biomasa, disminuyendo costos de operación y mantenimiento en las compañías aeronáuticas.

2.8.5 Aspecto Social. El proyecto permitiría mejorar a través de las regulaciones aeronáuticas, la calidad del aire local de las comunidades aledañas al aeropuerto El Dorado de la

ciudad de Bogotá, disminuyendo de esta manera el número de personas con afecciones respiratorias por esta problemática. El proyecto también contribuiría a los objetivos propuestos por la ICAO dados en la asamblea A36-22.

2.8.6 Aspecto Cultural. El proyecto permitiría concientizar a los entes regulatorios del país dedicados al medio ambiente y a la aviación, a las aerolíneas comerciales y a las comunidades aledañas del aeropuerto El Dorado; la importancia de disminuir el impacto de las emisiones de gases de los motores a reacción que contribuyen al calentamiento global del planeta y al desmejoramiento de la calidad del aire que todos respiramos.

3. Referente Teórico

3.1 Motores a Reacción

Los motores utilizados para los aviones suelen llamarse motopropulsores ya que es el conjunto conformado por un motor y un propulsor, este propulsor puede ser una hélice en un avión convencional.

Estos motores de aviación tienen varias clasificaciones, pero existen dos grupos principales:

- Los motores de combustión interna, alternativos o de cilindro-pistón, llamados en aviación Motores Recíprocos. (estos motores funcionan de forma muy similar a los motores de los automóviles, según el ciclo Otto de cuatro tiempos).
- Motores a Reacción o motores de Turbina, también llamados Aerorreactores. Los cuales utilizan los principios físicos del impulso, cantidad de movimiento y por su puesto la tercera ley de Newton, todos íntimamente relacionados.

Estos últimos serán los motores de estudio en el proyecto (ver figura 4), por lo cual se centrará en sus características y funcionamiento de aquí en adelante.

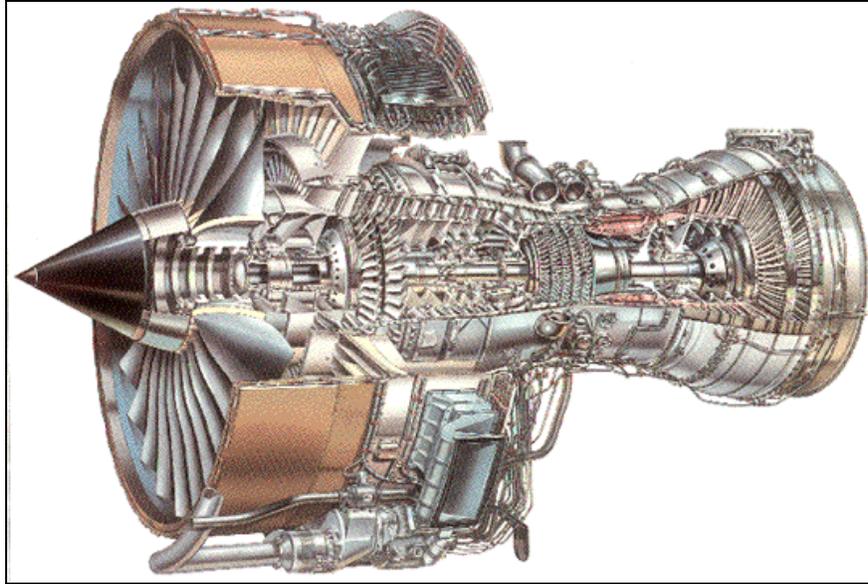


Figura 4. **Motor a reacción RollsRoyce.** Datos obtenidos de (Rolls Royce, 2013)

Los motores a reacción o también llamados aerorreactores, funcionan bajo el ciclo termodinámico de Brayton, este motor térmico transforma la energía química del combustible – oxidante, en energía cinética debida a la presión.

La propulsión por reacción se obtiene mediante la eyección a alta velocidad de una cierta cantidad de masa por unidad de tiempo (flujo másico de gases) en una determinada dirección y sentido.

Los cuerpos autopropulsados en un medio fluido como lo son los aviones, se desplazan gracias a la reacción por el movimiento hacia atrás de una gran cantidad de masa (masa de gases), definiéndose de esta manera el empuje como la reacción igual y opuesta del desplazamiento de la masa de gases.

Además del empuje provocado por los gases, existe un empuje suplementario en la tobera, dicho empuje es obtenido por la diferencia de presiones entre los gases y la presión atmosférica.

El motor a reacción pretende acelerar los gases de escape, para entregar el máximo empuje mediante la adecuación de la velocidad con una tobera, la potencia mecánica obtenida será la necesaria para mover el compresor de este motor.

Los motores a reacción tienen la siguiente clasificación (ver figura 5).

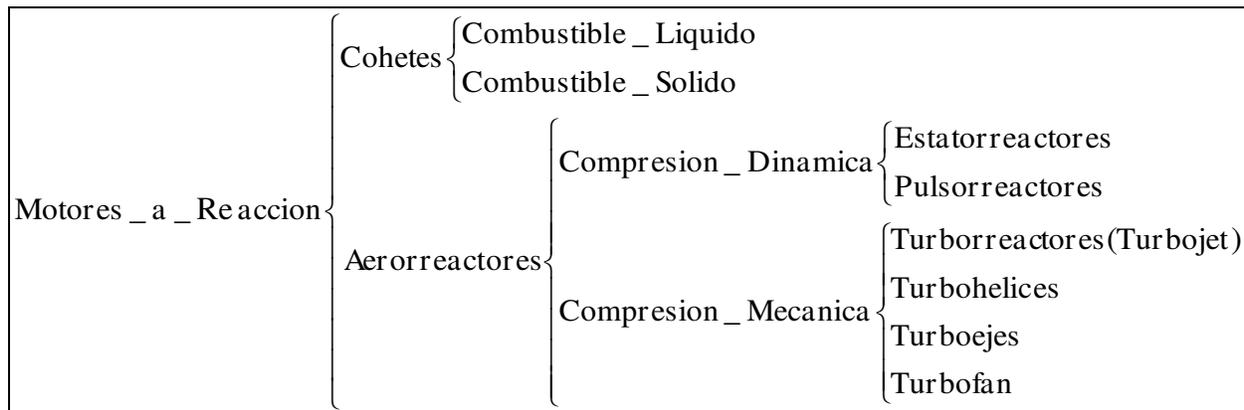


Figura 5. **Clasificación de los motores a reacción.** Datos suministrados por los Autores

Los Aerorreactores son los motores empleados en los aviones, se clasifican en:

- Aerorreactores de Compresión Dinámica: son los que comprimen el aire sin ayuda de elementos mecánicos, solamente gracias a la velocidad inicial del aire cuando entra al motor.

Entre estos motores están el Estatorreactor y el Pulsorreactor.

- Aerorreactores de compresión Mecánica: son los que utilizan una turbomaquina (compresores) para aumentar progresivamente la presión del aire cuando este entra al motor. De este grupo hacen parte los motores a reacción más conocidos y utilizados para las aeronaves (ver figura 6).

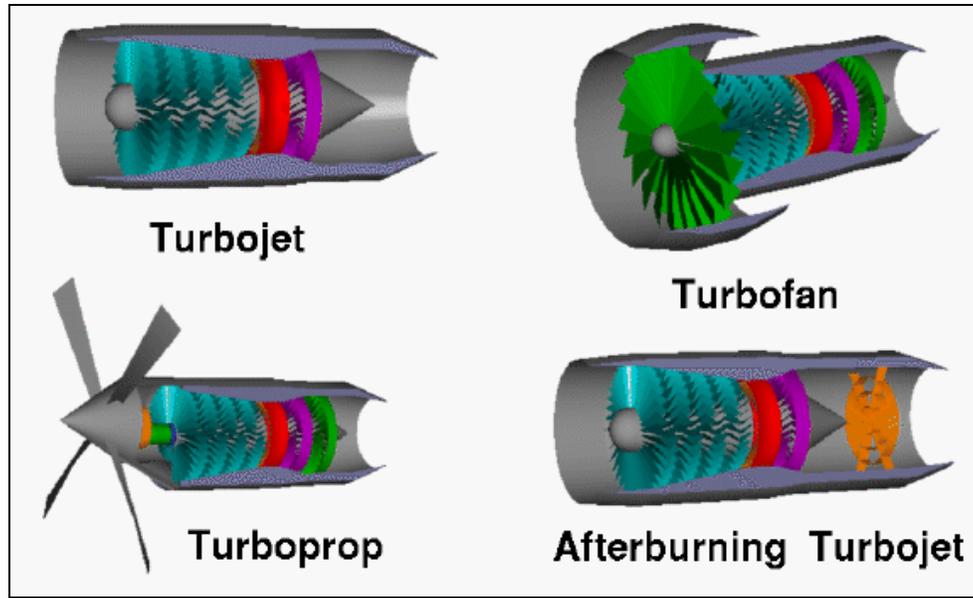


Figura 6. Motores a reacción de compresión mecánica. Datos obtenidos de (Nasa, 2014)

3.1.2 Partes del Motor a Reacción. Un motor a reacción está compuesto por los siguientes elementos (ver figura 7).

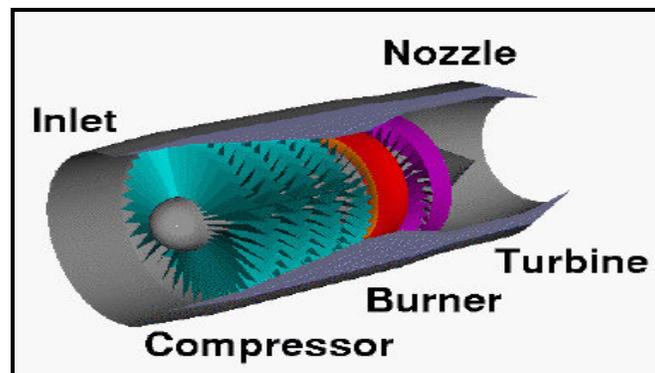


Figura 7. Partes del motor a reacción. Datos obtenidos de (Nasa, 2014)

1. Dispositivo de admisión (Inlet)
2. Compresor (Compressor)
3. Cámara de Combustión (Burner)
4. Turbina (Turbine)

5. Tobera (Nozzle)

3.1.2.1 Dispositivo de admisión. También conocido como difusor o toma de entrada (figura 8), es un conducto en el cual la corriente fluida pierde velocidad y gana presión. El dispositivo de admisión tiene como misión canalizar el flujo de aire hacia el compresor libre de distorsiones, con estabilidad y siendo capaz de transformar la mayor parte de energía cinética en energía debida a la presión.

La falta de rendimiento en el conducto de admisión ocasiona un descenso en las actuaciones de la máquina, ya que debe mantenerse un alto valor de presión dinámica, en donde el flujo de aire se encuentre libre de distorsiones o turbulencias, con velocidades compatibles a la entrada del compresor.

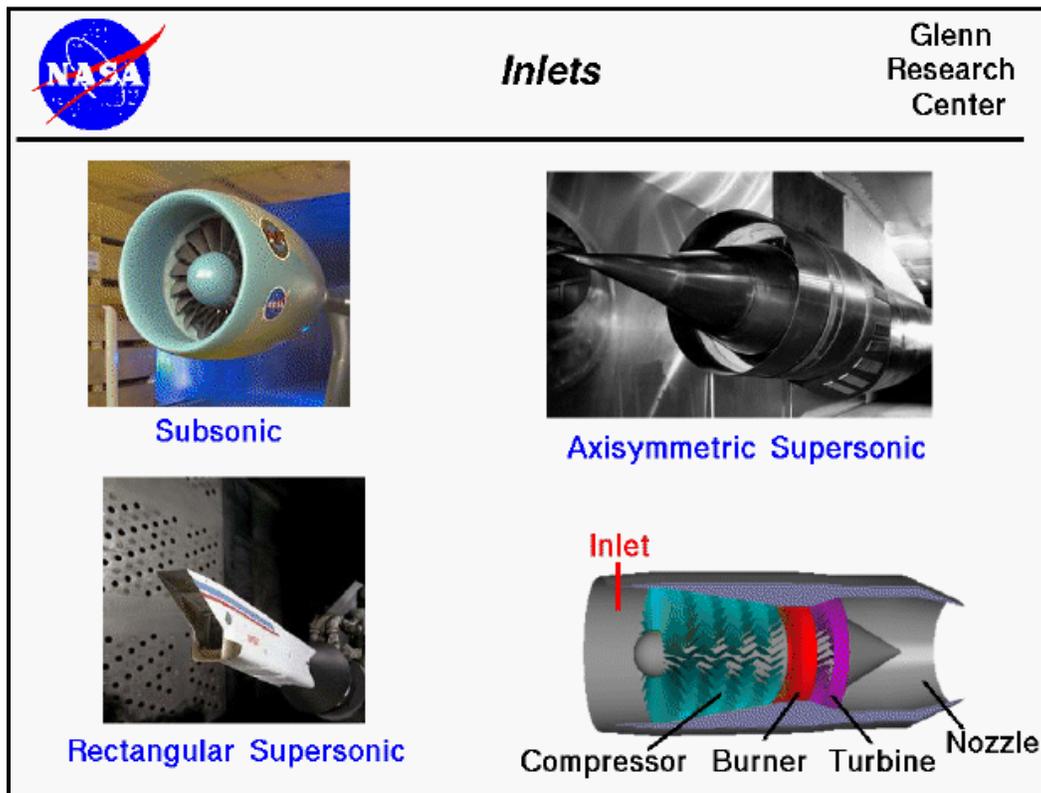


Figura 8. Dispositivos de admisión (Inlets). Datos obtenidos de (Nasa, 2014)

3.1.2.2 Compresor o etapas de compresión. También son conocidos bajo el nombre de turbocompresores, su función es la de comprimir el aire de forma continua aumentando la energía del fluido debida a la presión, mediante la aplicación de un trabajo mecánico. Se clasifican según la dirección de la corriente fluida (aire) en compresores centrífugos y compresores axiales.

Los compresores centrífugos (ver figura 9) canalizan el aire proveniente del dispositivo de admisión axialmente con el eje del rotor, siguiendo después un recorrido radial a través de este, la salida de dicho aire es de forma tangencial a la línea de curvatura de los alabes del rotor.



Figura 9. **Compresor centrífugo.** Datos obtenidos de (Nasa, 2014)

En los compresores axiales la corriente fluida sigue una dirección paralela al eje del motor. Están formados por un conjunto de alabes móviles y fijos; para un disco de alabes móviles (rotor) sigue uno de la alabes fijos (estator), en este paso del aire a través de dichos alabes es donde se genera el aumento progresivo de la presión. El conjunto de un disco de alabes fijos y móviles es lo que se conoce como etapa de compresión o escalonamiento.

Los compresores axiales están conformados por los rotores y estatores (ver figura 10). Este tipo de compresores son los más utilizados en los motores de las aeronaves.

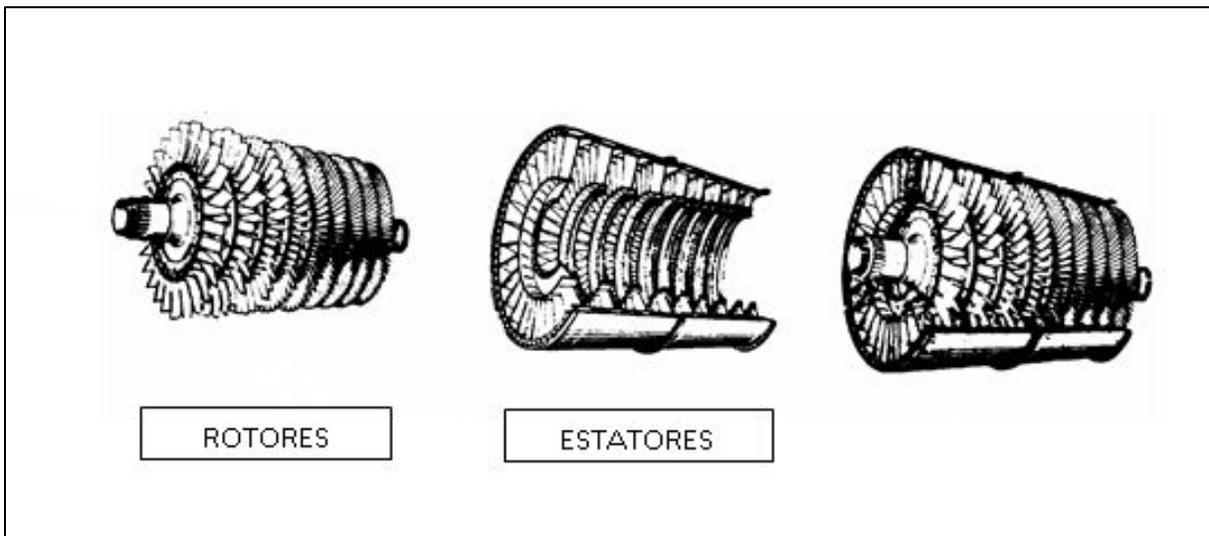


Figura 10. **Componentes del compresor axial. Motores de reacción.** Datos obtenidos de (Cuesta Álvarez, M, 2001)

3.1.2.3 Cámara de combustión. Es la parte del motor en donde se efectúa la combustión de la mezcla aire-combustible, el aire entra a la cámara a alta presión procedente del compresor, el combustible es inyectado en la zona anterior de la cámara proveniente del sistema de alimentación de combustible del motor.

La combustión en un motor a reacción es continua a diferencia del motor de cuatro tiempos, dicha combustión se realiza quemando el combustible en presencia del aire a presión que fluye continuamente procedente del compresor.

Las cámaras de combustión se clasifican en cámaras de combustión cilíndricas, anular y una combinación de las dos, las cilíndrico- anular (ver figura 11).

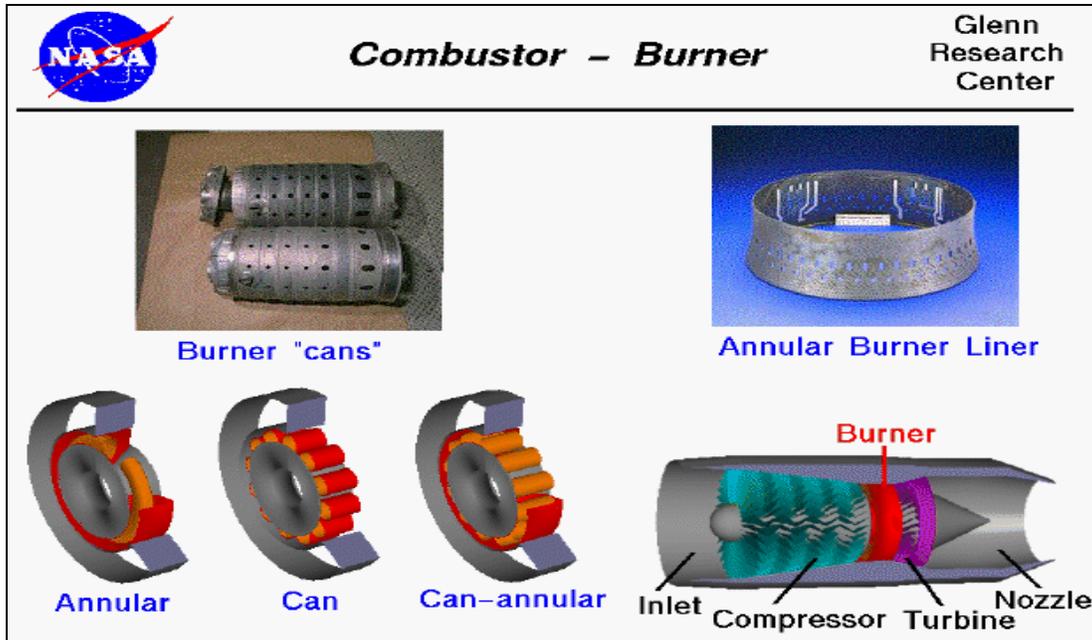


Figura 11. **Cámaras de combustión.** Datos obtenidos de (Nasa, 2014)

3.1.2.4 Turbina. Se podría afirmar que es la parte principal del motor, son mecanismos giratorios que extraen energía del gas producido en la combustión, convirtiendo esta energía en una potencia suficiente para accionar los compresores por medio del eje y a un pequeño generador que alimenta el equipo auxiliar, el grupo de turbinas también es responsable de expandir el gas hacia la tobera, en donde se ganara la alta velocidad de dichos gases responsables de producir el empuje necesario para impulsar la aeronave.

Las turbinas utilizadas en los motores a reacción son de tipo axial, las centrífugas no tienen aplicación aeronáutica. La configuración de las turbinas axial es muy similar a la de los compresores axiales, ya que cada etapa de turbina axial consta de un anillo de alabes fijos y un rueda de alabes móviles. El conjunto de alabes fijos es el estator de la turbina y el conjunto de alabes móviles es el rotor, entonces una etapa de turbina es el conjunto formado por un rotor y un estator (ver figura 12).

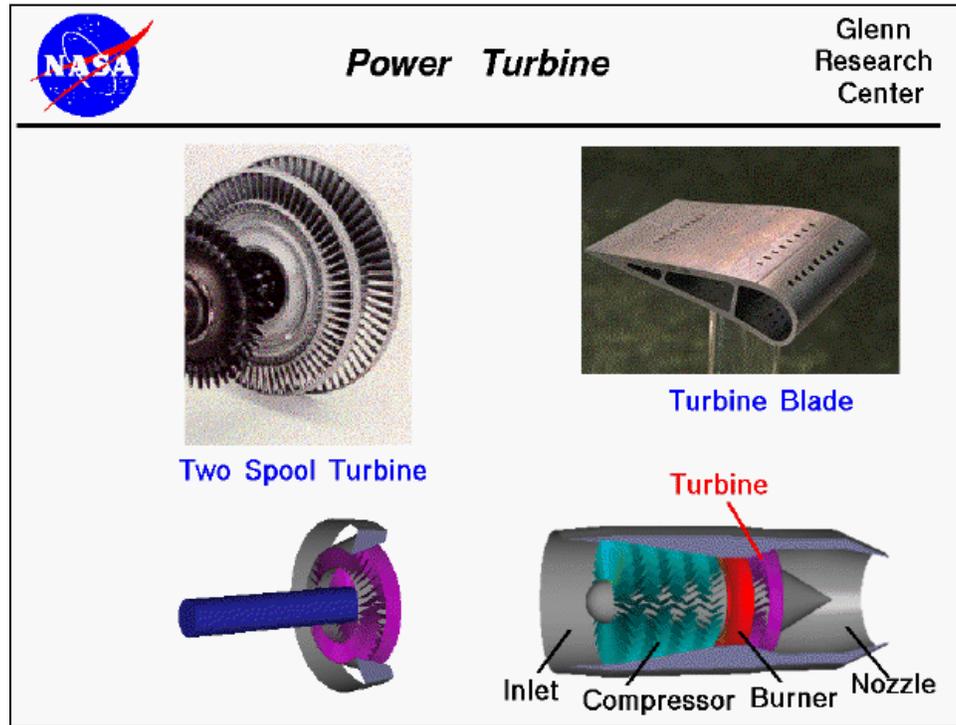


Figura 12. **Turbina axial.** Datos obtenidos de (Nasa, 2014)

3.1.2.5 Tobera. Es el órgano propulsor del motor a reacción, transforma la energía potencial del gas, en una gran fuerza de empuje, su principal función es la de aumentar la velocidad de dichos gases, a costa de disminuir su presión.

Las toberas para la propulsión subsónica son de forma convergente hacia la salida; la tobera trabaja en condiciones críticas cuando alcanza valores de número de $Ma = 1$, si la expansión del gas tiene lugar dentro de la tobera.

Para vuelos supersónicos se utilizan toberas convergentes-divergentes. En la zona convergente se aumenta la velocidad del flujo, alcanzándose velocidades sónicas en la garganta, y continuando el aumento de velocidad en la parte divergente (ver figura 13).

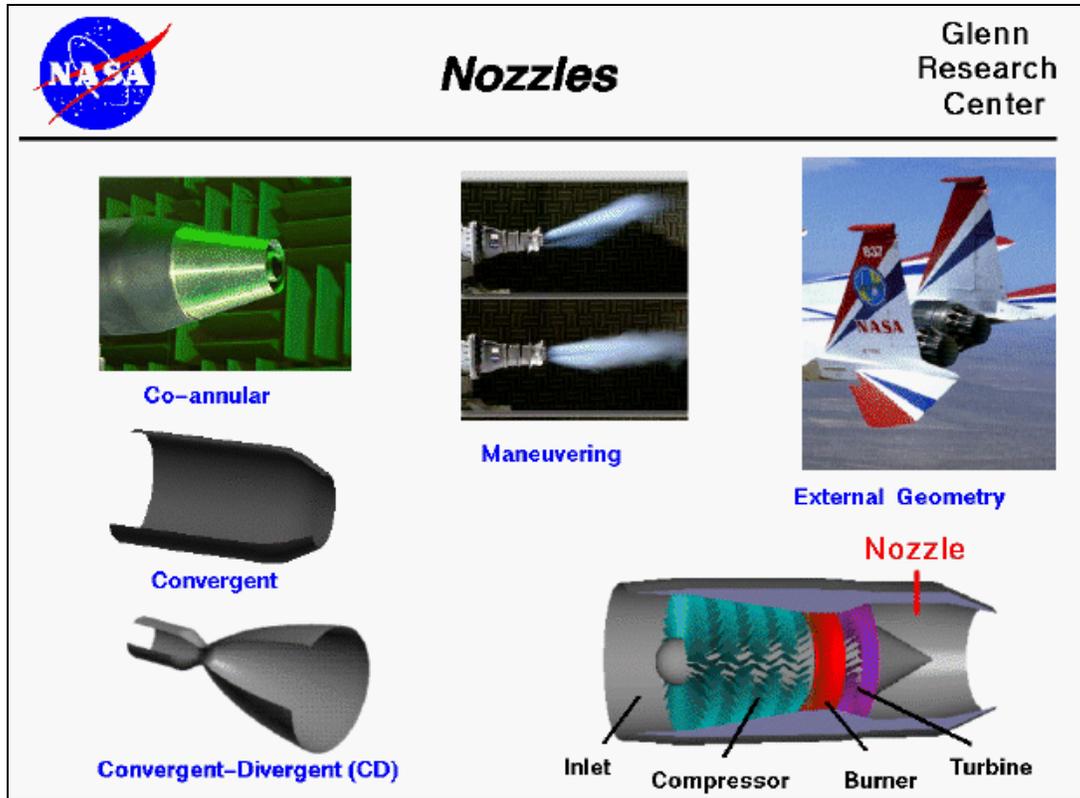


Figura 13. **Toberas.** Datos obtenidos de (Nasa, 2014)

3.1.3 Funcionamiento del Motor a Reacción. El dispositivo de admisión también llamado toma de aire, está ubicado en la parte delantera del motor donde inicialmente entra el aire, después este aire empieza un recorrido pasando por el compresor el cual es el encargado de comprimirlo progresivamente, gracias a una serie de etapas que este posee. Después el aire pasa a las cámaras de combustión donde precisamente se efectúa la combustión de la mezcla de aire y combustible, gracias a un sistema de inyección de combustible (ver figura 14). En los motores a reacción la inyección de combustible es de forma continua y se quema en presencia del aire a presión que proviene del compresor.

Efectuada la combustión se produce un gas con una elevada presión y temperatura el cual pasa a las ruedas de turbina provocándole un giro a alta velocidad, la etapa de turbina es la encargada de producir una expansión parcial del gas en donde este va cediendo presión y

temperatura, es decir pierde energía potencial la cual es entregada a la turbina en forma de rotación, este movimiento de rotación se comunica al compresor a través del eje; La etapa de turbina acciona al compresor y a su vez expande los gases a alta velocidad hacia la tobera.

La tobera es el órgano propulsor del motor a reacción, transforma la energía potencial del gas en una gran fuerza de empuje. El empuje de los motores a reacción depende de la masa del gas que pasa por el motor como del incremento de su velocidad a través del mismo.

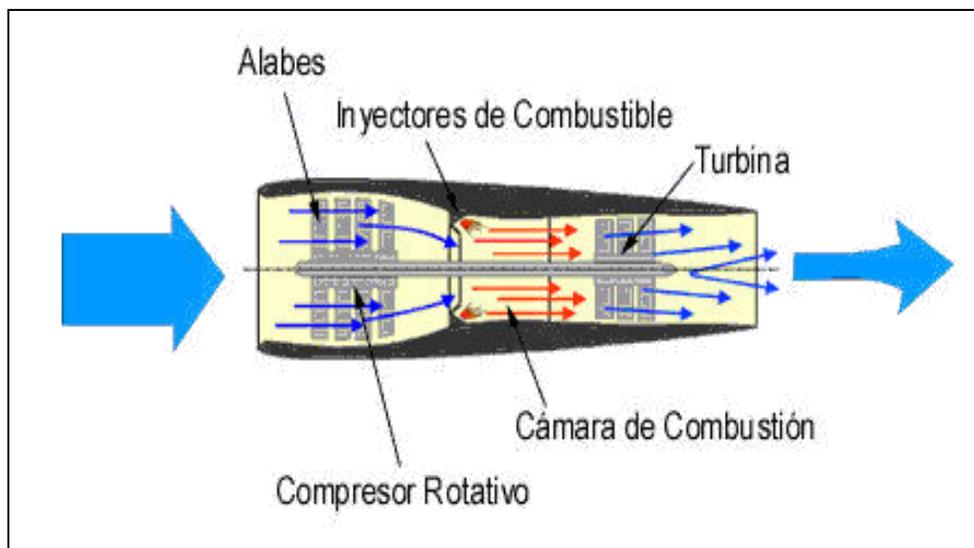


Figura 14. **Comportamiento del fluido dentro del motor.** Datos obtenidos de (Bloodhound ssc, 2013)

3.1.3.1 Ciclo Brayton. Es el ciclo termodinámico que rige las turbinas a gas, para nuestro caso los motores a reacción. Estas plantas motrices operan bajo un ciclo abierto, en donde la energía proviene del combustible que se inyecta en la cámara de combustión.

Este ciclo termodinámico está constituido por los siguientes procesos termodinámicos para una grafica de Presión Vs. Volumen: (ver figura 15):

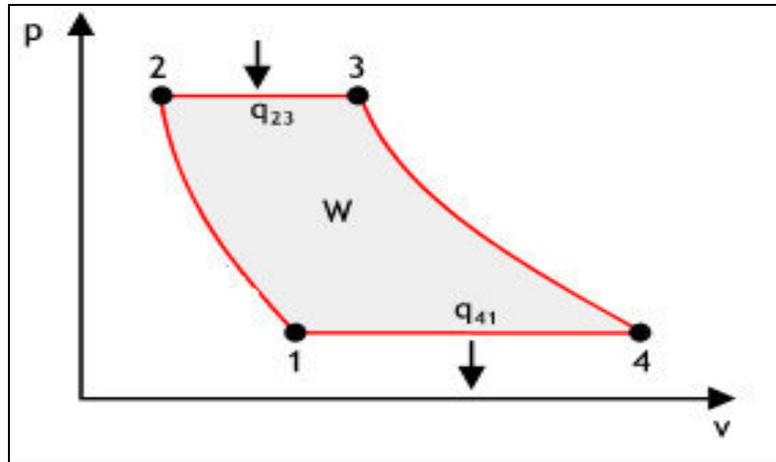


Figura 15. Ciclo ideal Brayton grafica P Vs V. Datos obtenidos de (MSPC, 2012)

- Del punto 1 al punto 2, se realiza una compresión adiabática por parte de las etapas de compresión, el volumen disminuye y la presión aumenta.
- Del punto 2 al punto 3, se inyecta el combustible y se aporta calor a presión constante en la cámara de combustión.
- Del punto 3 al 4, se expanden los gases en las etapas de turbina, allí la presión disminuye y el volumen aumenta.
- Del punto 4 al punto 1 se genera el escape de gases en donde se extrae el calor a presión constante hacia la atmósfera, entonces se repite de nuevo el ciclo.

Se debe tener en cuenta que el trabajo que genera la turbina es utilizado para accionar el compresor en un motor a reacción.

Para el ciclo termodinámico de Brayton se tiene la ecuación 1, que define su rendimiento o eficiencia térmica.

$$\eta_B = 1 - \frac{1}{R_p^{(\gamma-1)/\gamma}} \quad (1)$$

En donde:

γ = Relación de capacidades caloríficas molares a presión y volumen constante

(C_p / C_v) . También llamada constante adiabática.

R_p = Relación de compresión $(P_2 / P_1) = (P_3 / P_4)$

Para un ciclo ideal de Brayton la relación de compresión en el compresor es igual a la relación de compresión en la turbina. Esta última relación la llamamos relación de expansión (R_e).

También se puede analizar el comportamiento del ciclo utilizando una gráfica muy común en termodinámica, esta grafica es la de temperatura Vs. entropía (ver figura 16).

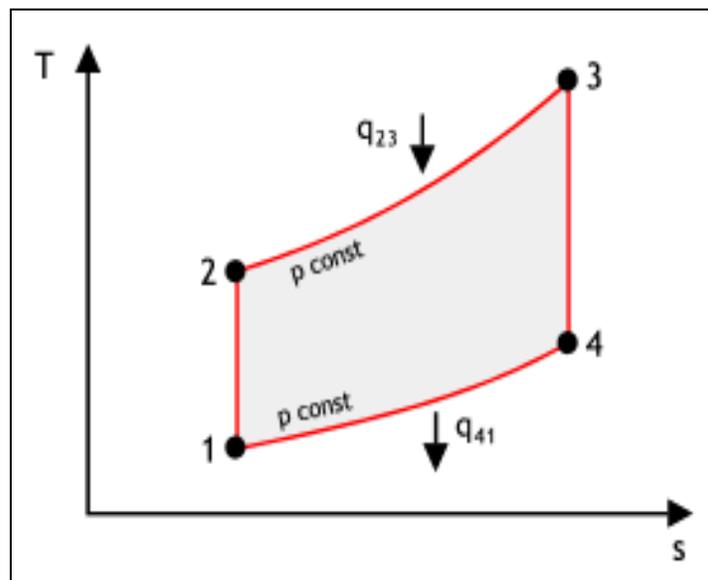


Figura 16. **Ciclo ideal Brayton** grafica T VsS. Datos obtenidos de (MSPC, 2012)

Aquí se determinan los puntos en donde la temperatura es mayor y menor dependiendo de los procesos.

3.1.3.2 Fuerza de Empuje. La fuerza de empuje que obtiene el motor a reacción, es la fuerza que aparece cuando se genera una diferencia en la cantidad de movimiento de los gases de escape a alta velocidad en la tobera, con respecto a la cantidad de movimiento del aire a baja velocidad cuando este entra al motor. La expresión matemática se determina a partir de la segunda ley de Newton (ecuación 2). Las presiones en la entrada y en la salida del motor a reacción son las mismas (presión ambiente).

- $F = ma$ Segunda ley de Newton (2)

- $a = \frac{\Delta v}{\Delta t}$, Reemplazamos en la ecuación 2 (3)

- $F = m \frac{\Delta v}{\Delta t}$, donde $\frac{m}{\Delta t} = \dot{m}$, por lo que se tiene

- $F = \dot{m} \Delta v = \dot{m}(v_{\text{salida}} - v_{\text{entrada}})$

$$F = \dot{m}(v_{\text{salida}} - v_{\text{entrada}}) \quad \text{Ecuación de empuje} \quad (4)$$

Dónde: v_{salida} = Velocidad de salida de los gases de escape

v_{entrada} = Velocidad de entrada del aire al motor

- \dot{m} = Flujo másico de aire

F = Empuje neto desarrollado

3.2 Sostenibilidad ambiental

Dentro del desarrollo sostenible se encuentra la sostenibilidad ambiental como uno de sus tres pilares (ver figura 17), los otros dos son el pilar social y económico; la integración de los tres conforman el llamado desarrollo sostenible, el cual está definido según el informe Bruntland (1987) como: “el satisfacer las necesidades de las generaciones presentes sin comprometer las posibilidades de las del futuro para atender sus propias necesidades”

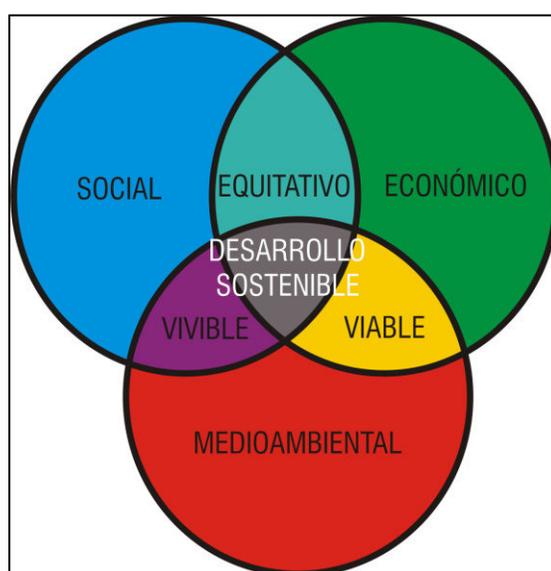


Figura 17. **Áreas del desarrollo sostenible.**
Datos obtenidos de (Ecointeligencia, 2013)

Las preocupaciones ambientales en nuestro planeta crecen diariamente, a tal punto que se han convertido en desafíos para el bienestar de la sociedad. Los más afectados son los países más pobres y menos privilegiados siendo estos afectados por la destrucción ambiental y los cambios climáticos que se suscitan , por lo general también son los que tienen menos recursos disponibles para afrontar estas situaciones cambiantes.

La sostenibilidad ambiental lucha contra la degradación ambiental, buscando la compatibilidad entre la actividad considerada y la preservación de la biodiversidad y de los ecosistemas, mediante el análisis de los impactos derivados de las actividades del hombre en términos de flujos, consumo de recursos lentamente renovables, generación de residuos y emisiones de gases. Para la sostenibilidad ambiental es importante la capacidad que tiene cualquier sistema en aprovechar la energía sin destruir los recursos del entorno, ya sea explotando los recursos naturales o realizando transformaciones mediante la aplicación industrial. La sostenibilidad ambiental se puede alcanzar mediante la agricultura orgánica, conservación de los recursos naturales, reciclaje, tecnologías para la descontaminación de agua, suelos y aire, saneamiento ambiental, prevención de desastres, generación de energías limpias entre otras.

3.3 Contaminación atmosférica

La contaminación atmosférica está definida como la presencia de sustancias en la atmosfera en cantidades que se consideren riesgosas para la salud del ser humano y los demás seres vivos; estas sustancias pueden afectar a los materiales, afectar la visibilidad y generar malos olores. La contaminación atmosférica es causada por procesos industriales donde se quema combustible (procesos de combustión) estos pueden ser en industrias, automóviles, aeronaves, barcos entre otros; los productos residuales de la combustión son dióxido y monóxido de carbono, óxidos de nitrógeno, óxidos de azufre, cloro e hidrocarburos.

Los contaminantes atmosféricos pueden clasificarse en primarios y secundarios. Los primarios se emiten directamente a la atmosfera como el caso del dióxido de azufre, este

contaminante afecta la vegetación e irrita los pulmones del hombre. Los secundarios se forman mediante procesos químicos atmosféricos actuando directamente sobre los contaminantes primarios y agentes no contaminantes en la atmósfera; entre estos se tiene: el ácido sulfúrico, el cual se forma mediante la oxidación del dióxido de azufre, el dióxido de nitrógeno el cual se forma cuando se oxida el óxido de nitrógeno y el ozono el cual se forma a partir del oxígeno. Los dos contaminantes primarios y secundarios se depositan en la superficie de la tierra por precipitación.

En el aire existen contaminantes gaseosos apareciendo ya sea en ambientes exteriores e interiores, sus concentraciones son diferentes. Los más comunes son el dióxido de carbono, el monóxido de carbono, los hidrocarburos, los óxidos de nitrógeno, los óxidos de azufre y el ozono; la principal fuente que produce estos contaminantes es la quema de combustible fósil.

Para el aire interior la contaminación es producida por algunos materiales de construcción, productos de limpieza entre otros; para los contaminantes de tipo gaseoso estos suelen provenir de volcanes e industrias, el smog es producido por la acción de la luz solar sobre los gases de escape de automóviles, aviones y fábricas.

Los gases contaminantes de la atmósfera que tienen una mayor incidencia sobre el ambiente son:

- Clorofluorocarbonos (CFC): también son llamados freones, contribuyen significativamente a la destrucción de la capa de ozono en la estratosfera incrementando el efecto invernadero. Para contrarrestar estos efectos negativos, el protocolo de Montreal prohibió la producción de la mayoría de estos productos, los cuales eran utilizados en los sistemas de refrigeración y climatización por su alto poder conductivo; estos productos también eran utilizados en aerosoles.

- Monóxido de Carbono (CO): se le puede llamar también óxido de carbono, es un gas inoloro e incoloro, este gas puede causar la muerte si se respira en niveles elevados. El monóxido de carbono aparece cuando la combustión de gas, gasolina, keroseno entre otros es incompleta; los aparatos domésticos que queman combustible como calentadores, chimeneas y los vehículos detenidos con el motor encendido lo producen así como las aeronaves en tierra y en vuelo.

- Dióxido de carbono (CO₂): es uno de los gases junto con otros que genera efecto invernadero, este gas reduce la emisión de calor al espacio provocando calentamiento en el planeta. El aumento de las partes por millón (390 en el 2009) en la atmosfera contribuyen notablemente al efecto invernadero que hace que la superficie del planeta se caliente; este aumento es causado por usos de combustibles fósiles y quemas agrícolas.

- Óxidos de Nitrógeno (N_yO_x): son compuestos químicos binarios de tipo gaseoso los cuales se forman por la combinación de oxígeno y nitrógeno. Su formación generalmente se da por combustiones a altas temperaturas, en donde el aire es el comburente. Entre los óxidos de nitrógeno se tiene: El monóxido de dinitrógeno (N₂O), el monóxido de nitrógeno (NO), el trióxido de dinitrógeno (N₂O₃), el tetraóxido de dinitrógeno(N₂O₄), el dióxido de nitrógeno (NO₂) y el pentaóxido de dinitrógeno(N₂O₅).

Los óxidos de nitrógeno se liberan al medio ambiente en los escapes de los vehículos motorizados como automóviles y aviones y en procesos industriales como la soldadura o detonación de dinamita. Cuando estos óxidos (NO_x) son liberados al medio ambiente por las combustiones efectuadas forman reacciones fotoquímicas y contaminantes secundarios como el nitrato de peroxiacetilo, el cual se manifiesta como una niebla (smog fotoquímico). Estos gases generan efectos nocivos para la salud por tal motivo existen regulaciones y normas ambientales mundiales como por ejemplo: la Directiva Europea 50- 2008, la cual está dedicada a la

protección de la salud humana y del medio ambiente, combatiendo las emisiones contaminantes a partir de la fuente esto según las directrices de la Organización Mundial de la Salud.

- Monóxido de Nitrógeno (NO): este es un gas incoloro y poco soluble en agua, se extiende en el aire debido a la producción del mismo por automóviles y plantas de energía; es considerado como un agente tóxico. La molécula de monóxido de nitrógeno es inestable en el aire permitiendo de esta manera su oxidación gracias a la presencia del oxígeno. La presencia de este gas en el aire hace que se convierta posteriormente en ácido nítrico lo que conlleva a la producción de la lluvia ácida y la aparición de agujeros en la capa de ozono. El monóxido de nitrógeno a baja atmósfera contribuye al calentamiento global, mientras que a alta atmósfera contribuye al oscurecimiento global.

- Dióxido de Azufre: su fórmula molecular es SO_2 . Se caracteriza por ser un gas incoloro con un olor penetrante que genera asfixia, el dióxido de azufre causa lluvia ácida debido a que en la atmósfera se transforma en ácido sulfúrico. Durante los procesos de combustión es liberado; combustibles como el petróleo contienen ciertas cantidades de compuestos a base de azufre, por tal motivo se eliminan mediante procesos de hidrodesulfuración. En la naturaleza se encuentra en los volcanes que por sus erupciones producen grandes cantidades que ocasionan contaminación en el aire. El efecto de este gas en las personas es contraproducente; irrita los ojos, garganta y vías respiratorias, también provoca dificultades respiratorias y sensación de tensión en el pecho, una exposición prolongada puede ser muy peligrosa para personas con enfermedades cardíacas.

- Metano: su fórmula química es CH_4 , es un gas de efecto invernadero el cual contribuye al calentamiento global del planeta aproximadamente en un 15%. El metano no es un gas tóxico, pero puede ocasionar quemaduras si llega a entrar en ignición; por ser inflamable

puede formar con el aire mezclas explosivas. Este gas se produce de forma natural por descomposición de sustancias orgánicas cuando hay ausencia de oxígeno, también se puede producir en el sistema digestivo de los rumiantes, en el proceso de la obtención de combustibles fósiles o en la quema de biomasa. La producción de metano se puede clasificar de la siguiente forma: 50% proviene de los sembradíos de arroz, actividad animal y de la acción de las termitas, 30% proviene de las tierras pantanosas y húmedas, 15% de la producción industrial de gas natural y carbón mineral y el 5 % restante de los rellenos de basura y otras sustancias orgánicas en descomposición. El metano posee un potencial de calentamiento global 62 veces mayor que el del dióxido de carbono, lo que lleva a pensar que a finales del siglo XXI el efecto del metano abra superado los valores del dióxido de carbono.

- Ozono (O_3): esta sustancia se encuentra conformada por tres átomos de oxígeno; se forma cuando se disocian los dos átomos del gas de oxígeno y cada átomo liberado se une después a otra molécula de O_2 , de esta manera se forma el ozono O_3 . El Ozono es un gas que no tiene color, posee un olor acre bajo condiciones ambientales, pero en grandes concentraciones se vuelve ligeramente azul; si se respira este gas en grandes cantidades provoca irritaciones en los ojos o en la garganta. Este gas tiene uso industrial en la síntesis de algunos compuestos orgánicos; su principal empleo radica como desinfectante depurador y purificador de aguas minerales ya que se comporta como un fuerte oxidante. Atmosféricamente se encuentra puro entre los 10 y 40 Km sobre el nivel del mar; a una altura de 25 Km sobre el nivel del mar su concentración es muy elevada (estratosfera). El ozono es muy importante ya que en la atmosfera actúa como un depurador del aire y como un filtro de los rayos ultravioleta (capa de ozono) que provienen del sol, sin este filtro no existiría vida en la tierra; en su forma natural el ozono es de color azul y de olor picante, se licua a $-111.9\text{ }^\circ\text{C}$ y se solidifica a $-193\text{ }^\circ\text{C}$.

Tiene efectos perjudiciales para la salud cuando se expone por periodos prolongados de tiempo y en altas concentraciones. Publicitariamente se dice que es beneficioso para la salud en bajas concentraciones, pero esto no está demostrado según la Organización Mundial para la Salud.

El ozono troposférico o también llamado ozono ambiental, es un gas incoloro el cual se crea a partir de las reacciones fotoquímicas entre óxidos de nitrógeno NO_x y compuestos orgánicos volátiles los cuales se derivan de quemas de combustible, este compuesto es el más destacado de los oxidantes fotoquímicos y hace parte del denominado Smog. Se encuentra en la zona más baja de la atmosfera, debido a que proviene de las emisiones de los compuestos orgánicos volátiles, NO_x , CO y del ozono estratosférico descendente; por encontrarse en dicha zona baja se convierte en un problema por su concentración que puede ser a partir de 150 microgramos/metro cubico, la cual es suficiente para generar daños en la salud humana. También puede afectar la vegetación a partir de 30 partes por billón además de contribuir al calentamiento global, este gas se forma gracias a las emisiones del dióxido de nitrógeno (NO_2) y de los hidrocarburos que reaccionan en presencia del calor y la luz solar. El ozono, NO_x y los compuestos orgánicos volátiles forman una neblina visible en zonas contaminadas; a esta neblina se le conoce con el nombre de smog de invierno.

3.4 Efecto invernadero

El efecto invernadero (ver figura 18), es el fenómeno que se le atribuye a los gases componentes de la atmosfera planetaria, los cuales retienen parte de la energía emitida por el suelo cuando este ha sido calentado por la radiación solar y reenviando de nuevo dicha energía

en forma de calor a la tierra. El efecto invernadero ayuda a que la energía recibida por la radiación solar no regrese inmediatamente al espacio, esto hace que exista en el planeta una temperatura aceptable para el desarrollo de la vida.

El efecto invernadero es necesario en cierto grado, pero su crecimiento en el planeta debido a las altas emisiones de gases contaminantes como el metano y el dióxido de carbono generado por la actividad humana, hace que exista un calentamiento global traducido en un cambio climático el cual ya es un problema ambiental.

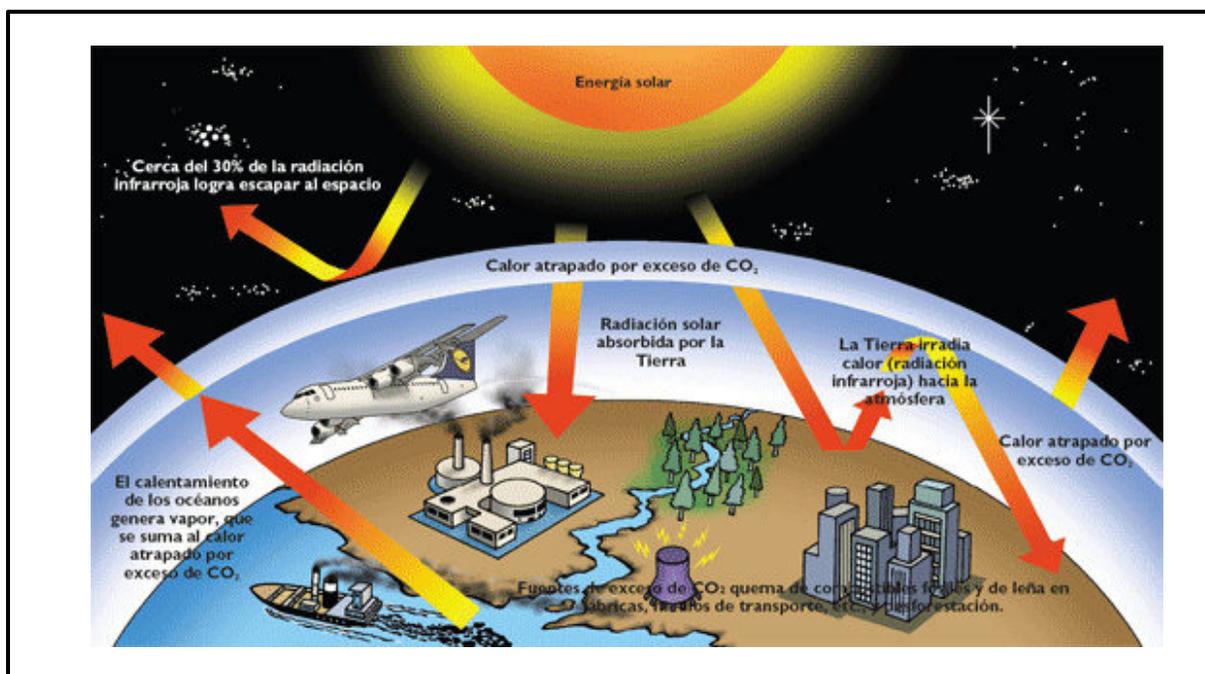


Figura 18. **Efecto invernadero.** Datos obtenidos de (Sepulveda, M., 2013)

Todos estos gases también llamados gases de efecto invernadero atrapan una gran cantidad de energía expresada en calor, haciendo que el planeta se caliente; la problemática se centra en que la producción de estos gases ha aumentado hace más de un siglo y medio desde que empezó la revolución industrial, teniendo valores críticos en las últimas décadas. Por ejemplo el CO₂, el cual se encuentra presente en la atmosfera crece no naturalmente, debido a la

utilización de motores de combustión interna, combustión del carbón entre otros, liberándose el carbono de los combustibles respectivos; el efecto invernadero causado por estos gases contaminantes es no natural y es el causante del calentamiento global en nuestro planeta.

Las cantidades de energía que entran y salen del planeta, ocasionan cambios en el sistema climático, generando fenómenos en la atmosfera, en el océano y en la tierra, de esta manera la radiación solar que entra se puede dispersar en la atmosfera, ser por las nubes reflejada, absorbida o reflejada por la superficie terrestre. Existen transformaciones de la energía solar; la energía solar de onda corta se transforma en calor el cual es absorbido por la tierra encontrándose como calor sensible y calor latente, siendo almacenado y transportado dando lugar a fenómenos atmosféricos de tipo turbulentos u oceánicos. Esta energía es devuelta a la atmosfera posteriormente como energía radiante de onda larga. Se debe tener en cuenta también en las emisiones del calor el efecto Albedo, el cual define el porcentaje de radiación reflejado, en donde las nubes y las superficies nevadas reflejan una mayor cantidad de energía y en donde los cuerpos oscuros absorben más energía del sol que la que reflejan. La energía que actúa en los océanos también presenta un proceso similar, esta energía es consumida en la evaporización del agua la cual es posteriormente liberada a la atmosfera en forma de lluvia cuando el vapor de agua es condensado.

Según el balance anual de energía de la tierra, el cual fue desarrollado por el National Center for Atmospheric Research (NCAR) en el año 2008; la tierra recibe por radiación solar 161 w/m^2 por efecto invernadero 333 w/m^2 para un total recibido de 494 w/m^2 ; posteriormente la tierra emite 17 w/m^2 por el fenómeno de convección, 80 w/m^2 por evaporización y transpiración, 396 w/m^2 por radiación de la superficie para un total emitido por la tierra de 493 w/m^2 ; lo que

supone que la tierra absorbe netamente 0.9 w/m^2 (ver figura 19). Esta cifra es la que indica actualmente la problemática del calentamiento global.

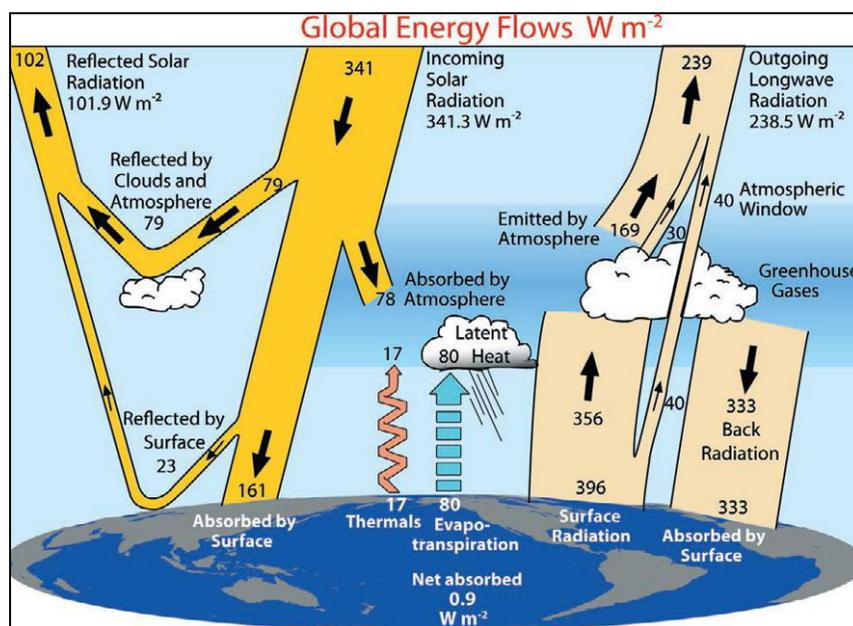


Figura 19. Balance anual de energía de la tierra de la NCAR en 2008 en w/m^2 . Datos obtenidos de (Trenberth, K.E., Fasullo, J.T., Kiehl, J., 2009)

3.4.1 Gases de efecto invernadero. Los gases de efecto invernadero (GEI), son denominados de larga permanencia ya que permanecen activos por mucho tiempo en la atmosfera; lo que indica que los gases que en este momento se están produciendo por ejemplo en combustiones de los motores que utilizan combustibles fósiles (derivados del petróleo), permanecerán en la atmosfera por generaciones ocasionando el efecto invernadero (Solomón, G., 2007). Un 50 % del CO_2 que se emite a la atmosfera tardara 30 años en desaparecer, un 30 % permanecerá varios siglos y el 20 % restante durara varios millares de años

El CO_2 atmosférico ha tenido un incremento considerable desde épocas preindustriales (1750), desde 280 partículas por millón (ppm) a 379 en el 2005. Los estudios indican que 2/3 de las emisiones provienen de las combustiones de combustibles fósiles como lo son el petróleo, gas y carbón; el restante 1/3 es de los cambios en la utilización del suelo en donde se tiene en cuenta

la deforestación (Solomón,G., 2007). De estas emisiones el 45 % se encuentra en la atmosfera, el 30 % es absorbido por los océanos y el 25 % está en la biosfera terrestre; lo que indica que el CO₂ además de encontrarse en la atmosfera en aumento, también lo hace en los océanos y en la biosfera.

Los gases que ocasionan el efecto invernadero son:

- Dióxido de Carbono (CO₂)
- Metano (CH₄)
- Monóxido de Dinitrógeno (N₂O)
- Ozono (O₃)
- Clorofluorocarbonos (CFC)
- Vapor de agua (H₂O)

Estos gases fueron mencionados en la sección 3.3 a excepción del vapor de agua el cual no es un gas contaminante si no en gas de efecto invernadero. El vapor de agua es obtenido cuando el agua líquida se evapora o por la sublimación del hielo, este gas es inodoro e incoloro o transparente y es el responsable de la humedad ambiental y de la formación de nubes. Este gas es el más importante por su abundancia en la atmosfera y por el balance energético global.

El vapor de agua al condensarse en la atmosfera toma un color blanco, debido a que actúa como si fuera un espejo reflejando todas las ondas del espectro visible para nuestros ojos; cuando esto ocurre el índice de gas de efecto invernadero es el máximo. Los aviones dejan estas estelas de vapor de agua provenientes de la combustión de los hidrocarburos al condensarse (ver figura. 20).



Figura 20. **Estelas de vapor de agua.** Los Autores

La Administración Nacional de la Aeronáutica y del Espacio (NASA), en sus estudios ayudados de datos satelitales, confirman que el vapor de agua es el gas más importante en el cambio climático por su efecto de amplificación del calor, el cual es lo suficientemente potente como para duplicar el calentamiento climático causado por el aumento de los niveles de dióxido de carbono en la atmosfera. Gracias a estas observaciones los científicos midieron con precisión la humedad a través de las más de diez millas de la atmosfera, dicha información fue comparada con las observaciones mundiales de los cambios en la temperatura; los científicos construyeron una imagen completa de las interacciones entre el vapor de agua, dióxido de carbono y otros gases en la atmosfera. El aumento del vapor de agua hace que las temperaturas en el planeta sean más cálidas, funcionando como un distribuidor del calor, dado que las moléculas de agua que están en el aire atrapan el calor que aparece de la reflexión del mismo entre el sol y la tierra, para posteriormente distribuirlo por toda la superficie terrestre. Este proceso es el de evaporización, transpiración, condensación y precipitación; en pocas palabras es el ciclo hidrológico.

Finalmente el equipo de la NASA descubrió que si la tierra se calienta 1.8°F , el aumento asociado de vapor de agua atraparé un extra de 2 w/m^2 de energía (Hansen,H., 2012); lo que indica que si se suma toda esta energía sobre la superficie de la tierra, se estará en umbrales críticos.

3.4.2 Forzamiento Radiactivo. El forzamiento radiactivo es el cambio del flujo neto de energía radioactiva hacia la superficie de la tierra, el cual es medido en el borde superior de la troposfera es decir a 12.000 m sobre el nivel del mar; este cambio de flujo se debe a los cambios internos en la composición de la atmosfera o cambios en el aporte externo de la energía solar. El forzamiento radiactivo se mide en vatios por metro cuadrado (w/m^2); cuando esta magnitud física es positiva se dice que contribuye a calentar la superficie de la tierra, mientras que si es negativa contribuye a su enfriamiento. En pocas palabras el forzamiento radiactivo mide cualquier cambio en la radiación (expresada en calor) que entra o sale del planeta.

Las causas del forzamiento radiactivo son: cambios en la radiación solar incidente y los efectos de los cambios dados por las cantidades de gases de efecto invernadero emitidos a la atmosfera.

El Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el cambio climático (IPCC), utilizan el término de “forzamiento radiactivo” como una perturbación que tiene el balance radiactivo del sistema climático del planeta, el cual puede generar cambios en los parámetros climáticos.

El forzamiento radiactivo fue definido por Ramaswamy (2001) como “el cambio en la irradiancia neta solar vertical (onda larga expresada en w/m^2) en la tropopausa después de permitir que las temperaturas estratosféricas se reajusten al equilibrio radiactivo, pero permaneciendo fijas, en sus valores no perturbados, las temperaturas de superficie y troposfera”. (p.23).

El IPCC en su cuarto informe del cambio climático del 2007, realizó un estudio en donde se obtuvieron valores del forzamiento radiativo ocasionado por los gases de efecto invernadero (ver figura 21); en este estudio se observó que los gases de efecto invernadero de larga duración como los producidos en las combustiones de combustibles fósiles, obtuvieron valores altos de forzamiento radiativo.

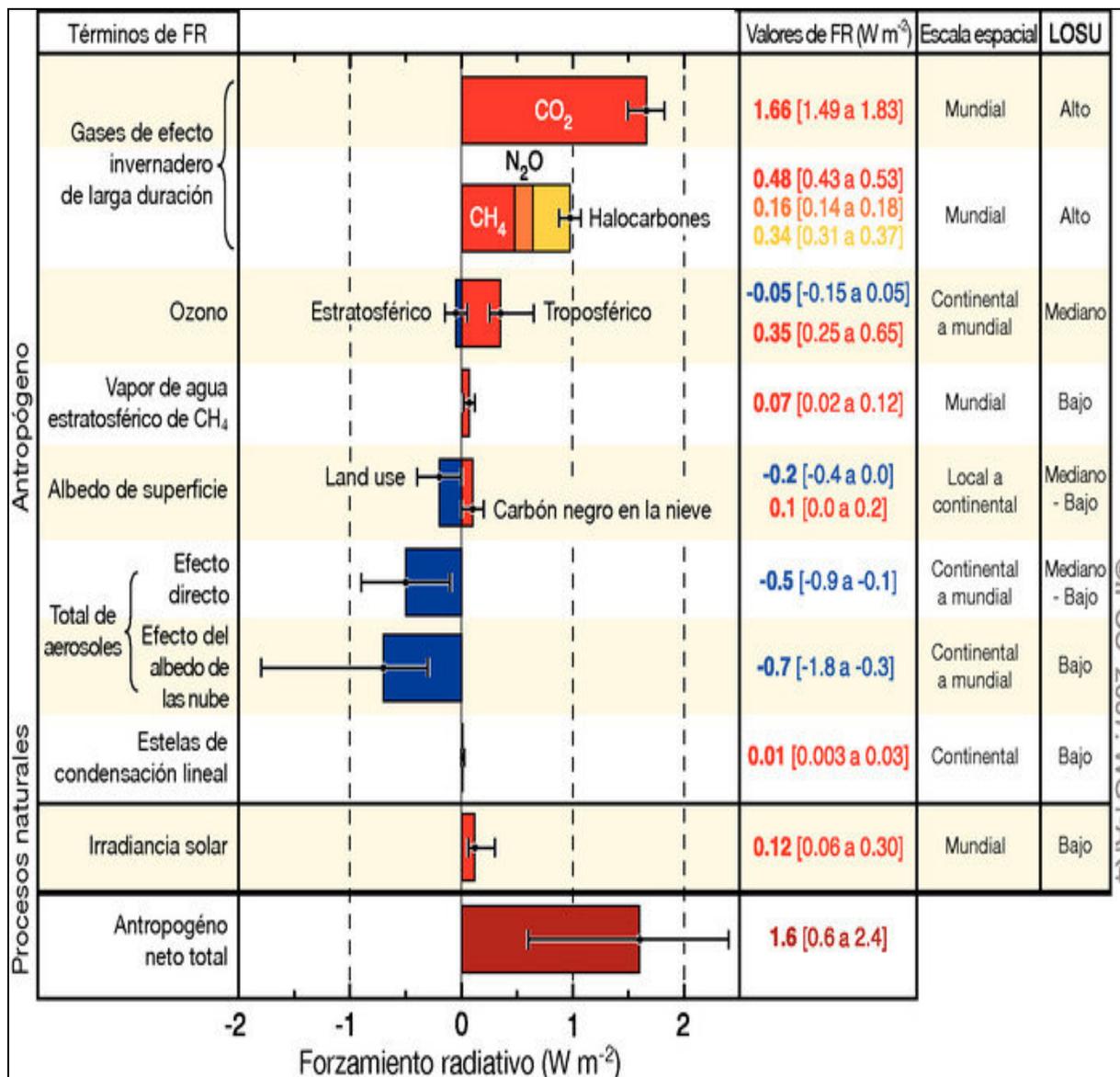


Figura 21. Componentes del forzamiento radiativo. Datos obtenidos de (IPCC, 2013)

3.5 Proceso de la combustión en los motores a reacción

El proceso de la combustión en los motores a reacción se lleva a cabo en la cámara de combustión (sección 3.1.2.3). La cámara de combustión tiene como función principal quemar grandes cantidades de combustible, el cual es suministrado gracias a las boquillas de pulverización (inyectores de combustible), con grandes volúmenes de aire dados por el compresor. En dicha cámara se libera calor de forma tal que el aire se expande y se acelera, para proporcionar una suave corriente de gas calentado de manera uniforme, para todas las condiciones que la turbina requiere; este proceso se debe llevar a cabo con la mínima pérdida de presión y con la máxima liberación del calor dentro del volumen comprendido de la cámara.

La cantidad de combustible que se añade al aire depende de la elevación de la temperatura requerida. La temperatura máxima se encuentra limitada en un rango de 850 a 1700 ° C, debido a los materiales en los que se encuentran fabricados los alabes de turbina y las boquillas de inyección. El aire llega a la cámara de combustión a una temperatura de 200 a 550 °C, gracias al proceso de la compresión; en la combustión la mezcla aire-combustible aumenta su temperatura de 650 a 1150 °C. La temperatura requerida del gas en las etapas de turbina del motor varía con el empuje del mismo, esto implica que la cámara de combustión también debe ser capaz de mantener una combustión estable y eficiente, según las condiciones operativas del motor (Rolls Royce., 1996)

Los motores modernos han tenido una serie de modificaciones y mejoras con el fin de elevar la eficiencia en la combustión. El parámetro de la eficiencia en la combustión, se ha convertido en un ítem muy importante debido al rápido aumento en el tráfico de aeronaves

comerciales y al aumento progresivo de la contaminación atmosférica, el cual es visto por las personas como humo de escape.

El proceso de la combustión en el motor a reacción, se lleva a cabo de la siguiente manera: El aire que proviene del compresor, entra a la cámara de combustión a una velocidad de hasta 150 m/s, pero debido a que esta velocidad del aire es demasiado alta para la combustión, la cámara tiene que primero difundir este aire, es decir desacelerarlo y elevar su presión estática.

Dado que la velocidad de la quema de combustible (querosene) a relaciones normales de la mezcla, son solo pocos metros por segundo, cualquier combustible encenderá incluso en la corriente de aire difuso, el cual ahora tiene una velocidad aproximada de 25 m/s. Una región de baja velocidad axial ha de ser creada en la cámara, para que la llama permanezca encendida a lo largo del margen operativo del motor.

En operaciones normales, la relación total aire/combustible de una cámara de combustión puede variar entre 45:1 y 130:1, esto quiere decir que por cada partícula de combustible que entra a la cámara, entran 45 partículas de aire. Sin embargo el querosene solo será quemado eficientemente en ò cerca de una relación de 15:1, por lo que el combustible debe estar quemado con solo una parte del aire que entra a la cámara, en lo que se llama una zona de combustión primaria. Esto se consigue por medio de un tubo de llama (revestimiento de combustión) que tiene varios dispositivos para la medición de la distribución del flujo a lo largo de la cámara (Rolls Royce., 1996)

Aproximadamente el 20% del flujo másico de aire es acogido por la sección de entrada (ver figura 22). Inmediatamente corriente abajo de la entrada están los deflectores de turbulencia (torbellinadores) y las cavidades perforadas para la llama (perforate flare), a través de las cuales el aire pasa a la zona de combustión primaria. El remolino de aire induce un flujo corriente arriba

del centro del tubo de llama y promueve la recirculación deseada. El aire no recogido por la entrada desemboca en el espacio anular entre el tubo de llama y la carcasa de aire.

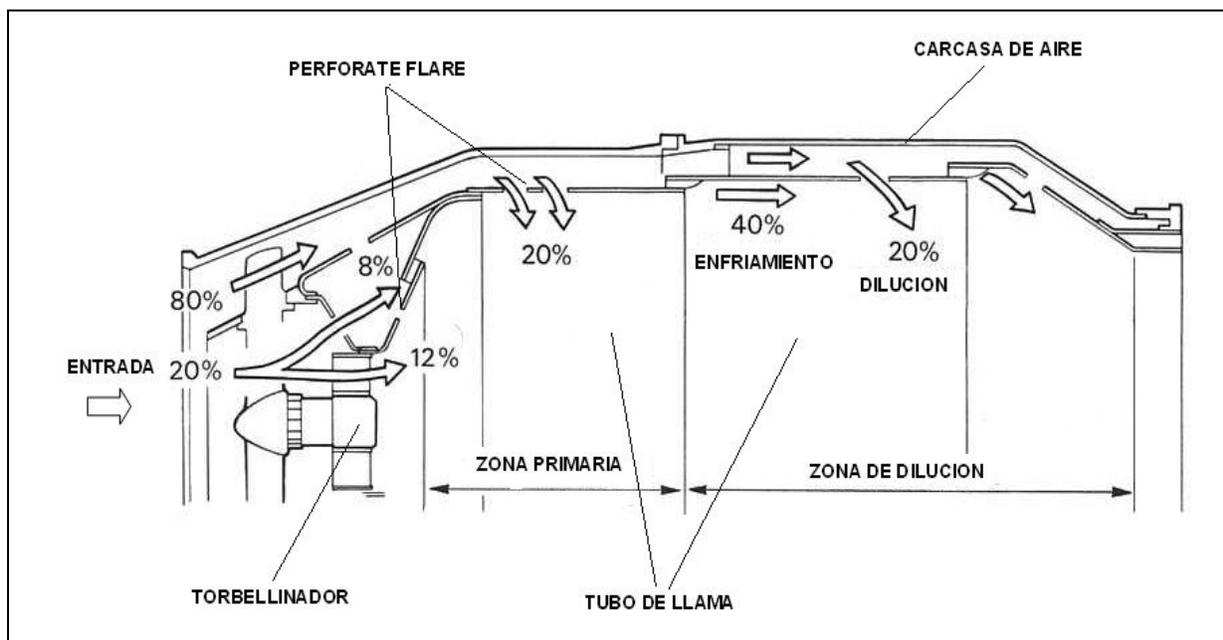


Figura 22. **Calculo proporcional del flujo de aire.** Elaborado por los Autores con base en los datos de (Rolls Royce., 1996)

A través de la pared del cuerpo del tubo de llama, adyacente a la zona de combustión hay un número seleccionado de orificios secundarios a través de los cuales un 20% del flujo principal de aire pasa a la zona primaria. El aire de los deflectores de turbulencia y que a partir de los orificios de aire secundario, interactúan y crean una región de baja velocidad de recirculación, toma la forma de un vórtice toroidal, similar a un anillo de humo que tiene el efecto de estabilizar y anclar la llama (ver figura 23). Los gases de recirculación aceleran la quema de gotas de combustible recién inyectados con el fin de llevarlos rápidamente a la temperatura de ignición.

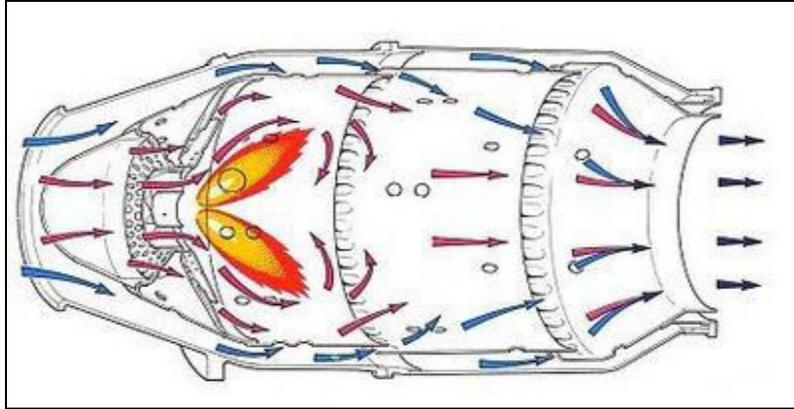


Figura 23. **Estabilización de llama y patrón de flujo de aire en general.** Datos obtenidos de (Take of briefing, 2012)

El combustible pulverizado gracias a la boquilla cónica del inyector, cruza el vórtice de recirculación en su centro. Esta acción junto con la turbulencia general en la zona primaria, ayuda significativamente a romper el combustible y mezclarlo con el aire entrante.

La temperatura que liberan los gases de la combustión es de 1800 a 2000 °C aproximadamente, esta temperatura es muy alta para los alabes guía que posee la primera etapa de turbina, de esta manera no todo el aire es utilizado en el proceso de la combustión; un 60% del flujo másico total de aire es introducido en el tubo de llama de donde aproximadamente la tercera parte (20%) es usada para disminuir la temperatura del gas en la zona de dilución antes de que entre a la turbina; el 40% restante es usado para la refrigeración de las paredes del tubo de llama (ver figura 22). Esto se logra gracias a una película de aire de refrigeración que fluye a lo largo de la superficie interior de la pared del tubo de llama, que aísla los gases calientes de la combustión. La combustión debe ser completa antes de que el aire de dilución entre al tubo de llama, de lo contrario el aire entrante enfriara la llama y la combustión será incompleta.

El proceso de combustión se inicia cuando una chispa eléctrica se genera por el encendido de una bujía. La llama es entonces auto sostenida debido a que la inyección de combustible es constante, de esta forma la combustión también es constante.

El diseño de una cámara de combustión y el método para inyectar el combustible puede ser diferente en los motores, pero la distribución de flujo de aire utilizado para efectuar y mantener la combustión es siempre la misma. La cámara de combustión debe permitir que el combustible se quemara de manera eficiente, en un amplio rango de condiciones de operación sin que existan grandes pérdidas de presión.

La cámara de combustión es un dispositivo que libera calor en función del volumen existente en la zona de combustión; por lo tanto para obtener la alta potencia requerida a la salida, la cámara debe liberar tasas de calor excepcionalmente altas. En condiciones de despegue los motores de aeronaves comerciales consumen grandes cantidades de combustible, por ejemplo un motor del Boeing 767 consume 20635 Lb de combustible en una hora (Lb/h); el poder calorífico del combustible es de aproximadamente 18550 BTU (unidades térmicas británicas) por libra (BTU/Lb), esto indica que la potencia calorífica que se genera en la cámara será de 106300 BTU/s, en otras palabras un gasto de calor potencial a una tasa aproximada de 150000 caballos de fuerza (Rolls Royce., 1996)

En los motores a reacción, la eficiencia de la combustión en condiciones de despegue es generalmente del 100% y en condiciones de crucero es de un 98%; esto se debe a la altura de vuelo en donde la relación de aire - combustible total, puede aumentar de 50:1 a 130:1 .

Los contaminantes no deseados que se encuentran en los gases de escape del motor, se crean dentro de la cámara de combustión. Existen 4 contaminantes principales que son controlados por leyes internacionales, estos son:

- Hidrocarburos no quemados (combustible no quemado)
- Humo o Smoke (partículas de carbono)
- Monóxido de carbono (CO)

- Óxidos de nitrógeno (NO_x)

Las principales condiciones que afectan a la formación de contaminantes son la presión, la temperatura y el tiempo. En las regiones ricas en combustible de la zona primaria de la cámara de combustión, los hidrocarburos se convierten en monóxido de carbono y smoke (humo); el aire fresco de disolución es utilizado para oxidar el monóxido de carbono y el Smoke convirtiéndolo posteriormente en dióxido de carbono no tóxico dentro de la zona de dilución. Los hidrocarburos sin quemar también pueden ser reducidos en esta zona, para continuar el proceso de combustión asegurando la combustión completa.

Los óxidos de nitrógeno (NO_x) son formados bajo las mismas condiciones que las requeridas para otros contaminantes, por tal motivo es importante enfriar la llama lo más rápidamente posible y así reducir el tiempo estipulado para la combustión (Rolls Royce., 1996). Este conflicto de condiciones requiere de la realización de varios compromisos, pero las continuas mejoras en el diseño de la cámara de combustión y en el rendimiento de la misma, ha dado lugar a un proceso de combustión sustancialmente más limpio.

3.5.1 Producción de gases. Los gases que genera el motor a reacción gracias a su funcionamiento termodinámico se encuentran directamente relacionados con el problema de la contaminación ambiental; sus niveles de emisión de sustancias tóxicas y de los denominados gases de invernadero, además de los niveles elevados de ruido lo ubican dentro de un contexto para el estudio de esta problemática.

El motor a reacción se encuentra clasificado dentro de la gama de motores de combustión interna (MCI), los cuales generan emisiones crecientes a la atmósfera de gases tales como: CO_2 , metano, óxido nítrico y los cloro-fluorocarbonatados, entre otros, por tal motivo es necesaria una acción para disminuir estos efectos nocivos. En Estados Unidos donde se realizan las mediciones

de estos gases de invernadero, se obtuvo que entre los años de 1990 a 2006, el incremento de los mismos fue del 87%. La figura 23 muestra los forzantes radiativos de las emisiones aéreas en 1992 y la proyección para el 2050 (IPCC, 1999).

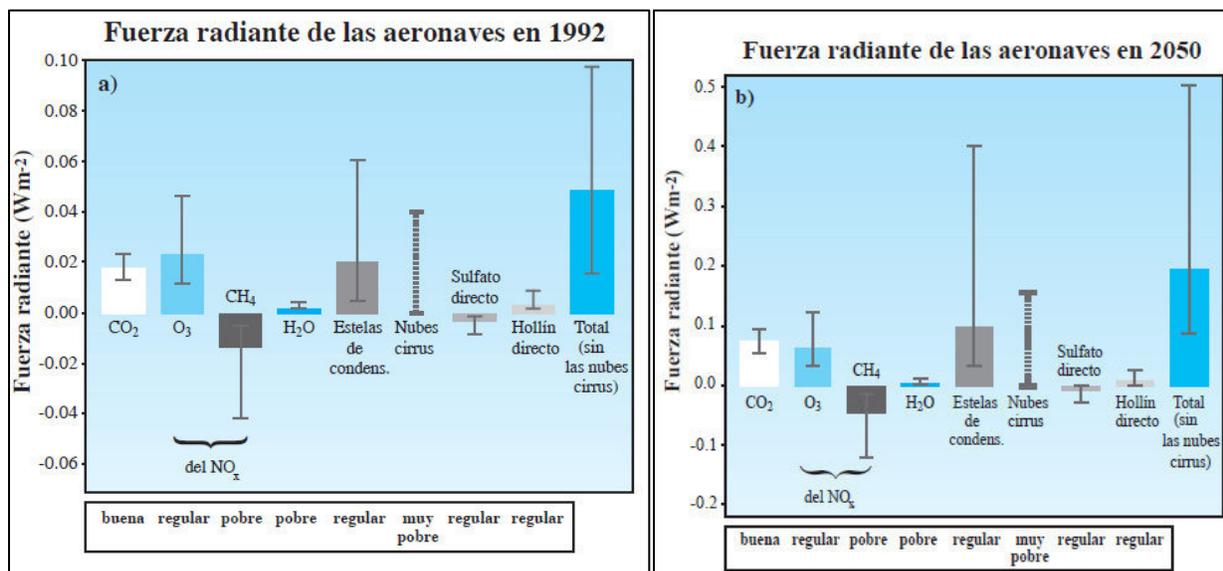


Figura 24. **Fuerza radiante de las aeronaves en 1992 y para 2050.** Datos obtenidos del Informe especial de IPCC. La aviación y la atmosfera global.1999

En la figura 24, se indican las estimaciones del forzamiento radiativo promediado global y anualmente (w/m^2) proveniente de las aeronaves subsónicas desde 1992 y para el 2050. La escala muestra un crecimiento para el 2050 cuatro veces mayor en comparación con el medido en 1992

Las aeronaves civiles producen emisiones globales de CO₂ alrededor del 2%, se debe tener en cuenta que existen aerolíneas que operan sus aviones a gran altitud los cuales vuelan cerca a la estratosfera, ocasionando efectos antropogénicos por el CO₂ y provocando cambios climáticos significativos.

La contribución a la contaminación ambiental dada por los aviones de transporte masivo de pasajeros y de carga se originan gracias a las emisiones de dióxido de carbono (CO₂) y óxidos de nitrógeno (NO_x); estas últimas son particularmente efectivas en formar ozono cuando se

vuela a gran altitud (8-13Km), dando así un mayor efecto de calentamiento global, las concentraciones de ozono son de tipo regional o local mientras que las emisiones de CO₂ son de tipo global. Las emisiones de los motores a reacción en cuanto al NO_x disminuyen los niveles de metano ocasionando un efecto de enfriamiento en el clima, dicho efecto no compensa el que genera el ozono (O₃) a partir de las emisiones de NO_x. Hipotéticamente se cree que las emisiones de sulfuros y vapor de agua dados por estos motores en la estratosfera tiende a agotar el ozono y a compensar el NO_x; estos efectos aún no han sido cuantificados.

Cuando las aeronaves vuelan a gran altitud, también emiten vapor de agua, el cual es un gas de invernadero que bajo ciertas condiciones atmosféricas forman estelas de condensación (nubes lineales visibles) que dan origen a efectos de calentamiento global; esta formación de nubes es conocida como cirrus.

Otro factor que se puede tener en cuenta para la contaminación ambiental provocada por las aeronaves es la liberación de hollín y partículas de sulfato. El hollín tiene la propiedad de absorber el calor y las partículas sulfatadas reflejan la radiación dando como resultado efectos de calentamiento y enfriamiento respectivamente.

El Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) ha realizado estudios enfocados a cuantificar el impacto ambiental generado por los motores de los aviones, concluyendo que la aviación civil genera un impacto al clima de 2 a 4 veces que las emisiones solas de CO₂ tomándose esto como un forzante radiactivo. Este ente también afirma que la aviación civil es la responsable de cerca de 3.5% del cambio climático antropogenico en donde se evidencia los efectos inducidos del CO₂. El IPCC también ha realizado proyecciones de esta problemática al 2050 en donde este porcentaje será del 5% si no se toman medidas restrictivas a tales emisiones (IPCC, 2007)

Se debe tener en cuenta que el transporte masivo de pasajeros y de carga aumenta considerablemente con la venta de aviones a las aerolíneas; por lo que de igual manera aumenta las emisiones de los gases de invernadero y las concentraciones de ruido. En Colombia no se han realizado estudios enfocados a esta problemática como en los países desarrollados, los cuales actualmente se encuentran preocupados por el aporte significativo a la contaminación y al efecto invernadero de este tipo de motores.

3.5.1.1 Emisiones nocivas. En lugares apartados de los aeropuertos los efectos nocivos de la contaminación atmosférica provocada por las operaciones de los aviones, pasan a un plano secundario. Caso contrario ocurre en los aeropuertos y sus cercanías, donde esta problemática necesita especial atención de los organismos y entes dedicados al control de la contaminación ambiental.

Las grandes superficies horizontales de los aeropuertos determinan el grado de contaminación de los mismos y de las zonas aledañas a ellos. Cuando predominan condiciones turbulentas en las capas inferiores de la atmosfera de los aeropuertos, las emisiones de los motores de las aeronaves no afectan a la población; por otra parte en lugares donde predominen condiciones atmosféricas estables y duraderas por largos periodos, es muy probable que los agentes contaminantes de las combustiones de los motores que se acumulan en el aire de los aeropuertos, afecten el bienestar de las comunidades aledañas.

Para evitar que existan problemas referentes a la contaminación atmosférica, provocada por los motores a reacción de los aviones, que afectan las inmediaciones de los grandes aeropuertos; se han dado varias soluciones desde la misma construcción y modificación de dichos motores por parte de los fabricantes, como por ejemplo:

- En los motores actuales las cámaras de combustión múltiples han sido reemplazadas por una cámara única (cámara de combustión anular) (ver figura 10), este cambio mejora el rendimiento de la combustión disminuyendo las emisiones de hidrocarburos sin quemar.

- Los motores de última generación han sido modificados en los inyectores de combustible, para que descarguen parcialmente el mismo durante las operaciones de ralentí (marcha lenta); esta actuación se da en la fase de encendido del motor. Se debe tener en cuenta que aunque la cantidad de combustible que no se quema es muy pequeña, los gases expulsados en las toberas de los motores a reacción hacia una zona relativamente limitada como lo es la de un aeropuerto, es relevante en cuanto a concentraciones nocivas.

Se debe tener en cuenta que los cambios tecnológicos en general de las aeronaves, pueden traer consigo un equilibrio y mitigación de los impactos ambientales; actualmente las aeronaves que se construyen son más eficientes en cuanto al uso de combustible por pasajero-Km, esto se debe a las mejoras en los motores y a la aerodinámica del avión. Se estima que para el año 2050 la eficiencia en cuanto al consumo de combustible será del 40% a 50%. Las mejoras en la eficiencia de los motores a reacción reducen el consumo específico de combustible y por ende las emisiones, no obstante las estelas de condensación pueden aumentar, así como las emisiones de NO_x si no existen adelantos tecnológicos para mejorar o reemplazar el combustible (Grupo Intergubernamental de Expertos Sobre el cambio Climático, IPCC., 1999).

En la figura 25, se indican los gases que entran y salen del motor a reacción; inicialmente lo que el motor absorbe es aire con los componentes que este tiene: Nitrógeno (78.08%), oxígeno (20.94), dióxido de carbono (0.035%) y gases inertes (0.93%). Para los productos de la combustión los cuales se expulsan en la tobera propulsiva del motor, se tienen los gases no

contaminantes los cuales son químicamente inertes e invisibles y también los gases contaminantes que son químicamente reactivos y visibles.

3.5.1.1.1 Anhídrido carbónico o dióxido de carbono (CO₂). Este gas contenido en la atmosfera es un gran absorbente de las radiaciones de onda que proceden del exterior; al aumentar su producción también aumenta la temperatura en la atmosfera. La cantidad del dióxido de carbono que se encuentra contenido en el aire es aproximadamente de 300 partes por un millón de aire (300 ppm); su aumento en el último siglo es aproximadamente de un 10 %, el cual proviene de varias actividades; este valor se puede incrementar con las operaciones a elevadas alturas que pueden llegar a tener las flotas militares de aviones supersónicos (Cuesta, 2001). . En la producción de gases en el motor a reacción, el CO₂ es el gas de mayores proporciones; por cada gramo de la suma de los gases contaminantes principales (NO_x + CO + CH) se forman 125 gramos de CO₂

En 1992 las emisiones de dióxido de carbono de las aeronaves fueron del 2% del total de las emitidas en ese año, es decir un 13% de las emisiones de dióxido de carbono de todas las fuentes de transporte. Las proyecciones para el 2040 serían de 1.6 a 10 veces el aumento de las emisiones de dióxido de carbono con respecto al valor de 1992 (Grupo Intergubernamental de Expertos Sobre el cambio Climático, IPCC., 1999).

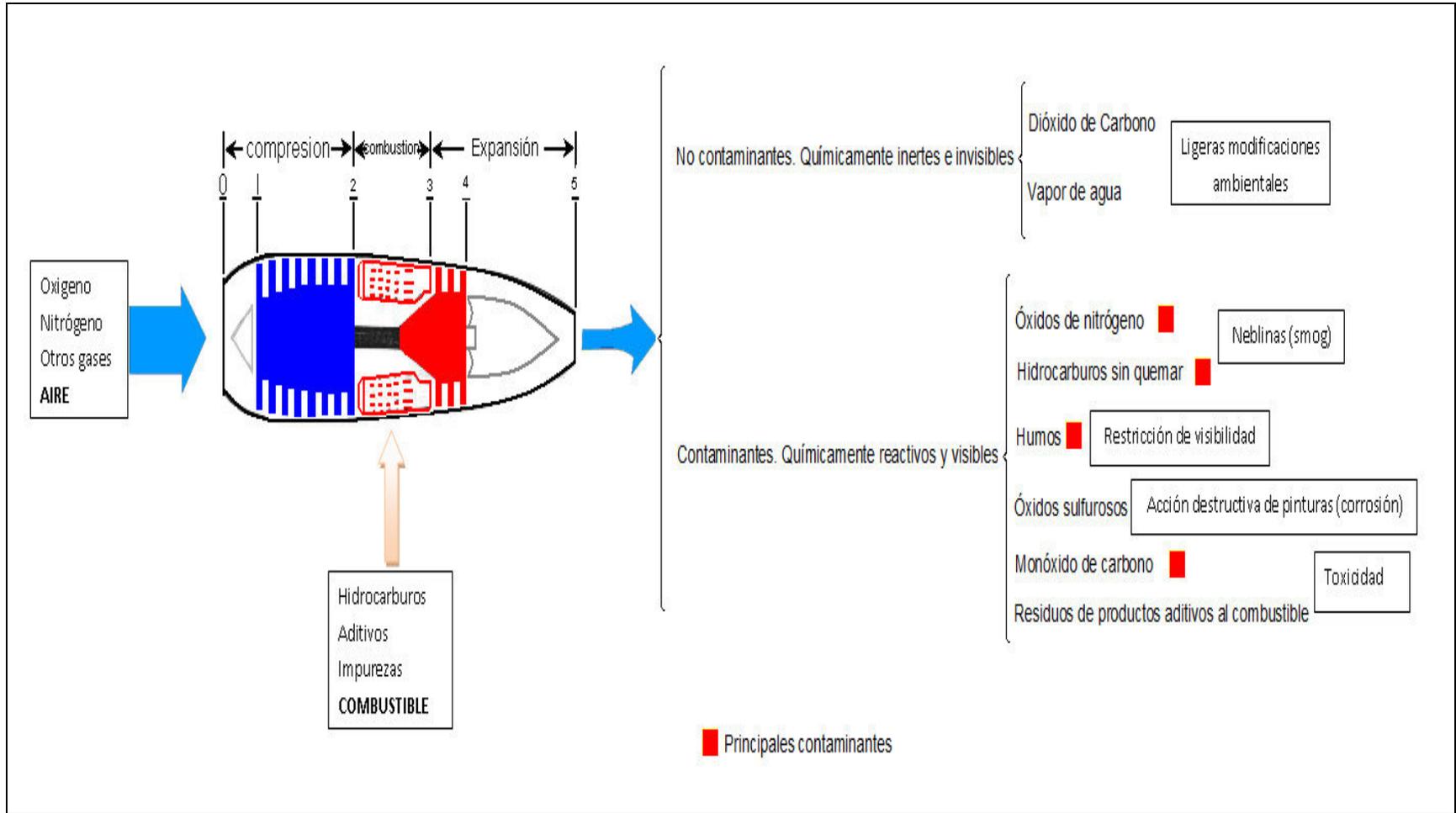


Figura 25. Admisión y gases de escape del motor a reacción. Elaborado por los Autores

3.5.1.1.2 Vapor de agua (H_2O). El vapor de agua emitido por las aeronaves subsónicas es liberado en su mayoría en la troposfera, donde es eliminado rápidamente por la precipitación en un intervalo de 1 ó 2 semanas aproximadamente (Cuesta, 2001). Cierta cantidad de las emisiones de vapor de agua es liberada a la estratosfera inferior donde se acumula formando concentraciones de gran tamaño. El vapor de agua es un gas de efecto invernadero, sus aumentos tienden a calentar la superficie de la tierra pero su efecto es menor en comparación con otras emisiones de las aeronaves, como por ejemplo el CO_2 y el NO_x .

En la producción de gases en el motor a reacción, el vapor de agua es el segundo gas de mayores proporciones; por cada gramo de la suma de los gases contaminantes principales ($NO_x + CO + CH$) se forman 50 gramos de vapor de agua.

Las estelas de condensación producidas por el vapor de agua emitido por las aeronaves, cubrieron aproximadamente el 0.1 % de la superficie de la tierra en 1992; su proyección al año 2050 tendrá una cobertura del 0.5%, lo que indica que su ritmo será más rápido que la tasa de crecimiento del consumo de combustible aeronáutico (IPCC, 1999). Esto se deberá a que el tránsito aéreo aumentará en la troposfera superior donde las estelas de condensación se forman preferiblemente, también al resultado de la mayor eficiencia en el uso del combustible de las aeronaves.

3.5.1.1.3 Óxidos de nitrógeno (NO_x). Los óxidos de nitrógeno son la suma de NO_2 y NO , donde estos últimos se encuentran en mayor proporción; son gases contaminantes muy difíciles de reducir. Los motores de las aeronaves son la única fuente contaminante en la alta atmósfera, aunque también pueden ser producidos estos gases en las pistas de los aeropuertos, cuando se operan los motores a máxima potencia. Los óxidos de nitrógeno al ser mezclados con los

hidrocarburos sin quemar originan nieblas las cuales pueden tener efectos alérgicos en las personas.

3.5.1.1.4 Hidrocarburos sin quemar. Cuando la luz solar incide sobre los hidrocarburos sin quemar, se forma gas metano que combinado con el ozono genera lo que se denomina “smog” el cual es la combinación de smoke (humo) y fog (niebla). Esta concentración es muy pequeña desde los años 80, en comparación con las concentraciones de NO_x y CO (Cuesta, 2001); esto es debido a los altos rendimientos de la combustión dada la eficiencia de los motores modernos. El rendimiento de la combustión en el régimen de despegue paso de 99.92% en 1972 a 99.98% en 1990 y en régimen de ralentí paso de 98.20% en 1972 a 99.30% en 1990.

3.5.1.1.5 Humos. La emisión en los motores a reacción de partículas de carbón sin quemar (hollín), generan estelas visibles que tienden a calentar la superficie de la tierra. La fuerza radiante directa ocasionada por los humos de las aeronaves no es relevante en comparación con las otras emisiones. Las cámaras de combustión de los motores han sido modificadas y mejoradas con el fin de aumentar la eficiencia de la combustión, permitiendo de esta manera que se reduzcan las emisiones visibles de humo.

3.5.1.1.6 Óxidos sulfurosos (SO_2). Las aeronaves provocan concentraciones muy menores de dióxidos de azufre en relación con las fuentes situadas en la superficie. El SO_2 expulsado en la tobera del motor, se combina con el vapor de agua dando lugar a la formación de ácido sulfúrico el cual a bajas alturas se disuelve con precipitación en forma de lluvia acida. Las partículas de sulfato reflejan la radiación y enfrían la superficie de la tierra, pero la fuerza radiante directa generada por estas partículas es muy pequeña comparada con las otras emisiones de las aeronaves; la acumulación de este tipo de partículas incrementan la formación de nubes y pueden cambiar las propiedades radiantes de las mismas.

3.5.1.1.7 Monóxido de carbono (CO). De todas las emisiones generadas por el motor, el monóxido de carbono es el producto más tóxico. Las concentraciones de este gas en las proximidades de los aeropuertos es comparada con las emisiones de automóviles en las ciudades; estos valores de contaminación son relevantes dadas las grandes superficies horizontales de los aeropuertos.

3.5.1.1.8 Residuos de productos aditivos al combustible. Cuando se adicionan aditivos al combustible, se generan productos tóxicos. Por ejemplo la inyección de agua al ser mezclada con el etanol ayuda a que la combustión sea más homogénea pero esto ocasiona residuos en poca proporción.

La tabla 1 indica el porcentaje de los productos de escape de los motores más representativos en la actualidad; en donde el motor a reacción posee las mayores concentraciones en cuanto a dióxido de carbono y las menores en otros contaminantes.

Tabla 1. Porcentajes de productos de emisión en motores. Motores de reacción

Admisión	Tipo de motor	Productos de emisión (%)
Aire y Combustible	Motor alternativo- ciclo Otto	Dióxido de carbono (36%)
		Vapor de agua (30%)
		Contaminantes (34%)
Aire y Combustible	Motor alternativo- ciclo Diesel	Dióxido de carbono (65%)
		Vapor de agua (30%)
		Contaminantes (5%)
Aire y Combustible	Motor a Reacción	Dióxido de carbono (70%)
		Vapor de agua (29%)
		Contaminantes (1%)

Fuente. Datos obtenidos de (Cuesta Álvarez, M, 2001)

3.6 Leyes y normas para el control de la contaminación ambiental ocasionada por motores a reacción.

Las leyes nacionales en cuanto al control de la contaminación ambiental ocasionada por motores a reacción son muy insipientes; como se mencionó en la sección 2.4.1 estas leyes están dedicadas a la contaminación acústica por parte de la Aeronáutica Civil de Colombia (RAC parte 11) y a la prevención y control de la contaminación del aire por parte de los ministerios de minas y energía, de la protección social y de ambiente, vivienda y desarrollo territorial.

La normatividad en Colombia en materia ambiental aparece con la creación del Ministerio del Medio Ambiente (ley 99 de 1993), en donde se reordena al sector público que se encargue de la gestión y conservación del medio ambiente y de los recursos naturales. Con esta misma ley se organiza el Sistema Nacional Ambiental (SINA) y se dictan otras disposiciones.

A continuación se enuncian los decretos, resoluciones y normas ambientales más relevantes en Colombia.

- Resolución 0005 de 1996. Reglamenta los niveles permisibles de emisiones contaminantes que deben tener las fuentes móviles.
- Decreto 02 de 1982. Se reglamenta parcialmente el título I de la ley 09 de 1979 en emisiones atmosféricas y las disposiciones sanitarias sobre emisiones atmosféricas.
- Decreto 948 de 1995. Se establecen las normas para la protección y control de la calidad del aire.
- Decreto 2206 de 1983. Se constituye el capítulo XVI para el control y sanciones sobre emisiones atmosféricas.

- Resolución 601 de 2006. Se estable la norma de calidad el aire o nivel de inmisión para todo el territorio nacional en condiciones de referencia.
- Resolución 0898 de 1995. Se regulan los criterios ambientales de calidad de los combustibles de los automotores.
- Norma técnica colombiana NTC 5385 Centros de Diagnóstico Automotor. ICONTEC 22 de Diciembre de 2006.
- Norma técnica colombiana NTC 4983 calidad del aire. Evaluación de gases de fuentes móviles a gasolina. Método de ensayo en marcha mínima – ralentí y velocidad crucero y especificaciones para los equipos empleados. ICONTEC 16 de Octubre de 2001.
- Resolución 910 del 5 de Junio de 2008. El Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, reglamentan los niveles permisibles de emisiones de contaminantes que deberán cumplir las fuentes móviles terrestres.

3.6.1 Leyes y normas internacionales. Las leyes y la normatividad para el control sobre las emisiones de gases en los motores a reacción internacionalmente sí se encuentran reglamentadas, para los explotadores (aerolíneas) y para los fabricantes.

A partir del objetivo fijado por el protocolo de Kioto, en donde se estableció reducir las emisiones de gases de efecto invernadero un 8% para el 2008; las emisiones de dióxido de carbono (CO₂) aumentaron por ejemplo del 21% en 1990 al 28% en el 2004. En el periodo comprendido entre 1992 y 2007 los gases emitidos por las aeronaves en la Unión Europea aumentaron un 89% , siendo el transporte aéreo uno de los más grandes responsables del aumento de emisiones contaminantes que generan el cambio climático (Deutsche Welle, 2007)

La Comisión de las Comunidades Europeas realizó en el año de 1999, un comunicado al concejo, al parlamento europeo y al comité económico y social y al comité de las regiones; que

se empezaría a realizar una política con el fin de reducir el impacto ambiental que ocasiona el sector aéreo. Un fragmento del resumen de dicho documento dice lo siguiente:(Comisión de las Comunidades Europeas, 1999)

El transporte aéreo es un sector en crecimiento y, por consiguiente, un sector importante para la economía de la Unión Europea. Pero la industria del transporte aéreo está creciendo a un ritmo más rápido que la capacidad actual de producir e introducir avances tecnológicos y operativos que reduzcan el impacto medioambiental en su origen. El impacto medioambiental global forzosamente aumentará ya que el desfase entre el rápido crecimiento de la actividad y la lenta introducción de mejoras medioambientales parece ser cada vez mayor en campos importantes como las emisiones de gases de invernadero. Esta tendencia es insostenible y debe invertirse. Por consiguiente, el objetivo a largo plazo debe ser mejorar el rendimiento medioambiental del transporte aéreo de forma que quede compensado el impacto medioambiental debido al crecimiento del sector.

La presente Comunicación analiza y determina por primera vez las formas en que la Comunidad Europea puede llevar a cabo una política coherente e integrada en el campo del transporte aéreo. A tal fin, es necesario complementar el uso de normas y reglas convenidas preferentemente a escala internacional con un sistema más efectivo de medidas regionales, nacionales y locales destinadas a acelerar la introducción de tecnologías y técnicas de explotación ecológicas para reducir las emisiones de ruido y de gases. Es así mismo importante que la Unión Europea defienda mejor sus intereses en la Organización de Aviación Civil Internacional (ICAO). (p.2).

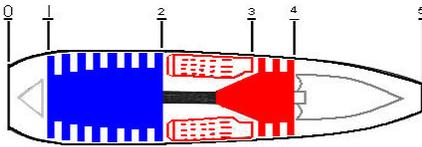
3.6.1.1 Leyes y normas ICAO sobre emisiones en motores a reacción. La Organización de Aviación Civil Internacional (ICAO), es una agencia de la Organización de las Naciones

Unidas la cual fue creada en 1944 con el fin de estudiar los problemas de la aviación civil internacional y de promover las leyes, normas y reglamentos de la aeronáutica mundial.

La ICAO se ocupa de la problemática del ruido y contaminación ambiental provocada por las aeronaves; su estructura para ejercer la reglamentación aeronáutica está dada por Anexos. La reglamentación para el control de emisiones y ruido se encuentra dada en el Anexo 16 – Protección del medio Ambiente. El volumen I de este anexo está dedicado a Ruido ocasionado por las aeronaves y el volumen II a las emisiones de los motores de las aeronaves.

En el volumen II del Anexo 16 de la ICAO, las emisiones de gases contaminantes de los motores deben cumplir con unos índices de emisión, los cuales estarán limitados por la cantidad generada en un ciclo de operación del motor, simulado en un banco de pruebas; este ciclo es un ciclo de despegue-aterrizaje del avión (Landing and Takeoff). En la tabla 2 se indica el control de gases contaminantes que realiza la ICAO.

Tabla 2. Control de gases contaminantes

CONTROL DE EMISIONES DE GASES CONTAMINANTES		
(Anexo 16 de ICAO – Refrendado en Noviembre de 1993)		
		
AVIONES SUBSONICOS		
Ciclo Despegue/Aterrizaje: LTO (Landing and Takeoff)		
(Simulado en Banco de Pruebas)		
$R_C = P_2/P_1$		Motores pequeños $R_C=20$ Motores medianos $R_C=25$
FASES DE VUELO	REGLAJE DE EMPUJE (E) % E máx.	TIEMPO DE LA PRUEBA (MIN)
Rodaje, marcha lenta (salida)	7%	19
Despegue (Takeoff)	100%	0.7
Ascenso (Climb)	85%	2.2
Aproximación (Approach)	30%	4.0
Rodaje, marcha lenta (llegada)	7%	7.0
CONTAMINANTE (en el intervalo del ciclo LTO)	Gramos por cada Kilonewton de empuje (KN). 1 KN= 102 Kg	
Hidrocarburos sin quemar (HC)	19.6	
Monóxido de Carbono (CO)	118	
Óxidos de Nitrógeno (NO _x)	40 + 2R _C Motores fabricados hasta el 31-12-95	
	32 + 1.6R _C Motores fabricados después del 31-12-95	

Fuente. Elaborado por los Autores

Los límites de las emisiones de NO_x, se destacan con una gran rigurosidad en la segunda edición del volumen II, publicada en Julio de 1993. De esta manera un motor que por ejemplo haya sido fabricado antes del 31 de Diciembre de 1995, cuya relación de compresión (R_C) sea de 35, posee una limitante de 110 gramos de NO_x por cada Kilonewton de empuje producido; por otra parte si se toma un motor el cual haya sido fabricado después del 31 de Diciembre de 1995 con la misma relación de compresión, no podrá sobrepasar 88 gramos de NO_x por cada Kilonewton de empuje producido en un ciclo LTO(Cuesta Álvarez, M, 2001)

La ICAO antes de publicar en 1975 su Anexo 16 – Volumen II, recomendaba controlar los humos (Smoke) bajo el documento de la EPA (Environmental Protection Agency) 40 CFR; el cual definía los índices de humos bajo un numero SN (Smoke Number) dado en la ecuación 5.

$$SN = 100 \left(1 - \frac{R_S}{R_W} \right) \quad (5)$$

Dónde: SN= Numero de Smoke

R_S= Reflexión del gas de escape (coeficiente)

R_W= Reflexión del aire limpio (coeficiente)

Este número o índice era función del porcentaje del empuje máximo (E_{max}), para los motores turbojet y turbofan o potencia máxima para los motores turbohélice; estos valores estaban en un rango del número entre 10 y 50, indicando que los valores menores del número eran para los grandes empujes o potencias y los valores elevados para los empujes o potencias menores respecto al valor máximo.

Hoy en día la ICAO mantiene el concepto de Número de Smoke y a partir de 1981 se utiliza la ecuación 6 para calcular dicho número.

$$SN = 83.6(F_{00})^{-0.274} \quad (6)$$

Dónde: SN= Numero de Smoke

F_{00} = Empuje Nominal del motor

Este número debe ser menor de 50 para que se encuentre bajo los rangos permisibles de contaminación según la ICAO; debe tenerse en cuenta que el empuje nominal (F_{00}), es el empuje de despegue máximo aprobado por la autoridad encargada de la certificación de la operación del avión. Para el caso de Colombia la Aeronáutica Civil aun no lleva este control.

El peso del Smoke condensado en forma de hollín es aproximadamente en la actualidad el 1% del índice correspondiente a los hidrocarburos sin quemar, lo que hace que esta producción sea relativamente baja (Cuesta Álvarez, M, 2001).

El control de gases contaminantes por parte de la ICAO en el ciclo LTO, es utilizado para la certificación realizando pruebas en el banco de corrida de motores; los tiempos que se deben utilizar en las pruebas deben concordar con los tiempos reales. La tabla 3 indica las diferentes fases de vuelo y los regímenes del motor para poder posteriormente calcular los índices de contaminación.

Tabla 3. Fases y regímenes de motor para la determinación de los índices de contaminación en el entorno de aeropuerto

FASE	TIEMPO	EMPUJE(E) – POTENCIA(P)
		$\% E_{\max} - P_{\max}$
Carreteo-Salida	5 minutos	7%
Despegue	1 minuto	100%
Aproximación	1 minuto	30%
Carreteo-Llegada	5 minutos	7%

Fuente. Datos obtenidos de (Cuesta Álvarez, M, 2001)

Las normas internacionales para el control de las emisiones contaminantes de los motores a reacción, tienen como propósito promover la uniformidad para implementar los requerimientos de certificación de las aeronaves en esta área. A continuación se enuncian las normas unificadas y relevantes en el tema de emisiones de motores a reacción.

- Normas FAR(Federal Aviation Regulation) parte 34
- Clean Air Act , secciones 232 y 233
- Normas EPA (Environmental Protection Agency) 40 CFR, parte 87
- ICAO Anexo 16, volumen II

4. Diseño Metodológico

4.1 Unidad de análisis y número de operaciones diarias en el aeropuerto El Dorado.

Para comenzar con el análisis es indispensable establecer la muestra a la cual se le realizara el estudio. Las aeronaves que entran y salen del Aeropuerto el Dorado, son en su mayoría aeronaves que utilizan motores de tipo turbofan, también existen aeronaves que utilizan motores turbohélice. Los aviones con motores recíprocos (a pistón), no son tomados en cuenta en el presente estudio ya que su número no es relevante. La población esta entonces limitada a las aeronaves que utilizan motores a reacción de tipo turbofan y turbohélice, fabricados después del 31-12-95, esto con el fin de aplicar las ecuaciones para el control de gases contaminantes emitido por la ICAO en su anexo 16. Cabe aclarar que la gran mayoría de las aeronaves que entran y salen del el aeropuerto El Dorado, poseen motores de última generación los cuales están dentro de la norma aplicada.

Los tipos de motores que se tomaron en cuenta para la toma de datos fueron los mencionados en la sección 2.7. Con la colaboración de las empresas Avianca S.A y Satena S.A, se solicitó acceder a los hangares donde se encuentran las aeronaves, de esta manera se aprovecharon los momentos en donde el grupo de mantenimiento hace las pruebas a dichos motores. (ver anexo A).

La tabla 4 muestra el motor analizado y las aeronaves de las compañías que lo utilizan.

Tabla 4. Aviones y compañías que utilizan los motores de análisis

Motor	Avión	Compañía
Turbofan CFM-56	A-321,A-320, A-319, A-318, A-340	Avianca, Iberia, Jet Blue, LAN, Air France, United Airlines
	B737	Copa Airlines, Aeroméxico, LAN, UnitedAirlines
Turbofan RR-Tren 700	A-330,	Avianca, Iberia, Air Canada
Turbohélice Pratt &Whitney PW 127M	ATR-42, ATR-72	Avianca,Satena

Fuente. Elaborado por los Autores

Los motores a reacción tanto turbofan como turbohélice utilizan combustible de aviación JET A-1, la ficha técnica de este combustible se especifica en el Anexo B.

Este combustible posee un poder calorífico ($Q_{net,p}$) de 43100 KJ/Kg y su composición química es de 13.92% H y 86.08% C, en peso (Saravanamuttoo, H., Rogers, G. y Cohen, H., 2001)

Las operaciones aeronáuticas de los aeropuertos están definidas como las salidas y llegadas de los aviones. La Aeronáutica Civil de Colombia entrega estos reportes diariamente en donde se registran las respectivas aerolíneas que realizan vuelos nacionales e internacionales, con el número de vuelos programados de cada una de ellas y con las salidas y llegadas reales de los aviones. En la página de internet de esta entidad (<http://www.aerocivil.gov.co/ServNavAerea/Paginas/OperacionesAereas.aspx>), se encuentran los reportes diarios de dichas operaciones aeronáuticas.

La tabla 5 muestra un resumen de las operaciones que son reales efectuadas en el mes de febrero de 2014. En el anexo C se muestra el reporte entregado el último día del mes de febrero de 2014 por la Aerocivil y la tabla resumen efectuada por los autores de los días de dicho mes para las aerolíneas nacionales.

Tabla 5. Resumen de operaciones aeronáuticas nacionales efectuadas en el mes de febrero de 2014 emitido por Aerocivil

Aerolínea	Vuelos programados	Salidas reales	Llegadas reales
AVIANCA	10688	-	-
LAN	3202	-	-
COPA	1650	-	-
SATENA	879	-	-
EASY FLY	600	-	-
VIVA COLOMBIA	562	-	-
TOTAL	17581	11607	11538

Fuente. Elaborado por los Autores

Las operaciones aeronáuticas registradas por La Aeronáutica Civil de Colombia, son las operaciones reales de las aerolíneas nacionales que pueden ser operaciones nacionales e internacionales como por ejemplo Avianca que realiza vuelos dentro y fuera del país.

El nuevo administrador del aeropuerto es la empresa OPAIN S.A. Esta empresa se dedica a administrar, modernizar, desarrollar comercialmente, expandir, operar y mantener el Aeropuerto Internacional El Dorado.

La empresa OPAIN S.A, entrega también un reporte en su página de internet (<http://www.elnuevodorado.com/estadisticas.html>) de las estadísticas de vuelo reportadas en el aeropuerto. Estas estadísticas se realizan cada trimestre; en este momento se tienen las estadísticas del primer trimestre del 2014 (ver anexo D).

La tabla 6 muestra un resumen de las operaciones programadas efectuadas por las aerolíneas en el primer trimestre de 2014.

Tabla 6. Resumen de operaciones aeronáuticas nacionales e internacionales efectuadas en el primer trimestre de 2014 emitido por OPAIN S.A

Mes	Operaciones aéreas	Operaciones aéreas	Total operaciones
	pasajeros y carga - llegadas	pasajeros y carga - salidas	aéreas
Enero	11409	11453	22862
Febrero	10169	10248	20417
Marzo	10941	10992	21933
Total	32519	32693	65212

Fuente. Elaborado por los Autores

Teniendo en cuenta el número de operaciones registradas en el Aeropuerto El Dorado, se puede realizar un promedio diario para el mes de Febrero de 2014 de 827 operaciones, según los estadísticos de la Aeronáutica Civil de Colombia; y de 729 operaciones, según los estadísticos de la empresa OPAIN S.A. Se debe tener en cuenta que los registros de la Aeronáutica Civil de Colombia son tomados de las operaciones reales y que los de la empresa OPAIN S.A, son tomados de las operaciones programadas. El promedio se realizó de la siguiente manera:

$$N\#Operaciones\ Diarias = \frac{Total\ Operaciones\ Mes}{Numero\ de\ Dias}$$

$$N\#Operaciones\ Diarias = \frac{23145}{28} = 827\ Operaciones. \quad AEROCIVIL$$

$$N\#Operaciones\ Diarias = \frac{20417}{28} = 729\ Operaciones. \quad OPAIN\ S.A$$

Como se mencionó anteriormente las operaciones registradas por Aerocivil, son las operaciones reales, es decir las operaciones que se dan en el transcurso del día, estas operaciones pueden ser mayores que las programadas ya que pueden existir vuelos adicionales por demanda de pasajeros o por demanda de carga. En el presente proyecto se tomara como base del estudio las operaciones reales registradas por la Aeronáutica Civil de Colombia.

4.2 Tipo de funcionamiento y régimen de trabajo de los motores

Las aeronaves en el aeropuerto el Dorado, están saliendo y llegando desde las 6:00 a.m hasta las 11:00 p.m, estas salidas y llegadas están registradas como vuelos comerciales de pasajeros; los vuelos de carga pueden darse en menor número después de las 11:00 p.m hasta las 5:00 a.m del siguiente día. En el anexo C se muestra para el día 28 de febrero este comportamiento analizado por Aerocivil denominado salidas reales y llegadas reales hora por hora.

Como se mencionó en la sección 3.6.1.1, los motores de los aviones poseen un ciclo operativo, denominado ciclo de despegue-aterrizaje (Landing and Takeoff). Este ciclo también llamado LTO, se especifica en los siguientes regímenes de trabajo que lo conforman:

- Carreteo –llegada: Es el tiempo utilizado entre el aterrizaje y el apagado de los motores, también es el tiempo que transcurre entre el encendido de los motores y el despegue de la aeronave (carreteo- salida).

- Despegue: es el tiempo en donde se alcanza la máxima potencia del motor, la aeronave alcanza aproximadamente 305 metros con respecto al suelo.

- Ascenso: es la fase de vuelo después del despegue, termina cuando la aeronave alcanza el vuelo crucero.

- Aproximación: es la fase de vuelo en donde la aeronave desciende aproximadamente hasta 15 metros y después aterriza.

En la tabla 3 se muestran los tiempos estipulados para estos regímenes de trabajo de los motores.

Un ciclo LTO corresponde al aterrizaje y despegue de los aviones; este se puede dar de manera no consecutiva ya que puede darse que existan más despegues que aterrizajes o viceversa.

Teniendo en cuenta que los aviones del presente estudio poseen dos motores cada uno y que las operaciones aéreas en el aeropuerto se promediaron dando un valor de 827 diarias; se puede afirmar que 1654 motores operan diariamente en el Aeropuerto El Dorado entre entradas y salidas de aeronaves.

4.2.1 Aeronaves que transitan en el Aeropuerto el Dorado. Las compañías aeronáuticas que trabajan en el Aeropuerto El Dorado, utilizan diferentes tipos de avión, teniendo en cuenta las distancias recorridas, el número de pasajeros, la carga a transportar, las rutas establecidas y por supuesto la demanda; todo esto es necesario para establecer las frecuencias de vuelo. De esta manera el tipo de motor y su desempeño también son de vital

importancia para cumplir con los itinerarios. La tabla 7 indica la flota en uso que poseen las aerolíneas del aeropuerto y los motores utilizados; esta información fue recabada de las respectivas páginas de internet de las aerolíneas, en donde se muestra la flota y el número de aviones.

Tabla 7. Flotas de las aerolíneas y motores utilizados

AEROLINEA	FLOTA	NUMERO	MOTOR
AVIANCA	Airbus A330	10	Turbofan- RR Trent 700
	Airbus A321	5	Turbofan-CFM56-5B
	Airbus A320-200	51	Turbofan-CFM56-5B
	Airbus A319-100	21	Turbofan-CFM56-5B
	Airbus A318-100	10	Turbofan-CFM56-5B
	Embraer 190	12	Turbofan-GE CF34-10E
	ATR - 42	8	Turbohélice PW 127
	ATR - 72	4	Turbohélice PW 127
	Cessna 208	10	Turbohélice PW PT6A
	Boeing 767-200F(carga)	3	Turbofan-GE CF6-80A
	Boeing 767-300F(carga)	1	Turbofan-GE CF6-80A
Airbus A330-200F(carga)	2	Turbofan- RR Trent 700	
SATENA	Embraer ERJ 170	2	Turbofan-GE CF34-8E
	Embraer ERJ 145	2	Turbofan- RR AE3007
	ATR - 42	2	Turbohélice PW 127
	ATR - 72	2	Turbohélice PW 127
LAN	Airbus A320	8	Turbofan-CFM56-5B
	Boeing 737-700	1	Turbofan-CFM56-7B

	Boeing 767-300ER	3	Turbofan-GE CF6-80C2
	Dash 8Q-200	5	Turbohélice PW 123C/D
COPA	Boeing 737-700	4	Turbofan-CFM56-7B
	Embraer 190AR A	3	Turbofan-GE CF34-10E
	Embraer 190AR B	11	Turbofan-GE CF34-10E
EASYFLY	BAe Jetstream 41	11	Turbohélice Garret TPE331
VIVA COLOMBIA	Airbus A320-200	5	Turbofan-CFM56-5B
AIRFRANCE	Airbus A340-300	3	Turbofan-CFM56-5B
AEROLINEAS ARGENTINAS	Boeing 737-800	1	Turbofan-CFM56-7B
AEROGAL	Boeing 737-200	1	Turbofan-CFM56-7B
AIR CANADA	Boeing 767-300	1	Turbofan-GE CF6-80C2
AMERICAN	Boeing 767-200	2	Turbofan-GE CF6-80C2
AIRLINES	Boeing 757-200	1	Turbofan-RR RB211
CONTINENTAL AIRLINES	Boeing 737-800	3	Turbofan-CFM56-7B
CUBANA	Airbus A320-200	1	Turbofan-CFM56-5B
DELTA	Boeing 757-200	2	Turbofan-RR RB211
IBERIA	Airbus A340-300	2	Turbofan-CFM56-5B
JETBLUE	Airbus A320-200	2	Turbofan-CFM56-5B
LACSA	Airbus A320-200	2	Turbofan-CFM56-5B
LUFTHANSA	Airbus A340-600	3	Turbofan- RR Trent 560
SPIRIT	Airbus A319-100	2	Turbofan-CFM56-5B

Fuente. Elaborada por los Autores

4.3 Ficha técnica de los motores y certificación ambiental

El fabricante de los motores a reacción cuando vende un motor, entrega a su cliente (aerolíneas comerciales) un respaldo técnico y de capacitación, el cual se ve reflejado en un servicio de soporte a través de la vida útil del mismo. Estas empresas prestan el servicio de venta de repuestos, capacitación de personal técnico y mantenimiento de servicios mayores. Junto con el motor se entregan los manuales de mantenimiento y operación, en ellos se incluyen todos los procedimientos técnicos y operativos del motor para que este obtenga un buen desempeño.

Los motores que más utilizan las aeronaves en Colombia son los motores de tipo turbofan y turbohélice; a continuación se describirá la ficha técnica básica de los motores en estudio.

Motor Turbofan CFM56-5B

- Fabricante: CFM (unión entre Snecma y General Electric)
- Cámara de combustión: Anular
- Peso: 2381 Kg
- Largo: 2.94 m
- Alto: 2.14 m
- Ancho: 1.97 m
- Empuje al despegue a nivel del mar: 142336 N
- Relación Bypass: 5.4:1
- Flujo másico de aire: 428 Kg/s
- Relación de presión total: 32.6
- Empuje máximo en crucero: 26000 N
- Consumo específico de combustible típico: 0.040 Kg/N h

Motor Turbofan RR Trent 700

- Fabricante: Rolls-Royce
- Cámara de combustión: Anular
- Peso: 6160 Kg
- Largo: 5.63 m
- Alto: 2.47 m
- Ancho: 1.37 m
- Empuje al despegue a nivel del mar: 300300 N
- Relación Bypass: 5.15:1
- Empuje máximo en crucero: 268700 N
- Consumo específico de combustible típico: 0.0563 Kg/N h
- Relación de presión total: 34

Motor Turbohélice Pratt & Whitney 127M

- Potencia: 2750 SHP
- RPM: 1200
- Largo: 2.13 m
- Alto: 0.838 m
- Ancho: 0.679 m
- Peso: 481.7 Kg
- Capacidad total del tanque de aceite: 19.3 L
- Máxima Temperatura Intermedia de turbina: 800°C
- Consumo específico de combustible típico: 0.295 Kg/Kwh
- Relación de presión total (Dos etapas de compresores centrífugos):

4.3.1 Certificación ambiental. Los fabricantes certifican ante los organismos de aviación internacional como lo es la FAA (Federal Aviation Administration) y la EASA (European Aviation Safety Agency) sus motores; estos organismos son los que regulan las normas y directivas de aeronavegabilidad tanto en América como en Europa, los dos se ciñen a la normatividad internacional emitida por la ICAO desde el punto de vista ambiental. Como se mencionó en la sección 3.6.1.1, la ICAO reglamenta el control de emisiones y ruido en motores en su anexo 16 (Protección del medio ambiente-Vol II).

El proceso de certificación de los motores ante estos organismos se realiza por medio de un documento llamado ``Certificado Tipo'', este es un documento otorgado y avalado por los anteriormente mencionados, en donde se especifican las características principales del diseño del elemento aeronáutico llámese aeronave, motor o producto aeronáutico; el documento certifica que los estándares de aeronavegabilidad y las normas para el buen funcionamiento del elemento son satisfactorias en el país donde se exija.

Los fabricantes de los motores en estudio, certifican que sus productos están bajo los estándares de calidad y bajo la normatividad internacional como el anexo 16 de la ICAO – Vol II, el cual habla de emisiones de los motores de las aeronaves; para ello se certifican con los certificados tipo emitidos por las direcciones de aeronáutica civil de los países. Las direcciones más importantes son las ya mencionadas FAA y EASA. Gracias a los avances tecnológicos en los motores a reacción, los fabricantes en sus páginas de internet muestran brochures de las características principales de estos y de las cualidades ofrecidas en cuanto a la protección del medio ambiente.

Para el motor turbofan CFM56-5B (ver figura 26), la Agencia de Seguridad de Aviación Europea (EASA), emitió el día 18 de mayo del 2009, el certificado tipo en donde se avalan las

minimas condiciones o requerimientos de protección ambiental conforme al anexo 16 de la ICAO – Vol II; estas se encuentran en la parte II certificaciones básicas, numeral 1.5 (ver anexo E).



Figura 26. Motor Turbopan CFM56-5B. Datos obtenidos de (CFM, 2012)

En su página de internet (www.cfmaeroengines.com), el fabricante de este motor menciona las siguientes cualidades:

- El CFM56-5B, fue el primer motor en introducir el concepto de doble cámara de combustión anular (DAC) a mediados de la década de los 90. Esta tecnología reduce las emisiones de óxidos de nitrógeno (NO_x) en un 45%.
- Proporciona a los operadores desde el 2007, mejoras significativas en el consumo de combustible, niveles de emisiones y costos de mantenimiento.
- Las nuevas configuraciones del CFM56-5B ofrecen un 0.5% mejor eficiencia de combustible y gastos de mantenimiento en un 1% menos.
- Primero en usar ultra bajas emisiones de combustión en servicios comerciales.
- Las emisiones de CO_2 , NO_x y ruido de las aeronaves deben reducirse para satisfacer las expectativas del mundo. Los nuevos motores CFM56-5B cumplirán con esas expectativas

mediante la reducción de las emisiones de CO₂ y NO_x en un 15 % y 50% respectivamente; así como de la reducción de la huella de ruido en un 75% con respecto a las aeronaves de hoy en día.

- CFM contará con una tecnología de combustión avanzada, la cual ha estado desarrollando durante casi una década, con el fin de disminuir las emisiones de NO_x en un 60%; esto disminuiría considerablemente en el motor los gases de efecto invernadero.

Para el motor turbofan RR Trent 700 (ver figura 27), la Agencia de Seguridad de Aviación Europea (EASA), emitió el día 29 de noviembre del 2013, el certificado tipo en donde se avalan las mínimas condiciones o requerimientos de protección ambiental conforme al anexo 16 de la ICAO – Vol. II; estas se encuentran en la parte II Certificaciones Básicas, numeral 1. (ver anexo F).



Figura 27. **Motor Turbofan RR Trent 700.**Datos obtenidos de (Rolls Royce, 2013)

En su página de internet (www.rolls-royce.com), el fabricante de este motor menciona las cualidades que posee en función de la protección ambiental; estas cualidades son las siguientes:

- Con el empuje más alto en servicio de 72000 Libras, el Trent 700 ofrece el mejor rendimiento de despegue y el mejor potencial de ingresos para los operadores del A330.

- Gracias al diseño único de tres ejes lo que significa menos etapas que los motores de la competencia; el motor ofrece bajos costos de mantenimiento, menor peso y mejor desempeño. El diseño de los alabes del fan del Trent700 contribuye a la disminución del ruido.

- El Trent 700 ofrece mejoras en la eficiencia del combustible, reduciendo su consumo en 1% con respecto a los modelos anteriores, reduciendo de esta manera los costos de operación.

- Con el consumo de combustible más bajo del ciclo de vida, las emisiones acumulativas más bajas y los niveles de ruido más bajos; el Trent 700 tiene el mejor desempeño ambiental de cualquier motor en el A330.

Para el motor turbohélice Pratt&Whitney 127M (ver figura 28), la Agencia de Seguridad de Aviación Europea (EASA), emitió el día 20 de diciembre del 2007, el certificado tipo en donde se avalan las mínimas condiciones o requerimientos de protección ambiental conforme al anexo 16 de la ICAO – Vol II; estas se encuentran en la parte II Certificaciones Básicas, numeral 2.5. (ver anexo G).



Figura 28. **Motor Turboprop Pratt & Whitney.** Datos obtenidos de (PWC, 2012)

En su página de internet (www.pwc.ca/en/engines/pw127m), el fabricante de este motor menciona las cualidades que posee en función de la protección ambiental; estas cualidades son las siguientes:

- El motor PW127M es un motor de bajo consumo de combustible para rutas más cortas (350 millas o menos).
- Las aerolíneas que utilizan la serie PW100 consumen entre 25 % y 40% menos combustible y producen hasta un 50% menos de emisiones de CO₂, que los aviones regionales de tamaño similar.
- La familia PW 100 ofrece a las compañías y pasajeros; fiabilidad, durabilidad y economía de operación; además de ofrecer también el menor consumo de combustible y las menores emisiones de carbono y gases de efecto invernadero.
- El motor PW 127M incorpora las últimas tecnologías avanzadas y aprobadas que han demostrado que el motor es el más ecológico de la industria aérea, para las rutas cortas atendidas por las aerolíneas regionales.
- El motor PW 127 posee una cámara de combustión de flujo reverso, la cual contribuye a generar bajas emisiones, una alta estabilidad en la combustión, un fácil encendido y una gran durabilidad.
- El motor PW 127M desarrolla una velocidad de salida en el eje de 1200 a 1300 rpm para disminuir el ruido en la hélice.

Como se mencionó anteriormente al inicio de esta sección, los fabricantes certifican sus motores en todas las áreas con los departamentos de aeronáutica civil de los países como lo son la FAA y EASA; además de certificarse también con la ICAO desde el punto de vista ambiental con respecto al control de emisiones. En Colombia la Aeronáutica Civil lleva a cabo esta

certificación de los motores mediante un acuerdo bilateral, el motor puede ser instalado en una aeronave certificada sí el motor a instalar tiene un certificado de aeronavegabilidad expedido por la autoridad aeronáutica de origen; esto certifica que el motor de la aeronave posee condiciones de aeronavegabilidad según las reglas del país de certificación y que operará de forma segura, además de que fue sometido por el fabricante a un taller certificado para una verificación de funcionamiento final (RAC parte 9, 2014)

De todas formas Aerocivil de Colombia no posee un reglamento sobre emisiones de gases, esta regulación la hace conforme el certificado tipo que presente el fabricante en el país.

4.4 Tipo de investigación

Teniendo en cuenta que la investigación requiere utilización y conocimientos específicos en el área de la propulsión y emisiones de gases, así como el manejo de parámetros matemáticos, estadísticos y mediciones para la obtención de resultados; esta investigación está clasificada como investigación aplicada tipo experimental.

La investigación se centra en el análisis porcentual de las partículas por millón de los gases producto de la combustión en los motores a reacción, cuando estos se encuentran en funcionamiento a un régimen de marcha mínima o ralentí. El análisis pretende determinar los valores de contaminación ambiental emitidos por estos motores y sugerir a los entes regulatorios como la Aerocivil, procedimientos para reducir los niveles de contaminación y polución generados en el Aeropuerto El Dorado.

Teniendo en cuenta los parámetros y la forma o procedimiento de análisis que se desarrollará; el proyecto será estructurado bajo una investigación cuantitativa diacrónica o

longitudinal ya que la evolución del fenómeno se estudiará en un periodo dado de tiempo, el cual será más o menos continuo.

La investigación también se clasifica dentro de una investigación experimental, debido a la serie de mediciones que se realizará a los motores con respecto a los gases emitidos. Tomando como variable independiente controlada, los contenidos porcentuales de gases de efecto invernadero, los cuales serán tabulados para la obtención de los números de Smoke y así determinar si sobrepasan o no los límites establecidos por la ICAO. El análisis se realiza a un grupo experimental de motores, durante un tiempo establecido para extraer un número suficiente de datos a analizar.

4.5 Procedimiento

La metodología para el desarrollo del proyecto fue una metodología de carácter analítico y experimental, realizada a motores a reacción tipo turbofan y turbohélice que tienen las aeronaves que operan en el aeropuerto El Dorado de la ciudad de Bogotá. Sobre estos motores se realizó un procedimiento para medir las emisiones de gases contaminantes, con el fin de analizarlas bajo las normas internacionales establecidas por la ICAO en su anexo 16.

Se realizó un test de seguimiento con el fin de analizar los datos obtenidos y de esta forma evaluar los impactos ambientales que se generan en la zona del aeropuerto El Dorado.

Durante el desarrollo de la investigación se establecieron dos aspectos importantes; uno dedicado a la fundamentación básica en donde se recopiló la información de los conceptos de las partes y funcionamiento de los motores a reacción, sostenibilidad ambiental, efecto y gases de invernadero producidos por estos motores y normatividad ambiental dedicada al control de las

emisiones. El segundo aspecto fue la aplicación de las técnicas de medición y análisis sobre los motores escogidos; los datos arrojados por las pruebas fueron tabulados y analizados para determinar los grados de contaminación por la emisión de los gases producto de la combustión interna de estos motores.

Se realizó inicialmente una prueba piloto en un motor turbohélice PT6-A, propiedad de la Fundación Universitaria Los Libertadores, el cual fue comprado como equipo de laboratorio e instrucción para realizar pruebas reales en este tipo de motores. Este equipo fue prestado en varias ocasiones para realizar tomas de datos con el fin de obtener parámetros de funcionamiento y gases emitidos muy semejantes a los de los motores seleccionados del aeropuerto, ya que el combustible utilizado es el mismo JET A (ver figura 29).



Figura29.MotorTurbohélicePratt&Whitney PT6-A.Los Autores

En el análisis de los datos obtenidos se utilizaron técnicas comparativas y descriptivas; en cuanto a la recolección de la información se utilizaron instrumentos como fichas de recolección de datos, tomando como referencias la ficha que utiliza la ICAO (ver anexo P) y la hoja de datos en Excel que entrega el software fleetMANAGER utilizado por el equipo analizador de gases GAS ALERT MAX XT. (ver anexo H)

4.5.1 Tamaño de la muestra. Para establecer el tamaño de la muestra se realizó el siguiente trabajo de campo, en donde se seleccionaron los tres tipos de motores a analizar:

Selección de los Motores. En Colombia actualmente las aerolíneas han adquirido aviones de última generación; estas aeronaves también utilizan motores de última generación, los cuales entregan los máximos rendimientos operativos. Los motores de las aeronaves que operan en el aeropuerto El Dorado son motores turbofan y turbohélice. Los motores turbofan son utilizados en aviones que tienen un mayor rango de vuelo (distancia recorrida) o transportan una gran cantidad de pasajeros y carga, por otro lado los aviones que utilizan motores turbohélice son utilizados para vuelos regionales (rutas cortas) o transportan una cantidad mínima de pasajeros y carga. Teniendo en cuenta estas limitaciones se escogieron tres motores que son:

- CFM56-5B: utilizado en aviones A-321, A-320, A-319, A-318, A-340, B737. Donde la cantidad de pasajeros en estos aviones es de 100 en adelante, convirtiéndose en un motor muy comercial y utilizado a diario en el aeropuerto El Dorado.
- RR Trent 700: utilizado en aviones A330 los cuales transportan una cantidad de pasajeros de 252 aprox. Estas aeronaves son ideales para vuelos de medio y largo alcance (trasatlánticos).
- PW 127M: utilizado en aviones ATR-42 y ATR-72; estos aviones son utilizados en vuelos regionales de 563Km o menos y transportan hasta 68 pasajeros.

Estos tres tipos de motores son muy utilizados por la aerolínea Avianca en su flota de aviones. La empresa Satena, utiliza los motores PW 127M en los aviones ATR , en razón a que esta empresa está muy dedicada a los vuelos regionales. Debido a lo anterior se seleccionaron estas dos aerolíneas para realizar las mediciones y toma de datos pertinentes, solicitando a dichas empresas un permiso especial como se mencionó en la sección 4.1

Medición de Gases Producidos en la Combustión. El equipo utilizado para el proceso de la medición de gases es el equipo portátil GAS ALERT MAX XT, este equipo utiliza lo último en tecnología de sensores para proporcionar una detección de gases tóxicos, combustibles y los peligros de oxígeno. El equipo monitorea de forma fiable 4 gases, sulfuro de hidrogeno (H_2S), monóxido de carbono (CO), oxígeno diatómico (O_2) y gas combustible (CH_4) con la ayuda de una bomba motorizada para un muestreo inteligente a distancia, ideal para espacios reducidos.

El equipo funciona accionando internamente la bomba de vacío, la cual arrastra los gases de escape cuando salen de la tobera del motor a través de una sonda hacia el interior del equipo; este analiza los gases por el método de absorción infrarroja no dispersiva. Los elementos del equipo para el muestreo son: filtros para el material particulado, filtro de la bomba, filtro de humedad, alarma sonora, 3 sensores de luz infrarroja y un sensor de oxígeno y una sonda de muestreo con mangueras de punta doble.

La tabla 8 muestra las características de la variable para poder seleccionar la población y la muestra.

Tabla 8. Características de la variable

Características	
Tipo de Motor	Turbofan CFM 56-5B
	Turbohélice PW127M
Actividad	Transporte Aéreo
Combustible	JET A1
Aeropuerto	El Dorado (Bogotá D.C)
Aerolíneas	Avianca S.A
	Satena S.A

Fuente. Elaborada por los Autores

Unidad de Trabajo. Es de vital importancia determinar el tamaño de la muestra estadística, la cual se encuentra contenida en una población o universo. Antes de la investigación este proceso se realiza para dar un grado de precisión óptimo al análisis; en ocasiones la precisión se ve afectada por factores tales como el presupuesto y disponibilidad de elementos. En el proceso denominado muestreo se definen las observaciones necesarias para estudiar la distribución de algunas características de la población; cuando se observa un subconjunto de dicha población se llama muestra. Esta muestra debe ser representativa, proporcionando ventajas con características económicas y prácticas, ofreciendo también información que sea oportuna, eficiente y exacta; permitiendo de esta manera hacer conclusiones o afirmaciones que incidan sobre la población a analizar.

Tamaño Óptimo de la Muestra. Teniendo en cuenta que se utilizará un analizador de gases, el cual es un instrumento que realiza mediciones de naturaleza continua para determinar el

número de partículas por millón de los gases; la ecuación a utilizar para calcular el tamaño de la muestra propuesta por (Martinez Bencardino,C., 2003) es la ecuación 7:

$$n = \frac{Z^2 S^2}{E^2} \quad (7)$$

Dónde:

n= Tamaño de la muestra

Z= Nivel de confianza

S= Desviación típica

E= Error de estimación

Para determinar el nivel de confianza (Z), es necesario definir un porcentaje de certeza ya que estudiar toda la población sería muy complejo debido a la disponibilidad de las compañías y los altos costos; por tal motivo es válido tomar un porcentaje de certeza menor del 100% para una muestra determinada como es el de nuestro caso. En la práctica se desea tener un porcentaje de certeza óptimo más no exacto, frecuentemente se utiliza un 95%, el cual representa un nivel de confianza Z= 1.96.

En la Tabla 9 se muestran los niveles de confianza (Z) y los errores (E), según los porcentajes de certeza.

Tabla 9. Tabla para determinar el nivel de confianza y el error, según el porcentaje de certeza

Certeza (%)	Z	Z ²	E	E ²
99	2.576	6.63	0.01	0.0001
98	2.33	5.42	0.02	0.0004
97.5	2.24	5.01	0.025	0.000625

Tabla 9 (continua)

Certeza (%)	Z	Z²	E	E²
95	1.96	3.84	0.05	0.0025
94	1.88	3.53	0.06	0.0036
93	1.81	3.27	0.07	0.0049
92	1.75	3.06	0.08	0.0064
91	1.69	2.85	0.09	0.0064
90	1.65	2.72	0.10	0.01
85	1.46	2.13	0.15	0.0225
80	1.28	1.63	0.20	0.04
70	1.10	1.21	0.30	0.09
62.27	1.00	1	0.37	0.1369
50	0.6745	0.45	0.50	0.25

Fuente. Elaborada por los Autores

El error de estimación es el que se está dispuesto a asumir para determinar un valor exacto de la muestra. Comúnmente se selecciona un valor del 5%.

La desviación típica (S) es elevada al cuadrado, con el fin de convertirla en la varianza (S²), enunciada en la ecuación 8.

$$S^2 = \frac{\sum(X_i - \bar{X})^2}{n} \quad (8)$$

Dónde:

S²= Varianza

X_i = Datos no agrupados arrojados por el instrumento en la toma

\bar{X} = Media aritmética en una toma de datos

n = Numero de datos en una toma

Para definir el tamaño de la muestra es necesario que la información sea representativa, valida y confiable con los mínimos costos posibles; lo que indica que el tamaño de la muestra se limita según los objetivos propuestos, los recursos y disponibilidad de los aviones así como de las características de la población y del tiempo permitido para las mediciones por parte de las aerolíneas.

Teniendo en cuenta que en el aeropuerto El Dorado, se generan aproximadamente 827 operaciones diarias y que existen 222 aviones de las aerolíneas en el aeropuerto según la tabla 7; se concluye que 1654 motores operan diariamente y que existen 444 motores dado el número de aviones de las aerolíneas. Gracias a estos análisis básicos se define inicialmente el tamaño de la población.

Según el estudio preliminar realizado en el aeropuerto El Dorado, 827 operaciones diarias se efectúan; esto indica que un avión puede salir o entrar varias veces y por ende sus motores con respecto a las frecuencias de vuelo de cada compañía. Como el número de operaciones es 827 es decir que en el aeropuerto entran y salen aviones 827 veces al día y que cada avión posee dos motores; se afirma entonces que 1654 veces funcionan los motores, durante las operaciones diarias de los aviones en el aeropuerto.

La población a analizar sin embargo para el estudio, es el número de datos a tomar con el equipo por motor; teniendo en cuenta que la naturaleza de las mediciones es de carácter continuo, es necesario realizar una distribución probabilística continua.

El tamaño de la muestra representativa a estudiar, con la cual se evaluará el impacto ambiental que ocasionan los motores de los aviones en Bogotá, utilizando la ecuación de muestreo, se determina de la siguiente forma. Se utilizarán los valores óptimos con márgenes de error mínimos para hallar un tamaño ideal y se asumirá la desviación del monóxido de carbono (CO), la cual fue la mayor desviación calculada según los datos obtenidos por el instrumento en la prueba piloto efectuada en el motor PT6-A (ver tabla 15).

Parámetros a considerar:

X_i = Datos obtenidos de CO por el equipo en la prueba piloto

\bar{X} = Media aritmética de los datos obtenidos de CO por el equipo en la prueba piloto

n = Numero de datos en una toma de la prueba piloto

Con referencia a los datos de la columna de PPM y de la columna del promedio para el CO mostrados en la tabla 15, se determina el valor de $X_i - \bar{X}$. En la prueba piloto para el CO se tomaron 24 datos cuya media aritmética fue de 28.46 PPM.

$$\begin{aligned} \sum(X_i - \bar{X})^2 &= (12-28.46)^2 + (15-28.46)^2 + (25-28.46)^2 + (35-28.46)^2 + (31-28.46)^2 + \\ &(29-28.46)^2 + (32-28.46)^2 + (35-28.46)^2 + (29-28.46)^2 + (34-28.46)^2 + \\ &(30-28.46)^2 + (29-28.46)^2 + (30-28.46)^2 + (33-28.46)^2 + (34-28.46)^2 + \\ &(30-28.46)^2 + (24-28.46)^2 + (29-28.46)^2 + (33-28.46)^2 + (29-28.46)^2 + \\ &(25-28.46)^2 + (24-28.46)^2 + (27-28.46)^2 + (29-28.46)^2 = \mathbf{733.95} \end{aligned}$$

Reemplazando en la ecuación 8 se obtiene el valor de la varianza (S^2).

$$S^2 = \frac{\sum(X_i - \bar{X})^2}{n} = \frac{733.95}{24}$$

$$S^2 = 30.58$$

Cuando la Certeza es del 95%, el valor del nivel de confianza (Z) será de 1.96 (tabla 9); el error de estimación (E) se asumirá como el 5% para el promedio. Reemplazando en la ecuación 7 se obtiene el valor de la muestra (n).

$$E = (0.05)(28.46) = 1.423$$

$$n = \frac{(1.96)^2(30.5)}{(1.423)^2}$$

$$n = 58$$

Esto indica que se deben tomar 58 datos por motor con el analizador de gases para tener una certeza del 95%. Este valor es un valor ideal ya que el margen de error es muy mínimo.

Como se mencionó anteriormente, el tamaño de la muestra para el presente proyecto se limita demasiado debido a la disponibilidad de los aviones; esto se debe en realidad al tiempo que permiten las compañías para hacer este tipo de pruebas. Para el presente caso se solicitó a las empresas Avianca y Satena la realización de las pruebas pero la limitante fue el desarrollo de las mismas solamente en un número mínimo de motores. Los inconvenientes que se tuvieron fueron los permisos, el tiempo de las mediciones y los temas de seguridad, tanto para toma de datos como para el acceso a los hangares, ya que los motores son encendidos a primeras horas de la mañana y el personal que debe estar en la rampla solo debe ser el de las compañías.

Teniendo en cuenta que el combustible para los motores a reacción es el mismo se puede realizar una repartición de toma de datos por motor; es decir 12 pruebas en 12 motores de la siguiente manera:

- Cuatro tomas de datos en Cuatro motores CFM56-5B
- Cuatro toma de datos en Cuatro motores PW 127M

- Cuatro toma de datos en Cuatro motores RR Trent 700

4.5.2 Prueba piloto. Como se mencionó en la sección 4.5, para las pruebas iniciales o pruebas piloto se utilizó el motor turbohélice PT6-A; este es un motor real que opera bajo las mismas condiciones que los motores a analizar. El procedimiento que se siguió para realizar las pruebas con el equipo analizador de gases GAS ALERT MAX XT fue el siguiente:

- Se procedió a encender el motor, realizando los procedimientos previos según el manual de operación de dicho motor.
- El procedimiento consiste en realizar una inspección previa de los elementos tanto internos en la cabina como de los elementos externos.
- Se debe conectar inicialmente la fuente de poder al motor, esto para el arranque del mismo, posteriormente se deben habilitar los switches en la cabina (según el manual de operaciones del motor)
- Una vez encendido el motor este se regulo a una velocidad de la hélice de 2200 rpm, para que trabajara a marcha mínima o ralentí. La temperatura en el motor no debe exceder de 700°C, por tal motivo se regulo a 550°C (según el manual de operaciones del motor).
- El equipo GAS ALERT MAX XT, posee una sonda la cual lleva el gas por medio de la bomba interna hasta el equipo. Esta sonda fue colocada a una distancia de 80cm de la tobera por donde salen los gases en el motor.
- Se tomaron 2 lecturas durante 5 min cada una, tiempo suficiente para que el equipo registrara los datos en la memoria.
- Las lecturas registradas en el equipo fueron utilizadas para determinar la muestra.
- Una vez guardados los datos en la memoria del equipo, se procedió a apagar el motor.



Figura 30. **Prueba piloto.** Autores

El equipo analizador de gases GAS ALERT MAX XT, mide las concentraciones de sulfuro de hidrógeno (H_2S) en partículas por millón (ppm), monóxido de carbono (CO) en ppm, oxígeno diatómico (O_2) en porcentaje (%) y gas combustible (CH_4) en porcentaje. Este equipo se encuentra diseñado para advertir cuando los niveles de gases nocivos superan los valores de activación de la alarma seleccionados por el usuario (Honey Wellanaly Tics, 2008)

El equipo se encuentra certificado en cuanto a su calibración con respecto a la resolución N° 601 del 4 de abril de 2006 expedida por el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial; la cual indica la norma de calidad de aire o nivel de inmisión para el territorio Colombiano, teniendo como referencia las condiciones atmosféricas de $25^{\circ}C$ y 1 atm de presión. En el artículo 4 de esta resolución se muestran los niveles máximos permisibles de los contaminantes atmosféricos (ver tabla 10).

Tabla 10. Concentraciones permitidas de los contaminantes atmosféricos para Colombia

Contaminante	Unidad	Limite permisible	Tiempo de exposición
PST(Partículas totales en suspensión)	$\mu g/m^3$	100	Anual
		300	24 Horas
PM ₁₀ (Material particulado)	$\mu g/m^3$	70	Anual
		150	24 Horas

Tabla 10 (Continua)

Contaminante	Unidad	Limite permisible	Tiempo de exposición
SO ₂	ppm (µg/m ³)	0.031(80)	Anual
		0.096(250)	24 Horas
		0.287(750)	3 Horas
NO ₂	ppm (µg/m ³)	0.053(100)	Anual
		0.08(150)	24 Horas
		0.106(200)	1 Horas
O ₃	ppm (µg/m ³)	0.041(80)	8 Horas
		0.061(120)	1 Hora
CO	ppm (µg/m ³)	8.8(10)	8 Horas
		35(40)	1 Hora

Fuente. Datos obtenidos de (Resolución 601, 2006)

De los contaminantes expuestos en la tabla anterior, el equipo analizador de gases GAS ALERT MAX XT, mide las concentraciones de CO, en donde para una persona que se encuentre expuesta una hora (1 h) a este gas, el límite permisible será de 35 ppm siendo este el calibrado en el equipo. Cuando el nivel permisible es sobrepasado, en el equipo se acciona una alarma sonora y de luz indicando el nivel de riesgo para las personas que se encuentran en el lugar.

El equipo puede medir grandes cantidades de gases contaminantes ocurridos en un lugar, este posee los siguientes límites de detección de gases según el manual del usuario:

- H₂S : 0 – 200 ppm (incrementos de 1 ppm)
- CO : 0-1000 ppm (incrementos de 1 ppm)
- O₂ : 0 -30 % vol. (incrementos de vol. del 0.1%)

- CH₄ (LEL) : 0-100% (incrementos de 1% LEL)ó 0- 5% v/v de metano.

El nivel de oxígeno (O₂), calibrado por el equipo es de 20.9% indicando el porcentaje de oxígeno como aire ambiente o concentración de oxígeno normal en el aire. Cuando una concentración de oxígeno es inferior a 19.5%, existe deficiencia de oxígeno, activándose la alarma sonora y de luz en el equipo; de la misma manera la alarma se activa cuando el nivel de oxígeno es superior al 23.5%, indicando un enriquecimiento de oxígeno. Cuando el porcentaje de oxígeno en volumen es mayor de 23.5%, puede existir peligro extremo de incendio por el oxígeno enriquecido y cuando es menor a 19.5%, puede ser perjudicial para la salud de las personas que se encuentren en el entorno (OSHA, 2001)

Para los gases combustibles como el metano (CH₄), la concentración mínima de la mezcla aire/combustible a la que un gas se puede inflamar se llama Límite Inferior de Explosividad (LEL); sí estas concentraciones se encuentran por debajo de este límite, las concentraciones son demasiado escasas para arder. Por otra parte la concentración máxima de la mezcla aire/combustible a la que un gas se puede inflamar se llama Limite Superior de Explosividad (UEL); sí estas concentraciones se encuentran por encima de este límite, las concentraciones son demasiado ricas para arder. Lo anterior indica que en los límites entre estos dos valores el gas ardería o explotaría.

El equipo se encuentra calibrado para medir concentraciones de metano, en donde el LEL del metano es del 5% en volumen. Para espacios reducidos se alcanza un 2.5% en volumen del metano, esto corresponde al 50% del LEL; es decir que si se alcanza el 5% del metano en volumen, el LEL sería del 100%. Se deben tener márgenes de seguridad ya que entre el 5 y el 15% en volumen, una chispa provocaría una explosión.

El sulfuro de hidrogeno (H_2S) es un gas toxico; los límites de exposición permisible de las Normas OSHA para este gas son de 10 ppm durante 8 horas. El equipo se encuentra calibrado para que la alarma se encienda a partir de este valor.

El equipo analizador de gases GAS ALERT MAX XT, posee certificado de calibración el cual es realizado por la empresa Urigo S.A. Durante el proceso se calibraron los sensores con los gases de calibración (ver anexo I).

Las lecturas realizadas por el equipo GAS ALERT MAX XT, durante la prueba piloto son guardadas en la memoria del mismo. Esta información es transportada al software fleet MANAGER; el cual muestra las lecturas ordenadas, indicando la fecha de la medición, el tipo de registro, el estado del equipo y las lecturas de los niveles de contaminación de los gases. El software permite exportar las lecturas a Excel, facilitando de esta manera tabular la información. Las lecturas efectuadas para la prueba piloto se desarrollaron el día 11 de Diciembre de 2013, estas se indican en el anexo J. En el anexo K se muestra el protocolo de medición con el analizador, el acceso y la operación del software fleet MANAGER para observar el registro de los resultados. Los análisis de esta prueba piloto se realizaron en la sección 6.2.1.3.1, dedicada al análisis de resultados.

4.5.3 Pruebas en Satena S.A y Avianca S.A. Con la colaboración de las empresas Satenay Avianca, se logró el acceso a los hangares de estas compañías para realizar las respectivas mediciones. Se tuvo colaboración del personal de mantenimiento, el cual estuvo muy pendiente durante el encendido de los motores. Las mediciones efectuadas desarrollaron el mismo protocolo que se realizó en la prueba piloto, incluyéndose un ítem de seguridad más riguroso con la empresa Avianca; dado que los motores turbofan son mucho más grandes y las fuerzas de empuje son mayores durante el pre encendido.

Con la Aerolínea Satena S.A, se realizó la prueba a las 5:50 A.M, el día 27 de Marzo de 2014, esta fue la fecha dada por la compañía para realizarla. La solicitud se efectuó el día 3 de Marzo de 2014 (ver anexo A).

Las mediciones se llevaron a cabo en los aviones ATR 42, estos aviones poseen dos motores turbohélice PW 127M. Al llegar al sitio del pre encendido de los motores se encontraban 4 aviones, para los cuales se realizó una medición por avión, es decir se tomó un motor por avión. El encendido inicial se hace a marcha mínima (ralentí) y como se mencionó anteriormente el procedimiento fue el mismo que el de la prueba piloto; aunque para esta prueba la posición de la sonda estaba más alejada, aproximadamente unos 5 metros de la tobera del motor, esto como margen de seguridad. Posteriormente los motores se apagaron y el avión fue carreteado hasta donde se encontraban los pasajeros para el abordaje.



Figura 31. Pruebas en Satena S.A. Los Autores

Los análisis de esta prueba en Satena S.A se realizaron en la sección 6.2.1.2.3, dedicada al análisis de resultados.

Con la Aerolínea Avianca S.A, se realizó la prueba a las 8:30 A.M para los motores RR Trent 700 y a las 3:00 P.M para los motores CFM56-5B, el día 12 de Mayo de 2014, esta fue la fecha dada por la compañía para realizarla. La solicitud se efectuó el día 3 de Marzo de 2014 (ver anexo A).

Las mediciones se llevaron a cabo en un avión A-330, este avión poseen dos motores turbofan RR Trent 700. Las mediciones se hicieron en compañía del personal de Avianca ya que por margen de seguridad, solamente ellos podían acceder a las zonas demarcadas una vez encendidos los motores. Se realizaron 2 tomas de datos en cada motor, siendo esto equivalente a como se hicieran las tomas en 4 motores por separado. El encendido inicial se hace a marcha mínima (ralentí) y como se mencionó anteriormente el procedimiento fue el mismo que el de la prueba piloto; aunque para esta prueba la posición de la sonda estaba más alejada, aproximadamente unos 20 metros de la tobera del motor, esto como margen de seguridad de la empresa. Gracias a la bomba interna que posee el equipo los gases fueron succionados hasta los sensores internos para determinar las concentraciones.

El procedimiento fue el mismo para el motor CFM56-5B; el avión que posee este motor en el que se hizo la prueba fue el A-320, este avión también tiene dos motores de tipo turbofan. Al igual que en el Trent 700, las mediciones se efectuaron 2 veces para cada motor y también se contó con la colaboración del personal técnico de Avianca, bajo los mismos márgenes de seguridad que se siguieron con el motor Trent 700.

Los análisis de las pruebas en Avianca S.A se realizaron en la sección 6.2.1.2, dedicada al análisis de resultados.



Figura 32. Pruebas en Avianca S.A. Autores

4.6 Técnicas e instrumentos de recolección de la información

Para el análisis se utilizaron las normas y métodos recomendados internacionales del Anexo 16 al Convenio Sobre Aviación Civil Internacional de la ICAO volumen II; denominado Protección del Medio Ambiente- Emisiones de los Motores de las Aeronaves

También se utilizaron las normas OSHA 29CFR 1910.146 para espacios reducidos y la Resolución 601 del 4 de abril de 2006 del Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Para este análisis se utilizó el equipo analizador de gases GAS ALERT MAX XT descrito anteriormente, dicho equipo cuenta con certificado de calibración reciente y vigente con el fin de que las tomas de datos realizadas sean veraces y estén bajo los parámetros ambientales de la ciudad de Bogotá (ver anexo I).

La técnica utilizada para la recolección de la información fue inicialmente un muestreo en donde se determinó el número de datos a tomar por motor con el analizador de gases, teniendo en cuenta las operaciones aéreas en el aeropuerto El Dorado. La recolección de datos se hizo mediante fichas en donde se registraron los contenidos en partículas por millón y contenidos porcentuales de los gases contaminantes; en este mismo orden de ideas se utilizó la ficha de la ICAO, en donde se registraron los valores característicos calculados para los gases contaminantes (ver anexo P); se debe tener en cuenta que la obtención de estos datos son calculados con las ecuaciones del anexo 16 de la ICAO.

5. Estudio Económico

La tabla 11 indica los gastos generados durante el desarrollo del proyecto. Se debe tener en cuenta que el equipo GAS ALERT MAX XT y el motor turbohélice Pratt & Whitney PT6-A, fueron prestados por la Universidad Los Libertadores a los Maestranes con fines investigativos y que la Universidad no cobro ningún valor por dichos préstamos.

Tabla 11. Estudio Económico

Concepto	Inversión
Calibración Equipo Gas Alert Max XT	\$ 92.800
Tubo Probador Colapsible 1 m	\$ 271.440
Papelería y fotocopias	\$ 300.000
Libros y revistas relacionados con emisiones de gases en motores a reacción, motores turbofan, motores turbohélice, normas FAR Y RAC	\$ 500.000
Total	\$ 1.164.240

Fuente. Elaborada por los Autores