

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

**TEORÍA Y DESARROLLO DE UN SISTEMA DE DILUCIÓN PARA
LA MEDICIÓN DE EMISIONES DE MOTORES CICLO DIESEL**

**PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO
MECÁNICO**

PAULINA ALEXANDRA CORTÉS TORRES

pauli_c83@hotmail.com

DIRECTOR: ING. ÁNGEL PORTILLA AGUILAR

ahph2001@yahoo.com

Quito, Noviembre 2010

DECLARACIÓN

Yo, Paulina Alexandra Cortés Torres, declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría, que no ha sido previamente presentada para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedo mis derechos de propiedad intelectual correspondientes a este trabajo, a la escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.

Paulina Alexandra Cortés Torres

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por la Srta. Paulina Alexandra Cortés Torres, bajo mi supervisión.

Ing. Ángel Portilla A.
DIRECTOR DE PROYECTO

AGRADECIMIENTOS

A Dios, mis padres, abuelitos, hermanos, sobrinos y a mi esposo Pablo, por su incondicional amor, paciencia y apoyo.

Al Ing. Ángel Portilla por su acertada dirección en este proyecto, al Dr. Alberto Ayala por su valioso aporte de conocimientos, al personal de la Facultad de Ingeniería Mecánica y a los representantes de CORPAIRE por la colaboración en este proyecto.

DEDICATORIA

A mis padres: Carlitos y Normita, abuelitos: Rosita(+), Eduardito(+), Piedad, hermanos: Gabita, Juanito, Santi y Pili, sobrinos: Micky, Nico y Hazzel y a mi querido esposo Pablo, para ustedes por ser el amor y la razón de mi vida.

CONTENIDO

RESUMEN

INTRODUCCIÓN

CAPITULO 1

INFLUENCIA DE LOS MOTORES CICLO DIESEL EN LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA.

1.1	Introducción.....	1
1.2	Generalidades del motor ciclo diesel.....	3
1.2.1	Relación aire/combustible para motores ciclo diesel.....	4
1.2.2	Ecuación de combustión en los motores ciclo diesel.....	5
1.3	Emisiones de motores de ciclo diesel.....	7
1.4	Efecto de las emisiones en el ser humano.....	9
1.4.1	Monóxido de Carbono: CO.....	9
1.4.2	Óxidos de Nitrógeno: NOx.....	10
1.4.3	Dióxido de Azufre: SO ₂	10
1.4.4	Hidrocarburos: HC.....	11
1.4.5	Material Particulado: MP.....	11

CAPITULO 2

MATERIAL PARTICULADO.

2.1	Formación de Material Particulado en el medio ambiente.....	13
2.2	Formación de Material Particulado en motores ciclo diesel.....	15
2.2.1.	Caracterización física de la formación del MP.....	16
2.2.1.1.	Caracterización física de formación del MP por conteo de partícula.....	16
2.2.1.2.	Caracterización física de formación del MP por tamaño de partículas.....	16

2.2.2. Caracterización química de la formación de MP.....	17
2.2.3. Procesos de formación de MP en las emisiones de motores ciclo diesel.....	18
2.2.3.1. Procesos físicos.....	18
2.2.3.1.1. Coagulación.....	18
2.2.3.1.2. Adsorción.....	19
2.2.3.1.3. Nucleación.....	19
2.2.3.1.4. Condensación y Evaporación.....	20
2.2.3.2. Procesos químicos.....	20
2.2.3.2.1. Pirólisis.....	20
2.2.3.2.2. Polimerización.....	21
2.2.4. Hidrocarburos Poliaromáticos (HAPs).....	21
2.2.4.1. Propiedades Fisicoquímicas de los HAPs.....	24
2.2.4.2. Formación de los HAPs.....	24
2.2.4.3. Fuentes de HAPs.....	25
2.3 Métodos para la medición de MP.....	26
2.3.1. Clasificación de los métodos de medición.....	26
2.3.1.1. Métodos de recolección.....	27
2.3.1.2. Método in-situ.....	27
2.3.2. Principios físicos utilizados para la medición de MP.....	27
2.3.2.1. El movimiento de una partícula en el ambiente gaseoso.....	28
2.3.2.2. Interacción con radiación electromagnética.....	29
2.3.3. Técnicas de medición de MP.....	30
2.3.3.1. Monitor de Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos (HAPs) en tiempo real PAS2000.....	32
2.3.3.1.1. Fenómeno Físico.....	32
2.3.3.1.2. Principio de Medición.....	33
2.3.3.1.3. Especificaciones técnicas.....	34
2.3.4. Preparación de la muestra de gases de escape.....	35
2.3.4.1. Dilución	35
2.3.4.2. Separación de sustancias volátiles.....	36

CAPITULO 3

SISTEMA DE DILUCION.

3.1 Dilución.....	37
3.1.1 Relación de Dilución.....	40
3.2 Requerimientos del sistema de dilución.....	42
3.3 Alternativas de sistemas de dilución.....	42
3.3.1 Sistemas de dilución de flujo total.....	43
3.3.2 Sistemas de dilución de flujo parcial.....	45
3.3.2.1 Dilusor con eyector.....	45
3.3.2.2 Dilusor con disco rotatorio.....	46
3.3.2.3 Mini túnel.....	47
3.4 Selección del sistema de dilución.....	49
3.5 Sistema de Dilución de Disco Rotatorio.....	50
3.5.1 Principio de funcionamiento del DDR.....	51
3.5.2 Métodos del dilución con DDR.....	53
3.5.2.1 Dilución en caliente y enfriamiento.....	54
3.5.2.2 Termo-dilución.....	56
3.5.2.3 Termo-acondicionamiento post-dilución.....	57
3.5.2.4 Dilución con aire a temperatura.....	58
3.5.3 Requerimientos del DDR.....	59
3.5.4 Análisis de la relación de dilución en el DDR	60
3.5.4.1 Especificación de los fluidos en el DDR.....	62
3.5.4.2 Cálculo de la relación de dilución.....	63
3.5.5 Simulación de la relación de dilución.....	67
3.5.5.1 Toma de muestra al final del tubo de escape.....	68
3.5.5.1.1 Calentando el aire de dilución.....	68
3.5.5.1.2 Calentando la muestra de gases de escape	73
3.5.5.2 Toma de muestra junto al filtro de MP	86
3.5.5.3 Análisis de la simulación de la Relación de Dilución.....	91

3.5.6	Parámetros de diseño del DDR.....	93
-------	-----------------------------------	----

CAPITULO 4

DISEÑO DEL SISTEMA DE DILUCION DE DISCO ROTATORIO

4.1	Introducción	95
4.2	Diseño del sistema mecánico de dilución.....	97
4.2.1	Selección del dispositivo motriz.....	98
4.2.1.1	Cálculo del torque requerido en el sistema	100
4.2.1.2	Momento de inercia.....	100
4.2.1.2.1	Cálculo de la masa e inercia del disco.....	101
4.2.1.2.2	Cálculo de la masa e inercia del eje motriz.....	102
4.2.1.3	Momento generado por la fuerza de rozamiento.....	105
4.2.1.3.1	Diseño del resorte	105
4.2.2	Diseño y selección de los elementos mecanicos del DDR.....	115
4.2.2.1	Diseño del eje motriz.....	116
4.2.2.1.1	Diseño estático.....	117
4.2.2.1.2	Diseño dinámico.....	123
4.2.2.2	Selección de rodamientos.....	129
4.2.2.2.1	Rodamientos en apoyos B y C del eje.....	130
4.2.2.2.2	Rodamiento para el sistema de giro resorte – disco rotatorio.....	132
4.2.2.3	Selección de pernos	133
4.2.2.3.1	Pernos de fijación del motor.....	133
4.2.2.3.2	Pernos de unión entre la tapa móvil del resorte y la tapa fija	138
4.2.2.3.3	Pernos de unión en el cuerpo dilusor.....	140
4.2.2.3.4	Pernos de unión entre la tapa y el cuerpo dilusor.....	142
4.2.2.4	Selección de la bomba para muestreo de gases de escape.....	145
4.2.2.4.1	Cálculo de la caída de presión en la línea de	

muestreo de gases de escape.....	148
4.3 Sistema de calentamiento del aire de dilución	156
4.3.1 Dispositivo calentador.....	156
4.3.2 Dispositivo de control de temperatura.....	161

CAPITULO 5

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones.....	162
5.2 Recomendaciones.....	165

BIBLIOGRAFÍA.....	167
--------------------------	------------

ANEXOS.....	171
--------------------	------------

ÍNDICE DE TABLAS

CAPÍTULO 1

Tabla 1.1 Comparación entre motores Otto y motores Diesel. (Control de Emisión Vehiculares del Distrito Metropolitano de Quito).....	8
---	---

CAPÍTULO 2

Tabla 2.1 Especificaciones Técnicas PAS2000.....	35
--	----

CAPÍTULO 3

Tabla 3.1. Medidas estándares de concentración.....	39
---	----

Tabla 3.2. Relaciones de dilución máximas y mínimas obtenidas para: $f=0.15 - 1$ Hz, aire de dilución a $T=150^{\circ}\text{C}$ y $P=1\text{atm}$, flujo de aire de dilución: 1,5 l/min, gases de escape a $T=60^{\circ}\text{C}$ y $P=1\text{atm}$, Discos con	
--	--

2, 4, 6, 8 y 10 cavidades.....	65
Tabla 3.3. Relaciones de dilución máximas y mínimas obtenidas para: $f=0.15 - 3$ Hz, aire de dilución a $T=150^{\circ}\text{C}$ y $P=1\text{atm}$, flujo de aire de dilución: 0,5 l/min, gases de escape a $T=60^{\circ}\text{C}$ y $P=1\text{atm}$, Discos con 2, 4, 6, 8 y 10 cavidades.....	69
Tabla 3.4. Relaciones de dilución máximas y mínimas obtenidas para: $f=0.15 - 3$ Hz, aire de dilución a $T=150^{\circ}\text{C}$ y $P=1\text{atm}$, flujo de aire de dilución: 1 l/min, gases de escape a $T=60^{\circ}\text{C}$ y $P=1\text{atm}$, Discos con 2, 4, 6, 8 y 10 cavidades.....	70
Tabla 3.5. Relaciones de dilución máximas y mínimas obtenidas para: $f=0.15 - 3$ Hz, aire de dilución a $T=150^{\circ}\text{C}$ y $P=1\text{atm}$, flujo de aire de dilución: 1,5 l/min, gases de escape a $T=60^{\circ}\text{C}$ y $P=1\text{atm}$, Discos con 2, 4, 6, 8 y 10 cavidades.....	71
Tabla 3.6. Relaciones de dilución máximas y mínimas obtenidas para: $f=0.15 - 3$ Hz, aire de dilución a $T=150^{\circ}\text{C}$ y $P=1\text{atm}$, flujo de aire de dilución: 2 l/min, gases de escape a $T=60^{\circ}\text{C}$ y $P=1\text{atm}$, Discos con 2, 4, 6, 8 y 10 cavidades.....	72
Tabla 3.7. Relaciones de dilución máximas y mínimas obtenidas para: $f=0.15 - 3$ Hz, aire de dilución a $T=20^{\circ}\text{C}$ y $P=1\text{atm}$, flujo de aire de dilución: 0,5 l/min, gases de escape a $T=80^{\circ}\text{C}$ y $P=1\text{atm}$, Discos con 2, 4, 6, 8 y 10 cavidades.....	74
Tabla 3.8. Relaciones de dilución máximas y mínimas obtenidas para: $f=0.15 - 3$ Hz, aire de dilución a $T=20^{\circ}\text{C}$ y $P=1\text{atm}$, flujo de aire de dilución: 1 l/min, gases de escape a $T=80^{\circ}\text{C}$ y $P=1\text{atm}$, Discos con 2, 4, 6, 8 y 10 cavidades.....	75
Tabla 3.9. Relaciones de dilución máximas y mínimas obtenidas para: $f=0.15 - 3$ Hz, aire de dilución a	

T=20°C y P=1atm, flujo de aire de dilución: 1,5 l/min, gases de escape a T=80°C y P=1atm, Discos con 2, 4, 6, 8 y 10 cavidades.....	76
Tabla 3.10. Relaciones de dilución máximas y mínimas obtenidas para: f=0.15 – 3 Hz, aire de dilución a T=20°C y P=1atm, flujo de aire de dilución: 2l/min, gases de escape a T=80°C y P=1atm, Discos con 2, 4, 6, 8 y 10 cavidades.....	77
Tabla 3.11. Relaciones de dilución máximas y mínimas obtenidas para: f=0.15 – 3 Hz, aire de dilución a T=20°C y P=1atm, flujo de aire de dilución: 0,5 l/min, gases de escape a T=100°C y P=1atm, Discos con 2, 4, 6, 8 y 10 cavidades.....	78
Tabla 3.12. Relaciones de dilución máximas y mínimas obtenidas para: f=0.15 – 3 Hz, aire de dilución a T=20°C y P=1atm, flujo de aire de dilución: 1 l/min, gases de escape a T=100°C y P=1atm, Discos con 2, 4, 6, 8 y 10 cavidades.....	79
Tabla 3.13. Relaciones de dilución máximas y mínimas obtenidas para: f=0.15 – 3 Hz, aire de dilución a T=20°C y P=1atm, flujo de aire de dilución: 1,5 l/min, gases de escape a T=100°C y P=1atm, Discos con 2, 4, 6, 8 y 10 cavidades.....	80
Tabla 3.14. Relaciones de dilución máximas y mínimas obtenidas para: f=0.15 – 3 Hz, aire de dilución a T=20°C y P=1atm, flujo de aire de dilución: 2 l/min, gases de escape a T=100°C y P=1atm, Discos con 2, 4, 6, 8 y 10 cavidades.....	81
Tabla 3.15. Relaciones de dilución máximas y mínimas obtenidas para: f=0.15 – 3 Hz, aire de dilución a T=20°C y P=1atm, flujo de aire de dilución: 0,5 l/min, gases de escape a T=120°C y P=1atm, Discos con 2, 4, 6, 8 y 10 cavidades.....	82

Tabla 3.16. Relaciones de dilución máximas y mínimas obtenidas para: $f=0.15 - 3$ Hz, aire de dilución a $T=20^{\circ}\text{C}$ y $P=1\text{atm}$, flujo de aire de dilución: 1 l/min, gases de escape a $T=120^{\circ}\text{C}$ y $P=1\text{atm}$, Discos con 2, 4, 6, 8 y 10 cavidades.....	83
Tabla 3.17. Relaciones de dilución máximas y mínimas obtenidas para: $f=0.15 - 3$ Hz, aire de dilución a $T=20^{\circ}\text{C}$ y $P=1\text{atm}$, flujo de aire de dilución: 1,5 l/min, gases de escape a $T=120^{\circ}\text{C}$ y $P=1\text{atm}$, Discos con 2, 4, 6, 8 y 10 cavidades.....	84
Tabla 3.18. Relaciones de dilución máximas y mínimas obtenidas para: $f=0.15 - 3$ Hz, aire de dilución a $T=20^{\circ}\text{C}$ y $P=1\text{atm}$, flujo de aire de dilución: 2 l/min, gases de escape a $T=120^{\circ}\text{C}$ y $P=1\text{atm}$, Discos con 2, 4, 6, 8 y 10 cavidades.....	85
Tabla 3.19. Relaciones de dilución máximas y mínimas obtenidas para: $f=0.15 - 3$ Hz, aire de dilución a $T=150^{\circ}\text{C}$ y $P=1\text{atm}$, flujo de aire de dilución: 0,5 l/min, gases de escape a $T=300^{\circ}\text{C}$ y $P=1\text{atm}$, Discos con 2, 4, 6, 8 y 10 cavidades.....	87
Tabla 3.20. Relaciones de dilución máximas y mínimas obtenidas para: $f=0.15 - 3$ Hz, aire de dilución a $T=150^{\circ}\text{C}$ y $P=1\text{atm}$, flujo de aire de dilución: 1 l/min, gases de escape a $T=300^{\circ}\text{C}$ y $P=1\text{atm}$, Discos con 2, 4, 6, 8 y 10 cavidades.....	88
Tabla 3.21. Relaciones de dilución máximas y mínimas obtenidas para: $f=0.15 - 3$ Hz, aire de dilución a $T=150^{\circ}\text{C}$ y $P=1\text{atm}$, flujo de aire de dilución: 1,5 l/min, gases de escape a $T=300^{\circ}\text{C}$ y $P=1\text{atm}$, Discos con 2, 4, 6, 8 y 10 cavidades.....	89
Tabla 3.22. Relaciones de dilución máximas y mínimas obtenidas para: $f=0.15 - 3$ Hz, aire de dilución a $T=150^{\circ}\text{C}$ y $P=1\text{atm}$, flujo de aire de dilución: 2 l/min,	

gases de escape a $T=300^{\circ}\text{C}$ y $P=1\text{atm}$, Discos con 2, 4, 6, 8 y 10 cavidades.....	90
Tabla 3.23. Resumen de los parámetros de diseño del DDR.....	94

CAPÍTULO 4

Tabla 4.1. Flujo, temperatura y presión de la muestra de gases de escape.....	148
Tabla 4.2. Propiedades físico químicas de los gases de escape.....	151
Tabla 4.3. Caída de presión en línea de gases de escape sin accesorios.....	153
Tabla 4.4. Caída de presión en línea de gases de escape con accesorios y válvula.....	154

ÍNDICE DE FIGURAS

CAPÍTULO 1

Figura 1.1. Fuentes de Gases contaminantes presentes en la atmósfera.....	2
Figura 1.2. Motor Diesel.....	3

CAPÍTULO 2

Figura 2.1. Proceso de formación y distribución de tamaño de partícula.....	15
Figura 2.2. Estructura química del Naftaleno.....	21
Figura 2.3. Estructura química del Benzo(a)pireno.....	22
Figura 2.4. Estructura química de los HAPs considerados por el US-EPA.....	24
Figura 2.5. Principio físico de funcionamiento del PAS2000.....	32
Figura 2.6. Principio de medición del PAS2000.....	33
Figura 2.7. Diagrama esquemático de desorción en caliente.....	36

CAPÍTULO 3

Figura 3.1. Diluido-Concentrado.....	38
Figura 3.2. Diagrama esquemático de dilución en caliente.....	43
Figura 3.3. Sistema Túnel de Dilución.....	44
Figura 3.4. Diagrama esquemático del dilusor con eyector.....	45
Figura 3.5. Dilusor con eyector.....	46
Figura 3.6. Diagrama esquemático de un dilusor con disco Rotatorio.....	46
Figura 3.7. Dilusor con disco rotatorio.....	47
Figura 3.8. Diagrama esquemático de un mini túnel de dilución.....	48
Figura 3.9. Sistema Mini Túnel de Dilución.....	48
Figura 3.10. Esquema del Dilusor de Disco Rotatorio.....	51
Figura 3.11. Mecanismos de transporte de masa.....	53
Figura 3.12. Diagrama de Fases y Trayectorias de: Dilución CVS(X-G), Dilución secundaria en frío (G-N), Dilución en caliente (X-H-N).....	55
Figura 3.13. Principio de la Termo-Dilución.....	56
Figura 3.14. Diagrama de Fase y Trayectoria la Termo-Dilución (G-V-H-N).....	57
Figura 3.15. Principio de la Termo-ajuste y Termo-Dilución.....	57
Figura 3.16. Curva de calibración del DDR para discos con diferentes número de cavidades.....	61
Figura 3.17. Curva de calibración del DDR para diferentes flujos de la muestra de gases de escape.....	61
Figura 3.18. Relaciones de dilución obtenidas para: f=0.15 – 3 Hz, aire de dilución a T=150°C y P=1atm, flujo de aire de dilución: 0,5 l/min, gases de escape a T=60°C y P=1atm, Discos con 2, 4, 6, 8 y 10 cavidades.....	69
Figura 3.19. Relaciones de dilución obtenidas para:	

- f=0.15 – 3 Hz, aire de dilución a T=150°C y P=1atm,
 flujo de aire de dilución: 1 l/min, gases de escape
 a T=60°C y P=1atm, Discos con 2, 4, 6, 8 y 10 cavidades..... 70
- Figura 3.20. Relaciones de dilución obtenidas para:
 f=0.15 – 3 Hz, aire de dilución a T=150°C y P=1atm
 flujo de aire de dilución: 1,5 l/min, gases de escape
 a T=60°C y P=1atm, Discos con 2, 4, 6, 8 y 10 cavidades..... 71
- Figura 3.21. Relaciones de dilución obtenidas para:
 f=0.15 – 3 Hz, aire de dilución a T=150°C y P=1atm,
 flujo de aire de dilución: 2t/min., gases de escape
 a T=60°C y P=1atm, Discos con 2, 4, 6, 8 y 10 cavidades..... 72
- Figura 3.22. Relaciones de dilución obtenidas para:
 f=0.15 – 3 Hz, aire de dilución a T=20°C y P=1atm,
 flujo de aire de dilución: 0,5 l/min, gases de escape
 a T=80°C y P=1atm, Discos con 2, 4, 6, 8 y 10 cavidades..... 74
- Figura 3.23. Relaciones de dilución obtenidas para:
 f=0.15 – 3 Hz, aire de dilución a T=20°C y P=1atm,
 flujo de aire de dilución: 1 l/min, gases de escape
 a T=80°C y P=1atm, Discos con 2, 4, 6, 8 y 10 cavidades..... 75
- Figura 3.24. Relaciones de dilución obtenidas para:
 f=0.15 – 3 Hz, aire de dilución a T=20°C y P=1atm,
 flujo de aire de dilución: 1,5t/min., gases de escape
 a T=80°C y P=1atm, Discos con 2, 4, 6, 8 y 10 cavidades..... 76
- Figura 3.25. Relaciones de dilución obtenidas para:
 f=0.15 – 3 Hz, aire de dilución a T=20°C y P=1atm,
 flujo de aire de dilución: 2t/min., gases de escape
 a T=80°C y P=1atm, Discos con 2, 4, 6, 8 y 10 cavidades..... 77
- Figura 3.26. Relaciones de dilución obtenidas para:
 f=0.15 – 3 Hz, aire de dilución a T=20°C y P=1atm,
 flujo de aire de dilución: 0,5t/min., gases de escape
 a T=100°C y P=1atm, Discos con 2, 4, 6, 8 y 10 cavidades..... 78
- Figura 3.27. Relaciones de dilución obtenidas para:
 f=0.15 – 3 Hz, aire de dilución a T=20°C y P=1atm,

- flujo de aire de dilución: 1 l/min, gases de escape
a $T=100^{\circ}\text{C}$ y $P=1\text{atm}$, Discos con 2, 4, 6, 8 y 10 cavidades..... 79
- Figura 3.28. Relaciones de dilución obtenidas para:
f=0.15 – 3 Hz, aire de dilución a $T=20^{\circ}\text{C}$ y $P=1\text{atm}$,
flujo de aire de dilución: 1,5 l/min, gases de escape
a $T=100^{\circ}\text{C}$ y $P=1\text{atm}$, Discos con 2, 4, 6, 8 y 10 cavidades..... 80
- Figura 3.29. Relaciones de dilución obtenidas para:
f=0.15 – 3 Hz, aire de dilución a $T=20^{\circ}\text{C}$ y $P=1\text{atm}$,
flujo de aire de dilución: 2 l/min, gases de escape
a $T=100^{\circ}\text{C}$ y $P=1\text{atm}$, Discos con 2, 4, 6, 8 y 10 cavidades..... 81
- Figura 3.30. Relaciones de dilución obtenidas para:
f=0.15 – 3 Hz, aire de dilución a $T=20^{\circ}\text{C}$ y $P=1\text{atm}$,
flujo de aire de dilución: 0,5 l/min, gases de escape
a $T=120^{\circ}\text{C}$ y $P=1\text{atm}$, Discos con 2, 4, 6, 8 y 10 cavidades..... 82
- Figura 3.31. Relaciones de dilución obtenidas para:
f=0.15 – 3 Hz, aire de dilución a $T=20^{\circ}\text{C}$ y $P=1\text{atm}$,
flujo de aire de dilución: 1 l/min, gases de escape
a $T=120^{\circ}\text{C}$ y $P=1\text{atm}$, Discos con 2, 4, 6, 8 y 10 cavidades..... 83
- Figura 3.32. Relaciones de dilución obtenidas para:
f=0.15 – 3 Hz, aire de dilución a $T=20^{\circ}\text{C}$ y $P=1\text{atm}$,
flujo de aire de dilución: 1,5 l/min, gases de escape
a $T=120^{\circ}\text{C}$ y $P=1\text{atm}$, Discos con 2, 4, 6, 8 y 10 cavidades..... 84
- Figura 3.33. Relaciones de dilución obtenidas para:
f=0.15 – 3 Hz, aire de dilución a $T=20^{\circ}\text{C}$ y $P=1\text{atm}$,
flujo de aire de dilución: 2 l/min, gases de escape
a $T=120^{\circ}\text{C}$ y $P=1\text{atm}$, Discos con 2, 4, 6, 8 y 10 cavidades..... 85
- Figura 3.34. Relaciones de dilución obtenidas para:
f=0.15 – 3 Hz, aire de dilución a $T=150^{\circ}\text{C}$ y $P=1\text{atm}$,
flujo de aire de dilución: 0,5 l/min, gases de escape
a $T=300^{\circ}\text{C}$ y $P=1\text{atm}$, Discos con 2, 4, 6, 8 y 10 cavidades..... 87
- Figura 3.35. Relaciones de dilución obtenidas para:
f=0.15 – 3 Hz, aire de dilución a $T=150^{\circ}\text{C}$ y $P=1\text{atm}$
flujo de aire de dilución: 1 l/min, gases de escape

a T=300°C y P=1atm, Discos con 2, 4, 6, 8 y 10 cavidades.....	88
Figura 3.36. Relaciones de dilución obtenidas para: f=0.15 – 3 Hz, aire de dilución a T=150°C y P=1atm, flujo de aire de dilución: 1,5 l/min, gases de escape a T=300°C y P=1atm, Discos con 2, 4, 6, 8 y 10 cavidades.....	89
Figura 3.37. Relaciones de dilución obtenidas para: f=0.15 – 3 Hz, aire de dilución a T=150°C y P=1atm, flujo de aire de dilución: 2 lt/min., gases de escape a T=300°C y P=1atm, Discos con 2, 4, 6, 8 y 10 cavidades.....	90

CAPÍTULO 4

Figura 4.1. Sistema de dilución de disco rotatorio.....	96
Figura 4.2. Diagrama de bloques del sistema de dilución.....	96
Figura 4.3. Sistema mecánico del DDR: partes (a) y cargas(b).....	98
Figura 4.4. Disco rotatorio (Dimensiones en mm).....	101
Figura 4.5. Área del disco rotatorio donde actúa la presión de los gases (Dimensiones en mm).....	108
Figura 4.6. Resorte (Dimensiones en mm).....	110
Figura 4.7. Diagrama de cuerpo libre del eje motriz (Dimensiones en mm).....	116
Figura 4.8. Propiedades del material del eje como datos de entrada en el SAP 2000.....	119
Figura 4.9. Sección del eje como dato de entrada en el SAP 2000.....	119
Figura 4.10. Fuerzas y torque que actúan sobre el eje como datos de entrada en el SAP 2000.....	120
Figura 4.11. Fuerzas R_A , R_B , R_C resultados gráficos de análisis estático en SAP 2000.....	120
Figura 4.12. Diagrama de esfuerzos cortantes resultados de análisis estático en SAP 2000.....	120

Figura 4.13. Diagrama de momentos flectores resultados de análisis estático en SAP 2000.....	121
Figura 4.14. Diagrama de esfuerzos combinados resultantes.....	122
Figura 4.15. Diagrama de esfuerzos fluctuantes del eje motriz.....	124
Figura 4.16. Bomba de diafragma.....	146
Figura 4.17. Esquema bomba de paletas.....	146
Figura 4.18. Bomba peristáltica rotatoria.....	147
Figura 4.19. Resistencias tipo bobina recta.....	157
Figura 4.20. Resistencias tipo banda bobina de abrazadera de ajuste con leva.....	158
Figura 4.21. Resistencias tipo banda bobina de abrazadera de ajuste con tornillos.....	158
Figura 4.22. Resistencias tipo banda bobina con doble manga.....	158
Figura 4.23. Resistencias para líneas de procesos de aire.....	159
Figura 4.24. Microprocesador controlador GEFran.....	161

RESUMEN

En el Capítulo 1, se presenta las generalidades del motor diesel, relación aire combustible, combustión, emisiones contaminantes, su influencia en la contaminación atmosférica y los efectos de las emisiones sobre el ser humano.

En el Capítulo 2, se analiza una fracción importante de las emisiones contaminantes, el material particulado (MP), se explican los proceso de formación, composición, fuentes de emisión, métodos y equipos de medición y preparación de la muestra de los gases de escape.

En el Capítulo 3, se estudio uno de los procesos de preparación de la muestra de la muestra e gases de escape, la dilución, se plantean los requerimientos de un sistema de dilución para utilizar en conjunto con el analizador de gases de escape PAS 2000, se explican alternativas de sistemas, se selecciona la alternativa que cumple con los requerimientos del equipo de análisis, se desarrolla la simulación de la dilución y se establece los parámetros de diseño del dilusor.

En el Capítulo 4, se desarrolla el diseño mecánico del dilusor, que comprende el diseño mecánico de las partes y la selección de los elementos y dispositivos complementarios, a partir del diseño se desarrolla los planos mecánicos del dilusor y se presenta un resumen de los parámetros de funcionamiento del mismo.

PRESENTACION

A nivel mundial, en la actualidad, los problemas de contaminación del aire y sus efectos sobre el ser humano y medio ambiente son de gran preocupación, por esta razón se han desarrollado diversos y extensos estudios en esta área.

En la ciudad de Quito se generan condiciones muy particulares de contaminación atmosférica debido a varios factores tales como: altitud, topografía, además de su no planificado desarrollo urbanístico que provoca rutas y horas de alto tráfico vehicular.

CORPAIRE interesado en continuar con su gestión de mejoramiento de la calidad del aire de Quito y además fomentar y contribuir al desarrollo de la investigación, en convenio con la EPN, pone en marcha el Proyecto "Teoría y Desarrollo de un Sistema de Dilución para la Medición de Emisiones Diesel", el presente estudio es el inicio del proyecto de evaluación de MP y particularmente de HAPs en las emisiones vehiculares en la ciudad de Quito.

CAPITULO 1

INFLUENCIA DE LOS MOTORES CICLO DIESEL EN LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA

1.1 INTRODUCCIÓN

“El hombre para vivir inhala aproximadamente 14000 litros de aire al día”.¹

Siendo la respiración un proceso vital, el aire puede presentar un grado máximo de impurezas o contaminantes, fuera del cual el hombre se envenenaría. Cualquier alteración de este tipo no sólo afecta al hombre sino a todo lo que le rodea.

El aire puro es una mezcla gaseosa compuesta en un 78% de nitrógeno, 21% de oxígeno y un 1% de gases como: bióxido de carbono, ozono, argón, xenón, radón, etc. La adición de sustancias o alteración a esta composición se considera como contaminación del aire.

En general, los contaminantes más comunes presentes en el medio ambiente son: el monóxido de carbono (CO), los óxidos de nitrógeno (NO_x), los óxidos de azufre (SO_x), los hidrocarburos (H_mC_n), los oxidantes fotoquímicos y las partículas (Material Particulado) cuyos componentes pueden ser muy diversos como: metales pesados, silicatos, sulfatos, entre otros.¹

Diversas son las fuentes de contaminantes atmosféricos y se las puede clasificar en dos grupos:

- *Fuentes Naturales*: se deben a causas naturales como: volcanes, incendios forestales, descomposición de materia orgánica.

¹ Manual de Monitoreo del Aire

- *Fuentes Antropogénicas*: se deben a actividades humanas y se clasifican en fuentes fijas, móviles y fugitivas. Las fuentes fijas o estacionarias se clasifican en puntuales (producto de la combustión y procesos evaporativos) y areales (residencial, comerciales, otras). Las fuentes móviles pueden ser en ruta (buses, camiones, particulares, taxis, comerciales y motocicletas) y fuera de ruta (aeropuertos, maquinaria agrícola). Las fuentes fugitivas son producto de la construcción y demolición, polvo suspendido y de preparación de terrenos agrícolas.²

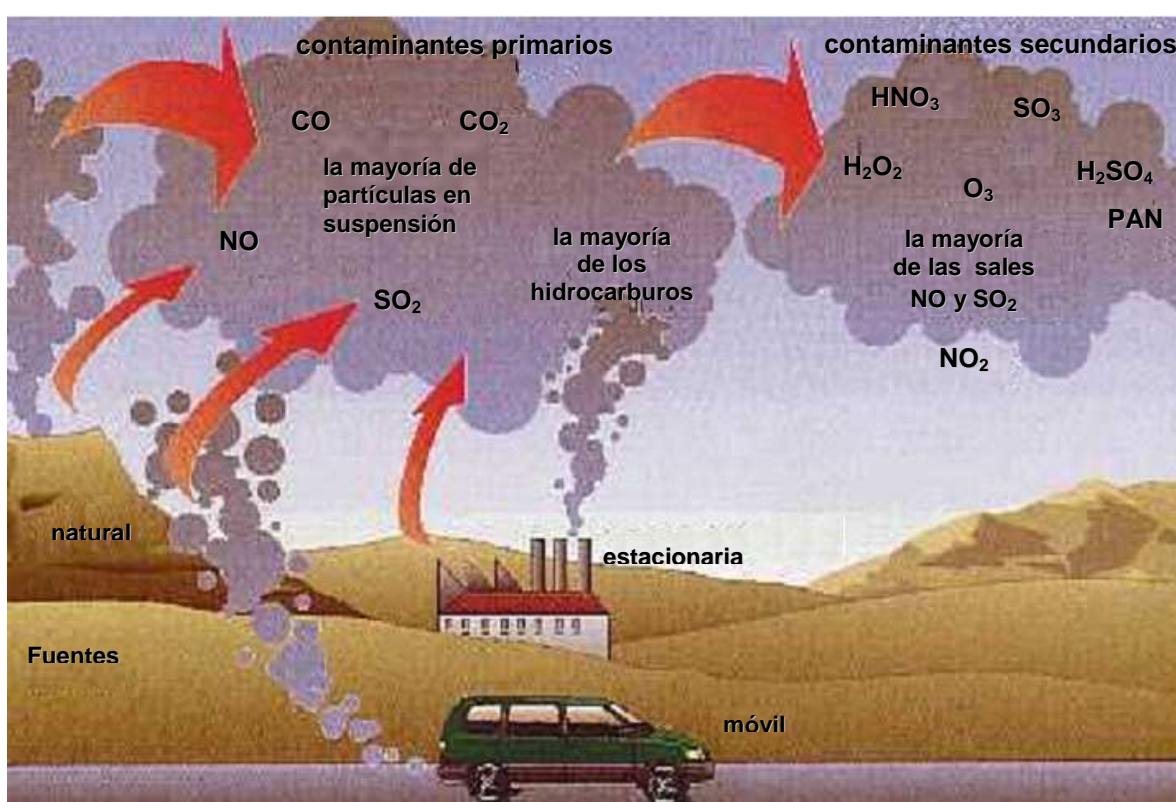


Figura 1.1. Fuentes de Gases contaminantes presentes en la atmósfera³

En la actualidad, es de particular interés la contaminación producida por las emisiones vehiculares, y dentro de éstas las generadas por los motores de ciclo diesel por su composición y efectos nocivos sobre el ser humano y medio ambiente en general.

² ALVARADO, M.; Emisiones de Material Particulado En Motores de Combustión Interna Ciclo Diesel, Universidad de Chile; Chile; 2001.

³ [http://200.68.10.178/chile/docs/protocolos/ANEXO%20C%20\(0.1%20MB\).pdf](http://200.68.10.178/chile/docs/protocolos/ANEXO%20C%20(0.1%20MB).pdf) ; Antecedentes de los Principales Contaminantes Atmosféricos

1.2 GENERALIDADES DEL MOTOR DE CICLO DIESEL

Los motores de ciclo diesel se encuentran entre los motores térmicos o también llamados motores de combustión interna (dado que el combustible se quema en su interior). “Los motores térmicos transforman la energía calorífica del combustible en energía mecánica, aprovechando la fuerza expansiva de los gases inflamados en el interior de un cilindro, que es recogida en el árbol del motor, cuyo giro es transmitido a las ruedas que dan impulso al vehículo”.⁴

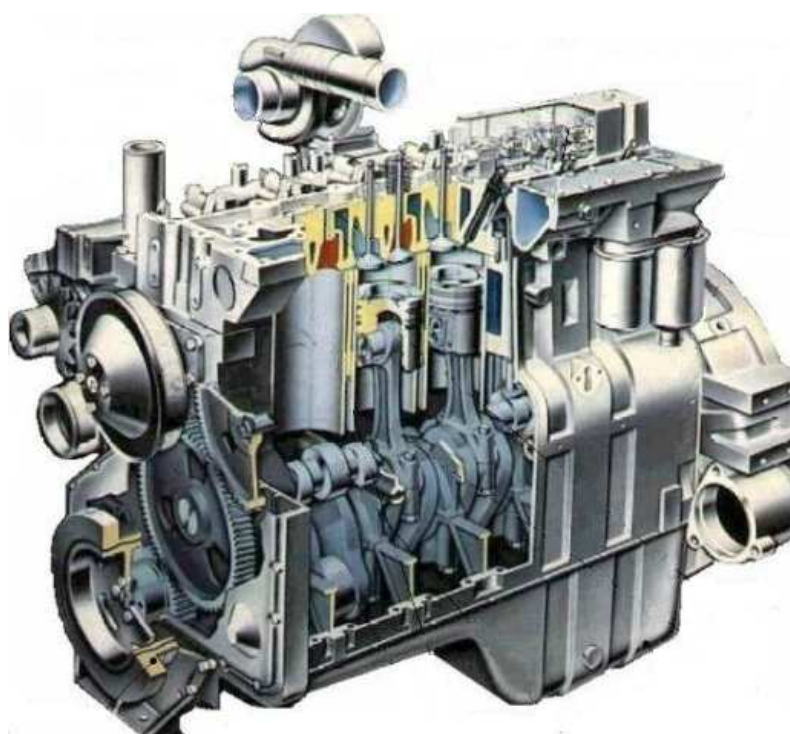


Figura 1.2. Motor Diesel⁵

En el ciclo diesel la combustión tiene lugar a un volumen constante. En este motor, la energía se obtiene por la combustión del combustible diesel ($C_{12}H_{26}$). Para producir la combustión se fuerza la penetración del combustible (por medio de la bomba de inyección y el inyector) en la cámara de combustión, que está ocupada por el aire comprimido y calentado a altas temperaturas. Esta

⁴ Control de Emisiones Vehiculares en el D.M.Q; Fundación Natura-Municipio Metropolitano de Quito-Auspicio: COSUDE.

⁵ <http://www.joseclaudio.eng.br/diesel1a1.html>

combustión genera un fuerte aumento de la presión del gas en la cámara de combustión.

La combustión en el ciclo diesel se produce por efecto únicamente de la fuerte compresión a la que está sometido el aire, lo que ha ocasionado su elevada temperatura, y provoca la inflamación espontánea del combustible, a medida que va entrando en el cilindro.

En este tipo de motores la relación de compresión suele ser mucho más elevada que en los de gasolina, se encuentra en los rangos de 15:1 hasta 30:1, puesto que en el cilindro solamente se comprime aire y no hay riesgo de explosión espontánea del combustible.

1.2.1 RELACIÓN AIRE/COMBUSTIBLE PARA MOTORES CICLO DIESEL⁶

En la combustión, la relación aire combustible es la proporción entre la masa de aire y la masa de combustible, y se expresa por medio de la Ec. 1.1:

$$A / C = \frac{m_{aire}}{m_{combustible}} \quad (\text{Ec. 1.1})$$

donde:

A/C: relación entre la masa de aire y la masa de combustible en la combustión

m_{aire} : masa de aire que interviene en la combustión (kg)

$m_{combustible}$: masa de combustible que interviene en la combustión (kg)

Los motores diesel operan a razones de aire/combustible más pobres que las teóricas o estequiométricas, aun cuando están a potencia máxima, y éstas normalmente disminuyen a medida que se reduce la potencia. La razón de aire/combustible normalmente se encuentra en el rango de (23-30)/1 cuando el

⁶ Control de Emisiones Vehiculares en el D.M.Q; Fundación Natura-Municipio Metropolitano de Quito-Auspicio: COSUDE

motor está a plena carga, aunque también pueden ocurrir valores más bajos como 20/1. La razón estequiométrica es 14.3/1.

“Los motores diesel operan a razones pobres principalmente para evitar la formación excesiva de material particulado (partículas de carbono) o de carbonilla en el proceso de combustión. Por lo general, la concentración de material particulado aumenta con la disminución en la razón de combustible/aire. Las partículas se vuelven visibles en los gases de escape mientras la razón de combustible/aire todavía es bastante pobre, con suficiente oxígeno aún presente para una posible reacción con el carbono para formar anhídrido carbónico gaseoso (CO_2) o monóxido de carbono (CO). Esta tendencia de los motores diesel a experimentar una combustión incompleta y producir carbonilla (hollín) de escape refleja el poco tiempo disponible para la mezcla de aire/combustible, y la volatilidad relativamente baja del combustible diesel”.

1.2.2 ECUACION DE COMBUSTIÓN EN LOS MOTORES CICLO DIESEL⁷

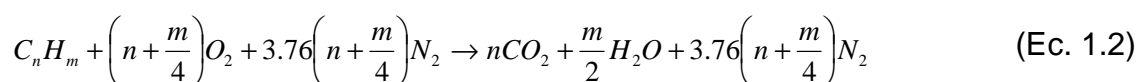
Combustión es el proceso de oxidación rápida de una sustancia, acompañado de un aumento de calor y frecuentemente de luz. En el caso de los combustibles comunes, el proceso consiste en una reacción química con el oxígeno de la atmósfera que lleva a la formación de dióxido de carbono, monóxido de carbono y agua, junto con otros productos como dióxido de azufre, que proceden de los componentes menores del combustible.

Teóricamente, en toda combustión sólo se precisa añadir una mínima porción de aire al combustible para completar el proceso. Sin embargo, con una mayor cantidad de aire, la combustión se efectúa con mayor eficacia y aprovechamiento de la energía liberada. Por otra parte, un exceso de aire reducirá la temperatura final y la cantidad de energía liberada. En consecuencia habrá de establecerse la relación aire-combustible en función de la temperatura y del grado de combustión deseados.

⁷MARTINEZ DE VEDIA, R; MARTINEZ, O.; Teoría de los Motores Térmicos. Talleres Gráficos; Argentina; 1966.

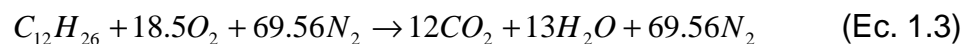
Los motores térmicos toman del aire el oxígeno necesario para la combustión de los hidrocarburos (H_mC_n), utilizados normalmente como combustibles.

Una reacción estequiométrica es aquella donde la cantidad de oxígeno suministrada es la necesaria para la combustión completa del combustible. Dicha ecuación puede generalizarse para cualquier hidrocarburo de fórmula general C_nH_m teniendo en cuenta la igualdad del número de átomos de los elementos que aparecen en ambos miembros de la ecuación:



La ecuación supone entonces que tanto los reactantes como los productos están en fase gaseosa y que el nitrógeno no reacciona químicamente.

De la Ec. 1.1, la reacción estequiométrica del diesel ($C_{12}H_{26}$), sin exceso ni defecto de aire es:



La Ec. 1.3 expresa que en la combustión de diesel 1 mol de combustible ($C_{12}H_{26}$) reacciona con 18.5 moles de O_2 .

Como se considera que la combustión se produce con aire seco, con una composición de 21% de oxígeno y 79% de nitrógeno, resulta que por cada 1 mol de O_2 que interviene en la combustión intervienen 3.76 moles de N_2 , entonces en la Ec. 1.3 el número de moles de aire que reacciona con 1 mol $C_{12}H_{26}$ es :

$$18.5 \text{ mol } O_2 + 69.5 \text{ mol } N_2 = 88 \text{ mol Aire}$$

Es equivalente expresar:

$$18.5 \text{ kmol } O_2 + 69.5 \text{ kmol } N_2 = 88 \text{ kmol Aire}$$

Para determinar la relación aire/combustible (Ec. 1.1) en la Ec. 1.3 es necesario conocer los pesos moleculares del combustible y de los componentes de aire:

Pesos moleculares:

$$M(\text{C}_{12}\text{H}_{26}) = 170 \text{ kg / kmol}$$

$$M(\text{O}_2) = 32 \text{ kg / kmol}$$

$$M(\text{N}_2) = 28 \text{ kg / kmol}$$

$$M(\text{CO}_2) = 44 \text{ kg / kmol}$$

$$M(\text{H}_2\text{O}) = 18 \text{ kg / kmol}$$

Como 1 mol de aire tiene 0.21 mol de O_2 y 0.79 mol de N_2 el peso molecular del aire es:

$$0.21 * (32 \text{ kg / kmol}_{\text{O}_2}) + 0.79 * (28 \text{ kg / kmol}_{\text{N}_2}) = 28.84 \text{ kg / kmol}_{\text{aire}}$$

De la Ec. 1.3:

$$A / C = \frac{88 \text{ kmol}_{\text{aire}} \times 28.84 \text{ kg / kmol}_{\text{aire}}}{1 \text{ kmol}_{\text{combustible}} \times 170 \text{ Kg / kmol}_{\text{combustible}}}$$

$$A / C = 14.92 \frac{\text{kg}_{\text{aire}}}{\text{kg}_{\text{combustible}}}$$

Esto corresponde a una relación aire/combustible ideal. De todas maneras, la combustión puede realizarse tanto con defecto como con exceso de aire, en relación con la cantidad teóricamente correcta (cantidad estequiométrica).

1.3 EMISIONES DE MOTORES DE CICLO DIESEL⁸

Si se compara la emisión de gases en los motores de encendido por chispa típico, es decir, sin ningún sistema especial incorporado a este tipo de motores que influya en las emisiones para cumplir con las exigencias de legislación local, con

⁸ Control de Emisiones Vehiculares en el D.M.Q; Fundación Natura-Municipio Metropolitano de Quito-Auspicio: COSUDE

la emisión de gases en los motores de encendido por compresión, estos últimos resultan ser más favorables en cuanto a la generación de gases contaminantes, salvo que una máquina a diesel produce más material particulado (humo).

En la siguiente tabla se puede apreciar una comparación de la generación de gases de combustión entre los motores de encendido por chispa y los motores de encendido por compresión.

Tabla 1.1 Comparación entre motores Otto y motores Diesel. (Control de Emisión Vehiculares del Distrito Metropolitano de Quito.)⁹

	MOTORES DIESEL	MOTORES OTTO
Material particulado (hollín)	0.5 g/m ³	0.01 g/m ³
Monóxido de Carbono	Menor que 0.1% en volumen	Menor que 10% en volumen
Hidrocarburos	Menor que 300 ppm	Menor que 1000 ppm
Óxidos de Nitrógeno	1000 – 4000 ppm	2000 – 4000 ppm

De manera general a los contaminantes presentes en el aire se los puede clasificar en dos grupos; partículas en suspensión (polvos, neblinas y humos) y contaminantes gaseosos (gases y vapores).

En el proceso de combustión desarrollado en motores diesel además de generarse los productos indicados en la ecuación estequiométrica Ec. 1.2 (CO₂, H₂O y N₂) existen otros compuestos, que son parte de las emisiones contaminantes a la atmósfera tales como:

- Los denominados contaminantes primarios (que son emitidos directamente por las fuentes): monóxido de carbono (CO), anhídrido sulfuroso (SO₂), monóxido de nitrógeno (NO) y material particulado (MP).

⁹ Control de Emisiones Vehiculares en el D.M.Q; Fundación Natura-Municipio Metropolitano de Quito-Auspicio: COSUDE

- Los contaminantes secundarios que son el resultado de reacciones químicas, térmicas o fotoquímicas de los contaminantes primarios entre sí o con sustancias presentes en el medio que son emitidos. Entre éstos se tienen: anhídrido sulfúrico (SO_3) producto de la oxidación del SO_2 por acción térmica, el ozono (O_3) troposférico que resulta por interacción fotoquímica entre los NO_x y los compuestos orgánicos volátiles (COV's), en diferentes reacciones se forman el dióxido de nitrógeno (NO_2), el peroxiacetilnitrato (PAN), el formaldehído (HCHO), entre otros.

En las máquinas de combustión a compresión, el hollín se forma inicialmente en el cilindro por la combustión incompleta de los hidrocarburos presentes en el combustible, alcanzado su máxima concentración durante la combustión, seguida de un rápido decremento por la oxidación.

Las emisiones resultantes de la combustión diesel están compuestas primordialmente de materiales carbonosos e hidrocarburos condensados. Además, el número de partículas y la distribución de tamaño pueden ser sumamente diferentes durante su formación hasta el momento de su expulsión en los gases de escape.

1.4 EFECTO DE LAS EMISIONES EN EL SER HUMANO

Cada uno de los componentes de las emisiones contaminantes genera sobre el ser humano y medio ambiente efectos particulares, los mismos que a continuación se describen.

1.4.1 MONÓXIDO DE CARBONO: CO

Este contaminante es el resultado de la combustión incompleta de compuestos carbonados y algunos procesos industriales y biológicos. Las fuentes principales de este contaminante son: las emisiones vehiculares, estufas, cocinas, humo del cigarrillo y calefones. En sectores urbanos principalmente proviene de emisiones

vehiculares. La proporción de emisión de vehículos depende de la velocidad del vehículo, siendo más alta la emisión a velocidades de motor más bajas.

Debido a su afinidad, fácilmente reacciona con la hemoglobina en lugar del oxígeno, para formar carboxihemoglobina. Este compuesto afecta la salud interfiriendo con el transporte de dicho elemento (O_2) al corazón y otros músculos, y al cerebro, además está relacionado con el aumento de angina en pacientes susceptibles, disminución en las funciones neuroconductuales, efectos perinatales como menor peso del feto y retardo del desarrollo post-natal y muerte.

1.4.2 ÓXIDOS DE NITRÓGENO: NO_x

En la emisiones contaminantes al referirse a la fracción de NO_x (óxidos artificiales), se cita al óxido nítrico (NO) y al dióxido de nitrógeno (NO_2). Su formación se da en procesos de combustión de combustibles fósiles a altas temperaturas, siendo el NO el que predomina y es un importante precursor de la formación de ozono troposférico. Su toxicidad radica en sus propiedades oxidantes. Sus efectos en salud son: inducción de edema pulmonar, aumento de metabolismo antioxidante, daño celular en el pulmón, irritación y pérdida de mucosas.

1.4.3 DIÓXIDO DE AZUFRE: SO_2

Se lo analiza en emisiones de ciclo diesel, aunque en motores a gasolina también se genera, pero por su bajo porcentaje no es de importancia, depende de la cantidad de azufre que contenga el combustible. La acción de este gas se potencia ante la presencia de material particulado. La mayor parte de las emisiones de azufre se libera en forma de SO_2 , que es a su vez oxidado a SO_3 . En condiciones de humedad, se da lugar a la formación de ácido sulfúrico el cual está presente como aerosol o partículas sólidas, es decir, es un precursor en la formación de material particulado. El SO_2 produce irritación en las vías respiratorias, como consecuencia de esto puede presentarse broncoconstricción y bronquitis obstructiva.

1.4.4 HIDROCARBUROS: HC

Son resultantes de una combustión incompleta o evaporación de combustibles fósiles. Sus efectos en la salud son: irritación de los ojos, cansancio y tendencia a toser. Pueden tener efecto carcinógeno o mutagénico y causar enfermedades pulmonares. Promueven la formación de ozono troposférico (O₃), el cual irrita las vías respiratorias y disminuye la función pulmonar.

1.4.5 MATERIAL PARTICULADO: MP

Las fuentes móviles que son impulsadas principalmente por los derivados gasolina o diesel, producen emisiones de MP que son dañinas para el ser humano.

Las emisiones de MP producidas por un motor de ciclo diesel son mayores que las de un vehículo de similares características operado a gasolina.¹⁰

Es necesario, por lo tanto, como introducción al presente proyecto, dar una idea general de la seriedad de los efectos del MP, existente en las emisiones contaminantes, sobre nuestra salud.

Las enfermedades producidas por el MP pueden ser cardiovasculares, cáncer al pulmón y enfermedades respiratorias (A menor diámetro, es mayor la penetración en el sistema respiratorio). No obstante, estas enfermedades no necesariamente tienen efecto inmediato en los seres humanos, sino más bien pueden tener efectos diferidos y presentarse con el transcurso de los años.¹¹

El ser humano se puede defender del MP cuyas partículas poseen diámetros mayores de 10 µm, no obstante, las partículas menores de 10 µm penetran al sistema respiratorio (faringe, tráquea, bronquios y alvéolos). De éstas, las que

¹⁰HILL, L.; Transient Particulate Analysis Using TEOM; Horiba Instruments Ltd., 1998.

¹¹ALVARADO, M.; Emisiones de Material Particulado en Motores de Combustión Interna Ciclo Diesel, Universidad de Chile; Chile; 2001.

tienen un diámetro menor de 2.5 μm entran en los alvéolos, de donde pueden pasar directamente a la sangre; las que son entre 10 y 2.5 μm de diámetro no pueden entrar en los alvéolos, pero quedan retenidas por un tiempo en los bronquios y bronquiolos finos, causando daño, después son expulsados hacia la tráquea y deglutidas, pasan al estómago, allí algunos componentes no son tóxicos, y otros sí lo son, o pueden ser absorbidos vía digestiva y por esa vía pasar a la sangre.

Estudios realizados en ratas y ratones concluyen que el MP produce daño en las células y al material genético. En experiencias realizadas, se expone a ratones por un período corto de tiempo donde ellos absorben rápidamente el MP por los alvéolos, inflamando su sistema respiratorio y afectando directamente a sus pulmones. Este efecto sucede cuando las concentraciones de partículas en el aire exceden los 8 mg/m^3 , lo que podría ser una causa de cáncer.¹²

El Material Particulado tiene diversos componentes y como ya se mencionó algunos son tóxicos, y afectan la salud humana. Entre estos están los **Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos** (HAPs). Estos se encuentran principalmente en el hollín emitido como producto de la combustión de los motores diesel.

¹²ALVARADO, M.; Emisiones de Material Particulado en Motores de Combustión Interna Ciclo Diesel, Universidad de Chile; Chile; 2001.

CAPITULO 2

MATERIAL PARTICULADO

Actualmente muchos estudios se han desarrollado con el objetivo de determinar los efectos nocivos que el **Material Particulado** (MP) genera en los seres vivos y medio ambiente, y otros tantos con los objetivos de identificar las fuentes de MP y reducir su emisión.

Como se indicó en la sección 1.4 el MP produce diferentes tipos de enfermedades como cardiovasculares y respiratorias, además ciertos componentes son responsables de causar cáncer y mutaciones genéticas.

En este capítulo se explican los procesos de formación de MP, su composición, fuentes de emisión y equipos de medición, enfocándose especialmente en una fracción del MP que son los HAPs.

2.1 FORMACIÓN DE MP EN EL MEDIO AMBIENTE

De forma general, el MP existente en el medio ambiente se puede dividir en dos grupos: ¹³

- Partículas Finas (tamaño de partícula $<2.5\mu\text{m}$)
- Partículas Gruesas (tamaño de partícula $>2.5\mu\text{m}$)

Las partículas de estos dos grupos resultan de procesos de formación distintos:

Las Partículas Finas, que son de especial interés en el presente estudio, se forman en procesos de combustión o a través de la condensación (nucleación) y crecen por efectos de la coagulación.

¹³ MAYER, A.; Elimination of Engine Generated Nanoparticles; Introduction Fig. 3; Suiza; 2005

El segundo grupo resulta de procesos mecánicos de formación de partículas en la naturaleza, tales como: polvo geogénico, material volcánico, aerosol marino, así como también polvo generado en procesos técnicos de abrasión, etc.

Si se evalúa un ambiente, la masa total de partículas está predominada por un bajo número de partículas gruesas, mientras que el aporte de las partículas finas (0.1- 2.5 μm) y ultrafinas (<0.1 μm), que se encuentran en gran número, no es importante pero sus efectos nocivos en la salud si lo son. Por esto es mejor una evaluación de conteo de partículas en vez de la medida de masa total.

Al Material Particulado de acuerdo al proceso de formación se lo puede clasificar en tres rangos de tamaño, lo que a la vez permite definir tres modos de distribución de partículas: Modo de Nucleación, Modo de Acumulación y Partículas Gruesas.

- *Modo de Nucleación o partículas primarias:* Esto sucede inmediatamente después de la formación de la fase de vapor. La mayoría de las partículas están dentro del rango de 2-3 nm, máximo en el rango de 10-20 nm.¹⁴
- *Modo de Acumulación o aglomerados:* Etapa de baja coagulación de partículas primarias adheridas por Fuerzas de Van der Waal. El tamaño de partícula típico en los gases de escape es cerca de los 100nm (se denominan “agregados” cuando la unión es más fuerte debido a un proceso de sinterización).¹⁴
- *Partícula gruesas (Coarse Particles):* Tienen un origen diferente, por ejemplo: procesos mecánicos como: abrasión, o partículas naturales de polvo. (tamaño de partícula > 2 μm).¹⁴

En la Fig.2.1. se esquematizan los tres modos de distribución y su tamaño:

¹⁴ MAYER, A.; Elimination of Engine Generated Nanoparticles; Introduction Fig. 3; Suiza; 2005

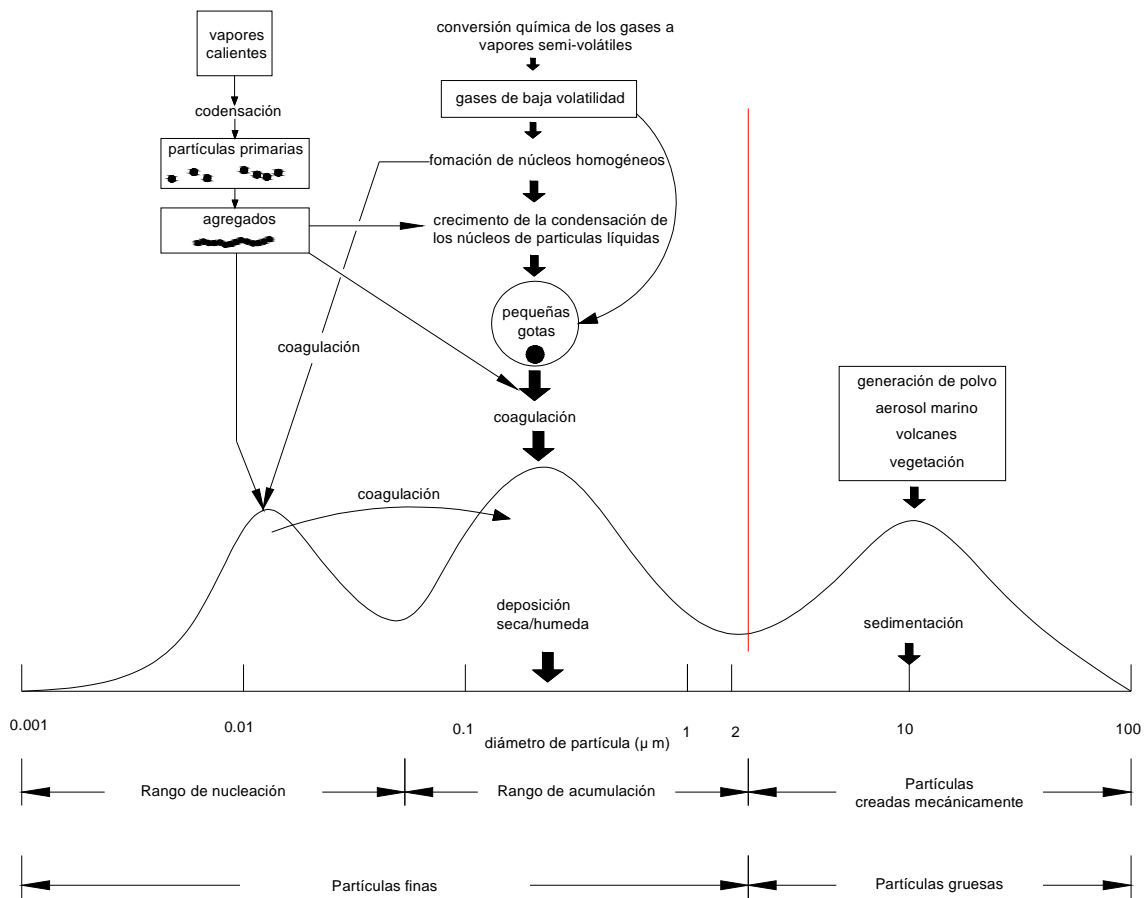


Figura 2.1. Proceso de formación y distribución de tamaño de partícula.¹⁵

2.2 FORMACIÓN DE MATERIAL PARTICULADO EN MOTORES CICLO DIESEL¹⁶

La inyección de combustible en los motores ciclo diesel se realiza a altas presiones y se mezcla con aire a altas temperaturas. Posteriormente, se produce el proceso de ignición instantánea en algunas zonas de la mezcla, generándose un aumento de temperatura y presión en el interior del cilindro. Mientras la inyección sigue ocurriendo, el combustible es atomizado, vaporizado, mezclado con aire y quemado. Existen lugares en el interior de la cámara de combustión en donde, por falta de oxígeno, se produce una combustión incompleta resultando de

¹⁵ MAYER, A.; Elimination of Engine Generated Nanoparticles; Introduction Fig. 3; Suiza; 2005 (Traducción)

¹⁶ ALVARADO, M.; Emisiones de Material Particulado En Motores de Combustión Interna Ciclo Diesel, Universidad de Chile; Chile; 2001

esto partículas de HC, las partículas de carbón (hollín) se forman por la pirólisis de combustibles y aceites lubricantes. Las partículas de menor tamaño son formadas por moléculas de combustible resultantes de procesos tales como la fragmentación, condensación, polimerización. Las partículas pueden crecer en tamaño por unión de varias partículas pequeñas o aumentar su masa por incorporación de moléculas que están en fase gaseosa.

En estos motores el MP se caracteriza de acuerdo a su formación. La formación de MP depende de los procesos físicos y químicos que se dan en el proceso combustión.

2.2.1 CARACTERIZACIÓN FÍSICA DE FORMACIÓN DEL MP ¹⁷

Para caracterizar físicamente el MP se lo debe evaluar en dos aspectos: el Tamaño de Partícula y el Conteo de partículas.

2.2.1.1. Caracterización física de formación del MP por tamaño de partícula.

En los estudios actuales a las partículas por su tamaño se las divide en dos grupos denominados MP_{10} y $MP_{2.5}$ (con diámetros equivalentes iguales o menores que $10\mu m$ ó $2.5\mu m$ respectivamente).

Mientras menor sea el tamaño de partícula mayor es la penetración en el organismo del ser humano y por tanto, mayores son los efectos dañinos que en él causan, por ejemplo el MP_{10} produce trastornos sanguíneos y cardiovasculares mientras que el $MP_{2.5}$ puede generar daños cancerígenos y genéticos (mutaciones).

2.2.1.2. Caracterización física de formación del MP por conteo de partículas.

Al evaluar por Conteo el MP en una muestra de emisiones contaminantes se

¹⁷ ALVARADO, M.; Emisiones de Material Particulado En Motores de Combustión Interna Ciclo Diesel, Universidad de Chile; Chile; 2001

pueden presentar dos casos:

- *Monodispersión*: Cuando se tiene una concentración de partículas con un diámetro fijo y cierta densidad.
- *Polidispersión*: Cuando se tiene una concentración de partículas de diferentes diámetros y cierta densidad.

2.2.2 CARACTERIZACIÓN QUÍMICA DE LA FORMACIÓN DEL MP ¹⁸

El material particulado es una mezcla compleja de compuestos orgánicos e inorgánicos. Por tanto, la caracterización química se lo hace en función de los componentes químicos del MP, así:

- **Fracción Insoluble**: Esta fracción de MP está constituido en su mayoría por “partículas primarias”, las mismas que están compuestas básicamente por carbono (las partículas de carbón son partículas inertes que inducen al cáncer) y se encuentran en fase sólida, también incluye pequeñas cantidades de cenizas no combustibles (las cenizas son derivadas principalmente de lubricantes, aditivos de combustibles y del desgaste propio del motor).
- **Sulfatos**: Son derivados de compuestos de sulfuros del combustible y en una cantidad menor del aceite lubricante. El sulfato es emitido por el motor como anhídrido sulfuroso (SO_2) y en menor cantidad anhídrido sulfúrico (SO_3). Los sulfatos son formados de la reacción entre SO_3 y H_2O .
- **Fracción Soluble**: También se la denomina Fracción Orgánica Soluble (SOF). Esta fracción está constituida por compuestos orgánicos de alto peso molecular y estructura compleja, son derivados de combustibles y lubricantes. Se los agrupa en hidrocarburos no combustionados (alcalinos,

¹⁸ ALVARADO, M.; Emisiones de Material Particulado En Motores de Combustión Interna Ciclo Diesel, Universidad de Chile; Chile; 2001

aromáticos), hidrocarburos oxigenados (ácidos orgánicos, éteres) e hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAPs).

2.2.3 PROCESOS DE FORMACIÓN DE MP EN LAS EMISIONES DE MOTORES CICLO DIESEL¹⁹

Existen todavía muchos procesos de formación de partículas en la combustión que no son entendidos en detalle y que difieren dependiendo del combustible. También hay varios procesos precursores de MP que se presentan inmediatamente después de la combustión o en el muestreo de gases de escape.

En la sección 2.2 se mencionan los procesos más estudiados de la formación de MP. A continuación se los clasifica en físicos y químicos:

2.2.3.1. Procesos Físicos

Son aquellos procesos en los que no existen reacciones químicas entre las sustancias.

2.2.3.1.1. Coagulación

Coagulación es el proceso donde las partículas interactúan y colisionan unas contra otras, dando lugar a la formación de nuevas partículas. Este mecanismo no afecta la masa total de partículas en los gases de escape, pero se produce un decremento en el número de partículas pequeñas y un incremento de partículas grandes. Este proceso es controlado por la concentración de partículas y la relación de dilución en la línea de muestreo. Si la relación de dilución es alta, y el gas de dilución es limpio, entonces la colisión entre partículas es baja.

¹⁹ TRACEY K.; Exhaust: Evaluating Different Measurement Techniques and Vehicle Technologies; Carleton University; Canada; 2002.

2.2.3.1.2. Adsorción

Es el proceso donde las moléculas de un gas o vapor se adhieren a la superficie de una partícula sólida. La adsorción está en una relación directamente proporcional con la tasa de saturación, por lo tanto, cuando se incrementa la tasa de saturación ocurre lo mismo con la adsorción. A una tasa de saturación de cerca de 1.0, la adsorción se vuelve condensación. El proceso inverso también es posible, si la tasa de saturación empieza a decrecer, los componentes orgánicos se desligan de las partículas y regresan a su estado gaseoso.

Los otros dos factores que controlan este proceso son el tiempo requerido para que la adsorción ocurra y el área de superficie disponible. Si el tiempo de muestreo no es suficiente para que se produzca la adsorción o si no hay suficiente área de superficie, la adsorción es minimizada. En el caso de los gases de escape de vehículos, la adsorción se da por los compuestos orgánicos volátiles sobre las partículas existentes en las emisiones, lo que afecta el tamaño y masa de las emisiones de material particulado, mientras que disminuye el contenido de hidrocarburos gaseosos en las emisiones.

2.2.3.1.3. Nucleación

Es el proceso de formación de nuevas partículas a partir de las sustancias orgánicas volátiles. Los hidrocarburos poliaromáticos son moléculas precursoras de la nucleación. Una alta tasa de saturación y baja área de superficie son óptimas para la nucleación de nuevas partículas. Una vez que la partícula alcanza cierto tamaño y se estabiliza, ésta continúa creciendo por efecto de condensación.

El proceso de nucleación ocurre de dos maneras: nucleación homogénea y nucleación heterogénea. Bajo condiciones de alta super saturación, forma cadenas de moléculas (clusters) a partir de moléculas de vapor y si las emisiones tienen una suficiente super saturación, las cadenas crecen hasta dar lugar a la condensación. Este proceso conduce la producción de grandes cantidades de

nuevas partículas. La nucleación heterogénea es similar a la homogénea excepto porque en este caso ya existe nucleación inicialmente en los gases de escape, por esta razón puede ocurrir a niveles de baja super saturación.

Kittelson descubrió que una relación de dilución entre 5:1 y 50:1 produce altas tasas de saturación, lo cual maximiza la nucleación.

2.2.3.1.4. Condensación y Evaporación

Condensación es el proceso que se da por la nucleación y adsorción cuando hay presentes partículas estables y altos niveles de saturación. La condensación es reversible, y la evaporación de los gases condensados puede ocurrir si el nivel de saturación cae por debajo de 1.0. Un decremento en la temperatura en los sistemas de muestreo causa que la muestra gaseosa se convierta en vapor, lo cual incrementa la tasa de saturación y por lo tanto se incrementa la posibilidad de condensación. La condensación y evaporación pueden afectar el tamaño y la masa del material particulado.

2.2.3.2. Procesos Químicos.

Son aquellos procesos en los que existen reacciones químicas entre los diferentes compuestos. Estas reacciones son precursoras de MP en la combustión.

2.2.3.2.1. Pirólisis²⁰

Se puede definir como la descomposición térmica de un material en ausencia de oxígeno o cualquier otro reactante. Esta descomposición se produce a través de una serie compleja de reacciones químicas y de procesos de transferencia de materia y calor.

²⁰ <http://es.wikipedia.org/wiki/Pirólisis>

La pirólisis también aparece como paso previo a la gasificación y la combustión. Se puede considerar que la pirólisis comienza alrededor de los 250°C, llegando a ser prácticamente completa alrededor a los 500°C.

2.2.3.2.2. Polimerización²¹

Polimerización es un proceso químico en el cual los reactivos monómeros se agrupan químicamente entre sí dando lugar a una molécula de gran peso, llamada polímero, que puede ser bien una cadena lineal o una macromolécula tridimensional.

2.2.4 HIDROCARBUROS AROMÁTICOS POLICÍCLICOS (HAPs)²²

El término hidrocarburo indica que la molécula contiene sólo carbono e hidrógeno. Dentro de estas moléculas está un grupo particular que son los Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos (HAPs)

A los HAPs también se los conoce como APN (aromáticos polinucleares) o como CAP (Compuestos aromáticos policíclicos). Son compuestos orgánicos formados por tres o más anillos aromáticos condensados, en donde algunos átomos de carbono son comunes a dos o tres anillos. Los anillos pueden estar en línea recta, angulados o racimados. La estructura más sencilla, formada por sólo dos anillos aromáticos condensados, es el naftaleno representado en la Fig. 2.2.

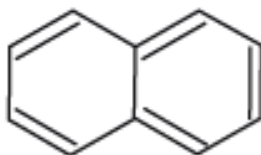


Figura 2.2. Estructura química del Naftaleno (C₁₀H₈)²³

²¹ <http://es.wikipedia.org/wiki/Polimerización>

²² Enciclopedia de Salud Y Seguridad en el Trabajo

²³ http://www.scielo.org.ar/scielo.php?pid=S0325-29572005000100006&script=sci_arttext&tlng=es

Entre los HAPs se encuentran cientos de compuestos que han sido objeto de gran atención por ser muchos de ellos carcinogénicos, genotóxicos y/o mutagénicos, especialmente aquellos HAPs que contienen entre cuatro y seis anillos aromáticos, como por ejemplo el Benzo(a)pireno (BaP) (Ver Fig. 2.3.).

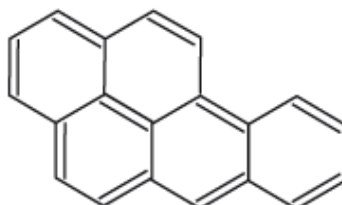


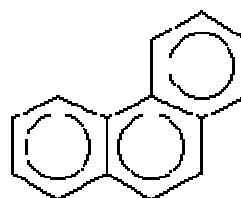
Figura 2.3. Estructura química del Benzo(a)pireno ($C_{20}H_{12}$)²⁴

Por esto, las principales organizaciones mundiales relacionadas con estudios de contaminación ambiental, consideran aquellos HAPs que tienen una presencia significativa en cuanto a peligrosidad y frecuencia. Por ejemplo, la US-EPA incluye en su lista de contaminantes prioritarios a un grupo de 16 HAPs, cuya estructura química se presenta en la Fig. 2.4.²⁴

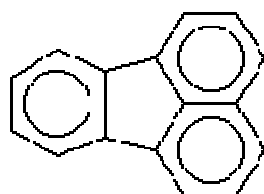
Antraceno (An)



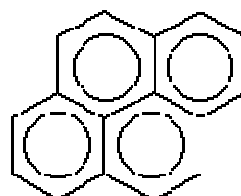
Fenantreno (Ph)



Fluoranteno (Fl)



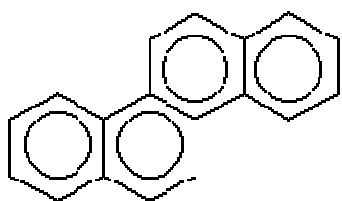
Pireno (Py)



Criseno (Chry)

Naftaleno (Np)

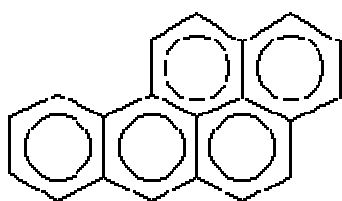
²⁴ http://www.scielo.org.ar/scielo.php?pid=S0325-29572005000100006&script=sci_arttext&tlng=es



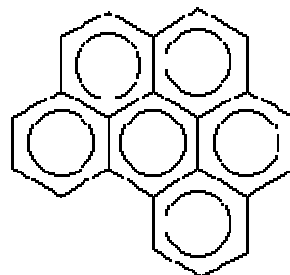
Benzo[a]pireno (B[a]Py)



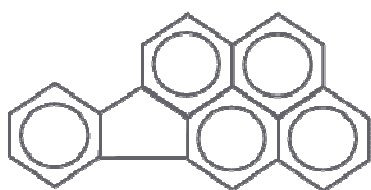
Benzo[g,h,i]perileno (B[g,h,i]Pe)



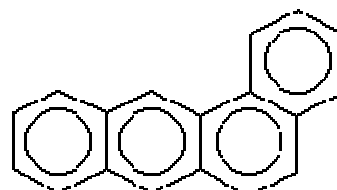
Indeno[1,2,3-c,d]pireno (I[1,2,3-c,d]Py)



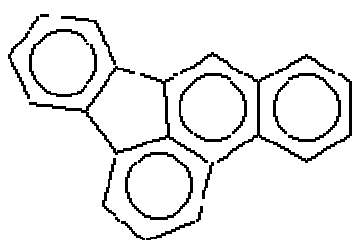
Benzo[a]antraceno (B[a]An)



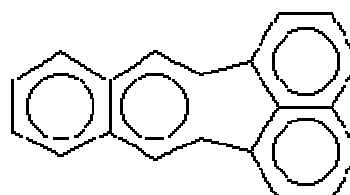
Benzo[b]fluoranteno (B[b]Fl)



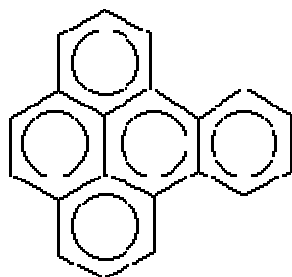
Benzo[k]fluoranteno (B[k]Fl)



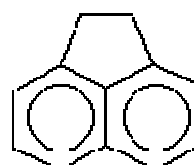
Benzo[e]pireno (B[e]Py)



Acenafteno (Ace)



Fluoreno (F)



Dibenz[a,h]antraceno (dB[a,h]An)

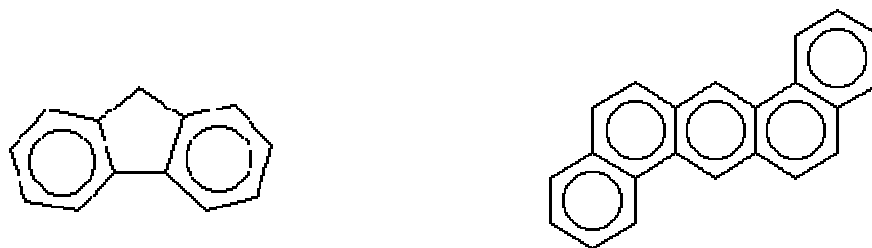


Figura 2.4. Estructura química de los HAPs considerados por el US-EPA

2.2.4.1. Propiedades Físicoquímicas de los HAPs.²⁵

Los sistemas conjugados de los HAPs son los responsables de su estabilidad química. Son sólidos a temperatura ambiente y su volatilidad es muy baja. Dependiendo de su carácter aromático, los HAPs absorben luz ultravioleta y producen un espectro fluorescente característico. Son solubles en muchos disolventes orgánicos, pero muy poco solubles en agua, tanto menos cuanto mayor sea su peso molecular.

El hecho de que los HAPs cancerígenos reaccionen con otras sustancias no significa necesariamente que se inactiven como tales; por el contrario, muchos HAPs que contienen sustituyentes son carcinógenos más potentes que su compuesto de origen.

En el ANEXO B se presentan las Propiedades Físico-Químicas de los HAPs más importantes.

2.2.4.2. Formación de los HAPs.²⁵

Los HAPs se forman por pirólisis o por combustión incompleta de materia orgánica que contiene carbono e hidrógeno. A elevadas temperaturas, la pirólisis de compuestos orgánicos produce fragmentos de moléculas y radicales que se combinan para formar HAPs. Factores como el tipo de combustible, la

²⁵ Enciclopedia de Salud Y Seguridad en el Trabajo

temperatura y el tiempo de estancia en la zona de combustión influyen en la composición de los productos resultantes de la pirólisis. Los combustibles que forman HAPs son el metano y otros hidrocarburos, hidratos de carbono, ligninas, péptidos, etc.

Los HAPs se emiten de la zona de combustión en forma de vapores. Debido a sus bajas presiones de vapor, la mayoría de los HAPs se condensan al instante sobre partículas de hollín (adsorción) o forman ellos mismos partículas muy pequeñas (nucleación) y en el caso de los HAPs liberados a la atmósfera en forma de vapor son adsorbidos por las partículas presentes en ella, esto producirá una diseminación de aerosoles que contienen HAPs, que pueden ser transportados a grandes distancias por los vientos.

2.2.4.3. Fuentes de HAPs

Los HAPs pueden encontrarse casi en todas partes, en el aire, en la tierra y en el agua, procedentes de fuentes naturales o antropogénicas. La contribución de las fuentes naturales, como los incendios forestales y los volcanes, es mínima si la comparamos con las emisiones causadas por el ser humano.²⁶

La más importante fuente de emisión de HAPs al aire son los automotores ligeros y de carga pesada. Los procesos de combustión corrientes y los procesos industriales como el refinamiento del petróleo han dejado una alta contaminación de HAPs en el medio ambiente.²⁷

Las emisiones de HAPs provenientes de la quema de combustibles fósiles pueden variar severamente dependiendo de la cantidad de partículas de combustible y condiciones de combustión, por lo que las fuentes industriales y comerciales de HAPs pueden clasificarse de acuerdo a los procesos asociados con cierto tipo de combustible o unidad de combustión. Los ambientes urbanos y

²⁶ Enciclopedia de Salud Y Seguridad en el Trabajo

²⁷ Manual del Usuario PAS2000

altamente industrializados contienen altos niveles de HAPs en comparación con sectores rurales.²⁸

El destino de los HAPs en el ambiente depende de que tan fácil se disuelvan en el agua y que tan fácil se evaporan en el aire. El tiempo de estancia de las partículas de HAPs en el ambiente y su transporte depende de su tamaño. Los HAPs pueden ser removidos por deposición húmeda o seca en la tierra, agua y vegetación. En el agua pueden volatilizarse, oxidarse, biodegradarse, adherirse con partículas suspendidas o sedimentos, o acumularse en organismos acuáticos. En sedimentos pueden degradarse o acumularse en organismos acuáticos. Los HAPs en la tierra pueden volatilizarse, degradarse o acumularse en plantas, también pueden trasladarse en aguas subterráneas y ser transportados en acuíferos.²⁹

2.3 MÉTODOS PARA LA MEDICIÓN DE MP³⁰

A los métodos de medición de MP se los clasifica considerando la forma de tomar la muestra de gases de escape, por lo tanto son de dos tipos: métodos de recolección y métodos in-situ.

Además, para cada uno de estos métodos se tiene una gran variedad de técnicas de medición de partículas, que difieren unas de otras por los principios físicos que utilizan.

2.3.1 CLASIFICACIÓN DE LOS MÉTODOS DE MEDICIÓN

Para la medición del MP se emplean diferentes métodos, como los explicados a continuación

²⁸ Manual del Usuario PAS2000

²⁹ Enciclopedia de Salud Y Seguridad en el Trabajo

³⁰ MOHR, M., BURTSCHER H.; Elimination of Engine Generated Nanoparticles; Conventional and New Methods of Particle Measurements; Suiza; 2005.

2.3.1.1. Métodos de Recolección

Con este método las partículas primero pasan a través de un filtro o extractor para luego ser analizadas. Para este método de medida se tiene un gran número de técnicas de análisis (químico, microscopio de electrones, microscopio de luz, gravimetría y espectroscopia). Por otro lado, el tiempo de resolución es muy limitado debido a que el tiempo de recolección, puede durar de minutos a muchas horas dependiendo de la concentración y la técnica, por lo que las mediciones en tiempo real no son posibles. El proceso de recolección también involucra riesgo de errores en los resultados ya que las condiciones de temperatura, presión y humedad pueden variar entre la toma de las muestras, filtrado y mezcla de los gases, generando por ejemplo que materiales en fase gaseosa se precipiten en el filtro y se vuelvan volátiles. También pueden ocurrir reacciones químicas entre los diferentes componentes de las emisiones en el filtro y se podrían analizar sustancias que originalmente no existían.

2.3.1.2. Método In-situ.

En esta categoría las partículas son analizadas en sitio, en otras palabras en el medio en el que son emitidos. Los errores anteriormente mencionados pueden evitarse, las mediciones en tiempo real si son posibles y se puede alcanzar tiempos de resolución menores a un segundo, con ciertas técnicas. Las técnicas utilizables con este método son aquellas desarrolladas para el análisis de aerosoles y éstas generalmente proporcionan información poco detallada. Estas técnicas son frecuentemente basadas en la interacción de las partículas con el gas circundante (difusión, convección forzada, condensación) o con luz (dispersión de luz, absorción y extinción).

2.3.2 PRINCIPIOS FÍSICOS UTILIZADOS PARA LA MEDICIÓN DE MP

2.3.2.1 El movimiento de una partícula en el ambiente gaseoso.

Las aplicaciones de medición se enfocan en el movimiento acelerado de las partículas. La ecuación general para el movimiento de una partícula en el gas ambiente es como sigue:

$$\vec{F} = \frac{\vec{v}}{b} + m \frac{d\vec{v}}{dt} \quad (\text{Ec. 2.1})$$

donde:

m : Masa de partícula en movimiento

\vec{F} : Fuerza que actúa sobre la partícula en movimiento

\vec{v} : Velocidad de movimiento de la partícula

b : constante de movimiento de la partícula

$\frac{d\vec{v}}{dt}$: Aceleración de la partícula en movimiento

Para un movimiento uniforme se tiene una velocidad constante por lo tanto:

$$v = \text{constante}$$

$$\vec{v} = \vec{F} \cdot b \quad (\text{Ec. 2.2})$$

Diferentes tipos de fuerzas externas dirigidas son aplicadas para diferentes propósitos de medidas, por ejemplo: fuerza eléctrica actuando en un campo, fuerza de inercia.

Se tiene una clase de movimiento para cada tipo de fuerza que actúe. Por ejemplo:

- Fuerza de gravedad \Rightarrow Movimiento de Sedimentación.

- Impacto debido al movimiento térmico de las partículas \Rightarrow Movimiento de difusión
- Fuerza eléctrica actuando en el campo \Rightarrow Movimiento de partículas cargadas en un campo eléctrico.
- Fuerza de Inercia \Rightarrow Impacto.

2.3.2.2 Interacción con radiación electromagnética.

Hay básicamente dos tipos de interacción que son usados por las técnicas de medida óptica: absorción y dispersión. Dependiendo de la razón de longitud de onda λ y el radio de la partícula R una teoría diferente tiene que ser utilizada para describir los procesos:

Si $R \gg \lambda$: Utilizar la Teoría de Óptica Geométrica

Si $R \equiv \lambda$: Utilizar la Teoría de Mie.

Si $R \ll \lambda$: Utilizar la Teoría de Dispersión de Rayleigh.

La luz visible y partículas finas están dentro del alcance de las Teorías de Mie y Rayleigh. La intensidad de dispersión y absorción disminuyen rápidamente cuando el tamaño de la partícula es más pequeño.

a. Extinción.

La atenuación del haz de luz a través de dispersión y absorción por partículas de aerosol es conocido como extinción y es descrito por la Ley de Lambert - Beer:

$$\frac{I}{I_0} = e^{-k.L} \quad (\text{Ec. 2.3})$$

donde:

I_0 : Intensidad de la luz incidente.

I : Intensidad de la luz desprendida

k : Coeficiente de extinción.

L : Longitud de la trayectoria óptica a través de la mezcla

Para una mezcla monodispersa, el coeficiente de extinción es proporcional al número de concentración, el área de la sección transversal de las partículas y el coeficiente de la superficie de la partícula. Ya que el coeficiente también depende del tamaño de la partícula, este es generalmente considerado en la práctica suficiente para especificar k como función de la concentración de partícula.

b. Dispersión de luz.

Una significativamente alta sensibilidad puede ser alcanzada midiendo la tasa de luz dispersa en comparación con el método de extinción. La intensidad de luz dispersa depende del tamaño de la partícula, el índice de refracción, la longitud de onda, de la luz incidente y del ángulo de dispersión. Para partículas pequeñas (diámetro de partícula: $d_p \ll \lambda$) la intensidad de luz dispersa decrece a una tasa de $(d_p)^6$, y para partículas dentro del rango de longitud de onda la función de luz dispersa oscila con las propiedades ópticas de las partículas. Por esta razón, los instrumentos de medida de luz dispersa son utilizables para partículas dentro del rango de tamaño de 100 nm y son calibrados por medidas de tamaño con partículas esféricas de látex.

2.3.3 TÉCNICAS DE MEDICIÓN DE MP

A partir de los principios físicos explicados en esta sección, se han desarrollado diferentes técnicas de medición de MP, las más comunes son las siguientes:

- Contador de Partículas Condensadas (CPC)
- Análisis de Movilidad Electroestática (DMA, SMPS, DMPS, DMS)
- Batería de difusión

- Clasificación del tamaño en base a la inercia
- Sensor Aerodinámico de partículas (APS)
- Impactador de cascada
- Impactador eléctrico de baja presión
- Monitor de masa
- Espectrómetro de tiempo de vuelo
- Contador óptico de partículas
- Medidor integral de dispersión y extinción de luz
- Fotómetro
- Opacímetro
- Medida directa de la absorción
- Sensor fotoacústico
- Incandescencia por láser inducido
- Medida de masa con método de filtrado
- Gravimetría
- Determinación de la masas de las partículas con un filtro de cristal cuarzo (TEOM, QCM)
- Absorción de rayos beta y de luz
- Determinación de la masa de la partícula por análisis de gases
- Enlace de átomos, moléculas y iones
- Epifaniómetro
- Cargador de difusión
- Carga fotoeléctrica

Existen diferentes equipos de análisis y medición de gases de escape que se han desarrollado en base a estas técnicas de medición. El equipo de medición que sirve como base y referencia de los parámetros para el desarrollo del presente proyecto es el PAS 2000 (Carga fotoeléctrica), a continuación se presenta un extracto del catálogo de dicho equipo.

2.3.3.1 Monitor de Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos (HAPs) en tiempo real PAS2000³¹

2.3.3.1.1 Fenómeno Físico

El sensado fotoeléctrico de la mezcla está basado en la ionización fotoeléctrica de partículas. Si se irradian partículas ultrafinas con luz que tenga una energía $h\nu$ y si esta energía es mayor a la función fotoeléctrica de entrada, la partícula emite un fotoelectrón. Después de la fotoemisión la partícula original cambia su carga positivamente.

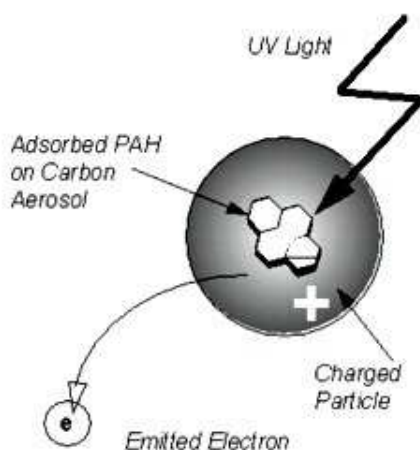


Figura 2.5. Principio físico de funcionamiento del PAS2000

Por sí mismas las partículas no son capaces de producir fotoemisiones. Sin embargo las partículas tienen una capa de HAPs que están condensados o adsorbidos en la superficie, la misma que puede ser fácilmente fotoionizada. El fotoelectrón emitido desde una partícula puede ser atrapado por una molécula libre de gas o cualquier otra partícula cargada. Se sabe que la fotoemisión es especialmente efectiva para partículas pequeñas en una región ultrafina. Este grupo de partículas es de particular interés porque implican un máximo riesgo para la salud.

³¹ Manual del Usuario PAS2000

La razón de carga sobre las partículas es medida directa de la concentración de HAPs. Esta carga es medida por el sensor de HAPs. Para una medida reproducible lo más importante es que la lámpara de energía, la geometría de la partícula y la composición se mantengan esencialmente constantes. En estudios científicos previos, ha sido observado que la mayoría de fuentes de combustión tienen una única "característica HAP", por ejemplo durante un rango específico de operación, una fuente de combustión producirá consistentemente iguales HAPs junto con una específica distribución de tamaño de las partículas.

2.3.3.1.2 Principio de Medición

El principio de medición es ilustrado en la Fig. 2.6:

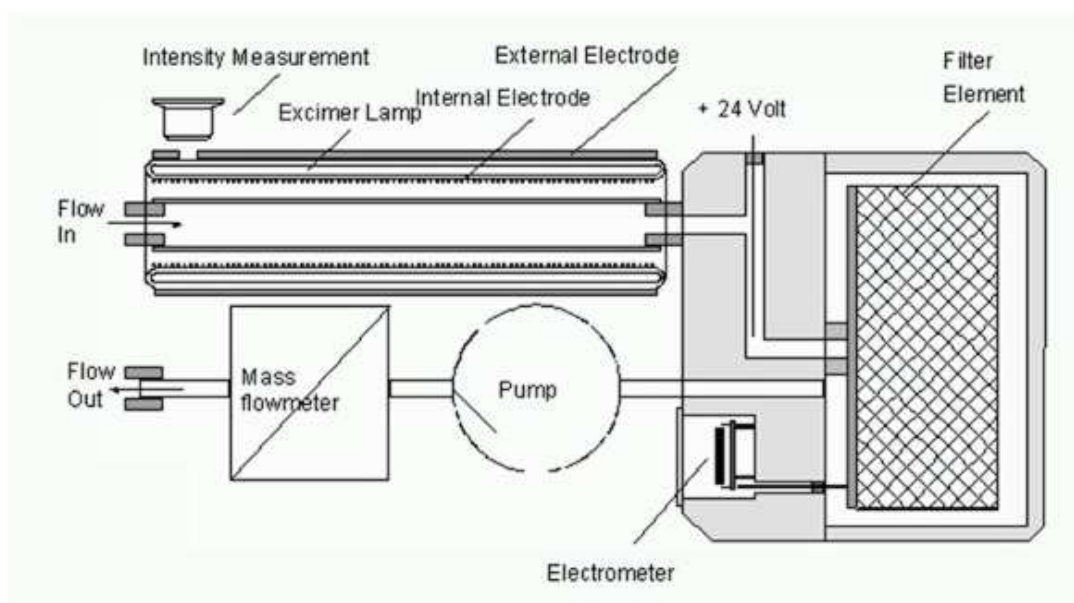


Figura2.6. Principio de medición del PAS2000³²

El flujo de partículas cargadas pasa por un tubo de cuarzo. Alrededor del tubo de cuarzo está montada una lámpara Excimer. La lámpara es un tubo hueco de cuarzo de doble pared. El espacio hueco (2mm de espesor) entre las paredes concéntricas es llenado con criptón(aproximadamente a 300mbar) y bajas

³² Manual del Usuario PAS2000

concentraciones de cloro. El electrodo exterior de la lámpara es un tubo metálico reflector. El electrodo interior es transparente a la luz. Un detector de silicón mide la intensidad de la radiación. Esta señal es usada para controlar la intensidad de la lámpara. El control de intensidad es alcanzado ajustando la frecuencia de la lámpara. Las partículas cargadas luego fluyen a través de un tubo corto antes de entrar al filtro. En el tubo un bajo voltaje es aplicado para remover las partículas cargadas negativamente. Subsecuentemente las partículas cargadas son recolectadas en un filtro que es montado en una jaula de Faraday. La corriente eléctrica asociada con la corriente del ión es desviada hacia un electrómetro y medida.

Los sensores HAP construidos en el pasado usaban una lámpara de mercurio las cuales operaban en un sistema de modo continuo. La lámpara de mercurio necesitaba un tiempo de calentamiento inicial y tenían que estar siempre encendidas. La ventaja de las lámparas Excimer es que éstas pueden ser encendidas y apagadas sin necesitar tiempo de calentamiento inicial y operan en modo de pulsos.

La señal de medida es obtenida por medio de la integración de la corriente de pulsos producida durante el tiempo de exposición. La ventaja de esta operación en modo de pulsaciones es que cualquier interferencia de fondo de la señal por partículas precargadas es evitada. Adicionalmente cualquier fluctuación de la línea base es suprimida.

La bomba antes del filtro se opera a flujo constante con el objetivo de eliminar la dependencia de la medida de la tasa de flujo total en la línea de toma de muestra. Esto es alcanzado con el uso de un medidor de flujo másico. La tasa de flujo óptima es de 2 l/min.

2.3.3.1.3 Especificaciones técnicas

Tabla 2.1 Especificaciones Técnicas PAS2000³³

PANTALLA DE VISUALIZACION	LCD panel con 168 x 64 píxeles de resolución
FUENTE DE PODER	115 V AC/60Hz & 220 V AC/50 Hz Máximo consumo de energía 35 VA
RANGO	0 -100 pA (uso seleccionable)
SENSIBILIDAD	0.3 – 1 µg/m ³ HAPs per pico-amperio (actual calibración de fabricante)
ENTRADA MINIMA	3 ng/ m ³
TIEMPO DE RESPUESTA	< 10 segundos regulable
SALIDA ANALOGA	(0 -10 V) y (0 -20 mA o 4 – 20 mA)
SALIDA DIGITAL	RS - 232
MUESTRA DE GAS	Posee una bomba con una tasa de flujo de 2 l/min
TEMPERATURA DE OPERACIÓN	40 - 104° F (5 – 40° C)
DIMENSIONES	4.5 in x 9.3 in x 12.5 in o133 mm x 236 mm x 317 mm (Alto x Ancho x Profundidad)
PESO	20 lb (9 kg)
ALMACENAMIENTO DE DATOS	2500 Puntos de Datos (cada punto de dato consiste en: Fecha, Tiempo y Valor)
SOFTWARE	User-friendly PC- Software grafico compatible que colecta datos desde el PAS2000. La visualización del software en tiempo real despliega tablas y calculo de porcentajes. Los datos son almacenados en una variedad de formatos. Los archivos de salida Flat ASCII pueden generarse para un análisis posterior en programas con hojas de cálculo. (MS-EXEL)

2.3.4 PREPARACIÓN DE LA MUESTRA DE GASES DE ESCAPE³⁴

Esta etapa es de gran importancia para los métodos de análisis de emisiones contaminantes que necesitan un flujo de la muestra, ya que pueden influir en los resultados.

Existen diferentes métodos de preparación de la muestra, como:

2.3.4.1 Dilución

Para la mayoría de los métodos de medición, los gases de escape tienen que ser diluidos antes de la medición, por una o varias de las siguientes razones:

³³ Manual del Usuario PAS2000

³⁴ MOHR, M., BURTSCHER H.; Elimination of Engine Generated Nanoparticles; Conventional and New Methods of Particle Measurements; Suiza; 2005.

- Hacer compatible la concentración con el rango de medida del aparato de medición.
- Enfriamiento hasta una temperatura apropiada para el aparato de medida.
- Prevención de la condensación de los componentes gaseosos de los gases de escape.
- Disminución del proceso de coagulación.

Procesos de condensación y nucleación pueden ocurrir durante el muestreo y dilución de la muestra de aerosol debido a la presencia de sustancias volátiles en los gases de escape. Estos procesos pueden resultar en la adsorción en la superficie de las partículas existentes y en gran escala de la formación de nuevas partículas, respectivamente. Esto puede evitarse usando la dilución con aire precalentado también llamado dilución en caliente.

Este tema se desarrolla con mayor detalle en el Capítulo 3.

2.3.4.2 Separación de sustancias volátiles

Otra opción, para evitar los problemas de condensación y nucleación, es usar un equipo de desorción en caliente (Fig. 2.7) con la cual las sustancias volátiles son térmicamente evaporadas y recolectadas en un colector, por ejemplo carbón activo.

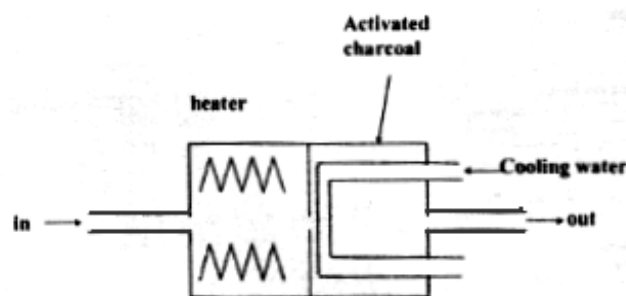


Figura 2.7. Diagrama esquemático de desorción en caliente.³⁵

³⁵ MOHR, M., BURTSCHER H.; Elimination of Engine Generated Nanoparticles; Conventional and New Methods of Particle Measurements; Suiza; 2005.

CAPITULO 3

SISTEMA DE DILUCION

En el Cap. 2 se indicó brevemente la importancia del Proceso de Dilución en la preparación de la muestra de gases de escape para el análisis. En este capítulo se plantean los requerimientos del **Sistema de Dilución**, se explican algunas alternativas de sistemas, se realiza la selección de la alternativa más adecuada, a continuación se desarrolla una simulación de la dilución con el equipo seleccionado variando los parámetros de funcionamiento, finalmente en función de lo anterior se establecen los parámetros de funcionamiento del equipo a diseñarse.

Previo al desarrollo del estudio del sistema de dilución es necesario definir términos que se utilizarán con frecuencia como dilución y relación de dilución

3.1 DILUCIÓN

Dilución es el proceso de disminuir la concentración de una **solución (soluto)** añadiendo **solvente**.³⁶

“Solución es una mezcla homogénea a nivel molecular de una o más especies químicas que no reaccionan entre sí cuyos componentes están en una proporción que varía entre ciertos límites. Una solución es una mezcla en la misma proporción en cualquier cantidad que tomemos (por pequeña que sea), y no se podrán separar por centrifugación ni filtración”.³⁷

Solvente es aquella sustancia que permite la dispersión de otra en su seno. Es el medio dispersante de una solución. Normalmente el disolvente establece el estado físico final de la solución.

³⁶ <http://buscon.rae.es/drael/> Diccionario de la Lengua Española; Vigésima segunda edición

³⁷ <http://en.wikipedia.org/wiki/Concentration>

Concentración es la medida de cuanto de una sustancia dada se ha mezclado con otra, es decir, la cantidad de soluto disuelta en un solvente. Cuando ya no es posible disolver más soluto en el disolvente se dice que en ese punto la solución está **saturada**. El **punto de saturación** depende de variables como la temperatura del medio y la naturaleza química del soluto y solvente.

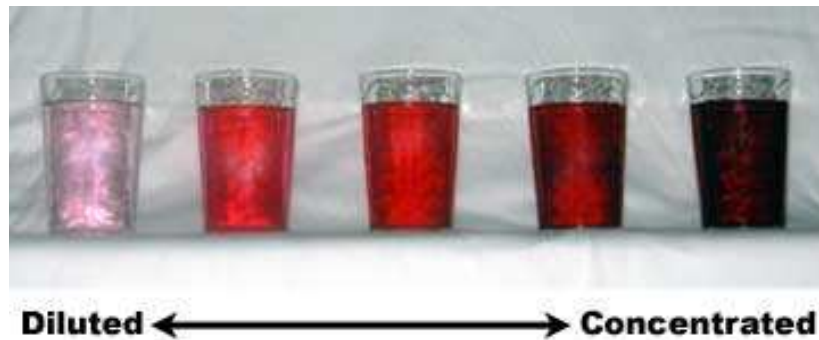


Figura 3.1. Diluido-Concentrado³⁸

Aunque en la Fig. 3.1 no se trata de dilución de gases sino de líquidos, es práctico para adquirir la noción de dilución y concentración, en el vaso de la izquierda la solución (sustancia colorante) está más diluida, mientras que en la de la derecha está más concentrada.

En este estudio el soluto es la muestra de gases de escape, mientras que el solvente es el aire.

La dilución en la medición de emisiones se emplea con varios objetivos como:³⁹

- Simular la dilución de emisiones de la descarga en la atmósfera.
- Prevenir problemas de condensación o adsorción de los compuestos volátiles en el material particulado de las emisiones de escape.
- Disminuir la coagulación de partículas.
- Enfriar la muestra hasta una temperatura adecuada para los instrumentos (sensores, equipo de medición)

³⁸ <http://en.wikipedia.org/wiki/Concentration>

³⁹ MOHR, M., BURTSCHER H.; Elimination of Engine Generated Nanoparticles; Conventional and New Methods of Particle Measurements; Suiza; 2005.

Es importante mencionar que en un proceso de dilución, técnicamente hablando, sólo se añade disolvente a la mezcla, más no soluto.⁴⁰

Existen diferentes formas para indicar la concentración de una solución. Para expresar cuantitativamente la proporción entre un soluto y el solvente en una solución se emplean unidades como: molaridad, normalidad, molalidad, formalidad, porcentaje en peso, porcentaje en volumen, fracción molar, partes por millón, partes por billón, partes por trillón, etc. Y para expresarla cualitativamente se emplean términos como diluido, para bajas concentraciones, o concentrado, para altas.⁴¹

En evaluaciones químicas de la atmósfera y regulaciones de contaminación del aire, comúnmente la concentración se expresa en partes por millón por volumen ppmv, esto sirve para referirse a concentraciones de gases (por ejemplo ppmv de CO₂), pero cuando se trata de sustancias no gaseosas tales como aerosoles, neblinas y MP, se la enuncia en términos de µg/m³ o mg/m³ (por ejemplo µg o mg de partículas por metro cúbico de aire ambiente), lo que elimina la necesidad tomar en cuenta el impacto de la temperatura y la presión en la densidad de los fluidos y en el peso del gas.

Tabla 3.1. Medidas estándares de concentración.

Medidas estándares de concentración usados comúnmente			
Medida	Notación	Fórmula genérica	Unidades
Porcentaje en Masa	%M/M	$\left(\frac{\text{gramos de soluto} \times 100}{\text{gramos de solución}} \right)$	%
Porcentaje en masa - volumen	%M/V	$\left(\frac{\text{gramos de soluto} \times 100}{\text{mililitros de solución}} \right)$	% % kg/l
Porcentaje en volumen - volumen	%V/V	$\left(\frac{\text{mililitros de soluto} \times 100}{\text{mililitros de solución}} \right)$	%

⁴⁰ <http://members.aol.com/profchm/dilution.html>

⁴¹ <http://en.wikipedia.org/wiki/Concentration>

Molaridad	M	$\left(\frac{\text{moles de soluto}}{\text{litro de solución}} \right)$	mol/l M
Molalidad	m	$\left(\frac{\text{moles de soluto}}{\text{ki log ramo de sovente}} \right)$	mol/kg m
Fracción molar	X	$\left(\frac{\text{moles de soluto}}{\text{moles de solución}} \right)$	(fracción)
Formalidad	F	$\left(\frac{\text{moles de soluto no disuelto}}{\text{litro de solución}} \right)$	mol/l F
Normalidad	N	$\left(\frac{\text{gramos equivalentes de soluto}}{\text{litro de solución}} \right)$	N
Partes por cien	% (o pph)	$\left(\frac{\text{decagramos de soluto}}{\text{ki log ramos de solución}} \right)$	Dag/kg
Partes por mil	‰ ‰ (o ppt*)	$\left(\frac{\text{gramos de soluto}}{\text{ki log ramos de solución}} \right)$	g/kg
Partes por millón	ppm	$\left(\frac{\text{miligramos de soluto}}{\text{ki log ramos de solución}} \right)$	mg/kg
Partes por billón	ppb	$\left(\frac{\text{microgramos de soluto}}{\text{ki log ramos de solución}} \right)$	µg/kg
Partes por trillón	ppt*	$\left(\frac{\text{nanogramos de soluto}}{\text{ki log ramos de solución}} \right)$	ng/kg

* “ppt” también suele ser utilizado para denotar “partes por trillón” o para “partes por mil”.

3.1.1 RELACIÓN DE DILUCIÓN

Cuando se lleva a cabo un proceso de dilución, independientemente del método con el que se lo realice, la Relación de Dilución (RD) se calcula mediante las Ec. 3.3 y 3.4 ⁴², que expresa la concentración de una sustancia en el seno de otra:

$$FMT = FMGE + FMAD \quad (\text{Ec. 3.1})$$

Despejando FMGE de Ec. 3.1:

⁴² CIRILO E.; Develop of a Micro-Dilution Tunnel System for In-Use, On-Board Heavy Duty Vehicle Particulate Matter Emissions Measurement; EEUU; 2001.

$$FMGE = FMT - FMAD \quad (\text{Ec. 3.2})$$

$$RD = \frac{FMT}{FMGE} = \frac{FMT}{FMT - FMAD} \quad (\text{Ec. 3.3})$$

$$RD = \frac{FMGE + FMAD}{FMGE} \quad (\text{Ec. 3.4})$$

$$FMGE = \frac{\rho_{GE} * FVGE}{1000 * 60} \quad (\text{Ec. 3.5})$$

$$FMAD = \frac{\rho_{AD} * FVAD}{1000 * 60} \quad (\text{Ec. 3.6})$$

donde:

RD: Relación de Dilución

FMT: Flujo Másico Total en el sistema de dilución (kg/s)

FMGE: Flujo Másico de los Gases de Escape (kg/s)

FMAD: Flujo Másico del Aire de Dilución (kg/s)

ρ_{GE} : Densidad de los gases de escape a condiciones específicas de presión y temperatura (kg/m^3)

ρ_{AD} : Densidad del aire de dilución a condiciones específicas de presión y temperatura (kg/m^3)

FVGE: Flujo Volumétrico de los Gases de Escape (l/min)

FVAD: Flujo Volumétrico del Aire de Dilución (l/min)

De la Ec. 3.4 se entiende que son cuatro variables las que intervienen en el cálculo de la RD: FMGE, FMAD, ρ_{GE} , ρ_{AD} (no se considera el FMT ya que depende exclusivamente de las dos primeras variables enunciadas)

Para cada modo de dilución existen diferentes factores que influyen en cada una de las cuatro variables, los mismos que se deben considerar y especificar, definiendo cuales de estos se conservarán constantes durante la dilución y cuales se variarán. Por ejemplo la presión y temperatura de los dos fluidos afectan directamente a las densidades respectivas y por tanto a la RD.

3.2 REQUERIMIENTOS DEL SISTEMA DE DILUCIÓN

Los requerimientos generales que debe un cumplir un sistema de dilución son:

- Flujo de muestreo consistente con el requerimiento del equipo de medición
- Rango de dilución de 10:1 a 1000:1 (para que dicho sistema tenga la capacidad de evaluar emisiones pre y post dispositivos RETROFIT)
- Posibilidad de utilizarlo tanto en pruebas en ruta (On-board) como en laboratorio.
- Demanda energética baja, esto para permitir las pruebas en ruta.
- Preservación del aerosol que se emite en el humo de escape
- Eliminación de la condensación del vapor de agua que existe en la emisión.

3.3 ALTERNATIVAS DE SISTEMAS DE DILUCIÓN

Para los sistemas de análisis de emisiones contaminantes se puede aplicar el método de muestreo de Flujo Total (MMFT) ó de Flujo Parcial (MMFP). En el primero se toma la totalidad de gases emitidos durante un ciclo (previamente definido, por ejemplo el tiempo especificado en los protocolos de certificación de motores), en el segundo caso sólo se recolecta una fracción de los emisiones del motor.

Si el equipo funciona con muestreo de flujo total ó flujo parcial influye directamente en el tamaño del mismo, por esta razón con flujo total para que el proceso de dilución se complete exitosamente el túnel es de gran longitud, mientras que los dilusores con flujo parcial son considerablemente más pequeños, lo que facilita su instalación y transportación en comparación con el primero.

Además, se han desarrollado estudios en los que se utilizan exitosamente los diferentes equipos de dilución combinados, donde uno cumple la función de dilución primaria y el/los otro(s) realizan una dilución secundaria, también se emplean en configuración de sistemas de dilución en cascada (varios dilusores instalados en serie), etc. Todo esto con el objetivo de alcanzar variados y

mayores rangos de relaciones de dilución que permitan la utilización del dilusor con los diferentes equipos de medición.

3.3.1 SISTEMAS DE DILUCIÓN DE FLUJO TOTAL⁴³

Este tipo de sistemas se basa en la dilución de la totalidad de gases de escape emitidos en un ciclo (tiempo establecido de prueba bajo condiciones específicas).

Un sistema de dilución por flujo total es el denominado método CVS, que utiliza el muestreo a volumen constante. Está constituido por un túnel de dilución por donde se hacen pasar las emisiones, al mismo tiempo que un flujo constante de aire filtrado (libre de partículas) es succionado (Figura 3.2).

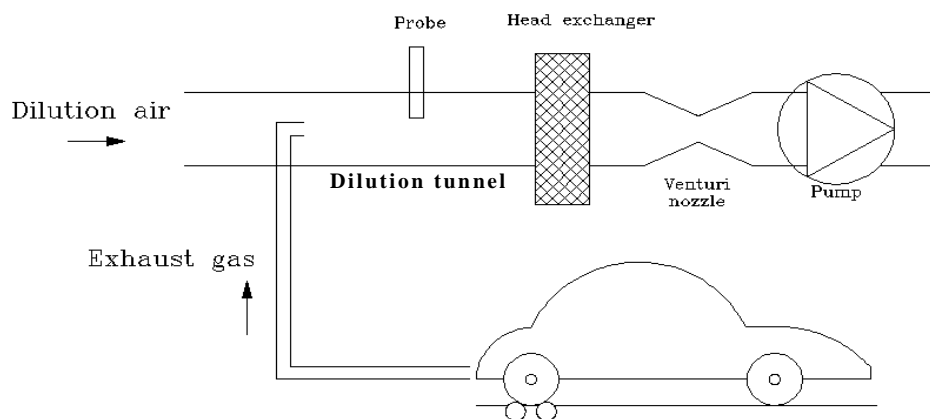


Figura 3.2. Diagrama esquemático de túnel de dilución CVS.⁴⁴

En este caso la dilución es inversamente proporcional al flujo de volumen de los gases de escape.

⁴³ MOHR, M., BURTSCHER H.; Elimination of Engine Generated Nanoparticles; Conventional and New Methods of Particle Measurements; Suiza; 2005.

⁴⁴ MOHR, M., BURTSCHER H.; Elimination of Engine Generated Nanoparticles; Conventional and New Methods of Particle Measurements; Suiza; 2005. (Modificado)

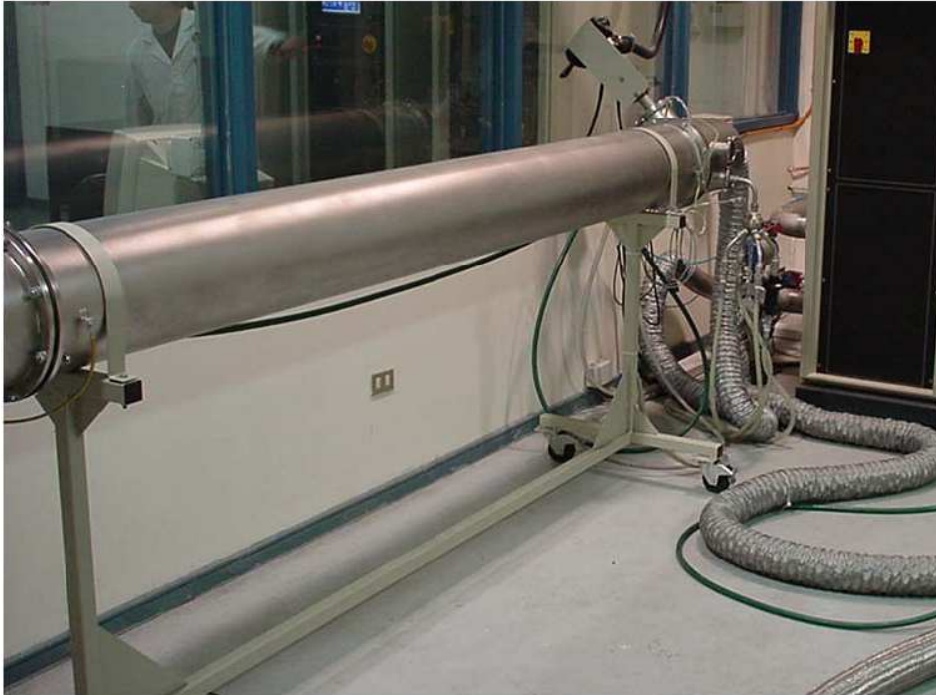


Figura 3.3. Sistema Túnel de Dilución.⁴⁵

Con este método es fácil determinar la emisión total por distancia recorrida (g/km.) o por trabajo realizado (g/kwh.). Para determinar la concentración por unidad de volumen (g/m³) se requiere la medida del factor de dilución. Este dilusor se configura para generar una relación de dilución fija.

El túnel de dilución es de gran tamaño (longitud ≥ 10 diámetro, diámetro ≈ 0.45 m, longitud ≈ 4.5 m)⁴⁷, lo que lo hace apto únicamente para pruebas en laboratorio.

Es importante citar resultados referentes al uso de este dilusor “durante el muestreo en túneles de dilución estándar la muestra tiende a la condensación en nanodroplets (nanopartículas de líquido) las mismas que son detectadas como partículas junto con las partículas no volátiles de hollín”⁴⁶.

Este método es indicado para determinar la medida de la masa de las partículas reguladas para el método de filtrado gravimétrico y normalmente se lo emplea en pruebas de certificación de motores.

⁴⁵ ALVARADO, M.; Emisiones de Material Particulado En Motores de Combustión Interna Ciclo Diesel, Universidad de Chile; Chile; 2001

⁴⁶ www.matter-engineering.com; Preliminary Datasheet NanoMet C (08/29/03); Matter Engineering AG.

3.3.2 SISTEMAS DE DILUCIÓN DE FLUJO PARCIAL

Estos sistemas diluyen una fracción del flujo total de gases de escape. Con estos métodos el porcentaje de dilución está usualmente predeterminado independientemente del flujo de los gases de escape. Los métodos de dilución por flujo parcial son principalmente usados con equipos de medición de partículas en tiempo real.

Una gran ventaja de los dilusores de flujo parcial es su reducido tamaño, lo que facilita su manipulación y montaje. Además, los requerimientos energéticos para su funcionamiento son mucho menores que para los equipos de dilución de flujo total, es posible conectar a fuentes portátiles energía como baterías, lo que hace indicados para aplicaciones de pruebas en ruta.

3.3.2.1. Dilusor con eyector

Este equipo opera con una relación constante de dilución aproximadamente de 1:10. El aire de dilución fluye alrededor de la tobera de succión por un boquete anular. El gas de escape es succionado hacia la cámara de mezcla debido a la caída de presión que genera el flujo de aire (Fig. 3.4.).



Figura 3.4. Diagrama esquemático del dilusor con eyector⁴⁷

⁴⁷ www.dekati.fi (Traducción)

Se pueden utilizar varios eyectores en serie para ampliar rango de relación de dilución⁴⁸, su ventaja es su reducido tamaño (longitud=360mm, diámetro=120mm)⁴⁷.



Figura 3.5. Dilusor con eyector⁴⁹

Con este sistema de dilución la concentración y distribución de tamaño de partícula no son afectadas de manera significativa.⁵⁰

3.3.2.2. Dilusor con disco rotatorio.

En este dilusor flujos continuos pequeños de gases de escape son transferidos en un chorro de aire libre de partículas con la ayuda de un disco rotatorio con alojamientos.

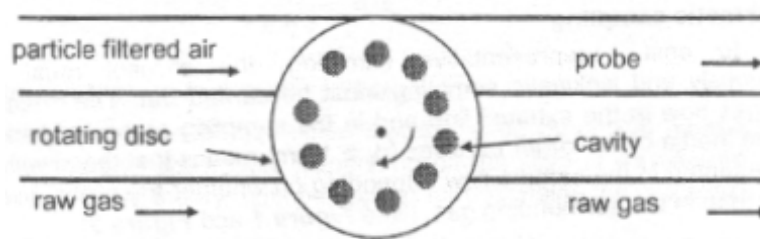


Figura 3.6. Diagrama esquemático de un dilusor con disco rotatorio.⁵¹

⁴⁸ AYALA, BRITT; Ultrafine PM Emissions from Natural Gas, Oxidation-Catalyst Diesel, Particle-Trap Diesel Heavy-Duty Transit Buses

⁴⁹ www.dekati.fi

⁵⁰ LYYRÄNEN, JOKINIEMI, KAUPPINEN, BACKMAN; Comparison of Different Dilution Methods for Measuring Diesel Particle Emissions, September 2002

El dilusor de disco rotatorio presenta varias ventajas: permite configurarlo para obtener amplios rangos de relaciones de dilución (30:1 – 1000:1)⁵², es compacto (258x148x312mm)⁵³ y por lo tanto fácil de instalar, desinstalar y transportar.



Figura 3.7. Dilusor con disco rotatorio.⁵⁴

Además, un aspecto importante es que con este sistema se pueden aplicar varios tipos de dilución (dilución en caliente, termo-dilución, termo-ajuste post-dilución. Ver Sección 3.5.2), con el objetivo de prevenir problemas de nucleación, adsorción, coagulación, etc.

Este sistema se recomienda utilizar sólo cuando se van a analizar partículas de tamaño menor a 1 μm , debido a que al trabajar con partículas grandes se produce pérdidas de éstas en los ductos de dilución y de muestreo, ya que por su tamaño se dificulta arrastrarlas con el flujo de aire y se depositan en las paredes de los ductos y tuberías. (Fig. 3.7.)

3.3.2.3. Mini túnel

Se han desarrollado mini-túneles que aplican la dilución de flujo parcial de acuerdo al método CVS (muestreo a volumen constante). En estos equipos, el

⁵¹ MOHR, M., BURTSCHER H.; Elimination of Engine Generated Nanoparticles; Conventional and New Methods of Particle Measurements; Suiza; 2005.

⁵² HUEGLIN; Dilution system for submicrons aerosols; 1997.

⁵³ www.matter-engineering.com; Preliminary Datasheet NanoMet C (08/29/03)

⁵⁴ www.matter-engineering.com; Raw Gas Dilution for Aerosols and Gases Type MD19-2E.

aire de dilución es controlado con la medida del volumen de flujo de los gases de escape del motor. La Fig. 3.8 muestra un esquema de este dilusor.

Como su longitud no excede los 50 centímetros también es una ventaja su reducido tamaño, es de fácil manipulación y se requiere espacios pequeños para el montaje .

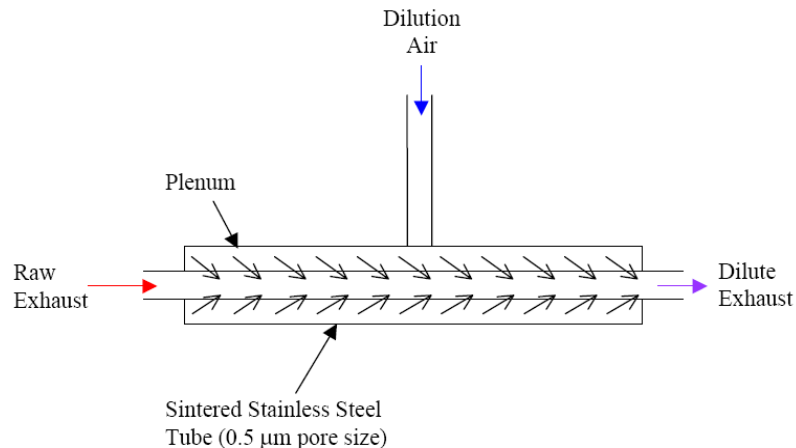


Figura 3.8. Diagrama esquemático de un mini túnel de dilución⁵⁵

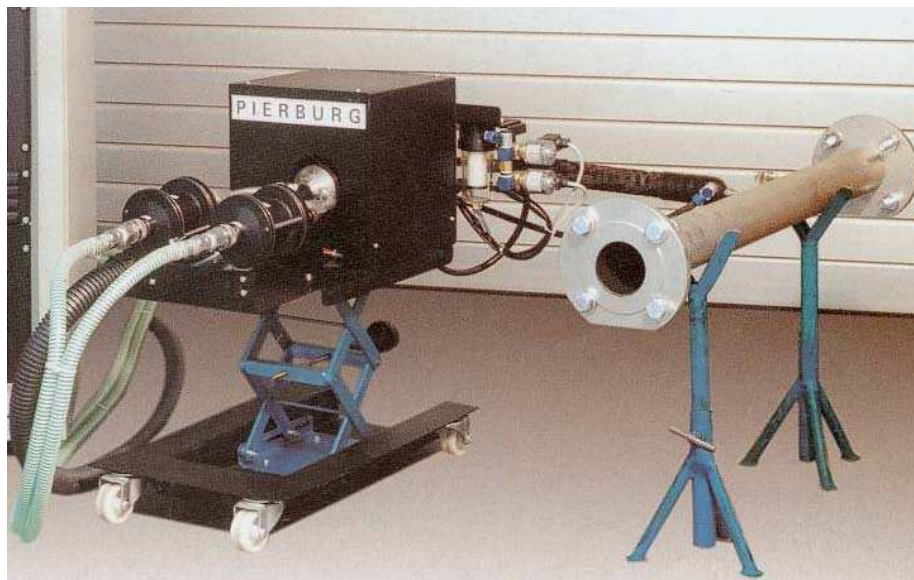


Figura 3.9. Sistema Mini Túnel de Dilución⁵⁶

⁵⁵ Design of a Portable Micro-Dilution Tunnel Particulate Matter Emissions Measurement System; USA; October 2005.

⁵⁶ ALVARADO, M.; Emisiones de Material Particulado en Motores de Combustión Interna Ciclo Diesel, Universidad de Chile; Chile; 2001

Su limitación de uso se debe a que este equipo se configura para funcionar con una relación de dilución fija, aunque es posible variarla pero dentro de pequeños rangos (1:10-1:100) variando el flujo de aire de dilución.

3.4 SELECCIÓN DEL SISTEMA DE DILUCIÓN

Las alternativas de Equipos de Dilución que se consideran son: túnel de dilución, eyector dilusor, mini túnel de dilución, dilusor de disco rotatorio; los mismos que en diversos estudios han sido probados en conjunto con variedad de equipos de medición.

La selección de la alternativa de sistema de dilución más adecuada se realiza evaluando los puntos mencionados en la sección 3.2. y considerando principalmente los requerimientos del equipo de medición con el cual va a trabajar el dilusor.

Cada uno de los equipos de dilución presenta ventajas y desventajas dependiendo de la configuración con el aparato de medición que se emplee, para el presente estudio se consideran los requerimientos, ventajas y desventajas del dilusor al emplearse con el equipo de medición PAS 2000, el cual se utiliza para determinar la concentración de masa del HAPs en las emisiones contaminantes de vehículos en condiciones de trabajo en ruta y en laboratorio, requiriendo por lo tanto un sistema de dilución que pueda instalarse y transportarse con facilidad en éstos.

Las características generales que debe tener el equipo dilusor que se seleccione para diseñar son: sistema de dilución compacto, portable y de sencillo manejo, que tenga un amplio rango de relaciones de dilución y fácil selección de las mismas, este dispositivo debe garantizar no afectar la concentración del número de partículas y preservar la distribución de tamaño de partículas de HAPs en la mezcla, y que el requerimiento energético para su funcionamiento sea bajo (que no exista la necesidad de conectarlo a la red de suministro de energía eléctrica local, que pueda emplear baterías).

No es posible realizar una evaluación cuantitativa de los aspectos mencionados, ya que no se han desarrollado ni documentado dos pruebas exactamente iguales en condiciones, en las que sólo se varíe el dilusor, pues para cada equipo de dilución se plantean condiciones particulares de prueba.

Por lo tanto, para la selección se analiza la descripción de cada alternativa que se presenta en la sección 3.3, por medio de este análisis se pueden descartar las alternativas que no cumplan los requerimientos y conservar las que se ajusten mejor a las necesidades planteadas.

Por el tamaño y requerimiento energético se descarta la posibilidad de emplear un equipo de dilución de flujo total.

Existe limitación en el uso de dilusor eyector y mini túnel por el pequeño rango de relaciones de dilución que permiten obtener, para el uso de estos equipos generalmente se requiere emplear métodos de dilución en varias etapas.

De las alternativas planteadas la que mejor satisface los requerimientos indicados es el Dilusor de Disco Rotatorio, además por su amplio rango de relaciones de dilución este equipo permite no sólo su utilización con el PAS 2000 como equipo de medición, sino que posibilita su configuración para trabajar con otros analizadores que requieran procesos de dilución bajo diferentes condiciones.

3.5 SISTEMA DE DILUCIÓN DE DISCO ROTATORIO

El dilusor de disco rotario (DDR) (Fig. 3.10) está compuesto por un bloque macizo de acero inoxidable que posee dos conductos internos, por el primero ingresa la muestra de gases de escape sin diluir y el otro pasa el aire de dilución. Los dos conductos tienen la salida hacia una misma cara del bloque, en la cual está ubicado un disco que se soporta y rota axialmente en un eje que atraviesa el bloque de acero y está conectado a un motor de pasos con frecuencia variable.

El disco posee un número específico de alojamientos, dispuestos en forma circular, diseñado para permitir un fácil montaje y desmontaje. Es de material sintético autolubricante para que pueda rotar con fricción mínima con el bloque de acero durante el funcionamiento del equipo, sin la necesidad de usar lubricantes.

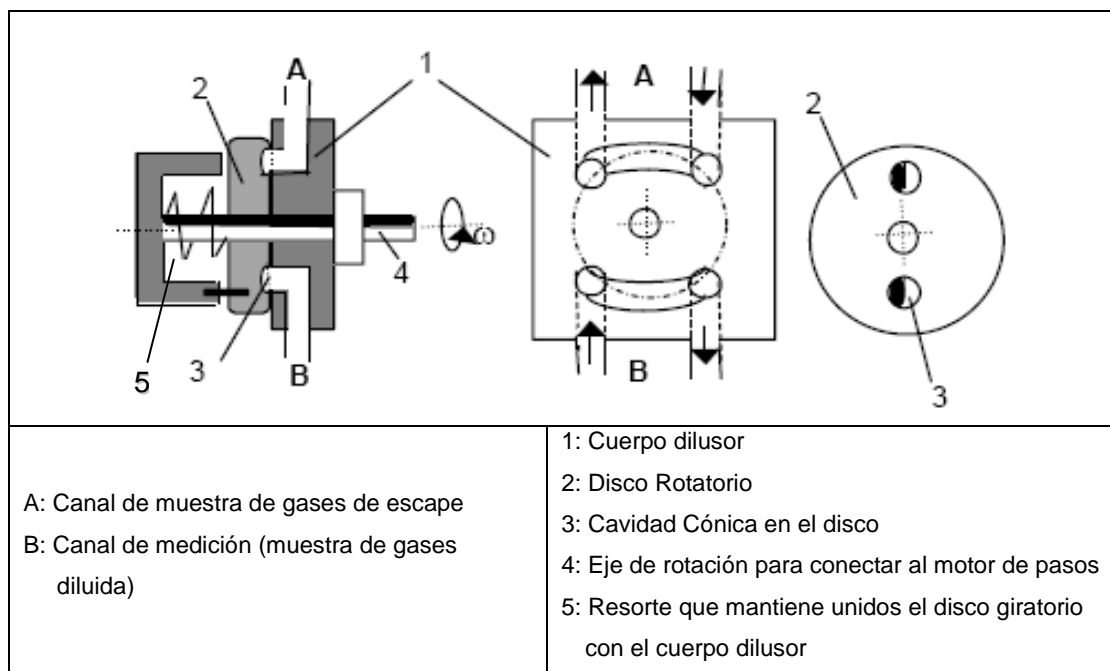


Figura 3.10. Esquema del Dilusor de Disco Rotatorio⁵⁷

3.5.1 PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DEL DDR

En este sistema la dilución de los gases de escape en aire se produce mediante el llenado y vaciado de los alojamientos del disco rotatorio. Es decir, con la ayuda del disco se transporta un cierto volumen de fluido de la línea de muestra de gases de escape hacia el conducto por donde pasa el aire de dilución. Todo este proceso se lleva a cabo mediante el fenómeno físico denominado Transporte de Masa por Convección-Difusión⁵⁸.

⁵⁷ www.matter-engineering.com; Preliminary Datasheet NanoMet C (08/29/03); Matter Engineering AG (Modificado)

⁵⁸ http://www.sulzerinnotec.com/en/PortalData/3/Resources/mat/documents/MAT_DLC_e.pdf

Para comprender el transporte por convección-difusión es necesario entender y distinguir dos procesos de movimiento de un soluto en un fluido: la difusión y la convección⁵⁹, ya que los mecanismos que originan cada uno son diferentes.

- “El **transporte convectivo** proviene del movimiento global de la mezcla”.⁶⁰ En la convección el soluto se mueve debido al movimiento del solvente o fluido, por lo tanto, cuando el fluido permanezca en reposo no habrá convección. El movimiento se produce por factores mecánicos o energéticos externos (por ejemplo: la acción de una bomba, gradientes de presión, diferencias de nivel) que ocasionan el movimiento de la mezcla "en bloque", tal como si fuera una sustancia pura.
- “El **transporte difusivo** se debe al movimiento relativo de los componentes de una mezcla, con velocidades individuales diferentes en magnitud y dirección”.⁵⁹ En la difusión el soluto se mueve como resultado del movimiento intermolecular de las partículas de ambas sustancias. Y el movimiento es causado por los gradientes de potencial químico y puede considerarse como una transformación interna de la mezcla para establecer un estado de equilibrio (equilibrio difusivo).

Los dos mecanismos son importantes en cualquier proceso de transporte pero en muchas ocasiones uno de los dos tiene mayor peso que el otro.

⁵⁹ GÓMEZ Héctor; “Una nueva formulación para el problema del transporte por convección-difusión”; Universidad de A Coruña; España.

⁶⁰ <http://www.monografias.com/trabajos30/transferencia-masa/transferencia-masa>

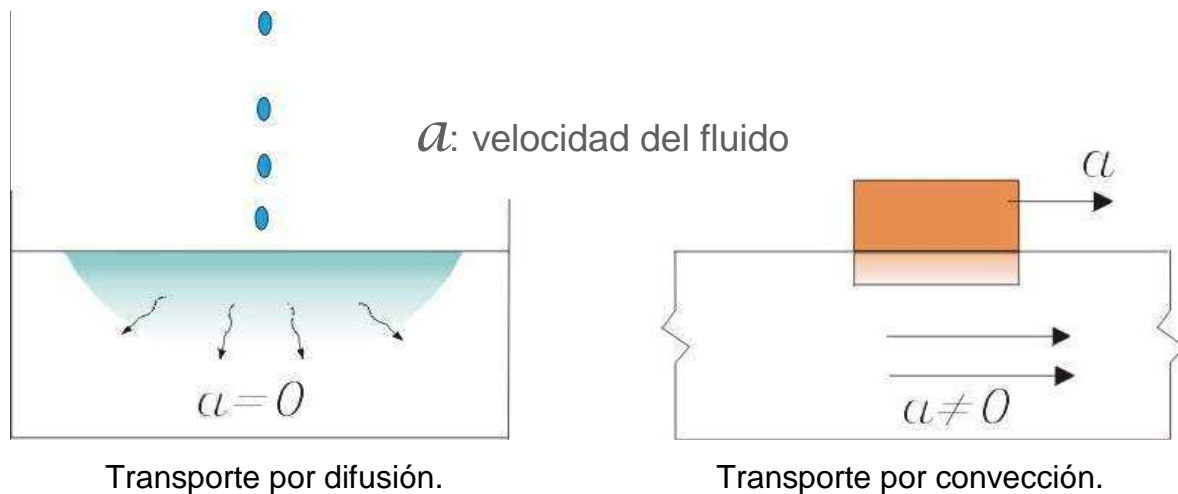


Figura 3.11. Mecanismos de transporte de masa⁶¹

En diversos análisis de ingeniería aparecen los problemas de transporte por convección-difusión, entre ellos se encuentran:⁶¹

- vertidos de contaminantes en medios hídricos y a la atmósfera.
- flujo de fluidos en explotación de recursos hidráulicos.
- simulación del comportamiento de reservas de petróleo, gas natural, etc.
- estudio de transferencias de calor y masa en problemas de ingeniería química y nuclear.

Una introducción a la formulación matemática del problema de transporte por convección- difusión se presenta en el Anexo A.

3.5.2 MÉTODOS DE DILUCIÓN CON EL DDR

En forma resumida a los componentes de las emisiones de un vehículo se los puede diferenciar en dos grupos: partículas sólidas (partículas de carbón u hollín y ceniza) y vapores de sustancias volátiles (agua, sulfato, hidrocarburos).

Debido a los resultados de diferentes estudios, cada vez es más aceptado el

⁶¹ ARELLANO Jesús; "Transferencia de masa sólido - líquido en tanques agitados"; Sartenejal; 2005.

criterio de la necesidad de medir los dos tipos de componentes o fracciones de las emisiones por separado, tanto por razones de reproducibilidad en las mediciones, que es más factible para el caso de las partículas sólidas, como por cuestiones de evaluación de los efectos en la salud. Con el objetivo de poder medir el MP de las emisiones con mejores resultados, es ampliamente aceptado el desempeño de los dilusores de disco rotatorio.

Para evaluar cualquiera de las dos fracciones del MP es importante preservar la muestra y para esto durante la dilución se deben prevenir los procesos de condensación, adsorción, nucleación, etc. que afectarían la muestra de análisis. Para alcanzar este objetivo se tienen diferentes posibilidades: calentar la unidad de dilución mediante el uso de resistencia dispuestas alrededor del bloque de acero, calentar los gases de escape antes de entrar al sistema de dilución, calentar el flujo de aire antes de la dilución, calentar la muestra diluida. A continuación se analizan algunos métodos que se pueden aplicar con este tipo de Dilusor.

3.5.2.1. Dilución en caliente y enfriamiento⁶²

Con el método de dilución en caliente y el posterior enfriamiento de la mezcla, se produce un efecto de histéresis (Fig. 3.12) que puede ser utilizado en varias técnicas para la separación de las sustancias volátiles de las partículas sólidas. El primer esfuerzo para remover los nano-partículas líquidas existentes en el gas de muestra cuando se emplea el CVS, tomado en el punto "G" es diluir la muestra (En la Fig.3.12. Trayectoria G→N).

De todas maneras, ya se conoce, por muchos estudios, que aun con la dilución secundaria usualmente es insuficiente salir del modo de nucleación, y la medición de tamaño de partícula resultará en dos modos de distribución de partículas.

⁶² KASPER, M.; Particle Sampling and Measurement for Type Approval and Field Control; Elimination of Engine Generated Nanoparticles; Suiza; 2005

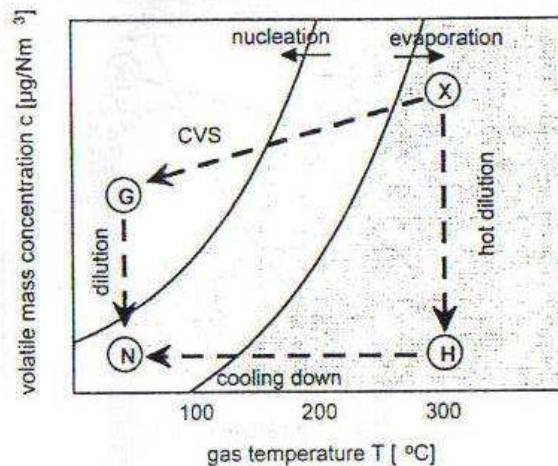


Figura 3.12. Diagrama de Fases y Trayectorias de: Dilución CVS(X-G), Dilución secundaria en frío (G-N), Dilución en caliente (X-H-N)⁶³

La dilución en caliente no remueve las nano-partículas líquidas, pero previene su formación al inicio diluyendo la muestra a altas temperaturas y posteriormente enfriándola (En la Fig.3.12. Trayectoria X→H→N). La dilución en aire caliente se aplica al tomar la muestra caliente, es decir, directamente del tubo de escape y en un sistema de dilución de disco rotatorio caliente. Al igual que cuando se usa la dilución secundaria, aquí el punto final de la dilución es el “N”. Se observa que no se pasa por la etapa de nucleación. Esto es porque después de la dilución en caliente con una suficiente relación de dilución, la presión de vapor de las sustancias volátiles es tan baja que durante el enfriamiento habrá condensación en la superficie de las partículas, pero no puede darse nucleación espontáneamente.

La dilución en caliente requiere que no haya puntos fríos en el sistema de gases de escape del vehículo antes del punto de toma de muestra, ya que si éstos existieran, la nucleación se produciría antes de la dilución, y usualmente aún un sistema de dilución calentado no es capaz de remover las nano-partículas líquidas que ya existirían.

⁶³ KASPER, M.; Particle Sampling and Measurement for Type Approval and Field Control; Elimination of Engine Generated Nanoparticles; Suiza; 2005

El principio de la dilución en caliente es exitoso para la prevención de la nucleación, ya que la dilución y el enfriamiento se desarrollan en dos pasos separados, lo que se observa en la figura donde las transiciones de una fase a otra son en dirección horizontal o vertical. De todas maneras este principio falla si por efecto de los puntos fríos en la línea de emisiones ya existe en la muestra nano-partículas líquidas.

3.5.2.2. Termo-Dilución.⁶⁴

El método que presenta las ventajas de la dilución en caliente y evita las desventajas es la Termo-dilución.

Este método consiste en una sección de calentamiento donde los volátiles son evaporados, seguido por un dilusor de disco rotatorio calentado donde se reduce la presión de vapor de los volátiles al punto que no ocurre nucleación durante el enfriamiento.

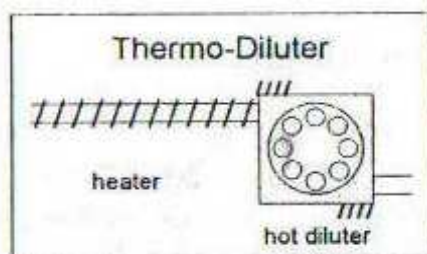


Figura 3.13. Principio de la Termo-Dilución⁶⁴

Este proceso se observa en la Fig. 3.14. en la trayectoria de los puntos “G→V→H→N”, en resumen tiene un subproceso de calentamiento, dilución en caliente y enfriamiento.

⁶⁴ KASPER, M.; Particle Sampling and Measurement for Type Approval and Field Control; Elimination of Engine Generated Nanoparticles; Suiza; 2005

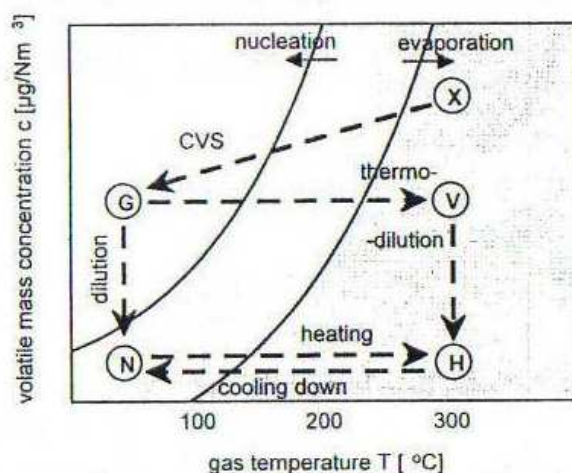


Figura 3.14. Diagrama de Fase y Trayectoria la Termo-Dilución (G-V-H-N) ⁶⁵

3.5.2.3. Termo-acondicionamiento post-dilución ⁶⁵

Si se tiene problemas con la termo-dilución con concentraciones altas de volátiles, se puede optar por invertir el orden del calentador y el dilusor. A este proceso se lo denomina Termo-acondicionamiento post-dilución, y tiene algunas ventajas adicionales como: el dilusor no necesita ser calentado, se lo ubica muy cerca de la fuente de emisiones, esto minimiza la aglomeración de partículas muestreadas; el termo-acondicionamiento es independiente de distribución de temperaturas a lo largo de la línea de calentamiento, sólo la temperatura máxima es relevante, esto mejora la precisión del tratamiento térmico; mientras que el dilusor se ubica cerca del tubo de escape el termo-acondicionamiento se ubica cerca al equipo de análisis de la muestra, obteniendo una disposición más compacta de toda la instrumentación.

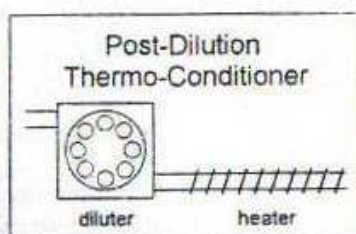


Figura 3.15. Principio de la Termo-acondicionamiento y Termo-Dilución ⁶⁵

⁶⁵ KASPER, M.; Particle Sampling and Measurement for Type Approval and Field Control; Elimination of Engine Generated Nanoparticles; Suiza; 2005

En la Fig. 3.14. este proceso se completa a través de la trayectoria de los puntos “G→N→H→N”.

Es necesario indicar que existe una gran diferencia entre llegar al punto “N” desde “G” (solo con dilución) que desde “H” (con dilución y enfriamiento), ya que en el segundo caso no se cruza la “línea de nucleación”, por tanto no se produce la re-nucleación.

En diferentes laboratorios en pruebas de comparación, este proceso resultó ser la mejor estrategia para remover las nano-partículas líquidas de la muestra de gas mientras que las pérdidas de partículas sólidas fueron bajas. Se recalca que es necesario trabajar con altas relaciones de dilución en este método para reducir suficientemente la presión de vapor de las sustancias volátiles antes del termo-acondicionamiento.

3.5.2.4. Dilución con aire a temperatura

En estudios de análisis y medición de emisiones, cuando se emplea la expresión dilución con “aire a temperatura” quiere decir que el aire de dilución está calentado a 150°C., por lo tanto, en adelante se utiliza la expresión.

Tomando en cuenta las recomendaciones realizadas por el Dr. Alberto Ayala (Manager, Climate Change Mitigation and Emission Reserch California Enviromental Protection Agency Air) colaborador de este proyecto y experto en la evaluación de emisiones contaminantes, se plantea un método de dilución con el DDR, adicional a los explicados anteriormente.

Este método contempla el calentamiento únicamente del aire de dilución a una temperatura de 150°C, es decir, dilución con “aire a temperatura”, la dilución se la realiza cerca del tubo de escape (la temperatura de la muestra de gases de escape es alrededor de 300°C) , no se requiere calentamiento de la muestra antes, durante, ni después de la dilución.

Los estudios desarrollados en la California Air Resouces Board (CARB) dan como resultado que 150°C de temperatura de calentamiento para el aire de dilución es

suficiente para el control del material volátil de las emisiones, es decir, evitar que se presenten procesos de condensación y la subsecuente nucleación homogénea, promovidas por el azufre y la humedad existente en las emisiones, que darían como consecuencia un gran número de partículas ultrafinas de naturaleza volátil.

3.5.3 REQUERIMIENTOS DEL DDR

En la sección 3.2 se indican los requerimientos generales que el sistema de dilución para la medición de emisiones debe cumplir. En esta sección se indican con mayor precisión esos requerimientos para el DDR, con la especificación adicional de que el dilusor se desarrolla para ser utilizado en conjunto con el equipo Monitor de HAPs en Tiempo Real (PAS2000), aunque no se debe descartar su posterior uso con otros equipos de medición de MP.

Por esta razón, el flujo y temperatura de la muestra de análisis dependen directamente de los requerimientos del PAS2000. Así mismo, para definir los parámetros de diseño como: el rango de relaciones de dilución, flujo y temperatura de gases de escape, flujo y temperatura de aire de dilución, requerimiento energético, se consideran los parámetros de funcionamiento de los equipos similares disponibles en el mercado.

A continuación se detallan los requerimientos:

- El rango de dilución mínimo requerido para la aplicación con el PAS2000 es de 1: 10 a 1:1000.
- Para utilizar el equipo en pruebas en ruta (On-board) el requerimiento de energía para su funcionamiento debe ser bajo y de fácil abastecimiento. Por ejemplo con baterías de 12V.
- La temperatura de 150°C de calentamiento del aire de dilución para garantizar que los compuestos volátiles no se condensen.

- El flujo óptimo que el dilusor entregue para analizar debe ser cercano a 2 l/min, que es el flujo para el PAS2000

3.5.4 ANALISIS DE LA RELACIÓN DE DILUCIÓN EN EL DDR

Evaluando la Ec. 3.3 particularmente para el caso del DDR, son los siguientes factores, que influyen en las cuatro variables que intervienen en el cálculo de la Relación de Dilución (RD), los que se consideran y analizan:

- Aumento o disminución del flujo de aire de dilución.
- Temperatura de calentamiento del aire de dilución.
- Temperatura de calentamiento de la muestra de gases de escape.
- Frecuencia de giro del disco (f).
- Número de cavidades en el disco

Existen otros factores que no se analizan, porque no son aplicables en la práctica, por ejemplo variar las presiones de los fluidos sería más costoso tecnológicamente, además de complicado generarlo y controlarlo.

El proceso de dilución en el DDR se lleva a cabo en un solo paso y en un lapso corto, por lo que el tiempo de estancia de la muestra en el dilusor (factor analizado en otros dilusores como el CVS) no se lo examina. La relación de dilución es función lineal del número y volumen de los alojamientos, así como del flujo aire de dilución y de la frecuencia de rotación del disco.

Las figuras 3.16 y 3.17 muestran las curvas de calibración del DDR obtenidas por Hueglin⁶⁶, donde se observan las relaciones de dilución en función de la frecuencia de giro del disco, para discos con diferentes números de cavidades. Con estas curvas se comprueba la relación lineal que existe en el DDR entre la relación de dilución y la frecuencia de giro del disco.

⁶⁶ HUEGLIN; Dilution system for submicrons aerosols; 1997.

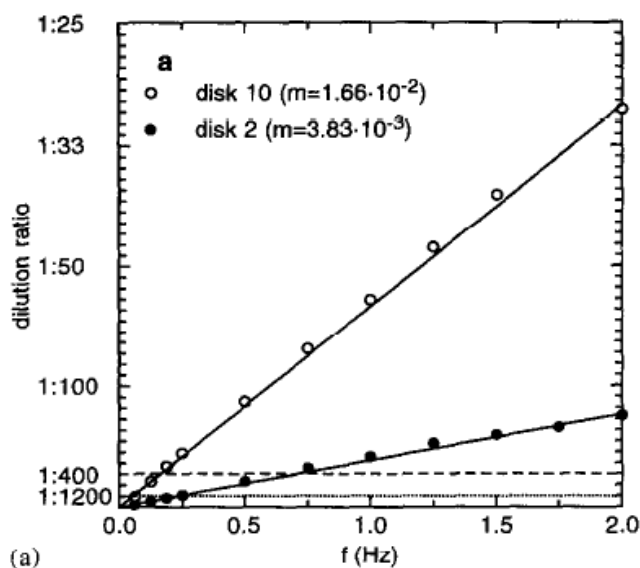


Figura 3.16. Curva de calibración del DDR para discos con diferentes número de cavidades⁶⁶

En la Fig. 3.17 la RD está ilustrada en términos de la señal normalizada emitida por el sensor (PAS 2000), al igual que en la Fig. 3.16 en función de la frecuencia de giro del disco, pero en esta figura se presentan resultados en términos de diferentes flujos de la muestra de gases de escape, que es lo que se obtiene al variar la frecuencia de giro o el número de cavidades en el disco, si se aumenta cualquiera de estos dos parámetros se incrementa el flujo de gas de escape entregado al dilusor.

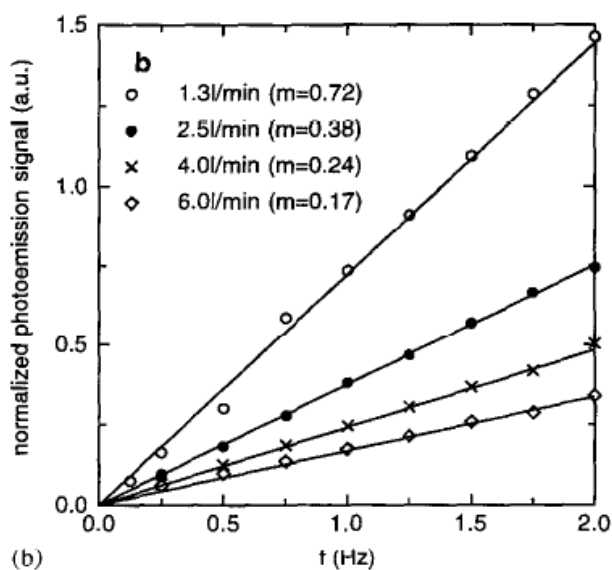


Figura 3.17. Curva de calibración del DDR para diferentes flujos de la muestra de gases de escape.⁶⁷

⁶⁷ HUEGLIN; Dilution system for submicrons aerosols; 1997.

3.5.4.1. Especificación de los fluidos en el DDR

Para la simulación de la relación de dilución se hacen algunas consideraciones respecto al tipo de fluidos y condición de presión que se manejan en el proceso, así:

1. Tanto el aire de dilución, la muestra de gases de escape y la muestra de la solución (gases de escape diluidos), se analizan como fluidos incompresibles por lo siguiente:

El fluido se considera incompresible sí: ⁶⁸

- “La sustancia en movimiento es un líquido”.
- “Si se trata de un gas cuya densidad cambia dentro del sistema en un valor no mayor de 10%, es decir, no hay grandes caídas de presión. En este caso, si se utiliza la densidad de entrada, el error resultante de la caída de presión calculada no sobrepasará por lo común los límites de incertidumbre del factor de fricción”.

Se considera en el presente estudio como dato el valor de presión atmosférica a nivel de mar, es decir 1 atm, y que durante el proceso de dilución las variaciones de presión dentro del Sistema de Dilución serán inferiores a 100 mbar ($\approx 0.10\text{atm}$), por lo tanto la variación de densidad de los fluidos en este proceso es inferior al 10%.

2. Para efectos del cálculo se considera, como una buena aproximación, que los gases de escape tienen la misma densidad del aire, para estudios posteriores dependiendo de las condiciones de pruebas se deberá determinar el factor de corrección correspondiente a la densidad para los gases de escape.

⁶⁸ PERRY; Manual del Ingeniero Químico; Tomo I

3. Los fluidos son gases ideales, sus propiedades a diferentes temperaturas se obtienen de las tablas termodinámicas de aire como gas ideal.

3.5.4.2. Cálculo de la Relación de Dilución

Como se indicó la RD se calcula con la Ec. 3.3, en esta sección se presenta un ejemplo de la secuencia de cálculo de la Relación de Dilución con una tabla de resultados bajo ciertas condiciones, esta incluye el uso de tablas de propiedades de gases para determinar los diferentes parámetros bajo condiciones específicas de presión y temperatura.

Se calcula para los siguientes parámetros:

- Frecuencia de giro del disco: 0.15 Hz
- Aire calentado hasta una Temperatura $T=150^{\circ}\text{C}$; y $P=1\text{atm}$
- Flujo de aire de dilución: 1.5 l/min
- Gases de escape a $P= 1\text{atm}$;y $T=60^{\circ}\text{C}$
- Discos con 2 alojamientos
- Volumen de los alojamientos : 0.05cm^3

Flujo de gases de escape que entra al dilusor:

$$RPM_D = f * 60 \quad (\text{Ec. 3.7})$$

$$FVGE = \frac{NA * VA * RPM_D}{1000} \quad (\text{Ec. 3.8})$$

donde:

RPM_D : Vueltas por minuto que da el disco (rpm)

f : Frecuencia de giro del disco (Hz)

NA: Número de alojamientos en el disco

VA: Volumen por alojamiento (cm^3)

De las ecuaciones 3.7 y 3.8:

$$RPM_D = 9 \text{ rpm}$$

$$FVGE = 9 * 10^{-4} \text{ l/min}$$

Densidades de los fluidos a las condiciones indicadas:

$$\rho_{GE, 60^\circ\text{C}, 1\text{atm}} = 1.051576 \text{ kg/m}^3$$

$$\rho_{AD, 150^\circ\text{C}, 1\text{atm}} = 0.752056 \text{ kg/m}^3$$

De las ecuaciones 3.5 y 3.6:

$$FMGE = 1.577364 * 10^{-8} \text{ kg/s}$$

$$FMAD = 1.880104 * 10^{-5} \text{ kg/s}$$

De la Ec. 3.3:

$$RD = 1193$$

La relación de dilución se suele expresar de la siguiente manera:

$$RD = 1 : 1193$$

Se entiende que por cada unidad de masa de gases de escape se tiene 1193 unidades de masa de muestra diluida.

En la Tabla 3.2 se presenta los resultados de la relación de dilución para el ejemplo anterior desarrollado para un rango de frecuencia de 0.15 a 1 Hz.

Tabla 3.2. Relaciones de dilución máximas y mínimas obtenidas para: $f=0.15 - 1$ Hz, aire de dilución a $T=150^{\circ}\text{C}$ y $P=1\text{atm}$, flujo de aire de dilución: 1.5 l/min, gases de escape a $T=60^{\circ}\text{C}$ y $P=1\text{atm}$, Discos con 2, 4, 6, 8 y 10 cavidades.

Frecuencia (Hz)	Número de vueltas por minutos	Flujo volumétrico gas de escape (l/min):	Flujo volumétrico aire de dilución (l/min):	Densidad Aire de Dilución (kg/m ³)	Densidad Gases de Escape (kg/m ³)	Flujo másico gas de escape (kg/s):	Flujo másico aire de dilución (kg/s):	RELACIÓN DE DILUCION
f	rpm	FVGE	FVAD	ρ_{AD}	ρ_{GE}	FMGE	FMAD	RD
0.15	9	0.0009	1.5	0.752056	1.051576	1.5774E-08	1.8801E-05	1:1193
0.2	12	0.0012	1.5	0.752056	1.051576	2.1032E-08	1.8801E-05	1:895
0.25	15	0.0015	1.5	0.752056	1.051576	2.6289E-08	1.8801E-05	1:716
0.3	18	0.0018	1.5	0.752056	1.051576	3.1547E-08	1.8801E-05	1:597
0.35	21	0.0021	1.5	0.752056	1.051576	3.6805E-08	1.8801E-05	1:512
0.4	24	0.0024	1.5	0.752056	1.051576	4.2063E-08	1.8801E-05	1:448
0.45	27	0.0027	1.5	0.752056	1.051576	4.7321E-08	1.8801E-05	1:398
0.5	30	0.003	1.5	0.752056	1.051576	5.2579E-08	1.8801E-05	1:359
0.55	33	0.0033	1.5	0.752056	1.051576	5.7837E-08	1.8801E-05	1:326
0.6	36	0.0036	1.5	0.752056	1.051576	6.3095E-08	1.8801E-05	1:299
0.65	39	0.0039	1.5	0.752056	1.051576	6.8352E-08	1.8801E-05	1:276
0.7	42	0.0042	1.5	0.752056	1.051576	7.361E-08	1.8801E-05	1:256
0.75	45	0.0045	1.5	0.752056	1.051576	7.8868E-08	1.8801E-05	1:239
0.8	48	0.0048	1.5	0.752056	1.051576	8.4126E-08	1.8801E-05	1:224
0.85	51	0.0051	1.5	0.752056	1.051576	8.9384E-08	1.8801E-05	1:211
0.9	54	0.0054	1.5	0.752056	1.051576	9.4642E-08	1.8801E-05	1:200
0.95	57	0.0057	1.5	0.752056	1.051576	9.99E-08	1.8801E-05	1:189
1	60	0.006	1.5	0.752056	1.051576	1.0516E-07	1.8801E-05	1:180

3.5.5 SIMULACIÓN DE LA RELACIÓN DE DILUCIÓN

Para la simulación de la RD se definen los rangos de variación de los diferentes parámetros tomando en cuenta los rangos de funcionamiento de los DDR existentes en el mercado y las recomendaciones de investigadores especializados en el uso de estos equipos, así:

- El rango de variación de la frecuencia de giro del disco de 0.15-3Hz de los DDR existentes en el mercado.
- Temperatura de calentamiento de los fluidos entre 80°C y 150°C.
- Número de cavidades de los disco entre 2 y 10.
- Flujo del aire de dilución variable entre 0.5 y 2 l/min

Siguiendo el procedimiento presentado en la sección anterior se realiza la simulación de la relación de dilución. De los parámetros indicados, en la Sección 3.5.4, la simulación se realiza variando en ciertos rangos algunos parámetros, mientras que otros se mantienen fijos.

La simulación de la RD se la realiza considerando dos puntos de muestreo diferentes, en el sistema se escoge:

- La toma de muestra de gases de escape se ubica al final del tubo de escape (independientemente de la ubicación del filtro de MP a lo largo del tubo).
- La toma de muestra de los gases de escape se ubica inmediatamente antes y después del filtro de MP.

A continuación se especifican las condiciones y consideraciones que se hacen para cada punto de muestreo. Los resultados se presentan en tablas y gráficas de las relaciones de dilución que se alcanzan con cada configuración planteada.

3.5.5.1. Toma de muestra al final del tubo de escape

Se toma la muestra al final del tubo de escape, al llegar a este punto los gases de escape han sufrido una disminución de su temperatura hasta valores mínimos de 60°C. En esta etapa se simulan dos configuraciones, la primera en la que se calienta sólo el aire de dilución y la segunda en la que se calienta sólo los gases de escape.

Para cada configuración se presentan cuatro grupos de resultados, que corresponden a la variación del flujo de aire de dilución en valores de 0.5 – 1 – 1.5 y 2 l/min.

3.5.5.1.1. Calentando el aire de dilución

Las consideraciones para la simulación de la RD para esta configuración son:

- Frecuencia de giro (f) del disco de 0.15-3Hz
- Se simula el proceso para discos con 2, 4, 6, 8 y 10 cavidades, con un volumen de 0.05 cm³ cada cavidad.
- Se considera que a la salida del tubo los gases de escape están a la temperatura mínima de 60°C y a 1 atm de presión.
- El aire a condiciones normales está a temperatura ambiente de 20°C y 1 atm de presión.
- El aire de dilución que se emplea está a una temperatura de calentamiento de 150°C y a 1 atm. de presión.

Como se indica en la Sección 3.5.4.1. se consideran tanto al aire de dilución como a la muestra de gases de escape, durante todo el proceso de dilución, como fluidos no compresibles. Por esto, para la simulación de la RD se asume que los cambios de presión en los fluidos que intervienen, no son importantes y se fija una presión de 1atm, por lo tanto, los cambios en las propiedades de los fluidos se deben exclusivamente a los cambios de temperatura y no a los cambios de presión.

Los resultados obtenidos son:

Tabla 3.3. Relaciones de dilución máximas y mínimas obtenidas para: $f=0.15 - 3$ Hz, aire de dilución a $T=150^{\circ}\text{C}$ y $P=1\text{atm}$, flujo de aire de dilución: 0.5 l/min, gases de escape a $T=60^{\circ}\text{C}$ y $P=1\text{atm}$, Discos con 2, 4, 6, 8 y 10 cavidades.

		RELACIÓN DE DILUCIÓN				
	f(Hz)	Disco 2	Disco 4	Disco 6	Disco 8	Disco 10
Max.	0.15	1:398	1:200	1:133	1:100	1:80
Min.	3	1:21	1:11	1:8	1:6	1:5

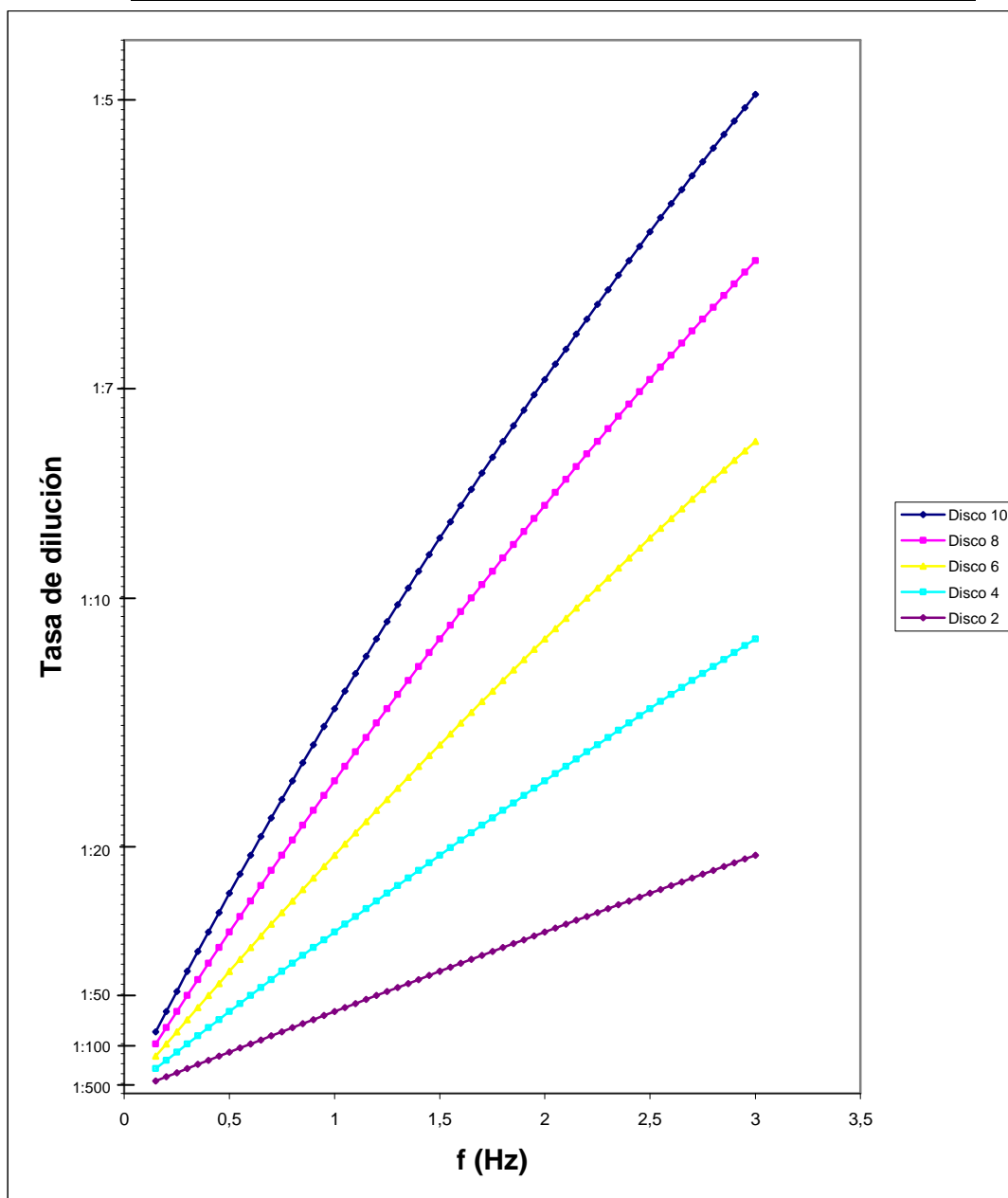


Figura 3.18. Relaciones de dilución obtenidas para: $f=0.15 - 3$ Hz, aire de dilución a $T=150^{\circ}\text{C}$ y $P=1\text{atm}$, flujo de aire de dilución: 0.5 l/min, gases de escape a $T=60^{\circ}\text{C}$ y $P=1\text{atm}$, Discos con 2, 4, 6, 8 y 10 cavidades.

Tabla 3.4. Relaciones de dilución máximas y mínimas obtenidas para: $f=0.15 - 3$ Hz, aire de dilución a $T=150^{\circ}\text{C}$ y $P=1\text{atm}$, flujo de aire de dilución: 1 l/min, gases de escape a $T=60^{\circ}\text{C}$ y $P=1\text{atm}$, Discos con 2, 4, 6, 8 y 10 cavidades.

		RELACIÓN DE DILUCIÓN					
		f(Hz)	Disco 2	Disco 4	Disco 6	Disco 8	Disco 10
Max.	0.15	1:796	1:398	1:266	1:200	1:160	
Min.	3	1:41	1:21	1:14	1:11	1:9	

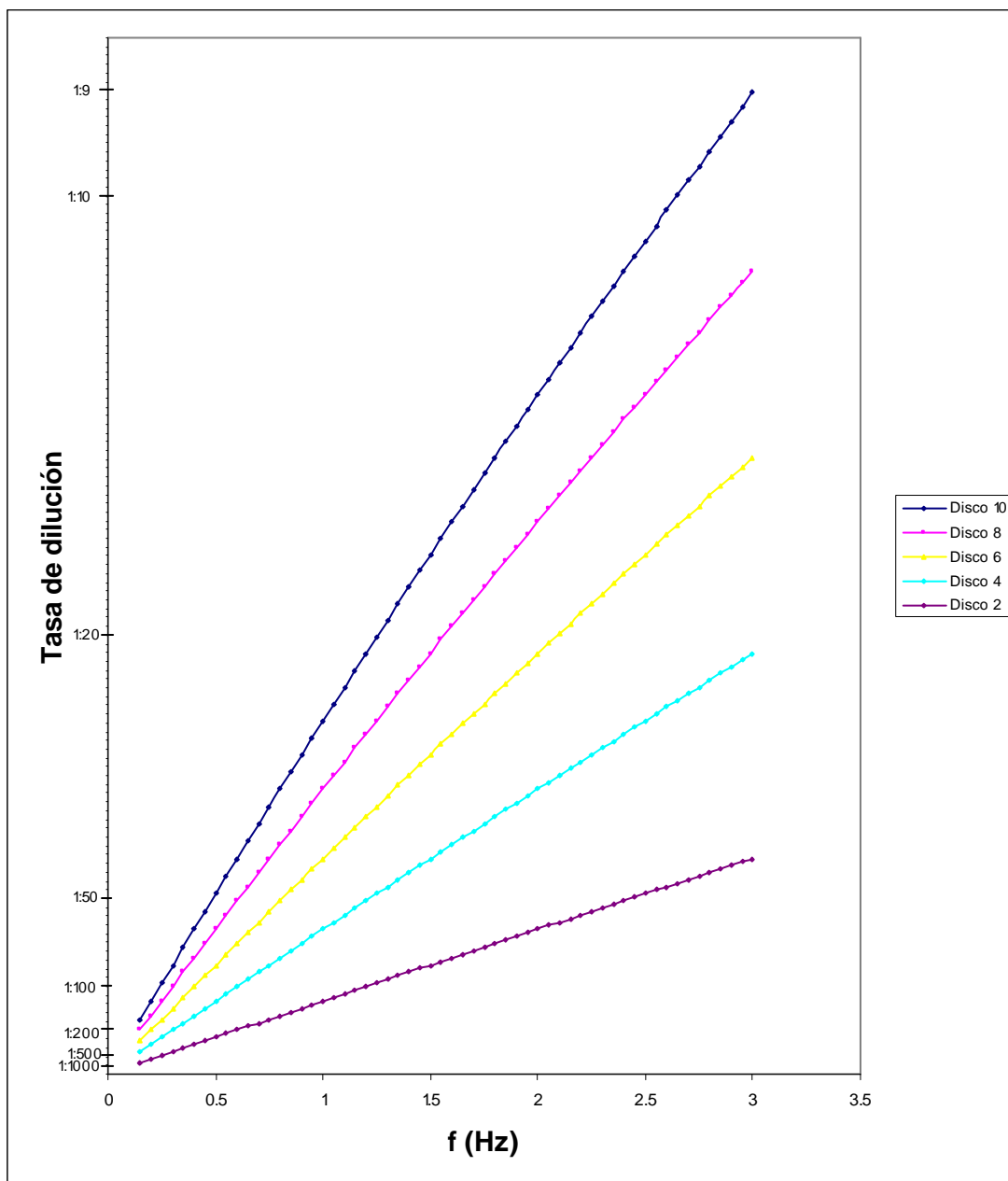


Figura 3.19. Relaciones de dilución obtenidas para: $f=0.15 - 3$ Hz, aire de dilución a $T=150^{\circ}\text{C}$ y $P=1\text{atm}$, flujo de aire de dilución: 1 l/min, gases de escape a $T=60^{\circ}\text{C}$ y $P=1\text{atm}$, Discos con 2, 4, 6, 8 y 10 cavidades.

Tabla 3.5. Relaciones de dilución máximas y mínimas obtenidas para: $f=0.15 - 3$ Hz, aire de dilución a $T=150^{\circ}\text{C}$ y $P=1\text{atm}$, flujo de aire de dilución: 1.5 l/min, gases de escape a $T=60^{\circ}\text{C}$ y $P=1\text{atm}$, Discos con 2, 4, 6, 8 y 10 cavidades.

		RELACIÓN DE DILUCIÓN					
		f(Hz)	Disco 2	Disco 4	Disco 6	Disco 8	Disco 10
Max.	0.15	1:1193	1:597	1:398	1:299	1:239	
Min.	3	1:61	1:31	1:21	1:16	1:13	

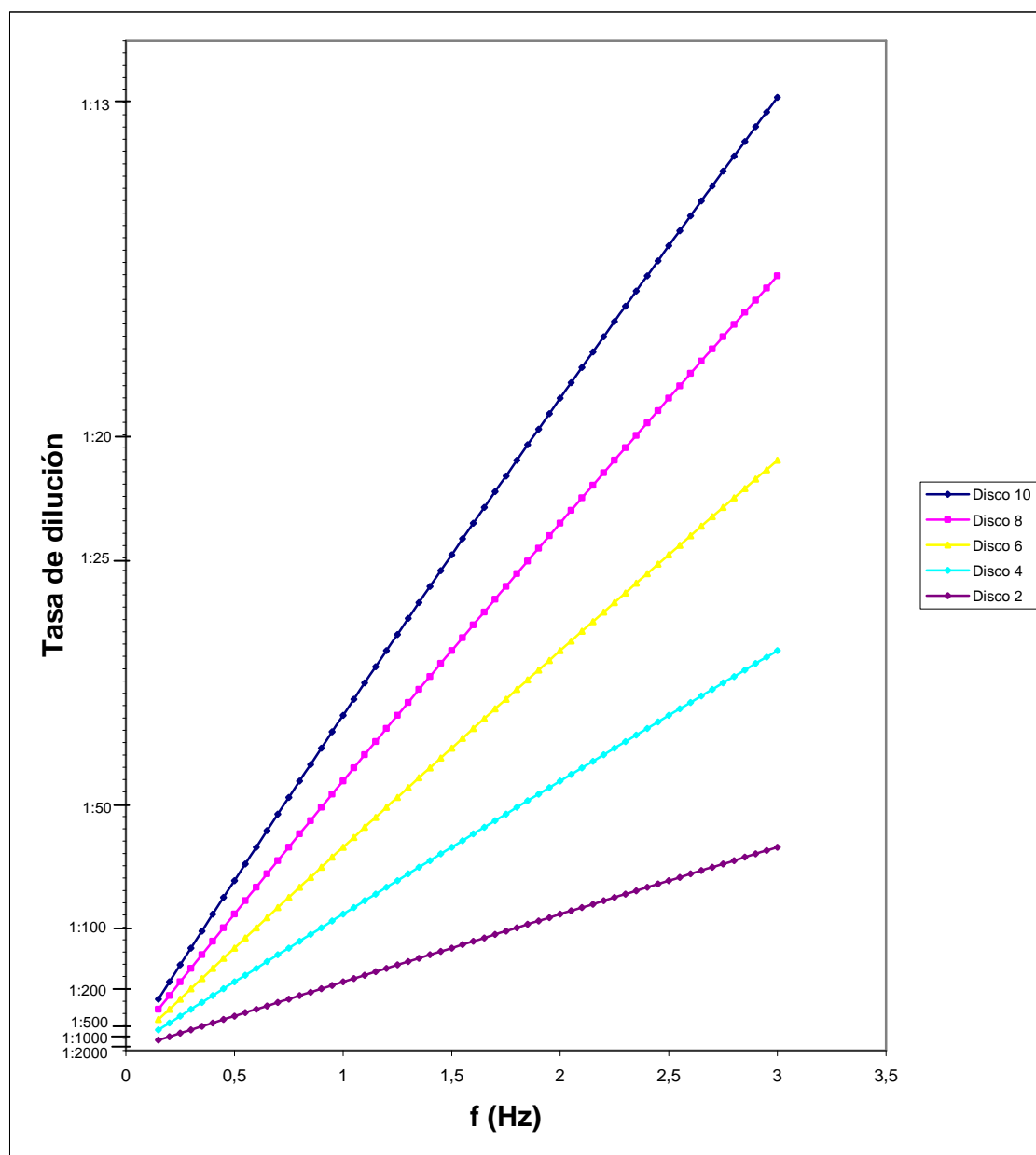


Figura 3.20. Relaciones de dilución obtenidas para: $f=0.15 - 3$ Hz, aire de dilución a $T=150^{\circ}\text{C}$ y $P=1\text{atm}$, flujo de aire de dilución: 1.5 l/min, gases de escape a $T=60^{\circ}\text{C}$ y $P=1\text{atm}$, Discos con 2, 4, 6, 8 y 10 cavidades.

Tabla 3.6. Relaciones de dilución máximas y mínimas obtenidas para: $f=0.15 - 3$ Hz, aire de dilución a $T=150^{\circ}\text{C}$ y $P=1\text{atm}$, flujo de aire de dilución: 2 l/min, gases de escape a $T=60^{\circ}\text{C}$ y $P=1\text{atm}$, Discos con 2, 4, 6, 8 y 10 cavidades.

		RELACIÓN DE DILUCIÓN					
		f(Hz)	Disco 2	Disco 4	Disco 6	Disco 8	Disco 10
Max.	0.15	1:1590	1:796	1:531	1:398	1:319	
Min.	3	1:80	1:41	1:27	1:21	1:17	

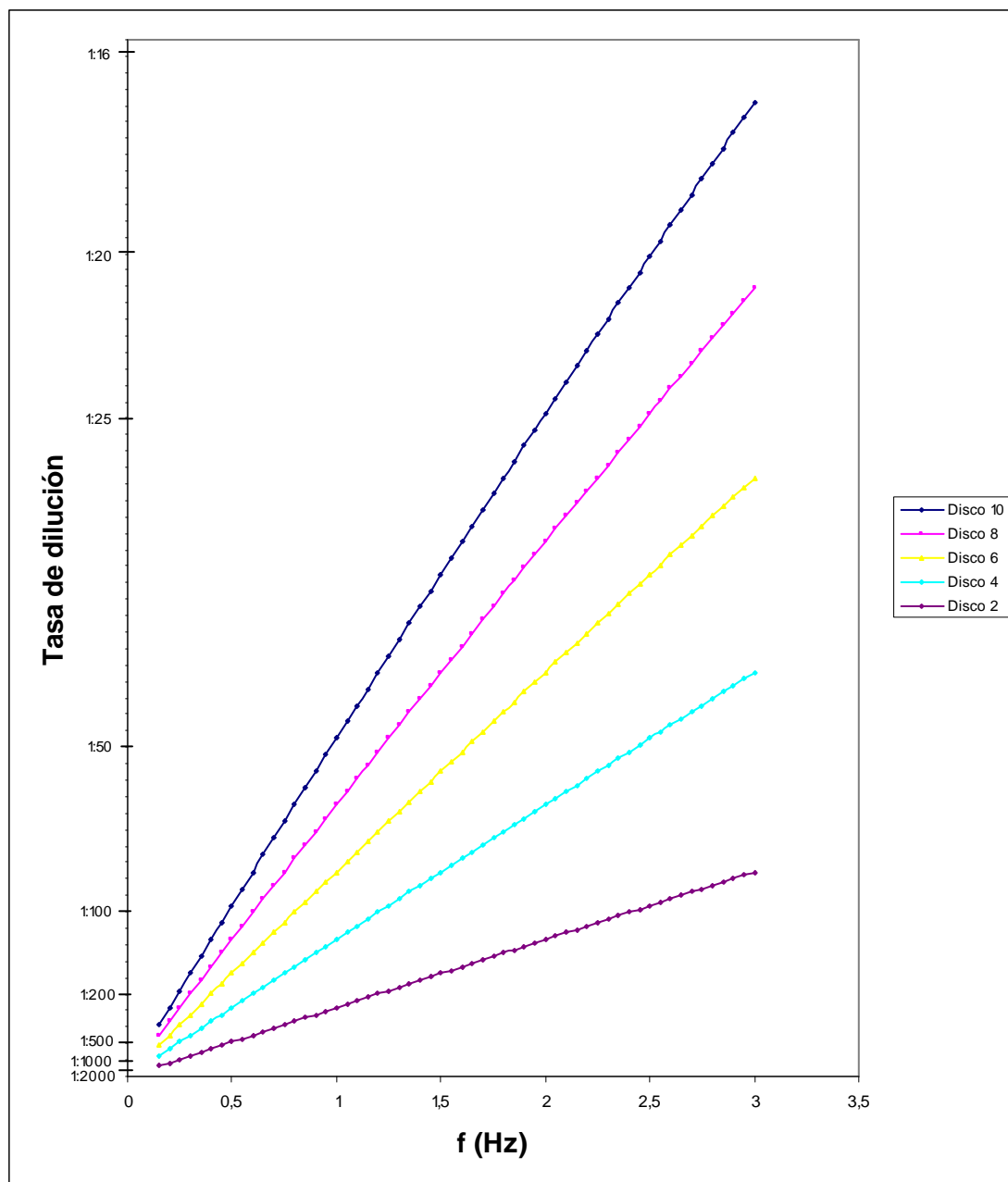


Figura 3.21. Relaciones de dilución obtenidas para: $f=0.15 - 3$ Hz, aire de dilución a $T=150^{\circ}\text{C}$ y $P=1\text{atm}$, flujo de aire de dilución: 2 l/min, gases de escape a $T=60^{\circ}\text{C}$ y $P=1\text{atm}$, Discos con 2, 4, 6, 8 y 10 cavidades.

3.5.5.1.2. Calentando la muestra de gases de escape

Las consideraciones y condiciones para la simulación de la RD para esta configuración:

- Frecuencia de giro (f) del disco de 0.15-3Hz.
- Se simula el proceso para discos con 2, 4, 6, 8 y 10 cavidades, con un volumen de 0,05 cm³ cada cavidad.
- Se considera que a la salida del tubo los gases de escape están a la temperatura mínima de 60°C y a 1 atm de presión.
- El aire a condiciones normales esta a temperatura ambiente de 20°C y presión de 1 atm.
- El aire de dilución que se emplea está a una temperatura de calentamiento de 150°C y a 1 atm de presión.
- La muestra de gases de escape se calienta a temperaturas de:
 - a) 80°C
 - b) 100°C y
 - c) 120°C

Los resultados obtenidos son:

a) Muestra de gases de escape calentados a 80°C.

Tabla 3.7. Relaciones de dilución máximas y mínimas obtenidas para: $f=0.15 - 3$ Hz, aire de dilución a $T=20^{\circ}\text{C}$ y $P=1\text{atm}$, flujo de aire de dilución: 0.5 l/mi., gases de escape a $T=80^{\circ}\text{C}$ y $P=1\text{atm}$, Discos con 2, 4, 6, 8 y 10 cavidades.

		RELACIÓN DE DILUCIÓN					
		f(Hz)	Disco 2	Disco 4	Disco 6	Disco 8	Disco 10
Max.	0.15	1:669	1:335	1:224	1:168	1:135	
Min.	3	1:34	1:18	1:12	1:9	1:8	

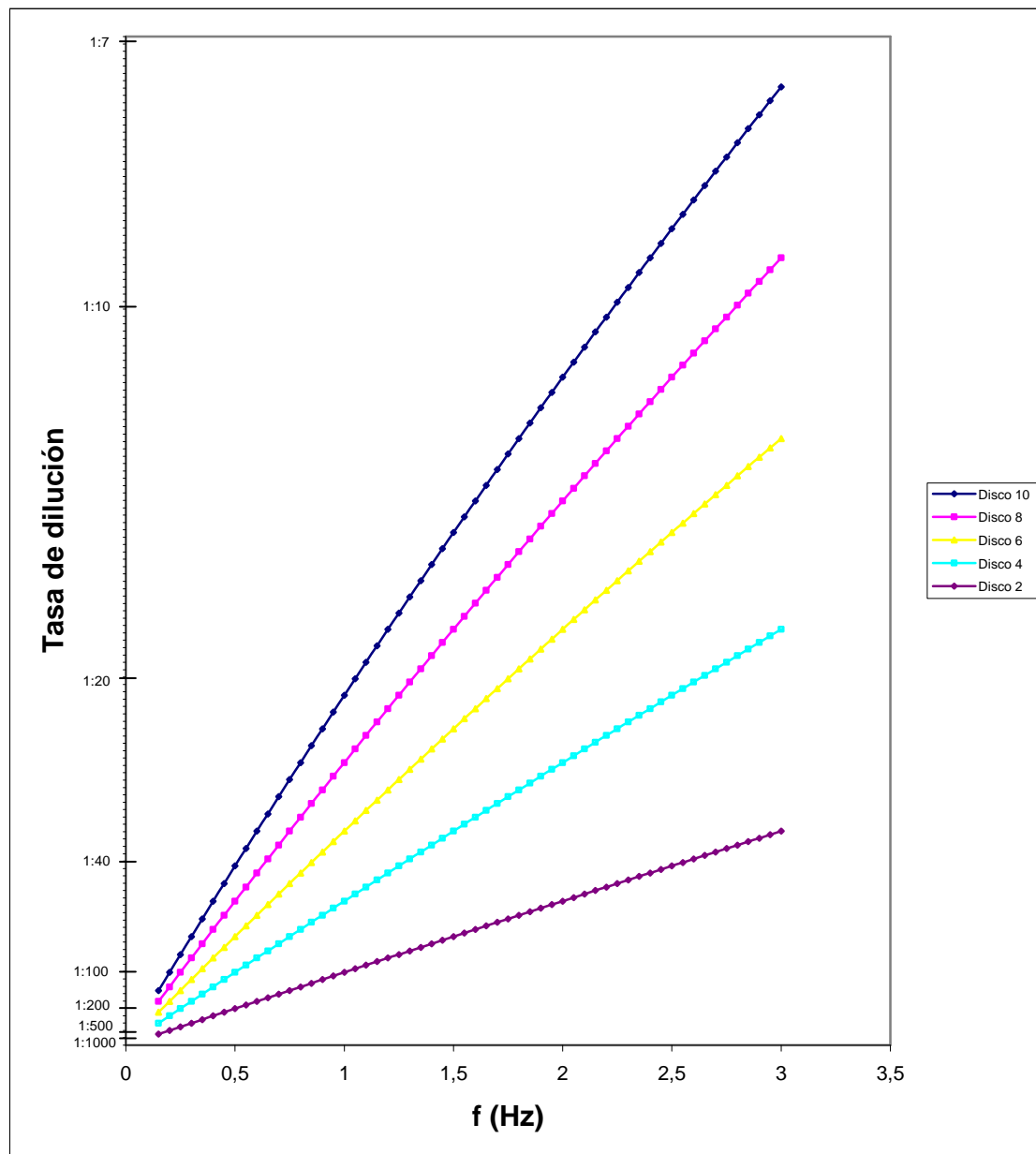


Figura 3.22. Relaciones de dilución obtenidas para: $f=0.15 - 3$ Hz, aire de dilución a $T=20^{\circ}\text{C}$ y $P=1\text{atm}$, flujo de aire de dilución: 0.5 l/min, gases de escape a $T=80^{\circ}\text{C}$ y $P=1\text{atm}$, Discos con 2, 4, 6, 8 y 10 cavidades.

Tabla 3.8. Relaciones de dilución máximas y mínimas obtenidas para: $f=0.15 - 3$ Hz, aire de dilución a $T=20^{\circ}\text{C}$ y $P=1\text{atm}$, flujo de aire de dilución: 1 l/min, gases de escape a $T=80^{\circ}\text{C}$ y $P=1\text{atm}$, Discos con 2, 4, 6, 8 y 10 cavidades.

		RELACIÓN DE DILUCIÓN					
		f(Hz)	Disco 2	Disco 4	Disco 6	Disco 8	Disco 10
Max.	0.15	1:1337	1:669	1:446	1:335	1:268	
Min.	3	1:68	1:34	1:23	1:18	1:14	

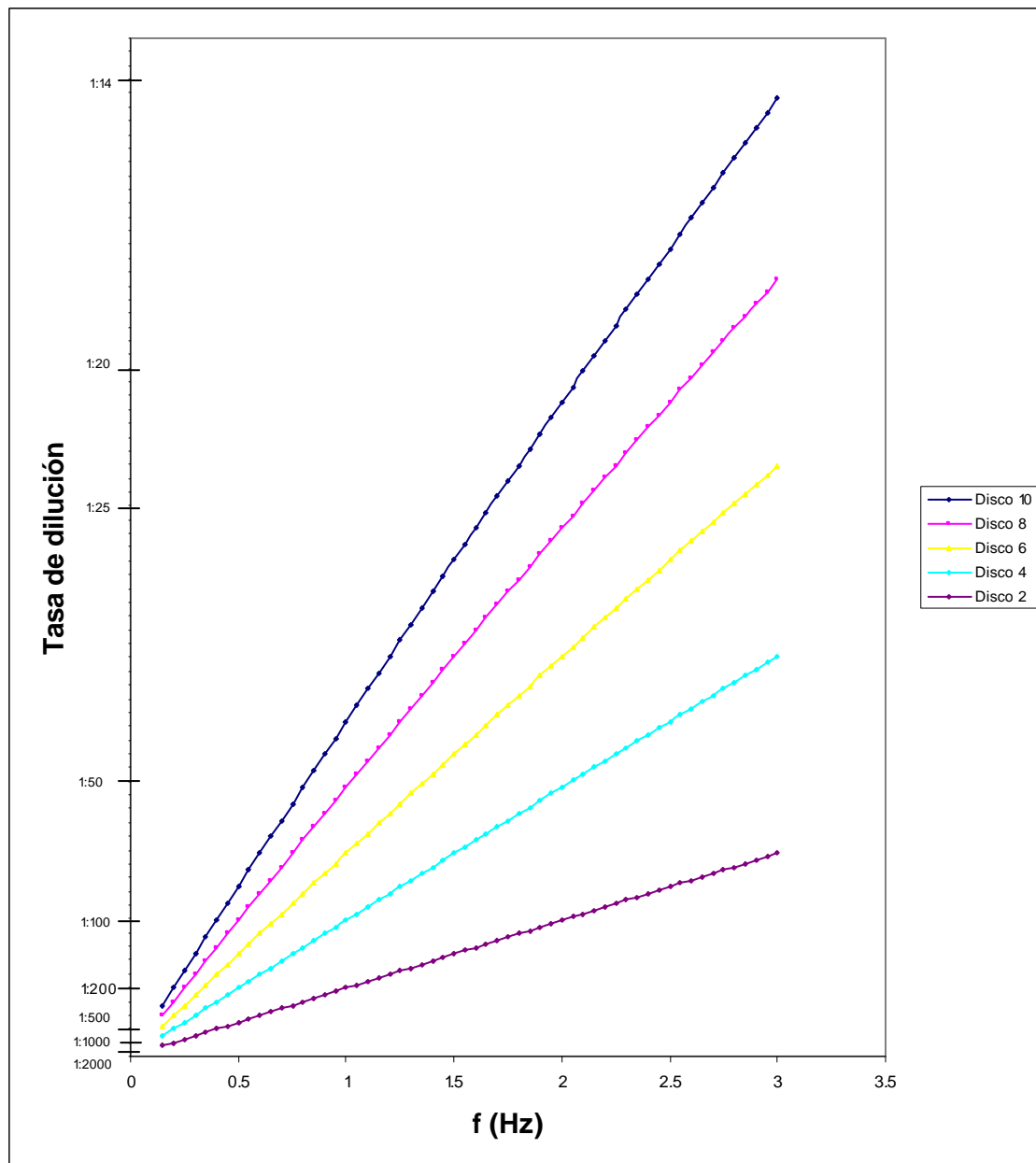


Figura 3.23. Relaciones de dilución obtenidas para: $f=0.15 - 3$ Hz, aire de dilución a $T=20^{\circ}\text{C}$ y $P=1\text{atm}$, flujo de aire de dilución: 1 l/min, gases de escape a $T=80^{\circ}\text{C}$ y $P=1\text{atm}$, Discos con 2, 4, 6, 8 y 10 cavidades.

Tabla 3.9. Relaciones de dilución máximas y mínimas obtenidas para: $f=0.15 - 3$ Hz, aire de dilución a $T=20^{\circ}\text{C}$ y $P=1\text{atm}$, flujo de aire de dilución: 1.5 l/min, gases de escape a $T=80^{\circ}\text{C}$ y $P=1\text{atm}$, Discos con 2, 4, 6, 8 y 10 cavidades.

		RELACIÓN DE DILUCIÓN					
		f(Hz)	Disco 2	Disco 4	Disco 6	Disco 8	Disco 10
Max.	0.15	1:2006	1:1003	1:669	1:502	1:402	
Min.	3	1:101	1:51	1:34	1:26	1:21	

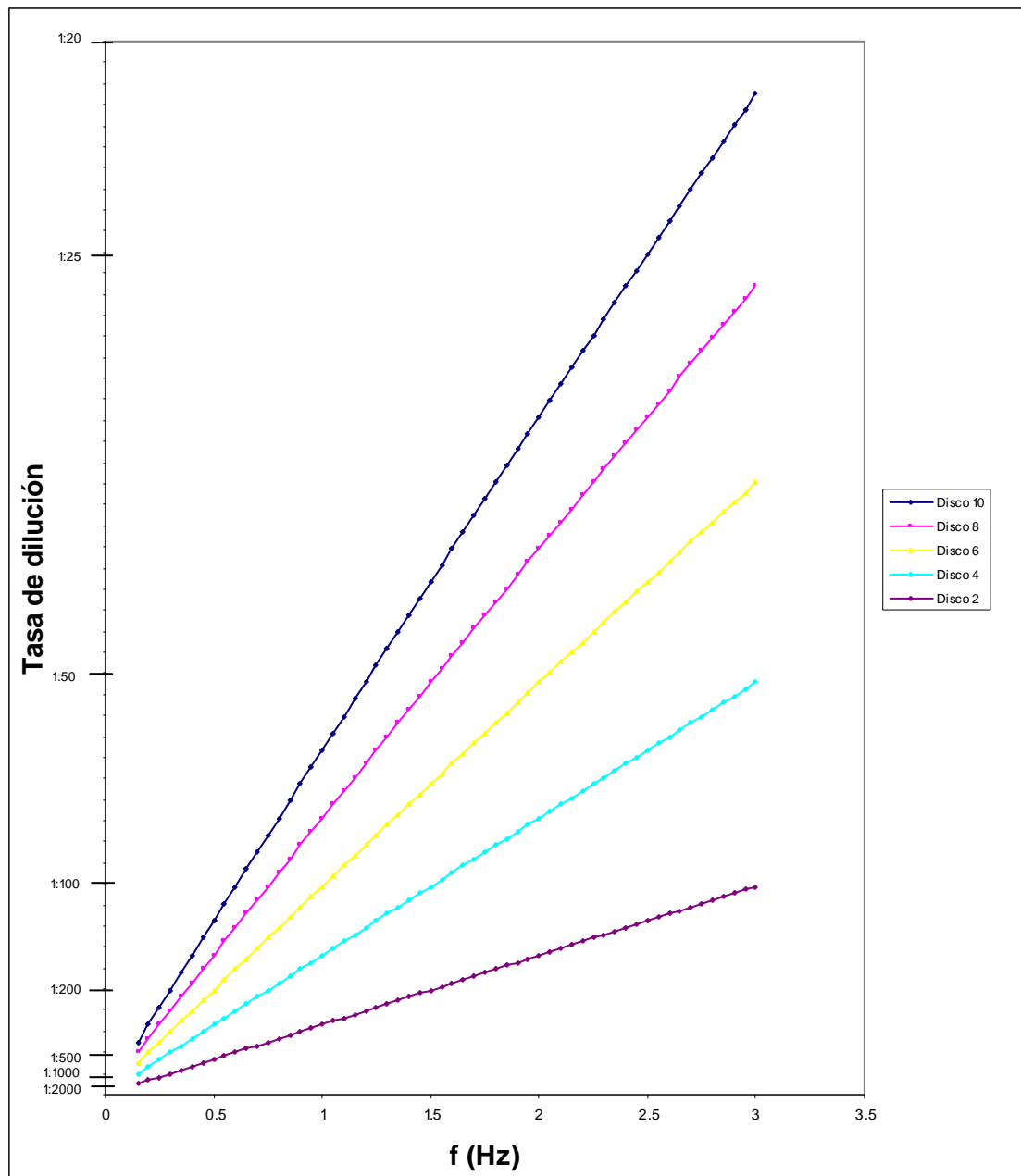


Figura 3.24. Relaciones de dilución obtenidas para: $f=0.15 - 3$ Hz, aire de dilución a $T=20^{\circ}\text{C}$ y $P=1\text{atm}$, flujo de aire de dilución: 1.5 l/min, gases de escape a $T=80^{\circ}\text{C}$ y $P=1\text{atm}$, Discos con 2, 4, 6, 8 y 10 cavidades.

Tabla 3.10. Relaciones de dilución máximas y mínimas obtenidas para: $f=0.15 - 3$ Hz, aire de dilución a $T=20^{\circ}\text{C}$ y $P=1\text{atm}$, flujo de aire de dilución: 2 l/min, gases de escape a $T=80^{\circ}\text{C}$ y $P=1\text{atm}$, Discos con 2, 4, 6, 8 y 10 cavidades.

		RELACIÓN DE DILUCIÓN					
		f(Hz)	Disco 2	Disco 4	Disco 6	Disco 8	Disco 10
Max.	0.15	1:2674	1:1337	1:892	1:669	1:536	
Min.	3	1:135	1:68	1:46	1:34	1:28	

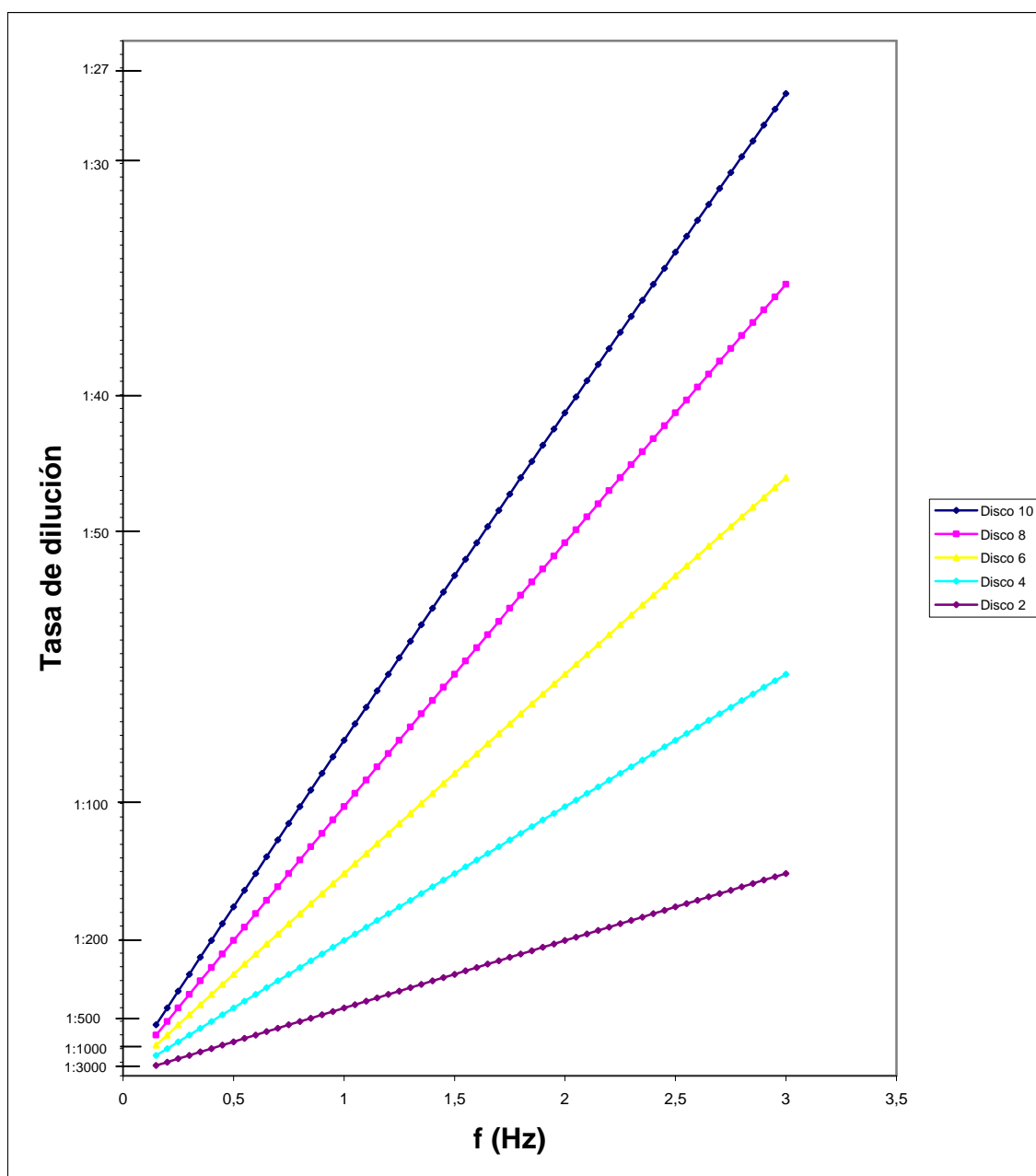


Figura 3.25. Relaciones de dilución obtenidas para: $f=0.15 - 3$ Hz, aire de dilución a $T=20^{\circ}\text{C}$ y $P=1\text{atm}$, flujo de aire de dilución: 2 l/min, gases de escape a $T=80^{\circ}\text{C}$ y $P=1\text{atm}$, Discos con 2, 4, 6, 8 y 10 cavidades.

b) Muestra de gases de escape calentados a 100°C.

Tabla 3.11. Relaciones de dilución máximas y mínimas obtenidas para: $f=0.15 - 3$ Hz, aire de dilución a $T=20^\circ\text{C}$ y $P=1\text{atm}$, flujo de aire de dilución: 0.5 l/min, gases de escape a $T=100^\circ\text{C}$ y $P=1\text{atm}$, Discos con 2, 4, 6, 8 y 10 cavidades.

		RELACIÓN DE DILUCIÓN					
		f(Hz)	Disco 2	Disco 4	Disco 6	Disco 8	Disco 10
Max.	0.15	1:718	1:359	1:240	1:180	1:144	
Min.	3	1:37	1:19	1:13	1:10	1:8	

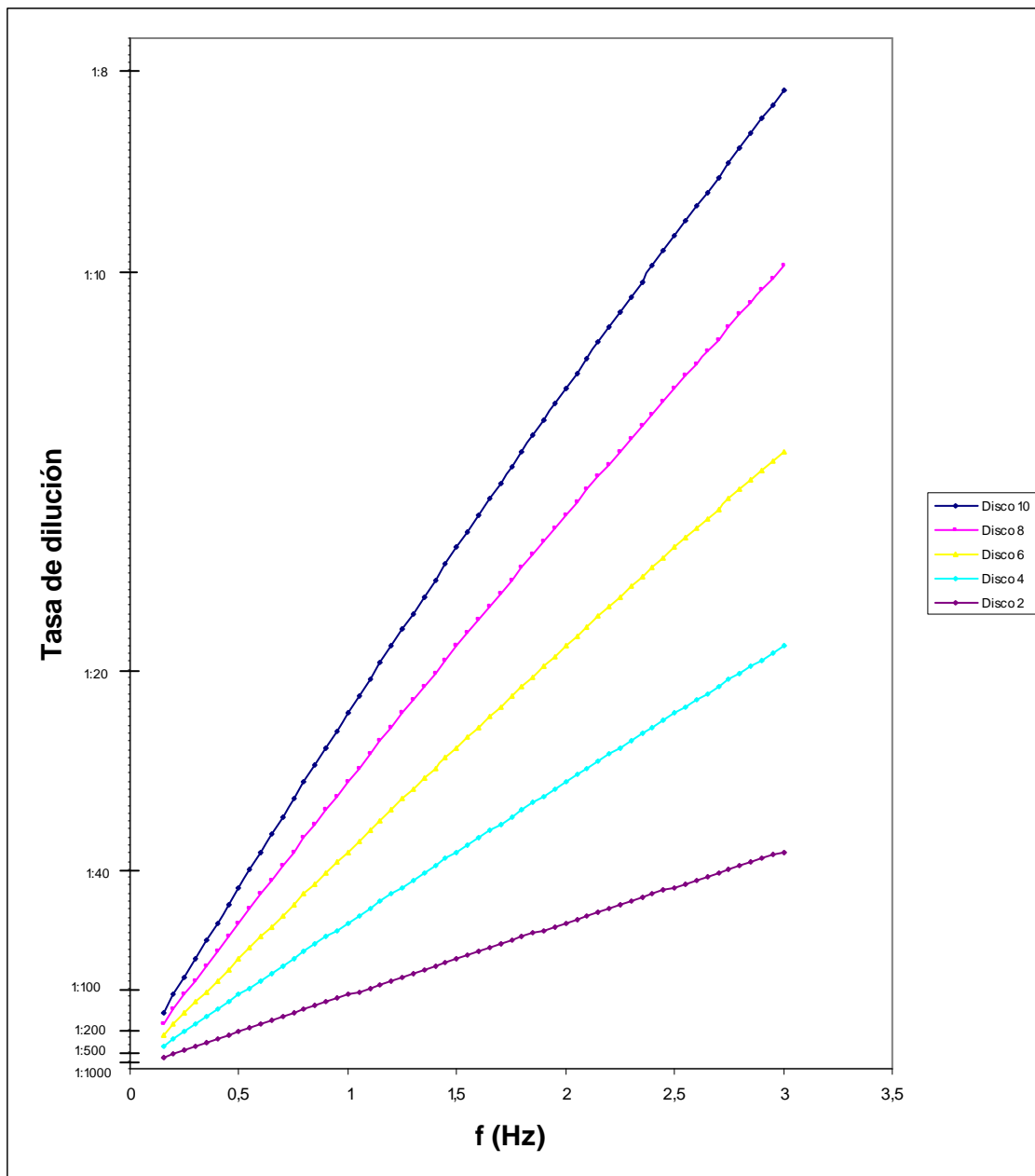


Figura 3.26. Relaciones de dilución obtenidas para: $f=0.15 - 3$ Hz, aire de dilución a $T=20^\circ\text{C}$ y $P=1\text{atm}$, flujo de aire de dilución: 0.5 l/min, gases de escape a $T=100^\circ\text{C}$ y $P=1\text{atm}$, Discos con 2, 4, 6, 8 y 10 cavidades.

Tabla 3.12. Relaciones de dilución máximas y mínimas obtenidas para: $f=0.15 - 3$ Hz, aire de dilución a $T=20^{\circ}\text{C}$ y $P=1\text{atm}$, flujo de aire de dilución: 1 l/min, gases de escape a $T=100^{\circ}\text{C}$ y $P=1\text{atm}$, Discos con 2, 4, 6, 8 y 10 cavidades.

		RELACIÓN DE DILUCIÓN					
		f(Hz)	Disco 2	Disco 4	Disco 6	Disco 8	Disco 10
Max.	0.15	1:1434	1:718	1:479	1:359	1:288	
Min.	3	1:73	1:37	1:25	1:19	1:15	

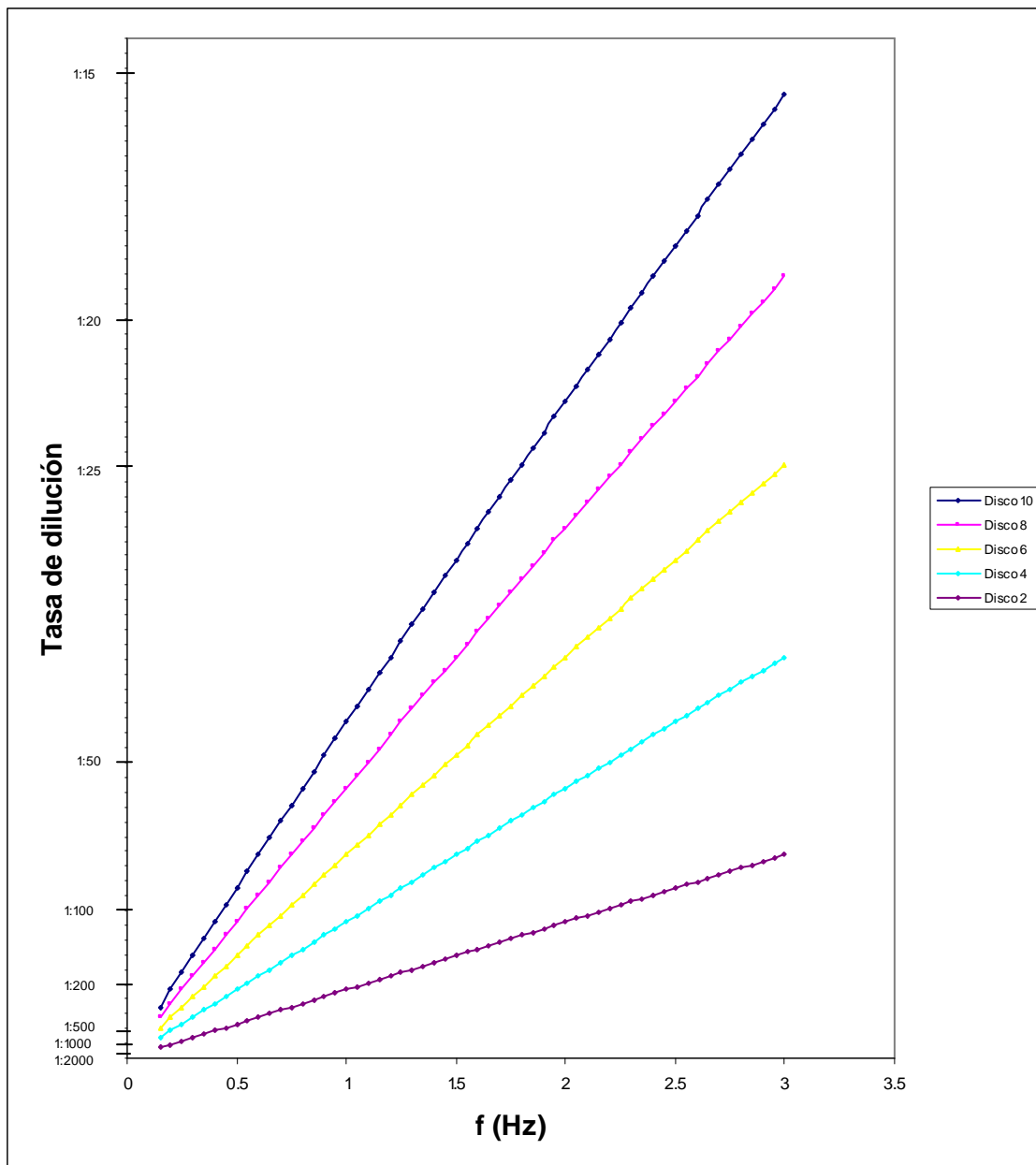


Figura 3.27. Relaciones de dilución obtenidas para: $f=0.15 - 3$ Hz, aire de dilución a $T=20^{\circ}\text{C}$ y $P=1\text{atm}$, flujo de aire de dilución: 1 l/min, gases de escape a $T=100^{\circ}\text{C}$ y $P=1\text{atm}$, Discos con 2, 4, 6, 8 y 10 cavidades.

Tabla 3.13. Relaciones de dilución máximas y mínimas obtenidas para: $f=0.15 - 3$ Hz, aire de dilución a $T=20^{\circ}\text{C}$ y $P=1\text{atm}$, flujo de aire de dilución: 1.5 l/min, gases de escape a $T=100^{\circ}\text{C}$ y $P=1\text{atm}$, Discos con 2, 4, 6, 8 y 10 cavidades.

		RELACIÓN DE DILUCIÓN					
		f(Hz)	Disco 2	Disco 4	Disco 6	Disco 8	Disco 10
Max.	0.15	1:2151	1:1076	1:718	1:538	1:431	
Min.	3	1:108	1:55	1:37	1:28	1:22	

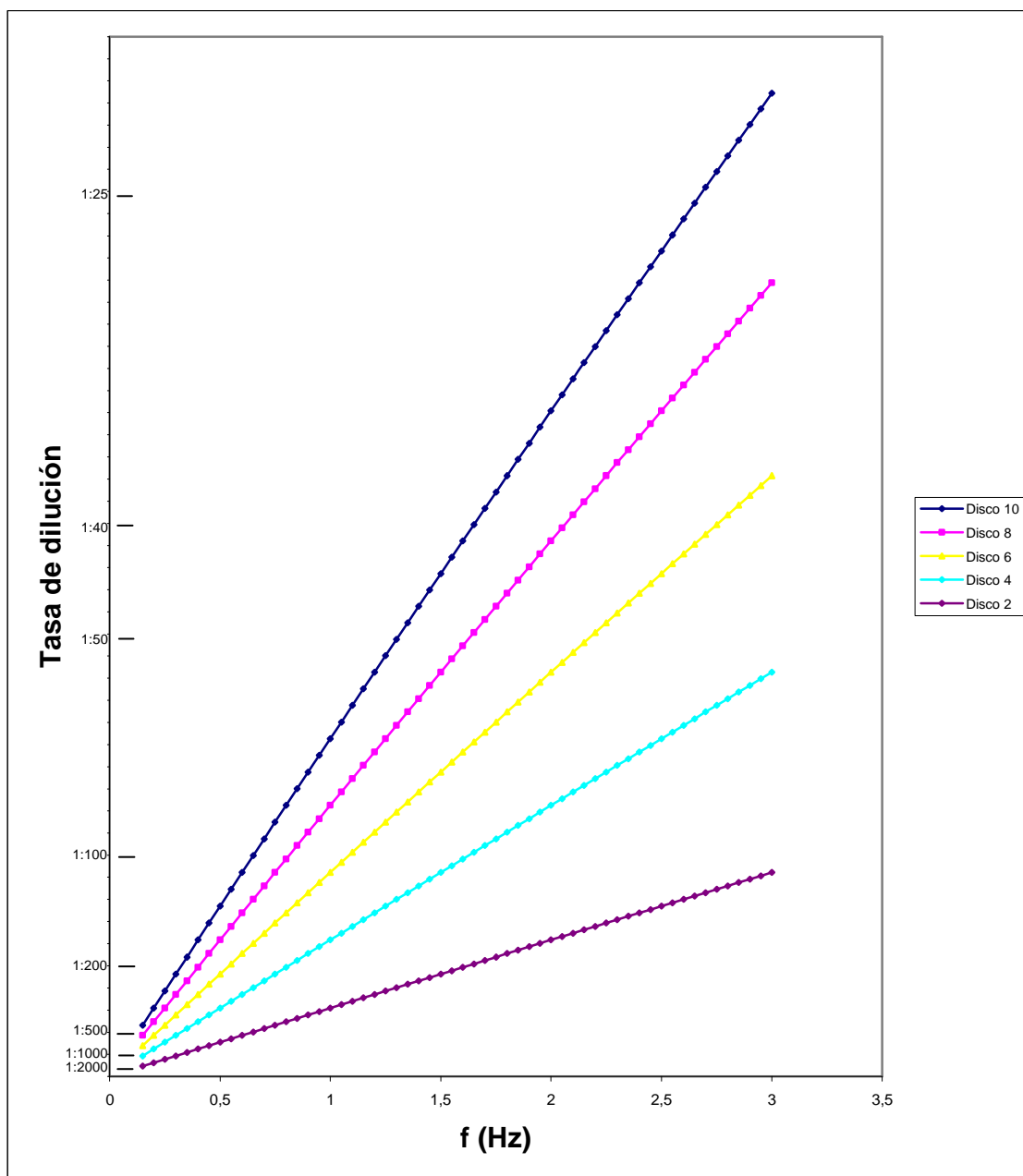


Figura 3.28. Relaciones de dilución obtenidas para: $f=0.15 - 3$ Hz, aire de dilución a $T=20^{\circ}\text{C}$ y $P=1\text{atm}$, flujo de aire de dilución: 1.5 l/min, gases de escape a $T=100^{\circ}\text{C}$ y $P=1\text{atm}$, Discos con 2, 4, 6, 8 y 10 cavidades.

Tabla 3.14. Relaciones de dilución máximas y mínimas obtenidas para: $f=0.15 - 3$ Hz, aire de dilución a $T=20^{\circ}\text{C}$ y $P=1\text{atm}$, flujo de aire de dilución: 2 l/min, gases de escape a $T=100^{\circ}\text{C}$ y $P=1\text{atm}$, Discos con 2, 4, 6, 8 y 10 cavidades.

		RELACIÓN DE DILUCIÓN					
		f(Hz)	Disco 2	Disco 4	Disco 6	Disco 8	Disco 10
Max.	0.15	1:2867	1:1434	1:956	1:718	1:574	
Min.	3	1:144	1:73	1:49	1:37	1:30	

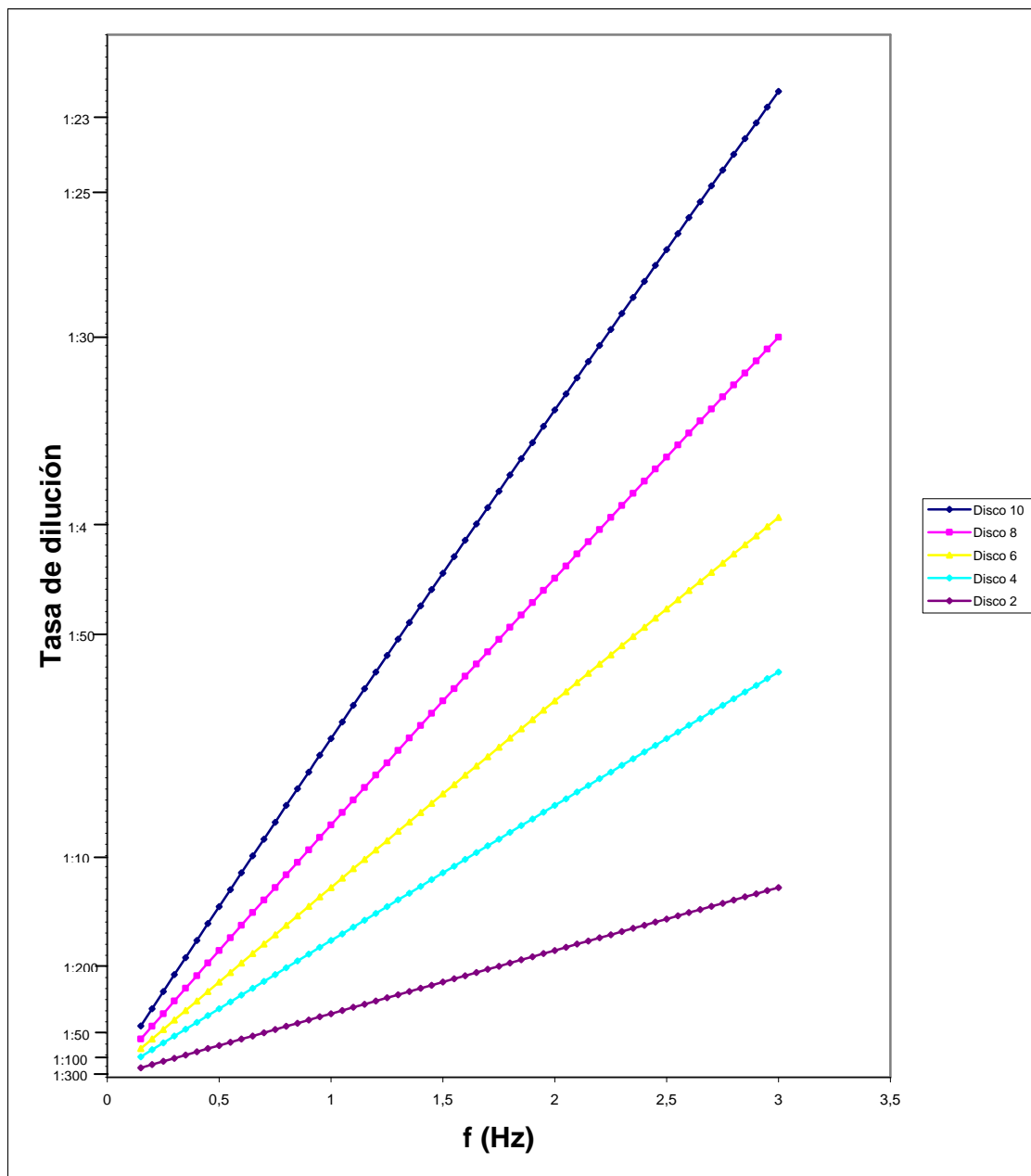


Figura 3.29. Relaciones de dilución obtenidas para: $f=0.15 - 3$ Hz, aire de dilución a $T=20^{\circ}\text{C}$ y $P=1\text{atm}$, flujo de aire de dilución: 2 l/min, gases de escape a $T=100^{\circ}\text{C}$ y $P=1\text{atm}$, Discos con 2, 4, 6, 8 y 10 cavidades.

c) Muestra de gases de escape calentados a 100°C.

Tabla 3.15. Relaciones de dilución máximas y mínimas obtenidas para: $f=0.15 - 3$ Hz, aire de dilución a $T=20^{\circ}\text{C}$ y $P=1\text{atm}$, flujo de aire de dilución: 0.5 l/min, gases de escape a $T=120^{\circ}\text{C}$ y $P=1\text{atm}$, Discos con 2, 4, 6, 8 y 10 cavidades.

		RELACIÓN DE DILUCIÓN					
		f(Hz)	Disco 2	Disco 4	Disco 6	Disco 8	Disco 10
Max.	0.15	1:774	1:387	1:259	1:194	1:156	
Min.	3	1:40	1:20	1:14	1:11	1:9	

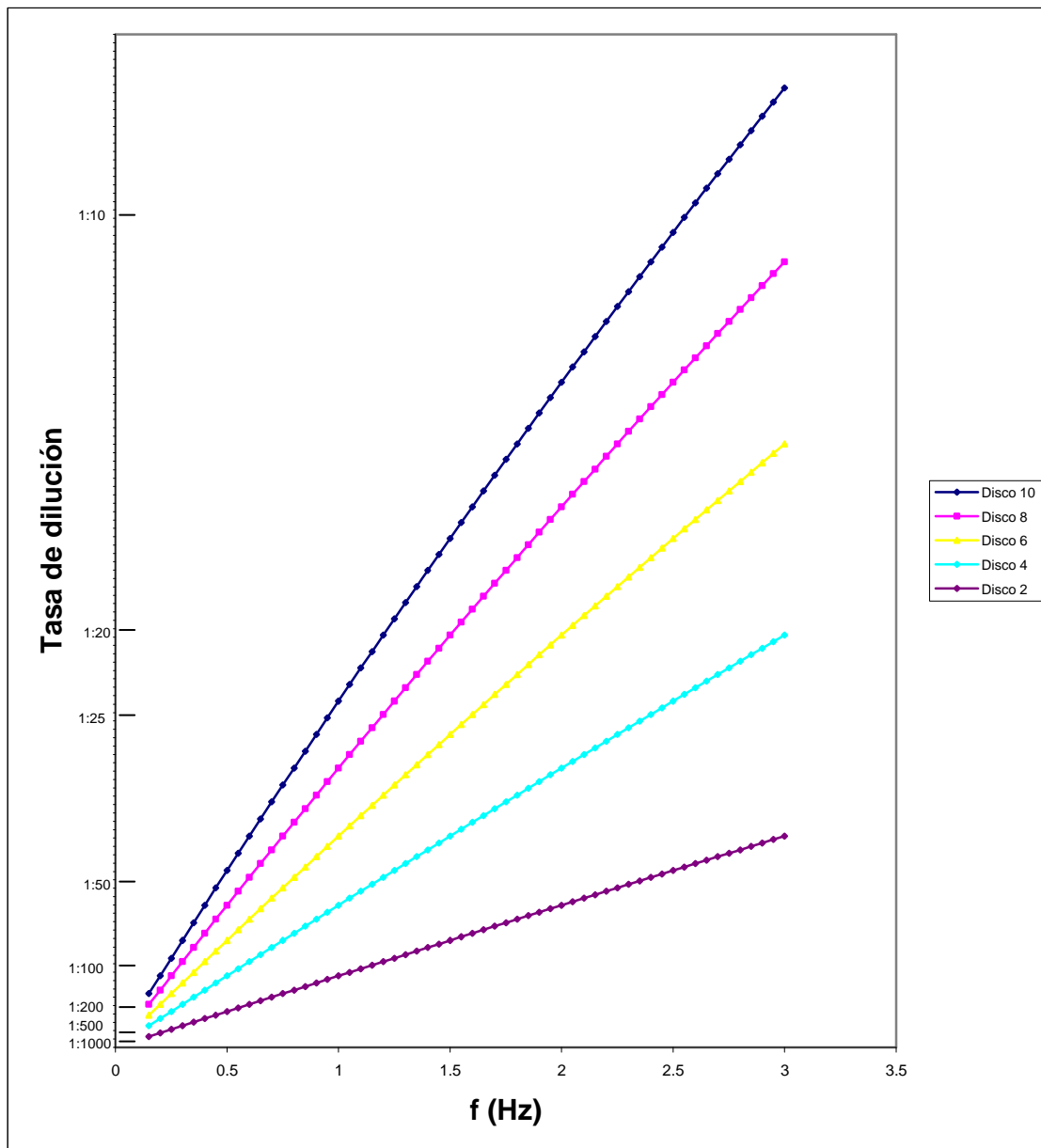


Figura 3.30. Relaciones de dilución obtenidas para: $f=0.15 - 3$ Hz, aire de dilución a $T=20^{\circ}\text{C}$ y $P=1\text{atm}$, flujo de aire de dilución: 0.5 l/min, gases de escape a $T=120^{\circ}\text{C}$ y $P=1\text{atm}$, Discos con 2, 4, 6, 8 y 10 cavidades.

Tabla 3.16. Relaciones de dilución máximas y mínimas obtenidas para: $f=0.15 - 3$ Hz, aire de dilución a $T=20^{\circ}\text{C}$ y $P=1\text{atm}$, flujo de aire de dilución: 1 l/min, gases de escape a $T=120^{\circ}\text{C}$ y $P=1\text{atm}$, Discos con 2, 4, 6, 8 y 10 cavidades.

		RELACIÓN DE DILUCIÓN					
		f(Hz)	Disco 2	Disco 4	Disco 6	Disco 8	Disco 10
Max.	0.15	1:1546	1:774	1:516	1:387	1:310	
Min.	3	1:78	1:40	1:27	1:20	1:16	

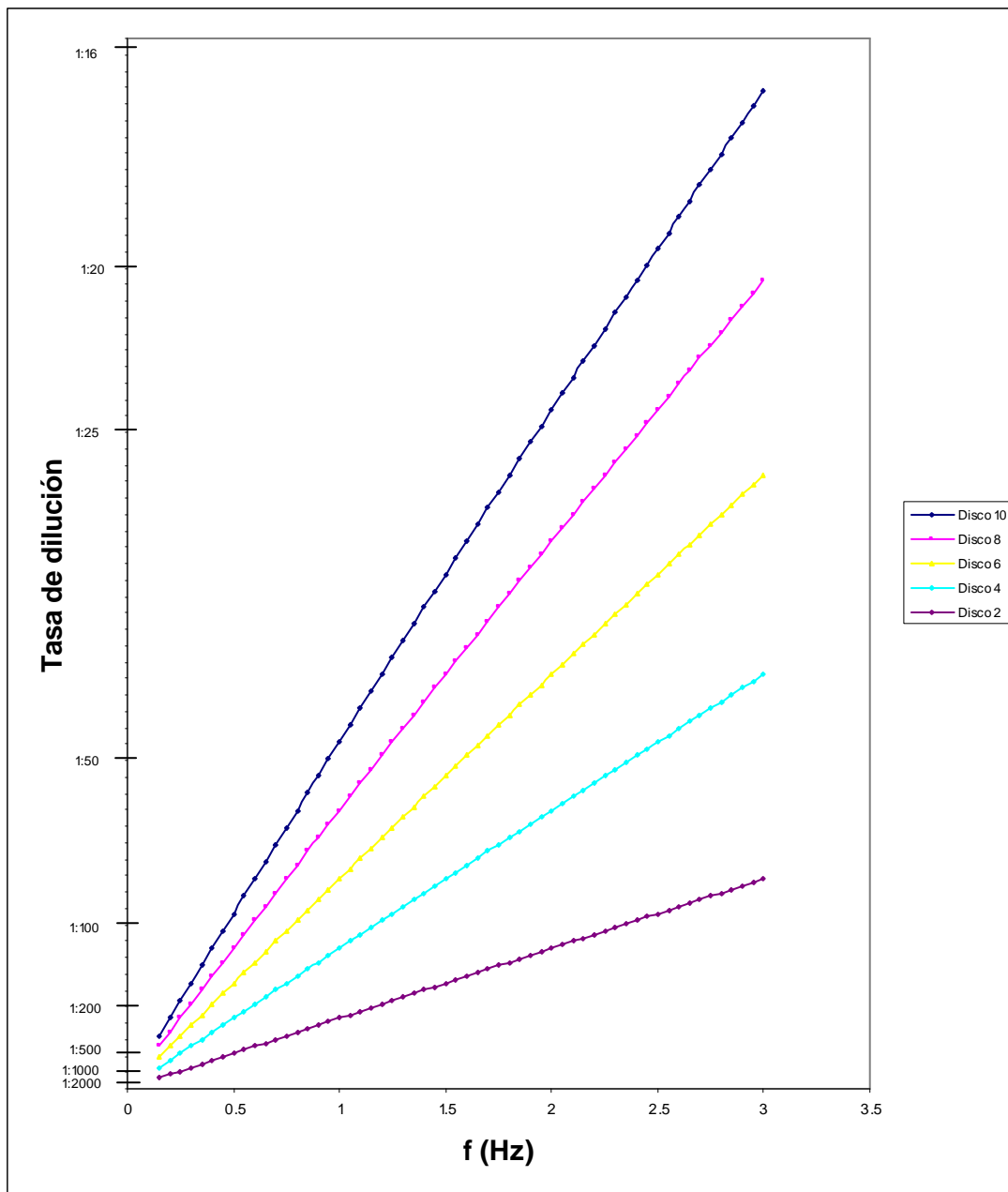


Figura 3.31. Relaciones de dilución obtenidas para: $f=0.15 - 3$ Hz, aire de dilución a $T=20^{\circ}\text{C}$ y $P=1\text{atm}$, flujo de aire de dilución: 1 l/min, gases de escape a $T=120^{\circ}\text{C}$ y $P=1\text{atm}$, Discos con 2, 4, 6, 8 y 10 cavidades.

Tabla 3.17. Relaciones de dilución máximas y mínimas obtenidas para: $f=0.15 - 3$ Hz, aire de dilución a $T=20^{\circ}\text{C}$ y $P=1\text{atm}$, flujo de aire de dilución: 1.5 l/min, gases de escape a $T=120^{\circ}\text{C}$ y $P=1\text{atm}$, Discos con 2, 4, 6, 8 y 10 cavidades.

		RELACIÓN DE DILUCIÓN					
		f(Hz)	Disco 2	Disco 4	Disco 6	Disco 8	Disco 10
Max.	0.15	1:2319	1:1160	1:774	1:580	1:465	
Min.	3	1:117	1:59	1:40	1:30	1:24	

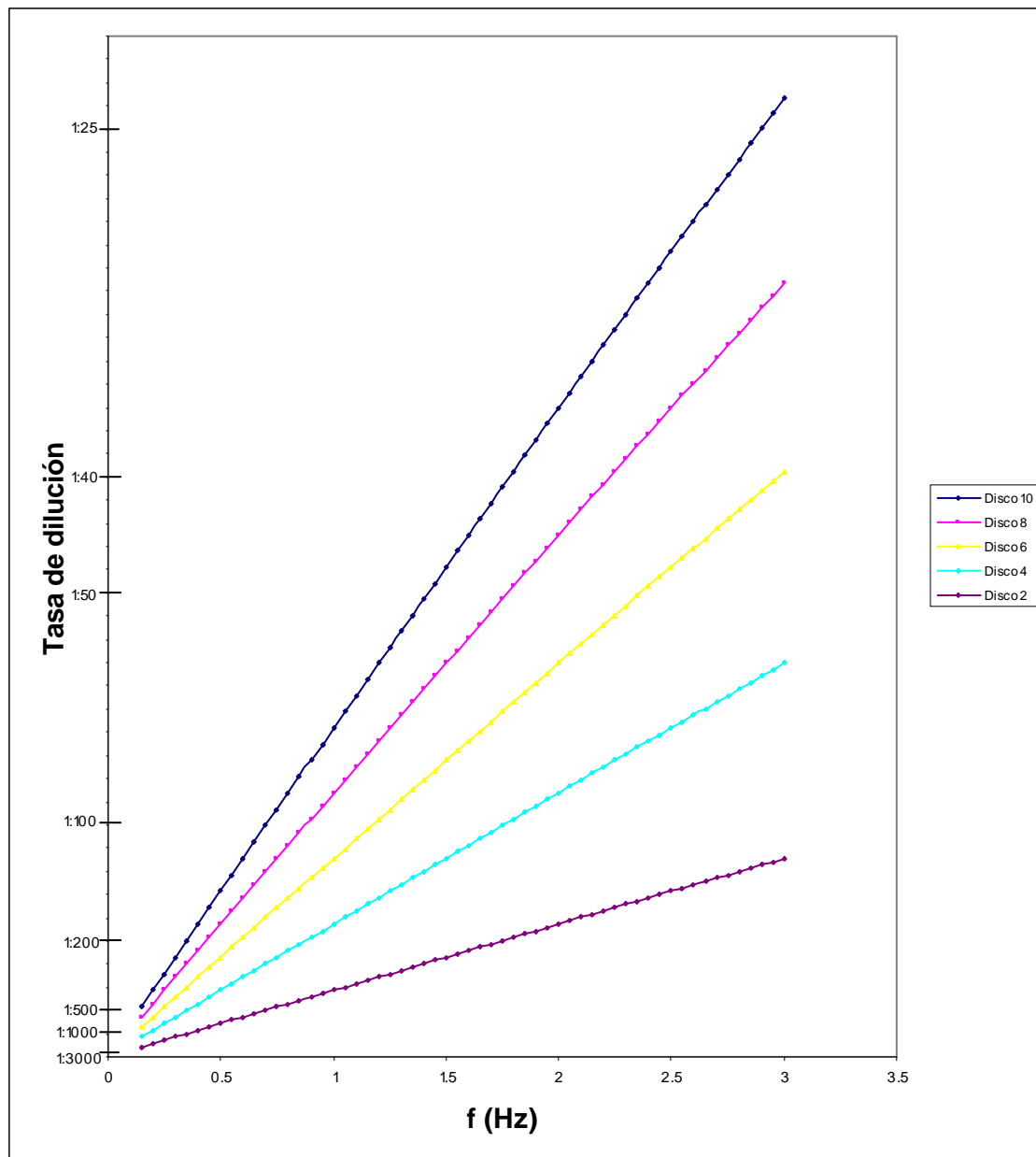


Figura 3.32. Relaciones de dilución obtenidas para: $f=0.15 - 3$ Hz, aire de dilución a $T=20^{\circ}\text{C}$ y $P=1\text{atm}$, flujo de aire de dilución: 1.5 l/min, gases de escape a $T=120^{\circ}\text{C}$ y $P=1\text{atm}$, Discos con 2, 4, 6, 8 y 10 cavidades.

Tabla 3.18. Relaciones de dilución máximas y mínimas obtenidas para: $f=0.15 - 3$ Hz, aire de dilución a $T=20^{\circ}\text{C}$ y $P=1\text{atm}$, flujo de aire de dilución: 2 l/min, gases de escape a $T=120^{\circ}\text{C}$ y $P=1\text{atm}$, Discos con 2, 4, 6, 8 y 10 cavidades.

		RELACIÓN DE DILUCIÓN					
		f(Hz)	Disco 2	Disco 4	Disco 6	Disco 8	Disco 10
Max.	0.15	1:3091	1:1546	1:1031	1:774	1:619	
Min.	3	1:156	1:78	1:53	1:40	1:32	

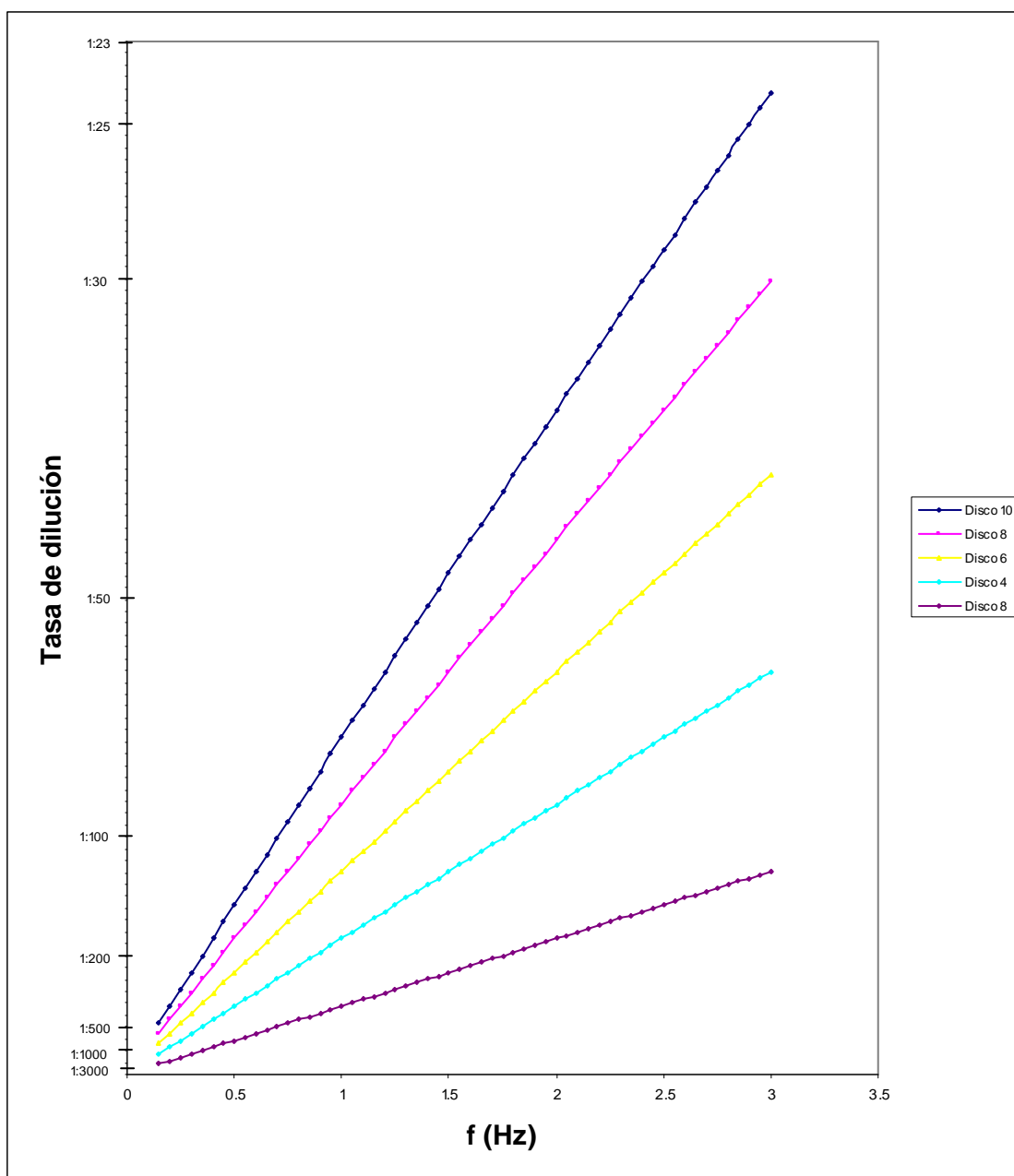


Figura 3.33. Relaciones de dilución obtenidas para: $f=0.15 - 3$ Hz, aire de dilución a $T=20^{\circ}\text{C}$ y $P=1\text{atm}$, flujo de aire de dilución: 2 l/min, gases de escape a $T=120^{\circ}\text{C}$ y $P=1\text{atm}$, Discos con 2, 4, 6, 8 y 10 cavidades.

3.5.5.2. Toma de muestra junto al filtro de MP

La localización de toma de muestra de gases de escape, y por lo tanto su temperatura, dependerá de la ubicación de filtro de MP. De la investigación realizada en el Proyecto RETROFIT – Quito se puede considerar de manera general que la temperatura óptima de trabajo de los filtros de MP es de 300°C, esto además se soporta en varios estudios en otros países con estos filtros, por ejemplo en el documento de Clean Air System se indica que la temperatura óptima de trabajo para un Filtro de Partículas de Diesel (DPF) está entre 300 y 375°C, pero como en la práctica las temperaturas de los gases de escape en algunos ciclos de trabajo suelen estar entre los 200 y 300°C, es acertado y práctico para fines de estudio emplear una temperatura de los gases de escape promedio de 300°C en este punto de toma de muestra.

Por lo tanto las consideraciones para esta etapa son:

- Frecuencia de giro del disco (f) de 0.15-3Hz.
- Se simula el proceso para discos con 2, 4, 6, 8 y 10 cavidades, con un volumen de 0.05 cm³ cada cavidad.
- La salida de los gases de escape se considera a la temperatura promedio de 300°C y a 1 atm de presión.
- El aire de dilución que se emplea está a una temperatura de calentamiento de 150°C y a 1 atm de presión.

No se analiza la influencia del calentamiento de gases de escape ya que no es un factor recomendable al cual acudir para alcanzar amplios rangos de relaciones de dilución, pues el requerimiento energético para elevar la temperatura de los gases de escape por encima de los 300°C es mucho mayor que para calentar el aire a 150°C, por lo tanto ese proceso no es práctico.

A continuación se presentan los resultados de esta simulación en cuatro grupos que corresponden a la variación del flujo de aire de dilución en los valores de 0.5 – 1 – 1.5 y 2 l/min.

Tabla 3.19. Relaciones de dilución máximas y mínimas obtenidas para: $f=0.15 - 3$ Hz, aire de dilución a $T=150^{\circ}\text{C}$ y $P=1\text{atm}$, flujo de aire de dilución: 0.5 l/min, gases de escape a $T=300^{\circ}\text{C}$ y $P=1\text{atm}$, Discos con 2, 4, 6, 8 y 10 cavidades.

		RELACIÓN DE DILUCIÓN				
	f(Hz)	Disco 2	Disco 4	Disco 6	Disco 8	Disco 10
Max.	0.15	1:679	1:340	1:227	1:171	1:137
Min.	3	1:35	1:18	1:12	1:9	1:8

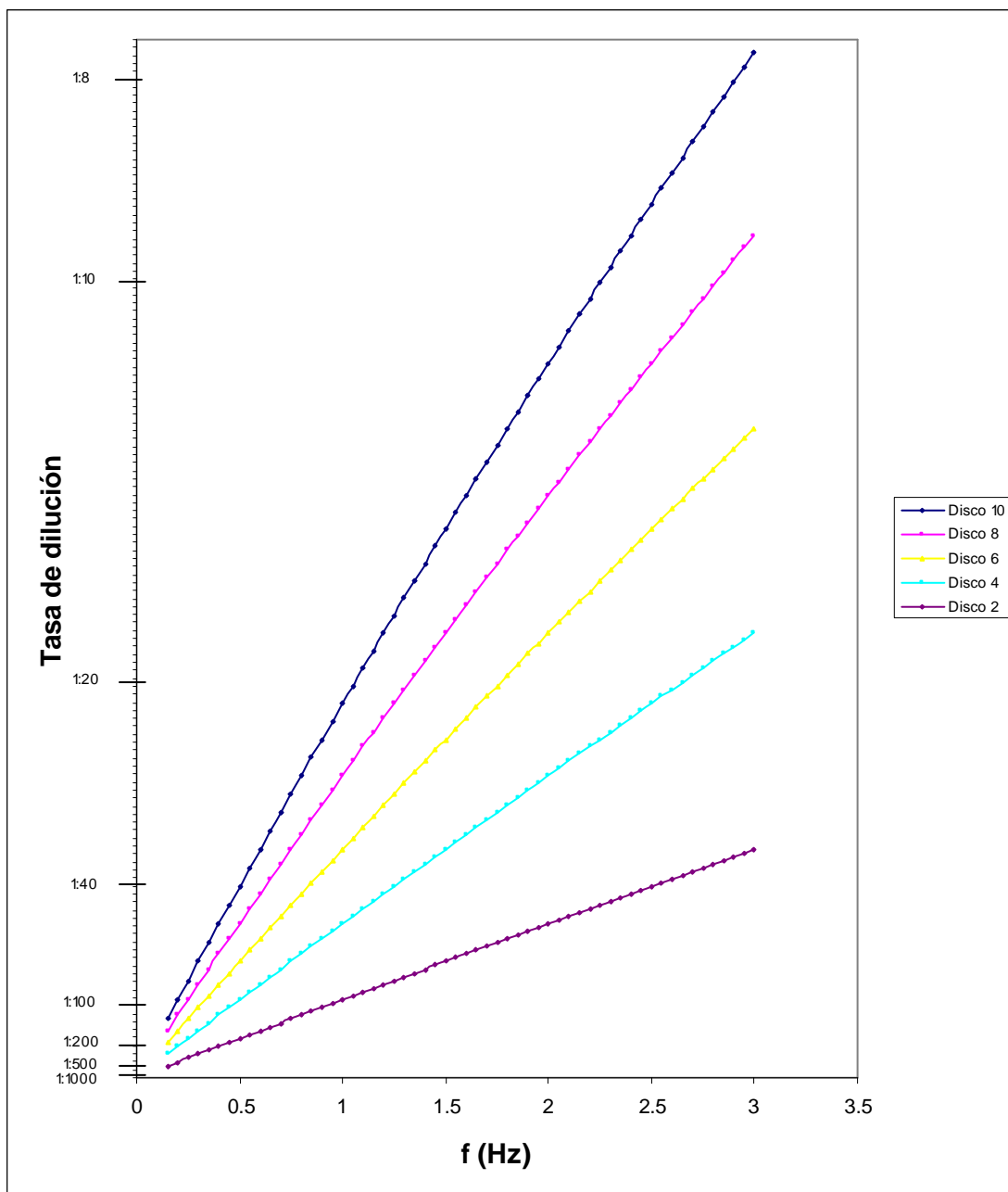


Figura 3.34. Relaciones de dilución obtenidas para: $f=0.15 - 3$ Hz, aire de dilución a $T=150^{\circ}\text{C}$ y $P=1\text{atm}$, flujo de aire de dilución: 0.5 l/min, gases de escape a $T=300^{\circ}\text{C}$ y $P=1\text{atm}$, Discos con 2, 4, 6, 8 y 10 cavidades.

Tabla 3.20. Relaciones de dilución máximas y mínimas obtenidas para: $f=0.15 - 3$ Hz, aire de dilución a $T=150^{\circ}\text{C}$ y $P=1\text{atm}$, flujo de aire de dilución: 1 l/min, gases de escape a $T=300^{\circ}\text{C}$ y $P=1\text{atm}$, Discos con 2, 4, 6, 8 y 10 cavidades.

		RELACIÓN DE DILUCIÓN					
		f(Hz)	Disco 2	Disco 4	Disco 6	Disco 8	Disco 10
Max.	0.15	1:1358	1:679	1:453	1:340	1:272	
Min.	3	1:69	1:35	1:24	1:18	1:15	

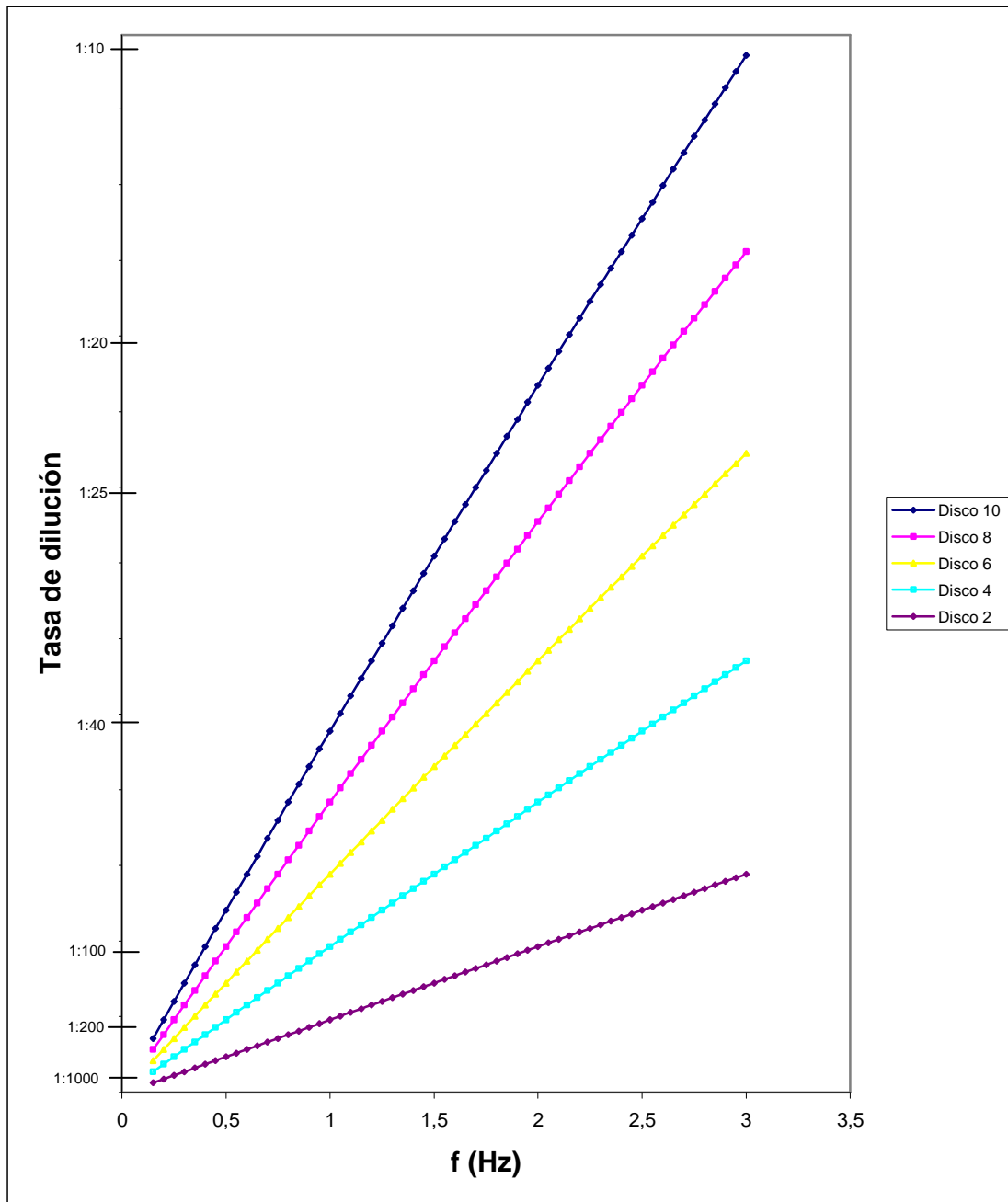


Figura 3.35. Relaciones de dilución obtenidas para: $f=0.15 - 3$ Hz, aire de dilución a $T=150^{\circ}\text{C}$ y $P=1\text{atm}$, flujo de aire de dilución: 1 l/min, gases de escape a $T=300^{\circ}\text{C}$ y $P=1\text{atm}$, Discos con 2, 4, 6, 8 y 10 cavidades.

Tabla 3.21. Relaciones de dilución máximas y mínimas obtenidas para: $f=0.15 - 3$ Hz, aire de dilución a $T=150^{\circ}\text{C}$ y $P=1\text{atm}$, flujo de aire de dilución: 1.5 l/min, gases de escape a $T=300^{\circ}\text{C}$ y $P=1\text{atm}$, Discos con 2, 4, 6, 8 y 10 cavidades.

		RELACIÓN DE DILUCIÓN					
		f(Hz)	Disco 2	Disco 4	Disco 6	Disco 8	Disco 10
Max.	0.15	1:2036	1:1019	1:679	1:510	1:408	
Min.	3	1:103	1:52	1:35	1:26	1:21	

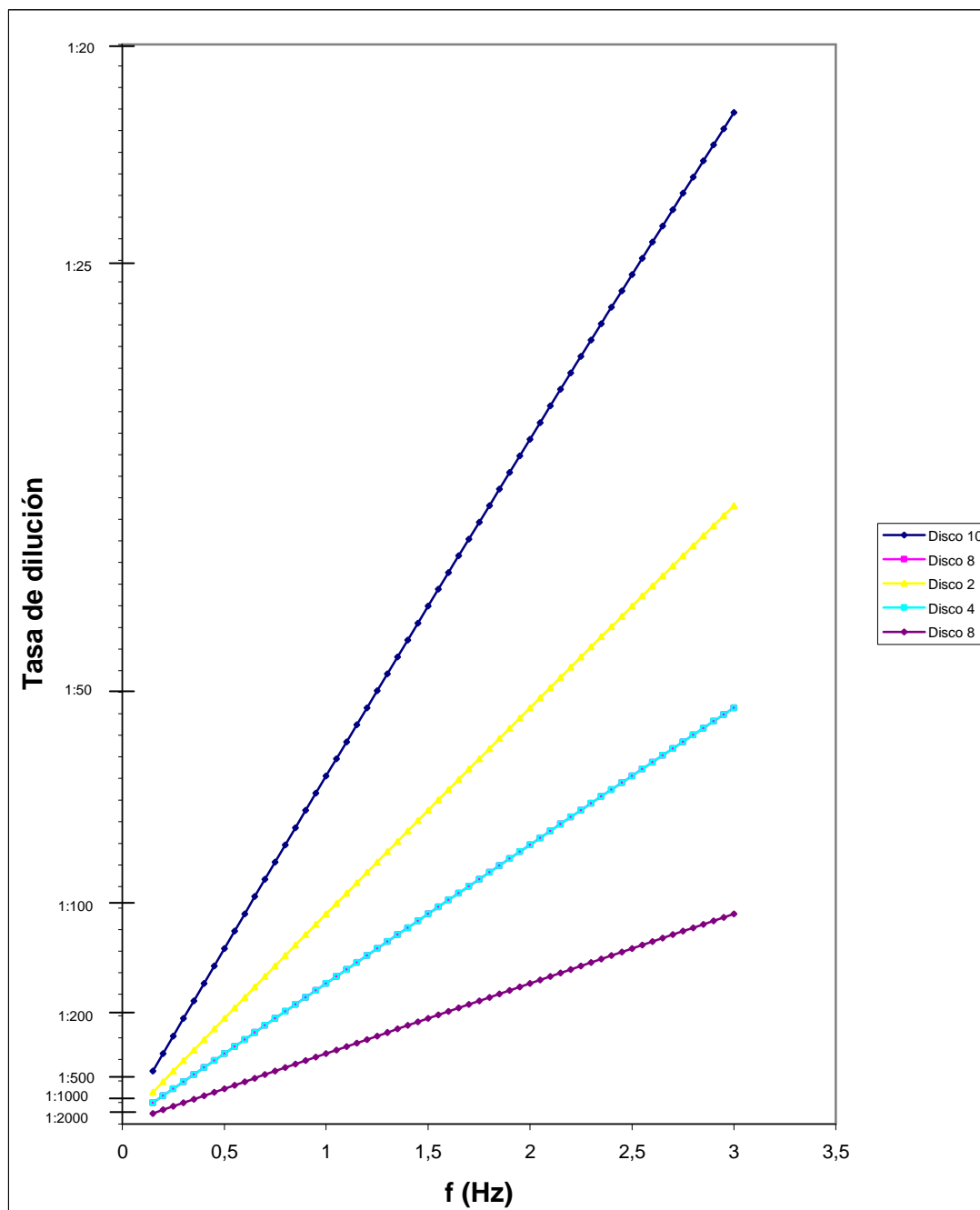


Figura 3.36. Relaciones de dilución obtenidas para: $f=0.15 - 3$ Hz, aire de dilución a $T=150^{\circ}\text{C}$ y $P=1\text{atm}$, flujo de aire de dilución: 1.5 l/min, gases de escape a $T=300^{\circ}\text{C}$ y $P=1\text{atm}$, Discos con 2, 4, 6, 8 y 10 cavidades.

Tabla 3.22. Relaciones de dilución máximas y mínimas obtenidas para: $f=0.15 - 3$ Hz, aire de dilución a $T=150^{\circ}\text{C}$ y $P=1\text{atm}$, flujo de aire de dilución: 2 l/min, gases de escape a $T=300^{\circ}\text{C}$ y $P=1\text{atm}$, Discos con 2, 4, 6, 8 y 10 cavidades.

		RELACIÓN DE DILUCIÓN					
		f(Hz)	Disco 2	Disco 4	Disco 6	Disco 8	Disco 10
Max.	0.15	1:2714	1:1358	1:905	1:679	1:544	
Min.	3	1:137	1:69	1:46	1:35	1:28	

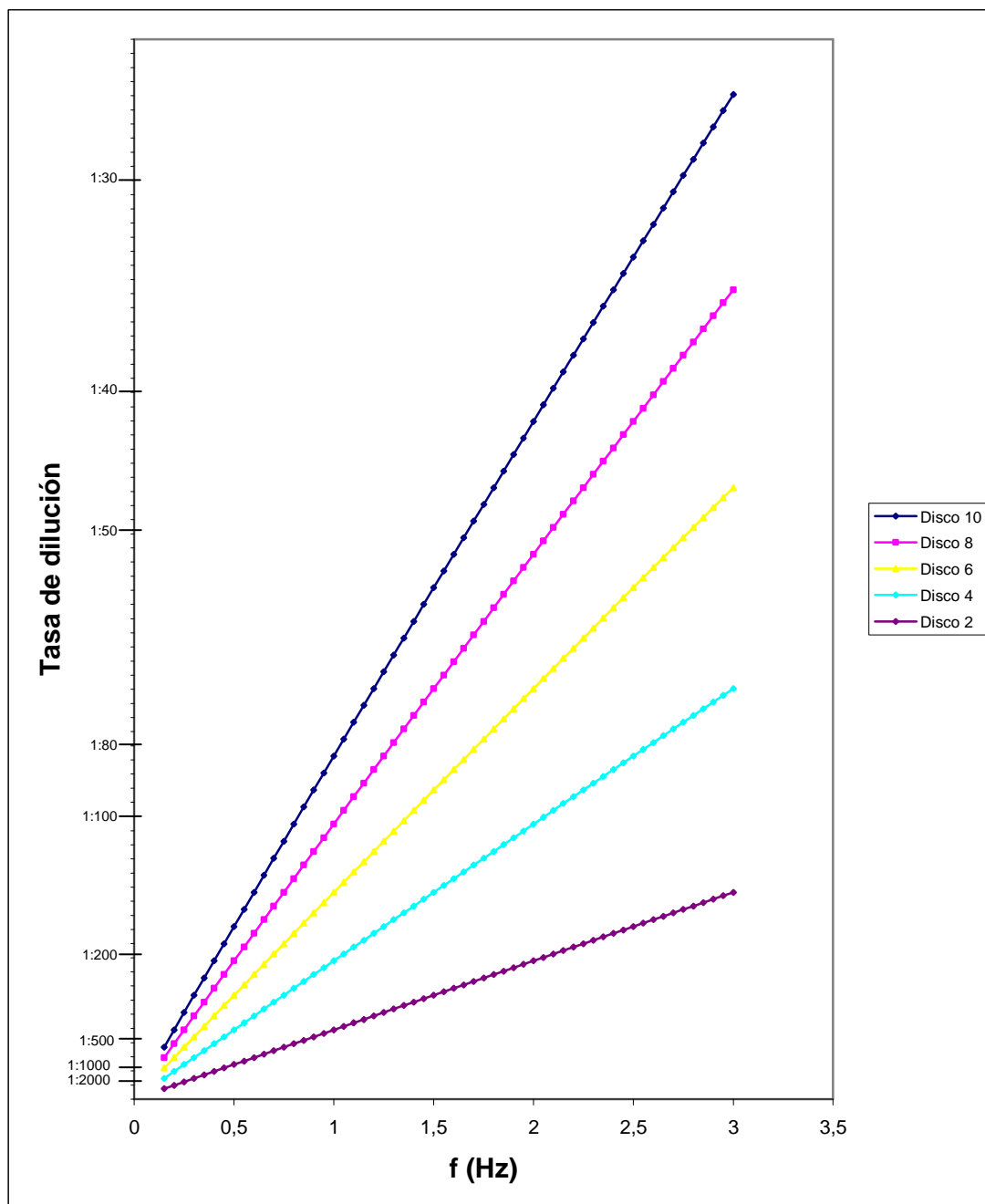


Figura 3.37. Relaciones de dilución obtenidas para: $f=0.15 - 3$ Hz, aire de dilución a $T=150^{\circ}\text{C}$ y $P=1\text{atm}$, flujo de aire de dilución: 2 l/min, gases de escape a $T=300^{\circ}\text{C}$ y $P=1\text{atm}$, Discos con 2, 4, 6, 8 y 10 cavidades.

3.5.5.3. Análisis de la simulación de la Relación de Dilución

Del análisis de la simulación de la RD en función de la variación de los diferentes parámetros, se obtiene los siguientes resultados:

1. Al utilizar discos con mayor número de cavidades y manteniendo el resto de parámetros constantes, la RD (relación entre la masa de gases de escape respecto a la masa aire total en la solución a analizarse) aumenta, ya que se diluye más cantidad de masa de gases de escape en una misma cantidad de masa de aire.
2. Al aumentar el flujo de aire de dilución y conservando el resto de parámetros constantes, se produce una disminución en la relación de dilución, ya que se tiene mayor cantidad de masa de aire para una misma cantidad de gases de escape.
3. El comportamiento de la RD respecto a la variación de la frecuencia de giro del disco, grafica una curva cuyo radio de curvatura es despreciable, por lo que se puede considerar como recta con pendiente creciente, es decir, la RD aumenta cuando la f se incrementa (relación directamente proporcional).

El comportamiento descrito en los tres puntos se generaliza al observar desde la Fig. 3.18 a la Fig. 3.36 correspondientes a la simulación de la relación de dilución y concuerda con el comportamiento de la RD indicado en la Sección 3.5.5 y la Fig. 3.16.

Respecto a los valores de RD que se obtienen con la variación de los discos con diferente número de cavidades y de la f en intervalos de 0.05 Hz, desde 0.15 a 3 Hz, se observa un comportamiento repetitivo, por lo que, para simplificar el sistema es necesario definir si se desea obtener diferentes valores de relación de dilución en función de varias opciones de discos o en su defecto en función de un

variador de frecuencia para el motor que permita operarlo a todas las frecuencias especificadas.

Como ya se anticipó al inicio del análisis, con respecto a la influencia del número de cavidades en el disco giratorio, al comparar el disco con 2 cavidades y el de 4 cavidades, con el resto de parámetros constantes, la RD aumenta como se observa para $f = 0.15$ Hz, Tabla 3.19 $RD_{\text{Disco2}}=1:1358$ y $RD_{\text{Disco4}}=1:679$, por lo tanto a mayor número de cavidades la RD aumenta.

Al comparar dos puntos con FMAD de 1 y 1.5 l/min (por ejemplo Tablas 3.3 y 3.4, respectivamente) y el resto de parámetros iguales, Disco 6, $f=3$ Hz, se tiene $RD_{1\text{l/min}}=1:14$ y $RD_{1.5\text{l/min}}=1:21$, con lo que se confirma que aumentando el flujo de aire de dilución se genera una disminución en la relación de dilución.

Dos puntos comparativos de la influencia de f en una misma curva en la Fig.3.21 para el Disco 8, se tiene $RD_{0.15\text{Hz}}=1:679$ mientras que $RD_{3\text{Hz}}=1:35$, entonces, a mayor f la RD aumenta.

Además de los tres puntos generales, se obtienen resultados particulares para cada configuración, donde se analiza la influencia de las temperaturas de los fluidos en la RD, así:

La primera parte de la simulación considera que la muestra de gas de escape se toma al final del tubo de escape, con las especificaciones indicadas en la sección 3.5.5.1., en la que se analiza dos configuraciones: calentando el aire de dilución y calentando la muestra de gas de escape.

El aumento de la temperatura del aire de dilución permite obtener mayores rangos de RD que si se aumenta la temperatura de gases de escape, esto se aprecia comparando los resultados de las Tablas 3.2 a 3.16. Para la primera configuración se tienen RD entre 1:5 (Fig. 3.18) y 1590 (Fig. 3.21), mientras que en la segunda configuración el RD está entre 1:8 (Fig. 3.22) y 1:3091 (Fig. 3.33).

Comparando dos datos puntuales para un flujo de aire de dilución de 2l/min con el Disco 4, $f= 1\text{Hz}$, con gases de escape a 100°C y 120°C (Figuras 3.29 y 3.33 respectivamente) $RD_{100^{\circ}\text{C}}=1:216$ y $RD_{120^{\circ}\text{C}}=1:233$, el calentamiento de los gases de escape produce un decremento en la RD, debido a que a mayor temperatura la densidad de un fluido disminuye y reemplazando las Ec.3.5 y 3.6 en la Ec.3.4 se aprecia que existe una relación inversa entre la RD y la densidad de los gases de escape.

La segunda parte del análisis contempla que la toma de muestra de gases de escape se realiza junto el dispositivo RETROFIT. Las consideraciones para esta etapa se especifican en la Sección 3.5.5.2, los resultados obtenidos son: RD en el rango de 1:8 (Fig. 3.34) a 1:2714 (Fig. 3.37), en comparación a la primera etapa el rango obtenido es pequeño por la elevada temperatura de la muestra de gases de escape (300°C), con lo que la densidad de este fluido disminuye aproximadamente a la mitad del valor de la densidad cuando el muestreo se hace a la salida del tubo de escape.

Las tablas completas de la simulación de la RD correspondientes a las diferentes configuraciones son presentadas en el Anexo C

3.5.6 PARÁMETROS DE DISEÑO DEL DDR

Evaluando las Secciones 3.5.3 y 3.5.4 donde sea analizan los requerimientos y relación de dilución del DDR respectivamente, se definen los parámetros de diseño.

Es necesario ajustar los parámetros de diseño a la disponibilidad tecnológica del país, por lo que se decide limitar el rango de variación de la frecuencia de giro entre 0.15 – 1 Hz, debido a que hay un limitado mercado para adquirir los motores de paso y los que se encuentran disponibles se pueden programar dentro del rango indicado para intervalos de 0,05 Hz, como se realizó la simulación de la RD.

Con el Disco 2 y Disco 10 se obtiene al rango de RD más amplio, por lo tanto se diseña y se desarrollan los planos constructivos del sistema considerando que va a operar con los dos discos.

Al diseñar el sistema para calentar el aire de dilución a una temperatura constante y no calentar la muestra de gases de escape, se logra simplificar el diseño, disminuir los requerimientos energéticos y costos, por esta razón y las indicadas en la Sección 3.5.2.4, el sistema se diseña para calentar a 150°C únicamente el aire de dilución.

El flujo del aire de dilución (1.5 l/min)⁶⁹ y de la muestra de gases de escape (1l/min)⁷⁰ se define tomando en cuenta los valores con los cuales operan este tipo de equipos en algunos estudios como los referidos.

Para la etapa de diseño (la selección de materiales y dispositivos) se debe considerar la temperatura crítica de los gases de escape después del filtro de partículas que es de 300°C.

Tabla 3.23. Resumen de los parámetros de diseño del DDR.

AIRE DE DILUCIÓN		
Temperatura	150°C	
Flujo	1.5 l/min	
MUESTRA DE GASES DE ESCAPE		
Temperatura máxima	300°C	
Temperatura mínima	60°C	
Flujo	1 l/min	
RELACIÓN DE DILUCIÓN		
F (Hz)	RD	
DISCO 2	0.15	1:1193
	1	1:180
DISCO 10	0.15	1:239
	1	1:37

⁶⁹ HUEGLIN, SCHERRER, BURTSCHER; Description and Application of a Dilution Method for the Characterization of Particles from Emissions Sources; 1997; Suiza.

⁷⁰ KASPER M., BURTSCHER H.; NanoMet: On-Line Characterization of Nanoparticles Size and Composition; SAE Technical Paper Series SP-1552; Junio 2000, Francia.

CAPITULO 4

DISEÑO DEL SISTEMA DE DILUCION DE DISCO ROTATORIO

El presente proyecto comprende el estudio de alternativas de dilusores para la medición de emisiones, selección de la mejor alternativa y su diseño. Las dos primeras etapas se desarrollan en los anteriores capítulos, una introducción al diseño se presenta en las secciones 3.5.3, 3.5.5 y 3.5.6 donde se plantean los requerimientos, la simulación de dilución de la alternativa seleccionada y los parámetros de diseño de la misma.

En este capítulo se desarrolla la etapa de diseño del dilusor, para la cual es necesario detallar los elementos y dispositivos que lo conforman.

4.1 INTRODUCCIÓN

Los componentes del Dilusor de Disco Rotatorio que se diseña se agrupan en dos sistemas:

- Sistema Mecánico de dilución
- Sistema de Calentamiento de aire de dilución

Estos sistemas están representados en la Fig. 4.1., donde además se presentan sistemas adicionales a los indicados, como el de suministro de aire de dilución y el de muestreo de gases de escape, estos dos junto con el sistema de control electrónico, medición y de adquisición de datos, son sistemas accesorios al dilusor de disco rotatorio y no se desarrollan como parte de este estudio, la información complementaria de estos se encuentra en los Anexos F, G y H correspondientemente.

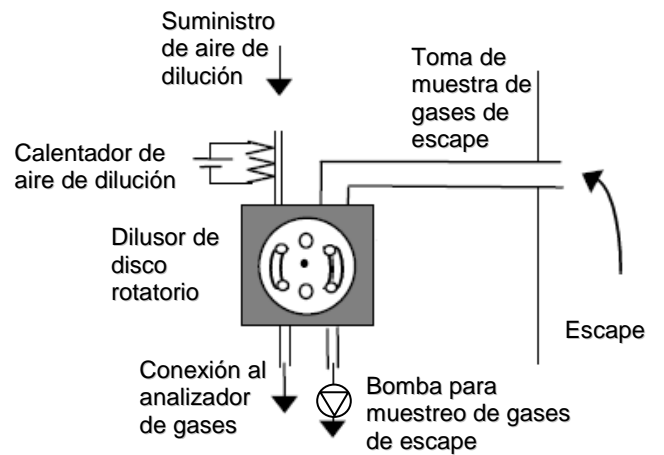


Figura 4.1. Sistema de Dilución de disco rotatorio⁷¹

El Sistema de Dilución de Disco Rotatorio ensamblado junto con los sistemas accesorios se representa en diagrama de bloques en la Fig. 4.2.:

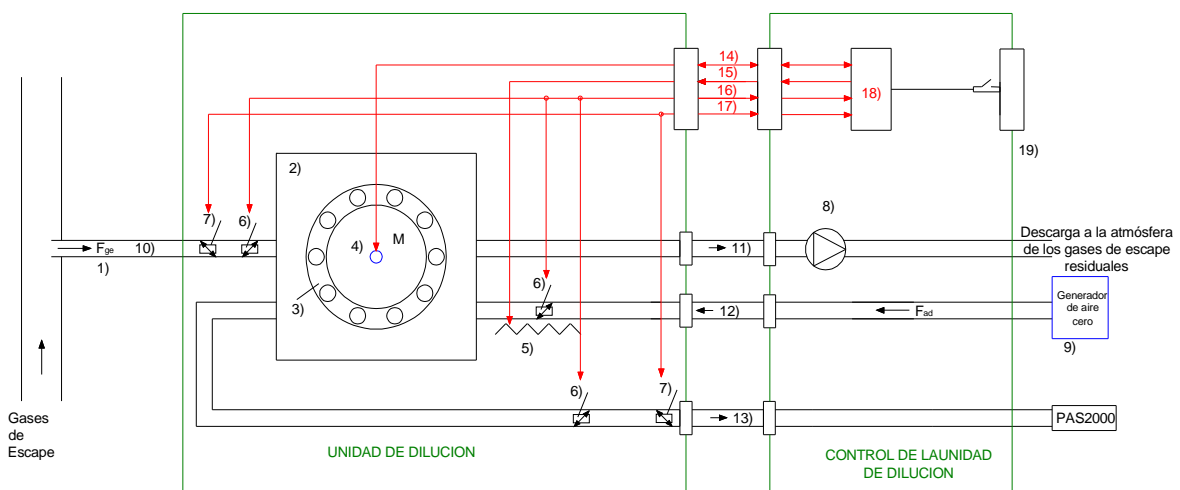


Figura 4.2. Diagrama de Bloques del Sistema de Dilución⁷¹

donde:

- 1) Sonda para toma de muestra de gases de escape
- 2) Bloque de dilución
- 3) Disco Rotatorio con cavidades

⁷¹ www.matter-engineering.com; Preliminary Datasheet NanoMet C (08/29/03); Matter Engineering AG (Modificado)

- 4) Control de frecuencia de giro del motor
- 5) Calentamiento del aire de dilución
- 6) Sensor de temperatura
- 7) Sensor de presión
- 8) Bomba peristáltica para gases de escape
- 9) Generador de “aire cero”.
- 10) Entrada de muestra de gas de escape
- 11) Salida de gas de escape excedente
- 12) Entrada de aire de dilución
- 13) Salida de muestra de gas de escape diluido
- 14) Señal de control de frecuencia de giro del motor
- 15) Potencia para el calentamiento del aire de dilución
- 16) Señal de temperatura
- 17) Señal de presión
- 18) Hardware de Control y Adquisición de datos
- 19) Interfase digital al computador

4.2 DISEÑO DEL SISTEMA MECÁNICO DE DILUCIÓN

En la Fig. 4.3 se observan los componentes mecánicos principales del DDR, éstos son: cuerpo dilusor, disco rotatorio, eje de rotación, resorte. Para el acople e instalación de estas partes se requiere de otros componentes, en la presente sección se desarrolla el diseño y/o selección de los componentes según sea necesario. Esta información se complementa con los planos constructivos (ver Anexo E) donde se detallan todas las partes que conforman el sistema mecánico del DDR.

Para iniciar el proceso de diseño mecánico es necesario determinar las diferentes cargas que influyen en el sistema. La figura 4.3 representa las partes constitutivas del sistema mecánico del DDR y las cargas que actúan en el mismo.

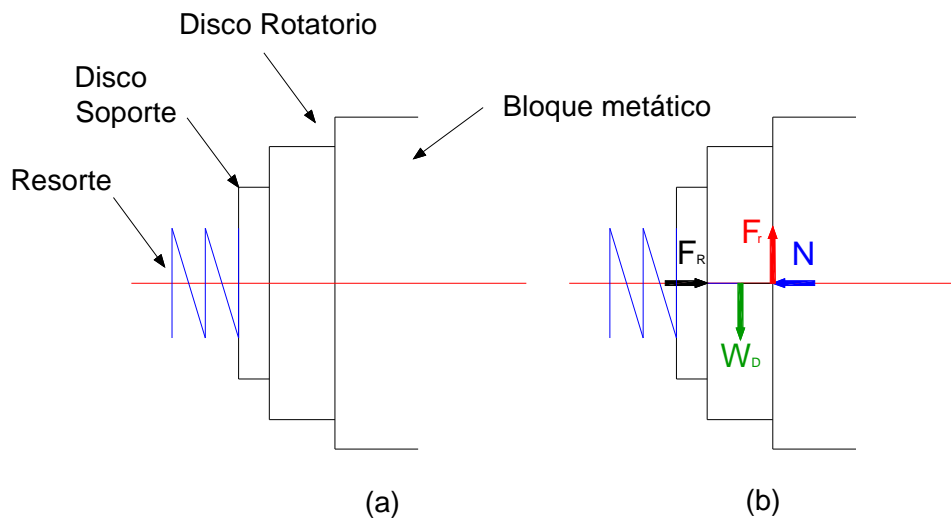


Figura 4.3. Sistema mecánico del DDR: partes (a) y cargas(b).

donde:

F_r : Fuerza de rozamiento entre las superficies en contacto del disco rotatorio y el bloque metálico.

W_D : Peso del disco rotatorio.

F_R : Fuerza del disco sobre el bloque metálico generada por el resorte.

N : Fuerza normal del bloque metálico sobre el disco rotatorio.

Esta sección se enfoca principalmente en seleccionar el dispositivo motriz del sistema y posteriormente diseñar o seleccionar todos los elementos que conforman el sistema.

4.2.1 SELECCIÓN DEL DISPOSITIVO MOTRIZ

El dispositivo motriz para el sistema dilusor es un motor eléctrico, que es un mecanismo rotativo que transforma la energía eléctrica en energía mecánica (rotación de un eje).

El requerimiento básico del motor que se seleccione, es que se pueda controlar y variar la velocidad de manera sencilla, además de ser pequeño (acorde con el

tamaño del cuerpo dilusor) y tener un bajo requerimiento energético.

Se pueden mencionar algunas opciones de sistemas de control de velocidad (se entiende así como el conjunto motor-actuador de control de velocidad), como:

- **Servomotores sin escobillas⁷²**

Basados en motores síncronos, utilizados para movimientos que requieran altas velocidades y control preciso, son de alto costo, estos pueden ser:

- Servomotor sin escobillas (brushless) clásico
- Servomotores rotativos sin engranajes (gearless)
- Servomotores lineales (torque motors)

- **Accionamientos AC⁷²**

Basados en motores asíncronos, son los más utilizados hoy en día en el mundo industrial, debido básicamente a su bajo coste frente a otras alternativas. En este caso se tiene como actuadores los Variadores o convertidores de frecuencia, que ejercen control sobre la tensión entregada al motor y su frecuencia. No permiten una alta precisión en el control de posición y velocidad.

- **Motor de pasos⁷³**

Es un dispositivo electromagnético que convierte pulsos digitales en la rotación mecánica del eje. Las ventajas de los motores del paso son bajo costo, alta confiabilidad, alto esfuerzo de torsión a las velocidades bajas, además de una construcción y control simple.

Los motores de paso son ideales cuando lo deseado es un posicionamiento con un elevado grado de exactitud y/o una muy buena regulación de la velocidad.

⁷² <http://www.mecmod.com/>

⁷³ <http://www.Uj/ams2000/stepping101.html>

Se selecciona como dispositivo motriz un motor de pasos, ya que este tipo de motores permite un control simple y preciso de la frecuencia de giro mediante un sencillo circuito electrónico y a bajo costo. (Ver Anexo F Catálogo F.2).

La selección del motor de pasos se realiza en función del torque requerido para accionar las partes móviles.

4.2.1.1. Cálculo del torque requerido en el sistema

Para el cálculo del torque total requerido por el sistema es necesario un análisis de la Fig. 4.3, de donde se concluye que en el sistema mecánico del DDR se generan dos momentos por efecto de las cargas actuantes, los mismos que se deben vencer para accionar las partes móviles del sistema, estos son: momento de inercia, momento producido por la fuerza de rozamiento. Para esto se aplica la Ec. 4.1, que expresa que el torque total es el necesario para vencer la suma de los momentos indicados.

$$T_T = T_1 + T_2 \quad (\text{Ec. 4.1})$$

donde:

T_T : Torque total requerido en el Sistema (N*m)

T_1 : Momento inercia del sistema (N*m)

T_2 : Momento generado por la fuerza de rozamiento (N*m)

4.2.1.2. Momento de Inercia

La inercia es la resistencia de un cuerpo o sistema de partículas a cambiar su estado de movimiento, por lo tanto, el momento de inercia es la resistencia que un presenta un cuerpo a ser acelerado en rotación.

Para calcular el momento de inercia total del sistema es necesario determinar las masas e inercias de cada una de las partes móviles, y estas son: el disco rotatorio y el eje motriz.

4.2.1.2.1. Cálculo de la masa e inercia del Disco

La Fig. 4.4. es la representación geométrica del Disco Rotatorio con sus dimensiones generales.

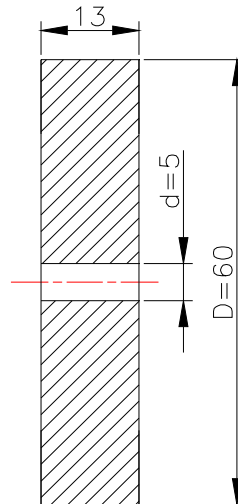


Figura 4.4. Disco Rotatorio (Dimensiones en mm)

Se calcula la masa e inercia del disco como sigue:

$$V_D = \frac{\pi}{4} (D^2 - d^2) * a \quad (\text{Ec. 4.2})$$

$$M_D = V_D * \rho_D \quad (\text{Ec. 4.3})$$

$$I_D = \frac{1}{2} M_D R^2 \quad (\text{Ec. 4.4})$$

donde:

V_D : Volumen del Disco (m^3)

D : Diámetro del Disco (m)

d : Diámetro Interior del Disco (m)

M_D : Masa del Disco (kg)

a : Espesor del Disco (m)

ρ_D : Densidad del material del Disco = Densidad del Teflón (kg/m^3)

I_D : Inercia del Disco ($\text{kg}\cdot\text{m}^2$)

R : Radio del Disco (m)

$$D = 0.06 m$$

$$R = 0.03 m$$

$$d = 0.005 m$$

$$a = 0.013 m$$

$$\rho_D = 2.2 * 10^{-3} \text{ kg} / \text{m}^3$$

De las ecuaciones 4.2, 4.3 y 4.4 se obtiene:

$$V_D = 3.65 * 10^{-5} \text{ m}^3$$

$$M_D = 0.08 \text{ kg} = 80 \text{ g}$$

$$I_D = 3.6 * 10^{-5} \text{ kg} * \text{m}^2$$

4.2.1.2.2. Cálculo de la masa e inercia del eje motriz

Para el cálculo de la masa e inercia del eje se debe estimar sus dimensiones y emplear las ecuaciones 4.5, 4.6 y 4.7, así:

$$V_E = \left(\frac{\pi}{4} * d^2 \right) * l \quad (\text{Ec. 4.5})$$

$$M_E = V_E * \rho_E \quad (\text{Ec. 4.6})$$

$$I_E = \frac{1}{2} M_E r^2 \quad (\text{Ec. 4.7})$$

donde:

V_E : Volumen del Eje (m^3)

d : Diámetro del Eje (m)

M_E : Masa del Eje (kg)

l : Longitud del Eje (m)

ρ_E : Densidad del Acero (AISI 10-18 CD) (kg/m^3)

I_E : Inercia del Eje ($\text{kg} * \text{m}^2$)

r : Radio del eje (m)

Como hay secciones del eje de diferente diámetro, para el cálculo de la masa se asume que el diámetro promedio del eje es de 6 mm.

$$d = 0.006m$$

$$r = 0.003m$$

$$l = 0.012m$$

$$\rho_E = 7.84 * 10^{-3} \text{ kg} / m^3$$

De las ecuaciones 4.5, 4.6 y 4.7 se determina:

$$V_E = 3.393 * 10^{-6} m^3$$

$$M_E = 0.027Kg = 27g$$

$$I_E = 1.215 * 10^{-7} \text{ kg} * m^2$$

La inercia total del sistema está dada por la suma de las inercias de los dos elementos móviles, así:

$$I_T = I_D + I_E \quad (\text{Ec. 4.8})$$

donde:

I_T : Inercia total del sistema ($Kg * m^2$)

$$I_T = 3.61 * 10^{-5} \text{ kg} * m^2$$

El cálculo del momento de inercia está dado por la Ec. 4.9

$$T_1 = I_T \alpha \quad (\text{Ec. 4.9})$$

Para el arranque del Sistema:

$$\omega_f = \omega_o + \alpha * t \quad (\text{Ec. 4.10})$$

$$\alpha = \frac{\omega_f}{t} \quad (\text{Ec. 4.11})$$

donde:

T_1 : Momento de Inercia del sistema ($\text{kg} \cdot \text{m}^2$)

α : Aceleración angular (rad/s^2)

ω_f : Velocidad angular final (rad/s)

ω_o : Velocidad angular inicial (rad/s)

t : Tiempo (s)

$\omega_o = 0$ (Porque se parte del reposo)

La aceleración angular se calcula considerando que se requiere completar una revolución en tiempo $t = 1$ s.

Esta consideración se hace en función de que la velocidad angular máxima (ω_{max}) con la que el sistema va a funcionar es de:

$$\omega_{max} = 1 \frac{\text{revolución}}{\text{s}} = 60 \text{rpm}$$

$$\omega_{max} = 6.283 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$$

Esta ω_{max} es la correspondiente a una $f_{max} = 1$ Hz

Por lo tanto como se parte del reposo la velocidad angular final crítica para la condición de arranque del Sistema es la ω_{max} , entonces:

$$\omega_f = 6.283 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$$

$$\alpha = 6.283 \frac{\text{rad}}{\text{s}^2}$$

De la Ec. 4.9:

$$T_1 = 2.27 * 10^{-4} \text{ N} * m$$

$$T_1 = 2.31 \text{ } \bar{g} * cm$$

4.2.1.3. Momento generado por la fuerza de rozamiento

La fuerza de rozamiento entre dos superficies depende directamente del coeficiente de fricción (μ) entre éstas, a su vez el coeficiente de fricción depende de las condiciones y materiales de trabajo, en el caso del DDR la superficies en contacto operan con fricción y sin lubricación. En el DDR la fuerza de rozamiento depende además de la fuerza proporcionada por el resorte que mantiene unidos las superficies del disco y del bloque.

Por lo tanto, para poder calcular el momento generado por la fuerza de rozamiento es necesario determinar primero la fuerza que ejerce el resorte sobre el disco y consecuentemente el disco sobre el bloque metálico.

4.2.1.3.1 Diseño del resorte

El requerimiento para el diseño de este elemento es que la fuerza sea al menos igual a la Normal (N) para que el disco se mantenga siempre en contacto con el cuerpo fijo. Además, la fuerza (F_R) del resorte debe ser suficiente para vencer la presión de los gases de escape que actúan sobre la superficie del disco (Fig. 4.3b). Con estas consideraciones el proceso de diseño del resorte es como sigue:

La fuerza del resorte F_R mayor o al menos igual a la fuerza de los gases F_g

$$F_R \geq F_g \quad (\text{Ec. 4.12})$$

Del diagrama de cuerpo libre del sistema se determinan las fuerzas para que el sistema se mantenga en equilibrio, considerando que la sumatoria de fuerzas en cualquier dirección es igual a cero (Fig. 4.3b), de donde se obtiene lo siguiente:

$$\sum F_x = 0 \quad (\text{Ec. 4.13})$$

$$F_R - N = 0 \quad (\text{Ec. 4.14})$$

$$F_R = N \quad (\text{Ec. 4.15})$$

donde:

F_R : Fuerza del resorte (N)

N : Fuerza Normal del cuerpo fijo sobre el disco rotatorio(N)

El momento T_2 generado por la fuerza de rozamiento entre el disco rotatorio y el cuerpo fijo está dado por la Ec. 4.16.

$$T_2 = \frac{2}{3} \mu * N * \frac{R_o^3 - R_i^3}{R_o^2 - R_i^2} = \frac{2}{3} \mu * F_R * \frac{R_o^3 - R_i^3}{R_o^2 - R_i^2} \quad (\text{Ec. 4.16})$$

donde:

μ : Coeficiente de Fricción por rozamiento entre superficies teflón-metal

R_o : Radio externo de la superficie del disco rotatorio en contacto con el cuerpo fijo (m)

R_i : Radio de la superficie del disco que no está contacto con el cuerpo fijo (m)

Para la condición rozamiento estático en seco con Teflón $\mu = 0.09$ (Anexo D-Propiedades del teflón)

Del Plano Mecánico 2692.101.4 DISCO ROTATORIO 1 (ver plano Anexo E)

$$R_o = 0.03 \text{ m}$$

$$R_i = 0.0195 \text{ m}$$

Además, se requiere que la fuerza efectuada por el resorte sea suficiente para mantener juntas las superficies del disco y el bloque al vencer la fuerza que ejerce el gas que circula en los ductos del bloque y que tiende a empujar el disco, ya que son presiones superiores a la atmosférica. Esta es la única fuerza que se opone a la del resorte y actúa perpendicular a las áreas de la Fig. 4.5:

$$P_g = \frac{F_g}{A_g} \quad (\text{Ec. 4.17})$$

$$F_g = P_g * A_g \quad (\text{Ec. 4.18})$$

donde:

P_g : Presión de los gases en los ductos (Pa)

F_g : Fuerza que ejercen los gases sobre el disco (N)

A_g : Área del disco sobre la que actúa la F_g (m²)

El valor de P_g depende de la presión de los gases post-combustión al emplear los dispositivo RETROFIT, por efecto de estos filtros se incrementan la presión de los gases aguas arriba del dispositivo, en promedio esta presión para un correcto funcionamiento de los filtros es de 150mbar, aunque puede incrementarse bajo ciertas circunstancias de operación, por ejemplo cuando el proceso de regeneración del dispositivo no se lleva a cabo a tiempo o existe taponamiento del filtro.⁷⁴ Por lo tanto se considera que en condiciones normales de muestreo $P_g = 150 \text{ mbar} = 15000 \text{ Pa}$.

Para el cálculo de A_g se considera que los cuatro ductos que tienen salida hacia la cara del bloque que está en contacto con el disco a su vez coincidirán simultáneamente con cuatro alojamientos del disco. El A_g está representado por el área sombreada de azul en la Fig. 4.5.

⁷⁴ Manual_MD19-2E_970128-6e; Matter Engineering AG.

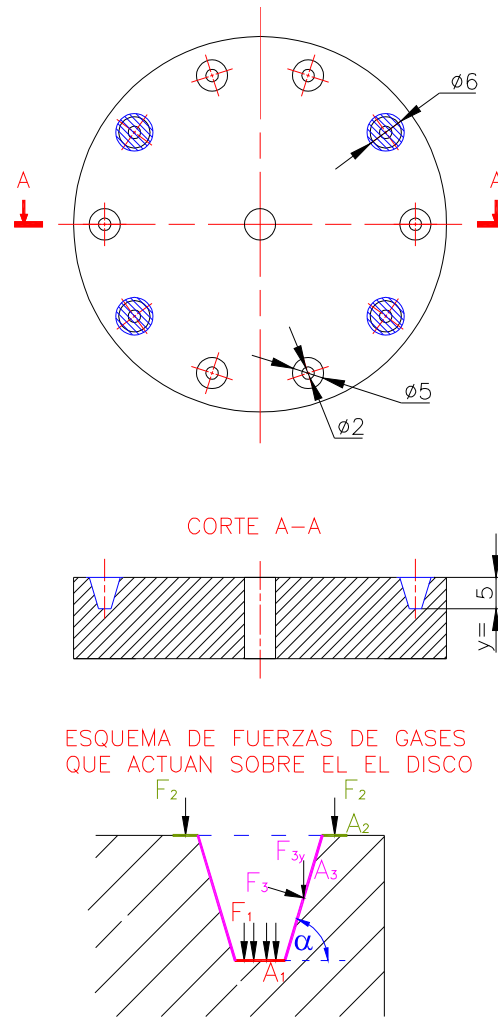


Figura 4.5. Área del disco rotatorio donde actúa la presión de los gases
(Dimensiones en mm)

Los ductos son de sección circular de 6mm de diámetro y los alojamientos del disco tienen la forma de un cono truncado con las dimensiones indicadas en la Fig. 4.5.

La fuerza total de los gases de escape que tiende a separar el disco de cuerpo fijo es cuatro veces la suma de la fuerzas F_1 resultado de P_g sobre el área A_1 (base del cono), F_2 que resulta de P_g sobre el área A_2 (anillo externo) y la componente F_{3y} de la fuerza F_3 resultado P_g actuando perpendicular a el área A_3 (pared del cono), ver la Fig. 4.5, se calcula como sigue:

$$F_g = 4 * (F_1 + F_2 + F_{3y}) \quad (\text{Ec. 4.19})$$

$$F_1 = P_g * A_1 \quad (\text{Ec. 4.20})$$

$$A_1 = \pi * r^2 \quad (\text{Ec. 4.21})$$

$$F_2 = P_g * A_2 \quad (\text{Ec. 4.22})$$

$$A_2 = \pi * (R_1^2 - R^2) \quad (\text{Ec. 4.23})$$

$$F_{3y} = F_3 * \cos \alpha = P_g * \cos \alpha * A_3 \quad (\text{Ec. 4.24})$$

$$A_3 = A_{ct} - A_1 = [\pi * h * (R + r)] - (\pi * r^2) \quad (\text{Ec. 4.25})$$

$$\tan \alpha = \frac{h}{R - r} \quad (\text{Ec. 4.26})$$

donde:

A_1 : Área de la base del cono truncado (m^2)

A_2 : Área del anillo externo al cono truncado (m^2)

A_3 : Área de la pared del cono truncado (m^2)

A_{ct} : Área de la superficie del cono truncado (m^2)

r : Radio menor del cono truncado (m)

R : Radio mayor del cono truncado (m)

h : Profundidad del cono truncado (m)

R_1 : Radio del ducto del bloque (m)

α : ángulo entre la pared y la proyección de la base del cono truncado

De las ecuaciones 4.19 a 4.26:

$$A_1 = 12.57 * 10^{-6} m^2$$

$$A_2 = 8.64 * 10^{-6} m^2$$

$$A_3 = 42.41 * 10^{-6} m^2$$

$$\alpha = 73.3^\circ$$

$$F_1 = 0.19 N$$

$$F_2 = 0.13 \text{ N}$$

$$F_{3y} = 0.18 \text{ N}$$

De la Ec. 4.19:

$$F_g = 2 \text{ N}$$

Para cumplir lo indicado en la Ec. 4.13 se considera un valor de F_R de 15 N para el diseño del resorte, así se garantiza que excede la fuerza requerida para mantener juntas las superficies del disco y el bloque.

Se requiere un resorte a compresión y se diseña sólo estáticamente ya que no está sometido a cargas dinámicas durante el funcionamiento de la máquina. La Fig. 4.6 es un esquema del resorte con las dimensiones asumidas para su diseño.

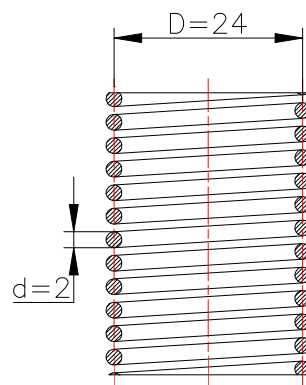


Figura 4.6. Resorte (Dimensiones en mm)

Para el diseño del resorte se tiene:

D: Diámetro de la hélice del Resorte (m)

d: Diámetro del alambre del Resorte (m)

C: Índice del Resorte

$$C = \frac{D}{d} \quad \text{y} \quad 4 \leq C \leq 12 \quad (\text{Ec. 4.27})$$

Asumo:

$$D = 0.024m$$

$$d = 0.002m$$

Por lo tanto: $C = 12$

El material seleccionado para el resorte es alambre de piano (AISI 1085) con las siguientes características:

$$d = 0.002m$$

$$S_{sy} = 0.45 S_{ut} \quad (\text{Tabla 10-13 Diseño en Ingeniería Mecánica; Shigley J.; 6ªEd.})$$

$$S_{ut} = \frac{A}{d^m} \quad (\text{Tabla 10-5 Diseño en Ingeniería Mecánica; Shigley J.; 6ªEd.})$$

$$A = 2211 MPa * mm^m$$

$$m = 0.145$$

donde:

S_{ut} : Resistencia a la tensión (MPa)

S_{sy} : Esfuerzo de cedencia a la torsión (MPa)

$$S_{ut} = 2000 MPa$$

$$S_{sy} = 900 MPa$$

CÁLCULO DE ESFUERZOS DEL RESORTE

Para mantener el resorte no más largo de lo debido su linealidad robusta ξ debe ser menor o a lo sumo igual a 0.15

$$\zeta \geq 0.15$$

Entonces, se fija el valor de $\zeta = 0.15$

Los esfuerzos del resorte del resorte se calculan por medio de las Ec. 4.29 y 4.30:

$$K_B = \frac{4C + 2}{4C - 3} \quad (\text{Ec. 4.28})$$

$$\tau_s = \frac{K_B * 8 * (1 + \zeta) * F * D}{\pi * d^3} \quad (\text{Ec. 4.29})$$

$$\eta_s = \frac{S_{sy}}{\tau_s} \quad \text{y} \quad \eta_s \geq 1.2 \quad (\text{Ec. 4.30})$$

donde:

K_B : Factor de corrección de curvatura

τ_s : Esfuerzo cortante (Pa)

η_s : Factor de seguridad

Se asume una fuerza F del resorte en longitud sólida de 30 N

$$K_B = 1.11$$

$$\tau_s = 292.55 * 10^6 \text{ Pa}$$

$$\eta_s = 3.1$$

Para que el resorte tenga estabilidad absoluta:

$$L_o \leq 2.63 \frac{D}{\alpha} \quad (\text{Ec. 4.31})$$

donde:

L_o : Longitud libre máxima del resorte (m)

α : Constante de condiciones de extremos del resorte

$\alpha=0.5$

(Tabla 10-3 Diseño en Ingeniería Mecánica; Shigley; 6ªEd.)

$$L_o \leq 0.13m$$

Para resortes helicoidales se emplean las siguientes ecuaciones:

$$k = \frac{d^4 * G}{8 * D^3 * N_a} \quad (\text{Ec. 4.32})$$

$$k = \frac{F}{y} \quad (\text{Ec. 4.33})$$

donde:

k : Constante del resorte (N/m)

G : Modulo de elasticidad (MPa)

y : Deflexión del resorte (m)

$G_{\text{alambre de piano}} = 82.7 \text{ MPa}$ (Tabla 10-12 Diseño en Ingeniería Mecánica; Shigley; 6ªEd.)

Para $y = 0.02\text{m}$ cuando el resorte queda totalmente comprimido:

$$k = 1500 \text{ N} / \text{m}$$

$$N_a = 7.97 \text{ espiras} \approx 8 \text{ espiras}$$

Para facilitar montaje se selecciona un resorte con extremos a escuadra y esmerilados:

$$N_T = N_a + Q \quad (\text{Ec. 4.34})$$

donde:

N_T : Número de espiras total

N_a : Número de espiras activas

Q : Número de espiras de extremo

Q' : Número de espiras que se suma a N_a para calcular la altura sólida del resorte

$$Q = 2$$

$$Q' = 1$$

(Tabla Diseño en Ingeniería Mecánica; Shigley J.; 6ªEd.)

$$N_i = 10 \text{ espiras}$$

Para determinar las longitudes y paso del resorte:

$$L_s = (N_a + Q') * d \quad (\text{Ec. 4.35})$$

$$L_o = L_{s+} (1 + \zeta) * y \quad (\text{Ec. 4.36})$$

$$p = \frac{(L_o - 2d)}{N_a} \quad (\text{Ec. 4.37})$$

donde:

L_o : Longitud libre del resorte (m)

L_s : Longitud sólida del resorte (m)

p : Paso del resorte (m)

$$L_s = 0.018m$$

$$L_o = 0.041m$$

$$p = 0.0046 m$$

Como ya se indicó, el sistema se diseña para una fuerza generada por el resorte de:

$$F = 15 \text{ N} \quad \text{y} \quad k = 1500 \text{ N/m}$$

La deflexión que debe tener el resorte para generar esta fuerza es:

$$y = 0.01 \text{ m}$$

Una vez diseñado el resorte, el momento producido por la fuerza de rozamiento entre las superficies en contacto del disco y el cuerpo fijo que está dado por la Ec. 4.16, es:

$$T_2 = 4.05 * 10^{-2} \text{ N} * \text{m}$$

$$T_2 = 413 \text{ g} * \text{cm}$$

Finalmente, de la Ec. 4.1 el torque total que se requiere del motor para el sistema es:

$$T_T = 4.07 * 10^{-2} \text{ N} * \text{m}$$

$$T_T = 415.31 \text{ g} * \text{cm}$$

Para la selección del dispositivo motriz se dispone del catálogo de la marca Jameco (ver Anexo G Catálogo G.1), el motor de pasos con numero de parte 237606CC cumple con el requerimiento de torque del sistema.

4.2.2 DISEÑO Y SELECCIÓN DE LOS ELEMENTOS MECÁNICOS DEL DDR

Además del resorte el sistema mecánico del DDR consta de otros elementos que se deben diseñar o seleccionar para que cumplan con los requerimientos, esto es tolerar los esfuerzos o cargas a los que se sometán.

4.2.2.1. Diseño del eje motriz

Un eje motriz en general es un elemento que transmite movimiento rotativo hacia un elemento cualquiera, a través de diferentes mecanismos tales como banda/polea, cadena/engrane, juegos de engranes.

El eje motriz es el componente que transmite el movimiento del motor al disco rotatorio y debe ser diseñado para soportar todos los esfuerzos que se generan en este proceso, además debe cumplir con requerimientos como tamaño estéticamente compatible con el resto de elementos del dilusor y ser definido en material y dimensiones que permitan su fabricación en el mercado local.

En función del tamaño de las partes de dilusor, se considera para el eje un diámetro de 5mm y una longitud de 120mm.

Se selecciona como material de fabricación un acero al carbono AISI 1018 CD, ya que se trata de un material indicado para aplicaciones de ejes y está disponible en el mercado local.

La Figura 4.7 esquematiza las fuerzas que actúan sobre el eje durante el funcionamiento del dilusor.

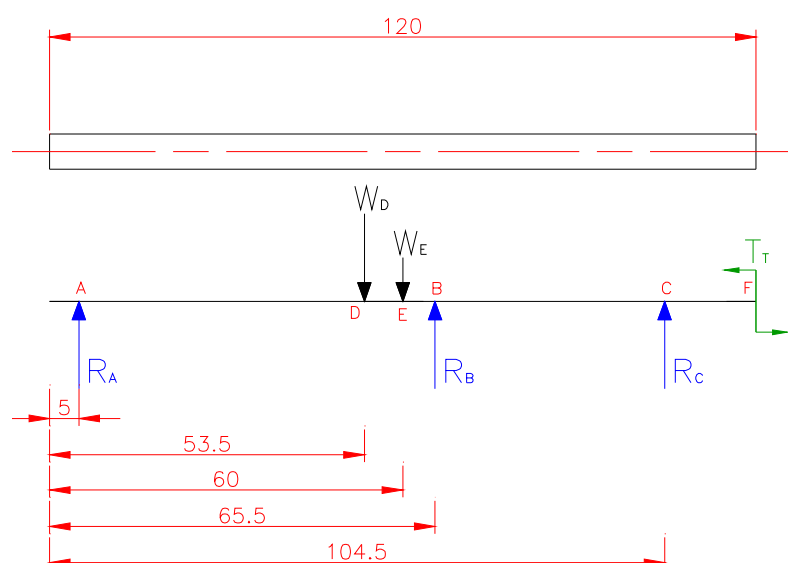


Figura 4.7. Diagrama de cuerpo libre del eje motriz (Dimensiones en mm).

donde:

W_D : Peso del Disco (N)

W_E : Peso del Eje (N)

T_T : Torque total transmitido por el motor de pasos (N*m)

Se calculan los pesos de los elementos con las ecuaciones 4.38 y 4.39.

$$W_D = M_D * g \quad (\text{Ec. 4.38})$$

$$W_E = M_E * g \quad (\text{Ec. 4.39})$$

donde:

g : Constante de gravedad (m/s^2)

$$g = 9.8m/s^2$$

$$W_D = 0.78N$$

$$W_E = 0.26N$$

El T_T se calculó en la sección 4.2.1.1 con la Ec. 4.1, entonces:

$$T_T = 4.07 * 10^{-2} N * m$$

Se deben determinar los valores de las fuerzas de reacción en cada punto de apoyo del elemento R_A , R_B , R_C .

4.2.2.1.1. Diseño estático

En el diseño estático se considera que las cargas que actúan sobre un elemento no varían con el tiempo y se establece un estado de equilibrio, lo que significa que para el diagrama de cuerpo libre del elemento la sumatoria de fuerzas es igual a cero al igual que la sumatoria de momentos en un determinado eje.

Aplicando lo considerado, se calculan por diseño estático las reacciones, esfuerzos cortantes, momento flector, momento torsor y deformación que actúan sobre el eje, para lo cual en este estudio se emplea el programa de cálculo SAP 2000.

Para realizar los cálculos en el programa se tiene que definir el diámetro y material del eje, esta información junto a los valores de las cargas que afectan al elemento son los datos de entrada para el cálculo en el SAP 2000.

Los datos de propiedades del material ingresados en el programa de cálculo se observan en la Figura 4.8, después de definir el material se especifica la sección del eje a evaluarse como se muestra en la Fig. 4.9.

En la Fig. 4.10 se muestra como datos de entrada del programa las fuerzas y torque que actúan sobre el eje, no se observa la representación del peso del eje ya que esta fuerza es asociada al elemento de análisis, ésta se define e incluye en los pasos de las Fig. 4.8 y 4.9.

Los datos ingresados y calculados para fuerzas y distancias están en N y mm respectivamente.

Los valores de las fuerzas de reacción, en los puntos A, B, C del eje, resultantes del análisis estático en SAP 2000 se presentan en la Fig. 4.11 y se resumen a continuación:

$$R_A = 0.10 N$$

$$R_B = 0.90 N$$

$$R_C = 0.03 N$$

Las Fig. 4.12 y 4.13 son los diagramas de resumen de esfuerzos cortantes y momentos que afectan al eje bajo condiciones estáticas, es decir, cuando las fuerzas actuantes no varían en el tiempo.

Material Property Data

General Data

Material Name and Display Color: A992Fy50 ■

Material Type: Steel

Material Notes:

Weight and Mass

Weight per Unit Volume: 7.697E-08

Mass per Unit Volume: 7.849E-12

Units: KN, mm, C

Isotropic Property Data

Modulus of Elasticity, E: 199.948

Poisson's Ratio, U: 0.3

Coefficient of Thermal Expansion, A: 1.170E-05

Shear Modulus, G: 76.9031

Other Properties for Steel Materials

Minimum Yield Stress, Fy: 0.3447

Minimum Tensile Stress, Fu: 0.4482

Effective Yield Stress, Fye: 0.3792

Effective Tensile Stress, Fue: 0.493

Switch To Advanced Property Display

Figura 4.8. Propiedades del material del eje como datos de entrada en el SAP 2000.

Pipe Section

Section Name: BARRA5mm

Section Notes:

Properties:

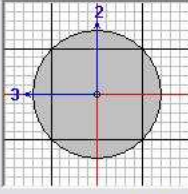
Property Modifiers:

Material: A992Fy50

Dimensions

Outside diameter (t3): 5

Wall thickness (tw): 2.4



Display Color: ■

Figura 4.9. Sección del eje como dato de entrada en el SAP 2000.

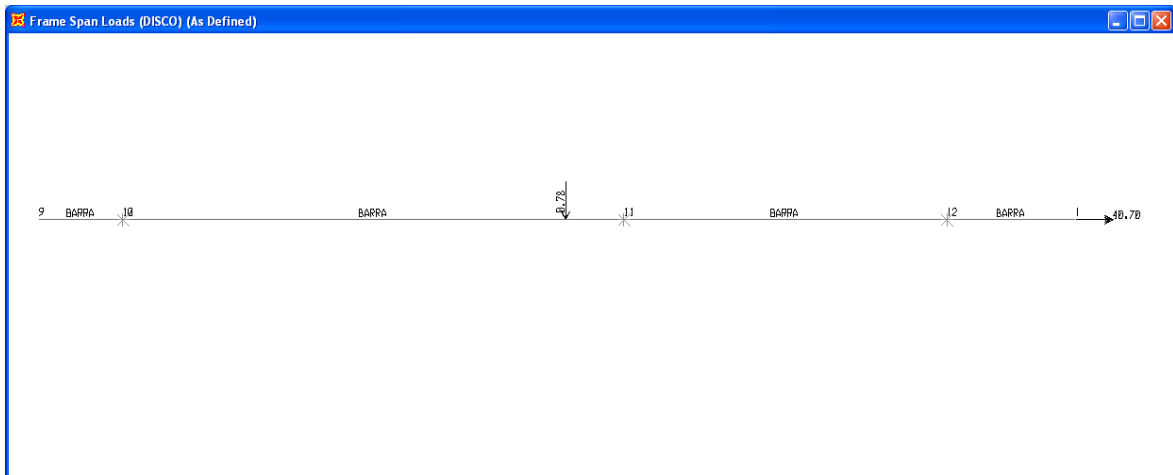


Figura 4.10. Fuerzas y torque que actúan sobre el eje como datos de entrada en el SAP 2000.

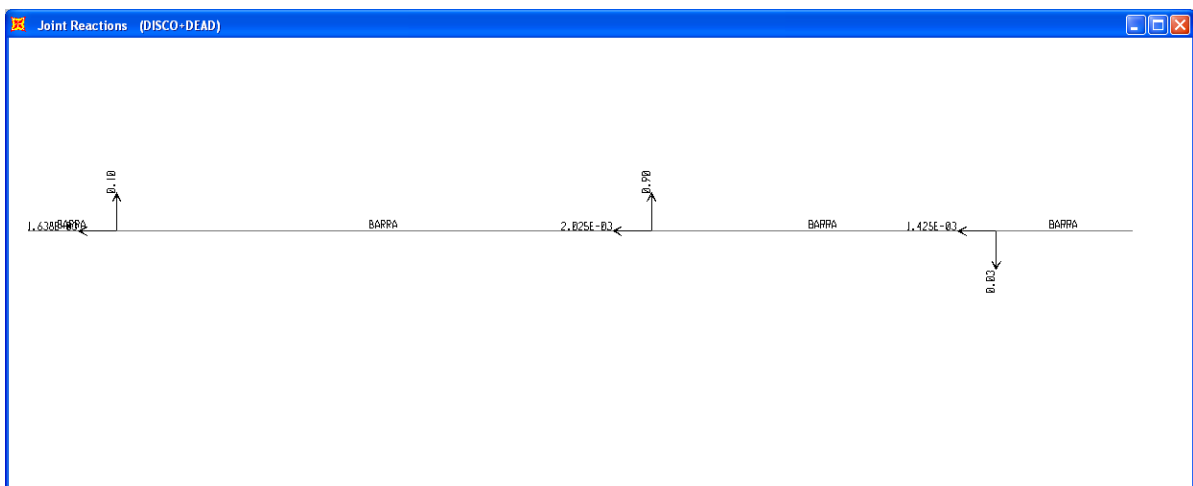


Figura 4.11. Fuerzas R_A , R_B , R_C resultados gráficos de análisis estático en SAP 2000.

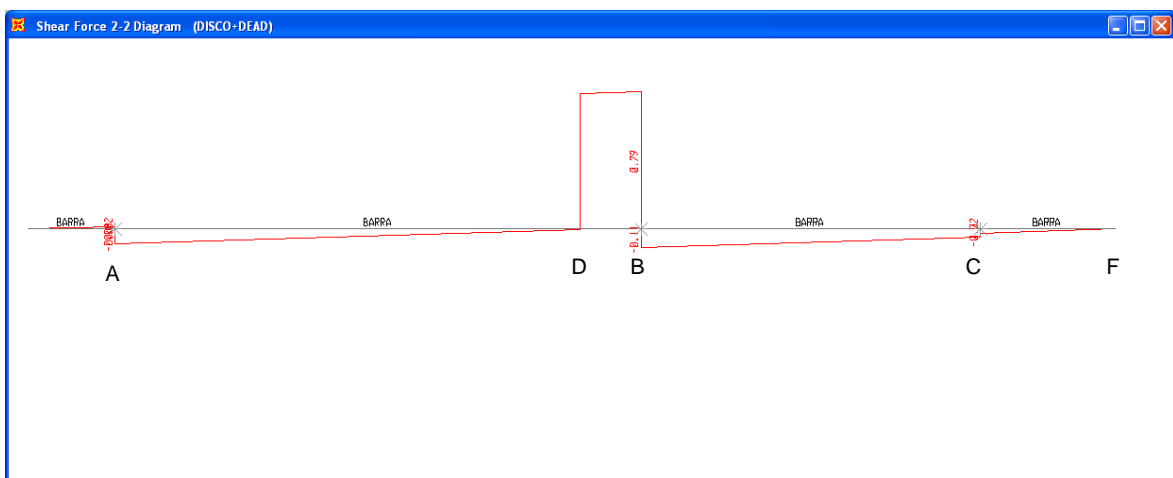


Figura 4.12. Diagrama de esfuerzos cortantes resultados de análisis estático en SAP 2000.

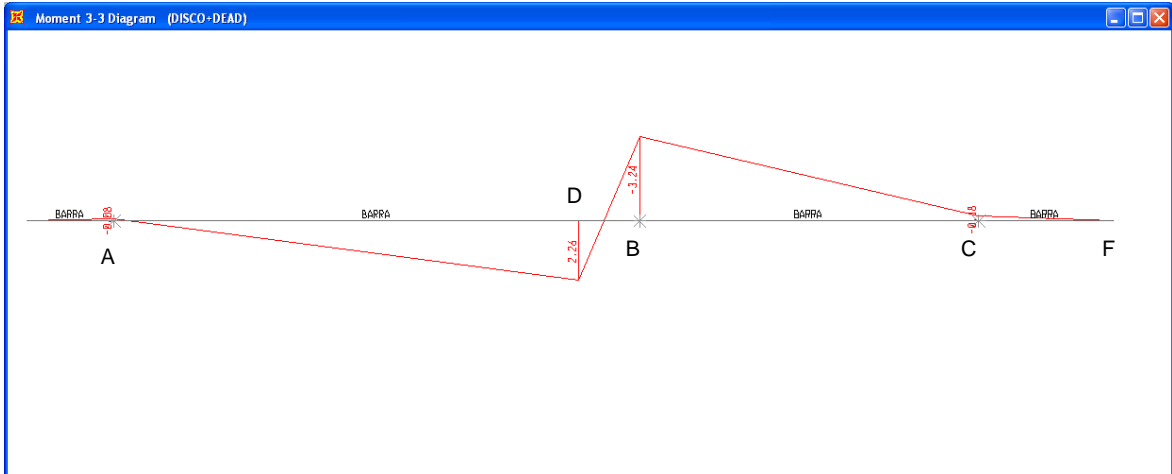


Figura 4.13. Diagrama de momentos flectores resultados de análisis estático en SAP 2000.

Los diagramas de las figuras 4.12 y 4.13 permiten determinar la sección crítica de diseño del eje y comprobar si el diámetro seleccionado cumple los requerimientos, en primera instancia del diseño estático, y posteriormente se analiza la misma sección del eje pero afectada por fuerzas que varían en el tiempo (diseño dinámico). De análisis de los diagramas tenemos lo siguiente:

V_{\max} : Esfuerzo cortante máximo (N)

V_{\min} : Esfuerzo cortante mínimo (N)

M_{\max} : Momento flector máximo (N*mm)

M_{\min} : Momento flector mínimo (N*mm)

$$V_{\max} = 0.79 N , \text{ en el punto de apoyo D}$$

$$V_{\min} = -0.11 N , \text{ en el punto de apoyo B}$$

$$M_{\max} = 2.26 N * mm , \text{ en el punto de apoyo D}$$

$$M_{\min} = -3.24 N * mm , \text{ en el punto de apoyo B}$$

Entonces, D es la sección crítica porque está sometida a esfuerzos combinados. Y se realiza el análisis para ésta sección.

Los esfuerzos en la sección D están distribuidos como se representa en la Figura 4.14.

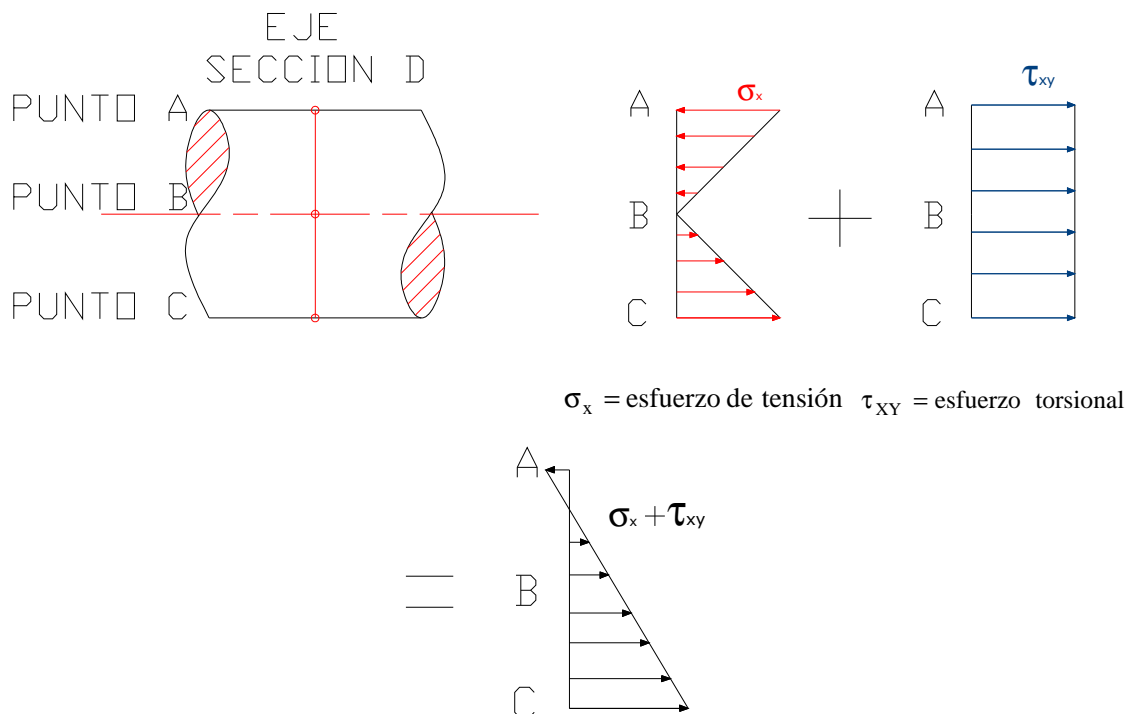


Figura 4.14. Diagrama esfuerzos combinados resultantes

Entonces el punto crítico es C en la Sección D, ya que los esfuerzos combinados de tensión y torsión son mayores que en los puntos A y B, como es esquematiza en la Figura 4.14.

$$\tau_{xy} = \frac{16T_T}{\pi d^3} \quad (\text{Ec. 4.40})$$

$$\sigma_x = \frac{32M_{\max}}{\pi d^3} \quad (\text{Ec. 4.41})$$

$$\sigma' = \sqrt{(\sigma_x)^2 + 3(\tau_{xy})^2} \quad (\text{Ec. 4.42})$$

$$\eta_s = \frac{S_y}{\sigma'} \quad \text{y} \quad \eta_s \geq 1.5 \quad (\text{Ec. 4.43})$$

donde:

τ_{xy} : Esfuerzo de Torsional máximo (Pa)

σ_x : Esfuerzo de Tensión máximo (Pa)

σ' : Esfuerzo equivalente (Pa)

η_s : Factor de Diseño Estático

S_y : Resistencia del material a la cedencia (MPa)

Para acero AISI 10-18 CD

$$S_y = 370 \text{ MPa}$$

(Tabla E-20 Diseño en Ingeniería Mecánica; Shigley; 6ªEd.)

$$\tau_{xy} = 1.66 * 10^6 \text{ Pa}$$

$$\sigma_x = 2.64 * 10^5 \text{ Pa}$$

$$\sigma' = 2.89 * 10^6 \text{ Pa}$$

$$\eta_s = 128$$

Por lo tanto el diseño cumple con los requerimientos para el funcionamiento con cargas estáticas.

4.2.2.1.2. Diseño dinámico

En el diseño dinámico es necesario considerar las variaciones de los esfuerzos en el tiempo. La figura 4.15 representa la variación en el tiempo de los esfuerzos de tensión, flexión y torsión que actúan sobre el eje.

El esfuerzo de tensión describe una curva sinusoidal con un esfuerzo de tensión amplitud σ_{xa} , mientras que el esfuerzo de torsión describe una curva constante, es decir, tiene un esfuerzo de tensión amplitud τ_{xya} igual a cero con respecto al tiempo t , esto debido a que durante el funcionamiento del dilusor las cargas que generan torsión (transmisión de movimiento rotatorio del motor al disco) se mantienen constantes.

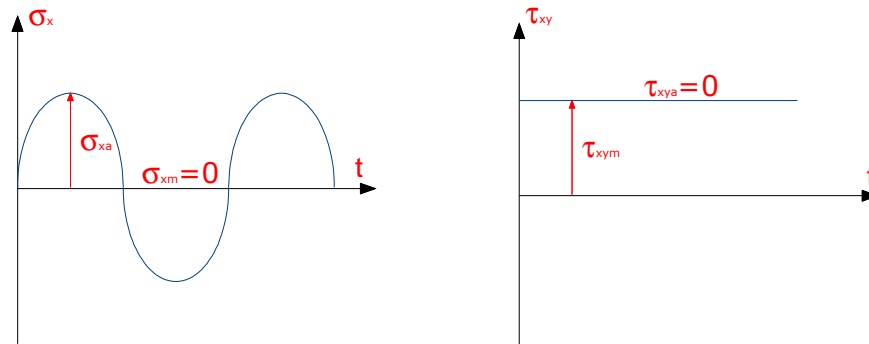


Figura 4.15. Diagrama de esfuerzos fluctuantes del eje motriz

Se calculan los esfuerzos dinámicos y se comparan con el límite a la fatiga del material seleccionado para determinar si cumple con el valor mínimo de factor de seguridad de diseño dinámico ($\eta_f \geq 2.5$).

Para acero AISI 10-18 CD

$$S_{ut} = 440 \text{ MPa}$$

(Tabla E-20 Diseño en Ingeniería Mecánica; Shigley; 6ªEd.)

CÁLCULO DE ESFUERZOS FLUCTUANTES:

$$S_e = S_e' \cdot k_a \cdot k_b \cdot k_c \cdot k_d \cdot k_e \cdot k_f \quad (\text{Ec. 4.44})$$

Para los aceros:

$$S_e' = 0.5 \cdot S_{ut} \quad \text{Si } S_{ut} \leq 200 \text{ kpsi} \quad (\text{Ec. 4.45})$$

donde:

S_e : Límite de resistencia a la fatiga

S_e' : Límite medio de resistencia a la fatiga

$$S_e' = 220 \cdot 10^6 \text{ Pa}$$

- **k_a : factor de acabado superficial**

(Tabla 7-5 Diseño en Ingeniería Mecánica; Shigley; 6ªEd.)

$$k_a = a \overline{S_{ut}}^{-b} * LN(1, C) \quad (\text{Ec. 4.46})$$

$$a = 4.45 * 10^6 \text{ Pa}$$

$$b = -0.265$$

$$C = 0.058$$

$$k_a = 0.887 * LN(1, 0.058) \Rightarrow k_a = 0.887$$

- **k_b : factor de tamaño**

(Ec. 7-10 Diseño en Ingeniería Mecánica; Shigley; 6ªEd.)

$$k_b = 1.24 * d^{-0.107} \quad \text{Si } 2.79 < d < 51 \text{ mm} \quad (\text{Ec. 4.47})$$

$$k_b = 1.04$$

- **k_c : factor de carga**

(Tabla 7-9 Diseño en Ingeniería Mecánica; Shigley; 6ªEd.)

$$k_c = 0.548 \quad \text{Factor de carga promedio de Marín}$$

$$\text{para } S_{ut} = 64 \text{ Kpsi}$$

- **k_d : factor de temperatura**

(Tabla 7-11 Diseño en Ingeniería Mecánica; Shigley; 6ªEd.)

$$T = 20^\circ \text{C} \Rightarrow k_d = 1$$

- **k_e : factor de concentración de tensiones**

$$k_e = 1$$

Ya que no se consideran otros factores que inciden en la resistencia del material tales como corrosión, recubrimientos, etc.

○ **k_f : factor de concentración de esfuerzos**

(Ec. 7-27 Diseño en Ingeniería Mecánica; Shigley; 6ªEd.)

$$k_f = \frac{k_{ts} * LN(1, C_{k_f})}{1 + \frac{2}{\sqrt{r}} * \frac{k_{ts} - 1}{k_{ts}} * \sqrt{a}} \quad (\text{Ec. 4.48})$$

$$D/d = 1.2$$

$$r/d = 0.02$$

donde:

k_{ts} : Factor de concentración de esfuerzo para eje redondo con entalle en el hombro en torsión

D: Diámetro del eje sección antes del hombro (m)

d: Diámetro del eje sección después del hombro (m)

r: Radio de acuerdo (m)

$$r = 0.1 \text{ mm}$$

$$k_{ts} = 0.78 + 0.2 \left(\frac{D}{d} \right)^{-10} + \left(\frac{r}{d} \right)^{-0.46} \sqrt{\frac{0.002 - 0.125(D/d)^2 + 0.123(D/d)^4}{1 - 2.75(D/d)^2 + 2.55(D/d)^4}} \quad (\text{Ec. 4.49})$$

$$k_{ts} = 1.91$$

(Fig. E.15-8 Diseño en Ingeniería Mecánica; Shigley; 6ªEd.)

$$\sqrt{a} = 0.316$$

(Tabla 7-12 Diseño en Ingeniería Mecánica; Shigley; 6ªEd.)

$$k_f = 0.978 * LN(1, C_{k_f}) \Rightarrow k_f = 0.978$$

Entonces:

$$S_e = 108.77 * 10^6 \text{ Pa}$$

Esfuerzo Flexionante:

$$\sigma = k_t * \sigma_o \quad (\text{Ec. 4.50})$$

$$\sigma_o = \frac{M * c}{I} \quad (\text{Ec. 4.51})$$

$$c = d / 2 \quad (\text{Ec. 4.52})$$

$$I = \frac{\pi * d^4}{64} \quad (\text{Ec. 4.53})$$

donde:

σ : Esfuerzo flexionante (Pa)

σ_o : Esfuerzo flexionante nominal (Pa)

K_t : Factor de concentración de esfuerzo para eje redondo con entalle en el hombro en flexión

I : segundo momento del área (m^4)

M : Momento flexionante ($N*m$)

$$M = 4.07 * 10^{-2} \text{ N} * \text{m}$$

$$k_t = 0.632 + 0.377 \left(\frac{D}{d} \right)^{-4.4} + \left(\frac{r}{d} \right)^{-0.5} \sqrt{-0.14 \frac{0.002 - 0.363(D/d)^2 + 0.503(D/d)^4}{1 - 2.39(D/d)^2 + 3.368(D/d)^4}} \quad (\text{Ec. 4.54})$$

$$k_t = 2.85$$

(Fig. E.15-9 Diseño en Ingeniería Mecánica; Shigley; 6ªEd.)

$$c = 0.0025 \text{ m}$$

$$I = 3.07 * 10^{-11} \text{ m}^4$$

$$\sigma_o = 3.31 * 10^6 \text{ Pa}$$

$$\sigma = 9.43 * 10^6 \text{ Pa}$$

Esfuerzo Torsional:

$$\tau = k_{ts} * \tau_o \quad (\text{Ec. 4.55})$$

$$\tau_o = \frac{T * c}{J} \quad (\text{Ec. 4.56})$$

$$J = \frac{\pi * d^4}{32} \quad (\text{Ec. 4.57})$$

donde:

τ : Esfuerzo torsional (Pa)

τ_o : Esfuerzo torsional nominal (Pa)

K_{ts} : Factor de concentración de esfuerzo para eje redondo con entalle en el hombro en torsión

J: segundo momento polar del área (m^4)

T: Momento torsional (N*m)

$$T = 4.07 * 10^{-2} \text{ N * m}$$

$$k_{ts} = 1.91$$

(Fig. E.15-9 Diseño en Ingeniería Mecánica; Shigley; 6ªEd.)

$$J = 6.14 * 10^{-11} m^4$$

$$\tau_o = 1.66 * 10^6 Pa$$

$$\tau = 3.17 * 10^6 Pa$$

$$\sigma'_a = \sqrt{(\sigma)^2 + 3(\tau)^2} \quad (\text{Ec. 4.58})$$

$$\eta_f = \frac{S_a}{\sigma'_a} \quad \text{y} \quad \eta_f \geq 2.5 \quad (\text{Ec. 4.59})$$

$$S_a = S_e \quad (\text{Ec. 4.60})$$

donde:

σ'_a : Esfuerzo equivalente (Pa)

η_f : Factor de Diseño Dinámico

$$\sigma'_a = 20.87 * 10^6 Pa$$

$$\eta_f = 5.21$$

Entonces se cumple que $\eta_f \geq 2.5$ para que el sistema no falle en condiciones dinámicas de funcionamiento

4.2.2.2. Selección de Rodamientos

Para la selección de rodamientos generalmente se consideran diferentes factores tales como: carga de fatiga, fricción, calor, resistencia a la corrosión, problemas cinemáticos, propiedades de los materiales, lubricación, tolerancias de maquinado, ensamble, tamaño, uso y costo; es decir, estos elementos se deben seleccionar para recibir una carga con determinadas características y tener una vida útil satisfactoria cuando operen bajo ciertas condiciones.

En este diseño las cargas a las que someten los elementos están muy por debajo de las cargas máximas para las que están diseñados, por lo que la selección básicamente se la realiza considerando: el tipo de carga (radial y/o axial), tamaño, es decir, en función del limitado espacio que dentro del sistema pueden ocupar, y de la disponibilidad en el mercado local.

Otro de los factores que se debe analizar obligatoriamente es la lubricación, ésta protege al rodamiento de la corrosión, desgaste, y evita el contacto metálico (fricción) entre los elementos rodantes, los caminos de rodadura y las jaulas.

El lubricante puede ser grasa o aceite, en casos especiales compuestos sólidos y su elección depende principalmente del tipo de rodamiento, las velocidades y campo de temperatura a las que va a prestar servicio. Los rodamientos de bolas generalmente se lubrican con grasas para condiciones normales de carga, velocidad y temperatura. Se usa en general lubricación de aceite cuando las elevadas condiciones de velocidad o temperatura no permiten el uso de grasa. El uso de aceite puede resultar en un sistema complejo y costo de lubricación si no es posible hacerlo manualmente. Seleccionar una adecuada lubricación tiene una influencia importante en el tiempo de vida de los rodamientos.

Se define la grasa como lubricante adecuado ya que cumple con los requerimientos porque los rodamientos que se seleccionan a continuación tienen una velocidad de servicio baja (60rpm) y la temperatura que alcanzarán los componentes del rodamiento menor que 60°C (temperatura límite para grasas de base cálcica), además no es aconsejable el uso de aceite ya que en el caso de usarlo como lubricante se requiere un sistema de recirculación lo que implica más costos y requerimiento energético para el sistema dilusor.

Se debe definir en los casos que se requieran rodamientos protegidos con obturaciones por uno o ambos lados. La obturación evita el ingreso de humedad y otros contaminantes y la pérdida de lubricante. Su selección se realiza en base al espacio disponible, tipo de lubricante, disponibilidad local. Los rodamientos que se suministran obturados por las dos caras tienen una cantidad apropiada de grasa y en la mayoría de los casos no se requiere relubricarlos, y son indicados para los casos en que por falta de espacio no se puede reinyectar lubricante periódicamente.

Como complemento a esta selección se realizan los cálculos correspondientes de la carga que actúa y la comparación con la capacidad de carga del rodamiento, para garantizar que no exceda su límite máximo.

FAG es la marca de rodamientos de mayor disponibilidad y variedad en el país, por lo que se utiliza un catálogo de ésta para la selección.

4.2.2.2.1. Rodamientos en apoyos B y C del eje

Las fuerzas en los apoyos son de tipo radial.

○ **Rodamiento rígido de bolas**

Se requieren dos rodamientos para apoyo del eje de 5mm. de diámetro, se selecciona los de serie 625 que cumplen estas condiciones.

Para rodamientos rígidos de bolas pequeños la vida útil de la grasa suele ser mayor que la del rodamiento y normalmente no hace falta relubricar por tal razón se selecciona rodamiento con placas de obturación por ambos lados o “lubricados de por vida”.

De esta serie se encuentran disponibles en el mercado local los de Serie 625 2RS que tienen placa de obturación de caucho en ambas caras. El cálculo de la capacidad de carga dinámica necesaria del rodamiento se lo realiza para el apoyo B ya que es el que soporta mayor carga.

$$f_l = \frac{C}{P} * f_n \quad (\text{Ec. 4.61})$$

$$P = F_r \quad (\text{Ec. 4.62})$$

donde:

C: Capacidad de carga dinámica (N)

P: Carga dinámica equivalente (N)

F_r : Fuerza radial en el punto (N)

f_l : factor de esfuerzos dinámicos

f_n : Factor de velocidad de giro

$$F_r = Rc = 0.90 N$$

$$f_n = 0.822$$

$$f_l = 3$$

Los requerimientos de los rodamientos son:

n: Velocidad de giro del eje (rpm)

d: Diámetro interno del rodamiento (m)

$$n = 60 \text{ rpm}$$

$$d = 0.005 m$$

Despejando de la ecuación 4.61:

$$C=3.28 N$$

Para la serie de rodamientos FAG 625 $C=1460 N$, por lo tanto, el rodamiento seleccionado cumple con todos los requerimientos.

4.2.2.2.2. Rodamiento para el sistema de giro resorte - disco rotatorio

La fuerza actuante es de tipo axial.

o Rodamiento axial de bolas

Se requiere un rodamiento de diámetro externo entre 30 y 40 mm para que se aloje en el Disco Rotatorio. Se selecciona los de serie 511 que cumplen esta condición. De esta serie se encuentran disponibles en el mercado local los de Serie 51104. El cálculo de la capacidad de carga dinámica necesaria del rodamiento se lo realiza considerando la máxima fuerza que el resorte puede generar, es decir, comprimido hasta su longitud sólida.

$$P = F_a \quad (\text{Ec. 4.63})$$

donde:

F_a : Fuerza axial en el punto (N)

$$F_a = 30 N$$

$$f_n = 0.822$$

$$f_l = 3$$

Los requerimientos de los rodamientos son:

D : Diámetro externo del Rodamiento (m)

d : Diámetro interno del rodamiento (m)

n : Velocidad de giro del eje (rpm)

$$D = 0.035 \text{ m}$$

$$d \geq 0.020 \text{ m}$$

$$n = 60 \text{ rpm}$$

De la Ec. 4.61:

$$C = 109.5 \text{ N}$$

Para la serie de rodamientos FAG 51104 $C = 11600 \text{ N}$, por lo tanto, el rodamiento seleccionado cumple con los requerimientos.

4.2.2.3. Selección de pernos

4.2.2.3.1. Pernos de fijación del motor

Los dos pernos de fijación del motor deben seleccionarse para soportar los esfuerzos de tensión que genera en ellos el torque que entrega el motor. La fuerza está dada por la Ec. 4.64:

$$T = \frac{F * D}{2} \quad (\text{Ec. 4.64})$$

$$\therefore F = \frac{2T}{D} = P_T$$

$$P = \frac{P_T}{N} \quad (\text{Ec. 4.65})$$

donde:

T: Torque entregado por el motor (N*m)

D: Distancia entre los dos pernos (m)

P_T : Carga total que soportan los pernos (N)

P: Carga que soporta un perno (N)

N: Número de pernos de la junta

De la Ec. 4.65:

$$P = 1.02 N$$

Junta no permanente perno-tuerca

Perno Hexagonal M4x16 Grado 9.8

$$A_t = 8.78 \text{ mm}^2 \quad (\text{Tabla 8-1 Diseño en Ingeniería Mecánica; Shigley; 6ªEd.})$$

$$S_p = 650 \text{ MPa} \quad (\text{Tabla 8-11 Diseño en Ingeniería Mecánica; Shigley; 6ªEd.})$$

$$S_{ut} = 900 \text{ MPa} \quad (\text{Tabla 8-11 Diseño en Ingeniería Mecánica; Shigley; 6ªEd.})$$

$$S_e = 140 \text{ MPa} \quad (\text{Tabla 8-17 Diseño en Ingeniería Mecánica; Shigley; 6ªEd.})$$

donde:

A_t = Área de esfuerzo de tensión (mm^2)

S_p = Resistencia mínima de prueba (MPa)

CÁLCULO DE RIGIDEZ DE LOS ELEMENTOS DE LA JUNTA

De la Tabla 8-7 Diseño en Ingeniería Mecánica; Shigley; 6ªEd. (ver Anexo E) se calculan los siguientes parámetros de diseño:

$$A_d = 1.26 * 10^{-5} \text{ m}^2$$

$$L = 0.016 \text{ m}$$

$$L_T = 0.014 \text{ m}$$

$$L_G = 0.009 \text{ m}$$

$$l_d = 0.002 \text{ m}$$

$$l_T = 0.007 \text{ m}$$

$$k_b = 216.53 * 10^6 \text{ N / m}$$

$$C = \frac{k_b}{k_b + k_m} \quad (\text{Ec. 4.66})$$

$$k_m = \frac{0.577 \cdot \pi \cdot E \cdot d}{2 \cdot l_n \left(\frac{0.577 \cdot l + 0.5 \cdot d}{0.577 \cdot l + 2.5 \cdot d} \right)} \quad (\text{Ec. 4.67})$$

donde:

C = Fracción de la carga externa P soportada por el perno

K_b = Rigidez del perno (N/m)

K_m = Rigidez de los elementos (N/m)

d = Diámetro de rosca del perno (m)

$$k_m = 870.89 \cdot 10^6 \text{ N/m}$$

$$C = 0.2$$

CÁLCULO DE CARGAS

Para el cálculo de cargas en los pernos, se emplean las siguientes ecuaciones:

$$F_i = 0.75 F_p \quad (\text{Ec. 4.68})$$

$$F_p = A_t \cdot S_p \quad (\text{Ec. 4.69})$$

$$T = K \cdot d \cdot F_i \quad (\text{Ec. 4.70})$$

donde:

F_i : Precarga (N)

F_p : Carga de prueba (N)

T: Par de torsión de apriete de precarga del perno (N*m)

K: Factor del par de torsión del perno

$$K = 0.2$$

(Tabla 8-15 Diseño en Ingeniería Mecánica; Shigley; 6ªEd.)

$$F_p = 5707 \text{ N}$$

$$F_i = 4280 \text{ N}$$

$$T = 3.42 \text{ N/m}$$

$$\xi_1 = \frac{F_i}{S_p * A_t} \quad (\text{Ec. 4.71})$$

$$\xi_2 = \xi_1 + \frac{C * P}{S_p * A_t} \quad (\text{Ec. 4.72})$$

donde:

ξ_1 = Fracción del esfuerzo de prueba que el perno siente cuando se aprieta

ξ_2 = Fracción del esfuerzo de prueba que el perno siente por la carga externa

$$\xi_1 = 0.75$$

$$\xi_2 = 0.7501$$

DISEÑO DINÁMICO

Para el diseño dinámico se utilizan las ecuaciones:

$$\sigma_a = \frac{CP}{2A_t} \quad (\text{Ec. 4.73})$$

$$\sigma_m = \frac{CP}{2A_t} + \sigma_i \quad (\text{Ec. 4.74})$$

$$\sigma_i = \frac{F_i}{A_t} \quad (\text{Ec. 4.75})$$

donde:

σ_a : Esfuerzo alternante (Pa)

σ_m : Esfuerzo constante (Pa)

σ_i : Esfuerzo por la precarga (Pa)

$$\sigma_a = 11.62 * 10^3 \text{ Pa}$$

$$\sigma_m = 487.48 * 10^6 \text{ Pa}$$

$$\sigma_i = 487.47 * 10^6 Pa$$

Lugar geométrico de la Falla de Goodman:

$$\frac{S_a}{S_e} + \frac{S_m}{S_{ut}} = 1 \quad (\text{Ec. 4.76})$$

Energía de la Distorsión de Goodman:

$$S_m = \frac{S_{ut}(S_e + \sigma_i)}{S_e + S_{ut}} \quad (\text{Ec. 4.77})$$

$$S_a = S_m + \sigma_i \quad (\text{Ec. 4.78})$$

donde:

S_m : Componente constante de la resistencia (Pa)

S_a : Componente amplitud de la resistencia (Pa)

$$S_m = 543 * 10^6 Pa$$

$$S_a = 55.53 * 10^6 Pa$$

$$n_f = \frac{S_a}{\sigma_a} \quad \text{y} \quad n_f \geq 1.9 \quad (\text{Ec. 4.79})$$

$$n_{fo} = \frac{S_{ut} * A_t}{\frac{P}{2} \left(1 + \frac{S_{ut}}{S_e} \right)} \quad (\text{Ec. 4.80})$$

donde:

n_f : factor de seguridad dinámico para perno con precarga

n_{fo} : factor de seguridad dinámico para perno sin precarga (unión floja)

$$n_f = 4800$$

$$n_{fo} = 2086$$

Los pernos seleccionados si cumplen los requerimientos ya que el factor de seguridad dinámico cumple con la condición de $n_f \geq 1.9$.

Los pernos de sujeción entre los ángulos de unión y cuerpo dilusor están justificados con el cálculo anterior, ya que están sometidos a los mismos esfuerzos y se seleccionan del mismo diámetro y grado que los anteriores.

4.2.2.3.2. Pernos de unión entre la tapa móvil del resorte y la tapa fija

La fuerza generada por el resorte es la Carga total $P_T = 30N$ soportada por cuatro pernos.

Por lo tanto de la Ec. 4.65:

$$P = 7.5N$$

Junta no permanente perno-alojamiento roscado

Perno Avellanado 90° M5x20 Grado 9.8

$$A_t = 14.2mm^2 \quad \text{(Tabla 8-1 Diseño en Ingeniería Mecánica; Shigley; 6ªEd.)}$$

$$S_p = 650MPa \quad \text{(Tabla 8-11 Diseño en Ingeniería Mecánica; Shigley; 6ªEd.)}$$

$$S_{ut} = 900MPa \quad \text{(Tabla 8-11 Diseño en Ingeniería Mecánica; Shigley; 6ªEd.)}$$

$$S_e = 140MPa \quad \text{(Tabla 8-17 Diseño en Ingeniería Mecánica; Shigley; 6ªEd.)}$$

CÁLCULO DE RIGIDEZ DE LOS ELEMENTOS DE LA JUNTA

De la Tabla 8-7 Diseño en Ingeniería Mecánica; Shigley; 6ªEd. (ver Anexo E)

$$A_d = 1.96 * 10^{-5} m^2$$

$$L = 0.020m$$

$$L_T = 0.016m$$

$$h = 0.005m$$

$$l = 0.008m$$

$$l_d = 0.004 m$$

$$l_T = 0.004 m$$

$$k_b = 426.13 * 10^6 N / m$$

De las ecuaciones 4.66 y 4.67:

$$k_m = 967.63 * 10^6 N / m$$

$$C = 0.31$$

CÁLCULO DE CARGAS

De las ecuaciones 4.68 a 4.72:

$$K = 0.2$$

(Tabla 8-15 Diseño en Ingeniería Mecánica; Shigley; 6ªEd.)

$$F_p = 9230 N$$

$$F_i = 6922.5 N$$

$$T = 6.92 N / m$$

$$\xi_1 = 0.75$$

$$\xi_2 = 0.7503$$

DISEÑO DINÁMICO:

De las ecuaciones 4.73 a 4.80:

$$\sigma_a = 81.87 * 10^3 Pa$$

$$\sigma_m = 487.58 * 10^6 Pa$$

$$\sigma_i = 487.5 * 10^6 Pa$$

$$S_m = 543 * 10^6 Pa$$

$$S_a = 55.5 * 10^6 Pa$$

$$n_f = 678$$

$$n_{fo} = 459$$

Los pernos seleccionados si cumplen los requerimientos ya que el factor de seguridad dinámico cumple con la condición de $n_f \geq 1.9$.

4.2.2.3.3. Pernos de unión en el cuerpo dilusor

La Carga total P_T soportada por la unión es la correspondiente a la presión interna generada por el gas. El valor máximo que alcanza esta presión es:

$$p_{m\grave{a}x} = 140 \text{ mbar} = 14 * 10^3 Pa$$

$$P_T = A_d * p \quad (\text{Ec. 4.81})$$

$$A_d = \frac{\pi * d_d^2}{4} \quad (\text{Ec. 4.82})$$

donde:

A_d = Área transversal del ducto

d_d = Diámetro del ducto

$$P_T = 0.4 N$$

De la Ec. 4.65:

$$P = 0.1 N$$

Junta no permanente perno-alojamiento roscado

Perno Avellanado 90° M5x20 Grado 9.8

$$A_t = 14.2 \text{ mm}^2 \quad (\text{Tabla 8-1 Diseño en Ingeniería Mecánica; Shigley; 6ªEd.})$$

$$S_p = 650 \text{ MPa} \quad (\text{Tabla 8-11 Diseño en Ingeniería Mecánica; Shigley; 6ªEd.})$$

$$S_{ut} = 900 \text{ MPa} \quad (\text{Tabla 8-11 Diseño en Ingeniería Mecánica; Shigley; 6ªEd.})$$

$$S_e = 140 \text{ MPa} \quad (\text{Tabla 8-17 Diseño en Ingeniería Mecánica; Shigley; 6ªEd.})$$

CÁLCULO DE RIGIDEZ DE LOS ELEMENTOS DE LA JUNTA

De la Tabla 8-7 Diseño en Ingeniería Mecánica; Shigley; 6ªEd. (ver Anexo D)

$$A_d = 1.96 * 10^{-5} \text{ m}^2$$

$$L = 0.018 \text{ m}$$

$$L_T = 0.016 \text{ m}$$

$$h = 0.006 \text{ m}$$

$$l = 0.0083 \text{ m}$$

$$l_d = 0.002 \text{ m}$$

$$l_T = 0.0063 \text{ m}$$

$$k_b = 379.33 * 10^6 \text{ N / m}$$

De las Ec. 4.66 y 4.67:

$$k_m = 906.3 * 10^6 \text{ N / m}$$

$$C = 0.3$$

CÁLCULO DE CARGAS

De las ecuaciones 4.68 a 4.72:

$$K = 0.2$$

(Tabla 8-15 Diseño en Ingeniería Mecánica; Shigley; 6ªEd.)

$$F_p = 9230 \text{ N}$$

$$F_i = 6922.5 \text{ N}$$

$$T = 6.92 \text{ N/m}$$

$$\xi_1 = 0.75$$

$$\xi_2 = 0.75$$

DISEÑO DINÁMICO:

De las ecuaciones 4.73 a 4.80:

$$\sigma_a = 1.06 * 10^3 \text{ Pa}$$

$$\sigma_m = 487.501 * 10^6 \text{ Pa}$$

$$\sigma_i = 487.5 * 10^6 \text{ Pa}$$

$$S_m = 543 * 10^6 \text{ Pa}$$

$$S_a = 55.5 * 10^6 \text{ Pa}$$

$$n_f = 52358$$

$$n_{fo} = 34408$$

Los pernos seleccionados si cumplen los requerimientos ya que el factor de seguridad dinámico cumple con la condición de $n_f \geq 1.9$.

4.2.2.3.4. Pernos de unión entre la tapa y el cuerpo dilusor

La fuerza generada por el resorte es la carga total $P_T = 30 \text{ N}$ soportada por dos pernos, la misma que generan en los pernos esfuerzos cortantes.

De la Ec. 4.65:

$$P = 15 \text{ N}$$

Junta no permanente perno-alojamiento roscado

Perno Avellanado 90° M5x16 Grado 9.8

$$A_t = 14.2 \text{ mm}^2 \quad (\text{Tabla 8-1 Diseño en Ingeniería Mecánica; Shigley; 6ªEd.})$$

$$S_p = 650 \text{ MPa} \quad (\text{Tabla 8-11 Diseño en Ingeniería Mecánica; Shigley; 6ªEd.})$$

$$S_{ut} = 900 \text{ MPa} \quad (\text{Tabla 8-11 Diseño en Ingeniería Mecánica; Shigley; 6ªEd.})$$

$$S_e = 140 \text{ MPa} \quad (\text{Tabla 8-17 Diseño en Ingeniería Mecánica; Shigley; 6ªEd.})$$

$$\tau = \frac{F}{A_s} \quad (\text{Ec. 4.83})$$

$$A_s = \frac{\pi * d^2}{4} \quad (\text{Ec. 4.84})$$

donde:

τ = Esfuerzo cortante

A_s = Área de esfuerzo cortante

$$\tau = 7.65 * 10^5 \text{ Pa}$$

$$A_s = 1.96 * 10^{-5} \text{ m}^2$$

CÁLCULO DE CARGAS

Para un coeficiente de fricción acero-acero $f = 0.25$, la precarga es:

$$F'_i = \frac{P}{f} \quad (\text{Ec. 4.85})$$

$$F'_i = 60 \text{ N}$$

Para un factor de diseño $n_d = 2$

$$F_i = n_d * F'_i$$

$$F_i = 120 N$$

$$F_i = \zeta_1 * S_p * A_t \quad (\text{Ec. 4.86})$$

$$A_{tR} = \frac{F_i}{\zeta_1 * S_p} \quad (\text{Ec. 4.87})$$

donde:

A_{tR} = Área de esfuerzo de tensión requerida

$$A_{tR} = 2.46 * 10^{-7} m^2$$

Para el perno seleccionado $A_t = 14.2 * 10^{-6} m^2$

$$\therefore A_t > A_{tR}$$

Por lo tanto los pernos seleccionados si cumplen los requerimientos del sistema.

El par de torsión de apriete T para el montaje de los pernos es:

$$T = \zeta_1 * K * S_p * A_t * d \quad (\text{Ec. 4.88})$$

$$T = 6.92 N * m$$

Hasta esta sección se cumple el diseño del sistema mecánico de dilución para el desarrollo de los planos mecánicos constructivos, los mismos que se presentan en el Anexo E.

Para las partes del dilusor que están en contacto con los gases de escape (con excepción del disco rotatorio) se selecciona al acero inoxidable como material de construcción. Al igual que para la tubería, accesorios, acoples de conexión y válvulas que se requieran, ya que para manejo de estos gases se requiere un material con la característica de alta resistencia a la corrosión por la presencia de

óxidos debido al contenido de humedad en la muestra. Además, el acero inoxidable tiene en general mejores características mecánicas y químicas que otros materiales como acero al carbono, por tanto mejor respuesta a las diferentes cargas que afectan a los diferentes componentes del dilusor.

4.2.2.4. Selección de la bomba para muestreo de gases de escape

Un elemento complementario necesario para el funcionamiento del dilusor, además de dispositivo motriz ya seleccionado, es la bomba para tomar la muestra y mantener el flujo de gases de escape en la línea del dilusor.

Una bomba es un dispositivo utilizado para mover líquidos, gases o sustancias en estado semisólido, por medio de fuerzas mecánicas, fuerza física o fuerza de compresión, en el caso de los líquidos o gases produce en ellos un cambio de presión.⁷⁵

La bomba en el sistema dilusor es necesaria para mantener el flujo de gases de escape tanto en la sonda de toma de muestra como en los ductos del dilusor y así permitir el llenado de las cavidades de disco rotatorio con dicho fluido.

Existen variedad de bombas para manejar fluidos gaseosos, para la selección de este dispositivo es necesario considerar varios aspectos, tales como: que sea de fácil manipulación (que sea pequeña, compatible con el tamaño del dilusor), de simple operación y mantenimiento, además su requerimiento energético debe ser bajo, en función de esto se presentan algunas alternativas de lo que se denominan mini bombas para gases, aplicables a este sistema.

- **Bombas de diafragma**

Es una bomba de desplazamiento positivo, que utiliza una combinación la acción recíproca de un diafragma de teflón o caucho y válvulas que abren y cierran de

⁷⁵ www.es.wikipedia.org

acuerdo al movimiento del diafragma, para bombear fluido. Entre estas bombas se tiene:

Bombas rotativas a diafragma: La generación de presión llega a 1 bar y el volumen desplazado a 4 l/min. Empleadas para medidores de presión arterial profesionales o equipos sofisticados de la industria.

Bombas excéntricas a diafragma: se pueden utilizar tanto para presión como para vacío.



Figura 4.16. Bomba de diafragma⁷⁶

- **Bombas miniatura con paletas**

Esta bomba con rotor a paletas es la solución óptima para bombear volúmenes pequeños con gran exactitud y prácticamente libre de pulsaciones. Su escaso peso, dimensiones y consumo de energía bajo, la hacen especialmente apta para unidades portátiles.



Figura 4.17. Esquema bomba de paletas⁷⁷

⁷⁶ www.acomby.com

⁷⁷ www.es.wikipedia.org

- **Bombas a émbolo**

Las bombas de pistón no tienen ninguna membrana que se deforme. Por esta razón están especialmente indicadas para su utilización con presión alta y también como aspiradores.

- **Bomba Peristáltica**

Este es un tipo de bomba de desplazamiento positivo. El principio de funcionamiento de esta bomba es la presión de rollos que aplastando progresivamente un tubo de goma, empujan el producto hacia la salida. La alternación de compresión y aflojamiento del tubo genera una llamada continua del producto y, por consiguiente, un flujo constante. Como la manguera es el único componente de la bomba en contacto con el fluido bombeado, ello elimina todo riesgo de contaminación o incompatibilidad del fluido con los materiales de la bomba, además simplifica y abarata su mantenimiento.

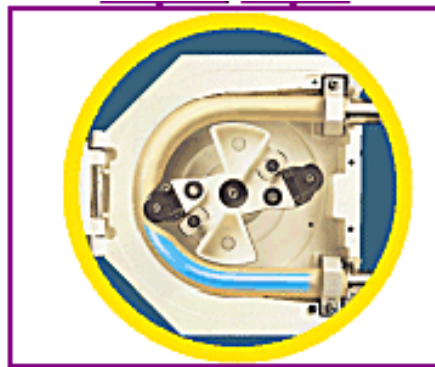


Figura 4.18. Bomba peristáltica rotatoria⁷⁸

De las alternativas presentadas, se considera que la bomba peristáltica es la solución más adecuada, ya que por su diseño el fluido nunca está en contacto con elementos de la bomba que puedan sufrir corrosión o desgaste y que contaminen la muestra, además del tamaño y simplicidad de ensamblaje, que facilitan su manipulación y operación.

⁷⁸ www.es.wikipedia.org

En el Anexo G se presenta un catálogo con mayor información de este tipo de tipo bombas y con las curvas de selección.

Para la selección de la bomba es necesario determinar el flujo, presión y temperatura a los cuales se debe suministrar el fluido, lo que se resume a continuación en la Tabla 4.1, además se debe determinar la caída de presión en la línea de muestreo de gases (pérdidas), para determinar la presión de trabajo del dispositivo.

Tabla 4.1. Flujo, temperatura y presión de la muestra de gases de escape.

MUESTRA DE GASES DE ESCAPE	
Flujo	1.5 l/min
Temperatura máxima	300°C
Presión manométrica	150 mbar, 2.18psi
Presión absoluta	853 mbar, 12.38psi
Presión atmosférica en Quito	703 mbar, 10.2psi

4.2.2.4.1. Cálculo de la caída de presión en la línea de muestreo de gases de escape

Los cambios de presión en un sistema de flujo se originan a partir de los cambios en la altura o en la velocidad del flujo (debido a cambios de área) y de la fricción. Para simplificar el análisis de la “pérdidas” se dividen en dos grupos: pérdidas mayores (debido a la fricción en porciones de área constante del sistema) y pérdidas menores (debidas al flujo a través de válvulas, uniones en Te y codos, y efectos de fricción en otras porciones de áreas no constante del sistema, y caída de presión en la entrada de la tubería).⁷⁹

El cálculo de la caída de presión en la línea se lo realiza con el uso del software InstruCalc Versión 5.1. El mismo que permite calcular en conjunto las pérdidas mayores y menores.

⁷⁹ FOX, R., McDONALD, A.; Introducción a la mecánica de fluidos; 4ª Edición; México 1995.

Para el cálculo con el software se hacen las estimaciones y consideraciones que a continuación se indican:

- Es importante indicar que el ducto interno del bloque dilusor, que transporta la muestra, se considera como un tramo de tubería horizontal ya que el cambio altura es despreciable ($>0.010\text{m}$).
- Se considera que todo el tramo de transporte de la muestra, desde el tubo de escape hasta la bomba (incluyendo el ducto del dilusor) es tubería de diámetro interno constante de 6mm ($\sim 0.24''$) que es el valor para tubing de acero inoxidable de diámetro externo de 8mm y espesor de pared de 1mm (ver referencia SS-T8M-S-1,0M-6ME Anexo F) .
- Se estima un tramo de conexión de 3 m (9.8ft) de longitud.

También se debe determinar el flujo volumétrico de la muestra de gases de escape a condiciones estándar de temperatura y presión (60°F, 14.7psi), para lo cual se emplea la siguiente fórmula de gases:

$$\frac{P_1 * V_1}{T_1} = \frac{P_2 * V_2}{T_2} \quad (\text{Ec. 4.89})$$

Donde cada lado de la igualdad tiene por factores la presión absoluta (P), el volumen (V) y la temperatura (T) bajo la condición 1 ó 2, los factores a cada lado de la igualdad se deben expresar en las mismas unidades. En este caso, se hace una modificación que no altera la igualdad, se expresa en flujo volumétrico (FV) en vez de volumen, así:

$$\frac{P_1 * FV_1}{T_1} = \frac{P_2 * FV_2}{T_2} \quad (\text{Ec. 4.90})$$

La condición 1 es la de trabajo del sistema dilusor, donde:

$$P_1 = 12.38 \text{ psi}$$

$$FV_1 = 1.5 \text{ l/min}$$

$$T_1 = 300^\circ\text{C} = 572^\circ\text{F}$$

La condición 2 es la estándar de los gases:

$$P_2 = 12.38 \text{ psi}$$

$$T_2 = 60^\circ\text{F}$$

Para determinar el valor del flujo volumétrico en condiciones estándar se despeja FV_2 de la ecuación 4.90:

$$FV_2 = \frac{P_1 * FV_1 * T_2}{T_1 * P_2} \quad (\text{Ec. 4.91})$$

$$FV_2 = 0.63 \text{ l/min}$$

$$FV_2 = 0.0222 \text{ cfm}$$

Una vez determinado este valor se puede emplear el software de cálculo. Primero se obtienen las propiedades fisicoquímicas del fluido (ver Tabla 4.2), y éstos son los datos entrada para el cálculo de las pérdidas de presión en la línea.

De la ecuación estequiométrica de combustión del diesel (Ec. 1.3) se transforma el número de moles a masa y esto a porcentaje. Se obtiene los siguientes porcentajes para los componentes de la mezcla de gases resultantes, estos valores se ingresan para cálculo de las propiedades de la mezcla de gases de escape:

$$\%(\text{H}_2\text{O}) = 8\% \text{ (H}_2\text{O como vapor de agua)}$$

$$\%(\text{CO}_2) = 20\%$$

$$\%(\text{N}_2) = 72\%$$

Es acertado emplear estos porcentajes de una combustión ideal, ya que aunque en los gases de escape existen otros componentes como los NO_x, CO, MP en su mayoría estos se derivan de los tres componentes listados en porcentaje.

Tabla 4.2. Propiedades físico químicas de los gases de escape

InstruCalc Ver 5.1	<u>Propiedades fisicoquímicas de gases de escape</u>				05/09/2007
Project .					
<u>Process Gas Data</u>					
Tag number					
<u>Base conditions</u>					
Base pressure : 14.696psia			Base temperature : 59degF		
Barometric pressure : 14.7psia					
<u>Fluid data</u>					
Name :					
<u>Process data</u>					
	<u>Case 1</u>	<u>Case 2</u>	<u>Case 3</u>	<u>Units</u>	
Temperature	396			degF	
Pressure	2.18			psig	
Molecular weight	31.516343				
Specific heat ratio (Cp/Cv)	1.342				
Normal boiling point	-320.4			degF	
Critical pressure	630.7			psia	
Critical temperature	297.7			degR	
Density @ FTP	.05794			lb/ft3	
Compressibility factor	1				
Viscosity	.02517			cp	
Vapor pressure	0			psia	
Known latent HV	122.6			btu/lb	
Temp @ known LHV	-320.4			degF	
Req'd latent HV	0			btu/lb	
Note					

Para el cálculo de pérdidas de presión, además de los datos de las propiedades físico químicas de los fluidos de la Tabla 4.2, se ingresan en el software los datos del material, diámetro interno y longitud de la tubería de conexión, número de accesorios y dispositivos como válvulas que se incluyan en la línea.

Se calculan dos configuraciones para su comparación:

- La primera considera que sólo se utiliza tubería entre el tramo de toma de muestra y la bomba.
- La segunda incluye la consideración de accesorios de conexión (6 codos de 90°) y una válvula de globo (necesaria para la regulación del flujo de la muestra).

A continuación se presentan los resultados del cálculo para los dos casos en las Tablas 4.3 y 4.4. Como se puede observar en los dos casos, las pérdidas de presión expresadas en psi están en el orden de las centésimas (0.062 psi), la diferencia entre la primera y la segunda consideración es de 0.0018, son mayores las pérdidas en el segundo caso ya que éste incluye las pérdidas menores por codos, válvula y entrada a la tubería.

En cualquiera de los dos casos la caída de presión está por debajo del 1% de la presión de ingreso de 150mbar, por lo que se consideran despreciables las pérdidas de presión en línea de toma de muestra de gases de escape, de esta manera la presión a lo largo de todo el tramo, aún con el uso de una válvula para regular el flujo, se establece en 150 mbar.

La presión de trabajo para la selección de la bomba peristáltica es, por lo tanto, 150 mbar, con la descarga de los gases residuales a la atmósfera como se presenta en la Tabla 4.1.

Tabla 4.3. Caída de presión en línea de gases de escape sin accesorios

InstruCalc Ver 5.1		<u>Caída de presión gases de escape</u>		11/09/2007	
		Línea sin accesorios			
		Project .			
<u>Line Loss - Gas flow</u>					
Tag number					
<u>Common Input Data</u>					
<u>Piping</u>					
Pipe sizes :	Length :	9.8 ft	I.D. :	.245 in	
Pipe elevations :	Start :	ft	End :	ft	
Pipe material :	Drawn tubing		Pipe condition :	New	
<u>Number of Valves</u>	<u>Gate</u>	<u>Globe</u>	<u>Check</u>		
<u>Number of fittings</u>	<u>90 deg ell</u>	<u>45 deg ell</u>	<u>Thru tee</u>	<u>Branch tee</u>	
Pipe ends	Uniform inlet. Uniform outlet				
<u>Fluid Data</u>					
Name :					
<u>Variable Input Data</u>					
	<u>Case 1</u>	<u>Case 2</u>	<u>Case 3</u>	<u>Units</u>	
Fluid flow	.0222			sft3/m	
Temperature	572			degF	
Source pressure	2.18			psig	
Molecular weight	31.5323				
Specific heat ratio (Cp/Cv)	1.328				
Viscosity	.02956			cp	
Critical temperature	298.1			degR	
Critical pressure	631.3			psia	
Equipment losses				psi	
<u>Output Data</u>					
Loss per 100 ft	.06122			psi	
End pressure	2.174			psig	
Gas velocity	1.956			ft/s	
Gas sonic velocity	1471			ft/s	
Note					

Tabla 4.4. Caída de presión en línea de gases de escape con accesorios y válvula

InstruCalc Ver 5.1		<u>Caída de presión gases de escape</u>		11/09/2007	
		Línea con accesorios y válvula de globo			
		Project .			
<u>Line Loss - Gas flow</u>					
Tag number					
<u>Common Input Data</u>					
<u>Piping</u>					
Pipe sizes :	Length :	9.8 ft	I.D. :	.245 in	
Pipe elevations :	Start :	ft	End :	ft	
Pipe material :	Drawn tubing	Pipe condition :	New		
<u>Number of Valves</u>	<u>Gate</u>	<u>Globe</u>	<u>Check</u>		
		1			
<u>Number of fittings</u>	<u>90 deg ell</u>	<u>45 deg ell</u>	<u>Thru tee</u>	<u>Branch tee</u>	
	6				
Pipe ends	Sudden large inlet contraction. Sudden large outlet expansion				
<u>Fluid Data</u>					
Name :					
<u>Variable Input Data</u>					
	<u>Case 1</u>	<u>Case 2</u>	<u>Case 3</u>	<u>Units</u>	
Fluid flow	.0222			sft3/m	
Temperature	572			degF	
Source pressure	2.18			psig	
Molecular weight	31.5323				
Specific heat ratio (Cp/Cv)	1.328				
Viscosity	.02956			cp	
Critical temperature	298.1			degR	
Critical pressure	631.3			psia	
Equipment losses				psi	
<u>Output Data</u>					
Loss per 100 ft	.06299			psi	
End pressure	2.166			psig	
Gas velocity	1.957			ft/s	
Gas sonic velocity	1471			ft/s	
Note					

Se utiliza el catálogo de la marca BREDEL donde se presentan las curvas y proceso de selección de la bomba peristáltica que a continuación se sigue (ver Anexo G Catálogo G.2) para el ítem SPX10 con manguera de 10mm:

1 El caudal requerido indica la velocidad de la bomba.

Para un caudal de 1.5 l/min (90 l/h) la velocidad de la bomba es de 18 rpm

2 Presión de descarga calculada.

La descarga de los gases residuales es a la atmósfera, en Quito la presión atmosférica es de 10.2 psi (70kPa).

3 Potencia neta requerida.

Con los puntos 1 y 2 voy a 3 y la potencia neta del motor para la bomba es de 0.06 kW

4 Temperatura del producto.

La temperatura de los gases está entre valores de 60° y 300°C, con temperaturas por encima de los 80°C la bomba siempre está en el área de funcionamiento de continuo, es más crítico con temperaturas más bajas así que se establece en 60°C como temperatura crítica para el uso de las curvas.

5 Presión de descarga calculada.

Punto donde la horizontal en 60°C se interseca con la presión de 10.2 psi (70kPa).

6 Máxima velocidad recomendada.

Del punto 5 se traza la vertical y corta el eje de las abscisas, se obtiene la velocidad máxima recomendada para la bomba que es de 45rpm, como este valor es mayor que el del punto 1, se garantiza que la bomba va a funcionar que la bomba con las condiciones de flujo presión y temperatura establecidas puede

operar continuamente sin problema (observar Curvas de Selección Anexo G Catálogo G.2).

Aunque de la figura de selección del rotor para las condiciones especificadas, resulta adecuado un rotor de baja presión, se selecciona uno de alta presión en caso de necesitar en el futuro, variar el flujo y por ende la velocidad de la bomba, para que ésta opere sin problemas en las dos áreas de funcionamiento (continua e intermitente).

Además, este tipo de bombas son adecuadas para aplicaciones de vacío y son autoaspirantes hasta 95% de vacío (50 mbar absoluto), la presión de la línea (150 mbar = 853 mbar absoluto) excede este valor, garantizando con esto la selección del dispositivo para los requerimientos del sistema.

4.3 SISTEMA DE CALENTAMIENTO DE AIRE DE DILUCIÓN

El aire de dilución debe calentarse por las razones ya indicadas en el Capítulo 3, para cumplir con el requerimiento de calentamiento de aire a 150°C se debe emplear un sistema combinado de calentamiento, medición y control de temperatura.

4.3.1 DISPOSITIVO CALENTADOR

Existen varias opciones de calentadores, una alternativa es diseñar el calentador en base a los requerimientos, condiciones de trabajo y materiales comunes para estos, a su vez, entregar este diseño a una empresa que los fabrique bajo pedido, la otra alternativa es seleccionar uno, de los existentes de diferentes fabricantes, que cumpla con los requerimientos y tolere las condiciones de trabajo.

Se selecciona la segunda alternativa, ya que en el mercado local, la primera no ofrece soluciones para líneas de diámetros menores a 1" (25.4 mm), por las limitaciones de materiales disponibles su construcción por no ser de común uso, y tanto la línea de ingreso de aire de dilución como la de la muestra de gases de

escape para el dilusor son de 6mm de diámetro interno y 8mm de diámetro externo.

En cuanto a selección de calentadores, en el mercado local están disponibles en la marca TEMPCO, que para el caso específico de calentamiento en líneas de transporte de fluidos gaseosos en los diámetros antes indicados, ofrece las siguientes opciones:

- ***Resistencias tipo bobina rectas***

Las resistencias de bobina son empleadas para el calentamiento de superficies cilíndricas de diámetros pequeños, externa o internamente, construidas con termocupla interna tipo “J” o “K”.



Figura 4.19. Resistencias tipo bobina recta⁸⁰

- ***Resistencias tipo banda bobina***

De estas resistencias existen las tipo mini banda bobina, están diseñadas y fabricadas con tolerancias de apriete para el montaje con la tubería gracias a su sistema de abrazadera.

⁸⁰ www.tempco.com



Figura 4.20. Resistencias tipo banda bobina de abrazadera de ajuste con leva⁸⁰



Figura 4.21. Resistencias tipo banda bobina de abrazadera de ajuste con tornillos⁸¹

- ***Resistencias tipo banda bobina con doble manga***

La resistencia se encuentra entre dos tubos (mangas), un interno de material aleado de níquel, plata y cobre, que favorece la transmisión de calor, y un externo de acero inoxidable, son construidos con tolerancias de apriete en el diámetro interior para el montaje con la tubería, lo que evita la necesidad de abrazaderas.



Figura 4.22. Resistencias tipo banda bobina con doble manga⁸¹

⁸¹ www.tempro.com

- **Resistencia para líneas de procesos con aire**

Estás resistencias están especialmente diseñadas para colocarse directamente en las líneas de procesos que manejan aire. Se trata de una sección de tubería con los extremos roscados y del diámetro requerido, que viene acoplada con la resistencia de calentamiento y terminales de suministro eléctrico listos para conectar a la fuente de energía eléctrica.

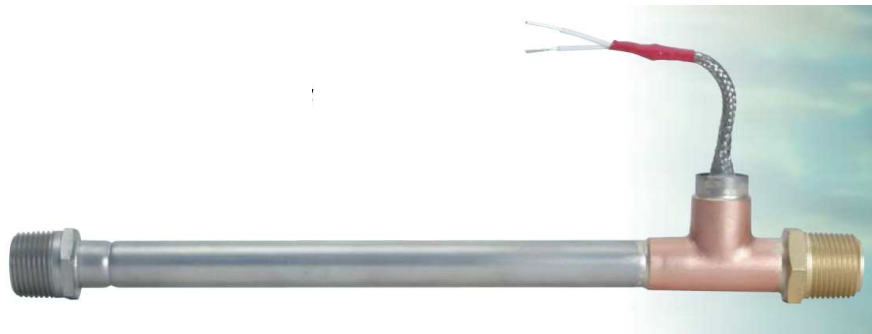


Figura 4.23. Resistencias para líneas de procesos con aire⁸²

La última es la alternativa seleccionada, ya que además de ser particularmente diseñada para líneas de transporte de aire que requieren calentamiento, representa la opción más sencilla para el ensamblaje, pues sólo es necesario seleccionar una de igual diámetro que la tubería de aire de dilución e insertarlo en la línea por medio de extremos roscados y uniones, no es necesario como en el caso de los otros calentadores revisar y garantizar que la superficie de la resistencia este en contacto con la mayor superficie posible de la tubería y sin ningún tipo de sustancia que pueda influir en la transferencia de calor entre las dos superficies como grasa o polvo, y precisamente por esa razón se evitan pérdidas de calor.

En el Anexo G Catálogo G.4 se encuentra la hoja técnica del calentador que incluye la fórmula de cálculo para la selección del mismo, donde se debe tener cuidado de no exceder la capacidad del dispositivo como indica el catálogo.

⁸² www.tempco.com

El parámetro de selección de este elemento es el máximo de vatios por pulgada lineal (máximo wattage) que puede suministrar, aplicando la Ec. 4.92⁸³, se calcula el wattage requerido para el sistema y se lo compara con el del calentador para garantizar que no exceda su máximo, así:

$$wattage = \frac{CFM \times \Delta T}{3} \quad (\text{Ec. 4.92})$$

$$\Delta T = T_{AD} - T_{amb} \quad (\text{Ec. 4.93})$$

donde:

CFM: flujo de aire que se calienta (cfm)

ΔT : incremento de temperatura del aire (°F)

T_{AD} : Temperatura del aire de dilución (°F)

T_{amb} : Temperatura ambiental (°F)

$$CFM = 1.5 \text{ l/min} = 0.053 \text{ cfm}$$

$$T_{AD} = 150^{\circ}C = 302^{\circ}F$$

$$T_{amb} = 20^{\circ}C = 68^{\circ}F$$

De la Ecuación 4.93:

$$\Delta T = 234^{\circ}F$$

De la Ecuación 4.92, para un calentador de ¼" de diámetro por ejemplo, el wattage que debe suministrar el calentador es de:

$$wattage = 7.8 \text{ W/pulg}$$

⁸³ Catálogo TEMPCO; Tubular Industrial Process; Air Process Heaters

Como el sistema no excede el máximo wattage que elemento (N° parte LDA00012) puede entregar con flujos de hasta 2 cfm (80 W/pulg), se determina que es apropiado para la aplicación.

4.3.2 DISPOSITIVO DE CONTROL DE TEMPERATURA

El dispositivo que completa este sistema es el controlador de temperatura. Este dispositivo permite activar o desactivar el suministro de energía que alimenta al calentador. Como va conectado a una termocupla para obtener el valor de la temperatura del fluido que se está calentando, se lo programa para que el sistema mantenga el aire de dilución dentro de un rango aceptable de temperatura ($150\pm 5^{\circ}\text{C}$).

Se puede emplear un microprocesador controlador como el de la marca GEFAN Modelo 600 (ver hoja técnica en el Anexo G Catálogo G.5), para su funcionamiento se emplea la termocupla del aire de dilución considerada en el sistema de medición y adquisición de datos.



Figura 4.19. Microprocesador controlador GREFAN⁸⁴

Con estos elementos seleccionados se completa el diseño del dilusor de disco rotatorio, la información correspondiente a los sistemas accesorios al DDR, como el de suministro de aire seco, medición y adquisición de datos, así como el de control electrónico del motor, se encuentran en los Anexo F.

⁸⁴ http://www.gefran.com/en/products/product_439.

CAPITULO 5

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES

- El equipo diseñado como se plantea en el proyecto se utiliza como sistema de dilusor único para el PAS 2000, también se lo puede utilizar en sistemas combinados de dilusores ya sea para dilución primaria (con un eyector dilusor para la dilución secundaria), o para la dilución secundaria (con un sistema CVS que realice la dilución primaria), dependiendo de los requerimientos de las pruebas y de los equipos de medición. Como en las configuraciones planteadas protocolos de calificación de motores, por ejemplo el EMPA.
- La ventaja más importante del Dilusor de Disco Rotatorio es su versatilidad, permite obtener una amplia gama de relaciones de dilución, esto diversifica su uso con variados equipos de medición contadores de partículas (CPC) y con espectrómetros de características de partículas (SMPS, EEPS, DMS 500, etc.), con diferentes requerimientos de dilución, o para diferentes protocolos para la certificación de motores (estos varían de uno a otro en condiciones de prueba, métodos de muestreo y equipos de medición)
- El dilusor de disco rotatorio es aplicable en estudio de partículas de tamaño menor a 1 μm , ya que para partículas de mayor tamaño se producen pérdidas de MP en el dilusor.
- El proyecto para el cual plantea el dilusor comprende el uso del equipo PAS2000 para la evaluación de partículas de la región ultrafina ($>1\mu\text{m}$), por lo tanto el sistema de dilución seleccionado satisface los requerimientos del proyecto.

- ☑ Los parámetros considerados para el diseño del dilusor han sido tomados del estudio de Hueglin (AN ACCURATE, CONTINUOUSLY ADJUSTABLE DILUTION SYSTEM (1:10 TO 1:10⁴) FOR SUBMICRON AEROSOLS) y del equipo producido por Matter Engineering. Como este es el inicio de estudio de material particulado en las emisiones vehiculares a las condiciones de Quito, el equipo desarrollado puede requerir ajustes en las temperaturas para evitar los problemas que ya se indicaron se pueden presentar en la etapa en la dilución o en la de muestreo.

- ☑ Para el Dilusor de Disco Rotatorio la relación de dilución es una función lineal de la frecuencia de giro del Disco este comportamiento se puede observar en la Sección 3.5.5 en la simulación de la relación de dilución y se comprobaría al obtener los graficas indicadas en el protocolo de pruebas del equipo las mismas que se deben multiplicar por el factor de ajuste (F) para que coincidan con las respectivas curvas de la sección indicada.

- ☑ Los materiales especiales (acero inoxidable y teflón) se seleccionaron considerando las condiciones de temperatura, desgaste y corrosión a las cuales van a operar algunas partes del equipo dilusor, aun cuando esto implica un considerable incremento en los costos de materia prima en comparación a utilizar un acero común (A36) en toda la máquina.

- ☑ De igual manera en los planos constructivos se especifican procesos de maquinado especiales con maquinas herramientas CNC (con control numérico) que incurren en un aumento de costos importante (aproximadamente tres veces el costos de maquinado en comparación con maquinas sin control numérico) para piezas en particular que deben fabricarse con alta exigencia tanto en acabados superficiales como tolerancias muy pequeñas en medidas y ubicación. Esto por ejemplo para el caso del los discos rotatorios debido a que el volumen de los alojamientos cónicos que poseen influyen directamente en los resultados de tasas de dilución que se obtengan con el equipo; así también el acabado superficial del disco y el cuerpo dilusor, en sus caras conjugadas,

debe ser lo más liso posible para disminuir el efecto de fricción y desgaste por abrasión durante el funcionamiento del dilusor.

- ☑ Se plantea un nuevo método de dilución para aplicar con el dilusor de disco rotatorio además de los mencionados en la Sección 3.2, esto es calentando únicamente el Aire de Dilución, esto en base a las recomendaciones del Dr. Alberto Ayala de las experiencias de los estudios en la CARB.
- ☑ Se empleó el Software InstruCalc Versión 5.1 para el cálculo de las caídas de presión en el sistema de dilución, este permite obtener resultados simulando distintas condiciones de operación para diferentes fluidos de manera sencilla y versátil como se observa en la Sección 4.2.2.4.1.

5.2 RECOMENDACIONES

- ☑ En el Anexo A se proporciona información sobre la base matemática del principio de funcionamiento de esta máquina. Como no es objetivo del presente proyecto la modelación matemática del mismo, se recomienda desarrollar un estudio formal de esta sección, para de esta manera conocer con las ecuaciones matemáticas que gobiernan su funcionamiento, lo que posibilitaría su simulación más detallada y proponer rediseño de partes o reconsideración de parámetros si así fuera necesario.
- ☑ Inicialmente se puede utilizar el dilusor de disco rotatorio en configuraciones determinadas en protocolos de calificación de motores de otros países, posteriormente se debe estructurar protocolos acorde con la condiciones de Quito.
- ☑ En las Sección de Planos Constructivos se hacen recomendaciones de materiales y proceso especiales, para la etapa de construcción se cumplir con dichas especificaciones, ya que afectan directamente en la funcionalidad y vida útil del equipo.
- ☑ En caso de ser necesario reajustes en las temperaturas de funcionamiento del equipo se recomienda implementar al equipo con etapas de calentamiento de la muestra de gases de escape o de la muestra diluida, esto también con el objetivo de permitir aplicar los diferentes métodos de dilución de la sección 3.2.
- ☑ Para las pruebas con el PAS2000 se recomienda utilizar el dilusor de disco rotatorio para la dilución primaria y un dilusor eyector como secundario, con esto además de ampliar el rango de tasas de dilución, permite alcanzar la temperatura de la muestra para que ingrese al equipo de medición.
- ☑ Se recomienda el uso del Software InstruCalc, para futuros cálculos de caídas de presión así como también se lo puede emplear para dimensionar

elementos tales como placas orificios para el control de flujo que se pueden emplear en vez de la válvula de globo indicada en la Sección 4.2.2.4.1, en el Anexo F se encuentra un ejemplo de esta aplicación.

BIBLIOGRAFIA

- ALVARADO, M.; Emisiones de Material Particulado En Motores de Combustión Interna Ciclo Diesel, Universidad de Chile; Chile; 2001.
- ARELLANO Jesús; “Transferencia de masa sólido - líquido en tanques agitados”; Sartenejal; 2005.
- AYALA, BRITT; Ultrafine PM Emissions from Natural Gas, Oxidation-Catalyst Diesel, Particle-Trap Diesel Heavy-Duty Transit Buses.
- Catálogo TEMPCO; Tubular Industrial Process; Air Process Heaters
- CIRILO E.; Develop of a Micro-Dilution Tunnel System for In-Use, On-Board Heavy Duty Vehicle Particulate Matter Emissions Measurement; EEUU; 2001.
- Control de Emisiones Vehiculares en el D.M.Q; Fundación Natura-Municipio Metropolitano de Quito-Auspicio: COSUDE.
- Design of a Portable Micro-Dilution Tunnel Particulate Matter Emissions Measurement System; USA; October 2005.
- Enciclopedia de Salud Y Seguridad en el Trabajo.
- FOX, R., McDONALD, A.; Introducción a la mecánica de fluidos; 4º Edición; México 1995.
- GÓMEZ Héctor; “Una nueva formulación para el problema del transporte por convección-difusión”; Universidad de A Coruña; España.
- HILL, L.; Transient Particulate Analysis Using TEOM; Horiba Instruments Ltd., 1998
- HUEGLIN; Dilution system for submicrons aerosols; 1997.

- HUEGLIN, SCHERRER, BURTSCHER; Description and Application of a Dilution Method for the Characterization of Particles from Emissions Sources; 1997; Suiza.
- KASPER, M.; Particle Sampling and Measurement for Type Approval and Field Control; Elimination of Engine Generated Nanoparticles; Suiza; 2005
- KASPER M., BURTSCHER H.; NanoMet: On-Line Characterization of Nanoparticles Size and Composition; SAE Technical Paper Series SP-1552; Junio 2000, Francia.
- LYRÄNEN, JOKINIEM, KAUPPINEN, BACKMAN, VESALA; Comparison of Different Dilution Methods for Measuring Diesel Particle Emissions; September 2002.
- Manual del Usuario PAS2000.
- Manual de Monitoreo del Aire.
- Manual_MD19-2E_970128-6e; Matter Engineering AG.
- MARTINEZ DE VEDIA, R; MARTINEZ, Osvaldo. Teoría de los Motores Térmicos. Talleres Gráficos "Pagani Hnos.". Argentina. 1966.
- MAYER, A.; Elimination of Engine Generated Nanoparticles; Introduction Fig. 3; Suiza; 2005.
- MOHR, M., BURTSCHER H.; Elimination of Engine Generated Nanoparticles; Conventional and New Methods of Particle Measurements; Suiza; 2005.
- PERRY; Manual del Ingeniero Químico; Tomo I.

- TRACEY K.; Exhaust: Evaluating Different Measurement Techniques and Vehicle Technologies; Carleton University; Canada; 2002.
- SHIGLEY; Diseño en Ingeniería Mecánica; 6ªEd.
- Rodamientos FAG - Catálogo WL 41 520/3 SB.
- Catálogo general SKF.
- <http://es.wikipedia.org/wiki/Polimerización>
- [http://200.68.10.178/chile/docs/protocolos/ANEXO%20C%20\(0.1%20MB\).pdf](http://200.68.10.178/chile/docs/protocolos/ANEXO%20C%20(0.1%20MB).pdf); Antecedentes de los Principales Contaminantes Atmosféricos
- <http://buscon.rae.es/drae/> Diccionario de la Lengua Española; Vigésima segunda edición
- <http://en.wikipedia.org/wiki/Concentration>
- <http://members.aol.com/profchm/dilution.html>
- http://www.scielo.org.ar/scielo.php?pid=S0325-9572005000100006&script=sci_arttext&tIng=es
- <http://www.joseclaudio.eng.br/diesel1a1.html>
- http://www.sulzerinnotec.com/en/PortalData/3/Resources/mat/documents/MAT_DLC_e.pdf
- <http://www.monografias.com/trabajos30/transferencia-masa/transferencia-masa>
- <http://www.mecmod.com>
- <http://www U//ams2000/stepping101.html>

- www.mtas.es/insht/EncOIT/pdf/tomo4/104_07.pdf; Enciclopedia de Salud y Seguridad en el Trabajo; *Guía de Productos Químicos*.
- www.matter-engineering.com; Preliminary Datasheet NanoMet C (08/29/03); Matter Engineering AG.
- www.matter-engineering.com; Raw Gas Dilution for Aerosols and Gases Type MD19-2E.
- www.dekati.fi
- www.es.wikipedia.org
- www.acomby.com
- www.tempco.com
- http://www.gefran.com/en/products/product_439.

ANEXOS

- **ANEXO A** FORMULACIÓN MATEMÁTICA DEL PROBLEMA DE TRANSPORTE DE MASA POR DIFUSIÓN-CONVECCIÓN
- **ANEXO B** PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS DE LOS PAHs
- **ANEXO C** TABLAS DE LA SIMULACIÓN DE LA RELACIÓN DE DILUCIÓN
- **ANEXO D** TABLAS Y GRÁFICOS PARA EL DISEÑO MECÁNICO
- **ANEXO E** PLANOS MECÁNICOS
- **ANEXO F** SISTEMAS ACCESORIOS DEL DDR
- **ANEXO G** CATALOGOS DE PARTES ESPECIALES
- **ANEXO H** ANALISIS DE COSTOS
- **ANEXO I** PROFORMAS

ANEXO A

FORMULACIÓN MATEMÁTICA DEL PROBLEMA DE TRANSPORTE DE MASA POR DIFUSIÓN-CONVECCIÓN

FORMULACIÓN MATEMÁTICA DEL PROBLEMA DE TRANSPORTE DE MASA POR DIFUSIÓN-CONVECCIÓN

El Principio de Funcionamiento es decir el fenómeno físico mediante el cual se produce la mezcla entre la muestra de gases de escape y el aire de dilución en este sistema es el Transporte de masa por convección- difusión.

La naturaleza de estos procesos se ve claramente reflejada en la estructura de las ecuaciones de Navier-Stokes. Sin embargo, puesto que la ecuación del transporte puede considerarse formalmente la versión lineal y escalar de las ecuaciones de Navier-Stokes, resulta más sencillo estudiar la problemática de estos procesos a través del problema de transporte.⁸⁵

En ausencia de difusión, un soluto introducido en un fluido en movimiento será arrastrado por el flujo, pudiendo caracterizarse este movimiento por la ecuación de ondas unidireccional.

La naturaleza de estos procesos también se ve claramente reflejada en la estructura de las ecuaciones de Navier-Stokes. Sin embargo, puesto que la ecuación del transporte puede considerarse formalmente la versión lineal y escalar de las ecuaciones de Navier-Stokes, resulta más sencillo estudiar la problemática de estos procesos a través del problema de transporte.

FORMULACIÓN CLÁSICA DEL PROBLEMA

La formulación del problema del transporte se fundamenta -como la de todos los fenómenos físicos- en las ecuaciones de equilibrio y las ecuaciones constitutivas. Para el problema de convección-difusión tendremos dos ecuaciones de equilibrio -conservación de masa fluida y conservación de soluto- y una ecuación constitutiva.

⁸⁵ GÓMEZ Héctor; "Una nueva formulación para el problema del transporte por convección-difusión"; España; pag. 4.

Las ecuaciones del problema son:

$$\frac{\partial \rho(x,t)}{\partial t} + a^T(x,t) \frac{\partial \rho(x,t)}{\partial x} + \rho(x,t) \cdot \text{div}(a(x,t)) = 0 \quad (\text{Ec. 1})$$

$$\rho(x,t) \frac{\partial u(x,t)}{\partial t} + \rho(x,t) a^T(x,t) \frac{\partial u(x,t)}{\partial x} + \text{div}(\rho(x,t) \cdot q(x,t)) - f = 0 \quad (\text{Ec. 2})$$

$$q(x,t) = -K(x,t) \frac{\partial u}{\partial x}(x,t) \quad (\text{Ec. 3})$$

La ecuación (1) es la ecuación de conservación de masa fluida, la ecuación (2) es la ecuación de conservación de masa de soluto y la (3) es la ley de Fick o ecuación constitutiva del problema.

El estudio de la transferencia de masa se realiza mediante la superposición de dos contribuciones: difusión y convección. El **transporte convectivo** proviene del movimiento global de la mezcla; mientras que el **transporte difusivo** se debe al movimiento relativo de los componentes de una mezcla, con velocidades individuales diferentes en magnitud y dirección, cuyo propósito último es establecer un estado de uniformidad de potenciales químicos (equilibrio difusivo) en toda la extensión del sistema.

Esta separación de términos es de importancia fundamental, porque los mecanismos que originan la difusión y la convección son diferentes.

En sistemas homogéneos, el proceso irreversible "natural" y más importante de este tipo de transferencia es la **difusión molecular**, que corresponde al movimiento de los componentes ocasionado por gradientes puros de composición, en ausencia de otros efectos que puedan influir sobre los potenciales químicos de los componentes de la mezcla.

En este tipo de difusión, un gradiente de concentración tiende a mover el componente en una dirección tal que iguale las concentraciones y anule el gradiente. Cuando el gradiente se mantiene mediante el suministro continuo de los componentes de baja y alta concentración, el flujo del componente que se difunde es continuo.

Puesto que el potencial químico depende también de la presión y de la temperatura, los gradientes de estas propiedades pueden inducir gradientes de potencial, ocasionando la **difusión por presión** y la **difusión térmica**. También la acción de un campo de fuerzas externas, que crea gradientes de energía potencial (la cual se suma al potencial químico, constituyendo un potencial "ampliado"), da origen a la **difusión forzada**, empleada generalmente en la separación de mezclas por sedimentación o centrifugación.

ANEXO B

PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS DE PAHs

Tabla 104.116 • Propiedades físicas y químicas.

Denominación química Número CAS	Color/Forma	p.e. (°C)	p.f. (°C)	p.m./ (g/ mol)	Solubilidad en agua	Densidad relativa (agua=1)	Densidad relativa del vapor (aire=1)	Pvap/ (kPa)	Limit. inflam.	p.ig. (°C)	p.aut ig. (°C)
ANTRACENO 120-12-7	placas monoclinicas por recristalización en alcohol; en estado puro es incoloro, con fluorescencia violeta; cuando se cristaliza en benceno, se forman placas incoloras brillantes con fluorescencia azul; cristales amarillos con fluorescencia amarilla	342	218	178.22	insol	1,283 @ 25 °C	6,15	1 mm Hg @ 145 °C	0,6 li ? ls	121 cc	540
BENZ(a)ANTRACENO 56-55-3	placas incoloras recristalizadas en ácido acético glacial o alcohol	400	162	228,3	0,014 mg/l @ 25 °C			5x10 ⁻⁹ torr			
BENZO(b)FLUORANTENO 205-99-2	agujas (recristalizadas en benceno), agujas incoloras (recristalizadas en tolueno o ácido acético glacial)		168	252,3	insol			<10 Pa			
BENZO(g,h,i)FLUORANTENO 203-12-3	cristales		149		insol			< 10 Pa			
BENZO(k)FLUORANTENO 207-08-9	agujas de color amarillo claro en benceno	480	217	252,3	insol			9,59x10 ⁻¹¹ torr			
BENZO(g,h,i)PERILENO 191-24-2	placas grandes de color amarillo verdusco claro (recristalizadas en xileno)	550	277	276,3	insol			1,0x10 ⁻¹⁰ mm Hg @ 25 °C			
BENZO(a)PIRENO 50-32-8	agujas monoclinicas de color amarillo claro en benceno y metanol; los cristales pueden ser monoclinico y ortorrómbicos; placas amarillentas (en benceno y ligroina)	> 360	179– 179,3	252,30	insol	1,351	8,7	> 1 mm Hg			
CRISENO 218-01-9	placas rómbicas rojas con fluorescencia roja o azul en benceno y ácido acético; placas bipiramidales ortorrómbicas en benceno; láminas incoloras con fluorescencia azul	448	255–256	228,28	insol	1,274		6,3x10 ⁻⁷ mm Hg			
DIBENZ(a,h)ACRIDINA 226-36-8	cristales amarillos		228	279,35							

Tabla 104.116 • Propiedades físicas y químicas.

Denominación química Número CAS	Color/Forma	p.e. (°C)	p.f. (°C)	p.m./ (g/ mol)	Solubilidad en agua	Densidad relativa (agua=1)	Densidad relativa del vapor (aire=1)	Pvap/ (kPa)	Limit. inflam.	p.ig. (°C)	p.aut ig. (°C)
DIBENZ(a,j)ACRIDINA 224-42-0	agujas o prismas de color amarillo		216	279,35							
DIBENZ(a,h)ANTRACENO 53-70-3	placas o laminillas incolores recristalizadas en ácido acético; la solución en ácido sulfúrico concentrado es roja; los cristales pueden ser monoclinicos u ortorrómbicos	524	266	278,33	insol	1,282		1x10 ⁻¹⁰ mm Hg			
DIBENZOFURANO 132-64-9	laminas o agujas en alcohol; cristales blancos; solido cristalino	287		168,19	10 ppm @ 25 °C	1,0886 @ 99 °C/4 °C	5,8	0,0044 mm Hg @ 25 °C			
DIBENZO(a,e)PIRENO 192-65-4	agujas de color amarillo claro en xileno; de color amarillo-rojo en solución de ácido sulfúrico concentrado		234	302,4							
DIBENZO(a,h)PIRENO 189-64-0	placas amarillas doradas en xileno o triclorobenceno; en solución de H ₂ SO ₄ tiene color rojo, cambiando después a violeta o azul		308	302,38							
DIBENZO(a,i)PIRENO 189-55-9	agujas, prismas o lamelas de color amarillo verdusco	275 @ 0,05 mm Hg	281	302,4				2,39x10 ⁻¹⁴ mm Hg			
FENANTRENO 85-01-8	placas monoclinicas en alcohol; cristales brillantes incolores; laminillas	340	101	178,22	insol	0,9800 @ 4 °C	6,15	1 mm Hg @ 118,2 °C		171 ca	
FLUORANTENO 206-44-0	agujas coloreadas; agujas o placas de color amarillo claro en alcohol	375	111	202,2	insol	1,252 @ 0 °C/4 °C		0,01 mm Hg			
NAFTACENO 83-32-9	agujas blancas; agujas bipiramidales ortorrómbicas en alcohol	279	95	154,21	insol	1,0242 a 90 °C/4 °C	5,32	10 mm Hg a 131,2 °C			

Tabla 104.116 • Propiedades físicas y químicas.

Denominación química Número CAS	Color/Forma	p.e. (°C)	p.f. (°C)	p.m./ (g/ mol)	Solubilidad en agua	Densidad relativa (agua=1)	Densidad relativa del vapor (aire=1)	Pvap/ (kPa)	Limit. inflam.	p.ig. (°C)	p.aut ig. (°C)
PIRENO 129-00-0	cristales tabulares prismáticos monoclinicos en alcohol o por sublimación; el pireno puro es incoloro; placas de color amarillo claro (cuando se recristalizan en tolueno); sólido incoloro (las impurezas de tetraceno dan color amarillo)	393	156	202,2	insol	1,271 @ 23 °C		6,85x10 ⁻⁷ torr @ 20 °C			

ANEXO C

TABLAS DE LA SIMULACIÓN DE LA RELACIÓN DE DILUCIÓN

Tabla C.1. Relaciones de dilución obtenidas para: $f=0.15 - 3$ Hz, aire de dilución a $T=150^{\circ}\text{C}$ y $P=1\text{atm}$, flujo de aire de dilución: $0,5$ l/min., gases de escape a $T=60^{\circ}\text{C}$ y $P=1\text{atm}$, Discos con 2, 4, 6, 8 y 10 cavidades.

f (Hz)	RELACIÓN DE DILUCIÓN				
	DISCO 2	DISCO 4	DISCO 6	DISCO 8	DISCO 10
0,15	1:557	1:279	1:186	1:140	1:112
0,2	1:418	1:209	1:140	1:105	1:84
0,25	1:334	1:168	1:112	1:84	1:68
0,3	1:279	1:140	1:94	1:70	1:57
0,35	1:239	1:120	1:80	1:61	1:49
0,4	1:209	1:105	1:70	1:53	1:43
0,45	1:186	1:94	1:63	1:47	1:38
0,5	1:168	1:84	1:57	1:43	1:34
0,55	1:153	1:77	1:52	1:39	1:31
0,6	1:140	1:70	1:47	1:36	1:29
0,65	1:129	1:65	1:44	1:33	1:27
0,7	1:120	1:61	1:41	1:31	1:25
0,75	1:112	1:57	1:38	1:29	1:23
0,8	1:105	1:53	1:36	1:27	1:22
0,85	1:99	1:50	1:34	1:26	1:21
0,9	1:94	1:47	1:32	1:24	1:20
0,95	1:89	1:45	1:30	1:23	1:19
1	1:84	1:43	1:29	1:22	1:18
1,05	1:80	1:41	1:27	1:21	1:17
1,1	1:77	1:39	1:26	1:20	1:16
1,15	1:73	1:37	1:25	1:19	1:15
1,2	1:70	1:36	1:24	1:18	1:15
1,25	1:68	1:34	1:23	1:18	1:14
1,3	1:65	1:33	1:22	1:17	1:14
1,35	1:63	1:32	1:22	1:16	1:13
1,4	1:61	1:31	1:21	1:16	1:13
1,45	1:58	1:30	1:20	1:15	1:12
1,5	1:57	1:29	1:20	1:15	1:12
1,55	1:55	1:28	1:19	1:14	1:12
1,6	1:53	1:27	1:18	1:14	1:11
1,65	1:52	1:26	1:18	1:14	1:11
1,7	1:50	1:26	1:17	1:13	1:11
1,75	1:49	1:25	1:17	1:13	1:11
1,8	1:47	1:24	1:16	1:13	1:10
1,85	1:46	1:24	1:16	1:12	1:10
1,9	1:45	1:23	1:16	1:12	1:10
1,95	1:44	1:22	1:15	1:12	1:10
2	1:43	1:22	1:15	1:11	1:9
2,05	1:42	1:21	1:15	1:11	1:9
2,1	1:41	1:21	1:14	1:11	1:9
2,15	1:40	1:20	1:14	1:11	1:9
2,2	1:39	1:20	1:14	1:10	1:9
2,25	1:38	1:20	1:13	1:10	1:8
2,3	1:37	1:19	1:13	1:10	1:8
2,35	1:36	1:19	1:13	1:10	1:8
2,4	1:36	1:18	1:13	1:10	1:8
2,45	1:35	1:18	1:12	1:10	1:8
2,5	1:34	1:18	1:12	1:9	1:8
2,55	1:34	1:17	1:12	1:9	1:8
2,6	1:33	1:17	1:12	1:9	1:7
2,65	1:32	1:17	1:11	1:9	1:7
2,7	1:32	1:16	1:11	1:9	1:7
2,75	1:31	1:16	1:11	1:9	1:7
2,8	1:31	1:16	1:11	1:8	1:7
2,85	1:30	1:16	1:11	1:8	1:7
2,9	1:30	1:15	1:11	1:8	1:7
2,95	1:29	1:15	1:10	1:8	1:7
3	1:29	1:15	1:10	1:8	1:7

Tabla C.2 Relaciones de dilución obtenidas para: $f=0.15 - 3$ Hz, aire de dilución a $T=150^{\circ}\text{C}$ y $P=1\text{atm}$, flujo de aire de dilución: 1 l/min, gases de escape a $T=60^{\circ}\text{C}$ y $P=1\text{atm}$, Discos con 2, 4, 6, 8 y 10 cavidades.

f (Hz)	RELACIÓN DE DILUCIÓN				
	DISCO 2	DISCO 4	DISCO 6	DISCO 8	DISCO 10
0,15	1:796	1:398	1:266	1:200	1:160
0,2	1:597	1:299	1:200	1:150	1:120
0,25	1:478	1:239	1:160	1:120	1:96
0,3	1:398	1:200	1:133	1:100	1:80
0,35	1:342	1:171	1:115	1:86	1:69
0,4	1:299	1:150	1:100	1:75	1:61
0,45	1:266	1:133	1:89	1:67	1:54
0,5	1:239	1:120	1:80	1:61	1:49
0,55	1:218	1:109	1:73	1:55	1:44
0,6	1:200	1:100	1:67	1:51	1:41
0,65	1:184	1:93	1:62	1:47	1:38
0,7	1:171	1:86	1:58	1:44	1:35
0,75	1:160	1:80	1:54	1:41	1:33
0,8	1:150	1:75	1:51	1:38	1:31
0,85	1:141	1:71	1:48	1:36	1:29
0,9	1:133	1:67	1:45	1:34	1:27
0,95	1:126	1:64	1:43	1:32	1:26
1	1:120	1:61	1:41	1:31	1:25
1,05	1:115	1:58	1:39	1:29	1:24
1,1	1:109	1:55	1:37	1:28	1:23
1,15	1:105	1:53	1:36	1:27	1:22
1,2	1:100	1:51	1:34	1:26	1:21
1,25	1:96	1:49	1:33	1:25	1:20
1,3	1:93	1:47	1:32	1:24	1:19
1,35	1:89	1:45	1:30	1:23	1:19
1,4	1:86	1:44	1:29	1:22	1:18
1,45	1:83	1:42	1:28	1:22	1:17
1,5	1:80	1:41	1:27	1:21	1:17
1,55	1:78	1:39	1:27	1:20	1:16
1,6	1:75	1:38	1:26	1:20	1:16
1,65	1:73	1:37	1:25	1:19	1:15
1,7	1:71	1:36	1:24	1:19	1:15
1,75	1:69	1:35	1:24	1:18	1:15
1,8	1:67	1:34	1:23	1:18	1:14
1,85	1:65	1:33	1:22	1:17	1:14
1,9	1:64	1:32	1:22	1:17	1:14
1,95	1:62	1:32	1:21	1:16	1:13
2	1:61	1:31	1:21	1:16	1:13
2,05	1:59	1:30	1:20	1:16	1:13
2,1	1:58	1:29	1:20	1:15	1:12
2,15	1:56	1:29	1:19	1:15	1:12
2,2	1:55	1:28	1:19	1:15	1:12
2,25	1:54	1:27	1:19	1:14	1:12
2,3	1:53	1:27	1:18	1:14	1:11
2,35	1:52	1:26	1:18	1:14	1:11
2,4	1:51	1:26	1:18	1:13	1:11
2,45	1:50	1:25	1:17	1:13	1:11
2,5	1:49	1:25	1:17	1:13	1:11
2,55	1:48	1:24	1:17	1:13	1:10
2,6	1:47	1:24	1:16	1:12	1:10
2,65	1:46	1:23	1:16	1:12	1:10
2,7	1:45	1:23	1:16	1:12	1:10
2,75	1:44	1:23	1:15	1:12	1:10
2,8	1:44	1:22	1:15	1:12	1:10
2,85	1:43	1:22	1:15	1:11	1:9
2,9	1:42	1:22	1:15	1:11	1:9
2,95	1:41	1:21	1:14	1:11	1:9
3	1:41	1:21	1:14	1:11	1:9

Tabla C.3 Relaciones de dilución obtenidas para: $f=0.15 - 3$ Hz, aire de dilución a $T=150^{\circ}\text{C}$ y $P=1\text{atm}$, flujo de aire de dilución: $1,5\text{l}/\text{min}$, gases de escape a $T=60^{\circ}\text{C}$ y $P=1\text{atm}$, Discos con 2, 4, 6, 8 y 10 cavidades.

f (Hz)	RELACIÓN DE DILUCIÓN				
	DISCO 2	DISCO 4	DISCO 6	DISCO 8	DISCO 10
0,15	1:1193	1:597	1:398	1:299	1:239
0,2	1:895	1:448	1:299	1:224	1:180
0,25	1:716	1:359	1:239	1:180	1:144
0,3	1:597	1:299	1:200	1:150	1:120
0,35	1:512	1:256	1:171	1:129	1:103
0,4	1:448	1:224	1:150	1:113	1:90
0,45	1:398	1:200	1:133	1:100	1:80
0,5	1:359	1:180	1:120	1:90	1:73
0,55	1:326	1:164	1:109	1:82	1:66
0,6	1:299	1:150	1:100	1:75	1:61
0,65	1:276	1:139	1:93	1:70	1:56
0,7	1:256	1:129	1:86	1:65	1:52
0,75	1:239	1:120	1:80	1:61	1:49
0,8	1:224	1:113	1:75	1:57	1:46
0,85	1:211	1:106	1:71	1:54	1:43
0,9	1:200	1:100	1:67	1:51	1:41
0,95	1:189	1:95	1:64	1:48	1:39
1	1:180	1:90	1:61	1:46	1:37
1,05	1:171	1:86	1:58	1:44	1:35
1,1	1:164	1:82	1:55	1:42	1:34
1,15	1:156	1:79	1:53	1:40	1:32
1,2	1:150	1:75	1:51	1:38	1:31
1,25	1:144	1:73	1:49	1:37	1:30
1,3	1:139	1:70	1:47	1:35	1:29
1,35	1:133	1:67	1:45	1:34	1:27
1,4	1:129	1:65	1:44	1:33	1:27
1,45	1:124	1:63	1:42	1:32	1:26
1,5	1:120	1:61	1:41	1:31	1:25
1,55	1:116	1:59	1:39	1:30	1:24
1,6	1:113	1:57	1:38	1:29	1:23
1,65	1:109	1:55	1:37	1:28	1:23
1,7	1:106	1:54	1:36	1:27	1:22
1,75	1:103	1:52	1:35	1:27	1:21
1,8	1:100	1:51	1:34	1:26	1:21
1,85	1:98	1:49	1:33	1:25	1:20
1,9	1:95	1:48	1:32	1:25	1:20
1,95	1:93	1:47	1:32	1:24	1:19
2	1:90	1:46	1:31	1:23	1:19
2,05	1:88	1:45	1:30	1:23	1:18
2,1	1:86	1:44	1:29	1:22	1:18
2,15	1:84	1:43	1:29	1:22	1:18
2,2	1:82	1:42	1:28	1:21	1:17
2,25	1:80	1:41	1:27	1:21	1:17
2,3	1:79	1:40	1:27	1:20	1:17
2,35	1:77	1:39	1:26	1:20	1:16
2,4	1:75	1:38	1:26	1:20	1:16
2,45	1:74	1:37	1:25	1:19	1:16
2,5	1:73	1:37	1:25	1:19	1:15
2,55	1:71	1:36	1:24	1:19	1:15
2,6	1:70	1:35	1:24	1:18	1:15
2,65	1:68	1:35	1:23	1:18	1:14
2,7	1:67	1:34	1:23	1:18	1:14
2,75	1:66	1:34	1:23	1:17	1:14
2,8	1:65	1:33	1:22	1:17	1:14
2,85	1:64	1:32	1:22	1:17	1:14
2,9	1:63	1:32	1:22	1:16	1:13
2,95	1:62	1:31	1:21	1:16	1:13
3	1:61	1:31	1:21	1:16	1:13

Tabla C.4 Relaciones de dilución obtenidas para: $f=0.15 - 3$ Hz, aire de dilución a $T=150^{\circ}\text{C}$ y $P=1\text{atm}$, flujo de aire de dilución: 2 l/min, gases de escape a $T=60^{\circ}\text{C}$ y $P=1\text{atm}$, Discos con 2, 4, 6, 8 y 10 cavidades.

f (Hz)	RELACIÓN DE DILUCIÓN				
	DISCO 2	DISCO 4	DISCO 6	DISCO 8	DISCO 10
0,15	1:1590	1:796	1:531	1:398	1:319
0,2	1:1193	1:597	1:398	1:299	1:239
0,25	1:955	1:478	1:319	1:239	1:192
0,3	1:796	1:398	1:266	1:200	1:160
0,35	1:682	1:342	1:228	1:171	1:137
0,4	1:597	1:299	1:200	1:150	1:120
0,45	1:531	1:266	1:178	1:133	1:107
0,5	1:478	1:239	1:160	1:120	1:96
0,55	1:434	1:218	1:145	1:109	1:88
0,6	1:398	1:200	1:133	1:100	1:80
0,65	1:368	1:184	1:123	1:93	1:74
0,7	1:342	1:171	1:115	1:86	1:69
0,75	1:319	1:160	1:107	1:80	1:65
0,8	1:299	1:150	1:100	1:75	1:61
0,85	1:281	1:141	1:94	1:71	1:57
0,9	1:266	1:133	1:89	1:67	1:54
0,95	1:252	1:126	1:85	1:64	1:51
1	1:239	1:120	1:80	1:61	1:49
1,05	1:228	1:115	1:77	1:58	1:46
1,1	1:218	1:109	1:73	1:55	1:44
1,15	1:208	1:105	1:70	1:53	1:42
1,2	1:200	1:100	1:67	1:51	1:41
1,25	1:192	1:96	1:65	1:49	1:39
1,3	1:184	1:93	1:62	1:47	1:38
1,35	1:178	1:89	1:60	1:45	1:36
1,4	1:171	1:86	1:58	1:44	1:35
1,45	1:165	1:83	1:56	1:42	1:34
1,5	1:160	1:80	1:54	1:41	1:33
1,55	1:155	1:78	1:52	1:39	1:32
1,6	1:150	1:75	1:51	1:38	1:31
1,65	1:145	1:73	1:49	1:37	1:30
1,7	1:141	1:71	1:48	1:36	1:29
1,75	1:137	1:69	1:46	1:35	1:28
1,8	1:133	1:67	1:45	1:34	1:27
1,85	1:130	1:65	1:44	1:33	1:27
1,9	1:126	1:64	1:43	1:32	1:26
1,95	1:123	1:62	1:42	1:32	1:25
2	1:120	1:61	1:41	1:31	1:25
2,05	1:117	1:59	1:40	1:30	1:24
2,1	1:115	1:58	1:39	1:29	1:24
2,15	1:112	1:56	1:38	1:29	1:23
2,2	1:109	1:55	1:37	1:28	1:23
2,25	1:107	1:54	1:36	1:27	1:22
2,3	1:105	1:53	1:36	1:27	1:22
2,35	1:102	1:52	1:35	1:26	1:21
2,4	1:100	1:51	1:34	1:26	1:21
2,45	1:98	1:50	1:33	1:25	1:20
2,5	1:96	1:49	1:33	1:25	1:20
2,55	1:94	1:48	1:32	1:24	1:20
2,6	1:93	1:47	1:32	1:24	1:19
2,65	1:91	1:46	1:31	1:23	1:19
2,7	1:89	1:45	1:30	1:23	1:19
2,75	1:88	1:44	1:30	1:23	1:18
2,8	1:86	1:44	1:29	1:22	1:18
2,85	1:85	1:43	1:29	1:22	1:18
2,9	1:83	1:42	1:28	1:22	1:17
2,95	1:82	1:41	1:28	1:21	1:17
3	1:80	1:41	1:27	1:21	1:17

MUESTRA DE GASES DE ESCAPE CALENTADOS A 80°C

Tabla C.5 Relaciones de dilución obtenidas para: $f=0.15 - 3$ Hz, aire de dilución a $T=20^\circ\text{C}$ y $P=1\text{atm}$, flujo de aire de dilución: 0,5 l/min, gases de escape a $T=80^\circ\text{C}$ y $P=1\text{atm}$, Discos con 2, 4, 6, 8 y 10 cavidades.

f (Hz)	RELACIÓN DE DILUCIÓN				
	DISCO 2	DISCO 4	DISCO 6	DISCO 8	DISCO 10
0,15	1:669	1:335	1:224	1:168	1:135
0,2	1:502	1:252	1:168	1:126	1:101
0,25	1:402	1:201	1:135	1:101	1:81
0,3	1:335	1:168	1:112	1:85	1:68
0,35	1:287	1:144	1:96	1:73	1:58
0,4	1:252	1:126	1:85	1:64	1:51
0,45	1:224	1:112	1:75	1:57	1:46
0,5	1:201	1:101	1:68	1:51	1:41
0,55	1:183	1:92	1:62	1:47	1:37
0,6	1:168	1:85	1:57	1:43	1:34
0,65	1:155	1:78	1:52	1:40	1:32
0,7	1:144	1:73	1:49	1:37	1:30
0,75	1:135	1:68	1:46	1:34	1:28
0,8	1:126	1:64	1:43	1:32	1:26
0,85	1:119	1:60	1:40	1:30	1:25
0,9	1:112	1:57	1:38	1:29	1:23
0,95	1:107	1:54	1:36	1:27	1:22
1	1:101	1:51	1:34	1:26	1:21
1,05	1:96	1:49	1:33	1:25	1:20
1,1	1:92	1:47	1:31	1:24	1:19
1,15	1:88	1:45	1:30	1:23	1:18
1,2	1:85	1:43	1:29	1:22	1:18
1,25	1:81	1:41	1:28	1:21	1:17
1,3	1:78	1:40	1:27	1:20	1:16
1,35	1:75	1:38	1:26	1:20	1:16
1,4	1:73	1:37	1:25	1:19	1:15
1,45	1:70	1:36	1:24	1:18	1:15
1,5	1:68	1:34	1:23	1:18	1:14
1,55	1:66	1:33	1:23	1:17	1:14
1,6	1:64	1:32	1:22	1:17	1:14
1,65	1:62	1:31	1:21	1:16	1:13
1,7	1:60	1:30	1:21	1:16	1:13
1,75	1:58	1:30	1:20	1:15	1:12
1,8	1:57	1:29	1:20	1:15	1:12
1,85	1:55	1:28	1:19	1:15	1:12
1,9	1:54	1:27	1:19	1:14	1:12
1,95	1:52	1:27	1:18	1:14	1:11
2	1:51	1:26	1:18	1:14	1:11
2,05	1:50	1:25	1:17	1:13	1:11
2,1	1:49	1:25	1:17	1:13	1:11
2,15	1:48	1:24	1:17	1:13	1:10
2,2	1:47	1:24	1:16	1:12	1:10
2,25	1:46	1:23	1:16	1:12	1:10
2,3	1:45	1:23	1:16	1:12	1:10
2,35	1:44	1:22	1:15	1:12	1:10
2,4	1:43	1:22	1:15	1:11	1:9
2,45	1:42	1:21	1:15	1:11	1:9
2,5	1:41	1:21	1:14	1:11	1:9
2,55	1:40	1:21	1:14	1:11	1:9
2,6	1:40	1:20	1:14	1:11	1:9
2,65	1:39	1:20	1:14	1:10	1:9
2,7	1:38	1:20	1:13	1:10	1:8
2,75	1:37	1:19	1:13	1:10	1:8
2,8	1:37	1:19	1:13	1:10	1:8
2,85	1:36	1:19	1:13	1:10	1:8
2,9	1:36	1:18	1:13	1:10	1:8
2,95	1:35	1:18	1:12	1:9	1:8
3	1:34	1:18	1:12	1:9	1:8

Tabla C.6 Relaciones de dilución obtenidas para: $f=0.15 - 3$ Hz, aire de dilución a $T=20^{\circ}\text{C}$ y $P=1\text{atm}$, flujo de aire de dilución: 1 l/min, gases de escape a $T=80^{\circ}\text{C}$ y $P=1\text{atm}$, Discos con 2, 4, 6, 8 y 10 cavidades.

f (Hz)	RELACIÓN DE DILUCIÓN				
	DISCO 2	DISCO 4	DISCO 6	DISCO 8	DISCO 10
0,15	1:1337	1:669	1:446	1:335	1:268
0,2	1:1003	1:502	1:335	1:252	1:201
0,25	1:803	1:402	1:268	1:201	1:161
0,3	1:669	1:335	1:224	1:168	1:135
0,35	1:574	1:287	1:192	1:144	1:116
0,4	1:502	1:252	1:168	1:126	1:101
0,45	1:446	1:224	1:149	1:112	1:90
0,5	1:402	1:201	1:135	1:101	1:81
0,55	1:365	1:183	1:122	1:92	1:74
0,6	1:335	1:168	1:112	1:85	1:68
0,65	1:309	1:155	1:104	1:78	1:63
0,7	1:287	1:144	1:96	1:73	1:58
0,75	1:268	1:135	1:90	1:68	1:54
0,8	1:252	1:126	1:85	1:64	1:51
0,85	1:237	1:119	1:80	1:60	1:48
0,9	1:224	1:112	1:75	1:57	1:46
0,95	1:212	1:107	1:71	1:54	1:43
1	1:201	1:101	1:68	1:51	1:41
1,05	1:192	1:96	1:65	1:49	1:39
1,1	1:183	1:92	1:62	1:47	1:37
1,15	1:175	1:88	1:59	1:45	1:36
1,2	1:168	1:85	1:57	1:43	1:34
1,25	1:161	1:81	1:54	1:41	1:33
1,3	1:155	1:78	1:52	1:40	1:32
1,35	1:149	1:75	1:50	1:38	1:31
1,4	1:144	1:73	1:49	1:37	1:30
1,45	1:139	1:70	1:47	1:36	1:29
1,5	1:135	1:68	1:46	1:34	1:28
1,55	1:130	1:66	1:44	1:33	1:27
1,6	1:126	1:64	1:43	1:32	1:26
1,65	1:122	1:62	1:41	1:31	1:25
1,7	1:119	1:60	1:40	1:30	1:25
1,75	1:116	1:58	1:39	1:30	1:24
1,8	1:112	1:57	1:38	1:29	1:23
1,85	1:109	1:55	1:37	1:28	1:23
1,9	1:107	1:54	1:36	1:27	1:22
1,95	1:104	1:52	1:35	1:27	1:22
2	1:101	1:51	1:34	1:26	1:21
2,05	1:99	1:50	1:34	1:25	1:21
2,1	1:96	1:49	1:33	1:25	1:20
2,15	1:94	1:48	1:32	1:24	1:20
2,2	1:92	1:47	1:31	1:24	1:19
2,25	1:90	1:46	1:31	1:23	1:19
2,3	1:88	1:45	1:30	1:23	1:18
2,35	1:86	1:44	1:29	1:22	1:18
2,4	1:85	1:43	1:29	1:22	1:18
2,45	1:83	1:42	1:28	1:21	1:17
2,5	1:81	1:41	1:28	1:21	1:17
2,55	1:80	1:40	1:27	1:21	1:17
2,6	1:78	1:40	1:27	1:20	1:16
2,65	1:77	1:39	1:26	1:20	1:16
2,7	1:75	1:38	1:26	1:20	1:16
2,75	1:74	1:37	1:25	1:19	1:16
2,8	1:73	1:37	1:25	1:19	1:15
2,85	1:71	1:36	1:24	1:19	1:15
2,9	1:70	1:36	1:24	1:18	1:15
2,95	1:69	1:35	1:24	1:18	1:15
3	1:68	1:34	1:23	1:18	1:14

Tabla C.7 Relaciones de dilución obtenidas para: $f=0.15 - 3$ Hz, aire de dilución a $T=20^{\circ}\text{C}$ y $P=1\text{atm}$, flujo de aire de dilución: 1,5 l/min, gases de escape a $T=80^{\circ}\text{C}$ y $P=1\text{atm}$, Discos con 2, 4, 6, 8 y 10 cavidades.

f (Hz)	RELACIÓN DE DILUCIÓN				
	DISCO 2	DISCO 4	DISCO 6	DISCO 8	DISCO 10
0,15	1:2006	1:1003	1:669	1:502	1:402
0,2	1:1504	1:753	1:502	1:377	1:302
0,25	1:1204	1:602	1:402	1:302	1:242
0,3	1:1003	1:502	1:335	1:252	1:201
0,35	1:860	1:431	1:287	1:216	1:173
0,4	1:753	1:377	1:252	1:189	1:151
0,45	1:669	1:335	1:224	1:168	1:135
0,5	1:602	1:302	1:201	1:151	1:121
0,55	1:548	1:274	1:183	1:138	1:110
0,6	1:502	1:252	1:168	1:126	1:101
0,65	1:464	1:232	1:155	1:117	1:94
0,7	1:431	1:216	1:144	1:108	1:87
0,75	1:402	1:201	1:135	1:101	1:81
0,8	1:377	1:189	1:126	1:95	1:76
0,85	1:355	1:178	1:119	1:89	1:72
0,9	1:335	1:168	1:112	1:85	1:68
0,95	1:318	1:159	1:107	1:80	1:64
1	1:302	1:151	1:101	1:76	1:61
1,05	1:287	1:144	1:96	1:73	1:58
1,1	1:274	1:138	1:92	1:69	1:56
1,15	1:262	1:132	1:88	1:66	1:53
1,2	1:252	1:126	1:85	1:64	1:51
1,25	1:242	1:121	1:81	1:61	1:49
1,3	1:232	1:117	1:78	1:59	1:47
1,35	1:224	1:112	1:75	1:57	1:46
1,4	1:216	1:108	1:73	1:55	1:44
1,45	1:208	1:105	1:70	1:53	1:42
1,5	1:201	1:101	1:68	1:51	1:41
1,55	1:195	1:98	1:66	1:49	1:40
1,6	1:189	1:95	1:64	1:48	1:39
1,65	1:183	1:92	1:62	1:47	1:37
1,7	1:178	1:89	1:60	1:45	1:36
1,75	1:173	1:87	1:58	1:44	1:35
1,8	1:168	1:85	1:57	1:43	1:34
1,85	1:164	1:82	1:55	1:42	1:34
1,9	1:159	1:80	1:54	1:41	1:33
1,95	1:155	1:78	1:52	1:40	1:32
2	1:151	1:76	1:51	1:39	1:31
2,05	1:148	1:74	1:50	1:38	1:30
2,1	1:144	1:73	1:49	1:37	1:30
2,15	1:141	1:71	1:48	1:36	1:29
2,2	1:138	1:69	1:47	1:35	1:28
2,25	1:135	1:68	1:46	1:34	1:28
2,3	1:132	1:66	1:45	1:34	1:27
2,35	1:129	1:65	1:44	1:33	1:27
2,4	1:126	1:64	1:43	1:32	1:26
2,45	1:124	1:62	1:42	1:32	1:26
2,5	1:121	1:61	1:41	1:31	1:25
2,55	1:119	1:60	1:40	1:30	1:25
2,6	1:117	1:59	1:40	1:30	1:24
2,65	1:114	1:58	1:39	1:29	1:24
2,7	1:112	1:57	1:38	1:29	1:23
2,75	1:110	1:56	1:37	1:28	1:23
2,8	1:108	1:55	1:37	1:28	1:22
2,85	1:107	1:54	1:36	1:27	1:22
2,9	1:105	1:53	1:36	1:27	1:22
2,95	1:103	1:52	1:35	1:26	1:21
3	1:101	1:51	1:34	1:26	1:21

Tabla C.8 Relaciones de dilución obtenidas para: $f=0.15 - 3$ Hz, aire de dilución a $T=20^{\circ}\text{C}$ y $P=1\text{atm}$, flujo de aire de dilución: 2 l/min, gases de escape a $T=80^{\circ}\text{C}$ y $P=1\text{atm}$, Discos con 2, 4, 6, 8 y 10 cavidades.

f (Hz)	RELACIÓN DE DILUCIÓN				
	DISCO 2	DISCO 4	DISCO 6	DISCO 8	DISCO 10
0,15	1:2674	1:1337	1:892	1:669	1:536
0,2	1:2006	1:1003	1:669	1:502	1:402
0,25	1:1605	1:803	1:536	1:402	1:322
0,3	1:1337	1:669	1:446	1:335	1:268
0,35	1:1146	1:574	1:383	1:287	1:230
0,4	1:1003	1:502	1:335	1:252	1:201
0,45	1:892	1:446	1:298	1:224	1:179
0,5	1:803	1:402	1:268	1:201	1:161
0,55	1:730	1:365	1:244	1:183	1:147
0,6	1:669	1:335	1:224	1:168	1:135
0,65	1:618	1:309	1:207	1:155	1:124
0,7	1:574	1:287	1:192	1:144	1:116
0,75	1:536	1:268	1:179	1:135	1:108
0,8	1:502	1:252	1:168	1:126	1:101
0,85	1:473	1:237	1:158	1:119	1:95
0,9	1:446	1:224	1:149	1:112	1:90
0,95	1:423	1:212	1:142	1:107	1:85
1	1:402	1:201	1:135	1:101	1:81
1,05	1:383	1:192	1:128	1:96	1:77
1,1	1:365	1:183	1:122	1:92	1:74
1,15	1:350	1:175	1:117	1:88	1:71
1,2	1:335	1:168	1:112	1:85	1:68
1,25	1:322	1:161	1:108	1:81	1:65
1,3	1:309	1:155	1:104	1:78	1:63
1,35	1:298	1:149	1:100	1:75	1:60
1,4	1:287	1:144	1:96	1:73	1:58
1,45	1:277	1:139	1:93	1:70	1:56
1,5	1:268	1:135	1:90	1:68	1:54
1,55	1:260	1:130	1:87	1:66	1:53
1,6	1:252	1:126	1:85	1:64	1:51
1,65	1:244	1:122	1:82	1:62	1:50
1,7	1:237	1:119	1:80	1:60	1:48
1,75	1:230	1:116	1:77	1:58	1:47
1,8	1:224	1:112	1:75	1:57	1:46
1,85	1:218	1:109	1:73	1:55	1:44
1,9	1:212	1:107	1:71	1:54	1:43
1,95	1:207	1:104	1:70	1:52	1:42
2	1:201	1:101	1:68	1:51	1:41
2,05	1:197	1:99	1:66	1:50	1:40
2,1	1:192	1:96	1:65	1:49	1:39
2,15	1:187	1:94	1:63	1:48	1:38
2,2	1:183	1:92	1:62	1:47	1:37
2,25	1:179	1:90	1:60	1:46	1:37
2,3	1:175	1:88	1:59	1:45	1:36
2,35	1:172	1:86	1:58	1:44	1:35
2,4	1:168	1:85	1:57	1:43	1:34
2,45	1:165	1:83	1:56	1:42	1:34
2,5	1:161	1:81	1:54	1:41	1:33
2,55	1:158	1:80	1:53	1:40	1:32
2,6	1:155	1:78	1:52	1:40	1:32
2,65	1:152	1:77	1:51	1:39	1:31
2,7	1:149	1:75	1:50	1:38	1:31
2,75	1:147	1:74	1:50	1:37	1:30
2,8	1:144	1:73	1:49	1:37	1:30
2,85	1:142	1:71	1:48	1:36	1:29
2,9	1:139	1:70	1:47	1:36	1:29
2,95	1:137	1:69	1:46	1:35	1:28
3	1:135	1:68	1:46	1:34	1:28

MUESTRA DE GASES DE ESCAPE CALENTADOS A 100°C.

Tabla C.9 Relaciones de dilución obtenidas para: $f=0.15 - 3$ Hz, aire de dilución a $T=20^{\circ}\text{C}$ y $P=1\text{atm}$, flujo de aire de dilución: 0,5 l/min, gases de escape a $T=100^{\circ}\text{C}$ y $P=1\text{atm}$, Discos con 2, 4, 6, 8 y 10 cavidades.

f (Hz)	RELACIÓN DE DILUCIÓN				
	DISCO 2	DISCO 4	DISCO 6	DISCO 8	DISCO 10
0,15	1:718	1:359	1:240	1:180	1:144
0,2	1:538	1:270	1:180	1:135	1:108
0,25	1:431	1:216	1:144	1:108	1:87
0,3	1:359	1:180	1:120	1:91	1:73
0,35	1:308	1:155	1:103	1:78	1:62
0,4	1:270	1:135	1:91	1:68	1:55
0,45	1:240	1:120	1:81	1:61	1:49
0,5	1:216	1:108	1:73	1:55	1:44
0,55	1:196	1:99	1:66	1:50	1:40
0,6	1:180	1:91	1:61	1:46	1:37
0,65	1:166	1:84	1:56	1:42	1:34
0,7	1:155	1:78	1:52	1:39	1:32
0,75	1:144	1:73	1:49	1:37	1:30
0,8	1:135	1:68	1:46	1:35	1:28
0,85	1:127	1:64	1:43	1:33	1:26
0,9	1:120	1:61	1:41	1:31	1:25
0,95	1:114	1:58	1:39	1:29	1:24
1	1:108	1:55	1:37	1:28	1:22
1,05	1:103	1:52	1:35	1:27	1:21
1,1	1:99	1:50	1:34	1:25	1:21
1,15	1:94	1:48	1:32	1:24	1:20
1,2	1:91	1:46	1:31	1:23	1:19
1,25	1:87	1:44	1:30	1:22	1:18
1,3	1:84	1:42	1:29	1:22	1:18
1,35	1:81	1:41	1:28	1:21	1:17
1,4	1:78	1:39	1:27	1:20	1:16
1,45	1:75	1:38	1:26	1:20	1:16
1,5	1:73	1:37	1:25	1:19	1:15
1,55	1:70	1:36	1:24	1:18	1:15
1,6	1:68	1:35	1:23	1:18	1:14
1,65	1:66	1:34	1:23	1:17	1:14
1,7	1:64	1:33	1:22	1:17	1:14
1,75	1:62	1:32	1:21	1:16	1:13
1,8	1:61	1:31	1:21	1:16	1:13
1,85	1:59	1:30	1:20	1:16	1:13
1,9	1:58	1:29	1:20	1:15	1:12
1,95	1:56	1:29	1:19	1:15	1:12
2	1:55	1:28	1:19	1:14	1:12
2,05	1:53	1:27	1:18	1:14	1:11
2,1	1:52	1:27	1:18	1:14	1:11
2,15	1:51	1:26	1:18	1:13	1:11
2,2	1:50	1:25	1:17	1:13	1:11
2,25	1:49	1:25	1:17	1:13	1:11
2,3	1:48	1:24	1:17	1:13	1:10
2,35	1:47	1:24	1:16	1:12	1:10
2,4	1:46	1:23	1:16	1:12	1:10
2,45	1:45	1:23	1:16	1:12	1:10
2,5	1:44	1:22	1:15	1:12	1:10
2,55	1:43	1:22	1:15	1:12	1:9
2,6	1:42	1:22	1:15	1:11	1:9
2,65	1:42	1:21	1:15	1:11	1:9
2,7	1:41	1:21	1:14	1:11	1:9
2,75	1:40	1:21	1:14	1:11	1:9
2,8	1:39	1:20	1:14	1:11	1:9
2,85	1:39	1:20	1:14	1:10	1:9
2,9	1:38	1:20	1:13	1:10	1:8
2,95	1:37	1:19	1:13	1:10	1:8
3	1:37	1:19	1:13	1:10	1:8

Tabla C.10 Relaciones de dilución obtenidas para: $f=0.15 - 3$ Hz, aire de dilución a $T=20^{\circ}\text{C}$ y $P=1\text{atm}$, flujo de aire de dilución: 1 l/min, gases de escape a $T=100^{\circ}\text{C}$ y $P=1\text{atm}$, Discos con 2, 4, 6, 8 y 10 cavidades.

f (Hz)	RELACIÓN DE DILUCIÓN				
	DISCO 2	DISCO 4	DISCO 6	DISCO 8	DISCO 10
0,15	1:1434	1:718	1:479	1:359	1:288
0,2	1:1076	1:538	1:359	1:270	1:216
0,25	1:861	1:431	1:288	1:216	1:173
0,3	1:718	1:359	1:240	1:180	1:144
0,35	1:615	1:308	1:206	1:155	1:124
0,4	1:538	1:270	1:180	1:135	1:108
0,45	1:479	1:240	1:160	1:120	1:97
0,5	1:431	1:216	1:144	1:108	1:87
0,55	1:392	1:196	1:131	1:99	1:79
0,6	1:359	1:180	1:120	1:91	1:73
0,65	1:332	1:166	1:111	1:84	1:67
0,7	1:308	1:155	1:103	1:78	1:62
0,75	1:288	1:144	1:97	1:73	1:58
0,8	1:270	1:135	1:91	1:68	1:55
0,85	1:254	1:127	1:85	1:64	1:52
0,9	1:240	1:120	1:81	1:61	1:49
0,95	1:227	1:114	1:76	1:58	1:46
1	1:216	1:108	1:73	1:55	1:44
1,05	1:206	1:103	1:69	1:52	1:42
1,1	1:196	1:99	1:66	1:50	1:40
1,15	1:188	1:94	1:63	1:48	1:38
1,2	1:180	1:91	1:61	1:46	1:37
1,25	1:173	1:87	1:58	1:44	1:35
1,3	1:166	1:84	1:56	1:42	1:34
1,35	1:160	1:81	1:54	1:41	1:33
1,4	1:155	1:78	1:52	1:39	1:32
1,45	1:149	1:75	1:50	1:38	1:31
1,5	1:144	1:73	1:49	1:37	1:30
1,55	1:140	1:70	1:47	1:36	1:29
1,6	1:135	1:68	1:46	1:35	1:28
1,65	1:131	1:66	1:44	1:34	1:27
1,7	1:127	1:64	1:43	1:33	1:26
1,75	1:124	1:62	1:42	1:32	1:26
1,8	1:120	1:61	1:41	1:31	1:25
1,85	1:117	1:59	1:40	1:30	1:24
1,9	1:114	1:58	1:39	1:29	1:24
1,95	1:111	1:56	1:38	1:29	1:23
2	1:108	1:55	1:37	1:28	1:22
2,05	1:106	1:53	1:36	1:27	1:22
2,1	1:103	1:52	1:35	1:27	1:21
2,15	1:101	1:51	1:34	1:26	1:21
2,2	1:99	1:50	1:34	1:25	1:21
2,25	1:97	1:49	1:33	1:25	1:20
2,3	1:94	1:48	1:32	1:24	1:20
2,35	1:92	1:47	1:31	1:24	1:19
2,4	1:91	1:46	1:31	1:23	1:19
2,45	1:89	1:45	1:30	1:23	1:19
2,5	1:87	1:44	1:30	1:22	1:18
2,55	1:85	1:43	1:29	1:22	1:18
2,6	1:84	1:42	1:29	1:22	1:18
2,65	1:82	1:42	1:28	1:21	1:17
2,7	1:81	1:41	1:28	1:21	1:17
2,75	1:79	1:40	1:27	1:21	1:17
2,8	1:78	1:39	1:27	1:20	1:16
2,85	1:76	1:39	1:26	1:20	1:16
2,9	1:75	1:38	1:26	1:20	1:16
2,95	1:74	1:37	1:25	1:19	1:16
3	1:73	1:37	1:25	1:19	1:15

Tabla C.11 Relaciones de dilución obtenidas para: $f=0.15 - 3$ Hz, aire de dilución a $T=20^{\circ}\text{C}$ y $P=1\text{atm}$, flujo de aire de dilución: 1,5 l/min., gases de escape a $T=100^{\circ}\text{C}$ y $P=1\text{atm}$, Discos con 2, 4, 6, 8 y 10 cavidades.

f (Hz)	RELACIÓN DE DILUCIÓN				
	DISCO 2	DISCO 4	DISCO 6	DISCO 8	DISCO 10
0,15	1:2151	1:1076	1:718	1:538	1:431
0,2	1:1613	1:807	1:538	1:404	1:323
0,25	1:1291	1:646	1:431	1:323	1:259
0,3	1:1076	1:538	1:359	1:270	1:216
0,35	1:922	1:462	1:308	1:231	1:185
0,4	1:807	1:404	1:270	1:203	1:162
0,45	1:718	1:359	1:240	1:180	1:144
0,5	1:646	1:323	1:216	1:162	1:130
0,55	1:587	1:294	1:196	1:148	1:118
0,6	1:538	1:270	1:180	1:135	1:108
0,65	1:497	1:249	1:166	1:125	1:100
0,7	1:462	1:231	1:155	1:116	1:93
0,75	1:431	1:216	1:144	1:108	1:87
0,8	1:404	1:203	1:135	1:102	1:82
0,85	1:380	1:191	1:127	1:96	1:77
0,9	1:359	1:180	1:120	1:91	1:73
0,95	1:340	1:171	1:114	1:86	1:69
1	1:323	1:162	1:108	1:82	1:65
1,05	1:308	1:155	1:103	1:78	1:62
1,1	1:294	1:148	1:99	1:74	1:60
1,15	1:281	1:141	1:94	1:71	1:57
1,2	1:270	1:135	1:91	1:68	1:55
1,25	1:259	1:130	1:87	1:65	1:53
1,3	1:249	1:125	1:84	1:63	1:51
1,35	1:240	1:120	1:81	1:61	1:49
1,4	1:231	1:116	1:78	1:59	1:47
1,45	1:223	1:112	1:75	1:57	1:45
1,5	1:216	1:108	1:73	1:55	1:44
1,55	1:209	1:105	1:70	1:53	1:43
1,6	1:203	1:102	1:68	1:51	1:41
1,65	1:196	1:99	1:66	1:50	1:40
1,7	1:191	1:96	1:64	1:48	1:39
1,75	1:185	1:93	1:62	1:47	1:38
1,8	1:180	1:91	1:61	1:46	1:37
1,85	1:175	1:88	1:59	1:45	1:36
1,9	1:171	1:86	1:58	1:43	1:35
1,95	1:166	1:84	1:56	1:42	1:34
2	1:162	1:82	1:55	1:41	1:33
2,05	1:158	1:80	1:53	1:40	1:32
2,1	1:155	1:78	1:52	1:39	1:32
2,15	1:151	1:76	1:51	1:38	1:31
2,2	1:148	1:74	1:50	1:38	1:30
2,25	1:144	1:73	1:49	1:37	1:30
2,3	1:141	1:71	1:48	1:36	1:29
2,35	1:138	1:70	1:47	1:35	1:28
2,4	1:135	1:68	1:46	1:35	1:28
2,45	1:133	1:67	1:45	1:34	1:27
2,5	1:130	1:65	1:44	1:33	1:27
2,55	1:127	1:64	1:43	1:33	1:26
2,6	1:125	1:63	1:42	1:32	1:26
2,65	1:123	1:62	1:42	1:31	1:25
2,7	1:120	1:61	1:41	1:31	1:25
2,75	1:118	1:60	1:40	1:30	1:24
2,8	1:116	1:59	1:39	1:30	1:24
2,85	1:114	1:58	1:39	1:29	1:24
2,9	1:112	1:57	1:38	1:29	1:23
2,95	1:110	1:56	1:37	1:28	1:23
3	1:108	1:55	1:37	1:28	1:22

Tabla C.12 Relaciones de dilución obtenidas para: $f=0.15 - 3$ Hz, aire de dilución a $T=20^{\circ}\text{C}$ y $P=1\text{atm}$, flujo de aire de dilución: 2 l/min, gases de escape a $T=100^{\circ}\text{C}$ y $P=1\text{atm}$, Discos con 2, 4, 6, 8 y 10 cavidades.

f (Hz)	RELACIÓN DE DILUCIÓN				
	DISCO 2	DISCO 4	DISCO 6	DISCO 8	DISCO 10
0,15	1:2867	1:1434	1:956	1:718	1:574
0,2	1:2151	1:1076	1:718	1:538	1:431
0,25	1:1721	1:861	1:574	1:431	1:345
0,3	1:1434	1:718	1:479	1:359	1:288
0,35	1:1229	1:615	1:410	1:308	1:247
0,4	1:1076	1:538	1:359	1:270	1:216
0,45	1:956	1:479	1:319	1:240	1:192
0,5	1:861	1:431	1:288	1:216	1:173
0,55	1:783	1:392	1:262	1:196	1:157
0,6	1:718	1:359	1:240	1:180	1:144
0,65	1:662	1:332	1:221	1:166	1:133
0,7	1:615	1:308	1:206	1:155	1:124
0,75	1:574	1:288	1:192	1:144	1:116
0,8	1:538	1:270	1:180	1:135	1:108
0,85	1:507	1:254	1:170	1:127	1:102
0,9	1:479	1:240	1:160	1:120	1:97
0,95	1:454	1:227	1:152	1:114	1:92
1	1:431	1:216	1:144	1:108	1:87
1,05	1:410	1:206	1:137	1:103	1:83
1,1	1:392	1:196	1:131	1:99	1:79
1,15	1:375	1:188	1:126	1:94	1:76
1,2	1:359	1:180	1:120	1:91	1:73
1,25	1:345	1:173	1:116	1:87	1:70
1,3	1:332	1:166	1:111	1:84	1:67
1,35	1:319	1:160	1:107	1:81	1:65
1,4	1:308	1:155	1:103	1:78	1:62
1,45	1:298	1:149	1:100	1:75	1:60
1,5	1:288	1:144	1:97	1:73	1:58
1,55	1:278	1:140	1:93	1:70	1:56
1,6	1:270	1:135	1:91	1:68	1:55
1,65	1:262	1:131	1:88	1:66	1:53
1,7	1:254	1:127	1:85	1:64	1:52
1,75	1:247	1:124	1:83	1:62	1:50
1,8	1:240	1:120	1:81	1:61	1:49
1,85	1:233	1:117	1:78	1:59	1:47
1,9	1:227	1:114	1:76	1:58	1:46
1,95	1:221	1:111	1:74	1:56	1:45
2	1:216	1:108	1:73	1:55	1:44
2,05	1:211	1:106	1:71	1:53	1:43
2,1	1:206	1:103	1:69	1:52	1:42
2,15	1:201	1:101	1:68	1:51	1:41
2,2	1:196	1:99	1:66	1:50	1:40
2,25	1:192	1:97	1:65	1:49	1:39
2,3	1:188	1:94	1:63	1:48	1:38
2,35	1:184	1:92	1:62	1:47	1:38
2,4	1:180	1:91	1:61	1:46	1:37
2,45	1:176	1:89	1:59	1:45	1:36
2,5	1:173	1:87	1:58	1:44	1:35
2,55	1:170	1:85	1:57	1:43	1:35
2,6	1:166	1:84	1:56	1:42	1:34
2,65	1:163	1:82	1:55	1:42	1:33
2,7	1:160	1:81	1:54	1:41	1:33
2,75	1:157	1:79	1:53	1:40	1:32
2,8	1:155	1:78	1:52	1:39	1:32
2,85	1:152	1:76	1:51	1:39	1:31
2,9	1:149	1:75	1:50	1:38	1:31
2,95	1:147	1:74	1:50	1:37	1:30
3	1:144	1:73	1:49	1:37	1:30

MUESTRA DE GASES DE ESCAPE CALENTADOS A 100°C.

Tabla C.13 Relaciones de dilución obtenidas para: $f=0.15 - 3$ Hz, aire de dilución a $T=20^{\circ}\text{C}$ y $P=1\text{atm}$, flujo de aire de dilución: 0,5 l/min, gases de escape a $T=120^{\circ}\text{C}$ y $P=1\text{atm}$, Discos con 2, 4, 6, 8 y 10 cavidades.

f (Hz)	RELACIÓN DE DILUCIÓN				
	DISCO 2	DISCO 4	DISCO 6	DISCO 8	DISCO 10
0,15	1:774	1:387	1:259	1:194	1:156
0,2	1:580	1:291	1:194	1:146	1:117
0,25	1:465	1:233	1:156	1:117	1:94
0,3	1:387	1:194	1:130	1:98	1:78
0,35	1:332	1:167	1:111	1:84	1:67
0,4	1:291	1:146	1:98	1:73	1:59
0,45	1:259	1:130	1:87	1:65	1:53
0,5	1:233	1:117	1:78	1:59	1:47
0,55	1:212	1:106	1:71	1:54	1:43
0,6	1:194	1:98	1:65	1:49	1:40
0,65	1:179	1:90	1:60	1:46	1:37
0,7	1:167	1:84	1:56	1:42	1:34
0,75	1:156	1:78	1:53	1:40	1:32
0,8	1:146	1:73	1:49	1:37	1:30
0,85	1:137	1:69	1:46	1:35	1:28
0,9	1:130	1:65	1:44	1:33	1:27
0,95	1:123	1:62	1:42	1:31	1:25
1	1:117	1:59	1:40	1:30	1:24
1,05	1:111	1:56	1:38	1:29	1:23
1,1	1:106	1:54	1:36	1:27	1:22
1,15	1:102	1:51	1:35	1:26	1:21
1,2	1:98	1:49	1:33	1:25	1:20
1,25	1:94	1:47	1:32	1:24	1:20
1,3	1:90	1:46	1:31	1:23	1:19
1,35	1:87	1:44	1:30	1:22	1:18
1,4	1:84	1:42	1:29	1:22	1:18
1,45	1:81	1:41	1:28	1:21	1:17
1,5	1:78	1:40	1:27	1:20	1:16
1,55	1:76	1:38	1:26	1:20	1:16
1,6	1:73	1:37	1:25	1:19	1:15
1,65	1:71	1:36	1:24	1:19	1:15
1,7	1:69	1:35	1:24	1:18	1:15
1,75	1:67	1:34	1:23	1:18	1:14
1,8	1:65	1:33	1:22	1:17	1:14
1,85	1:64	1:32	1:22	1:17	1:14
1,9	1:62	1:31	1:21	1:16	1:13
1,95	1:60	1:31	1:21	1:16	1:13
2	1:59	1:30	1:20	1:15	1:13
2,05	1:58	1:29	1:20	1:15	1:12
2,1	1:56	1:29	1:19	1:15	1:12
2,15	1:55	1:28	1:19	1:14	1:12
2,2	1:54	1:27	1:19	1:14	1:12
2,25	1:53	1:27	1:18	1:14	1:11
2,3	1:51	1:26	1:18	1:14	1:11
2,35	1:50	1:26	1:17	1:13	1:11
2,4	1:49	1:25	1:17	1:13	1:11
2,45	1:48	1:25	1:17	1:13	1:10
2,5	1:47	1:24	1:16	1:13	1:10
2,55	1:46	1:24	1:16	1:12	1:10
2,6	1:46	1:23	1:16	1:12	1:10
2,65	1:45	1:23	1:16	1:12	1:10
2,7	1:44	1:22	1:15	1:12	1:10
2,75	1:43	1:22	1:15	1:12	1:9
2,8	1:42	1:22	1:15	1:11	1:9
2,85	1:42	1:21	1:15	1:11	1:9
2,9	1:41	1:21	1:14	1:11	1:9
2,95	1:40	1:21	1:14	1:11	1:9
3	1:40	1:20	1:14	1:11	1:9

Tabla C.14 Relaciones de dilución obtenidas para: $f=0.15 - 3$ Hz, aire de dilución a $T=20^{\circ}\text{C}$ y $P=1\text{atm}$, flujo de aire de dilución: 1 l/min, gases de escape a $T=120^{\circ}\text{C}$ y $P=1\text{atm}$, Discos con 2, 4, 6, 8 y 10 cavidades.

f (Hz)	RELACIÓN DE DILUCIÓN				
	DISCO 2	DISCO 4	DISCO 6	DISCO 8	DISCO 10
0,15	1:1546	1:774	1:516	1:387	1:310
0,2	1:1160	1:580	1:387	1:291	1:233
0,25	1:928	1:465	1:310	1:233	1:186
0,3	1:774	1:387	1:259	1:194	1:156
0,35	1:663	1:332	1:222	1:167	1:133
0,4	1:580	1:291	1:194	1:146	1:117
0,45	1:516	1:259	1:173	1:130	1:104
0,5	1:465	1:233	1:156	1:117	1:94
0,55	1:422	1:212	1:141	1:106	1:85
0,6	1:387	1:194	1:130	1:98	1:78
0,65	1:358	1:179	1:120	1:90	1:72
0,7	1:332	1:167	1:111	1:84	1:67
0,75	1:310	1:156	1:104	1:78	1:63
0,8	1:291	1:146	1:98	1:73	1:59
0,85	1:274	1:137	1:92	1:69	1:56
0,9	1:259	1:130	1:87	1:65	1:53
0,95	1:245	1:123	1:82	1:62	1:50
1	1:233	1:117	1:78	1:59	1:47
1,05	1:222	1:111	1:75	1:56	1:45
1,1	1:212	1:106	1:71	1:54	1:43
1,15	1:203	1:102	1:68	1:51	1:41
1,2	1:194	1:98	1:65	1:49	1:40
1,25	1:186	1:94	1:63	1:47	1:38
1,3	1:179	1:90	1:60	1:46	1:37
1,35	1:173	1:87	1:58	1:44	1:35
1,4	1:167	1:84	1:56	1:42	1:34
1,45	1:161	1:81	1:54	1:41	1:33
1,5	1:156	1:78	1:53	1:40	1:32
1,55	1:151	1:76	1:51	1:38	1:31
1,6	1:146	1:73	1:49	1:37	1:30
1,65	1:141	1:71	1:48	1:36	1:29
1,7	1:137	1:69	1:46	1:35	1:28
1,75	1:133	1:67	1:45	1:34	1:27
1,8	1:130	1:65	1:44	1:33	1:27
1,85	1:126	1:64	1:43	1:32	1:26
1,9	1:123	1:62	1:42	1:31	1:25
1,95	1:120	1:60	1:41	1:31	1:25
2	1:117	1:59	1:40	1:30	1:24
2,05	1:114	1:58	1:39	1:29	1:24
2,1	1:111	1:56	1:38	1:29	1:23
2,15	1:109	1:55	1:37	1:28	1:23
2,2	1:106	1:54	1:36	1:27	1:22
2,25	1:104	1:53	1:35	1:27	1:22
2,3	1:102	1:51	1:35	1:26	1:21
2,35	1:100	1:50	1:34	1:26	1:21
2,4	1:98	1:49	1:33	1:25	1:20
2,45	1:96	1:48	1:33	1:25	1:20
2,5	1:94	1:47	1:32	1:24	1:20
2,55	1:92	1:46	1:31	1:24	1:19
2,6	1:90	1:46	1:31	1:23	1:19
2,65	1:88	1:45	1:30	1:23	1:18
2,7	1:87	1:44	1:30	1:22	1:18
2,75	1:85	1:43	1:29	1:22	1:18
2,8	1:84	1:42	1:29	1:22	1:18
2,85	1:82	1:42	1:28	1:21	1:17
2,9	1:81	1:41	1:28	1:21	1:17
2,95	1:80	1:40	1:27	1:21	1:17
3	1:78	1:40	1:27	1:20	1:16

Tabla C.15 Relaciones de dilución obtenidas para: $f=0.15 - 3$ Hz, aire de dilución a $T=20^{\circ}\text{C}$ y $P=1\text{atm}$, flujo de aire de dilución: 1,5 l/min, gases de escape a $T=120^{\circ}\text{C}$ y $P=1\text{atm}$, Discos con 2, 4, 6, 8 y 10 cavidades.

f (Hz)	RELACIÓN DE DILUCIÓN				
	DISCO 2	DISCO 4	DISCO 6	DISCO 8	DISCO 10
0,15	1:2319	1:1160	1:774	1:580	1:465
0,2	1:1739	1:870	1:580	1:436	1:349
0,25	1:1392	1:696	1:465	1:349	1:279
0,3	1:1160	1:580	1:387	1:291	1:233
0,35	1:994	1:498	1:332	1:249	1:200
0,4	1:870	1:436	1:291	1:218	1:175
0,45	1:774	1:387	1:259	1:194	1:156
0,5	1:696	1:349	1:233	1:175	1:140
0,55	1:633	1:317	1:212	1:159	1:127
0,6	1:580	1:291	1:194	1:146	1:117
0,65	1:536	1:268	1:179	1:135	1:108
0,7	1:498	1:249	1:167	1:125	1:100
0,75	1:465	1:233	1:156	1:117	1:94
0,8	1:436	1:218	1:146	1:110	1:88
0,85	1:410	1:206	1:137	1:103	1:83
0,9	1:387	1:194	1:130	1:98	1:78
0,95	1:367	1:184	1:123	1:92	1:74
1	1:349	1:175	1:117	1:88	1:71
1,05	1:332	1:167	1:111	1:84	1:67
1,1	1:317	1:159	1:106	1:80	1:64
1,15	1:303	1:152	1:102	1:77	1:61
1,2	1:291	1:146	1:98	1:73	1:59
1,25	1:279	1:140	1:94	1:71	1:57
1,3	1:268	1:135	1:90	1:68	1:54
1,35	1:259	1:130	1:87	1:65	1:53
1,4	1:249	1:125	1:84	1:63	1:51
1,45	1:241	1:121	1:81	1:61	1:49
1,5	1:233	1:117	1:78	1:59	1:47
1,55	1:225	1:113	1:76	1:57	1:46
1,6	1:218	1:110	1:73	1:55	1:44
1,65	1:212	1:106	1:71	1:54	1:43
1,7	1:206	1:103	1:69	1:52	1:42
1,75	1:200	1:100	1:67	1:51	1:41
1,8	1:194	1:98	1:65	1:49	1:40
1,85	1:189	1:95	1:64	1:48	1:39
1,9	1:184	1:92	1:62	1:47	1:38
1,95	1:179	1:90	1:60	1:46	1:37
2	1:175	1:88	1:59	1:44	1:36
2,05	1:171	1:86	1:58	1:43	1:35
2,1	1:167	1:84	1:56	1:42	1:34
2,15	1:163	1:82	1:55	1:41	1:33
2,2	1:159	1:80	1:54	1:41	1:33
2,25	1:156	1:78	1:53	1:40	1:32
2,3	1:152	1:77	1:51	1:39	1:31
2,35	1:149	1:75	1:50	1:38	1:31
2,4	1:146	1:73	1:49	1:37	1:30
2,45	1:143	1:72	1:48	1:36	1:29
2,5	1:140	1:71	1:47	1:36	1:29
2,55	1:137	1:69	1:46	1:35	1:28
2,6	1:135	1:68	1:46	1:34	1:28
2,65	1:132	1:67	1:45	1:34	1:27
2,7	1:130	1:65	1:44	1:33	1:27
2,75	1:127	1:64	1:43	1:33	1:26
2,8	1:125	1:63	1:42	1:32	1:26
2,85	1:123	1:62	1:42	1:31	1:25
2,9	1:121	1:61	1:41	1:31	1:25
2,95	1:119	1:60	1:40	1:30	1:25
3	1:117	1:59	1:40	1:30	1:24

Tabla C.16 Relaciones de dilución obtenidas para: $f=0.15 - 3$ Hz, aire de dilución a $T=20^{\circ}\text{C}$ y $P=1\text{atm}$, flujo de aire de dilución: 2 l/min, gases de escape a $T=120^{\circ}\text{C}$ y $P=1\text{atm}$, Discos con 2, 4, 6, 8 y 10 cavidades.

f (Hz)	RELACIÓN DE DILUCIÓN				
	DISCO 2	DISCO 4	DISCO 6	DISCO 8	DISCO 10
0,15	1:3091	1:1546	1:1031	1:774	1:619
0,2	1:2319	1:1160	1:774	1:580	1:465
0,25	1:1855	1:928	1:619	1:465	1:372
0,3	1:1546	1:774	1:516	1:387	1:310
0,35	1:1325	1:663	1:442	1:332	1:266
0,4	1:1160	1:580	1:387	1:291	1:233
0,45	1:1031	1:516	1:344	1:259	1:207
0,5	1:928	1:465	1:310	1:233	1:186
0,55	1:844	1:422	1:282	1:212	1:170
0,6	1:774	1:387	1:259	1:194	1:156
0,65	1:714	1:358	1:239	1:179	1:144
0,7	1:663	1:332	1:222	1:167	1:133
0,75	1:619	1:310	1:207	1:156	1:125
0,8	1:580	1:291	1:194	1:146	1:117
0,85	1:546	1:274	1:183	1:137	1:110
0,9	1:516	1:259	1:173	1:130	1:104
0,95	1:489	1:245	1:164	1:123	1:99
1	1:465	1:233	1:156	1:117	1:94
1,05	1:442	1:222	1:148	1:111	1:89
1,1	1:422	1:212	1:141	1:106	1:85
1,15	1:404	1:203	1:135	1:102	1:82
1,2	1:387	1:194	1:130	1:98	1:78
1,25	1:372	1:186	1:125	1:94	1:75
1,3	1:358	1:179	1:120	1:90	1:72
1,35	1:344	1:173	1:115	1:87	1:70
1,4	1:332	1:167	1:111	1:84	1:67
1,45	1:321	1:161	1:108	1:81	1:65
1,5	1:310	1:156	1:104	1:78	1:63
1,55	1:300	1:151	1:101	1:76	1:61
1,6	1:291	1:146	1:98	1:73	1:59
1,65	1:282	1:141	1:95	1:71	1:57
1,7	1:274	1:137	1:92	1:69	1:56
1,75	1:266	1:133	1:89	1:67	1:54
1,8	1:259	1:130	1:87	1:65	1:53
1,85	1:252	1:126	1:85	1:64	1:51
1,9	1:245	1:123	1:82	1:62	1:50
1,95	1:239	1:120	1:80	1:60	1:49
2	1:233	1:117	1:78	1:59	1:47
2,05	1:227	1:114	1:76	1:58	1:46
2,1	1:222	1:111	1:75	1:56	1:45
2,15	1:217	1:109	1:73	1:55	1:44
2,2	1:212	1:106	1:71	1:54	1:43
2,25	1:207	1:104	1:70	1:53	1:42
2,3	1:203	1:102	1:68	1:51	1:41
2,35	1:198	1:100	1:67	1:50	1:40
2,4	1:194	1:98	1:65	1:49	1:40
2,45	1:190	1:96	1:64	1:48	1:39
2,5	1:186	1:94	1:63	1:47	1:38
2,55	1:183	1:92	1:62	1:46	1:37
2,6	1:179	1:90	1:60	1:46	1:37
2,65	1:176	1:88	1:59	1:45	1:36
2,7	1:173	1:87	1:58	1:44	1:35
2,75	1:170	1:85	1:57	1:43	1:35
2,8	1:167	1:84	1:56	1:42	1:34
2,85	1:164	1:82	1:55	1:42	1:34
2,9	1:161	1:81	1:54	1:41	1:33
2,95	1:158	1:80	1:53	1:40	1:32
3	1:156	1:78	1:53	1:40	1:32

Toma de muestra junto al filtro de MP

Tabla C.17 Relaciones de dilución obtenidas para: $f=0.15 - 3$ Hz, aire de dilución a $T=150^{\circ}\text{C}$ y $P=1\text{atm}$, flujo de aire de dilución: $0,5$ l/min, gases de escape a $T=300^{\circ}\text{C}$ y $P=1\text{atm}$, Discos con 2, 4, 6, 8 y 10 cavidades.

f (Hz)	RELACION DE DILUCION				
	DISCO 2	DISCO 4	DISCO 6	DISCO 8	DISCO 10
0,15	1:679	1:340	1:227	1:171	1:137
0,2	1:510	1:255	1:171	1:128	1:103
0,25	1:408	1:205	1:137	1:103	1:82
0,3	1:340	1:171	1:114	1:86	1:69
0,35	1:292	1:146	1:98	1:74	1:59
0,4	1:255	1:128	1:86	1:65	1:52
0,45	1:227	1:114	1:76	1:58	1:46
0,5	1:205	1:103	1:69	1:52	1:42
0,55	1:186	1:94	1:63	1:47	1:38
0,6	1:171	1:86	1:58	1:43	1:35
0,65	1:158	1:79	1:53	1:40	1:32
0,7	1:146	1:74	1:49	1:37	1:30
0,75	1:137	1:69	1:46	1:35	1:28
0,8	1:128	1:65	1:43	1:33	1:26
0,85	1:121	1:61	1:41	1:31	1:25
0,9	1:114	1:58	1:39	1:29	1:24
0,95	1:108	1:55	1:37	1:28	1:22
1	1:103	1:52	1:35	1:26	1:21
1,05	1:98	1:49	1:33	1:25	1:20
1,1	1:94	1:47	1:32	1:24	1:20
1,15	1:89	1:45	1:30	1:23	1:19
1,2	1:86	1:43	1:29	1:22	1:18
1,25	1:82	1:42	1:28	1:21	1:17
1,3	1:79	1:40	1:27	1:21	1:17
1,35	1:76	1:39	1:26	1:20	1:16
1,4	1:74	1:37	1:25	1:19	1:16
1,45	1:71	1:36	1:24	1:19	1:15
1,5	1:69	1:35	1:24	1:18	1:15
1,55	1:67	1:34	1:23	1:17	1:14
1,6	1:65	1:33	1:22	1:17	1:14
1,65	1:63	1:32	1:22	1:16	1:13
1,7	1:61	1:31	1:21	1:16	1:13
1,75	1:59	1:30	1:20	1:16	1:13
1,8	1:58	1:29	1:20	1:15	1:12
1,85	1:56	1:29	1:19	1:15	1:12
1,9	1:55	1:28	1:19	1:14	1:12
1,95	1:53	1:27	1:18	1:14	1:11
2	1:52	1:26	1:18	1:14	1:11
2,05	1:51	1:26	1:18	1:13	1:11
2,1	1:49	1:25	1:17	1:13	1:11
2,15	1:48	1:25	1:17	1:13	1:10
2,2	1:47	1:24	1:16	1:13	1:10
2,25	1:46	1:24	1:16	1:12	1:10
2,3	1:45	1:23	1:16	1:12	1:10
2,35	1:44	1:23	1:15	1:12	1:10
2,4	1:43	1:22	1:15	1:12	1:9
2,45	1:43	1:22	1:15	1:11	1:9
2,5	1:42	1:21	1:15	1:11	1:9
2,55	1:41	1:21	1:14	1:11	1:9
2,6	1:40	1:21	1:14	1:11	1:9
2,65	1:39	1:20	1:14	1:11	1:9
2,7	1:39	1:20	1:14	1:10	1:9
2,75	1:38	1:20	1:13	1:10	1:8
2,8	1:37	1:19	1:13	1:10	1:8
2,85	1:37	1:19	1:13	1:10	1:8
2,9	1:36	1:19	1:13	1:10	1:8
2,95	1:35	1:18	1:12	1:10	1:8
3	1:35	1:18	1:12	1:9	1:8

Tabla C.18 Relaciones de dilución obtenidas para: $f=0.15 - 3$ Hz, aire de dilución a $T=150^{\circ}\text{C}$ y $P=1\text{atm}$, flujo de aire de dilución: 1 l/min, gases de escape a $T=300^{\circ}\text{C}$ y $P=1\text{atm}$, Discos con 2, 4, 6, 8 y 10 cavidades.

f (Hz)	RELACIÓN DE DILUCIÓN				
	DISCO 2	DISCO 4	DISCO 6	DISCO 8	DISCO 10
0,15	1:1358	1:679	1:453	1:340	1:272
0,2	1:1019	1:510	1:340	1:255	1:205
0,25	1:815	1:408	1:272	1:205	1:164
0,3	1:679	1:340	1:227	1:171	1:137
0,35	1:582	1:292	1:195	1:146	1:117
0,4	1:510	1:255	1:171	1:128	1:103
0,45	1:453	1:227	1:152	1:114	1:91
0,5	1:408	1:205	1:137	1:103	1:82
0,55	1:371	1:186	1:124	1:94	1:75
0,6	1:340	1:171	1:114	1:86	1:69
0,65	1:314	1:158	1:105	1:79	1:64
0,7	1:292	1:146	1:98	1:74	1:59
0,75	1:272	1:137	1:91	1:69	1:55
0,8	1:255	1:128	1:86	1:65	1:52
0,85	1:240	1:121	1:81	1:61	1:49
0,9	1:227	1:114	1:76	1:58	1:46
0,95	1:215	1:108	1:72	1:55	1:44
1	1:205	1:103	1:69	1:52	1:42
1,05	1:195	1:98	1:66	1:49	1:40
1,1	1:186	1:94	1:63	1:47	1:38
1,15	1:178	1:89	1:60	1:45	1:36
1,2	1:171	1:86	1:58	1:43	1:35
1,25	1:164	1:82	1:55	1:42	1:34
1,3	1:158	1:79	1:53	1:40	1:32
1,35	1:152	1:76	1:51	1:39	1:31
1,4	1:146	1:74	1:49	1:37	1:30
1,45	1:141	1:71	1:48	1:36	1:29
1,5	1:137	1:69	1:46	1:35	1:28
1,55	1:132	1:67	1:45	1:34	1:27
1,6	1:128	1:65	1:43	1:33	1:26
1,65	1:124	1:63	1:42	1:32	1:26
1,7	1:121	1:61	1:41	1:31	1:25
1,75	1:117	1:59	1:40	1:30	1:24
1,8	1:114	1:58	1:39	1:29	1:24
1,85	1:111	1:56	1:38	1:29	1:23
1,9	1:108	1:55	1:37	1:28	1:22
1,95	1:105	1:53	1:36	1:27	1:22
2	1:103	1:52	1:35	1:26	1:21
2,05	1:100	1:51	1:34	1:26	1:21
2,1	1:98	1:49	1:33	1:25	1:20
2,15	1:96	1:48	1:33	1:25	1:20
2,2	1:94	1:47	1:32	1:24	1:20
2,25	1:91	1:46	1:31	1:24	1:19
2,3	1:89	1:45	1:30	1:23	1:19
2,35	1:88	1:44	1:30	1:23	1:18
2,4	1:86	1:43	1:29	1:22	1:18
2,45	1:84	1:43	1:29	1:22	1:18
2,5	1:82	1:42	1:28	1:21	1:17
2,55	1:81	1:41	1:28	1:21	1:17
2,6	1:79	1:40	1:27	1:21	1:17
2,65	1:78	1:39	1:27	1:20	1:16
2,7	1:76	1:39	1:26	1:20	1:16
2,75	1:75	1:38	1:26	1:20	1:16
2,8	1:74	1:37	1:25	1:19	1:16
2,85	1:72	1:37	1:25	1:19	1:15
2,9	1:71	1:36	1:24	1:19	1:15
2,95	1:70	1:35	1:24	1:18	1:15
3	1:69	1:35	1:24	1:18	1:15

Tabla C.19 Relaciones de dilución obtenidas para: $f=0.15 - 3$ Hz, aire de dilución a $T=150^{\circ}\text{C}$ y $P=1\text{atm}$, flujo de aire de dilución: 1,5 l/min, gases de escape a $T=300^{\circ}\text{C}$ y $P=1\text{atm}$, Discos con 2, 4, 6, 8 y 10 cavidades.

f(Hz)	RELACIÓN DE DILUCIÓN				
	DISCO 2	DISCO 4	DISCO 6	DISCO 8	DISCO 10
0,15	1:2036	1:1019	1:679	1:510	1:408
0,2	1:1527	1:764	1:510	1:383	1:306
0,25	1:1222	1:612	1:408	1:306	1:245
0,3	1:1019	1:510	1:340	1:255	1:205
0,35	1:873	1:437	1:292	1:219	1:175
0,4	1:764	1:383	1:255	1:192	1:154
0,45	1:679	1:340	1:227	1:171	1:137
0,5	1:612	1:306	1:205	1:154	1:123
0,55	1:556	1:279	1:186	1:140	1:112
0,6	1:510	1:255	1:171	1:128	1:103
0,65	1:471	1:236	1:158	1:118	1:95
0,7	1:437	1:219	1:146	1:110	1:88
0,75	1:408	1:205	1:137	1:103	1:82
0,8	1:383	1:192	1:128	1:96	1:77
0,85	1:360	1:181	1:121	1:91	1:73
0,9	1:340	1:171	1:114	1:86	1:69
0,95	1:322	1:162	1:108	1:81	1:65
1	1:306	1:154	1:103	1:77	1:62
1,05	1:292	1:146	1:98	1:74	1:59
1,1	1:279	1:140	1:94	1:70	1:57
1,15	1:266	1:134	1:89	1:67	1:54
1,2	1:255	1:128	1:86	1:65	1:52
1,25	1:245	1:123	1:82	1:62	1:50
1,3	1:236	1:118	1:79	1:60	1:48
1,35	1:227	1:114	1:76	1:58	1:46
1,4	1:219	1:110	1:74	1:56	1:45
1,45	1:212	1:106	1:71	1:54	1:43
1,5	1:205	1:103	1:69	1:52	1:42
1,55	1:198	1:99	1:67	1:50	1:40
1,6	1:192	1:96	1:65	1:49	1:39
1,65	1:186	1:94	1:63	1:47	1:38
1,7	1:181	1:91	1:61	1:46	1:37
1,75	1:175	1:88	1:59	1:45	1:36
1,8	1:171	1:86	1:58	1:43	1:35
1,85	1:166	1:84	1:56	1:42	1:34
1,9	1:162	1:81	1:55	1:41	1:33
1,95	1:158	1:79	1:53	1:40	1:32
2	1:154	1:77	1:52	1:39	1:32
2,05	1:150	1:75	1:51	1:38	1:31
2,1	1:146	1:74	1:49	1:37	1:30
2,15	1:143	1:72	1:48	1:36	1:29
2,2	1:140	1:70	1:47	1:36	1:29
2,25	1:137	1:69	1:46	1:35	1:28
2,3	1:134	1:67	1:45	1:34	1:28
2,35	1:131	1:66	1:44	1:33	1:27
2,4	1:128	1:65	1:43	1:33	1:26
2,45	1:126	1:63	1:43	1:32	1:26
2,5	1:123	1:62	1:42	1:32	1:25
2,55	1:121	1:61	1:41	1:31	1:25
2,6	1:118	1:60	1:40	1:30	1:24
2,65	1:116	1:59	1:39	1:30	1:24
2,7	1:114	1:58	1:39	1:29	1:24
2,75	1:112	1:57	1:38	1:29	1:23
2,8	1:110	1:56	1:37	1:28	1:23
2,85	1:108	1:55	1:37	1:28	1:22
2,9	1:106	1:54	1:36	1:27	1:22
2,95	1:104	1:53	1:35	1:27	1:22
3	1:103	1:52	1:35	1:26	1:21

Tabla C.20 Relaciones de dilución obtenidas para: $f=0.15 - 3$ Hz, aire de dilución a $T=150^{\circ}\text{C}$ y $P=1\text{atm}$, flujo de aire de dilución: 2 l/min, gases de escape a $T=300^{\circ}\text{C}$ y $P=1\text{atm}$, Discos con 2, 4, 6, 8 y 10 cavidades.

RELACION DE DILUCIÓN					
f (Hz)	DISCO 2	DISCO 4	DISCO 6	DISCO 8	DISCO 10
0,15	1:2714	1:1358	1:905	1:679	1:544
0,2	1:2036	1:1019	1:679	1:510	1:408
0,25	1:1629	1:815	1:544	1:408	1:327
0,3	1:1358	1:679	1:453	1:340	1:272
0,35	1:1164	1:582	1:389	1:292	1:234
0,4	1:1019	1:510	1:340	1:255	1:205
0,45	1:905	1:453	1:302	1:227	1:182
0,5	1:815	1:408	1:272	1:205	1:164
0,55	1:741	1:371	1:248	1:186	1:149
0,6	1:679	1:340	1:227	1:171	1:137
0,65	1:627	1:314	1:210	1:158	1:126
0,7	1:582	1:292	1:195	1:146	1:117
0,75	1:544	1:272	1:182	1:137	1:110
0,8	1:510	1:255	1:171	1:128	1:103
0,85	1:480	1:240	1:161	1:121	1:97
0,9	1:453	1:227	1:152	1:114	1:91
0,95	1:429	1:215	1:144	1:108	1:87
1	1:408	1:205	1:137	1:103	1:82
1,05	1:389	1:195	1:130	1:98	1:79
1,1	1:371	1:186	1:124	1:94	1:75
1,15	1:355	1:178	1:119	1:89	1:72
1,2	1:340	1:171	1:114	1:86	1:69
1,25	1:327	1:164	1:110	1:82	1:66
1,3	1:314	1:158	1:105	1:79	1:64
1,35	1:302	1:152	1:101	1:76	1:61
1,4	1:292	1:146	1:98	1:74	1:59
1,45	1:282	1:141	1:95	1:71	1:57
1,5	1:272	1:137	1:91	1:69	1:55
1,55	1:264	1:132	1:89	1:67	1:54
1,6	1:255	1:128	1:86	1:65	1:52
1,65	1:248	1:124	1:83	1:63	1:50
1,7	1:240	1:121	1:81	1:61	1:49
1,75	1:234	1:117	1:79	1:59	1:48
1,8	1:227	1:114	1:76	1:58	1:46
1,85	1:221	1:111	1:74	1:56	1:45
1,9	1:215	1:108	1:72	1:55	1:44
1,95	1:210	1:105	1:71	1:53	1:43
2	1:205	1:103	1:69	1:52	1:42
2,05	1:200	1:100	1:67	1:51	1:41
2,1	1:195	1:98	1:66	1:49	1:40
2,15	1:190	1:96	1:64	1:48	1:39
2,2	1:186	1:94	1:63	1:47	1:38
2,25	1:182	1:91	1:61	1:46	1:37
2,3	1:178	1:89	1:60	1:45	1:36
2,35	1:174	1:88	1:59	1:44	1:36
2,4	1:171	1:86	1:58	1:43	1:35
2,45	1:167	1:84	1:56	1:43	1:34
2,5	1:164	1:82	1:55	1:42	1:34
2,55	1:161	1:81	1:54	1:41	1:33
2,6	1:158	1:79	1:53	1:40	1:32
2,65	1:155	1:78	1:52	1:39	1:32
2,7	1:152	1:76	1:51	1:39	1:31
2,75	1:149	1:75	1:50	1:38	1:31
2,8	1:146	1:74	1:49	1:37	1:30
2,85	1:144	1:72	1:49	1:37	1:30
2,9	1:141	1:71	1:48	1:36	1:29
2,95	1:139	1:70	1:47	1:35	1:29
3	1:137	1:69	1:46	1:35	1:28

ANEXO D

TABLAS Y GRAFICOS PARA EL DISEÑO MECÁNICO

POLITETRAFLUORETILENO VIRGEN (TEFLON)				PTFE
PROPIEDADES MECANICAS A 23°C	UNIDAD	ASTM	DIN	VALORES
PORCENTAJE EN PESO DE CARGA	%			0
PESO ESPECIFICO	Grs/cm3	D-792	53479	2.13 A 2.21
RES. TRACCION (DEF. 3% Y A ROTURA)	Kg/cm ²	D-638	53455	70 - 210
RES. A COMPRESION (DEF. 1% y 5%)	Kg/cm ²	D-695	53454	44 - 100
APLASTAMIENTO A 140 Kg/cm ² DURANTE 24 Hs.	%	D-621		14,3
ALARGAMIENTO A LA ROTURA (MINIMA)	Kg/cm ²	D-638	53453	200
RES. AL CHOQUE SIN ENTALLA	Kg.cm/cm ²	D-256	53455	NO ROMPE
DUREZA	Shore D	D-2240	53505	50 A 55
COEF. DE ROCE ESTATICO S/ACERO		D-1894		0.06 A 0.09
COEF. DE ROCE DINAMICO S/ACERO		D-1894		0,13
RES. AL DESGASTE POR ROCE				MUY BAJA
P x V LIMITE PARA VEL. 3 Mts/Min	Kg/cm ² xm/min			26
P x V LIMITE PARA VEL. 30 Mts/Min	Kg/cm ² xm/min			39
P x V LIMITE PARA VEL. 120 Mts/Min	Kg/cm ² xm/min			45
P x V PARA DESG. 0.13 mm EN 1000 Hs. S/LUB.	Kg/cm ² xm/min			0,43
VEL. DE DESLIZAMIENTO MAX. RECOMENDADA	m/min			3
PROPIEDADES TERMICAS	UNIDAD	ASTM	DIN	VALORES
TEMP. DE USO CONTINUO	°C			-260 A 260
COEF. DE DILAT. LINEAL DE 23 A 100°C	Por °C	D-696	53328	0.000125
COEF. DE DILAT. LINEAL DE 23 A 150°C	Por °C	D-696	53328	0.000135
COEF. DE DILAT. LINEAL DE 23 A 260°C	Por °C	D-696	53328	0.000175
COEF. DE CONDUCCION TERMICA	Kcal/m.h.°C	C-177	52612	0.24
PROPIEDADES ELECTRICAS	UNIDAD	ASTM	DIN	VALORES
CONSTANTE DIELECTRICA A 60 HZ		D-150	53483	2,1
CONSTANTE DIELECTRICA A 1 MHZ		D-150	53483	2,1
ABSORCION DE HUMEDAD AL AIRE	%	D-570	53472	0
RESISTENCIA SUPERFICIAL	Ohms	D-257	53482	> 10 A LA 16
RESISTENCIA VOLUMETRICA	Ohms-cm	D-257	53482	> 10 A LA 17
RIGIDEZ DIELECTRICA EN AIRE	Kv/mm	D-149		59
PROPIEDADES QUIMICAS Y OTRAS.	OBSERVACIONES			
RESISTENCIA A HIDROCARBUROS	EXCEL			
RESISTENCIA A ACIDOS DEBILES A TEMP. AMBIENTE	EXCEL			
RESISTENCIA A ALCALIS DEBILES A TEMP. AMBIENTE	EXCEL			
RESISTENCIA A PROD. QUIMICOS DEFINIDOS	CASI TODOS			
EFFECTO DE LOS RAYOS SOLARES	NO			
APROBADO PARA CONTACTO CON ALIMENTOS	SI			
COMPORTAMIENTO A LA COMBUSTION	NO ARDE			

PROPAGACION DE LLAMA	NULA
----------------------	------

El PTFE virgen tiene la mejor resistencia química de todos los plásticos, muy buenas propiedades eléctricas y bajo coeficiente de roce. Con el agregado de diferentes cargas se mejoran sus propiedades mecánicas y térmicas.

El material mencionado en la presente hoja técnica sólo es procesado por Industrias JQ. Por esto, la Información que consta en ella es un resumen de los resultados de los ensayos efectuados por Industrias JQ y de los efectuados por el fabricante de la materia prima. Esta información está sujeta a cambios sin previo aviso.

Los valores arriba indicados son de referencia. Pueden utilizarse como orientación para el diseño, pero se deja a criterio del usuario la necesidad de validar esos valores en función del uso que se dará al producto final.

Teflon® es marca registrada de DuPont para su producto PTFE. Sólo DuPont fabrica Teflon®.

Rev. 01.

Tabla 7-5

Parámetros en el factor de la condición superficial de Marin

Acabado superficial	$k_a = \alpha S_u^b \text{LN}(1, C)$			Coeficiente de variación, C
	α		b	
	kpsi	MPa		
Esmerilado*	1.34	1.58	-0.086	0.120
Maquinado o laminado en frío	2.67	4.45	-0.265	0.058
Laminado en caliente	14.5	56.1	-0.719	0.110
Como sale de forja	39.8	271	-0.995	0.145

*Debido a la amplia dispersión en los datos de superficie esmerilado, una función alterna es $k_a = 0.878 \text{LN}(1, 0.120)$. Nota: S_u en kpsi o MPa.

EJEMPLO 7-2 Un acero tiene una resistencia última media de 520 MPa y una superficie maquinada. Calcule k_a .

Solución De la tabla 7-5,

$$k_a = 4.45(520)^{-0.265} \text{LN}(1, 0.058)$$

$$k_a = 4.45(520)^{-0.265} (1) = 0.848$$

$$\sigma_{ia} = 4.45(520)^{-0.265} (0.058) = 0.049$$

por tanto $k_a \sim \text{LN}(0.848, 0.049)$. El valor determinístico simplemente es 0.848, la media.

Factor de tamaño k_b

El factor de tamaño se evaluó en 133 conjuntos de puntos de datos.¹⁷ Los resultados para flexión y torsión se expresan como

$$k_b = \begin{cases} (d/0.3)^{-0.107} = 0.879d^{-0.107} & 0.11 \leq d < 2 \text{ pulg} \\ 0.859 - 0.021 25d & 2 < d \leq 10 \text{ pulg} \\ (d/7.62)^{-0.107} = 1.24d^{-0.107} & 2.79 \leq d \leq 51 \text{ mm} \\ 0.859 - 0.000 837d & 51 < d \leq 254 \text{ mm} \end{cases} \quad (7-10)$$

Para carga axial no hay efecto de tamaño, por tanto

$$k_b = 1 \quad (7-11)$$

pero véase k_c .

Uno de los problemas que se originan al emplear la ecuación (7-10) es qué hacer cuando una barra redonda en flexión no está girando, o cuándo se utiliza una sección no circular. Por ejemplo, ¿cuál es factor de tamaño para una barra de 6 mm de espesor y 40 mm de ancho? En el método que se analizará aquí se emplea una *dimensión efectiva* d_e obtenida al igualar el volumen de material sometido a esfuerzo igual o superior a 95% del esfuerzo máximo con el mismo volumen en la probeta en viga rotativa.¹⁸ Resulta que

¹⁷ Mischke, op. cit., Tabla 3. Los datos adicionales modifican un poco el exponente; se puede considerar como -0.11.

¹⁸ Véase R. Kuguel, "A Relation between Theoretical Stress Concentration Factor and Fatigue Notch Factor Deduced from the Concept of Highly Stressed Volume", *Proc. ASTM*, vol. 61, 1961, pp. 732-748.

de carga axial y torsional, por tanto en estos casos k_c no es constante. Los valores promedio se muestran en la última columna de la tabla 7-7 y como notas de pie de página en las tablas 7-8 y 7-9. En la tabla 7-10 se observa la influencia de las clases de materiales sobre el factor de carga k_c . La teoría de la energía de distorsión predice que $(k_c)_{\text{torsión}} = 0.577$ para materiales donde se aplica la teoría de la energía de distorsión.

Tabla 7-7

Parámetros en el factor de carga de Marin

Modo de carga	$k_c = \alpha \bar{S}_{UT}^{\beta} \text{LN}(1, C)$				Promedio k_c
	α		β	C	
	kpsi	MPa			
Flexión	1	1	0	0	1
Axial	1.23	1.43	-0.078	0.125	0.85
Torsión	0.328	0.258	0.125	0.125	0.59

Tabla 7-8

Factor de carga promedio de Marin para carga axial

S_{UT} kpsi	k_c
50	0.907
100	0.860
150	0.832
200	0.814

*Anotación promedio 0.85.

Tabla 7-9

Factor de carga promedio de Marin para carga de torsión

S_{UT} kpsi	k_c
50	0.535
100	0.583
150	0.614
200	0.636

*Anotación promedio 0.59.

Tabla 7-10

Factor de carga de torsión promedio k_c de Marin para varios materiales

Material	Intervalo	n	\bar{k}_c	σ_{k_c}
Aceros forjados	0.52-0.69	31	0.60	0.04
Al forjado	0.43-0.74	13	0.55	0.09
Cu y su aleación forjada	0.41-0.67	7	0.56	0.10
Mg y su aleación forjada	0.49-0.61	2	0.54	0.12
Titanio	0.37-0.57	3	0.48	0.12
Fundición de hierro	0.79-1.01	9	0.90	0.07
Al fundido, Mg y su aleación	0.71-0.91	5	0.85	0.09

Fuente: La tabla es una extensión de P. G. Forrest, *Fatigue of Metals*, Pergamon Press, 1962, Tabla 17, p. 110, con desviaciones estándar estimadas del intervalo y tamaño de la muestra mediante la tabla A-1 en J. B. Kennedy y A. M. Neville, *Basic Statistical Methods for Engineers and Scientists*, 3a.ed., Harper & Row, Nueva York, 1986, pp. 54-55.

Tabla 7-11

Efecto de la temperatura de operación en la resistencia a la tensión de acero.*
 (S_T = resistencia a la tensión a temperatura ambiente,
 S_{RT} = resistencia a la tensión a temperatura ambiente;
 $0.099 \leq \hat{\sigma} \leq 0.110$.)

Temperatura, °C	S_T/S_{RT}	Temperatura, °F	S_T/S_{RT}
20	1.000	70	1.000
50	1.010	100	1.008
100	1.020	200	1.020
150	1.025	300	1.024
200	1.020	400	1.018
250	1.000	500	0.995
300	0.975	600	0.963
350	0.943	700	0.927
400	0.900	800	0.872
450	0.843	900	0.797
500	0.768	1 000	0.698
550	0.672	1 100	0.567
600	0.549		

* Fuente de datos: Fig. 5-11.

La tabla 7-11 se obtuvo a partir de la figura 5-11 empleando sólo los datos de la resistencia a la tensión. Note que la tabla representa 145 ensayos de 21 diferentes aceros al carbono y aleados, y que la desviación estándar máxima sólo es 0.110. Un ajuste de la curva polinomial de 4° orden para los datos subyacentes de la figura 5-11 proporciona un lugar geométrico medio, que se multiplica por $\text{LN}(1, 0.11)$ para dar k_d como

$$k_d = \left[0.975 + 0.432(10^{-3})t_f - 0.115(10^{-5})t_f^2 + 0.104(10^{-8})t_f^3 - 0.595(10^{12})t_f^4 \right] \text{LN}(1, 0.11) \quad (7-23)$$

donde $70 \leq t_f \leq 1\,000^\circ\text{F}$

Se originan dos tipos de problemas cuando se toma en cuenta la temperatura. Si se conoce el límite de la resistencia a la fatiga de una viga rotativa a temperatura ambiente, entonces se emplea

$$k_d = \frac{S_T}{S_{RT}} \quad (7-24)$$

de la tabla 7-11 y se procede como es usual. Si no se conoce el límite de la resistencia a la fatiga de una viga rotativa, entonces se calcula con la ecuación (7-4) y la resistencia a la tensión con temperatura corregida obtenida mediante el factor de la tabla 7-11. Entonces use $k_d = 1$.

EJEMPLO 7-5

Un acero 1035 presenta una resistencia última a la tensión media de 70 kpsi y se va a emplear en una parte que operará a una temperatura de 450°F. Estime el factor de modificación de la temperatura de Marin y (S'_{450}) si

- El límite de la resistencia a la fatiga a temperatura ambiente mediante ensayo está dado por (S'_{70}) = $\text{LN}(39.0, 1.76)$ kpsi.
- Sólo se conoce la resistencia última a la tensión media a temperatura ambiente.

Solución: a) (S'_{450}) = $k_d(S'_{70})$. Primero, de la ecuación (7-23),

Tabla 7-12Parámetros de Heywood para \sqrt{a} y C_{kf} para aceros

Característica	\sqrt{a}		C_{kf}
	\bar{S}_{ult} kpsi	\bar{S}_{ult} Mpa	
Agujero transversal	$5/\bar{S}_{ult}$	$174/\bar{S}_{ult}$	0.10
Hombro	$4/\bar{S}_{ult}$	$139/\bar{S}_{ult}$	0.11
Ranura	$3/\bar{S}_{ult}$	$104/\bar{S}_{ult}$	0.15

ras se especifican en la tabla 7-12. Una vez que se describe K_f , q también se puede cuantificar mediante el conjunto de ecuaciones (7-26).

La ecuación modificada de Neuber (según Heywood) proporciona el factor de concentración de esfuerzo a la fatiga K_f como

$$K_f = \frac{K_r \text{LN}(1, C_{kf})}{1 + \frac{2}{\sqrt{r}} \frac{K_r - 1}{K_r} \sqrt{a}} \quad (7-27)$$

donde K_r está distribuida de manera log-normal, r es el radio de la muesca y \sqrt{a} es una función de la resistencia última a la tensión media \bar{S}_{ult} . En la tabla 7-12 se dan los valores de \sqrt{a} para aceros. Las ecuaciones (7-25), (7-26) y (7-27) tienen sus contrapartes en cortante, si se emplean q_r , K_{rs} y K_{fs} .

El factor de concentración de esfuerzo a la fatiga K_f se aplica al esfuerzo nominal σ_0 como $K_f \sigma_0$, como un aumento del esfuerzo (se prefiere el trabajo porque en situaciones de esfuerzos combinados, el valor de K_f varía para cada componente) o como un factor de reducción de la resistencia $k_e = 1/K_f$ (no se produce pero se usa cuando sólo existe una componente de esfuerzo). Ambos, K_f y k_e , están distribuidos de manera log-normal con el mismo coeficiente de variación. Para métodos estocásticos se prefiere la ecuación (7-27) a la ecuación b) de la sección 5-20, puesto que tiene una base de datos estadísticos mucho mayor. Cuando σ_0 se descompone en una componente de la amplitud σ_{a0} y una componente constante σ_{m0} , K_f se aplica en ambas, siempre y cuando no ocurra fluencia en la muesca, lo cual se debe verificar.

El siguiente resumen práctico del factor de concentración de esfuerzo se proporciona para una fácil referencia.

Resumen del factor de concentración de esfuerzo	
Material frágil	
Estático:	Establezca $K_r = K_{rs}$, $K_{fs} = K_{fs}$
Dinámico:	Establezca $K_r = K_{rs}$, $K_{fs} = K_{fs}$
Material dúctil:	
Estático:	Establezca $K_r = K_{rs} = 1$
Dinámico:	Establezca $K_r = K_{rs}$, $K_{fs} = K_{fs}$, $K_f = f_1(K_r, q)$, $K_{fs} = f_2(K_{rs}, q_s)$
Aplique en ambas σ_{a0} y σ_{m0} siempre y cuando no ocurra fluencia.	

EJEMPLO 7-6 Un eje de acero tiene una resistencia última a la tensión media de 690 MPa y un hombro con un radio de filete de 3 mm que conecta un diámetro de 32 mm con uno de 38 mm.

Tabla 8-1

Diámetros y áreas de roscas métricas de paso basto y fino. (Todas las dimensiones en milímetros)*

Diámetro mayor nominal d	Serie de paso basto			Serie de paso fino		
	Paso p	Área de esfuerzo de tensión A_t	Área al diámetro menor A_m	Paso p	Área de esfuerzo de tensión A_t	Área al diámetro menor A_m
1.6	0.35	1.27	1.07			
2	0.40	2.07	1.79			
2.5	0.45	3.39	2.98			
3	0.5	5.03	4.47			
3.5	0.6	6.78	6.00			
4	0.7	8.78	7.75			
5	0.8	14.2	12.7			
6	1	20.1	17.9			
8	1.25	36.6	32.8	1	39.2	36.0
10	1.5	58.0	52.3	1.25	61.2	56.3
12	1.75	84.3	76.3	1.25	92.1	86.0
14	2	115	104	1.5	125	116
16	2	157	144	1.5	167	157
20	2.5	245	225	1.5	272	259
24	3	353	324	2	384	365
30	3.5	561	519	2	621	596
36	4	817	759	2	915	884
42	4.5	1 120	1 050	2	1 260	1 230
48	5	1 470	1 380	2	1 670	1 630
56	5.5	2 030	1 910	2	2 300	2 250
64	6	2 680	2 520	2	3 030	2 980
72	6	3 460	3 280	2	3 860	3 800
80	6	4 340	4 140	1.5	4 850	4 800
90	6	5 590	5 360	2	6 100	6 020
100	6	6 990	6 740	2	7 560	7 470
110				2	9 180	9 080

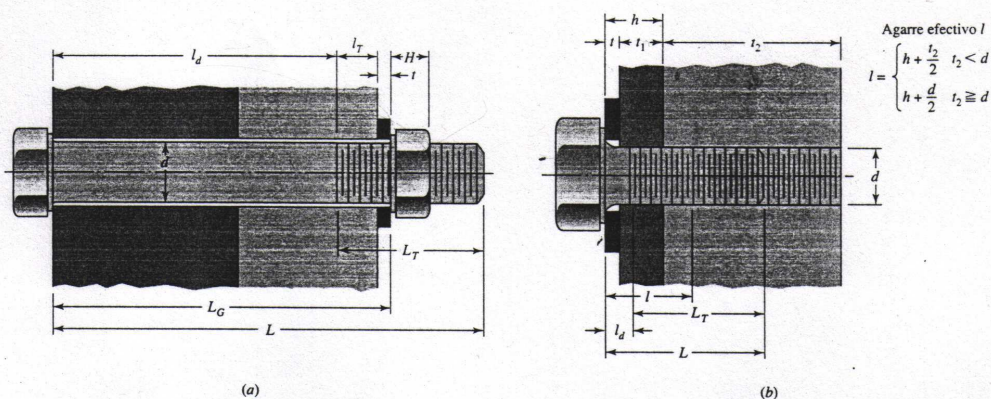
* Las ecuaciones y los datos utilizados para elaborar esta tabla se obtuvieron de la norma ANSI B1.1-1974 y B18.3.1-1978. El diámetro menor se determinó mediante la ecuación $d_m = d - 1.226 869p$, y el diámetro de paso a partir de $d_m = d - 0.649 519p$. La media del diámetro de paso y el diámetro menor se usaron para calcular el área de esfuerzo de tensión.

Las roscas métricas se describen escribiendo el diámetro y el paso en milímetros, en ese orden. Así, M12 \times 1.75 es una rosca que tiene un diámetro mayor nominal de 12 mm y un paso de 1.75 mm. Note que la letra M, que precede al diámetro, es la clave para la designación métrica.

En la figura 8-3a y b se ilustran las roscas cuadradas y Acme, respectivamente, que se emplean cuando se va a transmitir potencia. En la tabla 8-3 se listan los pasos preferidos para roscas Acme de serie en pulgadas. Sin embargo, se usan otros pasos y a menudo se hace, puesto que no existe la necesidad de una norma para tales roscas.

Con frecuencia se hacen modificaciones a las roscas Acme y las cuadradas. Por ejemplo, la rosca cuadrada algunas veces se modifica cortando el espacio entre los hilos para incluir un ángulo de 10 a 15°. Lo anterior no es difícil, puesto que de todos modos dichas roscas a menudo se cortan mediante una herramienta con una sola punta de corte; la modificación retiene en gran medida la alta eficiencia inherente en las roscas cuadradas y simplifica el corte. Las roscas Acme algunas veces se modifican hasta una forma achatada haciendo los hilos más cortos, lo cual resulta en un diámetro menor más largo y en un tornillo un poco más resistente.

Tabla 8-7
Procedimiento sugerido para determinar la rigidez del sujetador



Dado el diámetro del sujetador d y el paso p o el número de hilos

Agarre es espesor L_G

Espesor de la arandela de la tabla E-32 o E-33
Longitud roscada L_T
Serie en pulgadas:

$$L_T = \begin{cases} 2D + \frac{1}{4} \text{ pulg}, & L \leq 6 \text{ pulg} \\ 2D + \frac{1}{2} \text{ pulg}, & L > 6 \text{ pulg} \end{cases}$$

Serie métrica:

$$L_T = \begin{cases} 2D + 6 \text{ mm}, & L < 125, D \leq 48 \text{ mm} \\ 2D + 12 \text{ mm}, & 125 < L < 200 \text{ mm} \\ 2D + 25 \text{ mm}, & L > 200 \text{ mm} \end{cases}$$

Longitud del sujetador: $L > L_G + H$

Longitud de la parte útil sin rosca: $l_d = L - L_T$
Longitud de la parte roscada: $l_T = L_G - l_d$

Redondee usando la tabla E-17*

Área de la parte sin rosca:

$$A_d = \pi d^2 / 4$$

Área de la parte roscada:

$$A_T = A_r, \text{ tabla 8-1 o 8-2}$$

Rigidez del sujetador:

$$k_b = \frac{A_d A_T E}{A_d l_T + A_T l_d}$$

$$\text{Agarre efectivo } l = \begin{cases} h + t_2/2, & t_2 < d \\ h + d/2, & t_2 \geq d \end{cases}$$

Longitud del sujetador: $L > h + 1.5d$

Longitud de la parte útil sin rosca: $l_d = L - L_T$
Longitud de la parte útil roscada: $l_T = l - l_d$

* Los pernos y los tornillos de cabeza quizá no se fabriquen en todas las longitudes preferidas que se listan en la tabla E-17. Los sujetadores largos tal vez no estén disponibles en fracciones de pulgada o en longitudes en milímetros terminando en un dígito que no sea cero. Verifique con su proveedor de pernos su disponibilidad.

realizaron un estudio del elemento finito para este problema. Los resultados de la figura 8-16, concuerdan con la recomendación de $\alpha = 30^\circ$, coincidiendo exactamente con la proporción $d/l = 0.4$. Además, ofrecieron un ajuste de la curva exponencial de la forma

$$\frac{k_m}{Ed} = A \exp(Bd/l) \tag{8-23}$$

con las constantes A y B definidas en la tabla 8-8. Para caras estándares de la arandela y elementos del mismo material, la ecuación (8-23) proporciona un cálculo simple para la rigidez del elemento k_m . A partir de las ecuaciones, la ecuación (8-20) sigue siendo la base para la aproximación del problema.

Figura 8-16

Gráfica adimensional de la rigidez versus proporción dimensional de los elementos de una unión con pernos, donde se muestra la precisión relativa de los métodos de Rotscher, Mischke y Motosh, comparada con un análisis del elemento finito (AEF) realizado por Wileman, Choudury y Green. (Véase el pie de la tabla 8-8 para más información.)

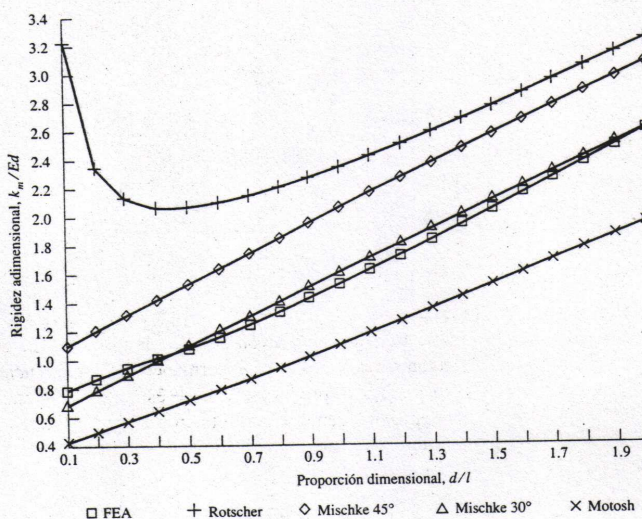


Tabla 8-8








Parámetros de la rigidez de varios materiales de elementos

Fuente: J. Wileman, M. Choudury, and I. Green, "Computation of Member Stiffness in Bolted Connections", *Trans. ASME, J. Mech. Design*, vol. 113, diciembre 1991, pp. 432-437.

Material empleado	Relación de poisson	GPa de elasticidad	Módulo Mpsi	A	B
Acero	0.291	207	30.0	0.787 15	0.628 73
Aluminio	0.334	71	10.3	0.796 70	0.638 16
Cobre	0.326	119	17.3	0.795 68	0.635 53
Fundición gris	0.211	100	14.5	0.778 71	0.616 16
Expresión general				0.789 52	0.629 14

Tabla 8-11

Clases métricas de propiedad mecánica para pernos, tornillos y birlos de acero*

Clase de propiedad	Intervalo de tamaños, inclusive	Resistencia mínima de prueba, † MPa	Resistencia de tensión mínima, † MPa	Resistencia mínima de fluencia, † MPa	Material	Marca en la cabeza
4.6	M5-M36	225	400	240	Acero al bajo o medio carbono	
4.8	M1.6-M16	310	420	340	Acero al bajo o medio carbono	
5.8	M5-M24	380	520	420	Acero al bajo o medio carbono	
8.8	M1.6-M36	600	830	660	Acero al medio carbono, T y R	
9.8	M1.6-M16	650	900	720	Acero al medio carbono, T y R	
10.9	M5-M36	830	1 040	940	Acero martensítico al bajo carbono, T y R	
12.9	M1.6-M36	970	1 220	1 100	Acero de aleación, T y R	

* La longitud de la rosca para pernos y tornillos de cabeza es

$$L_r = \begin{cases} 2d+6 & L \leq 125 \\ 2d+12 & 125 < L \leq 200 \\ 2d+25 & L > 200 \end{cases}$$

donde L es la longitud del perno. La longitud de la rosca para pernos estructurales es ligeramente menor que la indicada.

† Las resistencias mínimas son las resistencias excedidas por 99% de los sujetadores.

Vale la pena hacer notar que todos los pernos con especificación de grado fabricados en Estados Unidos llevan una marca o un logotipo del fabricante, además de la marca de grado, sobre la cabeza del perno, las cuales confirman que el perno cumple o excede las especificaciones. Si no se encuentran esas marcas, quizás el perno sea importado; para esa clase de pernos no existe la obligación de cumplir con las especificaciones.

Tabla 8-12

Cálculo de las rigideces del perno y del elemento.
Elementos de acero
sujetados mediante un perno
de acero $\frac{1}{2}$ "-13 NC

$$C = \frac{k_b}{k_b + k_m}$$

Agarre del perno, pulg	Rigideces, Mlb/pulg			
	k_b	k_m	C	1 - C
2	2.57	12.69	0.168	0.832
3	1.79	11.33	0.136	0.864
4	1.37	10.63	0.114	0.886

y la carga resultante en los elementos conectados corresponde a

$$F_m = P_m - F_i = \frac{k_m P}{k_b + k_m} - F_i = (1 - C)P - F_i \quad F_m < 0 \quad (8-25)$$

Por supuesto, dichos resultados sólo son válidos siempre y cuando permanezca alguna carga de sujeción en los elementos, lo cual se indica por el calificador de las ecuaciones.

La tabla 8-12 se incluye para proporcionar cierta información de los valores relativos de las rigideces encontradas. El agarre sólo contiene dos elementos, ambos de acero y sin arandelas. Las relaciones C y $1 - C$ representan los coeficientes de P en las ecuaciones (8-24) y (8-25), respectivamente; además, describen la proporción de la carga externa tomada por el perno y por los elementos. En todos los casos, los elementos toman más de 80% de la carga externa. Piense qué tan importante es esto cuando se presenta una carga por fatiga. También note que hacer el agarre más largo causa que los elementos tomen un porcentaje aún mayor de la carga externa.

8-8 Relación del par de torsión del perno con la tensión del perno

Después de haber aprendido que una precarga alta es muy deseable en conexiones con pernos importantes, enseguida se deben considerar los medios para asegurar que la precarga en realidad se desarrolle cuando se ensamblen las partes.

Si la longitud global del perno se mide en verdad con un micrómetro cuando se ensambla, la elongación del perno, debida a la precarga F_i , se calcula con la fórmula $\delta = F_i l / (AE)$. Luego, la tuerca simplemente se aprieta hasta que el perno se alarga a través de la distancia δ , asegurando así que se logre la precarga deseada.

Por lo general, la elongación de un tornillo no se puede medir, porque el extremo roscado a menudo se encuentra en un agujero ciego. También es impráctico en muchos casos medir la elongación del perno. En tales casos hay que estimar el par de torsión de la llave que se requiere para desarrollar la precarga especificada. Así, se utiliza una llave dinamométrica, un dispositivo neumático de impacto o el método de giro de la tuerca.

La llave dinamométrica tiene una carátula incorporada que indica el par de torsión adecuado.

En las llaves de impacto, la presión del aire se ajusta de manera que la llave se detiene cuando se obtiene el par de torsión adecuado; o en algunas llaves el aire se corta de manera automática al alcanzar el par de torsión deseado.

El método de giro de la tuerca requiere que primero se defina el significado de apriete firme. La condición de *apriete firme* se define como el apriete que se logra con algunos golpes de una llave de impacto, o bien es el esfuerzo total realizado por una persona con una llave ordinaria. Cuando la condición de ajuste firme se obtiene, todos los giros adicionales desarrollan tensión útil en el perno. El método de giro de la tuerca requiere que se calcule el número fraccional de vueltas necesario para desarrollar la precarga requerida, a partir de la condición de apriete firme. Por ejemplo, para pernos estructurales pesados de cabeza hexagonal, la especificación de giro de la tuerca estable-

Tabla 8-14

Distribución de la precarga F_i para 10 ensayos de pernos lubricados con apriete a $90 \text{ N} \cdot \text{m}$

30.3,	32.5,	32.5,	32.9,	32.9,	33.8,	34.3,	34.7,	37.4,	40.5
-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	------

* Valor medio $\bar{F}_i = 34.18 \text{ kN}$. Desviación estándar $\sigma = 2.88 \text{ kN}$.

Las medias obtenidas de las dos muestras son casi idénticas, aproximadamente 34 kN; mediante la ecuación (8-27), se tiene que, para ambas muestras, $K = 0.208$.

Bowman Distribution, un gran fabricante de sujetadores, recomienda los valores proporcionados en la tabla 8-15. En este libro se aplicarán dichos valores y se usará $K = 0.2$ cuando no se indique la condición del perno.

Ahora se analizará con mayor detalle la naturaleza de los esfuerzos en el perno inducidos por tensión. La ecuación (8-24) se escribe sin la carga en la unión P , haciendo P igual a cero, para obtener

$$F_b = F_i = \sigma A_t$$

donde F_b , F_i y σ son variables aleatorias. La variabilidad del esfuerzo en el perno σ se transmite a la tensión inicial F_b . El coeficiente de variación del esfuerzo iguala al de F_i , es decir, $C_\sigma = C_{F_i}$. Aunque resulta mejor que todos los sujetadores se reemplacen cuando se desensamble una unión atornillada, siempre se presentan estas circunstancias tentadoras:

- Los sujetadores de reemplazo no han llegado o se encuentran en otro lugar.
- Los sujetadores usados, cuando se limpian con algún solvente, lucen bien.
- Con la presión del apuro, ¿quién se dará cuenta?

El diseñador prudente no cae en estas tentaciones porque la unión reensamblada es *diferente*, debido a la deformación permanente en los sujetadores, para la cual la relación par de torsión-tensión no se conoce. Además, para el mismo par de torsión, la tensión inicial será menor que la que el diseñador especificó.

La integridad del diseño se ha desplazado a manos de otra persona. Para prevenir esta circunstancia, el diseñador precavido especifica un par de torsión de apriete que proporcione una probabilidad aceptablemente baja de causar distorsión permanente en la rosca de un perno o de una tuerca. La evaluación de la probabilidad requiere una interferencia esfuerzo-resistencia. El par de torsión de apriete de precarga del perno está dado por

$T = KdF_i = Kd\xi_1 S_{0.99} A_t \quad (\text{unidades acostumbradas en ingeniería})$ $T = Kd\xi_1 S_{0.99} A_t (10^{-3}) \quad (\text{unidades SI})$	(8-28)
--	--------

En unidades SI, d está en mm, $S_{0.99}$ en MPa, A_t en mm^2 , y T en $\text{N} \cdot \text{m}$. El parámetro ξ_1 representa la fracción del esfuerzo de prueba que el perno siente cuando se aprieta,

Tabla 8-15

Factores del par de torsión K para uso con la ecuación (8-27)

Condición del perno	K
Sin recubrimiento, acabado negro	0.30
Galvanizado	0.20
Lubricado	0.18
Con recubrimiento de cadmio	0.16
Con Anti-Seize Bowman	0.12
Con tuercas Bowman-Grip	0.09

Tabla 8-17

Resistencias a la fatiga completamente corregidas para pernos y tornillos con roscas laminadas*

Grado o clase	Intervalo de tamaños	Resistencia a la fatiga
SAE 5	$\frac{1}{2}$ -1 pulg	18.6 kpsi
	$1\frac{1}{8}$ - $1\frac{1}{2}$ pulg	16.3 kpsi
SAE 7	$\frac{1}{4}$ - $1\frac{1}{2}$ pulg	20.6 kpsi
SAE 8	$\frac{1}{4}$ - $1\frac{1}{2}$ pulg	23.2 kpsi
ISO 8.8	M1.6-M3.6	129 MPa
ISO 9.8	M1.6-M1.6	140 MPa
ISO 10.9	M5-M3.6	162 MPa
ISO 12.9	M1.6-M3.6	190 MPa

* Carga axial, repetidamente aplicada, completamente corregida.

esfuerzo, por tanto $K_f \sigma_{a0}$ es σ_a . La mella en la raíz del entalle y el esfuerzo en el plano del círculo de la raíz es nominal, excepto por un pequeño flujo plástico (que se endurece por deformación) en el primer ciclo si el esfuerzo es suficientemente alto en el entalle. Lo anterior equivale al empleo de $K_{fm} = 1$. De manera curiosa, el modelo de Dowling proporciona un resultado similar.

En la unión se desea que el perno brinde seguridad contra la fatiga y que su precarga sea un poco menor que la deformación permanente del sujetador. El lugar geométrico de falla de Gerber es

$$\frac{S_a}{S_e} + \left(\frac{S_m}{S_{ut}} \right)^2 = \frac{K_f n \sigma_{a0}}{S_e} + \left(\frac{n \sigma_{m0}}{S_{ut}} \right)^2 = \frac{n \sigma_{a0}}{S_e / K_f} + \left(\frac{n \sigma_{m0}}{S_{ut}} \right)^2 = 1$$

Note que el factor de seguridad *no se afecta* por K_f aplicada a σ_{a0} o por la resistencia a la fatiga S_e dividida entre K_f . Desde el punto de vista numérico, no es de consecuencia. El último método se considera como una resistencia a la fatiga *completamente corregida*. En este libro se emplearán esfuerzos nominales en las ecuaciones. Todas las intersecciones de coordenadas en el diagrama de fatiga del diseñador estarán presentes (excepto S_e , que está completamente corregida).

Una aplicación común de la unión con pernos a tensión se observa en dispositivos como los cilindros a presión, donde la carga externa varía de un extremo inferior de $P = 0$ a uno superior de P , por perno; ésta es una situación de carga aplicada de forma repetida. Las componentes de la amplitud y de la carga constante, P_a y P_m , son la mitad de la carga mayor P , o $P/2$. De la ecuación del perno, la expresión del esfuerzo corresponde a

$$\sigma_b = \frac{CP}{A_t} + \frac{F_i}{A_t}$$

se escriben expresiones para $(\sigma_b)_{\min}$ y $(\sigma_b)_{\max}$ como sigue:

$$\sigma_a = \frac{1}{2} (\sigma_{\max} - \sigma_{\min}) = \frac{1}{2} \left(\frac{CP}{A_t} + \frac{F_i}{A_t} - \frac{F_i}{A_t} \right) = \frac{CP}{2A_t} \quad (8-45)$$

$$\sigma_m = \frac{1}{2} (\sigma_{\max} + \sigma_{\min}) = \frac{1}{2} \left(\frac{CP}{A_t} + \frac{F_i}{A_t} + \frac{F_i}{A_t} \right) = \frac{CP}{2A_t} + \frac{F_i}{A_t} \quad (8-46)$$

En el diagrama de fatiga del diseñador, la línea de carga está dada por

$$\sigma_a = \sigma_m - \sigma_i \quad (8-47)$$

El siguiente problema consiste en encontrar las componentes de la resistencia S_a y S_m del lugar geométrico de falla. (Véase la figura 8-21.) Las componentes dependen del lugar geométrico de falla:

Tabla E-20

Resistencias mínimas determinísticas a la tensión y a la cedencia ASTM para algunos aceros laminados en caliente (HR) y estirados en frío (CD).

[Las resistencias listadas son valores ASTM mínimos estimados en el intervalo de tamaños de 18 a 32 mm ($\frac{3}{4}$ a 1 $\frac{1}{4}$ pulg). Estas resistencias resultan adecuadas para usarse con el factor de diseño definido en la sección 1-9, a condición que los materiales se conformen a los requisitos ASTM A6 o A568 o se requieran en las especificaciones de compra. Recuerde que un sistema de numeración no es una especificación. Véase la tabla 1-1 para ciertos aceros ASTM]

Fuente: 1986 SAE Handbook, p. 2.15.

1	2	3	4	5	6	7	8
UNS núm.	Núm. SAE y/o AISI	Procesamiento	Resistencia a la tensión, MPa (kpsi)	Resistencia a la cedencia, MPa (kpsi)	Elongación en 2 pulg. %	Reducción en área, %	Dureza Brinell
G10060	1006	HR	300(43)	170(24)	30	55	86
		CD	330(48)	280(41)	20	45	95
G10100	1010	HR	320(47)	180(26)	28	50	95
		CD	370(53)	300(44)	20	40	105
G10150	1015	HR	340(50)	190(27.5)	28	50	101
		CD	390(56)	320(47)	18	40	111
G10180	1018	HR	400(58)	220(32)	25	50	116
		CD	440(64)	370(54)	15	40	126
G10200	1020	HR	380(55)	210(30)	25	50	111
		CD	470(68)	390(57)	15	40	131
G10300	1030	HR	470(68)	260(37.5)	20	42	137
		CD	520(76)	440(64)	12	35	149
G10350	1035	HR	500(72)	270(39.5)	18	40	143
		CD	550(80)	460(67)	12	35	163
G10400	1040	HR	520(76)	290(42)	18	40	149
		CD	590(85)	490(71)	12	35	170
G10450	1045	HR	570(82)	310(45)	16	40	163
		CD	630(91)	530(77)	12	35	179
G10500	1050	HR	620(90)	340(49.5)	15	35	179
		CD	690(100)	580(84)	10	30	197
G10600	1060	HR	680(98)	370(54)	12	30	201
G10800	1080	HR	770(112)	420(61.5)	10	25	229
G10950	1095	HR	830(120)	460(66)	10	25	248

Tabla E-22

Resultados de ensayos a la tensión de algunos metales.*

Fuente: J. Datsko, "Solid Materials", cap. 7 en Joseph E. Shigley y Charles R. Mischke (eds. en jefe), *Standard Handbook of Machine Design*, 2a. ed., McGraw-Hill, Nueva York, 1996, pp. 7.47-7.50.

Número	Material	Condición	Resistencia (a la tensión)					
			Cedencia S_y , MPa (kpsi)	Última S_u , MPa (kpsi)	A la fractura, σ_f , MPa (kpsi)	Coefficiente σ_f , MPa (kpsi)	Resistencia a la deformación, exponente m	Deformación a la fractura ϵ_f
1018	Acero	Recocido	220 (32.0)	341 (49.5)	628 (91.1)†	620 (90.0)	0.25	1.05
1144	Acero	Recocido	358 (52.0)	646 (93.7)	898 (130)†	992 (144)	0.14	0.49
1212	Acero	HR	193 (28.0)	424 (61.5)	729 (106)†	758 (110)	0.24	0.85
1045	Acero	T&R600°F	1 520 (220)	1 580 (230)	2 380 (345)	1 880 (273)†	0.041	0.81
4142	Acero	T&R600°F	1 720 (250)	1 930 (210)	2 340 (340)	1 760 (255)†	0.048	0.43
303	Acero inoxidable	Recocido	241 (35.0)	601 (87.3)	1 520 (221)†	1 410 (205)	~0.51	1.16
304	Acero inoxidable	Recocido	276 (40.0)	568 (82.4)	1 600 (233)†	1 270 (185)	0.45	1.67
2011	Aleación de aluminio	T6	169 (24.5)	324 (47.0)	325 (47.2)†	620 (90)	0.28	0.10
2024	Aleación de aluminio	T4	296 (43.0)	446 (64.8)	533 (77.3)†	689 (100)	0.15	0.18
7075	Aleación de aluminio	T6	542 (78.6)	593 (86.0)	706 (102)†	882 (128)	0.13	0.18

*Los valores se tomaron de uno o dos cilindros y se consiguieron usando especificaciones adecuadas de compra. La deformación por fractura puede variar hasta en 100%.
†Valor derivado.

Tabla E-3

Unidades SI opcionales para esfuerzo flexionante $\sigma = Mc/I$, esfuerzo de torsión $\tau = Tr/J$, esfuerzo axial $\sigma = F/A$ y esfuerzo cortante directo $\tau = F/A$

Flexión y torsión				Axial y cortante directo		
M, T	I, J	c, r	σ, τ	F	A	σ, τ
N · m*	m ⁴	m	Pa	N*	m ²	Pa
N · m	cm ⁴	cm	MPa (N/mm ²)	N†	mm ²	MPa (N/mm ²)
M · m†	mm ⁴	mm	GPa	kN	m ²	kPa
kN · m	cm ⁴	cm	GPa	kN†	mm ²	GPa
N · mm†	mm ⁴	mm	MPa (N/mm ²)			

*Relación básica.
†Con frecuencia se prefiere.

Tabla E-4

Unidades SI opcionales para deflexión por flexión $y = f(Fl^3/EI)$ o $y = f(wl^4/EI)$ y deflexión torsional $\theta = Tl/GJ$

Deflexión por flexión					Deflexión torsional				
F, w/l	l	I	E	y	T	l	J	G	θ
N*	m	m ⁴	Pa	m	N · m*	m	m ⁴	Pa	rad
kN†	mm	mm ⁴	GPa	mm	N · m†	mm	mm ⁴	GPa	rad
kN	m	m ⁴	GPa	μ m	N · mm	mm	mm ⁴	MPa (N/mm ²)	rad
N	mm	mm ⁴	kPa	m	N · m	cm	cm ⁴	MPa (N/mm ²)	rad

*Relación básica.
†Con frecuencia se prefiere.

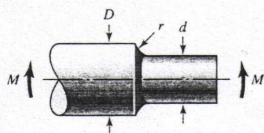
Tabla E-5

Constantes físicas de materiales

Material	Módulo de elasticidad E		Módulo de rigidez G		Relación de Poisson ν	Peso unitario w		
	Mpsi	GPa	Mpsi	GPa		lb/pulg ³	lb/ft ³	kN/m ³
Aluminio (todas las aleaciones)	10.3	71.0	3.80	26.2	0.334	0.098	169	26.6
Cobre al berilio	18.0	124.0	7.0	48.3	0.285	0.297	513	80.6
Latón	15.4	106.0	5.82	40.1	0.324	0.309	534	83.8
Acero al carbono	30.0	207.0	11.5	79.3	0.292	0.282	487	76.5
Fundición de hierro (gris)	14.5	100.0	6.0	41.4	0.211	0.260	450	70.6
Cobre	17.2	119.0	6.49	44.7	0.326	0.322	556	87.3
Abeto Douglas	1.6	11.0	0.6	4.1	0.33	0.016	28	4.3
Vidrio	6.7	46.2	2.7	18.6	0.245	0.094	162	25.4
Inconel	31.0	214.0	11.0	75.8	0.290	0.307	530	83.3
Plomo	5.3	36.5	1.9	13.1	0.425	0.411	710	111.5
Magnesio	6.5	44.8	2.4	16.5	0.350	0.065	112	17.6
Molibdeno	48.0	331.0	17.0	117.0	0.307	0.368	636	100.0
Metal Monel	26.0	179.0	9.5	65.5	0.320	0.319	551	86.6
Níquel plata	18.5	127.0	7.0	48.3	0.322	0.316	546	85.8
Acero al níquel	30.0	207.0	11.5	79.3	0.291	0.280	484	76.0
Bronce fosforado	16.1	111.0	6.0	41.4	0.349	0.295	510	80.1
Acero inoxidable (18-8)	27.6	190.0	10.6	73.1	0.305	0.280	484	76.0

Figura E-15-9

Eje redondo con entalle en el hombro en flexión $\sigma_0 = Mc/I$ donde $c = d/2$ e $I = \pi d^4/64$.*



El factor de concentración de esfuerzo K_t está relacionado con el esfuerzo principal máximo ordenado $(\sigma_1)_{\max} = K_t \sigma_0$,

$$K_t = 0.632 + 0.377 \left(\frac{D}{d}\right)^{-4.4} + \left(\frac{r}{d}\right)^{-0.5} \sqrt{\frac{-0.14 - 0.363(D/d)^2 + 0.503(D/d)^4}{1 - 2.39(D/d)^2 + 3.368(D/d)^4}}$$

D/d	r/d						
	0.01	0.05	0.10	0.15	0.20	0.25	0.30
1.01	1.790	1.349	1.245	1.199	1.171	1.152	1.138
1.05	2.638	1.697	1.474	1.376	1.317	1.276	1.247
1.10	3.154	1.897	1.599	1.467	1.388	1.355	1.295
1.50	4.237	2.279	1.815	1.610	1.487	1.404	1.342
2.00	4.424	2.388	1.843	1.624	1.494	1.405	1.339
6.00	4.495	2.360	1.854	1.630	1.496	1.405	1.337

El factor de concentración de esfuerzo K , está relacionado con el esfuerzo von Mises máximo $(\sigma)_{\max} = K_t \sigma_0$,

$$K_t = 0.622 + 0.38 \left(\frac{D}{d}\right)^{-4.3} + \left(\frac{r}{d}\right)^{-0.5} \sqrt{\frac{-0.322 - 0.277(D/d)^2 + 0.599(D/d)^4}{1 - 2.55(D/d)^2 + 5.27(D/d)^4}}$$

D/d	r/d						
	0.01	0.05	0.10	0.15	0.20	0.25	0.30
1.01	1.681	1.297	1.206	1.166	1.141	1.125	1.113
1.05	2.411	1.592	1.398	1.313	1.261	1.226	1.200
1.10	2.850	1.758	1.499	1.384	1.316	1.269	1.235
1.50	3.773	2.068	1.664	1.485	1.378	1.305	1.252
2.00	3.936	2.115	1.683	1.492	1.378	1.300	1.243
6.00	3.994	2.130	1.688	1.493	1.376	1.296	1.238

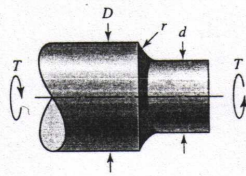
*S. M. Tipton, J. R. Sorem y R. D. Rolovic, "Updated Stress-Concentration Factors for Filleted Shafts in Bending and Tension", trad. de ASME Journal of Mechanical Design, vol. 118, núm.3 (septiembre de 1996), pp. 321-327.

1204

Apéndice E

Figura E-15-8

Eje redondo con entalle en el hombro en torsión, $\tau_0 = Tc/J$ donde $c = d/2$ y $J = \pi d^4/32$.*



El factor de concentración de esfuerzo K_{ts} está relacionado con el esfuerzo principal máximo ordenado $(\sigma_1)_{\max} = K_{ts} \tau_0$ o bien con el esfuerzo von Mises $(\sigma')_{\max} = K_{ts} \sigma_0 = \sqrt{3} K_{ts} \tau_0$.

$$K_{ts} = 0.78 + 0.2 \left(\frac{D}{d} \right)^{-10} + \left(\frac{r}{d} \right)^{-0.46} \sqrt{\frac{0.002 - 0.125(D/d)^2 + 0.123(D/d)^4}{1 - 2.75(D/d)^2 + 2.55(D/d)^4}}$$

D/d	r/d						
	0.02	0.05	0.10	0.15	0.20	0.25	0.30
1.01	1.288	1.176	1.117	1.091	1.074	1.063	1.055
1.05	1.588	1.352	1.229	1.174	1.140	1.117	1.100
1.10	1.753	1.445	1.284	1.212	1.168	1.137	1.115
1.50	2.059	1.620	1.392	1.288	1.226	1.183	1.150
2.00	2.101	1.647	1.410	1.303	1.238	1.194	1.160
6.00	2.109	1.652	1.414	1.306	1.241	1.196	1.162

* R. D. Rolovic, S. M. Tipton y J. R. Sorem, Jr., "Multiaxial Stress Concentration in Filleted Shafts", enviado a *ASME Journal of Mechanical Design*, marzo del 2000 (en revisión).

ANEXO E

PLANOS MECÁNICOS

ANEXO F

**SISTEMAS ACCESORIOS DEL DILUSOR DE DISCO
ROTATORIO**

Catálogo F.1. Suministro de aire de dilución

AIRE DE DILUCIÓN

En el Capítulo 3, sección 3.5.2.4, indica la necesidad de utilizar “aire de dilución” en este proceso, el aire de dilución suministrado debe cumplir con características que de flujo y calidad para controlar el proceso de dilución y evitar alteración de los resultados.

Para este propósito, en el suministro de aire de dilución se mencionan 3 etapas importantes:

- Compresión
- Secado
- Control de flujo

1. Etapa de compresión

Se recomienda para esta etapa el uso de un compresor de aire que su funcionamiento sea libre de aceite, pues estos últimos normalmente dejan residuos de este lubricante suspendidos en el fluido. (Ver catálogo de compresor libre de aceite Anexo G.7)

2. Secado de aire

Se requiere eliminar la humedad del aire para esto se emplean cartucho de sílica gel ubicados después de la etapa de compresión, los mismos que retendrán las partículas de agua que existan en el aire. (Ver catálogo de compresor libre de aceite Anexo G.7)

3. Control de flujo

Para el control de dosificación tanto de aire de dilución como de la muestra de gases de escape se pueden emplear válvulas de globo, de aguja con un sistema

electrónico que me permita visualizar el flujo que se suministra o también se pueden emplear placas orificio calibradas para diferentes flujos, estas últimas se deben diseñar para los requerimientos del estudio, pero son de precio considerablemente más bajo que las válvulas antes mencionadas. En el Anexo G Catálogo G.8 también se incluye el dimensionamiento de una placa orificio. Hay que considerar que en el caso de emplearse placa orificio para el control de flujo se debe realizar una revisión de las pérdidas de presión, ya que en los cálculos se consideró el uso de una válvula de globo.

Catálogo F.2. Control Electrónico: motor de pasos y adquisición de datos

ANTECEDENTES

Dado que el proyecto de dilución requiere un control preciso de la velocidad de giro para efectuar la mezcla de gases y la adquisición de variables como temperatura y presión necesarias, se tomó la decisión de implementar un control electrónico que permita determinar y visualizar estas variables.

CONFIGURACIÓN DEL SISTEMA.

Para la construcción del prototipo correspondiente al proyecto de dilución, se ha previsto una etapa de control la que, en función de los requerimientos del sistema está constituida por:

Sistema de adquisición de datos de las variables de ingreso y salida

Sistema de control de velocidad del motor a pasos

Interfaz de visualización

Cada uno de estos sistemas está integrado en el programa LABVIEW 8.0

SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS

El sistema de adquisición de datos esta implementado por medio de tarjetas electrónicas de National Instruments que funcionan como acondicionadores de señal y entregan valores normalizados.

Señal de Temperatura



FIG 1 – Tarjeta de adquisición de datos (National Instrument)

Para transformar la señal entregada por las termocuplas tipo J (N° parte XC-14-K-12, ver Anexo G) se utiliza la tarjeta de adquisición (N° parte NI USB-6008, ver Anexo G) acoplado con el modulo se utiliza la tarjeta de adquisición (N° parte NI USB-9211 4-ch, ver Anexo G) cuya entrada diferencial permite minimizar el efecto de los posibles ruidos en la señal medida a mas de entregar una señal vía USB al computador,

Señal De Presión



Para la señal de presión se implementó sobre la tarjeta de adquisición USB 6008, al tener el sensor o transductor de presión (N° parte PX209-015^a5V, ver Anexo G) una alimentación de 12 V entrega una señal normalizada de 0 a 5V la cual puede ser ingresada por medio de esta tarjeta USB al computador.

Estas tarjetas permiten un muestreo mínimo de 150 muestras por segundo, pero debido a la simultaneidad de la señal, este valor se ve reducido notablemente.

SISTEMA DE CONTROL DE VELOCIDAD DEL MOTOR A PASOS

Este control fue implementado en el microcontrolador PIC 16F877A debido a la versatilidad de este integrado de variar los tiempos de ejecución de los impulsos entregados al motor pasos, lo cual se entiende como una variación de la velocidad de giro.

De tal manera que el sistema genera una base de tiempo y da excitaciones periódicas a cada bobina lo que permite su movimiento, conociéndose este control como manejo por olas.

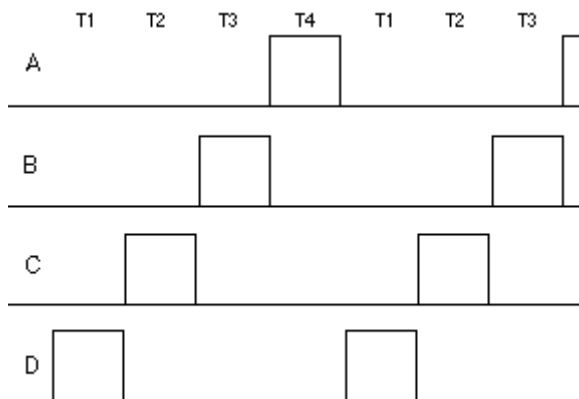


FIG 3 - MANEJO POR OLAS

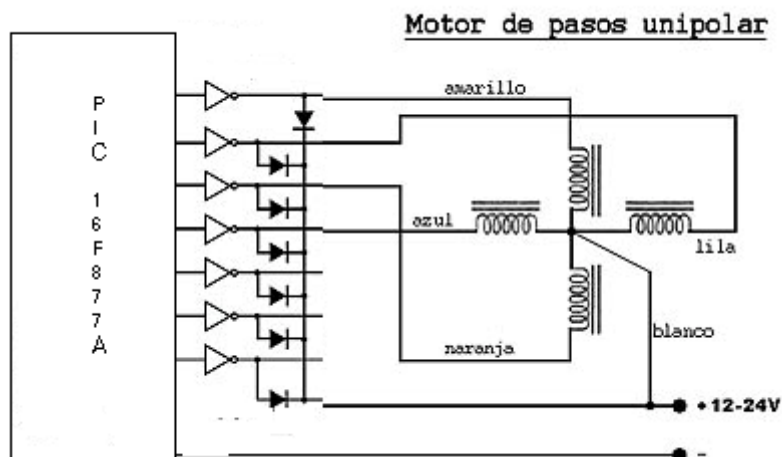


FIG 4 – CIRCUITO CONTROLADOR

Este microcontrolador está integrado en el sistema vía serial mediante comunicación RS 232 por medio del cual el computador envía el valor de la velocidad configurada

RECOMENDACIONES

El sistema debe ser ejecutado en un computador de las siguientes características

Procesador P4 o superior

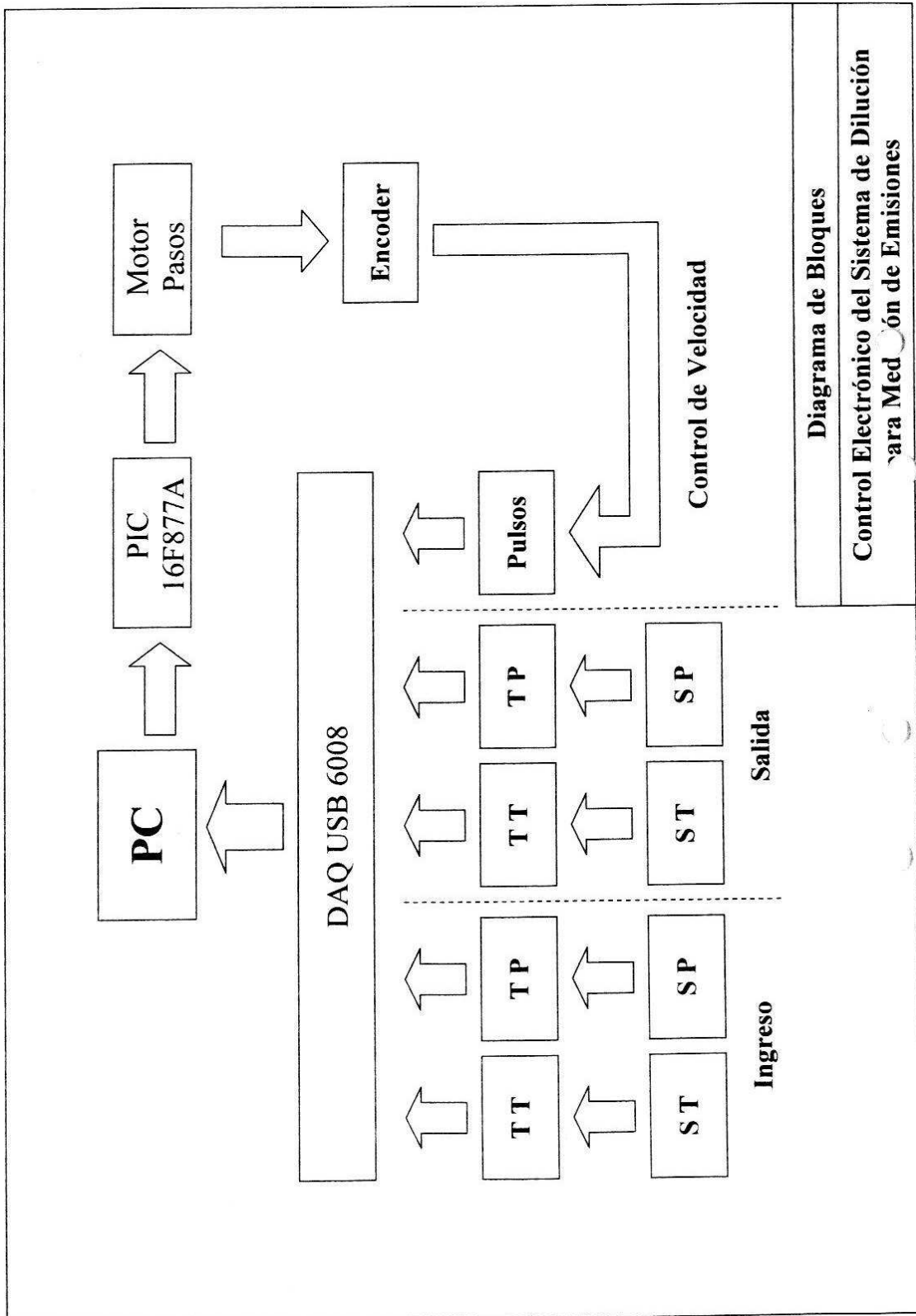
Memoria RAM 512

2 puertos USB mínimo

1 puerto serial mínimo

La ubicación de los sensores debe estar de acuerdo a las recomendaciones del fabricante.

A continuación se presenta el diagrama de bloques del sistema de control electrónico que conjuga el control del motor a pasos con el sistema de adquisición de datos (presión y temperatura)



ANEXO G

CATÁLOGOS DE PARTES ESPECIALES

Catálogo G.1. Motor de pasos

Stepper Motors

JAMECO ReliaPro
 • Reliable & Consistent
 • Professional Grade
 • Value Priced
 • Backed by Jameco

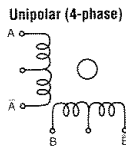
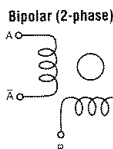
DC, gearhead & vibrating motors on pages 113-116

Color Code Legend
New **Save On Price** **Closeout**

JAMECO ReliaPro

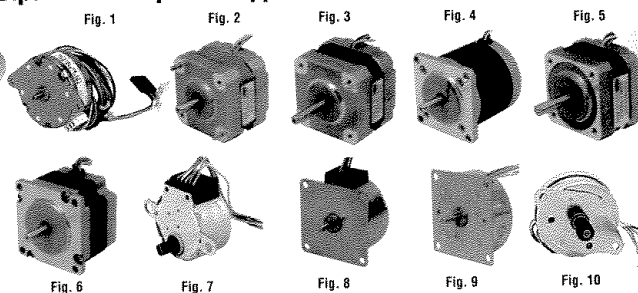
Jameco offers the industry's widest variety of off-the-shelf two-phase bipolar and four-phase unipolar stepper motors for your precision applications. Be sure to check out the wide selection of 2 to 200 VDC models below.

- Bearing type: ball
- Dielectric strength: 500V, 50Hz/minute
- 18" lead wires
- Ambient temperature: -10°C to +55°C
- Insulation resistance: 100MΩ @ 500VDC
- Use P/N 161998CC, pg 237, for shaft coupler



A Jameco EXCLUSIVE

Bipolar and Unipolar Stepper Motors



Electromech

Part No.	Product No.	Fig.	Drive System	Voltage (VDC)	Step Angle	Phase Resis. (Ohms)	Curr. (mA)	Phase Inductance (mH)	Detent Torque (g-cm)	Holding Torque (g-cm)	Mounting Hole Space Diagonal (in.)	Mounting Holes (in.)	Shaft Dia. (in.)	Shaft Length (in.)	Motor Dia. (in.)	Motor Height (in.)	Weight (lbs.)	Pricing		
																		1	10	50
237526CC	42BYGH001	3	Bipolar	2	1.8	2.1	950	2.3	200	1700	1.22	0.10	0.20	0.95	1.67	1.34	0.50	\$16.49	\$14.85	\$13.35
237497CC	39BYG101-01	2	Bipolar	2.7	1.8	6.8	400	6.5	150	650	1.22	0.10	0.20	0.75	1.54	0.79	0.26	15.95	14.35	12.95
237420CC	35BYG002	3	Bipolar	3.2	1.8	4.8	800	3	15	50	1.02	0.10	0.20	0.83	1.38	1.02	0.30	15.95	14.35	12.95
237489CC	39BYG001	2	Bipolar	5	1.8	5	1000	—	150	1800	1.22	0.10	0.20	0.91	1.54	1.34	0.44	15.95	14.35	12.95
237737CC	42BY48H08	8	Bipolar	5	7.5	9.1	550	—	130	630	1.95	0.14	0.12	0.39	1.85	0.87	0.28	7.89	7.09	6.39
237577CC	57BYG061	4	Bipolar	6	1.8	12	500	24	—	3569	1.86	0.20	0.25	0.83	2.29	1.61	1.00	29.95	26.95	24.23
237518CC	42BYG017	2	Bipolar	6.3	1.8	15	420	16	150	1400	1.22	0.10	0.20	0.51	1.67	1.34	0.50	16.49	14.85	13.35
237454CC	39BYG201	2	Bipolar	9.6	1.8	20	480	—	200	1000	1.22	0.10	0.20	0.20	1.54	0.98	0.44	16.95	15.25	13.75
237411CC	35BYG005	2	Bipolar	12	1.8	20	500	—	1.5	10	1.02	0.10	0.20	0.83	1.38	1.10	0.37	15.95	14.35	12.95
155459CC	42BYG023	2	Bipolar	12	1.8	30	400	36	220	2100	1.73	0.10	0.20	0.60	1.70	1.30	0.50	17.95	16.29	14.59
237471CC	39BYG401A	2	Bipolar	12	1.8	30	400	32	200	2100	1.22	0.10	0.20	0.95	1.54	1.34	0.44	19.49	17.55	15.79
237817CC	25BY2414	7	Bipolar	12	15	27	440	15.5	48	140	1.26	0.11	0.08	0.37	0.98	0.59	0.08	7.19	6.45	5.79
237462CC	39BYG401	2	Bipolar	14	1.8	31	400	32	200	2300	1.22	0.10	0.20	0.95	1.54	1.34	0.44	19.49	17.55	15.79
237446CC	35BYG008	2	Bipolar	24	1.8	1.3	1600	1	1	9	1.02	0.10	0.20	0.83	1.38	1.14	0.33	16.95	15.25	13.75
237569CC	57BYG009	4	Unipolar	2.4	1.8	1	2400	1.5	—	5914	1.86	0.20	0.25	0.83	2.29	2.20	1.40	32.29	29.09	26.15
237614CC	57BYGH801	6	Unipolar	3.3	1.8	2.2	1500	22	—	5608	1.86	0.20	0.25	0.83	2.24	2.01	1.32	35.19	31.69	28.49
237534CC	42BYGH102	5	Unipolar	3.6	1.8	3	1200	3.2	220	3000	1.22	0.10	0.20	0.95	1.67	1.57	0.50	17.95	16.15	14.55
237551CC	57BYG008	4	Unipolar	4	1.8	3.1	1300	4.4	—	4996	1.86	0.20	0.25	0.83	2.29	2.01	1.30	29.95	26.95	24.25
237593CC	85BYGH450	6	Unipolar	4.4	1.8	2.2	2000	—	—	21414	2.76	0.26	0.51	1.38	3.35	2.95	4.90	161.95	145.75	131.19
237622CC	57BYGH802	6	Unipolar	4.8	1.8	3.2	1500	2.9	—	8157	1.86	0.20	0.25	0.83	2.24	2.20	1.54	37.69	33.95	30.55
237606CC	57BYGH001	6	Unipolar	5	1.8	5	1000	—	—	3976	1.86	0.20	0.25	0.83	2.24	1.61	1.10	32.49	29.25	26.35
237825CC	25BY4801	7	Unipolar	5	7.5	10	500	—	45	110	1.38	0.14	0.08	0.35	0.98	0.56	0.07	6.95	6.25	5.65
237873CC	35BY48806	1	Unipolar	5	7.5	10	500	65	65	250	1.65	0.13	0.08	0.45	1.38	0.59	0.15	6.49	5.85	5.25
237770CC	20BY20H01	7	Unipolar	5	18	10	500	—	18	75	0.98	0.09	0.06	0.34	0.79	0.71	0.05	5.59	5.09	4.55
223870CC	57BYG070	4	Unipolar	5.4	1.8	3.6	1500	6	977	8974	2.65	0.20	0.25	0.80	2.20	2.20	2.00	49.95	42.46	31.84
237631CC	57BYGH803	6	Unipolar	6.3	1.8	4.2	1500	—	—	14276	1.86	0.20	0.25	0.83	2.24	2.99	2.43	64.59	58.15	52.35
172558CC	42BYG014	2	Unipolar	8.5	1.8	19	450	13	150	1300	1.22	0.50	0.20	0.87	1.67	1.34	0.50	12.95	11.66	10.49
237711CC	42BY48H06	8	Unipolar	9	7.5	20	450	18.5	130	800	1.95	0.14	0.12	0.39	1.65	0.87	0.30	7.89	7.09	6.39
237788CC	25BY2402	7	Unipolar	9	15	50	180	14	48	100	1.26	0.13	0.08	0.35	0.98	0.59	0.08	6.95	6.25	5.65
237649CC	25BY2403	7	Unipolar	9	15	20	450	4.5	48	130	1.38	0.14	0.08	0.33	0.98	0.56	0.07	4.69	4.25	3.79
172646CC	42BYG205	4	Unipolar	9.6	1.8	75	480	15	220	2300	1.73	0.10	0.20	0.90	1.70	1.40	0.50	17.95	15.29	13.75
224021CC	42BYG016	2	Unipolar	12	1.8	75	160	40	150	900	1.73	0.10	0.20	0.70	1.70	1.30	0.50	16.95	15.25	13.75
155432CC	42BYG228	2	Unipolar	12	1.8	30	400	23	220	2000	1.73	0.10	0.20	0.90	1.70	1.50	0.50	17.95	16.29	14.59
237542CC	57BYG007	4	Unipolar	12	1.8	32	380	30	—	2957	1.86	0.20	0.25	0.83	2.29	1.61	1.00	25.95	23.35	20.99
238537CC	42BYGH404	5	Unipolar	12	1.8	30	400	25	250	3200	1.22	0.10	0.20	0.95	1.67	1.89	0.60	19.95	17.95	16.15
162026CC	57BYG084	4	Unipolar	12	1.8	20	600	22	725	6000	2.65	0.20	0.25	1.00	2.20	2.00	1.30	26.95	24.29	21.85
237972CC	28BYJ01A1	7	Unipolar	12	5.625	300	40	—	300	552	1.38	0.17	0.20	0.33	1.10	0.75	0.09	4.19	3.79	3.55
237981CC	28BYJ01C	7	Unipolar	12	5.625	300	40	—	350	552	1.38	0.14	0.12	0.20	1.10	0.78	0.10	4.19	3.79	3.55
237753CC	28BYJ012A	7	Unipolar	12	5.625	200	60	—	350	736	1.38	0.16	0.12	0.24	1.10	0.75	0.08	3.59	3.25	3.10
237745CC	28BYJ01A	7	Unipolar	12	5.625	200	60	—	350	736	1.38	0.16	0.12	0.24	1.10	0.75	0.10	3.59	3.25	3.10
237833CC	25BY4803	7	Unipolar	12	7.5	50	240	16	45	110	1.34	0.09	0.08	0.27	0.98	0.59	0.07	6.95	6.25	5.85
237681CC	35BY48B069	1	Unipolar	12	7.5	50	270	28	65	300	1.65	0.13	0.08	0.26	1.42	0.85	0.15	6.49	5.85	5.25
237892CC	42BY48B03	8	Unipolar	12	7.5	57	210	18	105	300	2.28	0.08	0.12	0.30	1.65	0.58	0.21	10.45	9.39	8.45
238158CC	35BY48B110	1	Unipolar	12	7.5	42	286	25	90	400	1.65	0.13	0.08	0.26	1.38	0.85	0.19	6.89	6.19	5.89
237930CC	42BY48B14	8	Unipolar	12	7.5	50	240	—	145	450	1.95	0.14	0.12	0.39	1.65	0.59	0.22	8.95	8.09	7.25
213321CC	35BY48-27	1	Unipolar	12	7.5	15	800	68	90	460	1.96	0.13	0.08	0.25	1.38	0.83	0.20	8.95	7.61	5.71
238131CC	35BY48B105	1	Unipolar	12	7.5	15	800	10	90	460	1.65	0.13	0.08	0.26	1.38	0.85	0.19	6.89	6.19	5.89
237884CC	42BY48B02	8	Unipolar	12	7.5	40	300	28	130	500	N/A	N/A	0.12	0.30	1.65	0.57	0.21	10.45	9.39	8.45
238043CC	30BYJ05-PH	7	Unipolar	12	7.5	300	40	—	350	552	1.42	0.17	0.20	0.30	1.18	0.69	0.10	4.79	4.29	3.89
237761CC	30BYJ011	7	Unipolar	12	7.5	300	40	—	350	644	1.38	0.18	0.12	0.20	1.18	0.69	0.10	4.35	3.89	3.51

155459CC: Dual shaft

Catálogo G.2. Bomba Peristáltica

BOMBEO Y DOSIFICACIÓN INDUSTRIAL CON UNA AMPLIA GAMA DE APLICACIONES

En todas las bombas peristálticas Bredel, el fluido que se bombea sólo está en contacto con el interior de la manguera. Se obvia así la necesidad de utilizar otros componentes costosos y susceptibles de desgaste como son los cierres, válvulas, membranas, estatores, rotores o empaquetaduras. Las bombas peristálticas Bredel son especialmente adecuadas para el manejo de fluidos 'difíciles' como pueden ser los productos abrasivos, corrosivos, de alta viscosidad, sensibles al cizallamiento, con tendencia a cristalizar e, incluso, fluidos que tengan varias de estas características a la vez.

Industria Minera

Dosificación de productos químicos agresivos

Imprentas

Dosificación de tintas al agua

Cemento y Construcción

Dosificación de colorantes

Plantas de tratamiento de Agua

Dosificación de aditivos y toma de muestras

Industria de la madera

Bombeo de colas y adhesivos

Industria de la pintura

Bombeo de fluidos abrasivos

Cerveceras

Filtrado de diatomeas

Industria del grano

Dosificación de aditivos

Galvanización

Aporte de ácidos y lejías

Industria del plástico

Polímeros



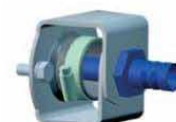
CONEXIONES MEJORADAS



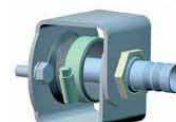
PRESTACIONES

IDEAL PARA EL MANEJO DE:

- ◆ Productos sensibles al cizallamiento
- ◆ Productos abrasivos
- ◆ Productos viscosos
- ◆ Productos de alta densidad
- ◆ Aplicaciones de vacío
- ◆ Autoaspirante hasta 95% de vacío (0,05 Bar Absoluto)
- ◆ Puede funcionar en seco indefinidamente
- ◆ Reversible
- ◆ Dosificadora: precisión tras 100 horas: +/- 1%
- ◆ Sustitución de manguera sin desmontar la bomba
- ◆ Fácil de limpiar: paso franco del fluido, sin válvulas, puntos de retención o empaquetaduras
- ◆ El fluido bombeado no entra en contacto con partes mecánicas o cierres
- ◆ Rodamientos engrasados de por vida
- ◆ Diseñada y construida para trabajar a presiones de hasta 7.5 bar [750 kPa]
- ◆ Silenciosa
- ◆ 100% desplazamiento positivo (sin recirculación).
- ◆ Un único componente sujeto a desgaste: la manguera
- ◆ Fácil mantenimiento, bajo coste, mínima interrupción en la producción
- ◆ Lubricación permanente de la manguera con lubricante especial
- ◆ Diferentes alternativas de accionamiento
- ◆ Control de nivel (rotura de manguera) opcional.
- ◆ Distribuida en todo el Mundo



Abrazaderas
Inoxidable 316



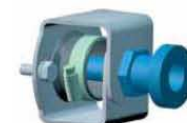
PTFE, PVDF



Inserciones roscadas
Inoxidable 316



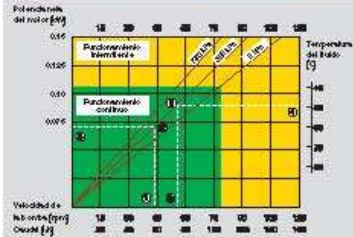
Con brida (DIN-ANSI) SS 316



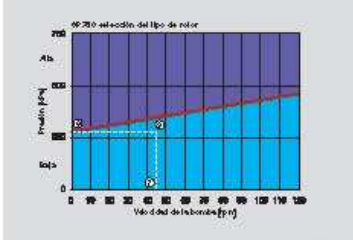
Sanitarias (SS 316) DIN 11851
También disponible:
Tri-clamp y SMS.

Bredel

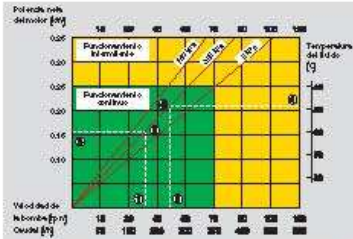
SPX10 CON MANGUERA DE 10 MM



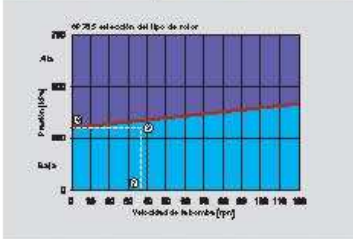
100 kPa = 14.50 psi = 1 bar



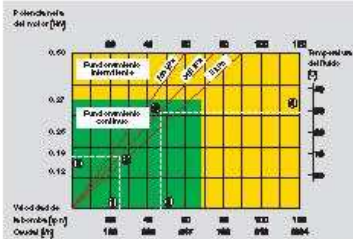
SPX15 CON MANGUERA DE 15 MM



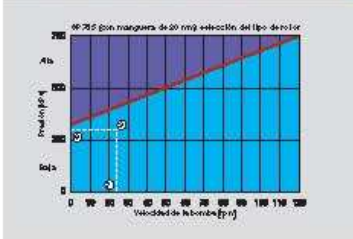
100 kPa = 14.50 psi = 1 bar



SPX15 CON MANGUERA DE 20 MM



100 kPa = 14.50 psi = 1 bar



Cómo usar las curvas

SPX10 con manguera de 10 mm
 Diámetro interior de manguera? 10 mm
 Par mínimo de arranque 47 Nm.
 Caudal por revolución 0.022 l
 Presión máxima de descarga 7,5 bar
 (750 kPa/110 psi).

SPX15 con manguera de 15 mm
 Diámetro interior de manguera? 15 mm
 Par mínimo de arranque 60 Nm.
 Caudal por revolución 0.083 l
 Presión máxima de descarga 7,5 bar
 (750 kPa/110 psi).

SPX15 con manguera de 20 mm
 Diámetro interior de manguera? 20 mm
 Par mínimo de arranque 85 Nm
 Caudal por revolución 0.152 l
 Presión máxima de descarga 7,5 bar
 (750 kPa/110 psi).

GRAFICO A

Selección de tamaño de bomba y potencia requerida.
 Comprobar la selección con velocidad máxima recomendada para la temperatura del producto.

- 1 El caudal requerido indica la velocidad de la bomba.
- 2 Presión de descarga calculada.
- 3 Potencia neta requerida.
- 4 Temperatura del producto.
- 5 Presión de descarga calculada.
- 6 Máxima velocidad recomendada.

Funcionamiento intermitente

Máximo 2 horas de operación con mínimo 1 hora de parada.

GRAFICO B

Selección del tamaño del rotor;
 Determinar el punto de funcionamiento (r.p.m./presión de descarga).

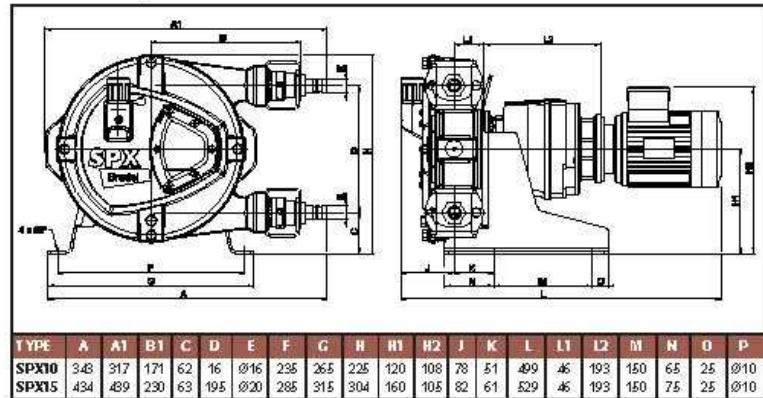
- 7 Velocidad requerida.
- 8 Presión de descarga calculada.
- 9 Cuando se opera por debajo de la línea roja, utilizar rotor de **baja** presión.

Quando se opera por encima de la línea roja, se utiliza rotor de **alta** presión.

Atención:

Con accionamiento de velocidad variable y operación en ambas zonas, utilizar siempre rotor de alta presión.

Dimensiones SPX10 y SPX15.



PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO

Una manguera realizada de material espedal, inserta en una carcasa que posee conexiones en ambos extremos, que se unen a las líneas de aspiración y descarga del sistema. Dentro de la carcasa se encuentra un rotor con dos zapatas de presión integradas. El rotor está montado sobre un casquillo y soportado por dos rodamientos. A medida que el rotor gira, la manguera es totalmente comprimida por la zapata y el fluido que contiene en su interior es empujado hacia delante. La cubierta desmontable

de la carcasa incluye una ventana de inspección. La carcasa se rellena hasta un determinado nivel con adecuada cantidad de fluido lubricante especial (registrado en NSF, de grado alimentario y que también actúa como refrigerante.



Catálogo G.3. Tuberías y accesorios de conexión de acero inoxidable

Tubo de acero inoxidable

Medidas métricas



Tubo sin soldadura

- Diámetro exterior de 3 a 25 mm
- Acero inoxidable 316/316L
- ASTM A213⁽¹⁾/A269

① _____

Grados de acero

ASIS	LNS	SS	AFNOR	W-NR.
316 / 316L	S31603	2353	Z2CND17-13	1.4438

Composición Química Típica

Elemento	% de Composición
Carbono	< 0,03
Cromo	17
Níquel	13
Molibdeno	2,6

Swagelok

Información de pedido

Ø Exterior, mm	Espesor de pared nominal, mm	Referencia básica	Longitud, m	Peso, kg/m	Presión, bar
3	0,5 ^{mm}	SS-T3M-S-0,5M-SME	6	0,021	340
	0,7	SS-T3M-S-0,7M-SME		0,027	360
5	1,0	SS-T5M-S-1,0M-SME		0,125	420
	1,5	SS-T5M-S-1,5M-SME		0,189	710
8	1,0	SS-T8M-S-1,0M-SME		0,175	310
	1,5	SS-T8M-S-1,5M-SME		0,244	520
10	1,0	SS-T10M-S-1,0M-SME		0,225	340
	1,5	SS-T10M-S-1,5M-SME		0,319	400
12	1,0	SS-T12M-S-1,0M-SME		0,275	300
	1,5	SS-T12M-S-1,5M-SME		0,394	330
	2,0	SS-T12M-S-2,0M-SME		0,500	470
16	1,0 ^{mm}	SS-T16M-S-1,0M-SME		0,575	140
	1,5	SS-T16M-S-1,5M-SME		0,507	230
	2,0	SS-T16M-S-2,0M-SME		0,651	330
18	1,0 ^{mm}	SS-T18M-S-1,0M-SME		0,425	120
	1,5	SS-T18M-S-1,5M-SME		0,579	200
	2,0	SS-T18M-S-2,0M-SME		0,501	290
20	2,0	SS-T20M-S-2,0M-SME		0,501	260
22	2,0	SS-T22M-S-2,0M-SME		1,00	230
	2,0 ^{mm}	SS-T25M-S-2,0M-SME		1,15	300
25	2,5	SS-T25M-S-2,5M-SME	1,41	260	

②
③

Herramientas y accesorios

Para ampliar la información, consulte el catálogo *Herramientas y accesorios de Swagelok*, MS-01-169S.



Soportes para Tubo

Para ampliar la información, consulte el catálogo *Swagelok Soportes para tubo*, MS-01-109S.



Racores

Para ampliar la información, consulte el catálogo *Swagelok Racores para Tubo Galvanizados y Adaptadores*, MS-01-140S.



Sistema de Soldadura Orbital Swagelok

Para ampliar la información, consulte la *Guía de referencia rápida del Sistema de Soldadura Orbital Swagelok*, MS-02-143.

Selección fiable de un componente

Al seleccionar un componente, habrá que tener en cuenta el diseño global del sistema, para conseguir un servicio seguro y sin problemas. El diseñador de la instalación y el usuario son los responsables de la función del componente, de la compatibilidad de los materiales, de los rangos de operación apropiados, así como de la operación y mantenimiento del mismo.

Garantía

Los productos Swagelok están respaldados por la *Garantía Limitada Vitalicia Swagelok*. Para obtener una copia, visite swagelok.com.mx o póngase en contacto con su Representante autorizado de Swagelok.



Gaugeable Tube Fittings and Adapter Fittings



- Available in tube sizes from 1/16 to 2 in. and 2 to 50 mm
- Consistent gaugeability upon initial installation
- Easy to disconnect and retighten
- Wide variety of materials and configurations

Swagelok

3 Gaugeable Tube Fittings and Adapter Fittings

Contents

Features, 2

The Swagelok Tube Fitting Advantage, 6

Materials, 8

ECE R110 Compliance, 8

Thread Specifications, 8

O-Rings, 8

Cleaning and Packaging, 8

Metric Swagelok Tube Fittings, 8

Pressure Ratings, 9

Ordering Numbers and Dimensions, 10

Additional Products

- For SAF 2507 super duplex tube fittings, see the Swagelok Gaugeable SAF 2507™ Super Duplex Tube Fittings catalog, MS-01-174.
- For PFA tube fittings, see the Swagelok PFA Tube Fittings and PFA Tubing catalog, MS-01-05.
- For heavy-wall tube fittings, see the Swagelok High-Pressure Fittings catalog, MS-01-34.



Straight Fittings

Unions



Union, 10

Reducing Union, 11



Bulkhead Union and Bulkhead Reducing Union, 12

Male Connectors



NPT, 13

ISO/BSP Tapered Thread (RT), 14

ISO/BSP Parallel Thread (RS), 15

ISO/BSP Parallel Thread (RP), 16



Bulkhead NPT, 17



SAE/MS Straight Thread (ST) and Long SAE/MS Straight Thread (ST), 17



O-Seal (SAE/MS Straight Thread and NPT), 18



AN and AN Bulkhead Fitting, 19



10-32 Thread, M5 x 0.8 Thread, and Metric Thread (RS), 20

Weld Connectors



Tube Socket, 20



Male Pipe, 21

Female Connectors



NPT, 22

ISO/BSP Tapered Thread (RT), ISO/BSP Parallel Thread (RJ and RP), 23

ISO/BSP Parallel Thread (RG, Gauge), 24



Bulkhead NPT, 24

Reducers



Reducer, 25

Long Reducer, 26



Bulkhead Reducer, 26

Port Connectors



Port Connector and Reducing Port Connector, 27

3 Gaugeable Tube Fittings and Adapter Fittings

Contents

Features, 2

The Swagelok Tube Fitting Advantage, 6

Materials, 8

ECE R110 Compliance, 8

Thread Specifications, 8

O-Rings, 8

Cleaning and Packaging, 8

Metric Swagelok Tube Fittings, 8

Pressure Ratings, 9

Ordering Numbers and Dimensions, 10

Additional Products

- For SAF 2507 super duplex tube fittings, see the *Swagelok Gaugeable SAF 2507™ Super Duplex Tube Fittings* catalog, MS-01-174.
- For PFA tube fittings, see the *Swagelok PFA Tube Fittings and PFA Tubing* catalog, MS-01-05.
- For heavy-wall tube fittings, see the *Swagelok High-Pressure Fittings* catalog, MS-01-34.

Straight Fittings

Unions



Union, 10

Reducing Union, 11



Bulkhead Union and Bulkhead Reducing Union, 12

Male Connectors



NPT, 13

ISO/BSP Tapered Thread (RT), 14

ISO/BSP Parallel Thread (RS), 15

ISO/BSP Parallel Thread (RP), 16



Bulkhead NPT, 17



SAE/MS Straight Thread (ST) and Long SAE/MS Straight Thread (ST), 17



O-Seal (SAE/MS Straight Thread and NPT), 18



AN and AN Bulkhead Fitting, 19



10-32 Thread, M5 × 0.8 Thread, and Metric Thread (RS), 20

Weld Connectors



Tube Socket, 20



Male Pipe, 21

Female Connectors



NPT, 22

ISO/BSP Tapered Thread (RT), ISO/BSP Parallel Thread (RJ and RP), 23

ISO/BSP Parallel Thread (RG, Gauge), 24



Bulkhead NPT, 24

Reducers



Reducer, 25

Long Reducer, 26



Bulkhead Reducer, 26

Port Connectors



Port Connector and Reducing Port Connector, 27

4 Gaugeable Tube Fittings and Adapter Fittings

Contents

Caps and Plugs



Cap, 28



Plug, 28

Vent Protectors



Mud Dauber, 28

90° Elbows

Unions



Union, 29

Male



NPT, 30



ISO/BSP Tapered

Thread (RT), 31



Reducing, 31

Positionable, ISO/
BSP Parallel Thread
(PR) and Positionable,
SAE/MS Straight
Thread (ST), 32

Weld



Tube Socket, 33



Male Pipe, 33

Female



NPT, 33

45° Elbows

Male



NPT, 34

Positionable,
SAE/MS Straight
Thread (ST), 34

Tees

Unions

Union and Reducing
Union, 35

Male

Branch, NPT
(TTM), 37

Run, NPT (TMT), 37

Positionable Branch,
SAE/MS Straight
Thread (TTS) and
Positionable Branch,
ISO/BSP Parallel
Thread (TTR), 38Positionable Run,
SAE/MS Straight
Thread (TST), 38Positionable Run,
ISO/BSP Parallel
Thread (TRT), 39

Female



Run, NPT (TFT), 39

Branch, NPT
(TTF), 40

Cross



Union, 40

Sanitary Flange Fittings

Kwik-Clamp Flange
to Swagelok Tube
Fitting, 41

Tube Adapters

Tube Adapter Information, 42

Male

NPT and ISO/BSP
Tapered Thread
(RT), 43ISO/BSP Parallel
Thread (RS and
RP), 44SAE/MS Straight
Thread (ST) and
O-Seal (SAE/MS
Straight Thread), 45

AN Thread, 45



Pipe Weld, 46

Contents

Female



NPT and ISO/BSP Tapered Thread (RT), 46

ISO/BSP Parallel Thread (RP and RJ), and ISO/BSP Parallel Thread (RG, Gauge), 47



AN Thread, 47

Additional Ordering Information, 48

Replacement Parts

Nuts



Female, 50



Knurled Female, 50



Male, 50

Ferrules



Front, 51



Back, 51

Nut-Ferrule Set and Package and Ferrule Set and Ferrule-Pak™ Package, 52

ISO/BSP Parallel Gaskets



Steel (RS Fitting), Copper (RP Fitting), Copper (RG, Gauge Fitting), and PTFE (RJ Fitting), 53

O-rings



Buna N (O-Seal Straight Threads and O-Seal Pipe Threads) and Fluorocarbon FKM (ISO/BSP Parallel Threads and SAE/MS Straight Threads), 54

Tools and Accessories

For tube benders, wrenches, cutters, liquid leak detectors, and more, see the Swagelok *Tools and Accessories* catalog, MS-01-169.



Gap Inspection Gauge and Depth Marking Tool, 55



Bulkhead Retainer, 56



Insert for Soft Plastic Tubing, 56



Preswaging Tool, 57

Hydraulic Swaging Units, 57



Gaugeability, 58

Installation Instructions, 58

The Swagelok Limited Lifetime Warranty, 62

Bored-Through Fittings

For thermocouples, dip tubes, and heat exchanger tees, 16

Chromatograph Fittings



See the Swagelok *Gaugeable Chromatograph and Column End Fittings* catalog, MS-02-173.

Dielectric Fittings



See the Swagelok *Dielectric Fittings* catalog, MS-02-36-SCS.

Flanges



For ANSI, DIN, and JIS flanges, see the Swagelok *Flange Adapters* catalog, MS-02-200.

VCO® and VCR® Face Seal Fittings



See the Swagelok *VCR Metal Gasket Face Seal Fittings* and *VCO O-Rings Face Seal Fittings* catalogs, MS-01-24 and MS-01-28.

Catálogo G.4. Calentador para líneas de procesos de aire

Industrial Process

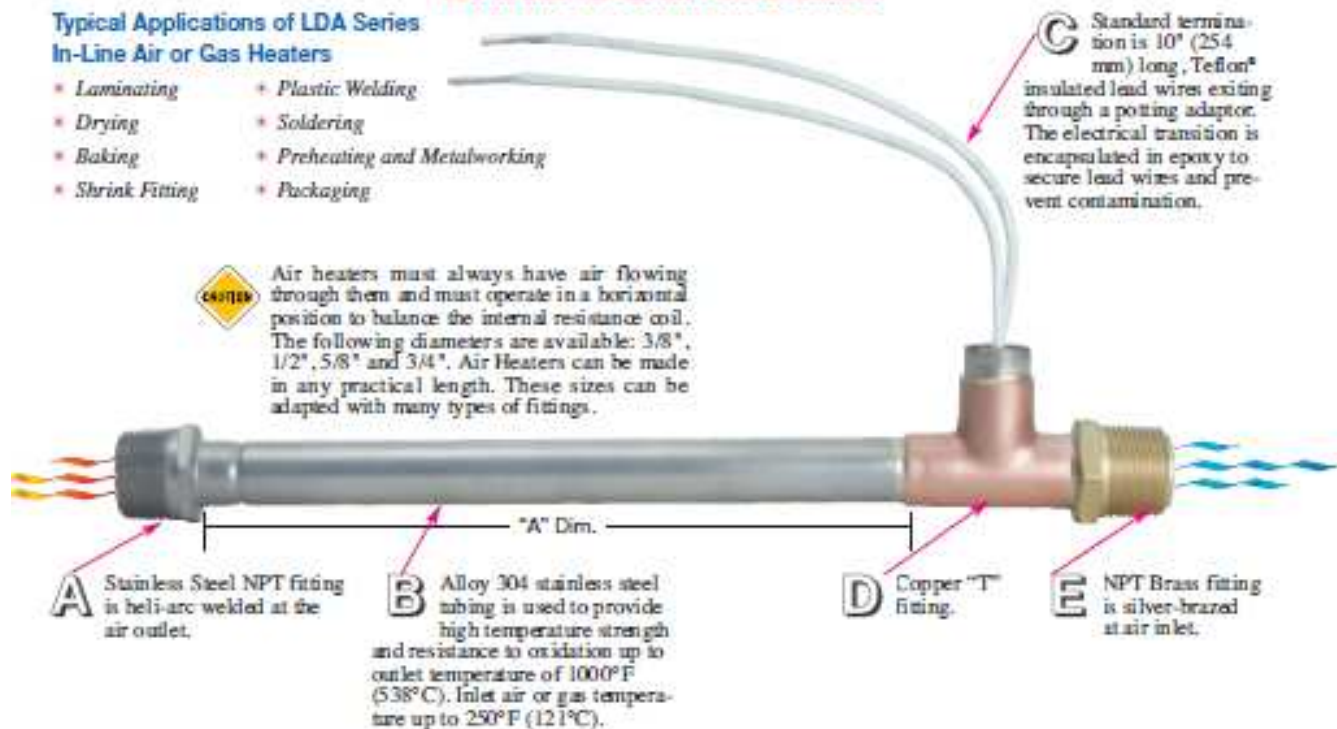


Air Process Heaters

LDA In-Line Forced Air Process Heaters

Typical Applications of LDA Series In-Line Air or Gas Heaters

- * Laminating
- * Plastic Welding
- * Drying
- * Soldering
- * Baking
- * Preheating and Metalworking
- * Shrink Fitting
- * Packaging



LDA In-Line Air Process Heater Specifications

Heater Diameter (in)	Maximum Amperage	Cross Sectional Flow Area (in ²)	Maximum CFM (ft ³)	Max. Wattage/Linear Inch Of Heated Length
3/8	6	.03	8	200
1/2	30	.04	10	250
5/8	15	.070	15	375
3/4	30	.120	20	500



Note: LDA In-Line Air Process Heaters can be made in any practical length within the standard diameters.

Heater Selection

To ensure maximum heater life, heater wattage must be calculated so that it is suitable for the desired air flow. To calculate wattage, determine the air flow and temperature rise required. The following relationship can be used to determine the wattage.

$$\text{Wattage} = \frac{\text{CFM} \times \text{Temperature rise (}^{\circ}\text{F)}}{3}$$

Table 1 Shows the relationship between cubic feet per minute versus maximum watts per linear inch of heated length on different heater diameters.

CFM	Maximum Watts per Linear Inch of Heated Length			
	3/8" Dia.	1/2" Dia.	5/8" Dia.	3/4" Dia.
2	80	80	100	120
4	100	100	100	120
6	150	150	150	150
8	200	200	200	200
10	—	250	250	250
15	—	—	375	375
20	—	—	—	500



Note: It is recommended that the wattage not exceed the maximum watts per linear inch indicated in the above reference table.



Industrial Process

Air Process Heaters

LDA In-Line Forced Air and Gas Heating



Standard (Non-Stock) LDA In-Line Air Process Heaters

Diameter	Sheath (in)	Watts	Volts	Hot End Fitting	Cold End Fitting	Lead Length (in)	Notes	Part Number
3/8	4	400	120	No Fitting	No Fitting	18		LDA00022
3/8	4	200	120	No Fitting	No Fitting	10		LDA00032
1/2	7	500	120	No Fitting	No Fitting	10		LDA00012
1/2	5	400	240	No Fitting	No Fitting	10		LDA00018
1/2	6 1/2	400	120	No Fitting	No Fitting	10		LDA00019
1/2	5	400	120	No Fitting	No Fitting	10	w/Type J TC	LDA00020
1/2	5	500	120	No Fitting	No Fitting	10	w/Type J TC	LDA00023
1/2	5	400	120	No Fitting	1/8 NPT SS Female	36	w/Mate-N-Lock Amp Connector	LDA00027
1/2	4	200	120	No Fitting	No Fitting	12		LDA00031
1/2	5	400	120	1/8 NPT SS Female	1/8 NPT SS Female	36		LDA00035
1/2	7	1000	240	No Fitting	No Fitting	10		LDA00036
1/2	7	500	120	No Fitting	No Fitting	10		LDA00037
5/8	5	600	120	3/8 NPT SS Male	1/4 NPT SS Female	36		LDA00005
5/8	5	500	120	No Fitting	No Fitting	10		LDA00007
3/4	6	750	208	1/4 NPT SS Female	1/4 NPT SS Female	63	Distributed Watts	LDA00002
3/4	8	1000	240	3/4 NPT SS Male	3/4 NPT Brass Male	24 w/SS Braid		LDA00003
3/4	8	2000	240	3/4 NPT SS Male	3/4 NPT Brass Male	24 w/SS Braid	Distributed Watts	LDA00008
3/4	8	2000	240	3/4 NPT SS Male	3/4 NPT Brass Male	36 w/SS Braid	Distributed Watts	LDA00009
3/4	4 1/2	750	230	1/4 NPT SS Female	No Fitting	60	Hermetic Seal	LDA00025
3/4	4 1/2	800	115	1/4 NPT SS Female	No Fitting	18	Hermetic Seal	LDA00026
3/4	5	670	240	3/4 NPT SS Male	3/4 NPT Brass Male	36 w/SS Braid		LDA00030

Ordering Information

Catalog Heaters

Order by Part Number for catalog heaters.

Standard lead time is 2-3 weeks.

Custom Engineered/Manufactured Heaters

For sizes and ratings not listed, TEMPACO will design and manufacture an LDA In-Line heater to meet your requirements.

Please Specify the following:

- Diameter
- Inlet-Outlet size and type
- "A" Dimension
- Wattage and Voltage
- Optional Thermocouple
- Lead Lengths and Type
- Special Requirements

Call Toll Free: (800) 323-6859 • Fax: (630) 350-0232 • E-Mail: sales@tempco.com

Catálogo G.5. Controlador de temperatura

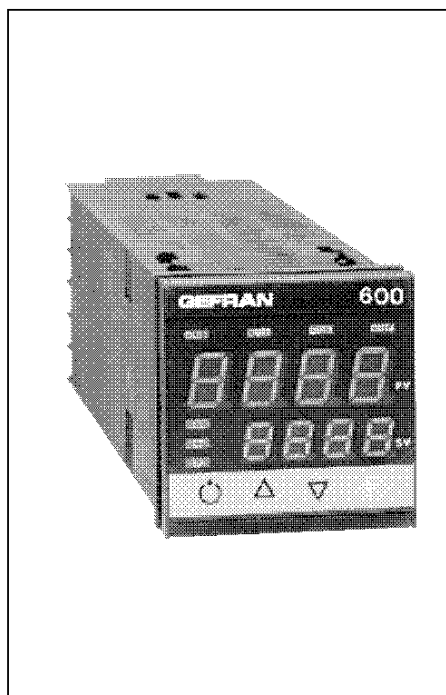


600

Controller

Main Applications

- Extrusion lines
- Injection presses for plastics
- Heat punches
- Rubber presses
- Packaging machines
- Packing machines
- Polymerization and synthetic fiber plants
- Food processing plants
- Die-casting plants
- Cooling plants
- Climatic cells and test benches
- Dryers for ceramic and construction parts
- Painting plants



Main features

- Universal input configurable from the faceplate
- Accuracy better than 0.2% FS under nominal conditions
- Control output: relay, logic, Triac or continuous
- Hot/cold function with selection of cooling medium
- 3 alarms with completely configurable functions
- Analog retransmission output
- Isolated digital input with configurable functions
- Auxiliary input for CT (50mAac)
- Heater break or probe short-circuit alarm
- Self-tuning, Auto-tuning, Soft-start, bumpless Man/Auto function
- Double setpoint, setpoint ramp, delayed alarm output function
- Optically isolated RS485 serial line. Protocol: GEFran CENCAL or MODBUS RTU
- Self-diagnosis
- Rapid configuration from PC with Winstrum package

PROFILE

Microprocessor controller, format 48x48 (1/16 DIN) manufactured using SMT. Provides a complete operator interface protected by a Lexan membrane that ensures level IP65 faceplate protection. It has 4 keys, two green LED displays, each with 4 digits, 4 red signal LED's for the 4 logic or relay outputs, and 3 other programmable LED's to signal the various operational states of the instrument. The main input for process variable is universal, and many types of signals can be connected: thermocouples, resistance thermometers, thermistors, normalized linear inputs, all with possibility of custom linearization using the faceplate keys. The type of input is selected from the faceplate keys; no external shunts are required.

A second auxiliary analog input from the current transformer is also available. With the isolated digital input you can select: one of the two presettable setpoints, select Manual-Automatic mode, reset the alarms memory, or enable the hold function. The instrument can have up to 4 outputs: relay (5 A, 250 V) or logic (24 VDC, 20 mA). An analog output in voltage or current is also available.

The function of each output is freely configurable from the faceplate keys. In addition to control and alarm outputs, you can have outputs that repeat the state of

the Process Variable, Digital Input, Retransmission Input by Process Variable, Process Setpoint, Deviation, Alarm Setpoints, and value acquired from the serial line.

Another isolated output (at 10 or 24Vdc, 30mA max.) is available to power external transmitters.

The serial communication option (available in RS485 standard) allows connection to supervision systems and PLCs with two protocols: GEFran CENCAL and MODBUS RTU. Instrument programming is facilitated by grouping parameters in functional blocks (CFG for control parameters, Inp for inputs, Out for outputs, etc.).

The instrument can also select display parameters based on hardware configuration, automatically masking irrelevant parameters.

The instrument is supplied with an "EASY" configuration with just a few parameters (only those for the model ordered and essential for controller operation). In this way, you just have to set the setpoint and alarm, and launch self-tuning from the button. The 600 does all the rest.

A PC programming kit is available for even simpler configuration, composed of a cable and a guided program for Windows environment (see data sheet code 80020).

TECHNICAL DATA

INPUTS

Accuracy 0.2% FS \pm 1digit.
Sampling time 120msec.

TC - Thermocouple

J	0-1000°C / 32-1832°F
K	0-1300°C / 32-2372°F
R	0-1750°C / 32-3182°F
S	0-1750°C / 32-3182°F
T	-200-400°C / -328-752°F
B	44-1800°C / 111-3272°F
E	-100-750°C / -148-1382°F
N	0-1300°C / 32-2372°F
L-GOST	0-600°C / 32-1112°F
U	-200-400°C / -328-752°F
G	0-2300°C / 32-4172°F
D	0-2300°C / 32-4172°F
C	0-2300°C / 32-4172°F
(Ni-Ni18Mo)	0-1100°C / 32-2072°F
custom	-1999-1999

RTD 3-wires

Pt100	-200-850°C / -328-1562°F
JPT100	-200-600°C / -328-1112°F

PTC

990 Ω , 25°C	-55-120°C / -67-248°F
---------------------	-----------------------

NTC

1k Ω , 25°C	-10-70°C / 14-158°F
--------------------	---------------------

DC - Linear

With scale settable from: -1999–1999
 0–60mV / 12–60mV
 0–10V / 2–10V
 0–5V / 1–5V
 0–1V / 0.2–1V
 0–20mA / 4–20mA
 Input impedance:
 Ri > 1MΩ for 60mV, 1V
 Ri > 10kΩ for 5V, 10V
 Ri = 50Ω for 20 mA
 32-segment custom linearization can be inserted

Auxiliary input

(alternative to Output 3 and Digital Input)
 Input for current transformer
 50mAac, 50/60Hz, Ri=10Ω

Digital input

(Alternative to Output 3 and Auxiliary Input)
 Ri = 4.7kΩ (24V, 5mA) insulation
 1500V or no-voltage contact.
 Function configurable for man/auto selection, local/remote (setpoint from serial line, setpoint1/setpoint2; Set/reset outputs, start/stop functions from tuning, software on/off, reset alarms member, hold.

OUTPUTS

4 configurable outputs:

- OUT1-OUT4: relay only
- OUT2: relay, logic, or triac
- OUT3: relay, logic, continuous or analog retransmission as alternative to aux. input and digital input

Freely assignable to control functions and single alarms in "OR" and "AND".
 Can be slaved to front panel key or aux. digital input.

Relay

With contacts: 5A/250Vac, $\cos\phi = 1$
 (order code: R)

Logic

24Vdc min. Rout=100Ω minimum
 (30 mA max.)
 (order code: D)

Triac

24–240Vac $\pm 10\%$, 50/60Hz, 1A max.
 $I^2t = 128A^2\text{sec}$.
 Leakage current 1.5mA max. at 220Vac
 (order code: T)

Continuous

0–10V ($R_{LOAD} \geq 50\text{ k}\Omega$),
 0/4–20mA (at 500Ω max.)
 for heating/cooling control output only.
 (order code: C)

Analog retransmission or control

0–10V ($R_{LOAD} \geq 50\text{ k}\Omega$),
 0/4–20mA (at 500Ω max.)
 resolution 12 bit, useful for control or retransmission of variable.
 (order code: W)

Serial line

Isolated 2/4 wires, RS422/485 interface
 (1200, 2400, 4800, 9600, 19200 baud)
 Prot.: GEFTRAN CENCAL or MODBUS

POWER SUPPLY

Standard: 100–240Vac/dc $\pm 10\%$
 on request: 20–27 Vac/dc $\pm 10\%$
 50/60Hz, max. 6W
 Protection by internal fuse not serviceable by user.

SENSOR/TRANSMITTER POWER SUPPLY

24V $\pm 10\%$ unregulated, 30mA
 15V for transmitter, 30mA
 Short-circuit protection

AMBIENT CONDITION

Working temperature range: 0–50°C
Storage temperature range: -20–70°C
Humidity: 20–85%RH non condensing

CONTROL

On/Off, P, PD, PID for heating and cooling, with parameters settable from keys.

Cooling setpoint relative to heating setpoint.

- Manual reset -999–999 digit
- Power reset -100.0–100.0%
- Cycle time 0–200sec
- Soft-start 0.0–500.0 min

For each action:

- Proportional band 0.0–999.9% FS
- Integral time 0.0–99.99 min
- Derivative time 0.0–99.99 min
- Max power limit 0.0–100.0%

ALARMS

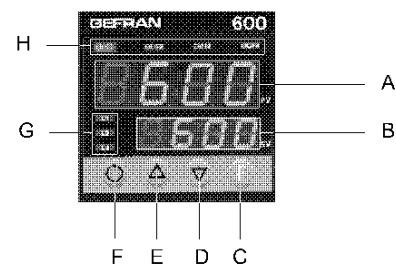
- 3 alarms settable as absolute, deviation, symmetrical deviation to setpoint with direct or reverse function.
- Alarm point can be set anywhere on selected scale.
- Alarms can be masked with exclusion at power-on, with memory, with delayed trip
- LBA alarm for setting control
- Hysteresis settable for each alarm
- Alarm assigned to current input with different operating modes.

WEIGHT

160g in complete version

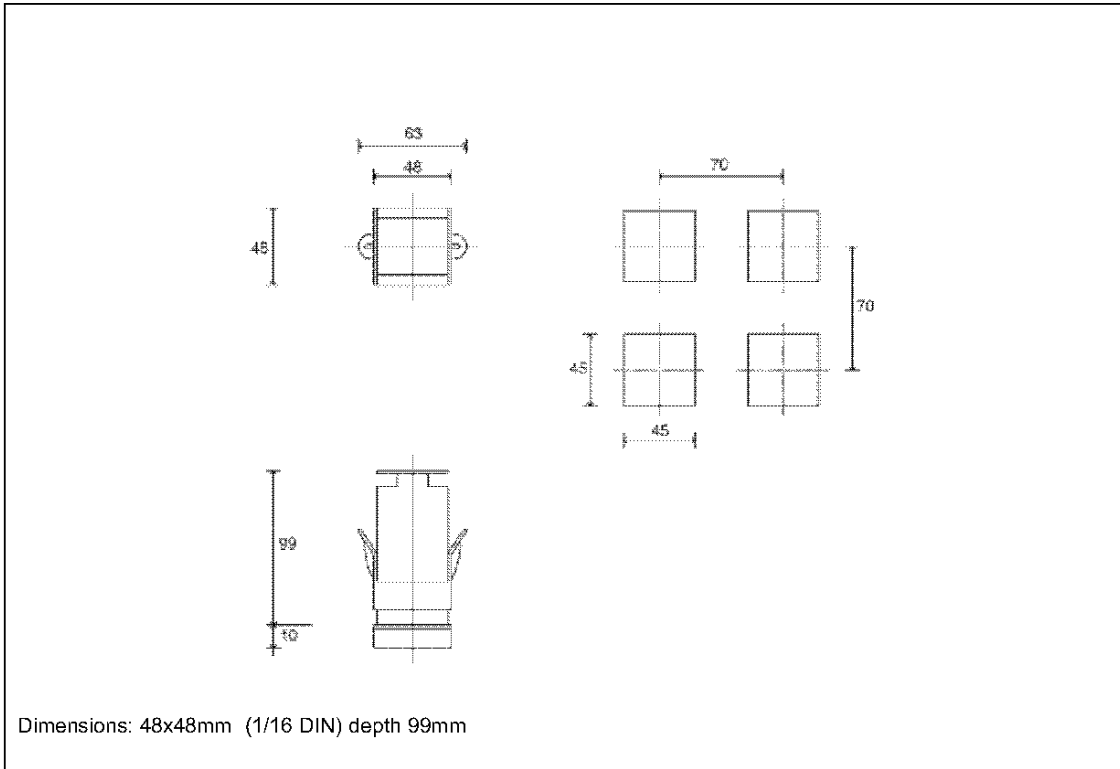
DIMENSIONS AND CUT-OUT

- A - Indication of process variable (PV), green digits h. 10mm
- B - Indication of setpoint (SV), green digits h. 7mm
- C - "Function" key
- D - "Lower" key
- E - "Raise" key
- F - Auto/Man selection
- G - Function indicator, red LED
- H - Indication of output states, red LED

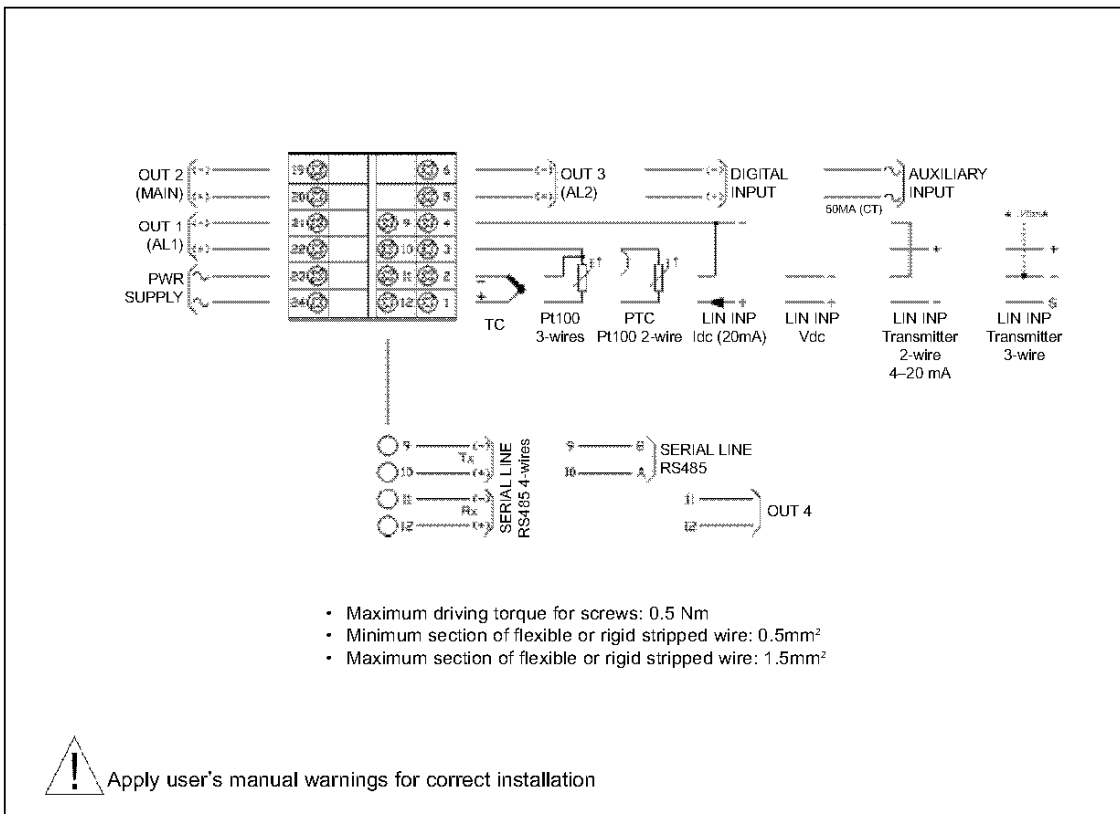


Faceplate protection IP65

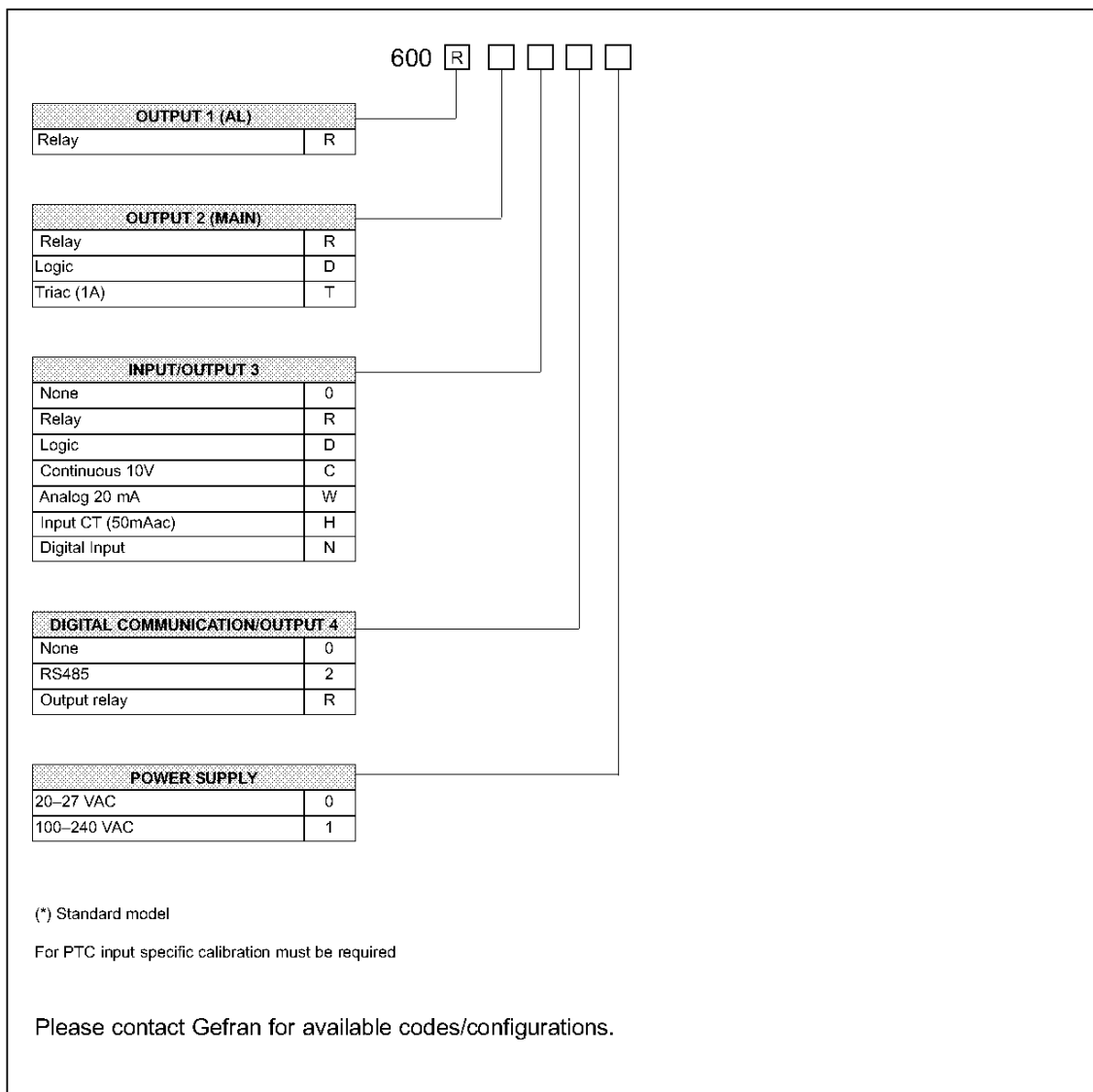
DIMENSIONS AND CUT-OUT






CONNECTION DIAGRAM



ORDER CODE



GEFRAN spa reserves the right to make any kind of design or functional modification at any moment without prior notice

	C/CSA/US Conformity - certified nr. 188658 - 1079794 (on request)
	In conformity to ECC 89/336/CEE and 73/23/CEE with reference to standards: EN 50082-2 (immunity in industrial environment), EN 50081-1 (emission in residential environment), EN 61010-1 (safety)
	C - TICK



Catálogo G.6. Medición de Presión y Temperatura

search by: Part Number All Omega Search

High Temperature Nextel Insulated Thermocouple Elements

XC SERIES



High Temperature Nextel Insulated Thermocouple Elements



\$ 21.00 XC-14-K-12

- Standard 0.3 m (12") Long Thermocouple Elements
- Insulation Temperature Rating Up to 1200°C (2200° F)
- Available In Type K, E and J Calibrations

[View related products - Thermocouples](#)

Click for [larger image](#).



OMEGA ® Nextel Ceramic Insulated Thermocouples are easy-to-use precise temperature elements manufactured to meet the highest industry standards. The Nextel ceramic insulation is rated for 1200° C (2200°F) continuous use, or 1425°C (2600°F) short term. These highly versatile elements are the ideal solution for many high temperature applications. Combined with OMEGA's stock thermowells and industrial heads, a complete head and well assembly can be quickly assembled for fast delivery.

Available in 3 wire sizes, 14, 20 and 24 gage, the standard element configuration is 0.3 meters (12 inches) in length with a general purpose welded bead, exposed junction thermocouple, plus 13 mm (0.5") stripped end termination. Calibration types K (CHROMEKA ® -ALOMEGA ®) E (CHROMEKA ® -Constantan), and J (Iron-Constantan) are stocked for fast delivery. For additional abrasion protection, stainless steel or Inconel overbraiding is available. Consult sales for additional information.

Want to learn more about [thermocouples](#)? Click on the link to go to our [thermocouple](#) tutorial page!

To Order (Specify Model Number) [Add to Cart](#)

+ What Other People Bought: When you see this icon, click on it to expand a list of products that other people have bought when they purchased this model.

Part Number	Availability	Price	Description	RoHS	Qty.
+ XC-14-K-12	In Stock	\$21.00	14 awg, Type K, Temp. Range -185 to 1250°C (-300 to 2300°F)	✓	<input type="text" value="0"/>
+ XC-20-K-12	In Stock	\$20.00	20 awg, Type K, Temp. Range -185 to 1250° C (-300 to 2300°F)	✓	<input type="text" value="0"/>
+ XC-24-K-12	In Stock	\$20.00	24 awg, Type K, Temp. Range -185 to 1250° C (-300 to 2300°F)	✓	<input type="text" value="0"/>
XC-14-E-12	1 Week	\$21.00	14 awg, Type E, Temp. Range -185 to 850°C (-300 to 1600°F)	✓	<input type="text" value="0"/>
XC-20-E-12	1 Week	\$20.00	20 awg, Type E, Temp. Range -185 to 850°C (-300 to 1600°F)	✓	<input type="text" value="0"/>
XC-24-E-12	1 Week	\$20.00	24 awg, Type E, Temp. Range -185 to 850°C (-300 to 1600°F)	✓	<input type="text" value="0"/>
XC-14-J-12	In Stock	\$21.00	14 awg, Type J, Temp. Range -185 to 750°C		

			(-300 to 1400°F)	✓	<input type="text" value="0"/>
XC-20-J-12	In Stock	\$20.00	20 awg, Type J, Temp. Range -185 to 750°C (-300 to 1400°F)	✓	<input type="text" value="0"/>
XC-24-J-12	In Stock	\$20.00	24 awg, Type J, Temp. Range -185 to 750°C (-300 to 1400°F)	✓	<input type="text" value="0"/>

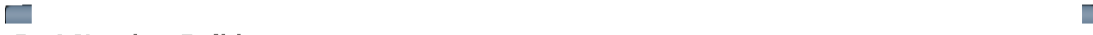


[Add to Cart](#)

† All dollar amounts on this site are shown in US currency.

Note: Consult with Sales for Custom Lengths & Configurations!

Ordering Example: (1) **XC-20-K-12** Type K Thermocouple, 20 awg, 12" Long, **\$20**



Part Number Builder

(1) (2) (3)
XC- - - [Get Price](#)

Option Descriptions

(1) AWG Wire Size

Select

14 for 14 AWG

20 for 20 AWG

24 for 24 AWG

(2) Thermocouple Type

Select

K for K Thermocouple

E for E Thermocouple

J for J Thermocouple

N for N Thermocouple

(3) Length

Select

12 for 12 inches

18 for 18 inches

24 for 24 inches

CUSTOM for custom length in inches(whole numbers only greater than 24 up to 600 inches max)

NOTE: All combinations may not be valid, check spec sheet for valid part numbers.





Technical Sales
Ecuador
1 800 999 119 pedir
enlace a 1 800 433
3488
orders@ni.com

NI USB-9211A

Portable USB-Based DAQ for Thermocouples

4 channels of 24-bit thermocouple input
Plug-and-play connectivity via USB
Compatibility with J, K, R, S, T, N, E, and B thermocouple types
Small, portable devices (12.1 by 8.6 by 2.5 cm)
Includes NI-DAQmx driver software and LabVIEW SignalExpress LE for Windows
Includes NI-DAQmx Base driver software for Linux® and Mac



Specifications

Specifications Documents

[Specifications](#)
[Data Sheet](#)

Specifications Summary

General

Product Name	USB-9211A
Product Family	Signal Conditioning
Form Factor	USB
Operating System/Target	Windows , Linux , Mac OS
Measurement Type	Temperature , Thermocouple
Isolation Type	Bank Isolation
RoHS Compliant	Yes

Analog Input

Channels	0 , 4
Single-Ended Channels	0
Differential Channels	4
Resolution	24 bits
Sample Rate	12 S/s
Max Voltage	80 mV

Maximum Voltage Range	-80 mV , 80 mV
Minimum Voltage Range	-80 mV , 80 mV
Simultaneous Sampling	No
Analog Output	
Channels	0
Digital I/O	
Bidirectional Channels	0
Input-Only Channels	0
Output-Only Channels	0
Number of Channels	0 , 0 , 0
Counter/Timers	
Counters	0
Physical Specifications	
Length	14 cm
Width	8.6 cm
Height	2.5 cm
I/O Connector	Screw terminals
Minimum Operating Temperature	0 °C
Maximum Operating Temperature	55 °C
Minimum Storage Temperature	-10 °C
Maximum Storage Temperature	70 °C

Solid State Pressure Transducer, 0 to 5 Vdc or 4 to 20 mA Outputs, Vacuum to 300 psi Ranges

PX209 and PX219 Series


\$ 195.00 PX209-015G5V

 • **FAST DELIVERY! Stock to 1-Week!**

- 5 Point NIST Traceable Calibration Included
- Stainless Steel Fitting and Body
- 0 to 5 Vdc, 0 to 10 Vdc or 4 to 20 mA Outputs Interface with Most Industrial Controls
- Solid State Media Isolation Suitable for Use with Many Industrial Liquids and Gases
- Broad Temperature Compensated Range of -20 to 80°C Yields High Stability with Changing Temperatures
- Electrical Isolation to 100 Meg Ohms Assures Long Term Reliability
- 100,000 Hours MTBF Typical

[View related products - Pressure Transducers](#)

 Click for [larger image](#).


OMEGA's PX209 Series general purpose pressure transducers are accurate, highly reliable pressure transducers suitable for the harshest industrial environments. The small size and lightweight of the PX209 Series pressure sensors are ideal for laboratory and scientific applications. The unusually high performance of this solid state pressure transducer comes from the 4-active-arm-bridge sensor using a micro-machined diffused silicon diaphragm and proprietary thin film media and dielectric isolation barriers. A proprietary ASIC provides excellent temperature compensation from -20 to 80°C (-4 to 176°F), and very tight tolerances for zero balance and span. Packaged in an all stainless steel housing, PX209 pressure transducer has excellent performance and the wetted parts are impervious to many industrial liquids and gases.

The PX209 is also available in metric configurations, with G1/4A ports, and models from 0-1 to 0-20 bar pressure ranges. Please see the [PXM209](#) for complete details, or contact our Pressure department for more information..

SPECIFICATIONS

Voltage Output

Excitation: 24 Vdc @ 15 mA (7 to 35 Vdc for 5 V output, 12 to 35 for 10 V output)

Output: 0 to 5 Vdc or 0 to 10 Vdc ±1.5% (3-wire)

Zero Balance: 0 Vdc ±2% FSO

Common Specifications

Accuracy: 0.25% BFSL (including linearity, hysteresis and repeatability)

Operating Temperature: -54 to 121°C (-65 to 250°F)

Compensated Temperature: -20 to 80°C (-4 to 176°F)

Thermal Effects: 0.04% FS/°C (0.02% FS/°F)

Proof Pressure: 150%

Burst Pressure: 300% range max.

Response Time: 2 mS typical

Vibration Sensitivity: At 20 g peak sinusoidal vibration from 10 Hz to

4 to 20 mA Output

Excitation: 24 Vdc (7 to 35 Vdc) reverse polarity protected

Output: 4 to 20 mA \pm 1% FSO (2-wire)

Zero Balance: 4 mA \pm 2% FSO

Max. Loop Resistance: 50 x (supply voltage -10) Ohms

2000 Hz (1.2" D.A.), the output shall not exceed 0.04% FS/g for 15 psi range to 0.005% FS/g for 100 psi and above

Natural Frequency: >35 kHz for 100 psi range

Gage Type: Diffused silicon strain gages

Wetted Parts: 316 SS, borosilicate glass, silicon nitride, epoxy

Pressure Port: 1/4-18 NPT

Electrical Connections:

PX209: 1 m (36") shielded 4-conductor cable

PX219: 9.4 mm mini-DIN 40050 Plug Connector Supplied

Weight: 128 g (4.5 oz)

PSI Range	BAR Range	CABLE STYLE	CONN. STYLE	COMPATIBLE METERS
GAGE PRESSURE RANGES (psig) WITH 0 to 5 Vdc OUTPUT				
0 to 15	0 to 1.0	PX209-015G5V	PX219-015G5V	DPi8 , DP41-E , DP25B-E
0 to 30	0 to 2.1	PX209-030G5V	PX219-030G5V	DPi8 , DP41-E , DP25B-E
0 to 60	0 to 4.1	PX209-060G5V	PX219-060G5V	DPi8 , DP41-E , DP25B-E
0 to 100	0 to 6.9	PX209-100G5V	PX219-100G5V	DPi8 , DP41-E , DP25B-E
0 to 200	0 to 13.8	PX209-200G5V	PX219-200G5V	DPi8 , DP41-E , DP25B-E
0 to 300	0 to 20.7	PX209-300G5V	PX219-300G5V	DPi8 , DP41-E , DP25B-E
GAGE PRESSURE RANGES (psig) WITH 4 to 20 mA OUTPUT				
0 to 15	0 to 1.0	PX209-015GI	PX219-015GI	DPi8 , DP41-E , DP25B-E
0 to 30	0 to 2.1	PX209-030GI	PX219-030GI	DPi8 , DP41-E , DP25B-E
0 to 60	0 to 4.1	PX209-060GI	PX219-060GI	DPi8 , DP41-E , DP25B-E
0 to 100	0 to 6.9	PX209-100GI	PX219-100GI	DPi8 , DP41-E , DP25B-E
0 to 200	0 to 13.8	PX209-200GI	PX219-200GI	DPi8 , DP41-E , DP25B-E
0 to 300	0 to 20.7	PX209-300GI	PX219-300GI	DPi8 , DP41-E , DP25B-E
ABSOLUTE PRESSURE RANGES (psia) WITH 0 to 5 Vdc OUTPUT				
0 to 15	0 to 1.0	PX209-015A5V	PX219-015A5V	DPi8 , DP41-E , DP25B-E
0 to 30	0 to 2.1	PX209-030A5V	PX219-030A5V	DPi8 , DP41-E , DP25B-E
0 to 60	0 to 4.1	PX209-060A5V	PX219-060A5V	DPi8 , DP41-E , DP25B-E
0 to 100	0 to 6.9	PX209-100A5V	PX219-100A5V	DPi8 , DP41-E , DP25B-E
0 to 200	0 to 13.8	PX209-200A5V	PX219-200A5V	DPi8 , DP41-E , DP25B-E
0 to 300	0 to 20.7	PX209-300A5V	PX219-300A5V	DPi8 , DP41-E , DP25B-E
ABSOLUTE PRESSURE RANGES (psia) WITH 4 to 20 mA OUTPUT				
0 to 15	0 to 1.0	PX209-015AI	PX219-015AI	DPi8 , DP41-E , DP25B-E
0 to 30	0 to 2.1	PX209-030AI	PX219-030AI	DPi8 , DP41-E , DP25B-E
0 to 60	0 to 4.1	PX209-060AI	PX219-060AI	DPi8 , DP41-E , DP25B-E
0 to 100	0 to 6.9	PX209-100AI	PX219-100AI	DPi8 , DP41-E , DP25B-E
0 to 200	0 to 13.8	PX209-200AI	PX219-200AI	DPi8 , DP41-E , DP25B-E
0 to 300	0 to 20.7	PX209-300AI	PX219-300AI	DPi8 , DP41-E , DP25B-E
VACUUM AND COMPOUND RANGES WITH 0 to 5 Vdc OUTPUT				
-14.7 to 0	-1 to 0	PX209-30VAC5V	PX219-30VAC5V	DPi8 , DP41-E , DP25B-E
-14.7 to 15	-1 to 1.0	PX209-30V15G5V	PX219-30V15G5V	DPi8 , DP41-E , DP25B-E
-14.7 to 45	-1 to 3.1	PX209-30V45G5V	PX219-30V45G5V	DPi8 , DP41-E , DP25B-E
-14.7 to 85	-1 to 5.9	PX209-30V85G5V	PX219-30V85G5V	DPi8 , DP41-E , DP25B-E
-14.7 to 135	-1 to 9.3	PX209-30V135G5V	PX219-30V135G5V	DPi8 , DP41-E , DP25B-E
VACUUM AND COMPOUND RANGES WITH 4 to 20 mA OUTPUT				
-14.7 to 0	-1 to 0	PX209-30VACI	PX219-30VACI	DPi8 , DP41-E , DP25B-E
-14.7 to 15	-1 to 1.0	PX209-30V15GI	PX219-30V15GI	DPi8 , DP41-E , DP25B-E
-14.7 to 45	-1 to 3.1	PX209-30V45GI	PX219-30V45GI	DPi8 , DP41-E , DP25B-E
-14.7 to 85	-1 to 5.9	PX209-30V85GI	PX219-30V85GI	DPi8 , DP41-E , DP25B-E
-14.7 to 135	-1 to 9.3	PX209-30V135GI	PX219-30V135GI	DPi8 , DP41-E , DP25B-E



Technical Sales
Ecuador
1 800 999 119 pedir
enlace a 1 800 433
3488
orders@ni.com

NI USB-6008

12-Bit, 10 kS/s Low-Cost Multifunction DAQ

8 analog inputs (12-bit, 10 kS/s)
2 analog outputs (12-bit, 150 S/s); 12 digital I/O; 32-bit counter
Bus-powered for high mobility; built-in signal connectivity
OEM version available
Compatible with LabVIEW, LabWindows/CVI, and
Measurement Studio for Visual Studio .NET
NI-DAQmx driver software and NI LabVIEW SignalExpress LE
interactive data-logging software



Specifications

Specifications Documents

Specifications (2)
Data Sheet

Specifications Summary

General

Product Name	USB-6008
Product Family	Multifunction Data Acquisition
Form Factor	USB
Operating System/Target	Windows , Linux , Mac OS , Pocket PC
DAQ Product Family	B Series
Measurement Type	Voltage
RoHS Compliant	Yes

Analog Input

Channels	8 , 4
Single-Ended Channels	8
Differential Channels	4
Resolution	12 bits
Sample Rate	10 kS/s
Throughput	10 kS/s

Max Voltage	10 V
Maximum Voltage Range	-10 V , 10 V
Maximum Voltage Range Accuracy	138 mV
Minimum Voltage Range	-1 V , 1 V
Minimum Voltage Range Accuracy	37.5 mV
Number of Ranges	8
Simultaneous Sampling	No
On-Board Memory	512 B
Analog Output	
Channels	2
Resolution	12 bits
Max Voltage	5 V
Maximum Voltage Range	0 V , 5 V
Maximum Voltage Range Accuracy	7 mV
Minimum Voltage Range	0 V , 5 V
Minimum Voltage Range Accuracy	7 mV
Update Rate	150 S/s
Current Drive Single	5 mA
Current Drive All	10 mA
Digital I/O	
Bidirectional Channels	12
Input-Only Channels	0
Output-Only Channels	0
Number of Channels	12 , 0 , 0
Timing	Software
Logic Levels	TTL
Input Current Flow	Sinking , Sourcing
Output Current Flow	Sinking , Sourcing
Programmable Input Filters	No
Supports Programmable Power-Up States?	No
Current Drive Single	8.5 mA
Current Drive All	102 mA
Watchdog Timer	No

Supports Pattern I/O?	No
Maximum Input Range	0 V , 5 V
Maximum Output Range	0 V , 5 V
Counter/Timers	
Counters	1
Buffered Operations	No
Debouncing/Glitch Removal	No
GPS Synchronization	No
Maximum Range	0 V , 5 V
Max Source Frequency	5 MHz
Minimum Input Pulse Width	100 ns
Pulse Generation	No
Resolution	32 bits
Timebase Stability	50 ppm
Logic Levels	TTL
Physical Specifications	
Length	8.51 cm
Width	8.18 cm
Height	2.31 cm
I/O Connector	Screw terminals
Timing/Triggering/Synchronization	
Triggering	Digital
Synchronization Bus (RTSI)	No

Catálogo G.7. Compresor y Secador de Aire

OIL-LESS AIR COMPRESSORS



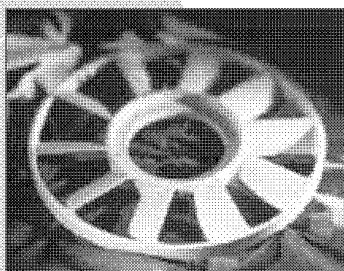
Long lasting cast iron, hard chrome-plated cylinders. PTFE guide rings prevent the pistons from contact, raising efficiency. Sealed anti-friction bearings in the upper and lower connecting rod ends for increased life.



Strong ductile iron crankshafts are mounted with sealed anti-friction bearings in a rugged cast iron crankcase.



Cast iron heads and spring-loaded valves with stainless steel gages, phosphoric bronze seats and Swedish steel discs keep your compressor running cool and offer a longer operating life.



Large aluminum cooling fan and low compressor speeds keep the PureAir II crankcase, cylinders and heads running cool, reducing wear and increasing the life of the unit.

Oil-less is better.

Whether it's healthcare, instrumentation, or laboratory applications, the need for pure, environmentally clean compressed air is rapidly expanding.

The only compressor you'll need.

Gardner Denver's PureAir II is changing the way the world uses oil-free compressed air. By developing a compressor that can run 24 hours a day, Gardner Denver has eliminated the need for oversizing and back-up units that add unnecessary expense.

Expect the most from the oil-less leader.

The craftsmanship of the PureAir II is nothing short of the best in the industry. Using the finest materials, and design techniques, Gardner Denver now offers a smaller version of the 24-hour a day oil-less compressor that will deliver the clean air you need.

ONLY MAY NOT INCLUDE PARTICULARS

All PureAir II compressors are 100% duty cycle, V-belt-driven packaged units with:

- Inlet Air Filter Silencers
- Enclosed Belt Guards
- Electric Motor
- Discharge Line Unloader Solenoid Valves
- Pressure Relief Valves
- Automatic Start-Stop Controls
- Check Valves
- Interconnecting Wiring and Piping
- Structural Steel Frames

Tank-mounted models include horizontal air receivers that are ASME coded

TYPICAL PERFORMANCE FOR A PUREAIR II

Pump	Motor HP	Air Delivery CFM @ 100 PSIG	Compressor Speed - RPM
CCE20	1	2.9	360
CCE20	1 1/2	4.5	570
CCE20	2	6.3	680
CCE30	3	9.4	650
CVE50	5	15.6	650

MAINTENANCE. Keeping the PureAir II up and running is as simple as checking the machine periodically. And, with no oil or fluids to change, there's little need for costly maintenance.

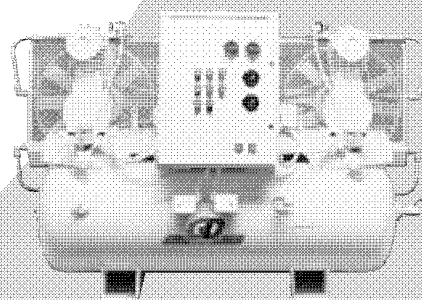
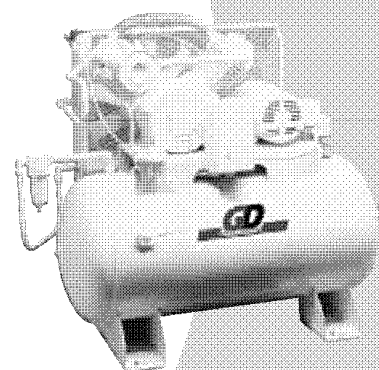
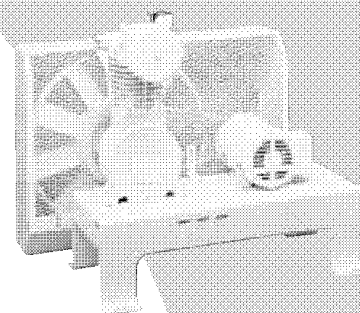
DURABILITY. With the highest reliability in the business, you can be assured that your PureAir II will always be up and running, 24 hours a day.

SERVICE. Should you need help with your PureAir II or have any questions about operation or maintenance, your Gardner Denver Service Representative stands ready to serve you.

WARRANTY. All PureAir II units are guaranteed with a one-year warranty on the compressor pump and all other parts and components.

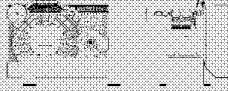
PARTS. The 24-hour Gardner Denver worldwide parts distribution network can deliver parts and accessories quickly, wherever and whenever they are needed.

EXPANDABILITY. Whether you just need a compressor or a complete compressed air system, Gardner Denver has the products, service and expertise to get your system designed, fabricated and shipped directly to you.



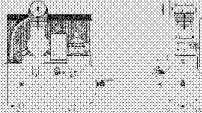
SPECIALTIES

BASE MOUNTED



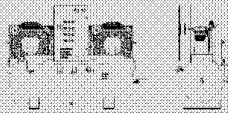
Unit Model	HP	Pump	Pump RPM	CFM Delivery*		Bore Dia in	Stroke IN	Dimensions L x W x H in	WT lbs
				50 psig	100 psig				
B1MTOII	1	CCE20	360	4.1	2.9	3.94	2.36	36 x 22 x 30	190
B1.5MTOII	1.5	CCE20	570	6.8	4.5	3.94	2.36	36 x 22 x 30	196
B2MTOII	2	CCE20	680	8.2	6.3	3.94	2.36	36 x 22 x 30	201
B3MTOII	3	CCE30	650	11.2	9.4	4.72	2.56	36 x 22 x 30	264
B5MTOII	5	CVE50	650	18.2	15.6	3.94	2.95	36 x 24 x 28	318

SIMPLEX TANK-MOUNTED



Unit Model	HP	Pump	Pump RPM	CFM Delivery*		Bore Dia in	Stroke IN	Dimensions L x W x H in	WT lbs
				50 psig	100 psig				
H1MTOII-3	1	CCE20	360	4.1	2.9	3.94	2.36	38 x 25.5 x 42.5	259
H1MTOII-6	1	CCE20	360	4.1	2.9	3.94	2.36	48 x 25.5 x 47.5	379
H1.5MTOII-3	1.5	CCE20	570	6.8	4.5	3.94	2.36	38 x 25.5 x 42.5	265
H1.5MTOII-6	1.5	CCE20	570	6.8	4.5	3.94	2.36	48 x 25.5 x 47.5	385
H2MTOII-3	2	CCE20	680	8.2	6.3	3.94	2.36	38 x 25.5 x 42.5	270
H2MTOII-6	2	CCE20	680	8.2	6.3	3.94	2.36	48 x 25.5 x 47.5	390
H3MTOII-6	3	CCE30	650	11.2	9.4	4.72	2.56	48 x 25.5 x 47.5	453
H5MTOII-6	5	CVE50	650	18.2	15.6	3.94	2.95	48 x 25.5 x 45	507

DUPLEX TANK-MOUNTED



Unit Model	HP	Pump	Pump RPM	CFM Delivery*		Bore Dia in	Stroke IN	Dimensions L x W x H in	WT lbs
				50 psig	100 psig				
H1MTOIID-6	1	CCE20	360	8.2	5.8	3.94	2.36	70 x 29 x 48	575
H1MTOIID-8	1	CCE20	360	8.2	5.8	3.94	2.36	70 x 29 x 48	635
H1.5MTOIID-6	1.5	CCE20	570	13.6	9.0	3.94	2.36	70 x 29 x 48	587
H1.5MTOIID-8	1.5	CCE20	570	13.6	9.0	3.94	2.36	70 x 29 x 48	647
H2MTOIID-6	2	CCE20	680	16.4	12.6	3.94	2.36	70 x 29 x 48	597
H2MTOIID-8	2	CCE20	680	16.4	12.6	3.94	2.36	70 x 29 x 48	657
H3MTOIID-8	3	CCE30	650	22.4	18.8	4.72	2.56	70 x 29 x 48	743
H3MTOIID-12	3	CCE30	650	22.4	18.8	4.72	2.56	73 x 22.5 x 52	821
H5MTOIID-8	5	CVE50	650	36.4	31.2	3.94	2.95	70.5 x 29 x 45	851
H5MTOIID-12	5	CVE50	650	36.4	31.2	3.94	2.95	73 x 30.5 x 49.5	929

Example of how to read model designations:

H5MTOIID-12

Horizontal Receiver ——— 5 Horsepower ——— Series ——— Duplex ——— 120-Gallon Receiver

*Units tested in accordance with CAGI/PNEURO acceptance test code PN2CPTC2.

NOTE: Add 1.0" in height for Vibration Isolators and add 3.50" in length for Ball Valve on tank



©2000 Gardner Denver, Inc.
<http://www.gardnerdenver.com>
 1-3-4-215 2nd Edition 5/00

www.gdrecips.com
mktg@gardnerdenver.com
 Litho in U.S.A.



For additional information contact your local representative or Gardner Denver Compressor and Pump Division, 1800 Gardner Expressway, Quincy, Illinois 62301 Customer Service Department Telephone: (815) 875-3321 FAX: (815) 872-0421 Sales and Service in all major cities. For parts information, contact Gardner Denver, Telephone: (815) 875-3321

Catálogo G.8. Dimensionamiento de placa orificio

InstruCalc Ver 5.1 - ISO 5167

20/07/2007

Project .

ISO Orifice Plate - Concentric - Flange Taps - Gas Flow

Tag number DR-001

Input data

Fluid	Air
Maximum gas flow	2.1 sft3/m
Normal gas flow	.053 sft3/m
Inlet pressure	100 psig
Differential range	2747.48 inH2O
Flow temperature	90 degF
Molecular weight	28.964
Cp/Cv specific heat ratio	1.398
Viscosity @ FTP	.01863 cp
Pipe inside diameter	.674 in
Density @ FTP	.565032 lb/ft3
Critical pressure	547 psia
Critical temperature	238.7 degR
Orifice diameter	.0332174 in
Base pressure	14.696 psia
Base temperature	59 degF
Barometric pressure	14.7 psia
Element material	304 stainless steel
Pipe material	Carbon steel

Output data

Beta ratio	.0492839
Normal flow differential	1.75 inH2O
Accuracy percent	1.442 percent
Reynolds number	2447
Max pressure loss	2711 inH2O
Max power loss	.1217 hp
Minimum plate thickness	.125 in
Thermal expansion factor	1.00041
Discharge coefficient	.617345
Gas expansion factor	.999839
Base pressure factor	.999997
Base temperature factor	1

Notes

PLACA ORIFICIO AIRE DE DILUCIÓN

ANEXO H

ANÁLISIS DE COSTOS DEL SISTEMA DE DILUCIÓN DE DISCO ROTATORIO

ANÁLISIS DE COSTOS

El Proyecto “TEORÍA Y DESARROLLO DE UN SISTEMA DE DILUCIÓN PARA MEDICIÓN DE EMISIONES A DIESEL” se financia a partir de los fondos concursables asignados para el desarrollo del mismo a través del convenio interinstitucional entre la E.P.N y CORPAIRE.

El monto total de fondos asignados son: 5000USD.

Los rubros predefinidos se detallan a continuación:

Aporte a la EPN (15% del total de fondos del proyecto)	750 USD.
Aporte al Fondo de Jubilación EPN (1% del total de fondos del proyecto)	50 USD.
Honorarios Investigador	600 USD.
Materiales de Oficina, impresión y reproducción	300 USD.

A continuación se detallan los costos para la construcción del Sistema de Dilución e implementación del mismo con la instrumentación necesaria.

Todos los costos están expresados en dólares e incluyen IVA.

Se adjuntan copias de proformas de materia prima, accesorios, instrumentación y prestación de servicios requeridos para la construcción del Sistema de Dilución.

COSTOS DE LA SISTEMA MECÁNICO DE DISCO ROTATORIO

Estos se dividen en dos ítems:

- **Costo de materia prima y accesorios mecánicos**

El costo de materia prima incluye el de los de unión y ensamblaje (pernos arandelas) y se obtiene de la cotización presentada por la Empresa Metaltronic S.A., y es:

400 USD. (Incluido IVA).

Los precios de los accesorios se detallan a continuación:

Descripción	Cantidad	Precio Unitario	Precio Total
Rodamiento FAG 625.2RSR	2	3.18	6.36
Rodamiento FAG 51104	1	6.33	6.33
Lámina de Felbesto grafitado para empaques espesor 1/32 pulg	1	42.56	42.56
Resorte alambre de piano D=24mm			
Tubería de Acero Inoxidable d=8mm			
Tubería de Cobre			
Codos de bronce			
"T" de bronce			
Bomba peristáltica	1		~400.00
Teflón(no está incluido en la materia prima)			~100.00
		TOTAL	~600.00

- **Costo de maquinado y ensamblaje**

El costo de maquinado y ensamblaje de la parte mecánica del sistema se obtiene de la cotización presentada por la Empresa Metaltronic S.A., y es:

2100 USD. (Incluido IVA).

En el costo total de la Sistema Mecánico de Disco Rotatorio es:
2900 USD. (Incluido IVA).

COSTOS DEL SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS Y CONTROL ELECTRÓNICO DEL MOTOR DE PASOS

Se presenta un listado que incluye los precios de los instrumentos y partes que conforman el Sistema de Adquisición de Datos y Control Electrónico del Motor de Pasos.

1	Descripción	Cantidad	Precio Unitario	Precio Total
XC-24-K-12	Termocupla con aislamiento de cerámica OMEGA tipo K	3	33.6	100.8
NI USB-9211A	Hardware de Adquisición de Datos para termocuplas NATIONAL INSTRUMENTS	1	584.64	584.64
PX209-015A5V	Transductor de Presión tipo absoluto OMEGA 0-15psi	2	376.72	753.44
NI USB-6008	Hardware de Adquisición de Datos para presión NATIONAL INSTRUMENTS	1	215.04	215.04
	Motor de Pasos	1	8.5	8.5
	Controlador PIC			
			TOTAL	~1800.00

El costo del Diseño e Implementación del sistema de Adquisición de Datos y Control Electrónico del Motor de Pasos, se obtiene de la proforma presentada por el Ing. Luis Campoverde:

300 USD. (Incluido IVA).

En el costo total del Sistema de Adquisición de Datos y Control Electrónico del Motor de Pasos es: 2100 USD. (Incluido IVA).

RESUMEN DE COSTOS

En resumen los costos del Proyecto son:

Aporte a la EPN (15% del total de fondos del proyecto)	750 USD
Aporte al Fondo de Jubilación EPN (1% del total de fondos del proyecto)	50 USD
Honorarios Investigador	600 USD
Materiales de Oficina, impresión y reproducción	300 USD
Costo Sección Mecánica del Sistema de Dilución	2900 USD
Costo Sistema de Adquisición de Datos y Control Electrónico del Motor de Pasos	2100 USD
COSTO TOTAL DEL PROYECTO	6800

ANEXO I

PROFORMAS DE PARTES Y SERVICIOS DEL SISTEMA DE DILUCIÓN DE DISCO ROTATORIO

No.- 6020
 Distrito Metropolitano de Quito
 26 de Octubre del 2006



Señores:
ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
 Atn. Ing. Ángel Portilla
 Presente:

A continuación se detalla la cotización del servicio de maquinado y ensamblaje del proyecto "Teoría y desarrollo de un sistema para medición de emisiones a diesel" de acuerdo con su pedido:

CONDICIONES COMERCIALES:

Precio de fabricación:

- Maquinado y ensamblaje: 2.100
- Materia prima e insumos: 400
- TOTAL 2.500 USD

Tiempo de entrega: 15 días a partir de la aceptación del contrato.

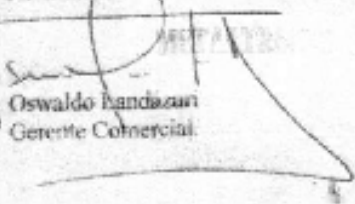
Forma de pago: 70% a la aceptación del contrato y 30% al momento de la entrega del producto.

Estos precios no incluyen I.V.A.

NOTA: esta cotización no incluye: resortes, rodamientos, motor, matrimonio motor.

Metaltronic es una empresa líder en el sector metalmecánico del Ecuador desde hace 30 años y nuestros productos son elaborados cumpliendo los más elevados estándares de calidad, de ello pueden dar fe empresas como: General Motors del Ecuador, Aymesa, General Motors de Venezuela, Domizil, entre muchos otros.

Atentamente


 Oswaldo Bandazari
 Gerente Comercial



RECIBIDO

NOMBRE: Huiteros

FECHA: 27/12/06

DISTRIBUIDOR PARA EL ECUADOR

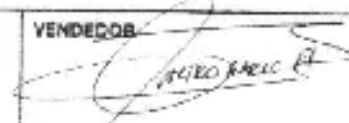
R.U.C.: 0101033124001
 AUT. SRL: 1103408064

Orbitas Landuse Pínel Andino
 Avenida Paucarbamba 1-100 y Manuel J. Calle (Escuela)
 Tel. P&A (07) 268-2185 • Fax: (07) 261-7800
 E-mail: orbitas@orbitas.net.ec www.orbitas.com.ec
 P.O. Box 01 05 1578 • CUENCA-ECUADOR

FACTURA N° 001-001- 0005945

FECHA: Cuenca, 7 de Agosto del 2006
 CLIENTE: Escuela Politécnica Nacional R.U.C.: 1760005620001
 DIRECCION: Ladrón de Guevara 11-253 y Andalucía.
 CIUDAD: QUITO
 CONDICIONES DE PAGO:
 ENTREGADO A:

CODIGO	ARTICULO	CANT.	V. UNITARIO	VALOR TOTAL
779438-01	USB-9211A 4-ch, 24-bit Thermocouple Input Module, for Windows	1	522,00	522,00
XC-24-K-12	High Temperature Nextel Insulated Thermocouple Elements.	3	30,00	90,00
SONE:			SUBTOTAL	612,00
Seiscientos ochenta y cinco dólares 44/100			MANO DE OBRA I.V.A. TARIFA 12 %	73,44
			TOTAL S	685,44

CONTABILIDAD	VENDEDOR 	RECIBI CONFORME
--------------	---	-----------------



High Lights


**NATIONAL
INSTRUMENT**
DISTRIBUIDOR PARA EL E

 H.U.C.: 0101033124001
 AUT. SRI: 1100408064

 C/Colón 1 Norte
 Avenida Pichincha entre 1-103 y Mariscal
 Telf: (02) 285 0211 y (02) 285 0212
 E-mail: ventas@nacional.com.ec www.ni.com.ec
 P.O. Box 01.02.1419 • CUENCA

FACTURA N° 001-001- 0005930

 FECHA: Cuenca, 25 de Julio del 2006
 CULTE: Escuela Politecnica Nacional R.U.C.: 1760005620
 DIRECCION: Ladrón de Guevara 11-253 y Andalucía
 CIUDAD: Quito
 CONDICIONES DE PAGO:
 ENTREGA A:

CODIGO	ARTICULO	CANT.	V. UNITARIO	VALOR
PX209-01545V	Transductor de presión tipo absoluto de 0-15 PSI	2	336.55	672.71
SON:			SUBTOTAL	672.71
Seiscientos cincuenta y tres dólares 43/100			MARGEN DE OBRAS I.V.A. TARIFA 12 %	80.72
			TOTAL \$	753.43

CONTABILIDAD	VENDEDOR <i>[Signature]</i> ATEL MACO	RECIBI CONFORME
--------------	---	-----------------

BAC-TECHNOLOGY**REPRESENTACIONES**

Cdo. La Alborada Eje: Itapa.
 Av. Fco. De Orellana y Benjamín Carrón.
 CC. Galerías, Local 14
 Guayaquil-Ecuador
 TEL: 2249513 TELEFAX: 2642540
 bac-tech@gye.satnet.net
 RUC:0992281707901

Oferta No. 1-07-0664
 Cliente SANTOS CMI
 Atención SRTA. PAULINA CORTES
 Fecha 15 de Julio de 2007
 Referencia

Item	Cant.	Código	Descripción	Precio Unitario	Precio Total
1	1	1DA00019	AIR HEATER MARCA TEMPCO, 1/2 X 6", 400WATTSM 120 VAC ENTREGA 4-5 SEMANAS	200.00	200.00
2	1	400R	CONTROLADOR DE TEMPERATURA, MARCA GEFRAK, ENTRADA UNIVERSAL (CUALQUIER TERMOCO. IPTA) 2 SALIDAS A RELE, ALIMENTACIO 100,240 VAC, TAMAÑO 48X48mm ENTREGA INMEDIATA	150.00	150.00
SUBTOTAL					380.00

Tiempo de entrega : EN CADA ITEM

Forma de pago : CHEQUE CON LA ORDEN, PRECIOS NO INCLUYEN IVA. LOS
 PRECIOS SON POR LAS CANTIDADES INDICADAS. SI CAMBIAN LAS
 CANTIDADES, LOS PRECIOS PUEDEN CAMBIAR.

VALIDEZ DE LA OFERTA : 15 DIAS

Notas :

Jag Bolívar Albán
 Gerente

Av. Francisco de Orellana y Benjamín Carrón CC Galerías L. 14,
 GUAYASquil-Ecuador 2642540
 e-mail: bac-tech@gye.satnet.net



High Level



**NATIONAL
INSTRUMENTS**
DISTRIBUIDOR PARA EL ECUADOR

R.U.C.: 0101033124301
AUT. SRI: 1103409064

Company Location: P.O. Box 100
Avenida Pichincha 2411-100 y Mariscal Sucre
Tel: FONO: 001-226-0718 • Fax: 001-281-7800
Web: www.ni.com
Tel: 84611691870 • CUENCA-POLAJOR

FACTURA N° 001-001- 0005797

FECHA: Cuenca, 18 de Mayo del 2006
CLIENTE: Ing. Ángel Adalberto Fortilla Aguilari. RUC: 0100030270001
DIRECCION: Km. 30.5 Vía Perimetral
CIUDAD: Quito
CONDICIONES DE PAGO:
ENTREGADO A:

CODIGO	ARTICULO	CANT.	V. UNITARIO	VALOR TOTAL
776326 22	NI USB-6038 Kit, JSB-6036 + LabVIEW Student Edition for Windows	1	149.00	149.00
SON:			SUBTOTAL	149.00
Doscientos Cuarenta y Nueve 0/1000.			MANO DE OBRA I.V.A. TARIFA 6%	23.00
			TOTAL S	172.00

CONTABILIDAD	VEN. DE COB.	RECIBI CONFORME
--------------	--------------	-----------------



MATRIZ REGISTRADA
 E.O. 2002001001
 Vía Colombia 12 P.O. Población - Cofre 091100
 Tels. 02015-22000 - Telex: 024200
 E-mail: ventas@ivanbohman.com.ec
 www.ivanbohman.com.ec

CUARTO SUPLENTE
 Vía Pedro Pablo Kuczynski 10795, Napa
 Tels. 02020-20200 - 202001
 Tels. 202010

IVAN BOHMAN C.A.

CONTRIBUYENTE ESPECIAL - Resolución 6025

AUTORIZACIÓN SRI N° 1104486502

FACTURA

N° 004-001-0052187

IMPORTANTE AL COMPRADOR

1. IVANBOHMAN C.A. NO ACEPTA DEVOLUCIONES DE MERCADERIA SIN JUSTIFICACION, UNA VEZ QUE ESTE HA SALIDO DEL ALMACEN.
2. LAS MERCADERIAS AMBAGADAS EN ESTA FACTURA VAJAN POR CUENTAY RIESGO DEL COMPRADOR.
3. SOBRE TODA FACTURA QUE NO SEA CANCELADA A SU VENCIMIENTO SE CARGARA INTERESES LEGALES EN MORA Y COMISIONES DE COBRANZA.

ESTE DOCUMENTO SE EMITE EN VIRTUD DE LA LEY DE TRANSPARENCIA EN LA ADMINISTRACION PUBLICA Y DE LA LEY DE ACCESO A LA INFORMACION PUBLICA. EN CASO DE QUE SE REQUIERAN DATOS PARA LA EMISION DE ESTE DOCUMENTO, SE DEBE DIRIGIRSE AL AREA DE ATENCION AL CLIENTE DEL AREA DE VENTAS, EN EL SIGUIENTE CORREO ELECTRONICO: ventas@ivanbohman.com.ec. EN CASO DE QUE SE REQUIERAN DATOS PARA LA EMISION DE ESTE DOCUMENTO, SE DEBE DIRIGIRSE AL AREA DE ATENCION AL CLIENTE DEL AREA DE VENTAS, EN EL SIGUIENTE CORREO ELECTRONICO: ventas@ivanbohman.com.ec. EN CASO DE QUE SE REQUIERAN DATOS PARA LA EMISION DE ESTE DOCUMENTO, SE DEBE DIRIGIRSE AL AREA DE ATENCION AL CLIENTE DEL AREA DE VENTAS, EN EL SIGUIENTE CORREO ELECTRONICO: ventas@ivanbohman.com.ec.

FECHA: 2007 04 18
 AÑO MES DIA

TIPO DE VENTA: BOBBERA
 CONDICION DE VENTA: CONTADO

FECHA DE VENCIMIENTO: QUITO SUR
 AÑO MES DIA

TRANSFERENCIA DE PROPIEDAD: NO DEBE ENVIAR

SEÑOR (ES) ALEX GUZMAN
 DIRECCION LADRON DE BUEYERA SN Y TR-500
 CIUDAD QUITO RUC 171633109-1
 PROVINCIA
 TELEFONO 2702801 FAX
 TRANSPORTISTA BOBBERA DIRECTO

CODIGO CLIENTE 01179099
 ORDEN DEL COMPROBANTE HORA 12:49:13 P
 CODIGO VENDEDOR 14037 CODIGO FACTURADOR 14037
 NOMBRE VENDEDOR BOBBERA NOMBRE FACTURADOR BOBBERA
 OBSERVACIONES CLIENTE RETIENE L.N. 20114
 SUJECION QUITO SUR 1010973 / 004-001-0052187

NA	CIT	REFERENCIA	DESCRIPCION	UN	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO	FACT.	VALOR TOTAL
73	11	L-TEFLON FITE 65MM X 3M	TEFLON (FITE)	M	02	35.8905	.00	.00
73	11	L-TEFLON FITE 65MM X 3M	TEFLON (FITE)	M	24	35.8905	100.00	7.00

SUBTOTAL	COSTO ADICIONAL	O.E.M.	MANO DE OBRA	IVA % 17%	IVA 0%	FLETE
7.98		.00	1.00	1.08		.00
NETO A PAGAR						10.06

ENTREGADO POR: [Signature]
 ADQUIRIENTE