

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA

“PROYECTO FINAL DE CARRERA”

Regeneración de atmósfera en un sumergible hiperbárico. Aplicación a vehículo tripulado para trabajos submarinos.



Departamento Ingeniería Química y Ambiental

David Mira Megías

Ingeniería Técnica Naval. Especialidad Estructuras Marinas

Septiembre 2003

Indice

1.	INTRODUCCIÓN	14
2.	OBJETIVOS	17
3.	ANTECEDENTES HISTÓRICOS	19
3.1	DESARROLLO HASTA EL FINAL DE LA PRIMERA GUERRA MUNDIAL	19
3.2	DESARROLLO ENTRE EL FINAL DE LA PRIMERA GUERRA MUNDIAL Y EL FINAL DE LA SEGUNDA GUERRA MUNDIAL	20
3.3	DESARROLLO DESDE EL FINAL DE LA SEGUNDA GUERRA MUNDIAL	20
3.4	GENERALIDADES	21
3.5	ESTUDIO DE LOS PRINCIPALES ABSORBENTES	22
4.	FUNDAMENTO TEÓRICO	24
4.1	INTRODUCCIÓN	24
4.1.1	<i>Cálculo del suministro de aire</i>	24
4.2	VENTILACIÓN DE GRANDES HABITÁCULOS	26
4.3	DEDUCCIÓN DE LA FÓRMULA GENERAL	27
4.4	CÁLCULO DEL CAUDAL DE VENTILACIÓN	30
4.5	CÁLCULO DEL CAUDAL DE VENTILACIÓN DEL SUMERGIBLE	32
5.	APLICACIÓN. VEHÍCULO TRIPULADO PARA TRABAJOS SUBMARINOS	38
5.1	DISEÑO DEL NUEVO PROTOTIPO	40
5.1.1	<i>Generalidades</i>	40
5.1.2	<i>Disposición general</i>	41
5.1.3	<i>El visor</i>	41
5.1.4	<i>Estructura</i>	41
5.1.5	<i>Material de construcción</i>	42
5.1.6	<i>Casco resistente</i>	43
5.1.7	<i>Sistema de comunicación</i>	44
5.1.8	<i>Sistema de propulsión</i>	44
5.1.9	<i>Sistema de potencia</i>	45
5.1.10	<i>Sistema de control</i>	46
5.1.11	<i>Panel de control</i>	46
5.1.12	<i>Sistemas de emergencia</i>	46
5.1.13	<i>Sistema de vídeo e iluminación</i>	48

5.1.14	<i>Sistema de manipulación</i>	49
5.1.15	<i>Sistema de control de atmósferas</i>	49
5.1.16	<i>Maniobras de posicionamiento</i>	50
5.1.17	<i>Inmersión</i>	50
5.1.18	<i>Estabilidad</i>	51
5.1.18.1	Estabilidad transversal.....	51
5.1.18.2	Estabilidad longitudinal.....	52
5.1.19	<i>Equipos y servicios</i>	53
5.1.19.1	Servicio de trimado.....	53
5.1.19.2	Servicio de compensación.....	54
5.1.19.3	Servicio de regulación.....	54
5.1.19.4	Servicio de aire comprimido y lastre.....	55
5.1.19.5	Equipo de regeneración de atmósferas.....	56
5.1.20	<i>Aplicación virtual</i>	59
5.1.21	<i>Sumergibles del mismo propósito</i>	60
6.	METODOLOGÍA	65
6.1	DETERMINACIÓN DEL VOLUMEN DE ABSORCIÓN DE CO ₂	65
6.1.1	<i>Introducción</i>	65
6.1.2	<i>Material necesario</i>	66
6.1.3	<i>Cálculos previos</i>	66
6.1.3.1	Determinación de la cantidad de ácido clorhídrico que debemos utilizar.....	66
6.1.4	<i>Método</i>	68
6.2	ESTANQUEIDAD EN CÁMARA HIPERBÁRICA.....	70
6.2.1	<i>Introducción</i>	70
6.2.2	<i>Material necesario</i>	70
6.2.3	<i>Método</i>	71
6.3	DETERMINACIÓN DE HIDRÓXIDOS Y CARBONATOS.....	74
6.3.1	<i>Introducción</i>	74
6.3.2	<i>Material necesario</i>	74
6.3.3	<i>Cálculos previos</i>	74
6.3.4	<i>Método</i>	77
6.4	CAPTACIÓN PASIVA.....	79
6.4.1	<i>Ambiente normobárico</i>	79
6.4.1.1	Ambiente.....	79
6.4.1.2	Simulador.....	80
6.4.2	<i>Ambiente hiperbárico</i>	82
6.4.2.1	Simulador.....	82
6.5	CAPTACIÓN ACTIVA.....	84

6.5.1	<i>Ambiente normobárico</i>	84
6.5.1.1	Ambiente	84
6.5.2	<i>Bomba de vacío</i>	86
6.5.2.1	Simulador	86
6.5.3	<i>Ambiente hiperbárico</i>	88
6.5.3.1	Simulador	88
6.5.4	<i>Botella de CO₂</i>	90
6.5.4.1	Ambiente	90
7.	RESULTADOS EXPERIMENTALES	93
7.1	INTRODUCCIÓN	93
7.2	CAPTACIÓN PASIVA.....	95
7.2.1	<i>Ambiente Normobárico</i>	95
7.2.1.1	Ambiente	95
7.2.1.2	Simulador	97
7.2.2	<i>Ambiente hiperbárico</i>	97
7.2.2.1	Simulador	97
7.3	CAPTACIÓN ACTIVA	102
7.3.1	<i>Ambiente Normobárico</i>	102
7.3.1.1	Ambiente	102
7.3.2	<i>Circuito abierto con bomba de vacío</i>	116
7.3.2.1	Simulador	116
7.3.3	<i>Ambiente hiperbárico</i>	129
7.3.3.1	Simulador	129
8.	ANÁLISIS DE RESULTADOS	150
8.1	CAPTACIÓN PASIVA.....	150
8.1.1	<i>Ambiente normobárico</i>	150
8.1.1.1	Ambiente	150
8.1.1.2	Simulador	151
8.1.2	<i>Ambiente hiperbárico</i>	151
8.1.2.1	Simulador	151
8.2	CAPTACIÓN ACTIVA	152
8.2.1	<i>Ambiente normobárico</i>	152
8.2.1.1	Ambiente	152
8.2.2	<i>Circuito abierto con bomba de vacío</i>	153
8.2.2.1	Simulador	153
8.2.3	<i>Ambiente hiperbárico</i>	154

8.2.3.1	Simulador	154
9.	CONCLUSIONES	155
10.	PLANOS.....	156
11.	BIBLIOGRAFÍA	157

Indice de Tablas

Tabla 1. r en función de caudal y tiempo para $r_0 = 0,8$	34
Tabla 2. r en función de caudal y tiempo para $r_0 = 1$	35
Tabla 3. r en función de caudal y tiempo para $r_0 = 1,2$	36
Tabla 4. r en función de caudal y tiempo para $r_0 = 1,5$	37
Tabla 5. Cantidad de HCl a emplear para la muestra de absorbente	67
Tabla 6. Estanqueidad en cámara hiperbárica	72
Tabla 7. Descompresión cámara hiperbárica.....	73
Tabla 8. Captación pasiva. Ambiente normobárico. Ambiente. Carbonatación en función del tiempo y tipo de absorbente	95
Tabla 9. Captación pasiva. Ambiente hiperbárico. Simulador. Carbonatación en función del tiempo del absorbente tipo I a $P_a = 2$ bar	97
Tabla 10. Captación pasiva. Ambiente hiperbárico. Simulador. Carbonatación en función del tiempo del absorbente tipo II-A a $P_a = 2$ bar.....	98
Tabla 11. Captación pasiva. Ambiente hiperbárico. Simulador. Carbonatación en función del tiempo del absorbente tipo II-B a $P_a = 2$ bar.....	98
Tabla 12. Captación pasiva. Ambiente hiperbárico. Simulador. Carbonatación en función del tiempo del absorbente tipo I a $P_a = 2,5$ bar	98
Tabla 13. Captación pasiva. Ambiente hiperbárico. Simulador. Carbonatación en función del tiempo del absorbente tipo II-A a $P_a = 2,5$ bar.....	99
Tabla 14. Captación pasiva. Ambiente hiperbárico. Simulador. Carbonatación en función del tiempo del absorbente tipo II-B a $P_a = 2,5$ bar	99
Tabla 15. Captación pasiva. Ambiente hiperbárico. Simulador. Carbonatación en función del tiempo del absorbente tipo I a $P_a = 3$ bar	99
Tabla 16. Captación pasiva. Ambiente hiperbárico. Simulador. Carbonatación en función del tiempo del absorbente tipo II-A a $P_a = 3$ bar.....	100
Tabla 17. Captación pasiva. Ambiente hiperbárico. Simulador. Carbonatación en función del tiempo del absorbente tipo II-B a $P_a = 3$ bar.....	100
Tabla 18. Captación pasiva. Ambiente hiperbárico. Simulador. Carbonatación en función del tiempo de los absorbentes a distintas presiones absolutas.....	100

Tabla 19. Captación activa. Ambiente normobárico. Ambiente. Carbonatación en función del tiempo de cada uno de los tres absorbentes. Bomba de vacío.....	102
Tabla 20. Captación activa. Ambiente normobárico. Ambiente. Carbonatación para un rango temporal común de cada uno de los tres absorbentes. Bomba de vacío	103
Tabla 21. Captación activa. Ambiente normobárico. Ambiente húmedo. Carbonatación en función del tiempo del absorbente tipo II-A. Botella CO ₂	105
Tabla 22. Captación activa. Ambiente normobárico. Ambiente sin humedad. Carbonatación en función del tiempo del absorbente tipo I. Botella CO ₂	106
Tabla 23. Captación activa. Ambiente normobárico. Ambiente sin humedad. Carbonatación en función del tiempo del absorbente tipo II-A. Botella CO ₂	106
Tabla 24. Captación activa. Ambiente normobárico. Ambiente sin humedad. Carbonatación en función del tiempo del absorbente tipo II-B. Botella CO ₂	107
Tabla 25. Captación activa. Ambiente normobárico. Ambiente sin humedad. Comparación de la carbonatación en función del tiempo de los absorbentes (serie A-I). Botella CO ₂	108
Tabla 26. Captación activa. Ambiente normobárico. Ambiente sin humedad. Comparación de la carbonatación en función del tiempo de los absorbentes (serie A-II). Botella CO ₂	109
Tabla 27. Captación activa. Ambiente normobárico. Ambiente sin humedad. Carbonatación en función del tiempo de los absorbentes de ambas series. Botella CO ₂	110
Tabla 28. Captación activa. Ambiente normobárico. Ambiente sin humedad. Carbonatación en función del tiempo. Prueba por separado absorbente tipo I. Botella CO ₂	111
Tabla 29. Captación activa. Ambiente normobárico. Ambiente sin humedad. Carbonatación en función del tiempo. Prueba por separado absorbente tipo II-A. Botella CO ₂	112
Tabla 30. Captación activa. Ambiente normobárico. Ambiente sin humedad. Carbonatación en función del tiempo. Prueba por separado absorbente tipo II-B. Botella CO ₂	113
Tabla 31. Captación activa. Ambiente normobárico. Ambiente sin humedad. Carbonatación en función del tiempo. Prueba por separado absorbente tipo II-A y tipo I. Botella CO ₂	114
Tabla 32. Captación activa. Circuito abierto con bomba de vacío. Simulador. Carbonatación absorbente tipo I con 9 % CO ₂	116
Tabla 33. Captación activa. Circuito abierto con bomba de vacío. Simulador. Carbonatación absorbente tipo I con 5 % CO ₂	116
Tabla 34. Captación activa. Circuito abierto con bomba de vacío. Simulador. Carbonatación absorbente tipo I con 4 % CO ₂	116
Tabla 35. Captación activa. Circuito abierto con bomba de vacío. Simulador. Carbonatación absorbente tipo I con 3 % CO ₂	117
Tabla 36. Captación activa. Circuito abierto con bomba de vacío. Simulador. Carbonatación absorbente tipo I con 1,5 % CO ₂	117
Tabla 37. Captación activa. Circuito abierto con bomba de vacío. Simulador. Carbonatación absorbente tipo II-A con 5 % CO ₂	117

Tabla 38. Captación activa. Circuito abierto con bomba de vacío. Simulador. Carbonatación absorbente tipo II-A con 4 % CO ₂	118
Tabla 39. Captación activa. Circuito abierto con bomba de vacío. Simulador. Carbonatación absorbente tipo I con 9 % CO ₂	118
Tabla 40. Captación activa. Circuito abierto con bomba de vacío. Simulador. Carbonatación absorbente tipo II-A con 1,5 % CO ₂	118
Tabla 41. Captación activa. Circuito abierto con bomba de vacío. Simulador. Carbonatación absorbente tipo II-B con 5 % CO ₂	119
Tabla 42. Captación activa. Circuito abierto con bomba de vacío. Simulador. Carbonatación absorbente tipo II-B con 4 % CO ₂	119
Tabla 43. Captación activa. Circuito abierto con bomba de vacío. Simulador. Carbonatación absorbente tipo II-B con 3 % CO ₂	119
Tabla 44. Captación activa. Circuito abierto con bomba de vacío. Simulador. Carbonatación absorbente tipo II-B con 1,5 % CO ₂	120
Tabla 45. Captación activa. Circuito abierto con bomba de vacío. Simulador. Carbonatación absorbente tipo I con 5 % CO ₂	120
Tabla 46. Captación activa. Circuito abierto con bomba de vacío. Simulador. Carbonatación absorbente tipo II-A con 5 % CO ₂	121
Tabla 47. Captación activa. Circuito abierto con bomba de vacío. Simulador. Carbonatación absorbente tipo II-B con 5 % CO ₂	122
Tabla 48. Captación activa. Circuito abierto con bomba de vacío. Simulador. Carbonatación de los tres tipos de absorbentes con 4 % CO ₂	123
Tabla 49. Captación activa. Circuito abierto con bomba de vacío. Simulador. Carbonatación de los tres tipos de absorbentes con 3 % CO ₂	124
Tabla 50. Captación activa. Circuito abierto con bomba de vacío. Simulador. Carbonatación de los tres tipos de absorbentes con 1,5 % CO ₂	125
Tabla 51. Captación activa. Circuito abierto con bomba de vacío. Simulador. Carbonatación del absorbente tipo I para cada porcentaje de CO ₂	126
Tabla 52. Captación activa. Circuito abierto con bomba de vacío. Simulador. Carbonatación del absorbente tipo II-A para cada porcentaje de CO ₂	127
Tabla 53. Captación activa. Circuito abierto con bomba de vacío. Simulador. Carbonatación del absorbente tipo II-B para cada porcentaje de CO ₂	128
Tabla 54. Captación activa. Ambiente hiperbárico. Simulador. Carbonatación circuito abierto con compresor a P _a = 1 bar del absorbente tipo I con 4,5 % CO ₂	129
Tabla 55. Captación activa. Ambiente hiperbárico. Simulador. Carbonatación circuito abierto con compresor a P _a = 1 bar del absorbente tipo II-A con 4,5 % CO ₂	129
Tabla 56. Captación activa. Ambiente hiperbárico. Simulador. Carbonatación circuito abierto con compresor a P _a = 1 bar del absorbente tipo II-B con 4,5 % CO ₂	129

Tabla 57. Captación activa. Ambiente hiperbárico. Simulador. Carbonatación circuito abierto con compresor a P_a = 1 bar del absorbente tipo I con 3 % CO_2	130
Tabla 58. Captación activa. Ambiente hiperbárico. Simulador. Carbonatación circuito abierto con compresor a P_a = 1 bar del absorbente tipo II-A con 3 % CO_2	130
Tabla 59. Captación activa. Ambiente hiperbárico. Simulador. Carbonatación circuito abierto con compresor a P_a = 1 bar del absorbente tipo II-B con 3 % CO_2	130
Tabla 60. Captación activa. Ambiente hiperbárico. Simulador. Carbonatación circuito abierto con compresor a P_a = 1 bar del absorbente tipo I con 1,5 % CO_2	130
Tabla 61. Captación activa. Ambiente hiperbárico. Simulador. Carbonatación circuito abierto con compresor a P_a = 1 bar del absorbente tipo II-A con 1,5 % CO_2	131
Tabla 62. Captación activa. Ambiente hiperbárico. Simulador. Carbonatación circuito abierto con compresor a P_a = 1 bar del absorbente tipo II-B con 1,5 % CO_2	131
Tabla 63. Captación activa. Ambiente hiperbárico. Simulador. Carbonatación circuito abierto con compresor a P_a = 1,5 bar del absorbente tipo I con 3 % CO_2	131
Tabla 64. Captación activa. Ambiente hiperbárico. Simulador. Carbonatación circuito abierto con compresor a P_a = 1,5 bar del absorbente tipo II-A con 3 % CO_2	132
Tabla 65. Captación activa. Ambiente hiperbárico. Simulador. Carbonatación circuito abierto con compresor a P_a = 1,5 bar del absorbente tipo II-B con 3 % CO_2	132
Tabla 66. Captación activa. Ambiente hiperbárico. Simulador. Carbonatación circuito abierto con compresor a P_a = 1,5 bar del absorbente tipo I con 1,5 % CO_2	132
Tabla 67. Captación activa. Ambiente hiperbárico. Simulador. Carbonatación circuito abierto con compresor a P_a = 1,5 bar del absorbente tipo II-A con 1,5 % CO_2	133
Tabla 68. Captación activa. Ambiente hiperbárico. Simulador. Carbonatación circuito abierto con compresor a P_a = 1,5 bar del absorbente tipo II-B con 1,5 % CO_2	133
Tabla 69. Captación activa. Ambiente hiperbárico. Simulador. Carbonatación circuito abierto con compresor a P_a = 1 bar del absorbente tipo I con 4,5 % CO_2	133
Tabla 70. Captación activa. Ambiente hiperbárico. Simulador. Carbonatación circuito abierto con compresor a P_a = 1 bar del absorbente tipo II-A con 4,5 % CO_2	134
Tabla 71. Captación activa. Ambiente hiperbárico. Simulador. Carbonatación circuito abierto con compresor a P_a = 1 bar del absorbente tipo II-B con 4,5 % CO_2	135
Tabla 72. Captación activa. Ambiente hiperbárico. Simulador. Carbonatación circuito abierto con compresor a P_a = 1 bar del absorbente tipo I con 1,5 % CO_2	136
Tabla 73. Captación activa. Ambiente hiperbárico. Simulador. Carbonatación circuito abierto con compresor a P_a = 1 bar del absorbente tipo II-A con 1,5 % CO_2	137
Tabla 74. Captación activa. Ambiente hiperbárico. Simulador. Carbonatación circuito abierto con compresor a P_a = 1 bar del absorbente tipo II-B con 1,5 % CO_2	138
Tabla 75. Captación activa. Ambiente hiperbárico. Simulador. Carbonatación circuito abierto con compresor a P_a = 1,5 bar del absorbente tipo I con 1,5 % CO_2	139

Tabla 76. Captación activa. Ambiente hiperbárico. Simulador. Carbonatación circuito abierto con compresor a P_a = 1,5 bar del absorbente tipo II-A con 1,5 % CO_2	140
Tabla 77. Captación activa. Ambiente hiperbárico. Simulador. Carbonatación circuito abierto con compresor a P_a = 1,5 bar del absorbente tipo II-B con 1,5 % CO_2	141
Tabla 78. Captación activa. Ambiente hiperbárico. Simulador. Carbonatación circuito abierto con compresor a P_a = 1,5 bar del absorbente tipo I con 3 % CO_2	142
Tabla 79. Captación activa. Ambiente hiperbárico. Simulador. Carbonatación circuito abierto con compresor a P_a = 1,5 bar del absorbente tipo II-A con 3 % CO_2	143
Tabla 80. Captación activa. Ambiente hiperbárico. Simulador. Carbonatación circuito abierto con compresor a P_a = 1,5 bar del absorbente tipo II-B con 3 % CO_2	144
Tabla 81. Captación activa. Ambiente hiperbárico. Simulador. Carbonatación circuito abierto con compresor a P_a = 1 bar de los tres absorbentes con 4,5 % CO_2	145
Tabla 82. Captación activa. Ambiente hiperbárico. Simulador. Carbonatación circuito abierto con compresor a P_a = 1 bar de los tres absorbentes con 1,5 % CO_2	146
Tabla 83. Captación activa. Ambiente hiperbárico. Simulador. Carbonatación circuito abierto con compresor a P_a = 1,5 bar de los tres absorbentes con 1,5 % CO_2	147
Tabla 84. Captación activa. Ambiente hiperbárico. Simulador. Carbonatación circuito abierto con compresor a P_a = 1,5 bar de los tres absorbentes con 3 % CO_2	148

Índice de Ilustraciones

Ilustración 1. Ventilación natural de cámara habitada.....	27
Ilustración 2. Evolución r según caudal para $r_0 = 0,8$	34
Ilustración 3. Evolución r según caudal para $r_0 = 1$	35
Ilustración 4. Evolución r según caudal para $r_0 = 1,2$	36
Ilustración 5. Evolución r según caudal para $r_0 = 1,5$	37
Ilustración 6. Imagen virtual de la aplicación.....	59
Ilustración 7. Imagen sumergible <i>Clelia</i>	60
Ilustración 8. Imagen sumergible <i>Deep Rover</i>	61
Ilustración 9. Imagen sumergible <i>Alvin</i>	62
Ilustración 10. Imagen sumergible <i>Deep Worker</i>	63
Ilustración 11. Representación estanqueidad en cámara hiperbárica.....	72
Ilustración 12. Esquema captación pasiva, ambiente normobárico en simulador.....	81
Ilustración 13. Esquema captación pasiva, ambiente hiperbárico en simulador.....	83
Ilustración 14. Esquema captación activa, ambiente normobárico.....	85
Ilustración 15. Esquema captación activa, bomba de vacío en simulador.....	87
Ilustración 16. Esquema captación activa, ambiente hiperbárico en simulador	89
Ilustración 17. Esquema captación activa, botella de CO_2 en ambiente	91
Ilustración 18. Representación puntual. Absorción pasiva normobárica.....	96
Ilustración 19. Representación gráfica. Absorción pasiva normobárica.....	96
Ilustración 20. Representación puntual. Absorción pasiva hiperbárica.....	101
Ilustración 21. Representación gráfica. Absorción pasiva hiperbárica.....	101
Ilustración 22. Representación puntual. Absorción activa ambiente con bomba de vacío	103
Ilustración 23. Representación gráfica. Absorción activa ambiente con bomba de vacío	104
Ilustración 24. Representación puntual. Absorción normobárica con suministro de CO_2 (serie A-I)	108
Ilustración 25. Representación puntual. Absorción normobárica con suministro de CO_2 (serie A-II).....	109
Ilustración 26. Representación puntual. Absorción normobárica con suministro de CO_2 . Serie A	110
Ilustración 27. Representación puntual. Absorción normobárica con suministro de CO_2 . Serie B	111
Ilustración 28. Representación puntual. Absorción normobárica con suministro de CO_2 . Absorbente tipo I	112
Ilustración 29. Representación puntual. Absorción normobárica con suministro de CO_2 . Absorbente tipo II-A	113
Ilustración 30. Representación puntual. Absorción normobárica con suministro de CO_2 . Absorbente tipo II-B	114

Ilustración 31. Representación puntual. Absorción normobárica con suministro de CO ₂ . Absorbente tipo I y tipo II-A	115
Ilustración 32. Representación gráfica. Absorción normobárica, circuito abierto en simulador con bomba de vacío. Absorbente tipo I con 5 % CO ₂	120
Ilustración 33. Representación gráfica. Absorción normobárica, circuito abierto en simulador con bomba de vacío. Absorbente tipo II-A con 5 % CO ₂	121
Ilustración 34. Representación gráfica. Absorción normobárica, circuito abierto en simulador con bomba de vacío. Absorbente tipo II-B con 5 % CO ₂	122
Ilustración 35. Representación gráfica. Absorción normobárica, circuito abierto en simulador con bomba de vacío. Absorbente tipo I, II-A y II-B con 4 % CO ₂	123
Ilustración 36. Representación gráfica. Absorción normobárica, circuito abierto en simulador con bomba de vacío. Absorbente tipo I, II-A y II-B con 3 % CO ₂	124
Ilustración 37. Representación gráfica. Absorción normobárica, circuito abierto en simulador con bomba de vacío. Absorbente tipo I, II-A y II-B con 1,5 % CO ₂	125
Ilustración 38. Representación gráfica. Absorción normobárica, circuito abierto en simulador con bomba de vacío. Absorbente tipo I para cada uno de los porcentajes de CO ₂	126
Ilustración 39. Representación gráfica. Absorción normobárica, circuito abierto en simulador con bomba de vacío. Absorbente tipo II-A para cada uno de los porcentajes de CO ₂	127
Ilustración 40. Representación gráfica. Absorción normobárica, circuito abierto en simulador con bomba de vacío. Absorbente tipo II-B para cada uno de los porcentajes de CO ₂	128
Ilustración 41. Representación gráfica. Absorción hiperbárica en circuito abierto a P _a = 1 bar del absorbente tipo I con 4,5 % CO ₂	134
Ilustración 42. Representación gráfica. Absorción hiperbárica en circuito abierto a P _a = 1 bar del absorbente tipo II-A con 4,5 % CO ₂	135
Ilustración 43. Representación gráfica. Absorción hiperbárica en circuito abierto a P _a = 1 bar del absorbente tipo I con 4,5 % CO ₂	136
Ilustración 44. Representación gráfica. Absorción hiperbárica en circuito abierto a P _a = 1 bar del absorbente tipo I con 1,5 % CO ₂	137
Ilustración 45. Representación gráfica. Absorción hiperbárica en circuito abierto a P _a = 1 bar del absorbente tipo II-A con 1,5 % CO ₂	138
Ilustración 46. Representación gráfica. Absorción hiperbárica en circuito abierto a P _a = 1 bar del absorbente tipo II-B con 1,5 % CO ₂	139
Ilustración 47. Representación gráfica. Absorción hiperbárica en circuito abierto a P _a = 1,5 bar del absorbente tipo I con 1,5 % CO ₂	140
Ilustración 48. Representación gráfica. Absorción hiperbárica en circuito abierto a P _a = 1,5 bar del absorbente tipo II-B con 1,5 % CO ₂	141
Ilustración 49. Representación gráfica. Absorción hiperbárica en circuito abierto a P _a = 1,5 bar del absorbente tipo II-A con 1,5 % CO ₂	142

Ilustración 50. Representación gráfica. Absorción hiperbárica en circuito abierto a $P_a = 1,5$ bar del absorbente tipo I con 3 % CO_2	143
Ilustración 51. Representación gráfica. Absorción hiperbárica en circuito abierto a $P_a = 1,5$ bar del absorbente tipo II-A con 3 % CO_2	144
Ilustración 52. Representación gráfica. Absorción hiperbárica en circuito abierto a $P_a = 1,5$ bar del absorbente tipo II-B con 3 % CO_2	145
Ilustración 53. Representación gráfica. Absorción hiperbárica en circuito abierto a $P_a = 1$ bar de los tres absorbentes con 4,5 % CO_2	146
Ilustración 54. Representación gráfica. Absorción hiperbárica en circuito abierto a $P_a = 1,5$ bar de los tres absorbentes con 1,5 % CO_2	147
Ilustración 55. Representación gráfica. Absorción hiperbárica en circuito abierto a $P_a = 1,5$ bar de los tres absorbentes con 1,5 % CO_2	148
Ilustración 56. Representación gráfica. Absorción hiperbárica en circuito abierto a $P_a = 1,5$ bar de los tres absorbentes con 3 % CO_2	149

1. Introducción

Más del 97 por ciento del agua del planeta -que en total cubre el 71 por ciento de la superficie terrestre- corresponde a las aguas saladas de océanos y mares, por lo que estamos hablando del ecosistema más grande de la Tierra.

No es descabellado entonces afirmar que los orígenes del buceo se remontan a los orígenes de la propia humanidad. Es fácil imaginar a los primeros hombres zambulléndose en las aguas, aguantando la respiración, luchando por descender unos pocos metros y resistiendo con coraje el temor a lo desconocido.

Explorar las profundidades del mar siempre ha cautivado la imaginación humana, aunque la posibilidad de hacerlo de manera segura surgió hace relativamente poco tiempo.

Sin duda tres importantes motivos, propios de la naturaleza humana, empujaron a nuestros antepasados a dar el primer paso a introducirse en un medio hostil, como, la búsqueda de alimentos y elementos suntuarios, la curiosidad y la elaboración de trabajos submarinos e investigación.

Debido a los riesgos inherentes con que tiene que enfrentarse el ser humano cuando incursiona a grandes profundidades: altas presiones, tiempos de permanencia limitados, dificultades de orientación, fauna peligrosa y corrientes entre otros, no es casual que los desarrollos tecnológicos se hayan centrado en construir aparatos que no involucren la presencia del ser humano, como en los casos de vehículos submarinos a control remoto.

A diferencia nuestro estudio se basará en la tecnología empleada para mantener en las mejores condiciones a la tripulación que conformará nuestro sumergible que como seres vivos necesita una atmósfera compuesta por diferentes gases en proporciones adecuadas.

Más concretamente el aire atmosférico consiste en una mezcla de oxígeno y nitrógeno en proporción prácticamente constante, junto con pequeñas cantidades de otros gases y una cantidad muy variable de vapor de agua. La máxima cantidad de vapor de agua que puede contener un volumen dado de aire es, sin duda, igual a la masa de vapor que cabe en él cuando se le llena de vapor saturado a la temperatura a que esté. Sin embargo, generalmente, el aire contiene menos vapor de agua que si estuviese saturado y nuestras sensaciones de sequedad o humedad del aire dependen de la proporción en que se halla aquél y no de la cantidad absoluta que contiene.

El vapor de agua que contiene la atmósfera procede de la continua evaporación de las inmensas masas de agua que forman los mares, ríos, lagos, etc. Su concentración en ella es variable, y depende de la cercanía que exista al mar y de la altitud.

El dióxido de carbono es un gas que se encuentra en un porcentaje muy bajo en la atmósfera, producto o resultado de la respiración de los seres vivos, que expulsado a un ambiente abierto es de vital importancia para procesos de fotosíntesis, pero expulsado en un ambiente cerrado a la atmósfera y en las condiciones adecuadas puede ser de vital importancia estudiar las consecuencias que podría tener una mala recirculación y absorción del gas para mantener unas condiciones adecuadas de habitabilidad.

Por lo tanto cuando nos encontremos en ambientes confinados hemos de tener en cuenta la proporción de dióxido de carbono liberado para utilizar los elementos necesarios de regeneración y absorción adecuados para evitar accidentes.

Dicha absorción se realiza mediante unos absorbentes, siendo el más empleado en submarinos la cal sodada, debido a su bajo coste, fácil manejo y disponibilidad en forma de granulado.

La cal sodada está formada básicamente por hidróxido de calcio y una pequeña proporción de hidróxido de sodio que reaccionan con el dióxido de carbono existente en la atmósfera produciendo la reducción e incluso eliminación de éste en el medio respirable dando lugar a carbonato más agua, liberando energía.

Actualmente el empleo de la cal sodada como absorbente del dióxido de carbono exhalado se centra en sistemas cerrados de ventilación con el consecuente compromiso en cuanto a control y mantenimiento.

2. Objetivos

La eliminación del dióxido de carbono producido en los sumergibles tripulados por el ciclo respiratorio de los seres vivos es el objetivo de la ingeniería, y más concretamente de nuestro estudio ya sea por reacción química o por ventilación con aire.

Al hablar de reacción química nos referimos a cualquier sustancia que pueda reaccionar con el dióxido de carbono producido de manera que lo absorba. Existen diversos tipos de absorbentes, los cuales estudiaremos y experimentaremos para darle una aplicación correcta a cada uno, según sean nuestros intereses. Cada absorbente lo emplearemos teniendo en cuenta unas condiciones de tripulación, volumen de habitáculo, tiempo de desactivación, etc.

Para todo ello disponemos de una serie de instrumentos de laboratorio y de un simulador hiperbárico, el cual nos hará las veces de sumergible tripulado en cuanto a condiciones de humedad, presión, temperatura y aire de mezcla se refiere.

El objetivo final del estudio será obtener un sumergible tripulado para trabajos submarinos de manera que sea autopropulsado para evitar los problemas de ondas electromagnéticas al no penetrar en el agua, típico de los controles remotos dentro del medio subacuático.

Dicha imposibilidad física, sólo quedaría tres alternativas para maniobrar el aparato: uno hace uso de un cordón umbilical, el cual conecte la nave con la superficie para que a través de él sea posible enviar órdenes y recibir señales (submarino tipo ROV), la segunda alternativa es buscar que la nave sea autónoma, es decir, que se la pueda programar una misión y al finalizar la misión retorne a un sitio específico, señalado previamente.

Y la última alternativa correspondería con nuestro sumergible tripulado autopropulsado mediante motor eléctrico, el cual debemos describir y calcular los medios necesarios para la eliminación de dióxido de carbono y hacer agradable la permanencia de los tripulantes bajo el agua, evitando accidentes de tipo neurológico.

3. Antecedentes históricos

3.1 Desarrollo hasta el final de la Primera Guerra Mundial

La historia de la construcción del submarino se remonta hasta la antigüedad, desde el momento en el que se pudo contar con la instalación de máquinas independientes de la aspiración del aire exterior.

Los primeros buques de esta clase fueron propulsados por motores eléctricos alimentados por baterías y su autonomía dependía esencialmente del tamaño de las baterías de acumuladores, recargándose en puntos de apoyo o buques base.

La etapa siguiente de desarrollo fueron los submarinos autónomos, los cuales podían cargar baterías en superficie y tenían una propulsión distinta para navegar en esta condición. Se probaron diferentes plantas propulsoras hasta que finalmente, el motor Diesel resultó el más apto para navegar en superficie.

A partir de este momento se comenzó a diferenciar la manera de construir submarinos en cuanto a estructura se refiere, pudiendo ser de un solo casco o de doble casco, siendo este último el preferido por las mejores condiciones marineras en superficie.

3.2 Desarrollo entre el final de la Primera Guerra Mundial y el final de la Segunda Guerra Mundial

En esta época se mejoró el armamento en submarinos de guerra. La profundidad y la seguridad ante la compresión aumentaron con el empleo de aceros más resistentes y con la introducción de la soldadura eléctrica.

La robustez y eficiencia de las instalaciones de máquinas se acrecentaron con la mejora en la construcción de motores Diesel, lo mismo que las instalaciones eléctricas.

Se desarrollaron los medios de comunicaciones, proyectándose de este modo el empleo de los submarinos para participar con las flotas de alta mar.

Inevitablemente el aumento de la potencia de la instalación eléctrica, la mejora en las formas hidrodinámicas y la instalación del snorkel provocó el desarrollo del submarino auténtico, que es capaz de permanecer sumergido por largos periodos de tiempo y cuyas características típicas son particularmente apropiadas para las exigencias de la navegación en inmersión.

3.3 Desarrollo desde el final de la Segunda Guerra Mundial

Después de la guerra se desarrolló la construcción de submarinos de maquinaria más potente, baterías más grandes y generadores Diesel más ligeros. Los apéndices se conformaron más hidrodinámicos, de manera que se logró mayor rendimiento en inmersión.

Actualmente el empleo civil de los submarinos puede dividirse según sus misiones en submarinos de transporte, investigación, rescate y trabajo, siendo la profundidad a la que ha de operar de gran influencia en el diseño del casco, así como el tiempo de permanencia y tripulación en cuanto a sistemas de regeneración se refiere.

3.4 Generalidades

La aparición de los submarinos y la continua realización de inmersiones prolongadas introdujeron la necesidad de crear unos ambientes propios para un total aislamiento del exterior y una modificación continua del mismo debido al ciclo respiratorio que efectúan las personas en su interior.

Ya se trataron en trabajos y estudios anteriores los problemas que trata cada tipo de sumergible, ya sean nucleares o convencionales, en cuanto al control de atmósferas, por lo que para información más concreta a ellos deberemos acudir.

Más concretamente el problema que se empezó a plantear era la absorción del dióxido de carbono que expulsa el ser vivo en su respiración, recurriendo a ciertas industrias para el aprovechamiento en el sector naval, teniendo todavía que realizar grandes esfuerzos para mejorar y perfeccionar estos sistemas de eliminación de CO₂.

También tiene aplicación en cámaras hiperbáricas, donde el hombre vive y desarrolla su actividad en el mismo medio que respira al igual que un submarino, por el contrario, existen condiciones en que no se cumple lo anterior como es el caso de buceadores, aplicándose en tal caso unos sistemas de mezclas de gases para optimizar su labor.

Como hecho histórico podemos señalar el **año 1929** cuando tuvo lugar una serie de estudios y posteriores publicaciones sobre la purificación del aire en submarinos. Dichos estudios se realizaron en distintos lugares como: Italia, Francia, Norteamérica, siendo este último el más decisivo en sus estudios y prácticas realizadas.

Fue durante la **Primera Guerra Mundial** y debido a las dificultades de adquisición de la potasa cáustica, empleada como absorbente hasta el momento, cuando surgió la cal sodada aportada por los norteamericanos. En la actualidad también se emplea en submarinos y experimentos para nuevas investigaciones.

Durante la **Segunda Guerra Mundial** se estudió la posibilidad de sustituir la cal sodada por el hidróxido de litio, utilizándose inicialmente para casos de emergencia. Todo esto estudiado por el Laboratorio Naval de Investigación Americano, el cual comenzó a continuación con la investigación, sin mucho éxito, de peróxidos y superóxidos de los metales alcalinos como absorbentes.

Con la **Posguerra** llegó el nacimiento de montajes regenerativos a causa del limitado espacio disponible para el sistema de eliminación de CO₂, por lo que se siguió adelante con el proyecto de habitabilidad de submarinos pensando en tiempos de inmersión mayores e incluso prácticamente ilimitados.

Fue en la tercera parte del **siglo XX** cuando dos submarinos de renombre realizaron las inmersiones más largas hasta el momento, que permitieron continuar la evolución de los sistemas empleados para limpiar la atmósfera respiratoria, llegándose en la actualidad al estudio, todavía en laboratorio, de un nuevo absorbente como son las algas.

3.5 Estudio de los principales absorbentes

El **hidróxido de litio** tiene ventajas sobre la cal sodada ante situaciones de emergencia y un excelente grado de pureza con estructura de pequeños cristales de tamaño uniforme, pero durante el almacenamiento y manipulación se desprende polvo que irrita las vías respiratorias. Para ello se empleaban cauchos sin necesidad de trasvasar el granulado. También se observó la disminución del rendimiento en el submarino debido a la disminución de la humedad en comparación al laboratorio.

La **cal sodada** al igual que el hidróxido de litio tiene una eficacia baja en submarinos debido a la humedad.

El empleo de la **cal baritada**, a diferencia de los anteriores, es debido fundamentalmente al origen de su fabricación, Palma de Mallorca. Es esta razón la que motivo a la Unidad de Investigación Subacuática del Centro de Buceo su estudio, deduciendo que para una comparación aceptable había que disminuir el diámetro del grano para su aplicación en submarinos.

Apareció entonces la posibilidad de emplear **peróxidos y superóxidos de metales alcalinos** por la característica de doble acción efectiva: desprendimiento de oxígeno y el residuo alcalino remanente puede ser utilizado como absorbente de CO₂. En los resultados obtenidos destacó la lentitud en alcanzar los niveles de reacción necesarios.

Fue sugerido el ciclo **sulfato sódico** como medio de resolver el doble problema de habitabilidad de los submarinos consistente en la producción de oxígeno y la absorción de dióxido de carbono.

Las **aminas** durante un largo periodo de tiempo se consideraron útiles solamente para casos de emergencia en la eliminación de CO₂. Fue la aparición de los submarinos nucleares quienes obligó a encontrar un proceso continuo para la eliminación del CO₂ con el mismo ritmo que formase la tripulación, manteniendo una concentración baja, apareciendo después de la 2ª Guerra Mundial una disolución amino-alcalina a la que posteriormente se le realizó unos cambios.

La **Alkacida M** en comparación con la **Monoetanolamina**, cuya propiedad es la de absorber CO₂ en frío y eliminarlo cuando se calienta surgida en la posguerra es la siguiente: facilidad de manejo, menos absorción de CO₂, menos capacidad de regeneración, más viscosa y más corrosiva.

Quines constituyen un sistema de absorción regenerativo son los **filtros moleculares** ya que si se saturan de gases absorbidos bastará calentarlos y evacuar los gases para que estén en condiciones de iniciar un nuevo ciclo de absorción.

Finalmente las **algas** constituyen la investigación actual ya que su intervención en la fotosíntesis puede ofrecer diversas ventajas en el medio subacuático.

4. Fundamento teórico

4.1 Introducción

4.1.1 Cálculo del suministro de aire

En cuanto al volumen de aire que se encuentra encerrado en un gran habitáculo a cualquier presión podemos decir que se asimila al que ocupa en un sumergible SCUBA (*Self Contained Underwater Breathing Apparatus*), según la expresión:

$$V = \frac{N \cdot V_r \cdot P_g}{P_r}$$

siendo V el volumen de aire disponible en el habitáculo cuando este se encuentre en la superficie, N es el número de tanques, V_r es la capacidad estimada del tanque, P_g es la presión estimada o medida en el interior, y P_r es la presión estimada que afecta al tanque en *atm*. Debe utilizarse un sistema unificado de unidades, el SI (Sistema Internacional) o el BG (Sistema Técnico), para obtener resultados dimensionalmente correctos. El efecto de la temperatura se calcula por medio de:

$$V_t = \frac{V_d \cdot T_2}{T_1}$$

donde V_t es el volumen de aire a la temperatura regulada, V_d es el aire disponible (según la fórmula anterior), T_2 es la temperatura absoluta del agua, y T_1 es la temperatura absoluta del aire. La duración del suministro de aire en minutos para un tanque SCUBA contempla una reserva de presión indicada por la expresión:

$$S = \frac{N \cdot V_r \cdot (P_g - P_m) \cdot (33) \cdot T_2}{R \cdot (D + 33) \cdot P_r \cdot T_1}$$

siendo S la duración en minutos, P_m la presión de reserva mínima en atm, R es estimación de la respiración (volumen respirado minuto) en metros cúbicos por minuto, y D es la profundidad en metros de columna de agua. Las necesidades de ventilación son suplidas por el equipamiento de buceo (escafandra o máscara) y pueden estimarse por la siguiente fórmula:

$$V = \frac{P_{at} \cdot O_{slm} \cdot R}{26,3 \cdot (C_2 - C_1) \cdot P_{at}}$$

donde V es la estimación de aire requerido en pies cúbicos estándar por minuto (SCFM), O_{SLM} es el consumo de oxígeno en litros estándar por minuto (SLM), R es el coeficiente respiratorio (volumen de dióxido de carbono producido/ volumen de oxígeno consumido), C_2 es la presión parcial deseable de dióxido de carbono en aire aspirado (atm.) y C_1 es la presión parcial de dióxido de carbono en aire respirable procedente del compresor (atm.) y P_{atm} es la presión a la profundidad correspondiente en atmósferas.

La constante 26,3 es el factor conversor para transformar los litros estándar por minuto en pies cúbicos estándar por minuto, e incluye la diferencia de temperatura entre ambas unidades. Un pie cúbico estándar se define con las condiciones de 70°F y 1,0 at, y un litro estándar con 32°F y 1,0 at. Si el consumo de oxígeno es de 2,6 SLM, R es 0,9 y C_2 es 0,02, entonces:

$$V = \frac{0,0893 \cdot P_{at}}{0,02 - C_1 \cdot P_{at}}$$

y cuando el aire respirable no contiene dióxido de carbono, la ecuación queda reducida a

$$V = 4,5 \cdot P_{at}$$

Por ejemplo, para la situación límite supuesta, un buceador asistido desde superficie que trabaja a 395 pies (120 metros) de columna de agua necesitará 58,5 SCFM de aire, ya que 395 pies son equivalentes a 13 atmósferas de presión absoluta.

4.2 Ventilación de grandes habitáculos

En cuanto a efectos de cálculo de ventilación se refiere, el recinto habitable del sumergible puede ser considerado como un gran habitáculo, y será necesario evaluar la ventilación necesaria para evitar la concentración excesiva de dióxido de carbono. Si se supone que el aire de la atmósfera será continuamente renovado, el análisis será bastante simple. Si suponemos que el aire puro que entra en el recinto y completa la mezcla, el resultado es:

$$P_{CO_2} = \frac{m \cdot R \cdot T}{V_{aire}} \left[1 - e^{-\frac{V_{aire} \cdot t}{V_t}} \right]$$

para la cual, P_{CO_2} es la presión parcial disponible de dióxido de carbono, m es la masa del flujo de dióxido de carbono, R es la constante de los gases para el dióxido de carbono, T es la temperatura absoluta, V_{aire} es la estimación del flujo de aire a la profundidad correspondiente, t representa el tiempo, y V_t es el volumen de la cámara. Si el tiempo (t) es muy grande, entonces el valor estable de la presión parcial del dióxido de carbono será:

$$P_{CO_2} = \frac{m \cdot R \cdot T}{V_{aire}}$$

Los cálculos mediante las expresiones que acaban de proponerse –procedentes de la bibliografía disponible– suponen una aproximación bastante fiable a la realidad, sin embargo, para estimar la ventilación de nuestro artefacto se utilizarán las ecuaciones que a continuación se detallan.

4.3 Dedución de la fórmula general

El fundamento teórico para el cálculo del caudal de aire, ventilación y regeneración de atmósfera en el interior de nuestro sumergible se basa en la deducción de una fórmula de aplicación general y suponiendo un recinto de ventilación natural.

Dicho recinto constará de unas aberturas mediante las cuales podrá entrar y salir aire. Además dispondrá en su interior de un número de personas que aspirarán dicho aire y producirán una cantidad determinada de dióxido de carbono en función de la actividad desarrollada.

Hemos de tener en cuenta en el desarrollo que el aire introducido en el interior dispondrá inicialmente de un porcentaje de dióxido de carbono y que el caudal de aire en la entrada es igual que en la salida con una mayor cantidad en este último de CO_2 .

Como ya se ha hecho referencia anteriormente, este estudio se apoya y continúa una línea investigadora iniciada un año antes. Los datos genéricos referidos a la ventilación patrón del simulador serán tenidos en cuenta y clasificados como fiables.

La situación expuesta se puede seguir de manera esquemática de la siguiente forma:

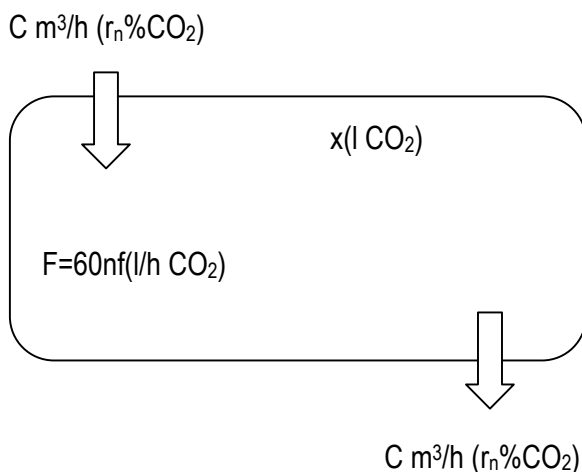


Ilustración 1. Ventilación natural de cámara habitada

Siendo:

- C; caudal en la entrada y salida en m³/h
- F; cantidad de CO₂ que desprende la tripulación en l/h
- n; número de personas
- f; cantidad de CO₂ que desprende cada persona en l/h
- r_n; porcentaje de CO₂ que se introduce inicialmente
- r; porcentaje de CO₂ que hay en el ambiente
- x; cantidad de CO₂ que hay en el ambiente
- V; volumen del recinto en m³

Con lo que podemos iniciar la deducción de la fórmula general de la siguiente manera:

Lo primero sería obtener la cantidad de CO₂ que hay en el ambiente, a partir de la relación existente entre r (porcentaje de CO₂ que hay en el ambiente) y x (cantidad de CO₂ que hay en el ambiente), de manera que:

$$\frac{x}{1000 \cdot V} = \frac{r}{100}$$

despejando x de la ecuación, nos queda:

$$x = 10 \cdot r \cdot V$$

dado que la cantidad de aire que hay en el ambiente (x) es la diferencia entre la cantidad de aire que entra menos la que sale, llegamos a la siguiente expresión:

$$dx = \left(F + \frac{r_n}{100} \cdot 1000 \cdot C - \frac{x}{1000 \cdot V} \cdot 1000 \cdot C \right) dt$$

integrando:

$$\int_{x_0}^x \frac{dx}{F + 10 \cdot r_n \cdot C - \frac{C}{V} \cdot x} = \int_0^t dt$$

la integral resuelta nos queda:

$$-\frac{V}{C} \cdot \ln \frac{F + 10 \cdot r_n \cdot C - \frac{C}{V} \cdot x}{F + 10 \cdot r_n \cdot C - \frac{C}{V} \cdot x_0} = t$$

operando:

$$\frac{F + 10 \cdot r_n \cdot C - \frac{C}{V} \cdot x}{F + 10 \cdot r_n \cdot C - \frac{C}{V} \cdot x_0} = e^{-\frac{C}{V}t}$$

denominando $K = \frac{F}{10 \cdot C} + r_n \rightarrow F + 10 \cdot r_n \cdot C = 10 \cdot C \cdot K$ obtenemos

$$\frac{10 \cdot C \cdot K - 10 \cdot C \cdot r}{10 \cdot C \cdot K - 10 \cdot C \cdot r_0} = e^{-\frac{C}{V}t}$$

simplificando obtenemos:

$$\frac{K - r}{K - r_0} = e^{-\frac{C}{V}t}$$

$$\frac{r - K}{r_0 - K} = e^{-\frac{C}{V}t} \quad (*)$$

despejando r en (*) obtenemos la fórmula que permite calcular el porcentaje de dióxido de carbono (CO_2) al cabo del tiempo t

$$r = K - (K - r_0)e^{-\frac{C}{V}t}$$

4.4 Cálculo del caudal de ventilación

Para el cálculo del caudal de ventilación partimos de la ecuación (*) deducida anteriormente, y efectuando operaciones nos queda:

$$\frac{(r - K)}{(r_0 - K)} = \frac{1}{e^{\frac{C}{V}t}}$$

operando dicha expresión:

$$e^{\frac{C}{V}t} = \frac{(r_0 - K)}{(r - K)}$$

aplicando logaritmos neperianos, nos queda:

$$\frac{C}{V}t = \ln \frac{(r_0 - K)}{(r - K)}$$

despejando el caudal (C), resulta:

$$C = \frac{V}{t} \ln \frac{(r_0 - K)}{(r - K)}$$

A partir de esta fórmula podemos obtener el caudal de ventilación según sean las circunstancias o situaciones dependiendo de:

- r_0 ; tanto por ciento inicial de CO₂
- r ; tanto por ciento actual de CO₂
- V ; volumen del simulador
- K
- t ; tiempo

A continuación mostraremos el cálculo del caudal de ventilación de un simulador hiperbárico ubicado en el laboratorio correspondiente al Departamento de Ingeniería Química.

Las características del estudio son las siguientes:

Volumen interior del simulador, $V = 0,2 \text{ m}^3$

Concentración inicial, $r_n = 0,03 \%$

Espacio no habitado (no se produce una aporte adicional de CO₂), $F = 0$

Tiempo máximo de estudio, $t = 120 \text{ min.}$

$$K = r_n + F/C$$

sustituyendo valores:

$$K = r_n = 0,03$$

Suponiendo constantes los valores de V y K , las variables que nos quedan son r y r_0 , las cuales nos variarán en los intervalos indicados a continuación:

- r entre 0,1% y 0,6%
- r_0 entre 0,8% y 1,5%

Según referencias anteriores la bomba a utilizar en el simulador debe aportar en la situación más desfavorable un caudal de 5,1 l/min.

Para encontrar la representación de la evolución que sigue el porcentaje r a lo largo de los 120 minutos en los cuales está en marcha el sistema de regeneración deberemos acudir a las tablas y gráficas del estudio completo de dicho apartado realizado por la promoción de investigación anterior.

4.5 Cálculo del caudal de ventilación del sumergible

Del mismo modo que hemos calculado el caudal de ventilación correspondiente al simulador hiperbárico para ventilar y bajar los niveles de dióxido de carbono hasta unos niveles adecuados, calculamos el caudal necesario para ventilar el sumergible en cuestión.

Más concretamente el estudio en cuanto al cálculo de ventilación necesario lo centraremos en un sumergible tripulado por dos personas cuyo recinto habitable es de 3000 litros.

Para ello variaremos el porcentaje inicial de dióxido de carbono (r_0) desde el valor 1,5% hasta el 0,8%, y tomaremos un tiempo de 24 horas coincidente con la autonomía del sumergible.

A diferencia del estudio del simulador, existe en el sumergible una tripulación que exhala dióxido de carbono y el aire que se introduce mediante botellas directamente acopladas entra limpio de dióxido de carbono.

Estimando que cada tripulante exhala por su condición 0,35 l/min de dióxido de carbono, nos queda:

$$F = 60 \cdot n \cdot f = 60 \cdot 2 \cdot 0,35 = 42 \text{ l/h } CO_2$$

Suponiendo un caudal inicial a partir de los resultados obtenidos del simulador de 15 m³/h se estudia a continuación el comportamiento de otros valores de caudal y la evolución de r en función del tiempo para cada uno de los mismos.

Se dispone de las siguientes constantes:

- V = 3000 l
- n = 2 personas
- tiempo = 1440 min
- f = 0,35 l/min
- F = 42 l/min

Sabiendo que $K = F/10 \cdot C + r_n$, en función de los valores de C calculados tenemos:

- K (64,2) = 0,0654
- K (21,4) = 0,1963
- K (12,9) = 0,3256
- K (8,1) = 0,5185
- K (5,8) = 0,7241
- K (4,1) = 1,0244

Además junto con la variación del caudal se estudiará también como influye el parámetro r_0 , encontrándose éste en el intervalo indicado a continuación:

- r_0 entre el 1,5% y 0,8 %

A partir de estos datos y según la ecuación: $r = K - (K - r_0)e^{-\frac{C}{V}t}$

Tenemos, para $r_0 = 0,8$. En función de los diferentes caudales y la evolución temporal:

t(min)	R(64,2)	R(21,4)	R(12,9)	R(8,1)	R(5,8)	R(4,1)
0	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
120	0,122	0,453	0,609	0,722	0,784	0,834
240	0,07	0,305	0,495	0,666	0,772	0,863
360	0,066	0,243	0,426	0,625	0,762	0,887
480	0,065	0,216	0,386	0,596	0,754	0,908
600	0,065	0,205	0,362	0,574	0,748	0,926
720	0,065	0,2	0,347	0,559	0,743	0,941
840	0,065	0,198	0,338	0,548	0,739	0,953
960	0,065	0,197	0,333	0,54	0,736	0,964
1080	0,065	0,197	0,33	0,534	0,734	0,973
1200	0,065	0,196	0,328	0,53	0,732	0,981
1320	0,065	0,196	0,327	0,526	0,73	0,987
1440	0,065	0,196	0,327	0,524	0,729	0,993

Tabla 1. r en función de caudal y tiempo para $r_0 = 0,8$

Obteniendo la representación gráfica siguiente:

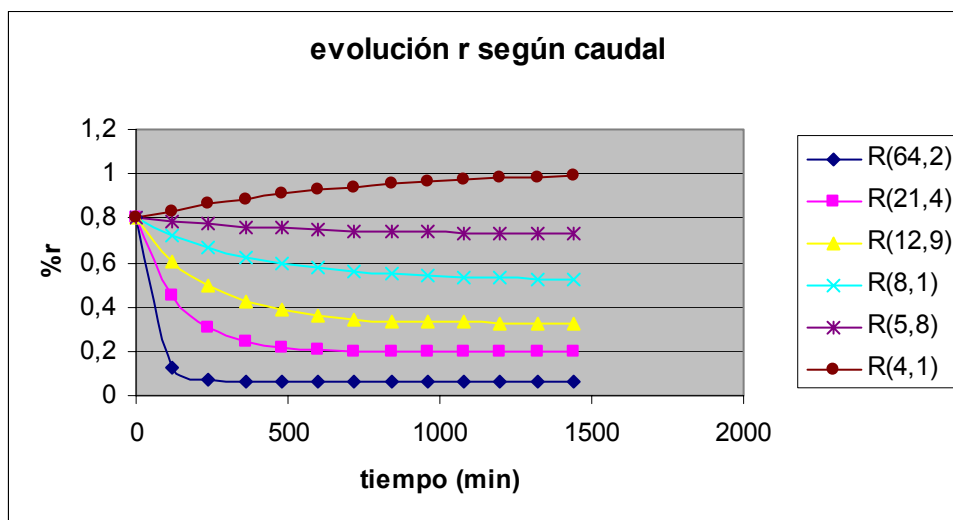


Ilustración 2. Evolución r según caudal para $r_0 = 0,8$

Tenemos, para $r_0 = 1$. En función de los diferentes caudales y la evolución temporal:

t(min)	R(64,2)	R(21,4)	R(12,9)	R(8,1)	R(5,8)	R(4,1)
0	1	1	1	1	1	1
120	0,122	0,453	0,609	0,722	0,784	0,834
240	0,07	0,305	0,495	0,666	0,772	0,863
360	0,066	0,243	0,426	0,625	0,762	0,887
480	0,065	0,216	0,386	0,596	0,754	0,908
600	0,065	0,205	0,362	0,574	0,748	0,926
720	0,065	0,2	0,347	0,559	0,743	0,941
840	0,065	0,198	0,338	0,548	0,739	0,953
960	0,065	0,197	0,333	0,54	0,736	0,964
1080	0,065	0,197	0,33	0,534	0,734	0,973
1200	0,065	0,196	0,328	0,53	0,732	0,981
1320	0,065	0,196	0,327	0,526	0,73	0,987
1440	0,065	0,196	0,327	0,524	0,729	0,993

Tabla 2. r en función de caudal y tiempo para $r_0 = 1$

Obteniendo la siguiente representación gráfica:

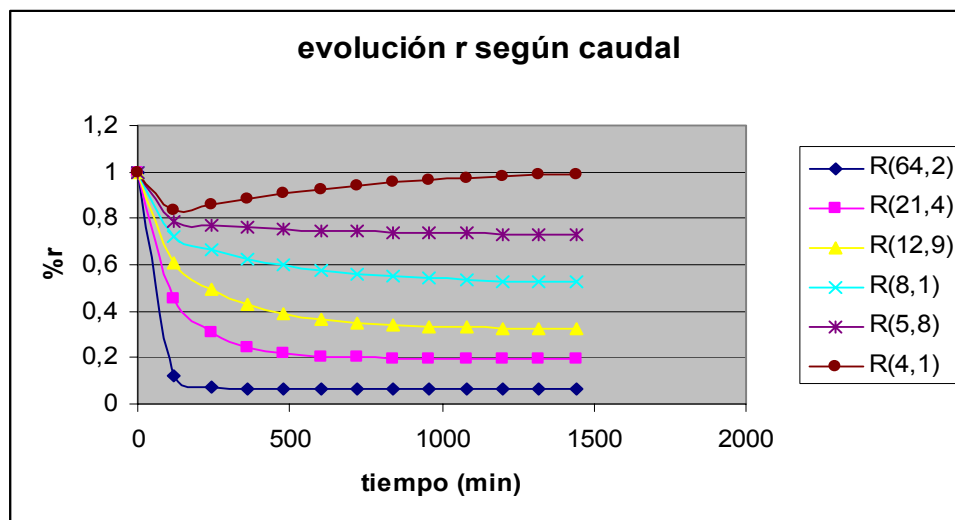


Ilustración 3. Evolución r según caudal para $r_0 = 1$

Tenemos, para $r_0 = 1,2$. En función de los diferentes caudales y la evolución temporal:

t(min)	R(64,2)	R(21,4)	R(12,9)	R(8,1)	R(5,8)	R(4,1)
0	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2
120	0,122	0,453	0,609	0,722	0,784	0,834
240	0,07	0,305	0,495	0,666	0,772	0,863
360	0,066	0,243	0,426	0,625	0,762	0,887
480	0,065	0,216	0,386	0,596	0,754	0,908
600	0,065	0,205	0,362	0,574	0,748	0,926
720	0,065	0,2	0,347	0,559	0,743	0,941
840	0,065	0,198	0,338	0,548	0,739	0,953
960	0,065	0,197	0,333	0,54	0,736	0,964
1080	0,065	0,197	0,33	0,534	0,734	0,973
1200	0,065	0,196	0,328	0,53	0,732	0,981
1320	0,065	0,196	0,327	0,526	0,73	0,987
1440	0,065	0,196	0,327	0,524	0,729	0,993

Tabla 3. r en función de caudal y tiempo para $r_0 = 1,2$

Obteniendo la siguiente representación gráfica:

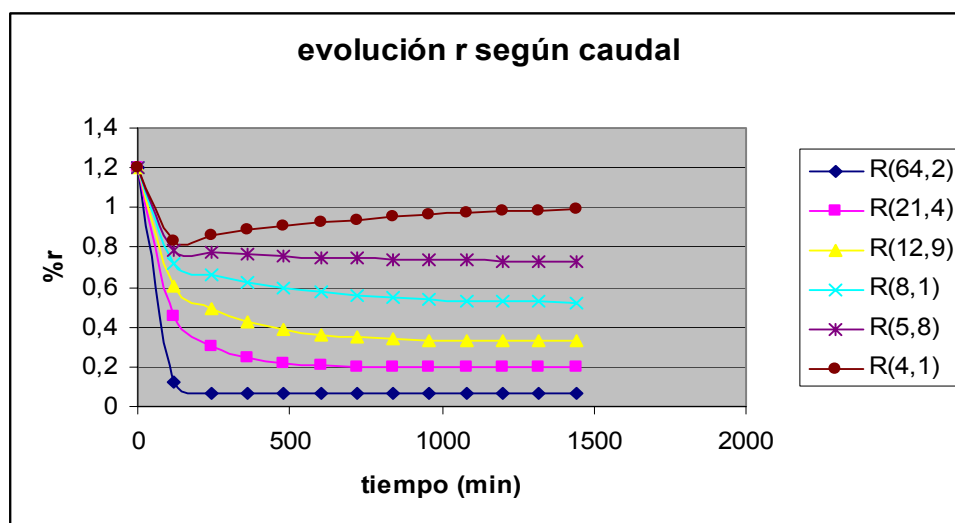


Ilustración 4. Evolución r según caudal para $r_0 = 1,2$

Tenemos, para $r_0 = 1,5$. En función de los diferentes caudales y la evolución temporal:

t(min)	R(64,2)	R(21,4)	R(12,9)	R(8,1)	R(5,8)	R(4,1)
0	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
120	0,122	0,453	0,609	0,722	0,784	0,834
240	0,07	0,305	0,495	0,666	0,772	0,863
360	0,066	0,243	0,426	0,625	0,762	0,887
480	0,065	0,216	0,386	0,596	0,754	0,908
600	0,065	0,205	0,362	0,574	0,748	0,926
720	0,065	0,2	0,347	0,559	0,743	0,941
840	0,065	0,198	0,338	0,548	0,739	0,953
960	0,065	0,197	0,333	0,54	0,736	0,964
1080	0,065	0,197	0,33	0,534	0,734	0,973
1200	0,065	0,196	0,328	0,53	0,732	0,981
1320	0,065	0,196	0,327	0,526	0,73	0,987
1440	0,065	0,196	0,327	0,524	0,729	0,993

Tabla 4. r en función de caudal y tiempo para $r_0 = 1,5$

Obteniendo la siguiente representación gráfica:

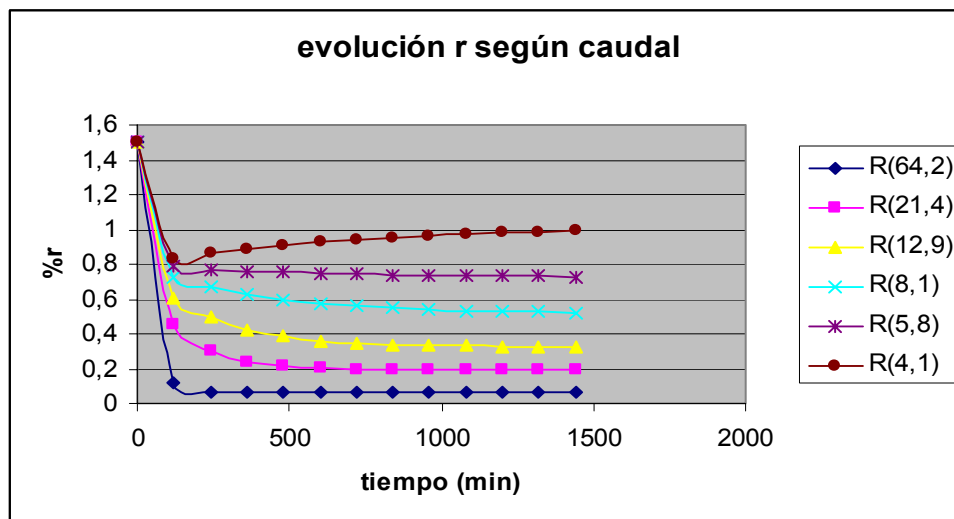


Ilustración 5. Evolución r según caudal para $r_0 = 1,5$

Para finalizar este capítulo, señalar que se han analizado todos los parámetros que se han considerado necesarios.

5. Aplicación. Vehículo tripulado para trabajos submarinos

Durante tiempos inmemorables ciertas áreas del globo terráqueo han sido víctimas de tragedias o sucesos relacionados con la ira de la madre naturaleza y durante los últimos años también relacionados con la negligencia humana al manejar los avances tecnológicos o científicos.

Dichas tragedias o sucesos podemos englobarlas dentro del término desastres, el cual está destruyendo el medio terrestre y el submarino.

Es por este motivo por el cual la necesidad de sistemas subacuáticos que operen y tengan aplicaciones distintas, aplicaciones que pueden ser relativas a los estudios ambientales, estudios de parámetros fisico-químicos, vigilancia de zonas afectadas por desastres, investigaciones pesqueras, hidrográficas, oceanográficas e incluso arqueología marina.

Pero no hemos de olvidar que también existe a parte del control e investigación de zonas la necesidad de reparaciones e instalaciones de estructuras sumergidas, así como manipulación de artefactos sumergidos a grandes profundidades, para los cuales necesitamos unos sistemas dotados de todos los componentes necesarios para su satisfactoria actuación, de manera que esté construido y diseñado de forma segura manteniendo en condiciones adecuadas de presión, temperatura, humedad, etc, su posible tripulación.

Aunque al diseñar y construir un sumergible tripulado para trabajos submarinos es un problema que se enuncia fácilmente, en la práctica es extremadamente complejo. Trabajar debajo del agua impone una serie de restricciones difíciles de cumplir, y son tantos los asuntos por considerar, que para que un proyecto de esta naturaleza pueda ser exitoso tiene que ser interdisciplinar. Es imposible abordarlo desde un solo campo del conocimiento.

Otro punto a favor importante de la pertinencia de emprender un trabajo en esta área, tiene que ver con que en nuestro país se puede ser perfectamente competitivo, dentro del mismo rango, con lo hecho en otras partes del mundo, por dos razones:

En primer lugar, porque no se trata de desgastar las energías en componentes que se pueden adquirir, sino en idear las formas de agrupar tales componentes para lograr un producto con alto valor agregado, fruto del ingenio que se le haya colocado.

En segundo lugar, porque ningún submarino en el mundo es fabricado en serie.

Naturalmente, para elevar el valor añadido no sólo se necesita ingenio y menores costos, también se requiere la comprensión profunda de los fenómenos que intervienen. Este es un aprendizaje que, según las experiencias acumuladas, está a nuestro alcance.

5.1 Diseño del nuevo prototipo

La primera etapa del proyecto consiste en la construcción del soporte físico que alberga todos los componentes del sistema.

5.1.1 Generalidades

En el desarrollo del prototipo se han tenido que abordar especificación técnica como: sistemas de estanqueidad, comunicaciones, control, propulsión, etc.

El minisubmarino construido tiene a grandes rasgos las siguientes características:

- Presión interior igual a la atmosférica
- Profundidad máxima igual 2000 pies (aprox. 600 metros)
- Atmósfera de aire ambiental
- Capacidad para dos personas
- Autonomía de 24 horas
- Velocidad máxima de proyecto en inmersión entre 3 y 4 nudos
- Peso aproximado de 2 toneladas
- Lastre adicional y flotabilidad positiva
- Espacio para dos personas sentadas
- Sistema independiente de propulsión
- Sistema independiente de regeneración ambiental
- Maniobrabilidad total, con 6 grados de libertad, en la condición de inmersión, a todas las velocidades, incluso cuando el sumergible está detenido
- Disposición de medios activos de gobierno
- Versatilidad de uso no sólo a nivel de trabajo operativo, sino también de investigación científica, para ello damos libertad al usuario en el tipo material científico a instalar
- Máxima estabilidad en todas las condiciones, tanto en la situación de inmersión como en superficie

5.1.2 Disposición general

La disposición general está representada en sus correspondientes planos y las características principales son:

- Eslora total (incluyendo brazos articulados) de 3,12 metros.
- Eslora total (excluyendo brazos articulados) de 2,17 metros.
- Manga total (incluyendo brazos articulados) de 2,30 metros.
- Manga total (excluyendo brazos articulados) de 1,72 metros.
- Manga del habitáculo de 1,10 metros.
- Manga de la cúpula superior de 0,45 metros.
- Puntal de 1,21 metros.
- Desplazamiento igual a 2 toneladas
- Volumen interior del habitáculo de 3 metros cúbicos.
- Tripulación compuesta por dos personas

5.1.3 El visor

El minisubmarino dispone a bordo de un visor, equipado con una cámara de vídeo de alta resolución y cuenta con sistemas de iluminación para situaciones de extrema oscuridad.

5.1.4 Estructura

La profundidad de inmersión es una premisa esencial en la construcción del minisubmarino, siendo el casco resistente la parte principal del mismo debido a la presión que soporta del mar.

Es el armazón que conforma el casco del minisubmarino en el cual se albergan todas las componentes de a bordo. Dado que en el interior de la nave se alojaron fuentes de potencia, cámaras, luces, baterías, transformadores y todos los sistemas eléctricos y electrónicos complementarios, es fundamental garantizar la estanqueidad de la estructura.

El material seleccionado, el cual desarrollamos posteriormente, debe soportar en todo momento la presión existente, debe ser resistente a los agentes abrasivos y facilitar eventuales reparaciones conservando su resistencia estructural.

El diseño interior debe permitir la adecuada distribución de los componentes, de modo que la nave sea hidrostáticamente estable y se tenga fácil acceso al interior.

La forma exterior del casco minimiza las pérdidas por derrame y evita que se generen fuerzas indeseables de empuje ascensional, cuando la nave propulse en el plano horizontal.

Para evaluar previamente el comportamiento de sus perfiles se hará uso de modelos a escala ensayados en túneles de viento, extrapolando los resultados al tamaño real y la densidad del fluido en que se va a mover nuestro artefacto.

Una condición de diseño es que tenga flotabilidad ligeramente positiva, lo que depende enormemente del peso de los componentes que en un momento dado se encuentren en el interior y de la densidad del agua del entorno. Por este motivo es necesario dotar al minisubmarino de sistemas de lastrado que faciliten el ajuste de la flotabilidad.

Finalmente se debe impedir que cuerpos extraños se enreden en el exterior de la nave y procurar que la apariencia estética sea agradable.

5.1.5 Material de construcción

Antiguamente (antes del año 1850) se empleaba como principal material para la construcción de buques, puentes y estructuras la madera, con el inconveniente de que los cascos tenían escasa resistencia a la tracción y compresión, y estaban expuestos a un gran desgaste y/o deterioro.

A mediados del siglo XIX, los cascos de hierro desplazaron a la madera, que a su vez fue sustituido por el acero a partir de 1880, material que corresponde a una aleación de hierro y carbono más otros elementos aleantes.

Dicho acero tiene las ventajas de tener un bajo costo, ductilidad, resistencia mecánica, adecuadas dimensiones, facilidad para trabajar y buenas condiciones de soldadura, aunque su principal desventaja era su baja resistencia a la corrosión. Es por este motivo por el que surgen las pinturas especiales de protección para cascos ferrosos.

En esta última época e introduciéndonos en nuestra aplicación se ha introducido en la construcción de submarinos de alta profundidad, cascos de presión de titanio, de forma esférica generalmente, como obedece nuestro sumergible, para su mejor resistencia al colapso.

El uso del titanio para nuestro sumergible es debido a la ligereza, dureza y resistencia a la corrosión que se debe considerar seriamente en las aplicaciones marinas siempre que los problemas sean de profundidad y corrosión.

El titanio se emplea cada vez más para distintos efectos debido a su facilidad y menor coste de fabricación y soldadura, sustituyendo a los aceros de aleación.

Dicho material empleado está protegido por una película de óxido que le protege y permite una amplia gama de pH y de temperatura, sobreviviendo a la corrosión, cavitación, picaduras y grietas, usando el mínimo espesor del material para satisfacer los requisitos mecánicos del sistema.

Las características del titanio comparado con otras aleaciones de alto rendimiento son las siguientes: mayor fuerza, baja densidad, resistencia excepcional a la corrosión y facilidad relativa de fabricación y soldadura.

5.1.6 Casco resistente

Debido a las condiciones extremas de trabajo con altas presiones hidrostáticas y a las grandes restricciones de peso, buscamos un material que compagine una muy elevada resistencia a la deformación y muy alto módulo de Young, con bajo peso y buenas condiciones de soldabilidad para grandes espesores.

Las formas geométricas más habituales para la construcción de cascos resistentes son las esferas, cilindros o combinaciones de ambos por su resistencia a la presión exterior. Entre ellos escogeremos el cilindro por permitir una mayor habitabilidad.

Cálculo de la presión máxima para una profundidad (z) de 600 metros:

$$p = \frac{(D + 10)}{10} = \frac{(600 + 10)}{10} = 61atm$$

que al estar en agua de mar de densidad 1,026 toneladas por metro cúbico, nos queda:

$$p = 61atm \times 1.026 = 62.586atm$$

5.1.7 Sistema de comunicación

La instalación para comunicación con el exterior no difiere por sus equipos de los instalados en otros buques comparables. Dicha instalación trabaja a base de transductores acústicos para emitir y recibir, pudiendo ser interceptadas por terceros.

5.1.8 Sistema de propulsión

Los impulsores del minisubmarino permiten una excelente maniobrabilidad y proporcionan movimientos suaves con el fin de poder operar en espacios reducidos, su velocidad podrá variarse fácilmente al igual que su sentido de propulsión para direccionar la nave.

Se tendrá seis grados de libertad: tres para el desplazamiento a lo largo de cada uno de los ejes y tres más para la rotación alrededor de los mismos.

El sistema de propulsión podrá operar de forma continua a una velocidad máxima de tres o cuatro nudos cuando se desplace en aguas tranquilas.

Ya que el consumo de potencia crítico, la eficiencia de conversión de energía eléctrica en energía mecánica debe ser lo más alta posible, es necesaria una adecuada selección del tipo y del diámetro de las propelas, y elaborar las curvas de operación para conocer cual es la velocidad angular a la que se desarrolla la máxima eficiencia.

Con esta información es posible seleccionar los motores más apropiados de modo que la relación potencia-peso sea óptima para el sistema.

El minisubmarino en cuestión dispondrá de cuatro motores eléctricos, dos de ellos le permiten desplazarse horizontalmente y controlar la velocidad y dirección de avance, los otros dos permiten ascender y descender.

Dispondrá además de un compartimento central en el cual se aloja la electrónica y los sistemas de distribución de potencia.

Dicho motor alcanza un buen grado de eficiencia con poco peso, así mismo, dispone de una buena capacidad de regulación, aptitud para climas tropicales, funcionamiento silencioso y capacidad de funcionamiento con grandes ángulos de balance transversal e inclinación longitudinal.

Todo ello necesita de unas baterías de plomo situadas en los flotadores cilíndricos laterales encargadas de alimentar el motor y los circuitos en las condiciones de voltaje adecuadas.

El número de baterías será de doce de alto amperio, proporcionando corriente continua a todos los sistemas.

5.1.9 Sistema de potencia

El sistema de potencia debe estar en condiciones de suministrar toda la energía requerida por los distintos componentes del minisubmarino como son: sistema de propulsión, sistema de vídeo e iluminación, sistema de navegación, instrumentación, sistema de emergencia, etc.

El sistema de suministro de energía debe ser confiable y de fácil mantenimiento y reposición.

5.1.10 Sistema de control

Estará formado por un panel de control y un control de navegación que permitirá controlar la posición, orientación y trayectoria seguida, con la máxima autonomía desde una posible misión establecida desde el panel de control.

5.1.11 Panel de control

El panel de control está diseñado con una arquitectura abierta para facilitar la conexión. Esto permite que los sistemas de mando sean redundantes aumentando la confiabilidad de la operación.

5.1.12 Sistemas de emergencia

Los sistemas de emergencia a bordo serán sistemas de respaldo que permitan generar señales de alarma en caso de situaciones de riesgo. Se pueden distinguir dos clases de emergencia:

- **Situaciones anómalas:** son situaciones de funcionamiento anormal que no comprometen la integridad del submarino ni la de la tripulación, sino faltas de instrumentación, luces, vídeo.
- **Situaciones críticas:** son situaciones que comprometen seriamente la integridad del sistema y tripulación como pérdida de comunicación, filtraciones, pérdida de control, pérdida de potencia o fallo en el sistema de regeneración de atmósferas.

Los sistemas de emergencia tendrán su propia instrumentación y serán alimentados por una fuente de potencia independiente y altamente confiable.

El caso que más concierne nuestro estudio es el de fallo en el sistema general de regeneración, ante el cual hemos de aportar aire mediante las botellas acopladas al artefacto.

El procedimiento a seguir en caso de poca profundidad sería presurizar el interior mediante las botellas de aire hasta igualarla con la del exterior en ese momento y poder abrir la escotilla para el rescate.

Dicha profundidad no será superior a 50 metros por motivos de resistencia corporal en cuanto a presiones se refiere de los propios tripulantes.

El número de botellas de aire va a depender del volumen interior del artefacto y han de presurizar a la misma presión que hay en el exterior. De tal forma y atendiendo a la ley de Boyle:

$$V_a \cdot P_a = V_b \cdot P_b \cdot n$$

siendo:

V_a = volumen interior neto del artefacto

P_a = presión exterior del artefacto

V_b = volumen de la botella

P_b = presión interior de cada botella

n = número de botellas a instalar

Para el cálculo de V_a y de P_a hemos de tener en cuenta que:

$$V_a = V \cdot \alpha$$

$$P_a = (D + 10)/10$$

siendo:

V = volumen interior bruto del artefacto

α = permeabilidad

D = profundidad

De tal manera, suponiendo una permeabilidad de 0.80, una profundidad máxima de aplicación del sistema de emergencia de 50 metros y un volumen de artefacto de 3 metros cúbicos, operamos de la siguiente forma:

$$V_a = V \cdot \alpha = 3 \cdot 0.80 = 2,40m^3$$

$$P_a = (D + 10)/10 = (50 + 10)/10 = 6atm$$

despejando n de la ecuación inicial, nos queda:

$$n = \frac{V_a \cdot P_a}{V_b \cdot P_b} = \frac{2,40 \cdot 6}{0.05 \cdot 200} = 1,44botellas$$

empleando como volumen de gas interior equivalente a presión atmosférica 50 litros a una presión de 200 atmósferas.

El número final de botellas será el entero mayor al número obtenido, por lo tanto 2 botellas de aire comprimido que instalaremos para nuestro sistema de emergencia.

5.1.13 Sistema de vídeo e iluminación

Otra de las aplicaciones a la que podemos someter nuestro minisubmarino es la de inspección del medio subacuático para reunir todas las condiciones estructurales y de regeneración necesarias, aunque no sea este su auténtico compromiso.

Para ello el sistema de vídeo e iluminación debe poseer alta resolución a color y capacidad de trabajo en condiciones de mínima iluminación, típica de ambientes marinos, lagos o ríos.

Debido a la alta dispersión de la luz en los ambientes acuáticos es necesario que el sistema de iluminación entregue una luz altamente coherente para facilitar el enfoque e inspección por medio de las cámaras de vídeo.

5.1.14 Sistema de manipulación

Es el sistema que define más concretamente nuestra aplicación, ya que cuenta con un sistema de manipulación compuesto por dos brazos mecánicos, los cuales permitirán interactuar con su entorno.

Para que se pueda utilizar confiablemente en ambientes agresivos, como son los que se encuentran en lechos marinos o de ríos, es necesario que este sistema sea robusto.

Además incluirá detectores de apriete máximo para asegurar que ni la muestra a recolectar ni el manipulador en sí, sufran daño alguno.

Para facilitar la operación de los brazos se contará con sensores de posición.

Los controles de mando del manipulador serán ergonómicos, con el fin de permitir una manipulación cómoda, suave y precisa.

5.1.15 Sistema de control de atmósferas

Es uno de los sistemas más importantes a controlar ya que nuestro sumergible en cuestión va dotado de tripulación.

Como bien sabemos la tripulación efectúa su ciclo respiratorio expulsando dióxido de carbono, el cual debe ser eliminado haciéndolo pasar por un sistema de eliminación dotado de absorbentes.

Este sistema puede estar apoyado por una instalación de regeneración ambiental que se encargue de la absorción de la humedad con gel de sílice y la eliminación de olores orgánicos con carbón activo.

Debido a la importancia de este sistema en cuanto a bienestar e importancia se refiere para la vida de los tripulantes se efectúan los pertinentes estudios y aplicación sobre absorbentes en el medio.

5.1.16 Maniobras de posicionamiento

El minisubmarino al ser autopropulsado podrá sumergirse o emerger a voluntad, debido a sus dos hélices con tobera situados en los laterales, dejando para el movimiento horizontal las dos hélices de popa.

El mayor problema reside a la hora de sacar el artefacto fuera del agua, ya que necesitaremos una pluma de carga para la elevación completa del mismo, y posterior estiba en el buque de superficie.

El minisubmarino dispondrá de unos cáncamos de leva en los cuales puede engancharse la maniobra de leva del buque auxiliar, lanzando al agua buceadores dotados de ropas térmicas que trepan al sumergible y ejecutan la tarea del enganche. Tales maniobras de enganche se ejecutan hasta con una marejada de fuerza 6.

Los tripulantes deberán entrar al artefacto antes de su entrada en el agua y cerrar la tapa de escotilla herméticamente para poder mantener la presión.

5.1.17 Inmersión

El submarino tiene dos condiciones de flotabilidad, una en superficie y otra, sumergido, cumpliéndose en ambos casos el Principio de Arquímedes. En nuestra aplicación nos reduciremos a la situación de completa inmersión debido a que será ésta su principal situación.

El paso de la situación en superficie a la inmersión se realizará a través de la propulsión proporcionada por las hélices con tobera, situadas en los laterales del casco y a los pequeños tanques de lastre contenidos a tal efecto.

El proceso de inmersión se realiza dejando entrar agua en los tanques de lastre, aumentando el peso del conjunto, por lo que el centro de carena y el centro de gravedad cambiarán de posición, provocando el desplazamiento en dirección vertical del sumergible.

El submarino en inmersión puede mantenerse a una determinada profundidad por medio de la inundación y achique de agua, mediante un sistema automático que lo mantiene estacionario a cierta profundidad y que hace funcionar la inundación y achique de los tanques.

El volumen de los tanques de lastre es aproximadamente del 10 al 40 por ciento del desplazamiento en superficie.

5.1.18 Estabilidad

5.1.18.1 Estabilidad transversal

En superficie la estabilidad del sumergible es análoga a la de cualquier buque convencional.

Puesto que nuestro sumergible está proyectado para trabajos submarinos en la totalidad de su tiempo de operación, nos centraremos en la situación de inmersión.

Esta situación se consigue con la inundación total de los tanques de lastre y la ayuda de nuestras proelas, de esta manera ante un fallo eléctrico general el sumergible siempre tenderá a ir hacia la superficie, soltando el lastre fijo.

La estabilidad de un cuerpo totalmente sumergido tiene unas particularidades que las diferencia notablemente de la de un cuerpo parcialmente emergido.

Todas las diferencias parten de que no hay flotación, lo que origina que el momento de inercia sea cero y por tanto la diferencia entre el centro de carena y el metacentro (BM) valga cero, ya que $BM = \frac{I_t}{\nabla}$

Esto quiere decir que el metacentro coincide con el centro de carena tanto transversal como longitudinalmente.

5.1.18.2 Estabilidad longitudinal

Se estudia al igual que la transversal en los estados de superficie, inmersión y transición entre los dos anteriores.

La diferencia principal con la estabilidad de un buque normal consiste en el control que podrá ejercerse de la posición longitudinal del centro de gravedad mediante el servicio de trimado descrito más adelante.

En superficie sólo se estudiará la estabilidad inicial, pues estamos hablando de alturas metacéntricas mucho mayores que las que tendría en estabilidad transversal y nunca se llega a trimar grandes ángulos en superficie.

Para dicho cálculo necesitaríamos las curvas hidrostáticas que nos darán en función del calado la altura metacéntrica desde la línea base, pudiendo obtener la posición del centro de gravedad y la altura metacéntrica longitudinal, la cual nos define la estabilidad longitudinal.

En inmersión, al no haber flotación, el momento de inercia de ésta vale cero, y el metacentro longitudinal coincide con el centro de carena. Esto significa que la altura metacéntrica longitudinal es igual a la transversal.

No sólo eso, sino que puedo hablar de estabilidad longitudinal a grandes ángulos.

Durante la transición al igual que en transversal, la altura metacéntrica va disminuyendo conforme el sumergible inunda sus tanques de lastre. La única condición que asegura la estabilidad es que el metacentro esté por encima del centro de gravedad durante todo el proceso de inmersión ($GM > 0$).

5.1.19 Equipos y servicios

En primer lugar, dado que la fuente de energía principal proviene de acumuladores eléctricos, no hay servicio alguno relacionado con combustible.

Los motores y servos hidráulicos que necesitan lubricación son de pequeño tamaño y disponen de almacenamiento propio de aceite según el aparato, con lo que tampoco hay servicio centralizado de almacenamiento y trasiego de aceite.

No hay servicio de refrigeración en máquinas, pues son de pequeño tamaño y se refrigeran al contacto con el medio circundante.

No tiene sentido hablar de sistema de agua dulce ni de aguas sucias por la poca autonomía, ni de achique o contra-incendios por las pequeñas dimensiones del recinto habitáculo.

A continuación citamos y desarrollamos los servicios de los que dispondrá nuestro sumergible.

- Servicio de trimado
- Servicio de compensación
- Servicio de regulación
- Servicio de aire comprimido y lastre

5.1.19.1 Servicio de trimado

Es el encargado de mantener una estabilidad longitudinal adecuada mediante el traspaso de lastre de un tanque a otro sin salir del circuito mediante el correspondiente empleo de una bomba centrífuga y las correspondientes válvulas de diseño.

Dichas válvulas son del tipo telemando y se dispondrá de una bomba de emergencia para caso de fallo en el sistema principal.

Necesitaremos un gran caudal de trasiego para unos tiempos reducidos a la hora de trimar.

5.1.19.2 Servicio de compensación

Se emplea para achicar y llenar los tanques de lastre a cualquier profundidad operativa del sumergible.

Consiste en una serie de ramales que parten de las dos parejas de tanques y confluyen en un piano de válvulas al que se conecta las botellas de aire y la aspiración (a la vez descarga) al exterior.

Todas las válvulas empleadas son al igual que el servicio anterior telemandadas.

Las botellas al igual que el resto de la instalación, han de ser resistentes a la máxima presión hidrostática que puede encontrarse el sumergible.

5.1.19.3 Servicio de regulación

Se utiliza para achicar y llenar los tanques del mismo nombre, a cualquier profundidad operativa del sumergible.

Consiste en una serie de ramales que parten de las dos parejas de tanques y confluyen en un piano de válvulas al que se conecta las botellas de aire y la aspiración (a la vez descarga) al exterior.

Del piano de válvulas de regulación parte la tubería que lo une al piano de válvulas del servicio de trimado, de forma que se puede usar la bomba de trimado como bomba de emergencia del servicio de regulación desviando la línea.

La bomba se enfrenta a las mismas condiciones que la bomba de trimado.

5.1.19.4 Servicio de aire comprimido y lastre

Tiene el fin exclusivo de achicar los tanques de lastre.

No se puede hablar de un servicio propiamente dicho, sino de instalaciones alrededor de los tanques de lastre que permiten su funcionamiento.

El tanque de lastre dispone de dos aberturas permanentes en la parte inferior por donde se produce la entrada y salida de agua salada, las cuales estarán protegidas mediante rejillas para impedir la entrada de cuerpos extraños al interior que podrían dañarlos.

Siempre van abiertas porque la entrada de agua a los tanques se regula con las ventilaciones.

Estas ventilaciones son válvulas telemandadas situadas en la parte superior de los tanques de lastre.

En la condición de superficie permanecerán cerradas, de forma que los lastres no se pueden inundar por sus aberturas inferiores debido a que el aire contenido en los tanques no se puede escapar. Cuando se quiere conseguir la inmersión se abren de manera que el aire escapa por ellos, permitiéndose la inundación de los tanques.

Para la emersión vuelven a permanecer cerrados para que el soplado de los lastres con aire comprimido empuje el agua solamente por las aberturas inferiores, desalojando los tanques.

Mediante la instalación de aire comprimido, para la salida a superficie del sumergible, es necesario vaciar de agua los tanques introduciendo este aire, que está a una presión superior al agua de los tanques, que tiende a ocupar todo el espacio de éstos, desalojando todo al agua.

Dicha instalación consta de dos botellas independientes entre sí, cada una con una línea que la une a la parte superior del tanque.

Las botellas al igual que el resto de la instalación debe soportar la presión máxima hidrostática a la que puede encontrarse nuestro sumergible.

5.1.19.5 Equipo de regeneración de atmósferas

El problema de la regeneración de atmósferas respirable dentro del casco resistente durante todo el periodo de autonomía se divide en las siguientes partes:

- Reposición de aire consumido
- Eliminación de dióxido de carbono
- Control automático de las funciones anteriores
- Detección de trazos de posibles gases perjudiciales
- Emergencia en el sistema principal

Para el suministro de aire, calculo la cantidad consumida por la tripulación y el volumen necesario de botellas, suponiendo un esfuerzo superior al moderado, por niveles de seguridad, de forma que:

$$30 \text{ litros/min} \times \text{autonomía}(\text{horas}) \times n^{\circ} \text{ personas} \times 60 \text{ min/hora} = 30 \times 24 \times 2 \times 60 = 86400 \text{ litros}$$

Necesito por tanto 86400 litros de aire a 1 atmósfera.

Conociendo que la presión de una botella de aire es de 200 atmósferas y el volumen de aire que contiene es de 50 litros, calculamos los litros de aire que introduce cada una de las botellas a 1 atmósfera de la siguiente manera:

$$V = 50 \text{ litros} \times 200 \text{ atm} = 10000 \text{ litros}$$

Por lo tanto necesitaremos 9 botellas de aire para el suministro de a los tripulantes de nuestro sumergible.

Este número de botellas, aparentemente excesivo para las dimensiones de nuestro artefacto va a suponer un peso de 67 kg por botella de aire vacía, a la cual le añadimos un peso del aire que contiene una densidad de 1,3 gramos/litro, lo que nos supone un incremento de 13 kg por botella. Finalmente cada botella llena de aire supondrá un peso de 80 kg que habrá que tener en cuenta a la hora de los cálculos de desplazamiento y estabilidad del artefacto.

Para la eliminación del dióxido de carbono producido se ha elegido el método químico empleado en los experimentos de laboratorio, basados en la reacción del gas con un compuesto llamado "cal sodada" de forma que se suprima de la atmósfera.

Suponemos que cada tripulante respire 20 veces por minuto a razón de 0,5 litros cada vez y que el porcentaje correspondiente de dióxido de carbono es del 4 %. Respecto a esta estimación y esfuerzo moderado, tomaremos 10 l/min.

Estimando que los dos tripulantes permanecen en el interior del habitáculo durante 24 horas, tendremos:

$$V = 0,4 \times 2 \times 60 \times 24 = 1152 \text{litros}$$

El volumen V corresponde al CO₂ desprendido por la dotación en un día.

Empleándose como veremos a continuación, de la extrapolación de resultados experimentales, una capacidad de absorción en condiciones normales entre 130 y 200 litros/kilogramo, nos queda:

Entre 5 y 8 kilogramos de absorbente a instalar por día de inmersión, pudiendo extrapolar al periodo de tiempo y condiciones de presión deseadas, obteniendo la cantidad de absorbente a emplear en cada caso.

Para conseguir la reacción, el aire cargado de CO₂, que es más pesado y tiende a irse hacia abajo es aspirado por un pequeño ventilador y obligado a pasar por un filtro donde se encuentra un cartucho recambiable del compuesto.

Al pasar a través de él, el CO_2 se combina con la cal sodada, desapareciendo del aire. Cada cierto tiempo, el cartucho se satura y hay que cambiarlo por otro.

A parte de las provisiones de cal que resultan de los experimentos, el equipo debe completarse con un aparato de monitorización de gases que mantenga los porcentajes de O_2 y CO_2 poniendo en funcionamiento el sistema de apertura y reducción de presión de las botellas, así como el aparato eliminador de CO_2 .

Finalmente, en caso de emergencia, de fallo de todo el equipo, se emplea mascarar de respiración autónomas acopladas a un botellín de O_2 .

5.1.20 Aplicación virtual



Ilustración 6. Imagen virtual de la aplicación

5.1.21 Sumergibles del mismo propósito

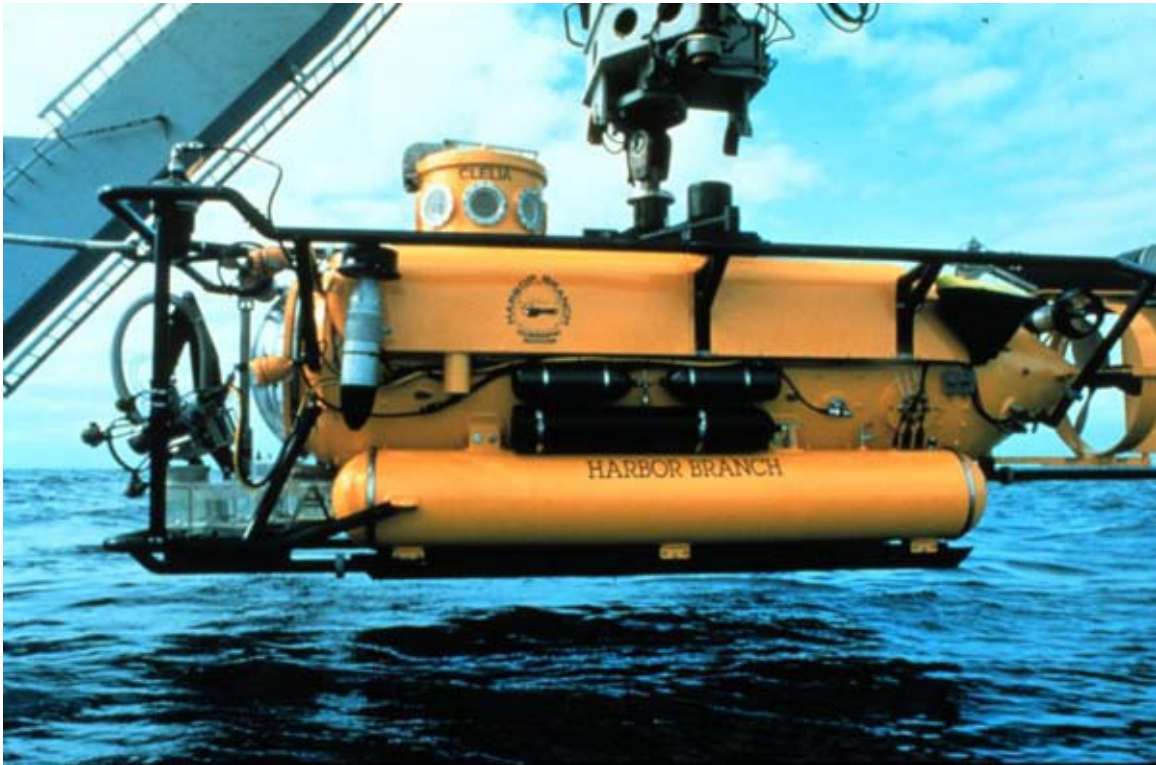


Ilustración 7. Imagen sumergible *Clelia*

Clelia es un sumergible construido por *Perry Oceanographics* en 1976 y refinado en 1992 por *Harbor Branch* para dirigir las necesidades de la comunidad de científicos marinos. Puede acomodar dos científicos/observadores y un piloto con una excelente visibilidad a través de la esfera situada en la proa del mismo.

Clelia va equipada con sonar activo, videocámaras, iluminación, etc, para una completa y segura investigación del medio, todo ello clasificado por *American Bureau of Shipping*.

Tiene las siguientes características:

- Eslora de 23 pies
- Manga de 9 pies
- Puntal de 7 pies
- Velocidad máxima de 3 nudos
- Profundidad máxima de operación de 1000 pies



Ilustración 8. Imagen sumergible *Deep Rover*

Deep Rover es un sumergible que usa sensores de diodo de láser para detectar fugas de aceite, construido por *Deep Ocean Technology* como futuro vehículo submarino constituido por una burbuja con dos brazos articulados.

El hábitat tomará muestras oceanográficas a profundidades de 3200 pies (aprox. 900 m) encontrándose la cabina a la presión de la superficie del mar.

Tiene las siguientes características:

- Eslora de 8,2 pies (aprox. 2,5 m)
- Manga de 6,3 pies (aprox. 1,9 m)
- Puntal de 7,8 pies (aprox. 2,3 m)
- Profundidad de operación de 3200 pies (aprox. 900 m)
- Velocidad máxima de 2,25 nudos
- 1 tripulante

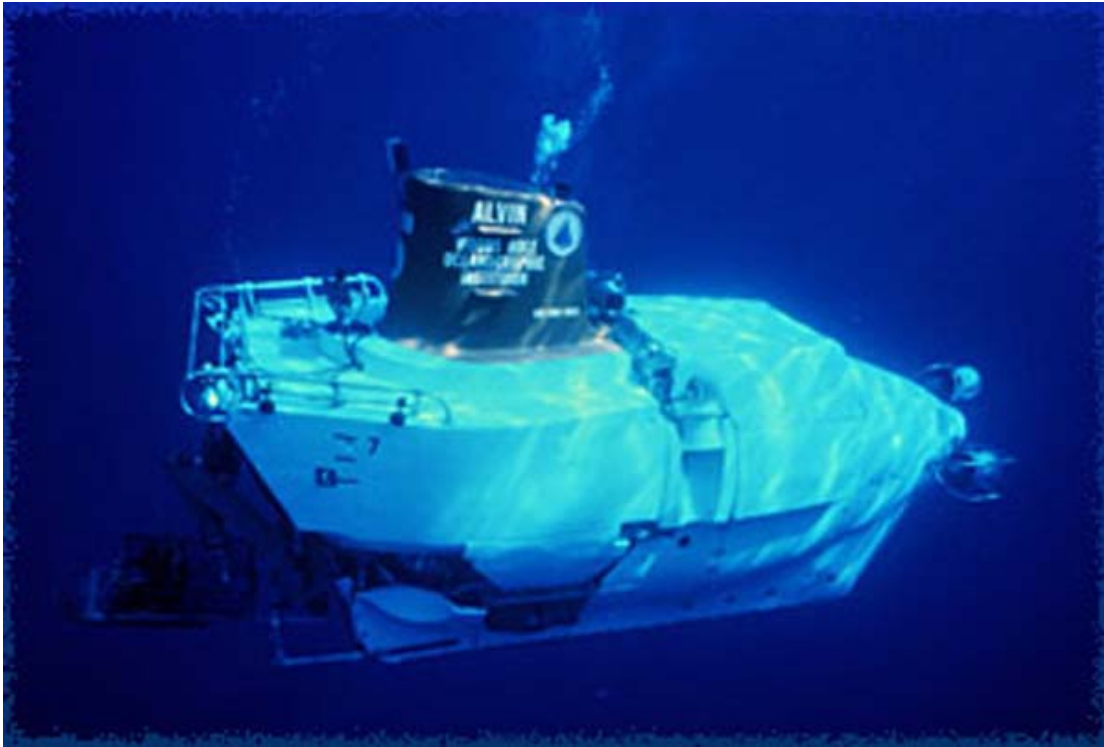


Ilustración 9. Imagen sumergible *Alvin*

Alvin creado por *Woods Hole Oceanographic Institution* está en funcionamiento desde 1964.

Fue el primer sumergible dedicado al estudio a grandes profundidades equipado con dos observadores y un piloto.

Actualmente llega a la profundidad de 14764 pies gracias a su casco de titanio y a una autonomía de 10 horas en condiciones normales.

Tiene las siguientes características:

- Eslora de 23,4 pies
- Manga de 8,6 pies
- Puntal de 11,1 pies
- Velocidad de crucero 1 nudo
- Velocidad máxima 2 nudos
- 1 piloto y 2 observadores



Ilustración 10. Imagen sumergible *Deep Worker*

Deep Worker es un sumergible usado en la exploración subacuática de todo el mundo, es compacto y ligero, capaz de sumergirse a 2000 pies con un equipamiento que le permite estar el máximo tiempo bajo la superficie.

El piloto que hace las veces de observador se encuentra siempre en las mismas condiciones que en superficie sea cual sea su profundidad.

Tiene las siguientes características:

- Eslora de 8,25 pies
- Manga de 5,3 pies
- Puntal de 5,75 pies
- Profundidad de operación de 2000 pies

- Velocidad entre 3 y 4 nudos
- 1 tripulante

6. Metodología

6.1 Determinación del volumen de absorción de CO₂

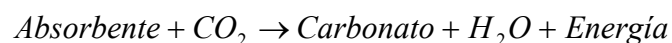
6.1.1 Introducción

Ésta es la primera de las pruebas que realizamos para el estudio de la capacidad de absorción de distintos tipos de compuestos absorbentes, tanto expuestos a la intemperie como los utilizados en ambientes confinados.

En esta prueba se determina la capacidad de carbonatación o cantidad de dióxido de carbono que se elimina del ambiente mediante la reacción química de los distintos tipos de absorbentes en un tiempo determinado.

El absorbente reacciona con el CO₂ existente en la atmósfera a medida que transcurre el tiempo, hasta la saturación, de manera que se puede representar gráficamente la cantidad de CO₂ absorbido conforme aumenta el tiempo de exposición.

La reacción generada es la siguiente:



6.1.2 Material necesario

- Cal sodada (tipo buceo, submarino-I, submarino-II)
- Ácido clorhídrico 1:1 (6N)
- Calcímetro de "Bernard"
- Embudo
- Pipeta
- Matraz con tubo vertical
- Bureta
- Agua acidulada, fenolftaleína, anaranjado de metilo

6.1.3 Cálculos previos

6.1.3.1 Determinación de la cantidad de ácido clorhídrico que debemos utilizar

Para comenzar hemos de conocer la composición que va a tener nuestro absorbente, ya que no se conoce exactamente, y lo tendremos que tener en cuenta a la hora de estimar la cantidad de ácido clorhídrico que vamos a emplear para disolver todo el absorbente, produciendo la liberación de CO₂, volumen que mediremos en la bureta.

El absorbente estará formado por cuatro compuestos básicamente, éstos son:

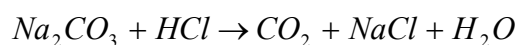
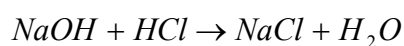
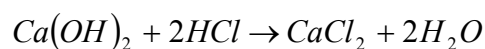
Hidróxido cálcico, Ca(OH)₂

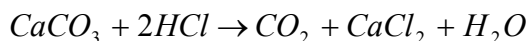
Hidróxido sódico, NaOH

Carbonato sódico, Na₂CO₃

Carbonato cálcico, CaCO₃

Cada uno de los cuales reaccionará con el ácido clorhídrico de la siguiente manera:





Ahora ya podemos calcular la cantidad de ácido que debemos emplear para disolver 0,3 gramos de muestra, expresada de la forma G en gramos, representada en la siguiente tabla:

Reactivo	Pm	Reacción	G (HCl)
$\text{Ca}(\text{OH})_2$	74	$\text{Ca}(\text{OH})_2 + 2\text{HCl} \rightarrow \text{CaCl}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$	0,295
NaOH	40	$\text{NaOH} + \text{HCl} \rightarrow \text{NaCl} + \text{H}_2\text{O}$	0,274
Na_2CO_3	106	$\text{Na}_2\text{CO}_3 + \text{HCl} \rightarrow \text{CO}_2 + \text{NaCl} + \text{H}_2\text{O}$	0,103
CaCO_3	100	$\text{CaCO}_3 + 2\text{HCl} \rightarrow \text{CO}_2 + \text{CaCl}_2 + \text{H}_2\text{O}$	0,219

Tabla 5. Cantidad de HCl a emplear para la muestra de absorbente

A partir de estos resultados elegiremos el que mayor cantidad de HCl necesita para reaccionar, mas concretamente los 0,295 g de HCl del $\text{Ca}(\text{OH})_2$, ya que cumpliendo con él, lo hacemos con los demás, por necesitar éstos inferiores cantidades de HCl necesario para la reacción.

Conociendo el número de gramos de HCl necesarios para 0,3 gramos de muestra y sabiendo que el número de moles es:

$$n = \frac{G}{Pm} = V \cdot M$$

de forma que, despejando y sustituyendo los resultados obtenidos, nos queda:

$$V = \frac{G}{Pm \cdot M} \rightarrow V = \frac{0,295}{36,5 \cdot 6} = 0,001347 \text{ litros} \cong 1,35 \text{ ml}$$

Dada la pequeña cantidad que obtenemos, vamos a emplear en nuestra práctica 2,5 ml de manera que tengamos un exceso de HCl y poder cumplir con éxito el experimento.

6.1.4 Método

Primeramente se toma una muestra significativa de absorbente de forma que nos permita realizar una serie de pruebas. Este absorbente es expuesto a unas condiciones atmosféricas de forma homogénea para que todos los granos que lo componen sufran las mismas consecuencias.

Para realizar la primera prueba se pesan 0,3 gramos de absorbente en la balanza (en nuestro caso electrónica) y la introducimos en la matraz, manteniendo el tubo vertical vacío, de manera que no caiga ningún grano del absorbente en su interior ayudándonos de un embudo de fabricación propia.

A continuación medimos con una pipeta 2,5 ml de ácido clorhídrico y lo vertemos con riguroso cuidado dentro del tubo vertical, ya que si entrara en contacto con el absorbente antes de hora comenzaría la reacción.

Seguidamente, y con rapidez, cerramos el matraz con un tapón que lleva incorporado el extremo del tubo del calcímetro y enrasamos, procurando que el nivel del líquido en la bureta se sitúe en el cero, o anotar la medida para que una vez terminada la reacción y tomando la medida final, podamos obtener nuestro volumen de dióxido de carbono a partir de la diferencia de lecturas tomadas.

Para ello hemos de inclinar el matraz de forma que entre en contacto el absorbente con el ácido clorhídrico y agitar para que se produzca la reacción hasta que visualicemos en la bureta que no se desprenden mas dióxido de carbono, momento en el cual hemos de tomar la lectura.

A partir de esta medida podemos calcular el número de moles de CO₂ desprendido a partir de la siguiente ecuación:

$$p \cdot V = n \cdot R \cdot T \quad \text{Ecuación de los gases perfectos}$$

$$n = \frac{p \cdot V}{R \cdot T} \quad \text{donde:}$$

R = 0,082 atm · litro/K · mol

p = 1 atm

T = 293 K

V = volumen en litros de la experiencia

6.2 Estanqueidad en cámara hiperbárica

6.2.1 Introducción

Esta prueba se realiza para comprobar la estanqueidad que tiene la cámara hiperbárica (Iberco) que disponemos en nuestro laboratorio, previa introducción del aire en cámara y manteniendo las válvulas en posición correspondiente, de manera que podamos dejar la instalación fijada para el posterior análisis y toma de resultados.

Una cámara hiperbárica consiste en un recipiente de acero o acero y acrílico con capacidad para una persona (cámara monoplaza), o dos o más personas (cámara multiplaza), en el cual el paciente se introduce, se aumenta la presión entre 1,7 y 2,8 atmósferas absolutas y respira oxígeno puro por 60 a 90 minutos.

Actualmente se pueden tratar patologías como: enfermedad de la descompresión, aeroembolismo, gangrena gaseosa y lesiones por flora anaerobia, intoxicación por monóxido de carbono, necrosis por radiación, etc. De manera que es de vital importancia la disposición de una cámara hiperbárica en condiciones óptimas para el tratamiento de dichas patologías y el estudio de nuevas aplicaciones.

Nuestro estudio se reduce a una cámara hiperbárica de dimensiones moderadas en la que hemos de comprobar primeramente su estanqueidad, de manera que al final de nuestro ensayo podemos representar gráficamente las pérdidas de presión que ha sufrido a lo largo de las horas e incluso días una vez introducido el aire y cerradas las válvulas de escape, analizando el significado de la curva obtenida.

6.2.2 Material necesario

- Cámara hiperbárica (Iberco)
- Botella aire comprimido
- Manoreductor
- Tubos

6.2.3 Método

Para la ejecución de esta nueva prueba hemos preparado primeramente una serie de tubos de conexión entre la botella de aire comprimido, más concretamente, desde la válvula de salida del aire hasta la toma de entrada de la cámara que disponemos.

A continuación abrimos la válvula de la botella de aire llenándose la cámara de éste. Para ello han de estar todas las escotillas de la cámara cerradas y la válvula de salida también cerrada para que el aire no salga al exterior.

Tras unos segundos comprobamos que la presión dentro de la cámara va aumentando tal y como marca el manómetro instalado en la cámara, llevando dicha presión hasta el valor de 50 m.c.A.

Ahora es el momento en el que cerramos la válvula de entrada, interrumpiendo la entrada del aire, por lo que la presión se mantiene constante y podemos comenzar el estudio de estanqueidad midiendo las pérdidas de presión conforme pasa el tiempo.

Esta medición la vamos a realizar registrando la presión una vez al día, siempre a la misma hora y creando una tabla donde podamos exponer los resultados para a continuación representar gráficamente.

La tabla y gráfica obtenida es la siguiente:

fecha	días	P_{relativa}	$P_{\text{fórmula}}$
30/01/2003	0	49,5	47,6
31/01/2003	1	34,5	35,5
03/02/2003	4	14	14,7
04/02/2003	5	11	11
05/02/2003	6	8,5	8,2
06/02/2003	7		6,1
07/02/2003	8		4,6
10/02/2003	11	3,5	1,9
11/02/2003	12		1,4
12/02/2003	13		1,1
13/02/2003	14		0,8

Tabla 6. Estanqueidad en cámara hiperbárica

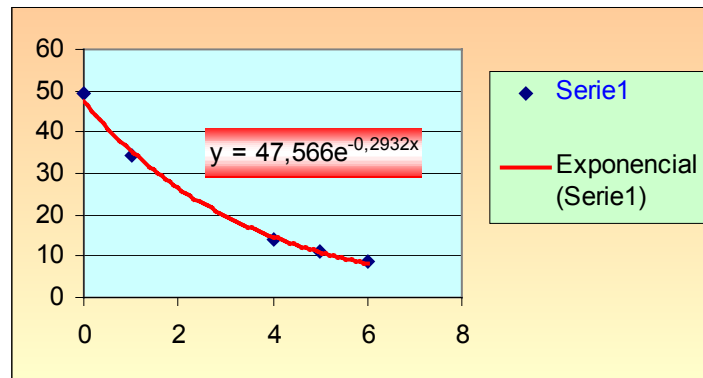


Ilustración 11. Representación estanqueidad en cámara hiperbárica

La prueba de descompresión se realiza en la fecha indicada obteniendo la siguiente información:

Fecha	días	P.relativa	P.absoluta	P.Linea Tend	P Desc
30/01/2003	0	49,5	59,5	44,4	59,5
31/01/2003	1	34,5	44,5	39,9	54,2
03/02/2003	4	14	24	28,8	49,5
04/02/2003	5	11	21	25,9	45,2
05/02/2003	6	8,5	18,5	23,3	41,4
06/02/2003	7			20,9	38
07/02/2003	8			18,7	34,9
08/02/2003	9			16,8	32,2
09/02/2003	10			15,1	29,7
10/02/2003	11	3,5	13,5	13,6	27,5
11/02/2003	12	2,5	12,5	12,2	25,5
12/02/2003	13			10,9	23,7
13/02/2003	14	2	12	9,8	22,1

Tabla 7. Descompresión cámara hiperbárica

6.3 Determinación de hidróxidos y carbonatos

6.3.1 Introducción

Esta prueba se realiza a partir de los resultados obtenidos en la primera, con el objetivo de determinar la cantidad de hidróxidos y carbonatos que contiene nuestro absorbente en cuestión.

Para ello realizamos varios experimentos empleando el mismo tipo de absorbente sometido a distintas condiciones, en concreto, a distintos tiempos de permanencia absorbiendo dióxido de carbono.

Valoramos con hidróxido de sodio la muestra obtenida previo enrase con agua destilada hasta la cantidad determinada, de manera que se produzca un cambio en el color debido a la aplicación de unas gotas de fenolftaleína que nos indicará que cantidad de hidróxido ha alcanzado nuestro absorbente.

Los resultados deberán ser prácticamente constantes ya que no influye la cantidad de dióxido de carbono absorbido y la composición del mismo no varía.

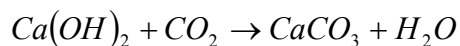
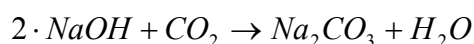
6.3.2 Material necesario

- Disolución obtenida de la prueba anterior (volumen de absorción de CO_2)
- Hidróxido de sodio (0.1M)
- Agua destilada
- Fenolftaleína
- Matraz aforado (250 ml)
- Vaso, pipeta, bureta, varilla, embudo, ...

6.3.3 Cálculos previos

Sabemos que el absorbente empleado esta formado básicamente por hidróxido de calcio y una pequeña proporción de hidróxido de sodio, que reaccionan con el dióxido de carbono existente en la atmósfera. Aunque en ocasiones no ha llegado a carbonatarse por completo estará formado por hidróxidos y carbonatos de los metales correspondientes.

De forma que:



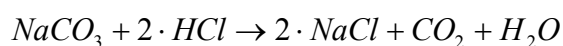
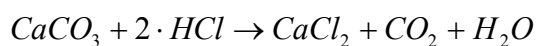
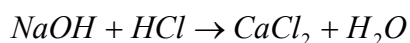
Sabiendo que este ensayo ha sido valorado con HCl en cantidad suficiente, más concretamente conoceremos el exceso valorando con NaOH de concentración 0.1M.

Cuando conocemos este exceso podemos conocer el volumen de HCl que ha reaccionado con el absorbente, concretamente con el NaOH y el Ca(OH)₂, de la siguiente forma:

$$V_{\text{HCl}(\text{total})} = V_{\text{HCl}(\text{reacciona})} + V_{\text{HCl}(\text{exceso})} \quad \text{de tal forma:}$$

$$V_{\text{HCl}(\text{reacciona})} = V_{\text{HCl}(\text{total})} - V_{\text{HCl}(\text{exceso})}$$

Por lo tanto podemos determinar la cantidad de hidróxidos y carbonatos haciendo reaccionar cada componente del absorbente (NaOH, Ca(OH)₂, CaCO₃ y Na₂CO₃) con el HCl de la siguiente manera:



calculadas las cantidades que reaccionan, y como conocemos los totales (determinados en la prueba anterior) se puede saber la cantidad de hidróxidos y carbonatos que tiene la muestra.

En cuanto a moles se refiere:

$Moles\ totales = Moles\ de\ carbonatos + Moles\ de\ \acute{o}xidos$ de manera que:

$Moles\ de\ \acute{o}xidos = Moles\ totales - Moles\ de\ carbonatos$

Para realizar la valoración hemos de emplear el hidróxido sódico, preparado de la siguiente manera:

La cantidad del preparado será de 500ml, siendo la mayoría agua destilada y la parte restante hidróxido sódico en forma sólida para la obtención final de una disolución de hidróxido sódico de concentración 0.1M.

El cálculo del hidróxido sódico en forma sólida se realiza de la siguiente forma:

$$Moles = \frac{g}{Pm} = V \cdot M$$

Donde:

$$Pm\ (NaOH) = 40\ g/mol$$

$$V = 0,5\ litros$$

$$M = 0,1\ moles/litros$$

De tal forma:

$$g = Pm \cdot V \cdot M = 40 \cdot 0,5 \cdot 0,1 = 2g(NaOH)$$

Estos 2 gramos de NaOH sólido los disolvemos en un matraz aforado de 500ml con agua destilada hasta enrasar.

A continuación agitamos hasta que el NaOH sólido quede completamente disuelto.

6.3.4 Método

La forma de realizar esta prueba se basa en los resultados y material recogido de la prueba anterior de determinación de CO₂ absorbido por nuestro absorbente en cuestión, de la forma siguiente:

Cogemos la muestra obtenida de la disolución del absorbente y el ácido clorhídrico recogida en el matraz con tubo interior y añadimos agua destilada.

Tras dicha operación agitamos para una completa homogeneización y vamos rellenando un matraz de 250 ml de capacidad hasta dicha cantidad.

A continuación tapamos el matraz y volvemos a agitar para que la mezcla sea completamente homogénea y vertemos 20 ml al vaso de ensayo.

Se añaden 3 gotas de fenolftaleína a la disolución y valoramos con el hidróxido sódico ayudándonos de una varilla y con sumo cuidado para que las gotas del hidróxido afecten únicamente a la disolución y no al vaso ni a la varilla, pudiendo variar en tal caso el resultado de la experiencia por tratarse de unidades en milímetros.

Dicha valoración se hará hasta que la disolución tome un color rosáceo, momento en el cual podemos tomar lectura del hidróxido empleado.

A continuación podemos calcular el número de moles de hidróxidos a partir de la siguiente ecuación:

$$n = \frac{n_0 - (2 \cdot n_{CO_2} + n_{exc})}{2}$$

Siendo:

n_0 = moles iniciales de HCl

n_{CO_2} = moles de CO₂ desprendidos = $\frac{1}{2} n_{HCl}$

n_{exc} = moles en exceso de HCl

Teniendo en cuenta que:

$$n_0 = V_0 \cdot N = 2,5 \cdot 6 = 15 \text{ milimoles}$$

$$n_{CO_2} = \frac{P \cdot V_{CO_2}}{R \cdot T} = \frac{V_{CO_2}}{0,082 \cdot 293} = 0,042 \cdot V_{CO_2}$$

$$n_{exc} = 5 \cdot V_{NaOH} \cdot N = 5 \cdot 0,1 \cdot V_{NaOH}$$

Y sustituyendo en la ecuación inicial, nos queda:

$$n = \frac{15 - (0,084 \cdot V_{CO_2} + 0,5 \cdot V_{NaOH})}{2}$$

6.4 Captación pasiva

6.4.1 Ambiente normobárico

6.4.1.1 Ambiente

6.4.1.1.1 Introducción

La determinación de la absorción de dióxido de carbono por parte de cada tipo de absorbente expuesto al ambiente, sin ningún tipo de perturbación durante el tiempo establecido será el objeto de nuestra experiencia.

Dicho aire ambiental se encuentra a una temperatura media de 20 °C y 1 bar de presión absoluta.

El periodo experimental de ésta se ha extendido durante casi seis meses siendo la temperatura del laboratorio la única variable, manteniéndose en un rango de 20 a 25 °C. .

6.4.1.1.2 Material necesario

- Absorbente
- Bandeja de exposición
- Aire ambiental sin perturbaciones
- Calcímetro de "Bernard"

6.4.1.1.3 Método

Tras coger una determinada cantidad de muestra de cada uno de los tres absorbentes empleados en nuestro estudio, se exponen en tres bandejas independientes, de manera que reciba de la mejor manera posible el aire ambiental, esparciendo bien los granos de absorbente.

A continuación se analiza cada absorbente mediante el calcímetro de "Bernard".

6.4.1.2 Simulador

6.4.1.2.1 Introducción

Esta prueba se basa en el estudio del funcionamiento de cada tipo de absorbente sometido a presión atmosférica situado en el interior de la cámara. Como observamos la diferencia principal con respecto a captación del ambiente radica en la diferencia del volumen de aire y en la menor variación de temperatura.

6.4.1.2.2 Material necesario

- Absorbente
- Bandeja de exposición
- Simulador hiperbárico (Iberco)
- Calcímetro de "Bernard"
- Bomba de vacío mod. D-95, 220V, 130W
- Cronómetro *SEIKO H-801*

6.4.1.2.3 Método

El método empleado es similar a la captación activa del ambiente exceptuando el recinto, en nuestro caso, los límites geométricos de la cámara, a diferencia de los límites geométricos del laboratorio.

Para el estudio de este sistema sin ventilación empleamos cada una de las muestras, introduciéndolas en el interior de la cámara que cerraremos mediante los portillos asegurándonos la estanqueidad con respecto al exterior. Hemos de tener en cuenta que las válvulas de presurización y despresurización han de estar cerradas.

Tras dejar actuar el absorbente un determinado tiempo procedemos a su análisis de carbonatación mediante el calcímetro de "Bernard".

Esquema de funcionamiento:

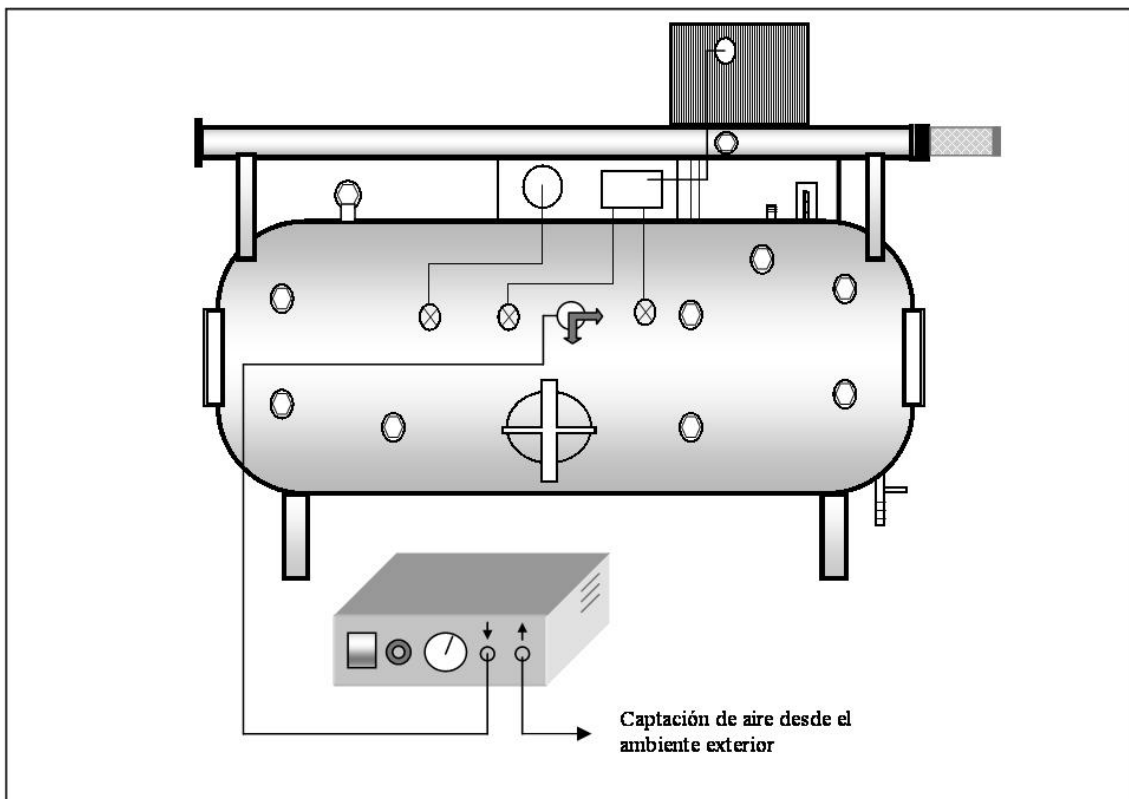


Ilustración 12. Esquema captación pasiva, ambiente normobárico en simulador

6.4.2 Ambiente hiperbárico

6.4.2.1 Simulador

6.4.2.1.1 Introducción

Esta prueba se basa en el estudio del funcionamiento de cada tipo de absorbente sometido a presión situado en el interior de la cámara. Como observamos el método empleado es similar a la captación activa del ambiente exceptuando el recinto, en nuestro caso, los límites geométricos de la cámara, a diferencia de los límites geométricos del laboratorio y del empleo de un compresor que nos introducirá aire en la cámara con el objeto de incrementar la presión inicial correspondiente a 1 ata.

6.4.2.1.2 Material necesario

- Compresor de aire *Jun-Air* mod.6-10
- Absorbente
- Bandeja de exposición
- Simulador hiperbárico (Iberco)
- Calcímetro de "Bernard"
- Cronómetro *SEIKO H-801*

6.4.2.1.3 Método

Tras preparar la cantidad estipulada de cada uno de los absorbentes y exponerlos en su correspondiente bandeja se introduce cada muestra por separado en sucesivos experimentos.

Una vez introducido el absorbente correspondiente y cerrada herméticamente la cámara ponemos en marcha el compresor que mantendrá en el interior de la misma la presión deseada en todo momento.

Tras dejar actuar el absorbente un determinado tiempo a la presión determinada procedemos a su análisis de carbonatación mediante el calcímetro de "Bernard".

Esquema de funcionamiento:

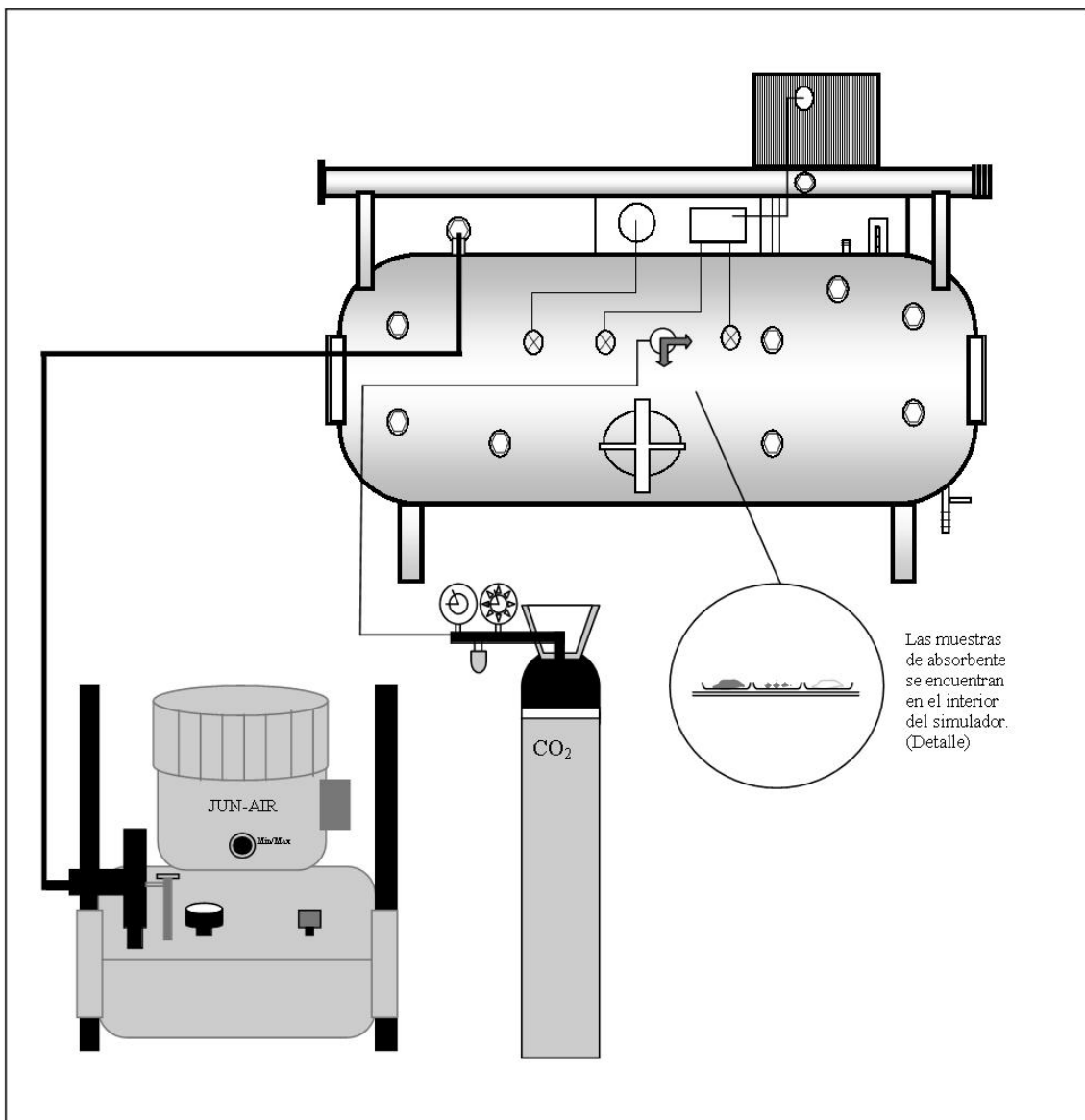


Ilustración 13. Esquema captación pasiva, ambiente hiperbárico en simulador

6.5 Captación activa

6.5.1 Ambiente normobárico

6.5.1.1 Ambiente

6.5.1.1.1 Introducción

Esta prueba consiste en forzar el paso de aire de la atmósfera mediante una bomba de vacío que lo impulsa a través del absorbente situado en el interior de un canister de vidrio abierto por ambos extremos, intercalando en el sistema un manómetro que nos permita mantener un flujo constante de aire. El CO₂ absorbido será función del tiempo que mantengamos el flujo de aire.

Los experimentos se realizarán con varios tipos de absorbentes y para distintos tiempos de exposición al ambiente.

6.5.1.1.2 Material necesario

- Bomba de vacío mod. D-95, 220V, 130W
- Caudalímetro
- Canister de vidrio
- Mangueras
- Cronómetro *SEIKO H-801*

6.5.1.1.3 Método

Nuestro sistema constará básicamente de bomba, caudalímetro y muestra de absorbente conectados entre sí mediante manguera y el empleo de una derivación tipo "T".

Tras coger una determinada muestra de absorbente, en nuestro caso 5 y 10 gramos respectivamente, la introducimos en el canister de vidrio, aislándolo mediante el empleo de gasas. Dicho tubo se conecta mediante manguera al sistema.

Por otra parte se conecta el caudalímetro al sistema de manera que los resultados obtenidos se hayan realizado todos con la misma diferencia de presión.

Una vez montado el sistema se pone en marcha la bomba y regulamos el paso de aire mediante una válvula y mantenemos el flujo de aire el tiempo establecido.

Esquema de funcionamiento:

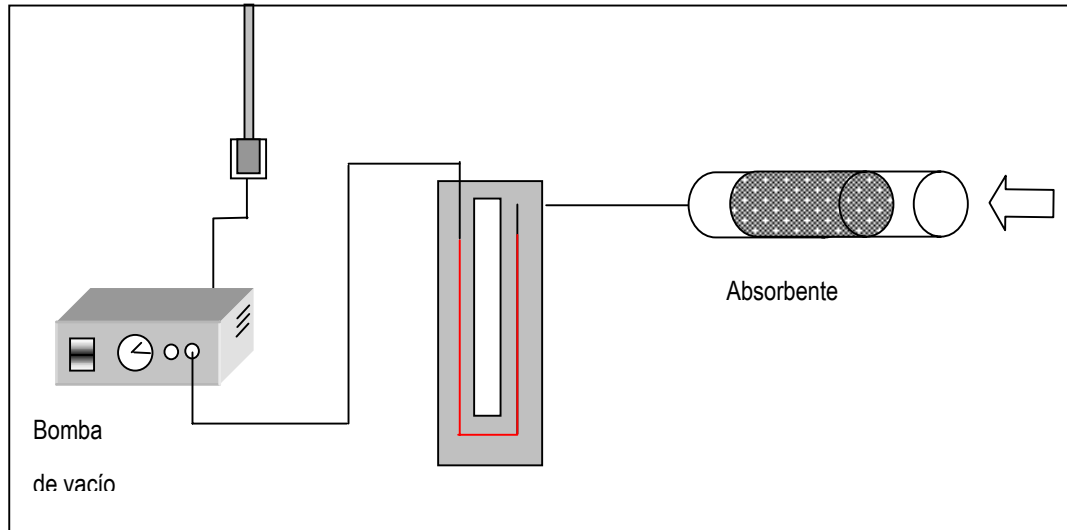


Ilustración 14. Esquema captación activa, ambiente normobárico

6.5.2 Bomba de vacío

6.5.2.1 Simulador

6.5.2.1.1 Introducción

Esta prueba consiste en analizar cada uno de los tipos de absorbentes después de la exposición de los mismos al paso del aire forzado por una bomba de presión, teniendo en cuenta el porcentaje de dióxido de carbono.

6.5.2.1.2 Material necesario

- Botella de CO₂
- Mangueras
- Simulador hiperbárico *Iberco*
- Bomba de vacío mod. D-95, 220V, 130W
- Cronómetro *SEIKO H-801*

6.5.2.1.3 Método

Primeramente tomamos una muestra de absorbente (Buceo, Submarino-I y Submarino-II) que introducimos en un canister. A continuación ubicamos el canister en el sistema y realizamos la experiencia.

El sistema consta de un simulador hiperbárico que mantendremos a presión atmosférica durante todo el experimento suministrándole una proporción determinada de CO₂ a partir de una botella.

También dispondremos de una bomba de vacío que extrae el aire del interior de la cámara y lo hace pasar por el absorbente situado en la salida de aire del simulador.

Esta prueba la hemos realizado para evaluar el absorbente a distintas concentraciones iniciales de CO₂ en el interior de la cámara, y evaluando la capacidad hasta alcanzar el porcentaje final indicado por el analizador del 0.5 %.

- Primera prueba; 5% CO₂
- Segunda prueba; 4% CO₂
- Tercera prueba; 3% CO₂
- Cuarta prueba; 1,5% CO₂

De manera que tras realizar cada experiencia con distintas muestras de absorbentes procedemos a su análisis de carbonatación.

Para la prueba se ha empleado una cantidad de 20 gramos de absorbente y posteriormente una de 10 gramos.

Esquema de funcionamiento:

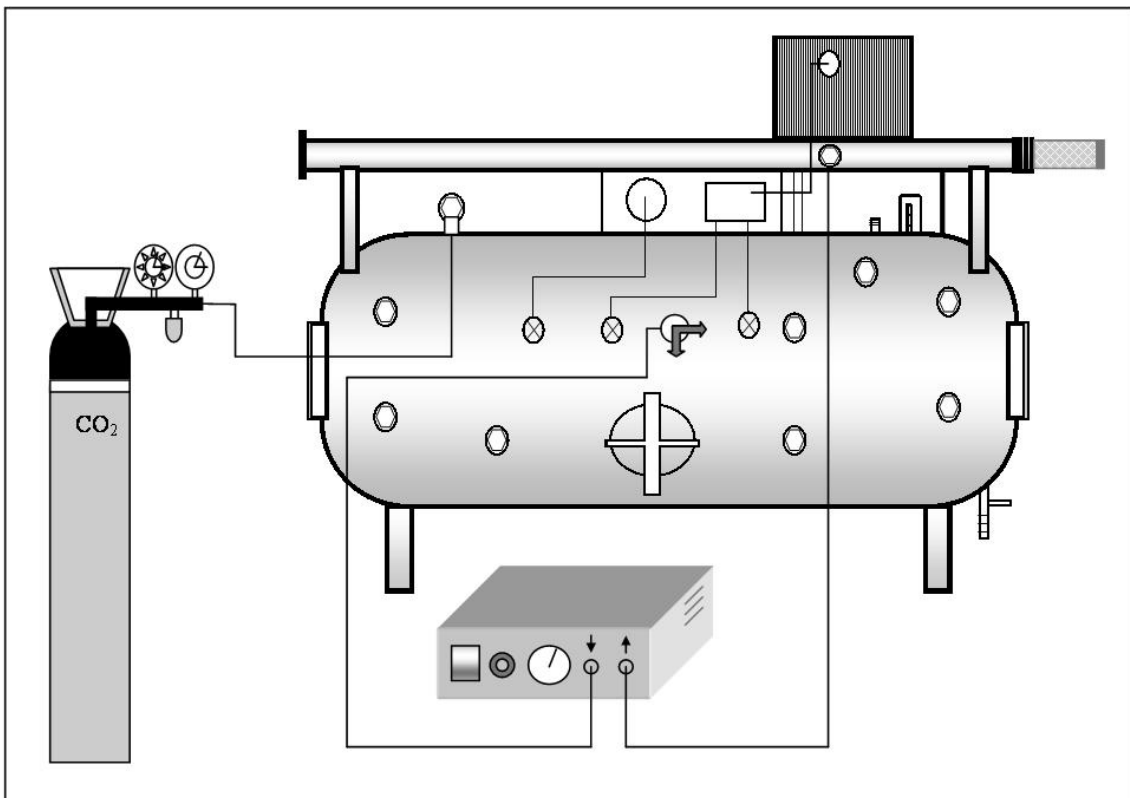


Ilustración 15. Esquema captación activa, bomba de vacío en simulador

6.5.3 Ambiente hiperbárico

6.5.3.1 Simulador

6.5.3.1.1 Introducción

Con esta prueba pretendemos conocer la capacidad de absorción de los tres absorbentes tipo, utilizando diferentes rangos de presiones absolutas, medidas en metros de columna de agua. (10 mca = 1 Bar). Como variables debemos tener en cuenta presiones absolutas, porcentajes de dióxido de carbono, tiempos y cantidad de absorbente.

6.5.3.1.2 Material necesario

- Compresor de aire *Jun-Air* mod.6-10
- Botella de CO₂
- Mangueras
- Simulador hiperbárico *Iberco*
- Bomba de vacío mod. D-95, 220V, 130W
- Cronómetro *SEIKO H-801*

6.5.3.1.3 Método

Primero comprobamos que todas las válvulas de la cámara están cerradas.

A través de una válvula introducimos dióxido de carbono procedente de la botella, abrimos las válvulas de presurización y despresurización, hasta que la concentración de dióxido de carbono alcanza un porcentaje 0,5% superior al de la prueba. A continuación ponemos el compresor en funcionamiento introduciendo el aire y creando un sistema de regeneración a circuito abierto. (Ver figura).

Cuando la concentración alcanza el porcentaje deseado se coloca el canister con la cantidad de absorbente utilizada en nuestro estudio, de 10 a 20 gramos, en la salida de exhaustación.

Durante todo este intervalo se registra la concentración de dióxido de carbono que nos indica el analizador en función del tiempo en minutos. Una vez que el analizador se estabiliza en un rango de medida de 0,5% retiramos el canister y procedemos a su análisis de carbonatación.

Esquema de funcionamiento:

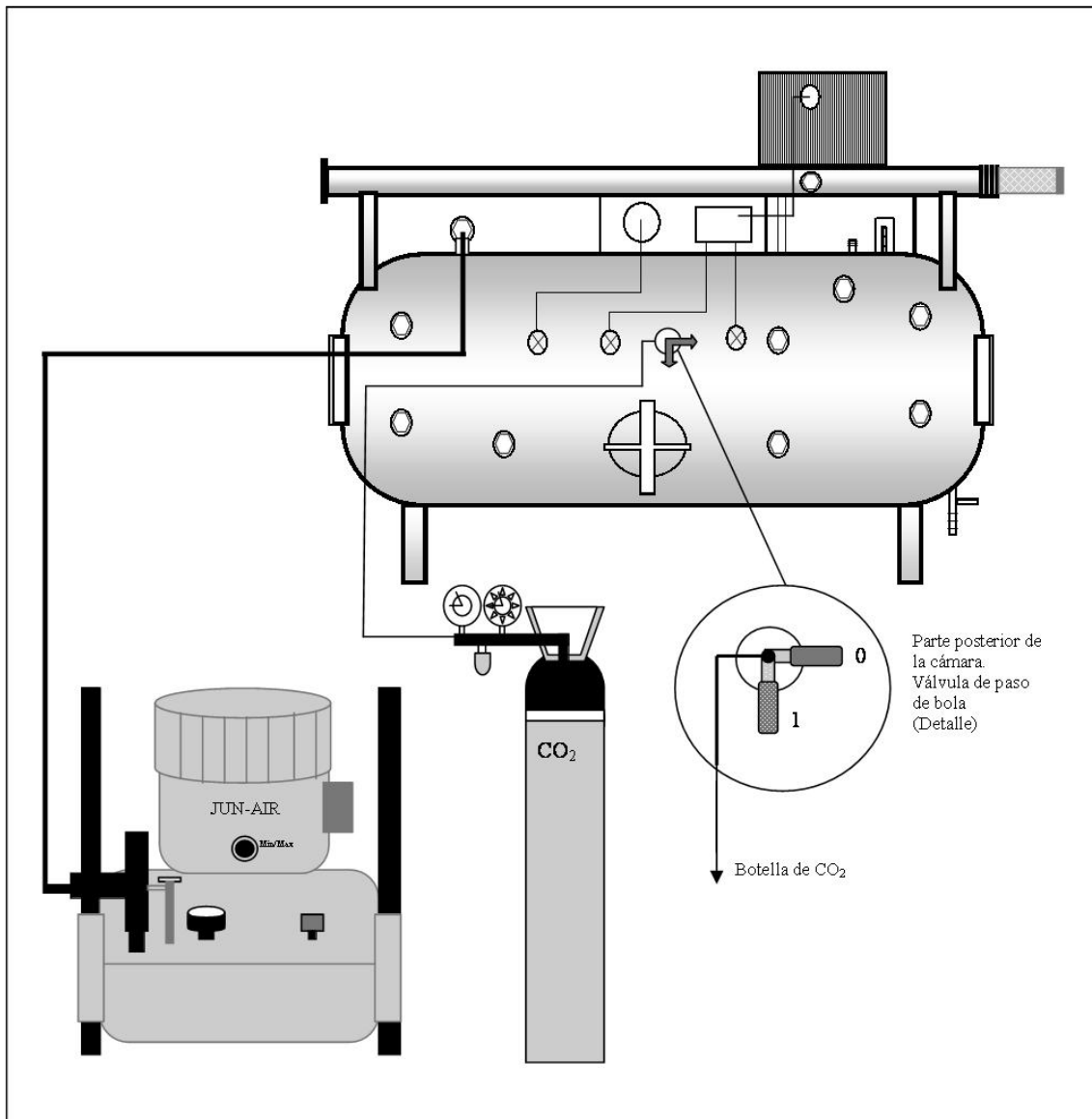


Ilustración 16. Esquema captación activa, ambiente hiperbárico en simulador

6.5.4 Botella de CO₂

6.5.4.1 Ambiente

6.5.4.1.1 Introducción

En esta prueba vamos a determinar la absorción de dióxido de carbono del absorbente cuando es suministrado por una botella auxiliar de CO₂.

Para ello se hace pasar el CO₂ por agua para que la captación sea mayor por la humectación del gas.

Disponemos también de un manómetro para que la diferencia de presión se mantenga constante a lo largo de todo el proceso y para todos los ensayos, de manera que los resultados obtenidos estén basados en la misma presión.

6.5.4.1.2 Material necesario

- Botella auxiliar de CO₂ (5 litros)
- Manoreductor
- Tubos y gomas de sujeción
- Manómetro
- Vaso

Un esquema sencillo es conectar una botella de aire comprimido con dióxido de carbono, de composición conocida, haciendo pasar con un caudal humidificado constante (IF) a través del absorbente y posteriormente a un analizador, estudiando su evolución.

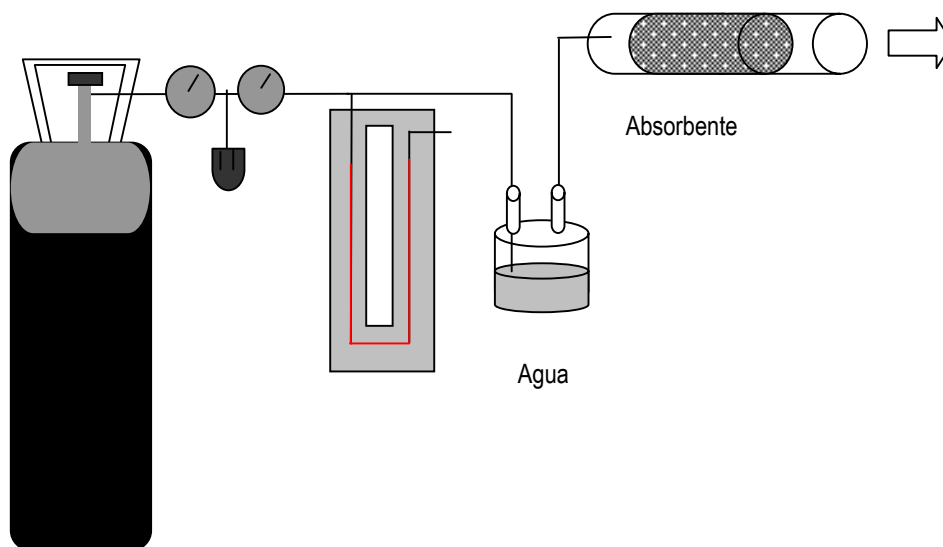


Ilustración 17. Esquema captación activa, botella de CO₂ en ambiente

6.5.4.1.3 Método

Lo primero es situar la botella de CO₂ en un lugar seguro y asegurarla firmemente de manera que no pueda volcar, para ello bastará tomar una cinta.

A continuación colocamos el manorreductor en la botella de manera que podamos controlar en todo momento la presión que está produciéndose.

Al manorreductor se une un tubo que conecta con el manómetro encargado de mantener constante la diferencia de presión, en nuestro caso, 50 mm.c.A.

Del mismo tubo se parte hacia un matraz con doble abertura con agua donde pasa a su través el gas procedente de la botella, que a su vez conecta con la muestra tal y como vemos en el esquema de funcionamiento.

Este proceso se realiza para aumentar la absorción de dióxido de carbono de nuestro absorbente, el cual en esta prueba hemos presentado pulverizado para mejorar los resultados.

Para la obtención de los resultados realizamos varios experimentos con periodos de tiempo de 10, 20, 30,... minutos que posteriormente analizaremos en el calcímetro de Bernard haciendo reaccionar una muestra de 0,3 gramos con 2,5 ml de ácido clorhídrico 0,1N

7. Resultados experimentales

7.1 Introducción

Siguiendo el orden de las experiencias expuesto en el capítulo anterior, a continuación se reproducen los resultados obtenidos para cada una de las pruebas realizadas. El análisis de los datos y las posibles conclusiones derivadas de los mismos serán objeto de los siguientes capítulos.

La notación que se va a utilizar en los descriptores de las tablas es la siguiente:

- Activa/ Pasiva: indicador de las condiciones de ventilación de la prueba; si la ventilación fue forzada o no.
- Ambiente/ Simulador: definen el lugar de realización de la experiencia. Indican si esta se realizó en el exterior o en el interior del simulador hiperbárico, respectivamente.
- Absorbentes:
 - Tipo I: Absorbente Buceo
 - Tipo II-A: Absorbente Submarino I
 - Tipo II-B: Absorbente Submarino II
- Calcímetro: hace referencia a los resultados de las pruebas efectuadas con el calcímetro de Bernard.

- Tiempo: será uno de los parámetros que sirvan para comparar resultados y fijar la tendencia de los datos obtenidos. En todas las pruebas realizadas el tiempo (T) vendrá expresado en minutos.
- Normobárica/ Hiperbárica: la presión absoluta a la que se realizan las experiencias podrá ser igual o superior a la ambiental.

7.2 Captación pasiva

7.2.1 Ambiente Normobárico

7.2.1.1 Ambiente

Recordando las condiciones bajo las cuales se realizan las experiencias (ventilación pasiva, en el exterior del simulador y a presión ambiental) se tomaron datos procedentes de las pruebas en el calcímetro de Bernard, para cada uno de los tres tipos de absorbentes, a lo largo de una hora y en intervalos de 15 minutos, obteniendo los siguientes resultados:

CARBONATACIÓN (ml)			
TIEMPO	TIPO I	TIPO II-A	TIPO-IIB
0	6,5	8	5
15	7	8,5	5,5
30	7,5	8,5	5,5
45	7	9	6
60	7	9	6

Tabla 8. Captación pasiva. Ambiente normobárico. Ambiente. Carbonatación en función del tiempo y tipo de absorbente

De forma gráfica,

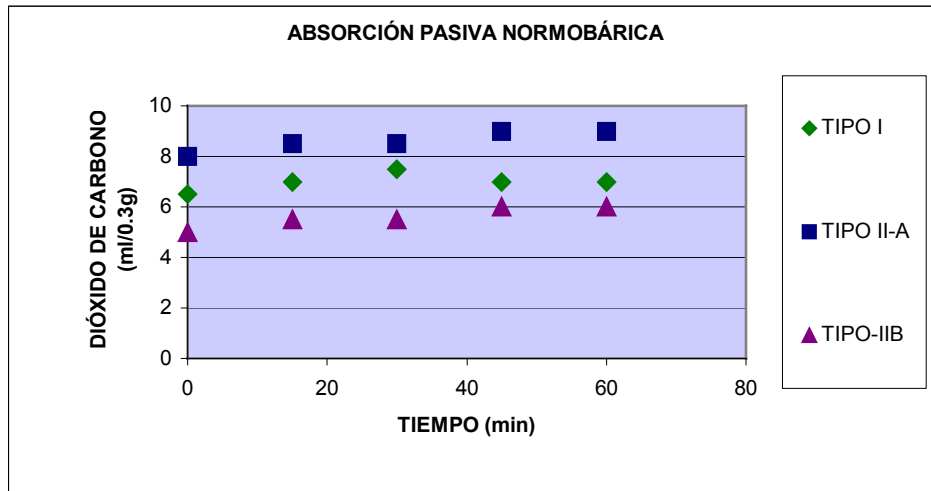


Ilustración 18. Representación puntual. Absorción pasiva normobárica

Añadiendo la línea de tendencia a cada una de las series, queda de la forma:

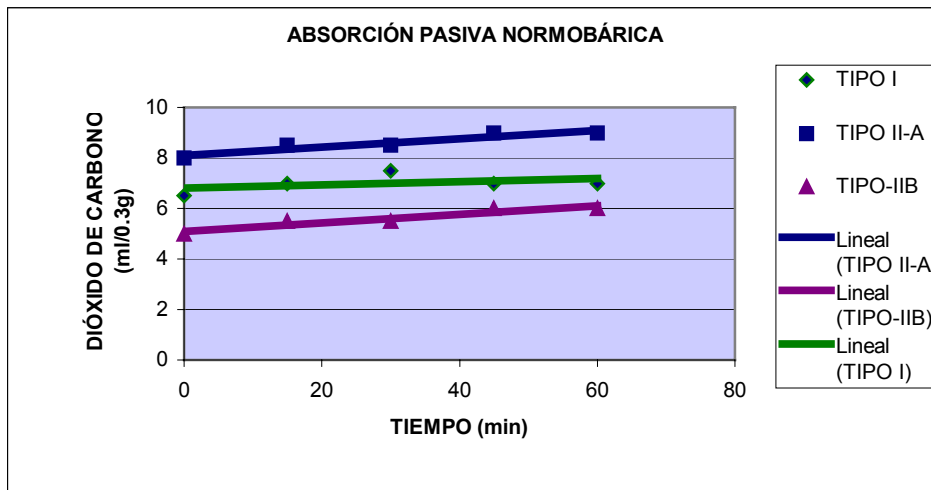


Ilustración 19. Representación gráfica. Absorción pasiva normobárica

En este caso la línea de tendencia correspondiente a los datos será de tipo lineal.

7.2.1.2 Simulador

Esta prueba, con sus parámetros correspondientes (captación pasiva, ambiente normobárico en simulador), no ha sido objeto de experimentación a lo largo de este proyecto. Sin embargo, sí fue tomada en cuenta en las pruebas realizadas un año antes.

7.2.2 Ambiente hiperbárico

7.2.2.1 Simulador

Esta serie de pruebas sigue dentro de las que se han considerado ventilación Pasiva. Para cada uno de los diferentes tipos de muestras y las presiones absolutas seleccionadas se anotan los valores máximos de cada una de las series. En esta ocasión se dispone de una doble medida correspondiente a la carbonatación máxima al final del tiempo de exposición. Tal y como se detalló en el Capítulo "Metodología", para cada uno de los absorbentes se estudian las presiones absolutas correspondientes a 2 bar, 2.5 bar y 3 bar; con un suministro constante de CO₂ durante 2 minutos.

Absorbente Tipo I. Pa = 2 bar

CARBONATACIÓN (ml)	
MINUTOS	V CO ₂
0	patrón
25	19
25	19,5

Tabla 9. Captación pasiva. Ambiente hiperbárico. Simulador. Carbonatación en función del tiempo del absorbente tipo I a P_a = 2 bar

Absorbente Tipo II-A. $P_a = 2$ bar

CARBONATACIÓN (ml)	
MINUTOS	V CO ₂
0	patrón
25	43,5
25	42

Tabla 10. Captación pasiva. Ambiente hiperbárico. Simulador. Carbonatación en función del tiempo del absorbente tipo II-A a $P_a = 2$ bar

Absorbente TIPO II-B. $P_a = 2$ bar

CARBONATACIÓN (ml)	
MINUTOS	V CO ₂
0	patrón
25	27,5
25	25

Tabla 11. Captación pasiva. Ambiente hiperbárico. Simulador. Carbonatación en función del tiempo del absorbente tipo II-B a $P_a = 2$ bar

Absorbente TIPO I. $P_a = 2,5$ bar

CARBONATACIÓN (ml)	
MINUTOS	V CO ₂
0	patrón
25	22,5
25	21,5

Tabla 12. Captación pasiva. Ambiente hiperbárico. Simulador. Carbonatación en función del tiempo del absorbente tipo I a $P_a = 2,5$ bar

Absorbente TIPO II-A. $P_a = 2,5$ bar

CARBONATACIÓN (ml)	
MINUTOS	V CO ₂
0	patrón
25	41,5
25	41,5

Tabla 13. Captación pasiva. Ambiente hiperbárico. Simulador. Carbonatación en función del tiempo del absorbente tipo II-A a $P_a = 2,5$ bar

Absorbente TIPO II-B. $P_a = 2,5$ bar

CARBONATACIÓN (ml)	
MINUTOS	V CO ₂
0	patrón
25	35
25	33,5

Tabla 14. Captación pasiva. Ambiente hiperbárico. Simulador. Carbonatación en función del tiempo del absorbente tipo II-B a $P_a = 2,5$ bar

Absorbente TIPO I. $P_a = 3$ bar

CARBONATACIÓN (ml)	
MINUTOS	V CO ₂
0	patrón
25	19
25	18

Tabla 15. Captación pasiva. Ambiente hiperbárico. Simulador. Carbonatación en función del tiempo del absorbente tipo I a $P_a = 3$ bar

Absorbente TIPO II-A. $P_a = 3$ bar

CARBONATACIÓN (ml)	
MINUTOS	V CO ₂
0	patrón
25	38,5
25	37

Tabla 16. Captación pasiva. Ambiente hiperbárico. Simulador. Carbonatación en función del tiempo del absorbente tipo II-A a $P_a = 3$ bar

Absorbente TIPO II-B. $P_a = 3$ bar

CARBONATACIÓN (ml)	
MINUTOS	V CO ₂
0	patrón
25	28
25	27

Tabla 17. Captación pasiva. Ambiente hiperbárico. Simulador. Carbonatación en función del tiempo del absorbente tipo II-B a $P_a = 3$ bar

Las series de datos anteriores se pueden resumir en una sola tabla:

CARBONATACIÓN (ml)				
MINUTOS	Pa.MCA	TIPO I	TIPO II-A	TIPO II-B
0	10	7,1	8,3	6,3
25	20	19,3	43	25,5
25	25	22,3	41,3	35
25	30	18,3	37,2	27,3

Tabla 18. Captación pasiva. Ambiente hiperbárico. Simulador. Carbonatación en función del tiempo de los absorbentes a distintas presiones absolutas

De forma gráfica,

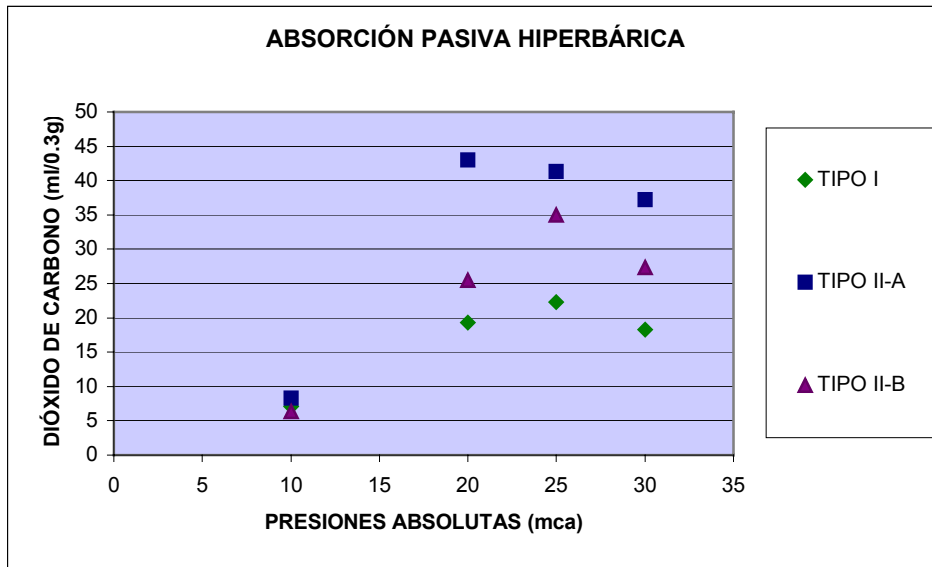


Ilustración 20. Representación puntual. Absorción pasiva hiperbárica

Añadiendo la línea de tendencia y la ecuación de la misma, tenemos:

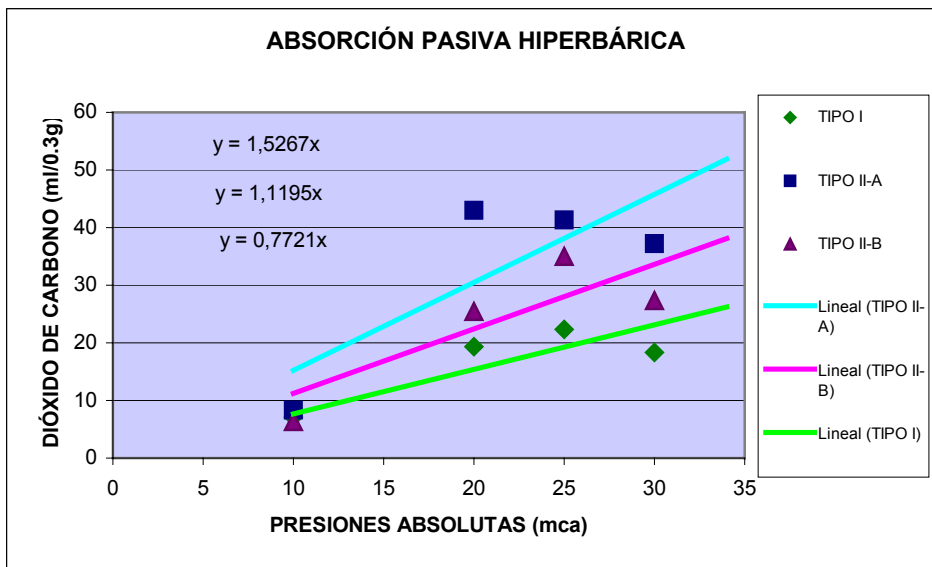


Ilustración 21. Representación gráfica. Absorción pasiva hiperbárica

7.3 Captación activa

7.3.1 Ambiente Normobárico

7.3.1.1 Ambiente

7.3.1.1.1 Bomba de vacío

Para cada uno de los absorbentes se tomaron datos del volumen de CO₂ desprendido en espacios de 15 minutos. Esta experiencia se realiza por medio de la bomba de vacío y se considera de captación activa, es decir, el flujo de ventilación se encuentra modificado. Con estas condiciones para cada uno de los absorbentes tenemos estos resultantes de la prueba de carbonatación:

Para cada uno de los tres tipos de absorbentes:

Para Tipo I		Para Tipo II-A		Para Tipo II-B	
MINUTOS	V CO ₂	MINUTOS	V CO ₂	MINUTOS	V CO ₂
0	6,5	0	8	0	5
15	7,5	15	9	15	6
30	8,5	30	11,5	30	7,5
45	9	45	12	45	8,5
60	9	60	10,5	60	8,5

Tabla 19. Captación activa. Ambiente normobárico. Ambiente. Carbonatación en función del tiempo de cada uno de los tres absorbentes. Bomba de vacío

Resumiendo los datos de los tres absorbentes para un rango temporal común:

MINUTOS	TIPO I	TIPO II-A	TIPO II-B
0	6,5	8	5
15	7,5	9	6
30	8,5	11,5	7,5
45	9	12	8,5
60	9	10,5	8,5

Tabla 20. Captación activa. Ambiente normobárico. Ambiente. Carbonatación para un rango temporal común de cada uno de los tres absorbentes. Bomba de vacío

De forma gráfica tenemos

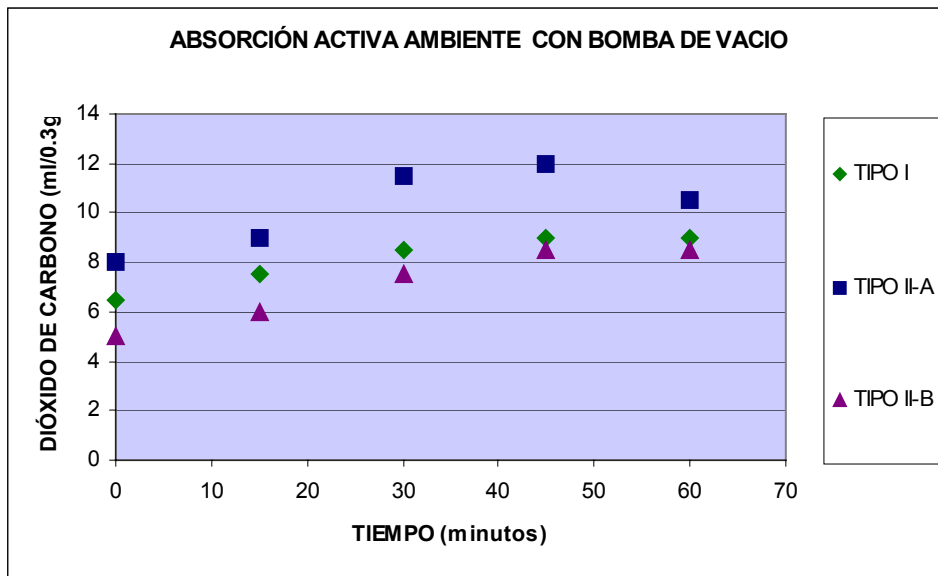


Ilustración 22. Representación puntual. Absorción activa ambiente con bomba de vacío

Añadiendo la línea de tendencia de los puntos

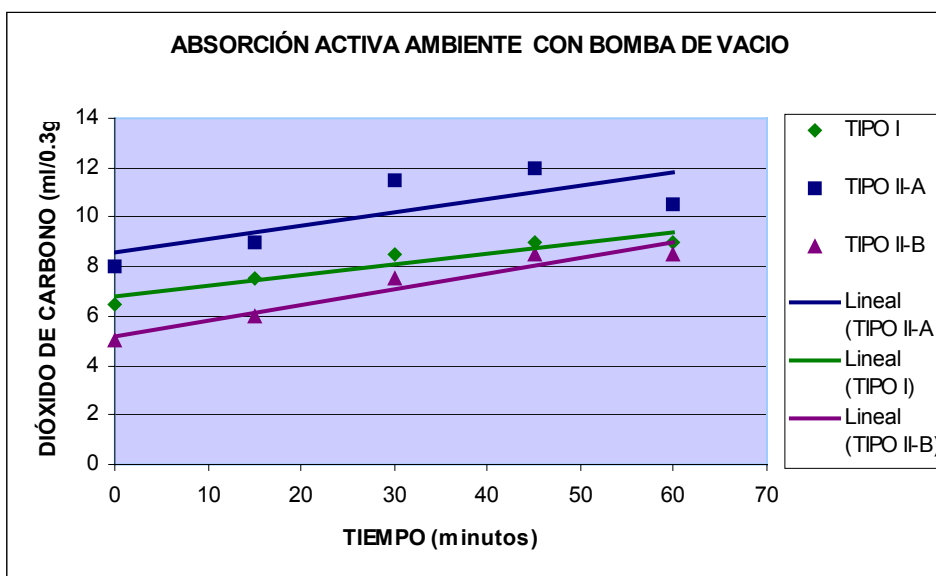


Ilustración 23. Representación gráfica. Absorción activa ambiente con bomba de vacío

7.3.1.1.2 Botella de CO₂

Incluyendo las series con y sin humedad

Con humedad

Recordamos que esta serie de pruebas se realiza mediante captación activa por medio de una botella de CO₂ (100%) y, en este caso, con humedad, tal y como se explicó en el capítulo anterior. Para un rango temporal común se tomaron dos medidas (Cal-A y Cal-B), como medio para asegurar la fiabilidad de los datos obtenidos; sin embargo, en presencia de humedad, sólo se dispone de los datos correspondientes al absorbente Tipo II-A. Los datos son:

Tipo II-A

MINUTOS	V CO ₂	V CO ₂
0	10	10
10	40	48
20	45	47,5
30	48,5	49
40	49,5	51,5

Tabla 21. Captación activa. Ambiente normobárico. Ambiente húmedo. Carbonatación en función del tiempo del absorbente tipo II-A. Botella CO₂

Sin humedad

El carácter experimental de esta serie de pruebas ha modificado los parámetros de su realización, es decir, se han tomado intervalos temporales de medida y tiempos máximos de exposición del absorbente distintos en cada una de las pruebas, este hecho puede dificultar una comparación total entre los datos obtenidos, sin embargo, aporta pautas de variación del volumen de CO₂ absorbido dependiendo de las condiciones de la prueba.

Tipo I

MINUTOS	V CO ₂	V CO ₂
0	6,5	6
5	45,5	52
10	51	53,5
20	58,5	55,5

MINUTOS	V CO ₂	V CO ₂
5	54	52
10	52	50,5
20	52	52
30	54,5	55

MINUTOS	V CO ₂	V CO ₂
5	43	46
10	50	52

MINUTOS	V CO ₂	V CO ₂
0	6	8
1	25,5	28,5
2	29	29
4	41	43
6	48,5	49
8	49,5	51
15	51,5	52

MINUTOS	V CO ₂	V CO ₂
0	6,5	6,5
1	25,5	24,5
2	29,5	30
3	38	37
5	45,5	42,5
10	50	51,5

MINUTOS	V CO ₂
0	6,5
1	26
2	36,5
4	45,5
8	50,5

Tabla 22. Captación activa. Ambiente normobárico. Ambiente sin humedad. Carbonatación en función del tiempo del absorbente tipo I. Botella CO₂

Tipo II-A

MINUTOS	V CO ₂	V CO ₂
10	45,5	47
20	46	44,5
30	47	42

MINUTOS	V CO ₂	V CO ₂
0	9	8
5	45	42
10	48	45
20	42,5	43,5
30	42	42,5
40	42	44

MINUTOS	V CO ₂	V CO ₂
5	49	47
10	48,5	48,5
20	48	48
30	48	49,5

MINUTOS	V CO ₂	V CO ₂
0	9,5	8
1	35	35,5
2	39,5	41
4	44	47
6	45,5	46,5
8	44	44
10	46,5	48,5

MINUTOS	V CO ₂	V CO ₂
0	8,5	7
1	31	28,5
2	41	40,5
3	40	42
5	44	46,5
10	50	48,5

Tabla 23. Captación activa. Ambiente normobárico. Ambiente sin humedad. Carbonatación en función del tiempo del absorbente tipo II-A. Botella CO₂

Tipo II-B

MINUTOS	V CO ₂	V CO ₂
0	8	7
1	28,5	30
2	32,5	32
3	43	44
5	43,5	44,5
10	43	44

MINUTOS	V CO ₂	V CO ₂
0	5,5	7
1	26,5	30
2	25	27
4	32,5	34
8	39	38,5

MINUTOS	V CO ₂	V CO ₂
0	5,5	5
0,5	23,5	25
1	28,5	30
2	24	23
4	40	39
8	42,5	45
10	36,5	37

MINUTOS	V CO ₂	V CO ₂
0	5,5	5,5
0,5	15,5	15
1	25,5	26
2	28	31
4	40,5	39,5
8	42,5	42,5
10	41,5	44

Tabla 24. Captación activa. Ambiente normobárico. Ambiente sin humedad. Carbonatación en función del tiempo del absorbente tipo II-B. Botella CO₂

Tomando datos comparables de cada una de las series (sin humedad) tenemos:

Serie A-I

MINUTOS	TIPO I	TIPO II-A	TIPO II-B
0	6	9,5	5,5
0,5	-	-	23,5
1	25,5	35	28,5
2	29	39,5	24
4	41	44	40
6	48,5	45,5	41
8	49,5	44	42,5
10	51,5	46,5	36,5

Tabla 25. Captación activa. Ambiente normobárico. Ambiente sin humedad. Comparación de la carbonatación en función del tiempo de los absorbentes (serie A-I). Botella CO₂

Gráficamente:

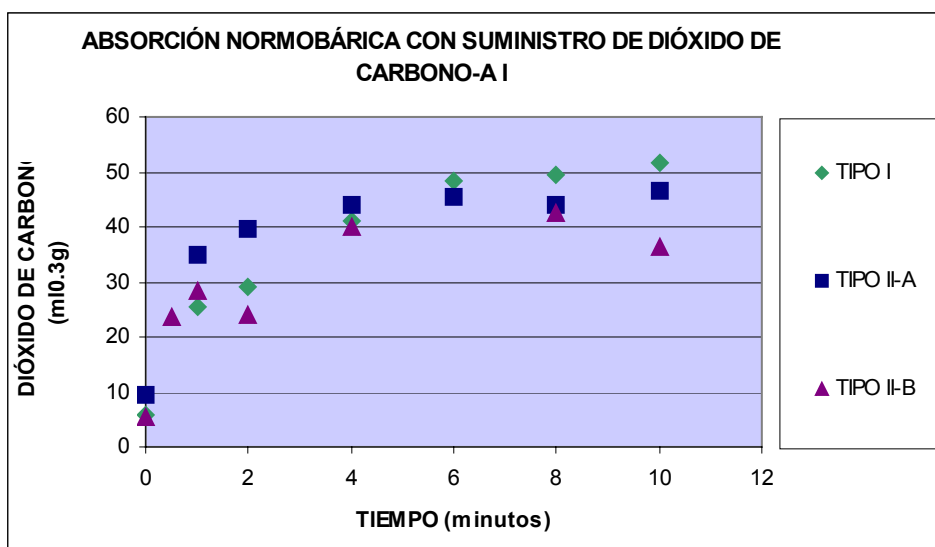


Ilustración 24. Representación puntual. Absorción normobárica con suministro de CO₂ (serie A-I)

Tomando datos del resto de series nos queda la siguiente tabla de datos:

Serie A-II

MINUTOS	TIPO I	TIPO II-A	TIPO II-B
0	8	8	5
0,5	-	-	25
1	28,5	35,5	30
2	29	41	23
4	43	47	39
6	49	46,5	43
8	51	44	45
10	52	48,5	37

Tabla 26. Captación activa. Ambiente normobárico. Ambiente sin humedad. Comparación de la carbonatación en función del tiempo de los absorbentes (serie A-II). Botella CO₂

Gráficamente:

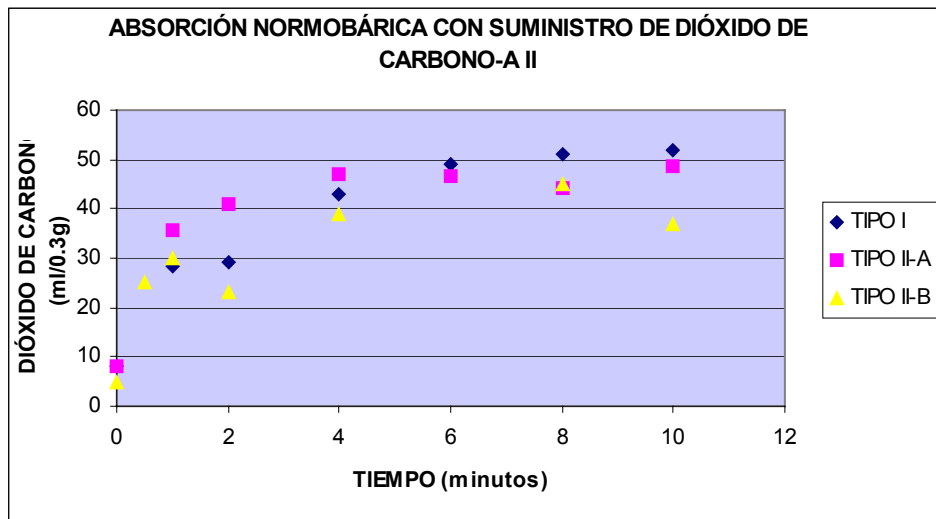


Ilustración 25. Representación puntual. Absorción normobárica con suministro de CO₂ (serie A-II)

Juntando las dos tablas anteriores con los valores de cada absorbente duplicados tenemos:

Series A y B

MINUTOS	TIPO I	TIPO I	TIPO II-A	TIPO II-A	TIPO II-B	TIPO II-B
0	6	8	9,5	8	5,5	5
0,5	-	-	-	-	23,5	25
1	25,5	28,5	35	35,5	28,5	30
2	29	29	39,5	41	24	23
4	41	43	44	47	40	39
6	48,5	49	45,5	46,5		
8	49,5	51	44	44	42,5	45
10	51,5	52	46,5	48,5	36,5	37

Tabla 27. Captación activa. Ambiente normobárico. Ambiente sin humedad. Carbonatación en función del tiempo de los absorbentes de ambas series. Botella CO₂

A estas series les corresponden las siguientes representaciones:

Series A y B

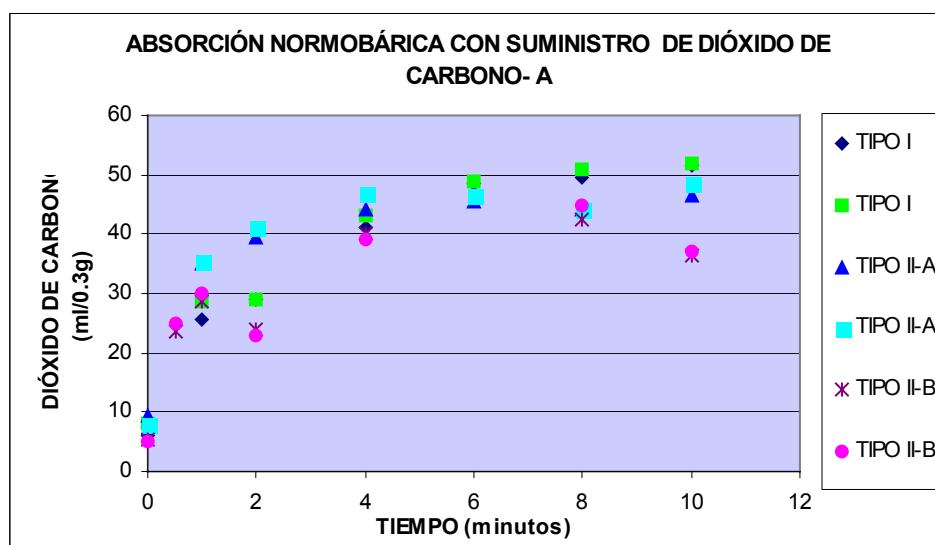


Ilustración 26. Representación puntual. Absorción normobárica con suministro de CO₂. Serie A

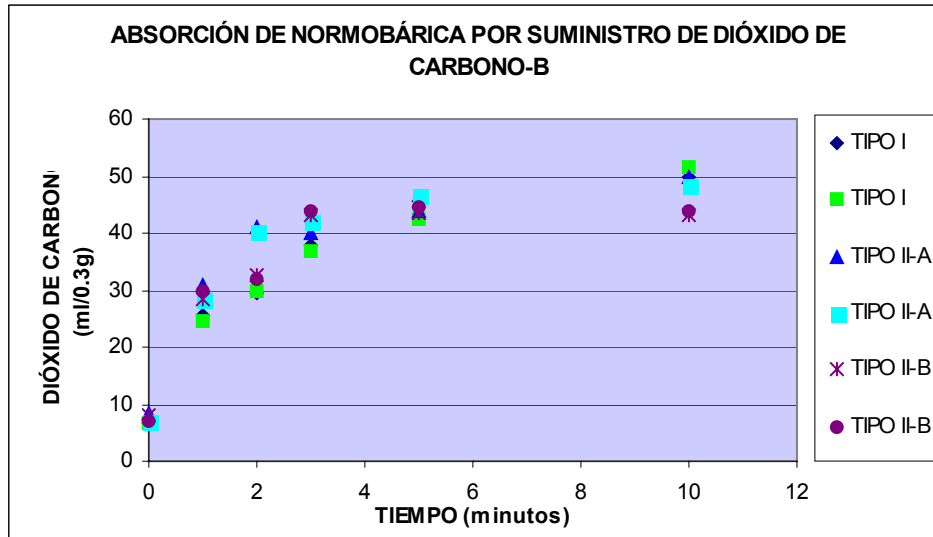


Ilustración 27. Representación puntual. Absorción normobárica con suministro de CO₂. Serie B

Pruebas separadas por absorbente:

TIPO I				
TIEMPO (mins)	I	II	III	IV
0	6	8	6,5	6,5
1	25,5	28,5	25,5	24,5
2	29	29	29,5	30
3	-	-	38	37
4	41	43	-	-
5	-	-	45,5	42,5
6	48,5	49	-	-
8	49,5	51	-	-
10	51,5	52	50	51,5

Tabla 28. Captación activa. Ambiente normobárico. Ambiente sin humedad. Carbonatación en función del tiempo. Prueba por separado absorbente tipo I. Botella CO₂

De forma gráfica:

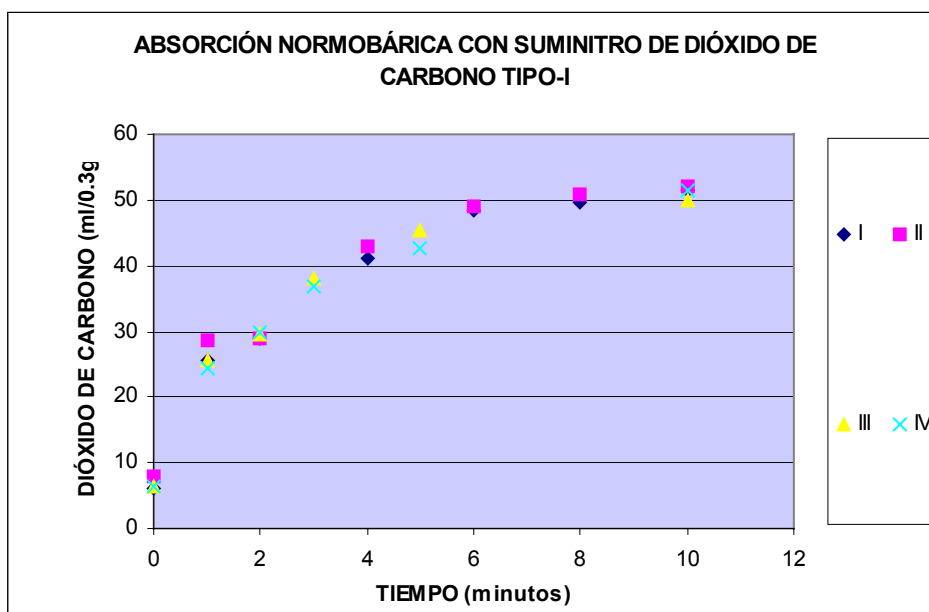


Ilustración 28. Representación puntual. Absorción normobárica con suministro de CO₂. Absorbente tipo I

Para II-A

TIPO II-A				
TIEMPO (mins)	I	II	III	IV
0	9,5	8	8,5	7
1	35	35,5	31	28,5
2	39,5	41	41	40,5
3	-	-	40	42
4	44	47	-	-
5		-	44	46,5
6	45,5	46,5	-	-
8	44	44	-	-
10	46,5	48,5	50	48,5

Tabla 29. Captación activa. Ambiente normobárico. Ambiente sin humedad. Carbonatación en función del tiempo. Prueba por separado absorbente tipo II-A. Botella CO₂

De forma gráfica

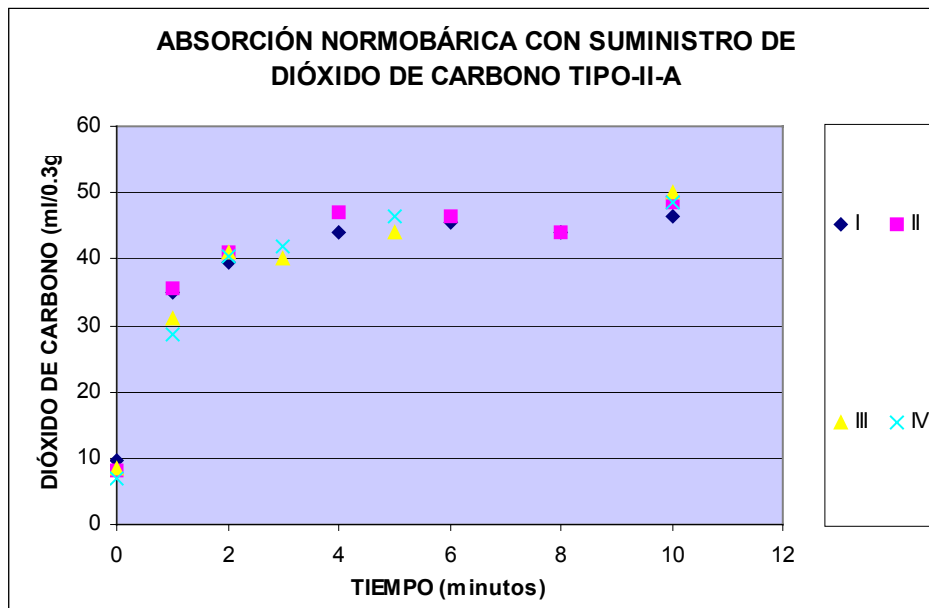


Ilustración 29. Representación puntual. Absorción normobárica con suministro de CO₂. Absorbente tipo II-A

Para II-B

TIPO II-B				
TIEMPO (mins)	I	II	III	IV
0	5,5	5	8	7
0,5	23,5	25		
1	28,5	30	28,5	30
2	24	23	32,5	32
3			43	44
4	40	39		
5			43,5	44,5
6				
8	42,5	45		
10	36,5	37	43	44

Tabla 30. Captación activa. Ambiente normobárico. Ambiente sin humedad. Carbonatación en función del tiempo. Prueba por separado absorbente tipo II-B. Botella CO₂

De forma gráfica

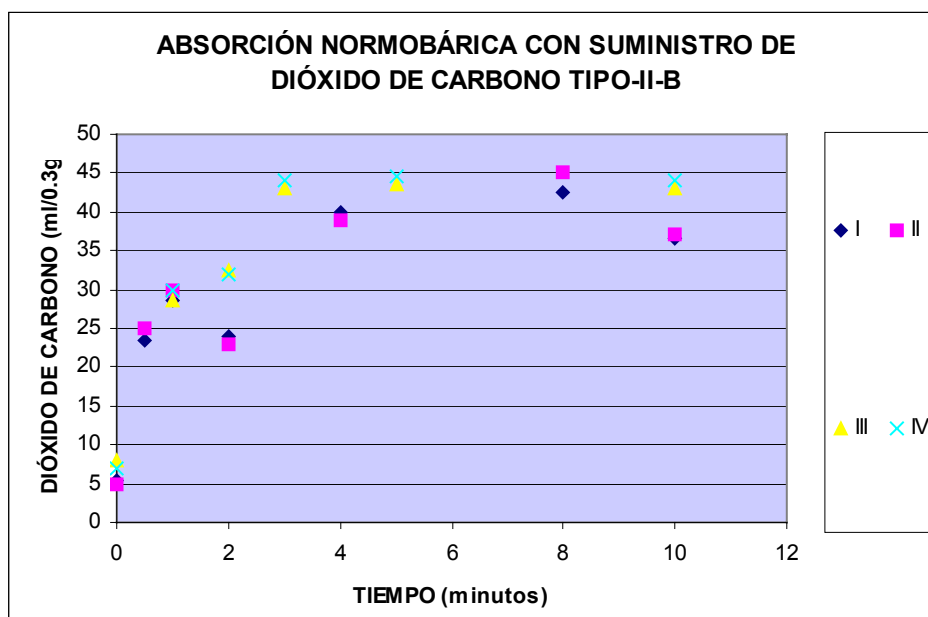


Ilustración 30. Representación puntual. Absorción normobárica con suministro de CO₂. Absorbente tipo II-B

Tomando un nuevo muestreo de datos

TIEMPO	Tipo II-A		Tipo I	
	V CO ₂	V CO ₂	V CO ₂	V CO ₂
0	9	8	-	-
5	45	42	54	52
10	48	45	52	50,5
20	42,5	43,5	52	52
30	42	42,5	54,5	55

Tabla 31. Captación activa. Ambiente normobárico. Ambiente sin humedad. Carbonatación en función del tiempo. Prueba por separado absorbente tipo II-A y tipo I. Botella CO₂

Gráficamente:

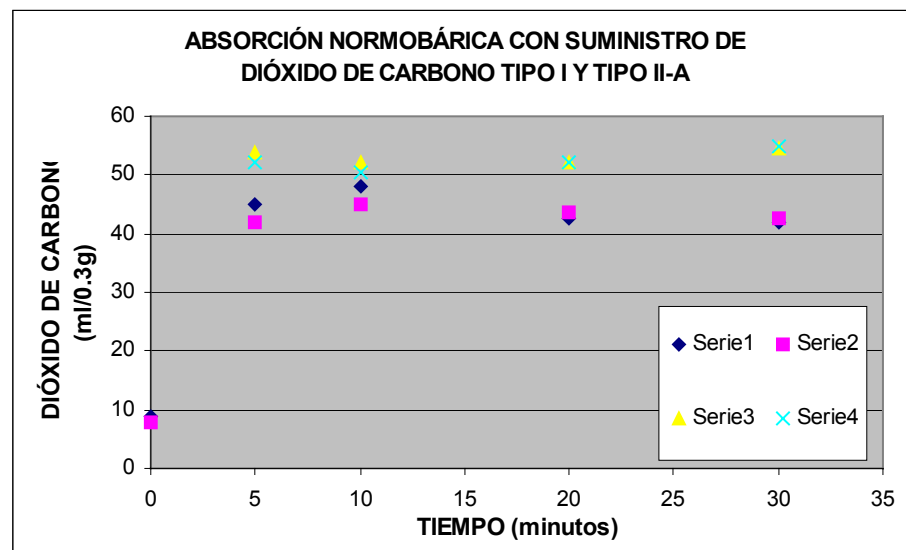


Ilustración 31. Representación puntual. Absorción normobárica con suministro de CO₂. Absorbente tipo I y tipo II-A

7.3.2 Circuito abierto con bomba de vacío

7.3.2.1 Simulador

Absorbente Tipo I con 9% CO₂

MINUTOS	V CO ₂
0	6,5
32	7,5
69	8

Tabla 32. Captación activa. Circuito abierto con bomba de vacío. Simulador. Carbonatación absorbente tipo I con 9 % CO₂

Absorbente Tipo I con 5% CO₂

MINUTOS	V CO ₂	MINUTOS	V CO ₂	MINUTOS	V CO ₂
0	6,5	0	6,5	0	6,5
24	12	18	10,5	22	21

Tabla 33. Captación activa. Circuito abierto con bomba de vacío. Simulador. Carbonatación absorbente tipo I con 5 % CO₂

Absorbente Tipo I con 4% CO₂

MINUTOS	V CO ₂
0	6,5
16	15,5

Tabla 34. Captación activa. Circuito abierto con bomba de vacío. Simulador. Carbonatación absorbente tipo I con 4 % CO₂

Absorbente Tipo I con 3% CO₂

MINUTOS	V CO ₂
0	6,5
14	20

Tabla 35. Captación activa. Circuito abierto con bomba de vacío. Simulador. Carbonatación absorbente tipo I con 3 % CO₂

Absorbente Tipo I con 1,5% CO₂

MINUTOS	V CO ₂
0	6,5
18	12

Tabla 36. Captación activa. Circuito abierto con bomba de vacío. Simulador. Carbonatación absorbente tipo I con 1,5 % CO₂

Absorbente Tipo II-A con 5% CO₂

MINUTOS	V CO ₂	MINUTOS	V CO ₂	MINUTOS	V CO ₂
0	8	0	8	0	8
32	11	19	10	21	17

Tabla 37. Captación activa. Circuito abierto con bomba de vacío. Simulador. Carbonatación absorbente tipo II-A con 5 % CO₂

Absorbente Tipo II-A con 4% CO₂

MINUTOS	V CO ₂
0	8
21	19,5

MINUTOS	V CO ₂
0	8
18	17,5

Tabla 38. Captación activa. Circuito abierto con bomba de vacío. Simulador. Carbonatación absorbente tipo II-A con 4 % CO₂

Absorbente Tipo II-A con 3% CO₂

MINUTOS	V CO ₂
0	8
18	17,5

Tabla 39. Captación activa. Circuito abierto con bomba de vacío. Simulador. Carbonatación absorbente tipo I con 9 % CO₂

Absorbente Tipo II-A con 1,5% CO₂

MINUTOS	V CO ₂
0	8
7	18,5

Tabla 40. Captación activa. Circuito abierto con bomba de vacío. Simulador. Carbonatación absorbente tipo II-A con 1,5 % CO₂

Absorbente Tipo II-B con 5% CO₂

MINUTOS	V CO ₂	MINUTOS	V CO ₂	MINUTOS	V CO ₂
0	5	5	8	0	5
34	8,5	15	12	24	17,5

Tabla 41. Captación activa. Circuito abierto con bomba de vacío. Simulador. Carbonatación absorbente tipo II-B con 5 % CO₂

Absorbente Tipo II-B con 4% CO₂

MINUTOS	V CO ₂
0	5
17	15,5

Tabla 42. Captación activa. Circuito abierto con bomba de vacío. Simulador. Carbonatación absorbente tipo II-B con 4 % CO₂

Absorbente Tipo II-B con 3% CO₂

MINUTOS	V CO ₂
0	5
15	11

Tabla 43. Captación activa. Circuito abierto con bomba de vacío. Simulador. Carbonatación absorbente tipo II-B con 3 % CO₂

Absorbente Tipo II-B con 1,5% CO₂

MINUTOS	V CO ₂
0	5
25	35

Tabla 44. Captación activa. Circuito abierto con bomba de vacío. Simulador. Carbonatación absorbente tipo II-B con 1,5 % CO₂

Agrupando las pruebas por tipo de absorbente y porcentajes de CO₂ tenemos:

Absorbente Tipo I con 5% CO₂

TIEMPO	V CO ₂	V CO ₂	V CO ₂
0	6,5	6,5	6,5
18	-	10,5	-
22	-	-	21
24	12	-	-

Tabla 45. Captación activa. Circuito abierto con bomba de vacío. Simulador. Carbonatación absorbente tipo I con 5 % CO₂

Gráficamente

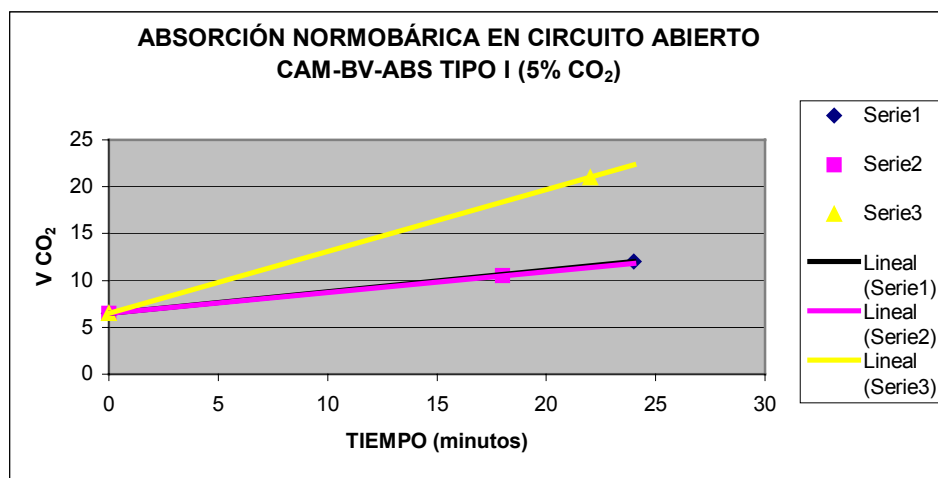


Ilustración 32. Representación gráfica. Absorción normobárica, circuito abierto en simulador con bomba de vacío. Absorbente tipo I con 5 % CO₂

Absorbente Tipo II-A con 5% CO₂

TIEMPO	V CO ₂	V CO ₂	V CO ₂
0	8	8	8
19	-	10	-
21	-	-	17
32	11	-	-

Tabla 46. Captación activa. Circuito abierto con bomba de vacío. Simulador. Carbonatación absorbente tipo II-A con 5 % CO₂

Gráficamente

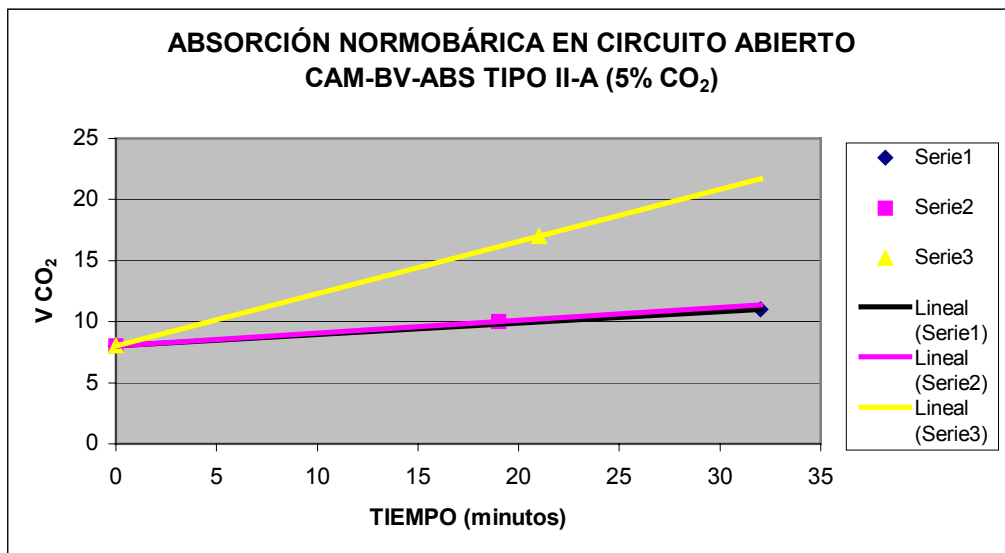


Ilustración 33. Representación gráfica. Absorción normobárica, circuito abierto en simulador con bomba de vacío. Absorbente tipo II-A con 5 % CO₂

Absorbente Tipo II-B con 5% CO₂

TIEMPO	V CO ₂	V CO ₂	V CO ₂
0	5	-	5
5	-	8	-
15	-	12	-
24	-	-	17,5
34	8,5	-	-

Tabla 47. Captación activa. Circuito abierto con bomba de vacío. Simulador. Carbonatación absorbente tipo II-B con 5 % CO₂

Gráficamente

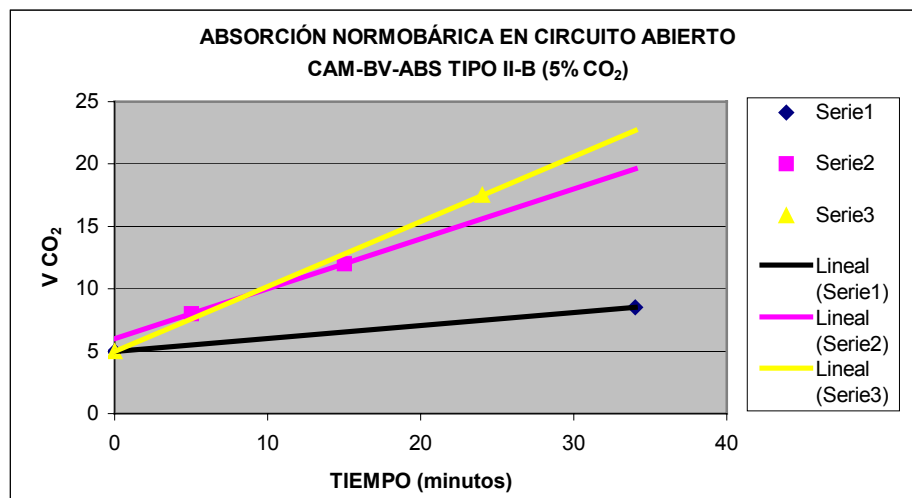


Ilustración 34. Representación gráfica. Absorción normobárica, circuito abierto en simulador con bomba de vacío. Absorbente tipo II-B con 5 % CO₂

Para 4%, 3% y 1,5% comparamos los resultados en cada uno de los absorbentes:

En caso de 4% CO₂

4% CO ₂	TIPO I	TIPO II-A	TIPO II-B
TIEMPO	V CO ₂	V CO ₂	V CO ₂
0	6,5	8	5
16	15,5	-	-
17	-	-	15,5
21	-	19,5	-

Tabla 48. Captación activa. Circuito abierto con bomba de vacío. Simulador. Carbonatación de los tres tipos de absorbentes con 4 % CO₂

Gráficamente

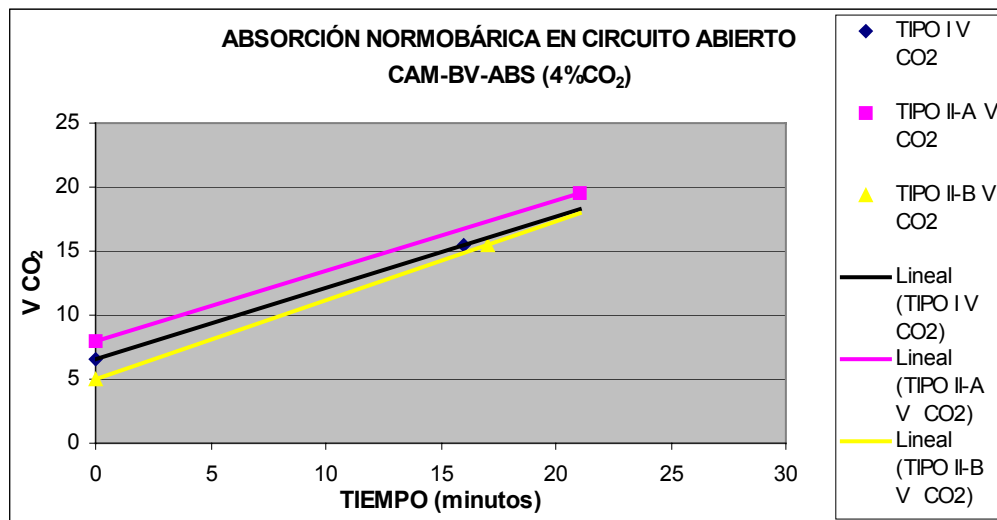


Ilustración 35. Representación gráfica. Absorción normobárica, circuito abierto en simulador con bomba de vacío. Absorbente tipo I, II-A y II-B con 4 % CO₂

En el caso de 3% CO₂

3% CO ₂	TIPO I	TIPO II-A	TIPO II-B
TIEMPO	V CO ₂	V CO ₂	V CO ₂
0	6,5	8	5
14	20	-	-
15	-	-	11
18	-	17,5	-

Tabla 49. Captación activa. Circuito abierto con bomba de vacío. Simulador. Carbonatación de los tres tipos de absorbentes con 3 % CO₂

Gráficamente

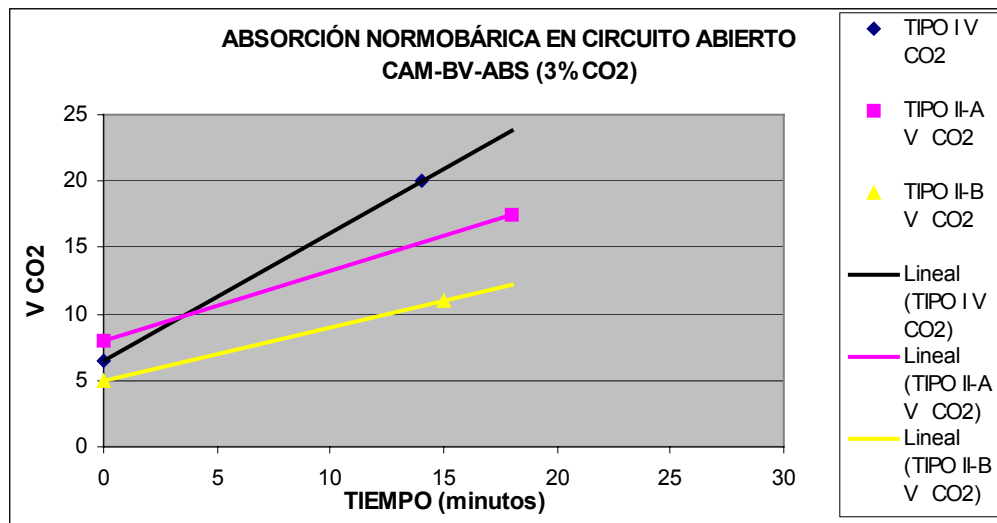


Ilustración 36. Representación gráfica. Absorción normobárica, circuito abierto en simulador con bomba de vacío. Absorbente tipo I, II-A y II-B con 3 % CO₂

Finalmente, para 1,5% CO₂

1,5% CO ₂	TIPO I	TIPO II-A	TIPO II-B
TIEMPO	V CO ₂	V CO ₂	V CO ₂
0	6,5	8	5
7	-	18,5	-
18	12	-	-
25	-	-	35

Tabla 50. Captación activa. Circuito abierto con bomba de vacío. Simulador. Carbonatación de los tres tipos de absorbentes con 1,5 % CO₂

Gráficamente

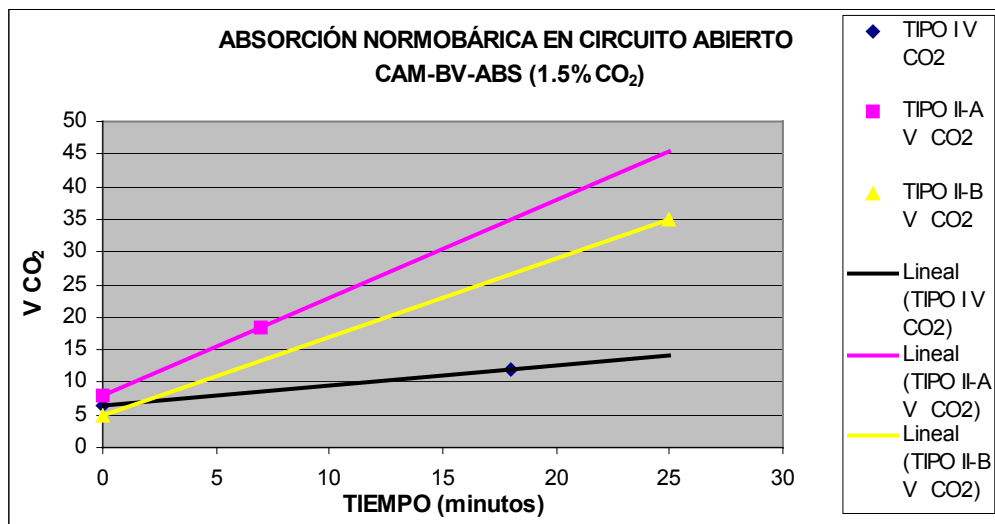


Ilustración 37. Representación gráfica. Absorción normobárica, circuito abierto en simulador con bomba de vacío. Absorbente tipo I, II-A y II-B con 1,5 % CO₂

Por último, se exponen los datos correspondientes a cada uno de los absorbentes, mostrando su evolución respecto al tiempo para los porcentajes de CO₂ estudiados:

Así, para el absorbente Tipo I tenemos:

TIPO I	5% CO ₂	4% CO ₂	3% CO ₂	1,5% CO ₂
TIEMPO	V CO ₂	V CO ₂	V CO ₂	V CO ₂
0	6,5	6,5	6,5	6,5
14	-	-	20	-
16	-	15,5	-	-
18	10,5	-	-	12

Tabla 51. Captación activa. Circuito abierto con bomba de vacío. Simulador. Carbonatación del absorbente tipo I para cada porcentaje de CO₂

De forma gráfica:

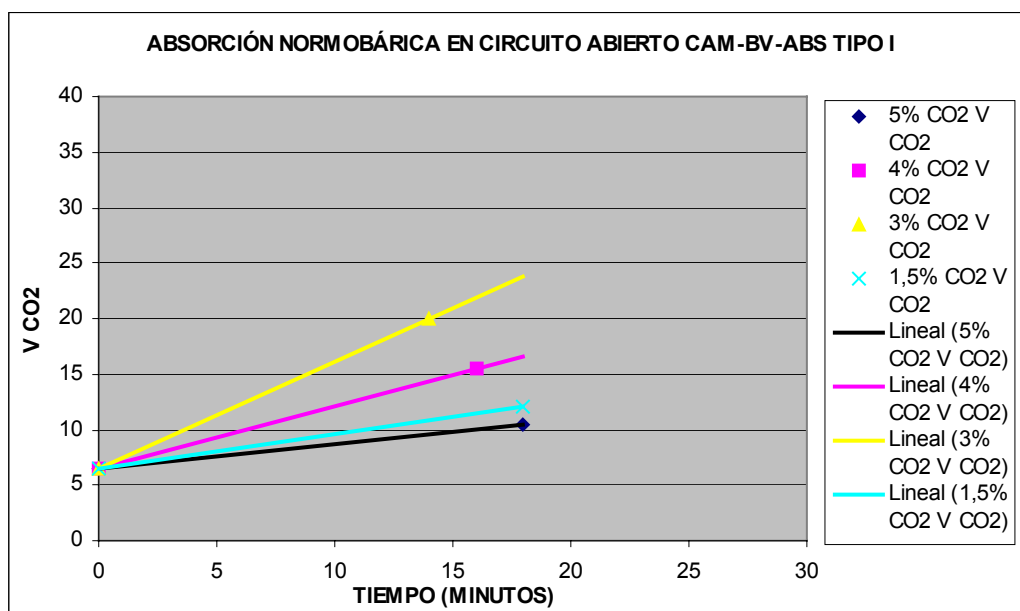


Ilustración 38. Representación gráfica. Absorción normobárica, circuito abierto en simulador con bomba de vacío. Absorbente tipo I para cada uno de los porcentajes de CO₂

Para el absorbente Tipo II-A

TIPO II-A	5% CO ₂	4% CO ₂	3% CO ₂	1,5% CO ₂
TIEMPO	V CO ₂	V CO ₂	V CO ₂	V CO ₂
0	8	8	8	8
7	-	-	-	18,5
18	-	-	17,5	-
21	17	19,5	-	-

Tabla 52. Captación activa. Circuito abierto con bomba de vacío. Simulador. Carbonatación del absorbente tipo II-A para cada porcentaje de CO₂

De forma gráfica:

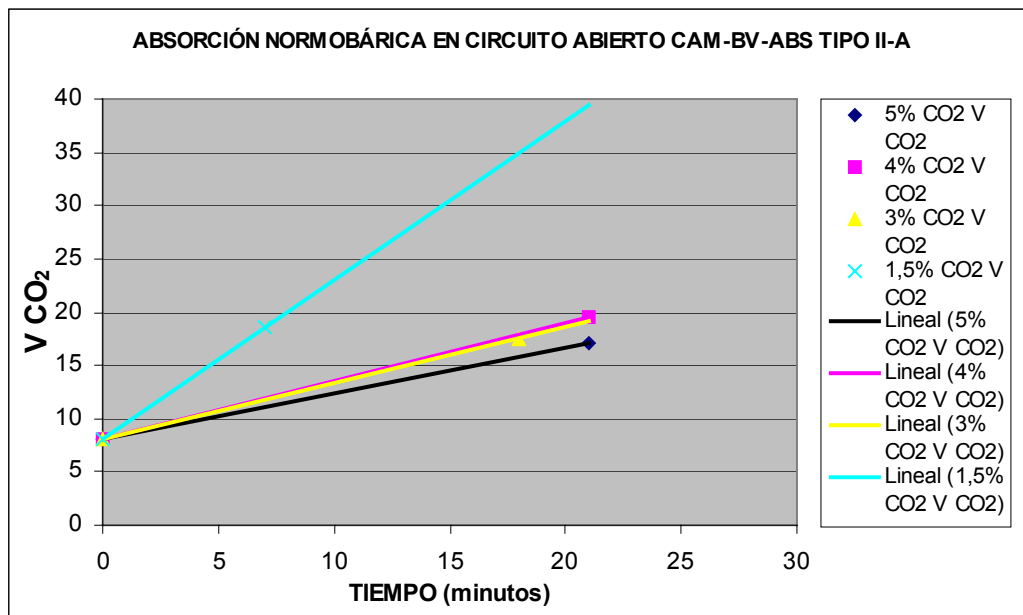


Ilustración 39. Representación gráfica. Absorción normobárica, circuito abierto en simulador con bomba de vacío. Absorbente tipo II-A para cada uno de los porcentajes de CO₂

Para el absorbente Tipo II-B

TIPO II-B	5% CO ₂	4% CO ₂	3% CO ₂	1,5% CO ₂
TIEMPO	V CO ₂	V CO ₂	V CO ₂	V CO ₂
0	5	5	5	5
15	-	-	11	-
17	-	15,5	-	-
24	17,5	-	-	-
25	-	-	-	35

Tabla 53. Captación activa. Circuito abierto con bomba de vacío. Simulador. Carbonatación del absorbente tipo II-B para cada porcentaje de CO₂

De forma gráfica:

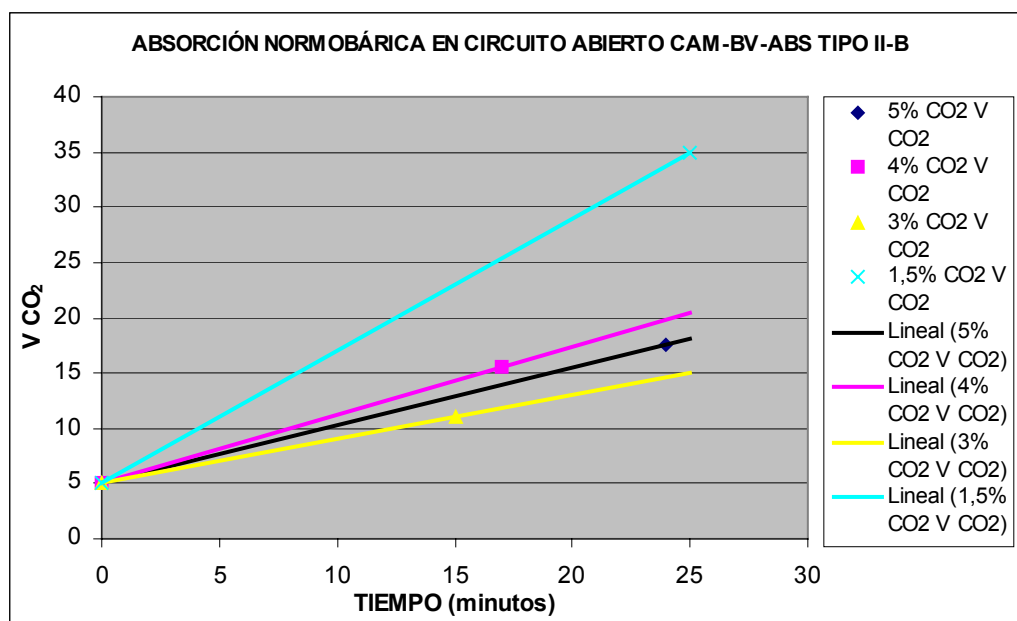


Ilustración 40. Representación gráfica. Absorción normobárica, circuito abierto en simulador con bomba de vacío. Absorbente tipo II-B para cada uno de los porcentajes de CO₂

7.3.3 Ambiente hiperbárico

7.3.3.1 Simulador

7.3.3.1.1 Circuito abierto con compresor

Presión Absoluta de 1 bar

Para el absorbente Tipo I con 4,5% CO₂

MINUTOS	V CO ₂
0	7
45	18

MINUTOS	V CO ₂
0	5
45	16,5

Tabla 54. Captación activa. Ambiente hiperbárico. Simulador. Carbonatación circuito abierto con compresor a $P_a = 1$ bar del absorbente tipo I con 4,5 % CO₂

Para el absorbente Tipo II-A con 4,5% CO₂

MINUTOS	V CO ₂
0	8
71	20

MINUTOS	V CO ₂
0	8
71	23

Tabla 55. Captación activa. Ambiente hiperbárico. Simulador. Carbonatación circuito abierto con compresor a $P_a = 1$ bar del absorbente tipo II-A con 4,5 % CO₂

Para el absorbente Tipo II-B con 4,5% CO₂

MINUTOS	V CO ₂
0	5
79	25

MINUTOS	V CO ₂
0	5
79	27

Tabla 56. Captación activa. Ambiente hiperbárico. Simulador. Carbonatación circuito abierto con compresor a $P_a = 1$ bar del absorbente tipo II-B con 4,5 % CO₂

Para el absorbente Tipo I con 3% CO₂

MINUTOS	V CO ₂
0	7
83	18,5

MINUTOS	V CO ₂
0	5
83	20,5

Tabla 57. Captación activa. Ambiente hiperbárico. Simulador. Carbonatación circuito abierto con compresor a $P_a = 1$ bar del absorbente tipo I con 3 % CO₂

Para el absorbente Tipo II-A con 3% CO₂

MINUTOS	V CO ₂
0	8
82	23

MINUTOS	V CO ₂
0	8
82	23

Tabla 58. Captación activa. Ambiente hiperbárico. Simulador. Carbonatación circuito abierto con compresor a $P_a = 1$ bar del absorbente tipo II-A con 3 % CO₂

Para el absorbente Tipo II-B con 3% CO₂

MINUTOS	V CO ₂
0	5
62	25,5

MINUTOS	V CO ₂
0	5
62	22,5

Tabla 59. Captación activa. Ambiente hiperbárico. Simulador. Carbonatación circuito abierto con compresor a $P_a = 1$ bar del absorbente tipo II-B con 3 % CO₂

Para el absorbente Tipo I con 1,5% CO₂

MINUTOS	V CO ₂
0	7
41	17

MINUTOS	V CO ₂
0	5
45	15

Tabla 60. Captación activa. Ambiente hiperbárico. Simulador. Carbonatación circuito abierto con compresor a $P_a = 1$ bar del absorbente tipo I con 1,5 % CO₂

Para el absorbente Tipo II-A con 1,5% CO₂

MINUTOS	V CO ₂
0	8
44	11,5

MINUTOS	V CO ₂
0	8
44	13,5

Tabla 61. Captación activa. Ambiente hiperbárico. Simulador. Carbonatación circuito abierto con compresor a $P_a = 1$ bar del absorbente tipo II-A con 1,5 % CO₂

Para el absorbente Tipo II-B con 1,5% CO₂

MINUTOS	V CO ₂
0	5
58	17

MINUTOS	V CO ₂
0	5
58	16,5

Tabla 62. Captación activa. Ambiente hiperbárico. Simulador. Carbonatación circuito abierto con compresor a $P_a = 1$ bar del absorbente tipo II-B con 1,5 % CO₂

Presión Absoluta de 1,5 bar

Para el absorbente Tipo I con 3% CO₂

MINUTOS	V CO ₂	MINUTOS	V CO ₂	MINUTOS	V CO ₂
0	7	0	5	0	8
83	18,5	83	20,5	82	23

Tabla 63. Captación activa. Ambiente hiperbárico. Simulador. Carbonatación circuito abierto con compresor a $P_a = 1,5$ bar del absorbente tipo I con 3 % CO₂

Para el absorbente Tipo II-A con 3% CO₂

MINUTOS	V CO ₂
0	8
82	23

Tabla 64. Captación activa. Ambiente hiperbárico. Simulador. Carbonatación circuito abierto con compresor a $P_a = 1,5$ bar del absorbente tipo II-A con 3 % CO₂

Para el absorbente Tipo II-B con 3% CO₂

MINUTOS	V CO ₂
0	5
62	25,5

MINUTOS	V CO ₂
0	5
62	22,5

Tabla 65. Captación activa. Ambiente hiperbárico. Simulador. Carbonatación circuito abierto con compresor a $P_a = 1,5$ bar del absorbente tipo II-B con 3 % CO₂

Para el absorbente Tipo I con 1,5% CO₂

MINUTOS	V CO ₂
0	7
59	15

MINUTOS	V CO ₂
0	5
59	16,5

Tabla 66. Captación activa. Ambiente hiperbárico. Simulador. Carbonatación circuito abierto con compresor a $P_a = 1,5$ bar del absorbente tipo I con 1,5 % CO₂

Para el absorbente Tipo II-A con 1,5% CO₂

MINUTOS	V CO ₂
0	8
40	18,5

MINUTOS	V CO ₂
0	8
40	19,5

Tabla 67. Captación activa. Ambiente hiperbárico. Simulador. Carbonatación circuito abierto con compresor a P_a = 1,5 bar del absorbente tipo II-A con 1,5 % CO₂

Para el absorbente Tipo II-B con 1,5% CO₂

MINUTOS	V CO ₂
0	5
49	18,5

MINUTOS	V CO ₂
0	5
49	19,5

Tabla 68. Captación activa. Ambiente hiperbárico. Simulador. Carbonatación circuito abierto con compresor a P_a = 1,5 bar del absorbente tipo II-B con 1,5 % CO₂

Vamos a agrupar algunas de las pruebas con tal de clarificar los resultados. Debemos recordar que estamos trabajando en condiciones Hiperbáricas.

Los resultados para **P_a = 1 bar** son los siguientes:

Para Tipo I con 4,5% CO₂

TIPO I (1 BAR)		
TIEMPO	V CO ₂	V CO ₂
0	7	5
45	18	16,5

Tabla 69. Captación activa. Ambiente hiperbárico. Simulador. Carbonatación circuito abierto con compresor a P_a = 1 bar del absorbente tipo I con 4,5 % CO₂

Gráficamente

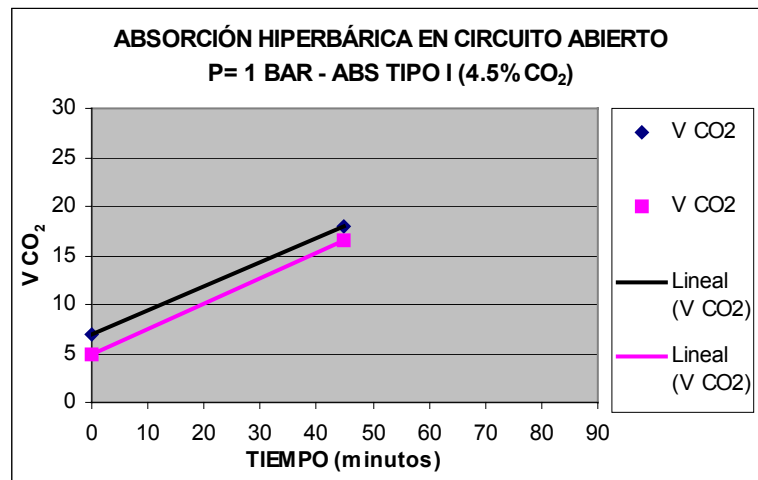


Ilustración 41. Representación gráfica. Absorción hiperbárica en circuito abierto a $P_a = 1$ bar del absorbente tipo I con 4,5 % CO₂

Para Tipo II-A con 4,5% CO₂

TIPO II-A (1 bar)		
TIEMPO	V CO ₂	V CO ₂
0	8	8
71	20	23

Tabla 70. Captación activa. Ambiente hiperbárico. Simulador. Carbonatación circuito abierto con compresor a $P_a = 1$ bar del absorbente tipo II-A con 4,5 % CO₂

Gráficamente

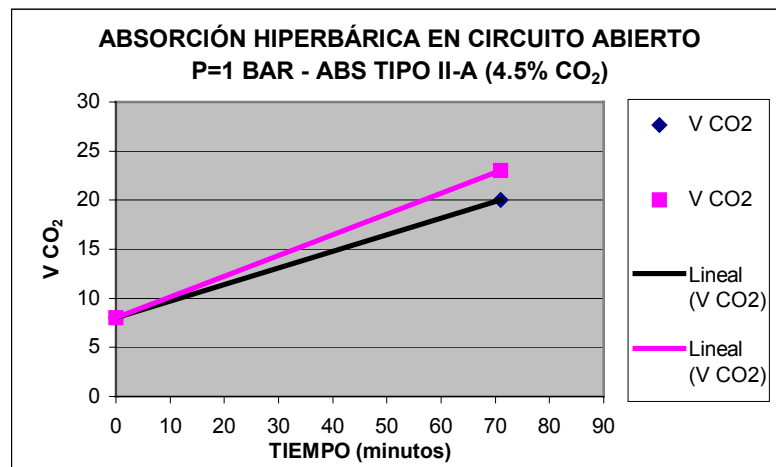


Ilustración 42. Representación gráfica. Absorción hiperbárica en circuito abierto a $P_a = 1$ bar del absorbente tipo II-A con 4,5 % CO₂

Para Tipo II-B con 4,5% CO₂

TIPO II-B (1 bar)		
TIEMPO	V CO ₂	V CO ₂
0	5	5
79	25	27

Tabla 71. Captación activa. Ambiente hiperbárico. Simulador. Carbonatación circuito abierto con compresor a $P_a = 1$ bar del absorbente tipo II-B con 4,5 % CO₂

Gráficamente

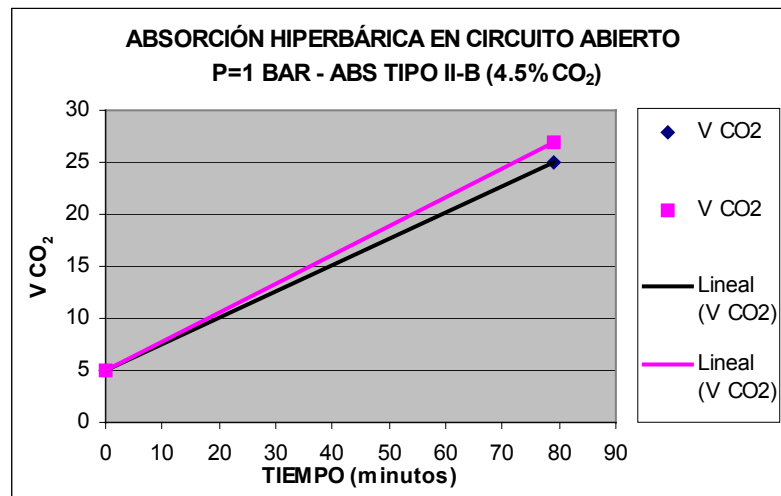


Ilustración 43. Representación gráfica. Absorción hiperbárica en circuito abierto a $P_a = 1$ bar del absorbente tipo I con 4,5 % CO₂

Para Tipo I con 1,5% CO₂

TIPO I (1 bar)		
TIEMPO	V CO ₂	V CO ₂
0	7	5
41	17	-
45	-	15

Tabla 72. Captación activa. Ambiente hiperbárico. Simulador. Carbonatación circuito abierto con compresor a $P_a = 1$ bar del absorbente tipo I con 1,5 % CO₂

Gráficamente

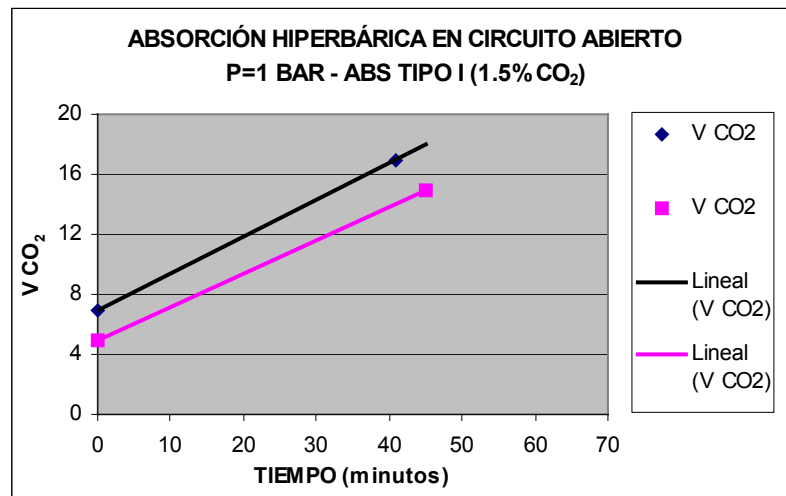


Ilustración 44. Representación gráfica. Absorción hiperbárica en circuito abierto a $P_a = 1$ bar del absorbente tipo I con 1,5 % CO₂

Para Tipo II-A con 1,5% CO₂

TIPO II-A (1 bar)		
TIEMPO	V CO ₂	V CO ₂
0	8	8
44	11,5	13,5

Tabla 73. Captación activa. Ambiente hiperbárico. Simulador. Carbonatación circuito abierto con compresor a $P_a = 1$ bar del absorbente tipo II-A con 1,5 % CO₂

Gráficamente

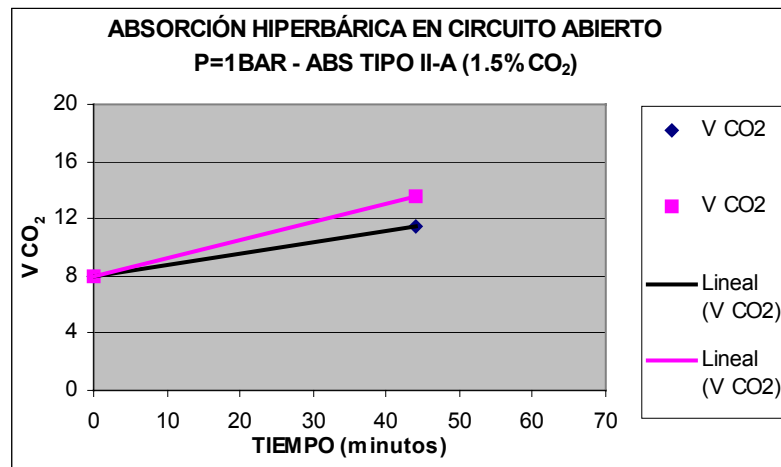


Ilustración 45. Representación gráfica. Absorción hiperbárica en circuito abierto a $P_a = 1$ bar del absorbente tipo II-A con 1,5 % CO₂

Para Tipo II-B con 1,5% CO₂

TIPO II-B (1 bar)		
TIEMPO	V CO ₂	V CO ₂
0	5	5
58	17	16,5

Tabla 74. Captación activa. Ambiente hiperbárico. Simulador. Carbonatación circuito abierto con compresor a $P_a = 1$ bar del absorbente tipo II-B con 1,5 % CO₂

Gráficamente

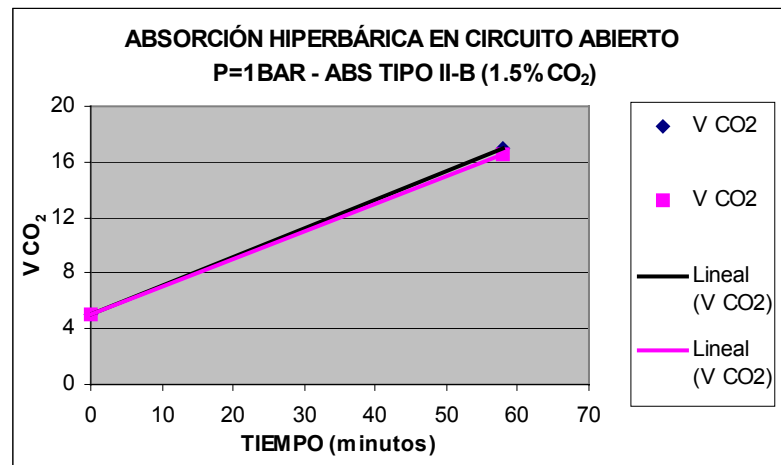


Ilustración 46. Representación gráfica. Absorción hiperbárica en circuito abierto a $P_a = 1$ bar del absorbente tipo II-B con 1,5 % CO₂

Los resultados para $P_a = 1,5$ bar son los siguientes:

Para Tipo I con 1,5% CO₂

TIPO I (1,5 bar)		
TIEMPO	V CO ₂	V CO ₂
0	7	5
59	15	16,5

Tabla 75. Captación activa. Ambiente hiperbárico. Simulador. Carbonatación circuito abierto con compresor a $P_a = 1,5$ bar del absorbente tipo I con 1,5 % CO₂

Gráficamente

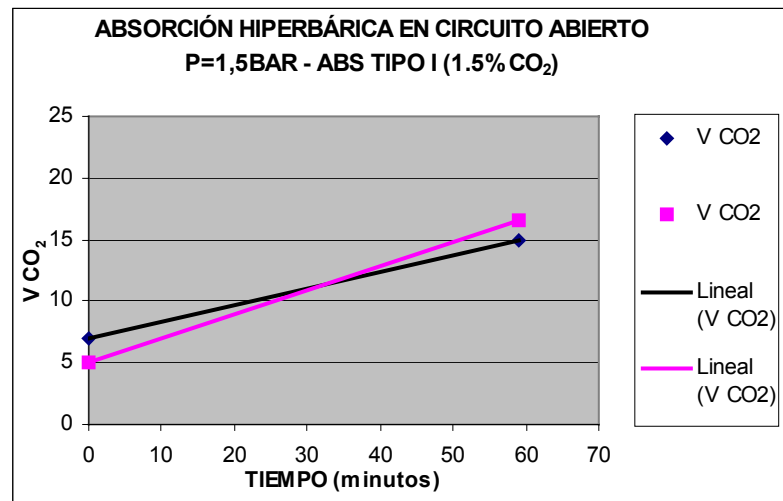


Ilustración 47. Representación gráfica. Absorción hiperbárica en circuito abierto a $P_a = 1,5$ bar del absorbente tipo I con 1,5 % CO₂

Para Tipo II-A con 1,5% CO₂

TIPO II-A (1,5 bar)		
TIEMPO	V CO ₂	V CO ₂
0	8	8
40	18,5	19,5

Tabla 76. Captación activa. Ambiente hiperbárico. Simulador. Carbonatación circuito abierto con compresor a $P_a = 1,5$ bar del absorbente tipo II-A con 1,5 % CO₂

Gráficamente

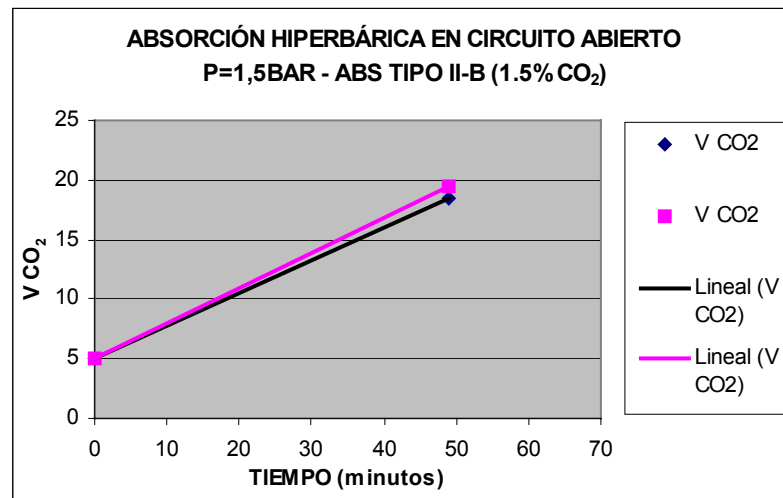


Ilustración 48. Representación gráfica. Absorción hiperbárica en circuito abierto a $P_a = 1,5$ bar del absorbente tipo II-B con 1,5 % CO₂

Para Tipo II-B con 1,5% CO₂

TIPO II-B (1,5 bar)		
TIEMPO	V CO ₂	V CO ₂
0	5	5
49	18,5	19,5

Tabla 77. Captación activa. Ambiente hiperbárico. Simulador. Carbonatación circuito abierto con compresor a $P_a = 1,5$ bar del absorbente tipo II-B con 1,5 % CO₂

Gráficamente

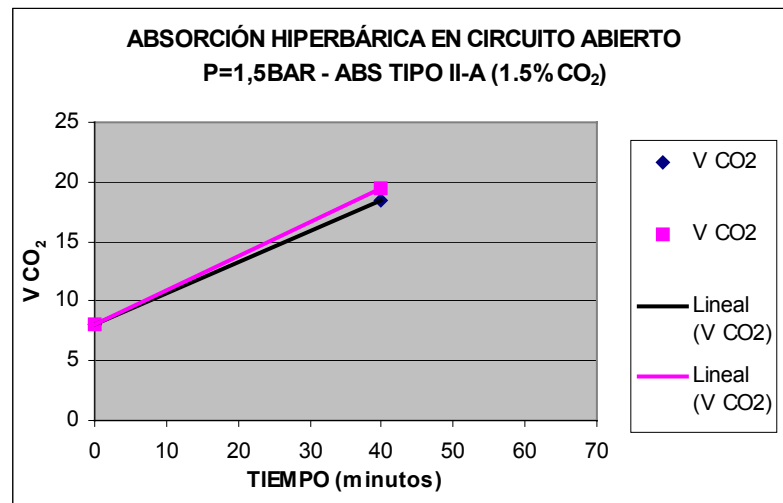


Ilustración 49. Representación gráfica. Absorción hiperbárica en circuito abierto a $P_a = 1,5$ bar del absorbente tipo II-A con 1,5 % CO₂

Para Tipo I con 3% CO₂

TIPO I (1,5 bar)		
TIEMPO	V CO ₂	V CO ₂
0	7	5
83	18,5	20,5

Tabla 78. Captación activa. Ambiente hiperbárico. Simulador. Carbonatación circuito abierto con compresor a $P_a = 1,5$ bar del absorbente tipo I con 3 % CO₂

Gráficamente

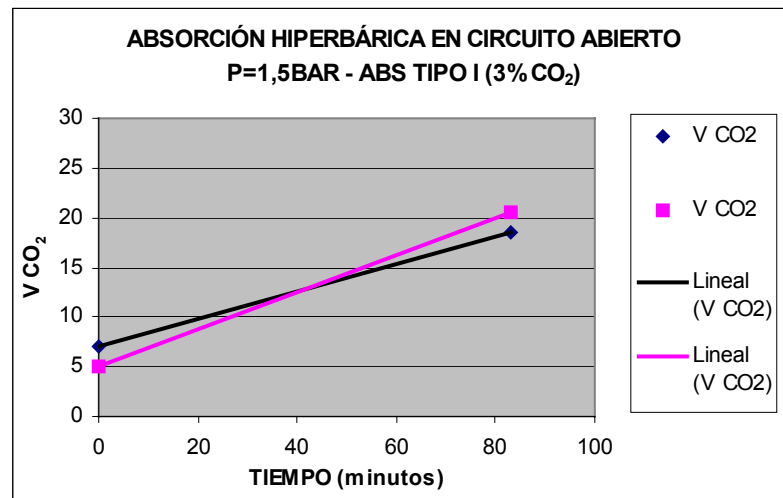


Ilustración 50. Representación gráfica. Absorción hiperbárica en circuito abierto a $P_a = 1,5$ bar del absorbente tipo I con 3 % CO₂

Para Tipo II-A con 3% CO₂

TIPO II-A (1,5 bar)		
TIEMPO	V CO ₂	V CO ₂
0	8	8
82	23	23

Tabla 79. Captación activa. Ambiente hiperbárico. Simulador. Carbonatación circuito abierto con compresor a $P_a = 1,5$ bar del absorbente tipo II-A con 3 % CO₂

Gráficamente

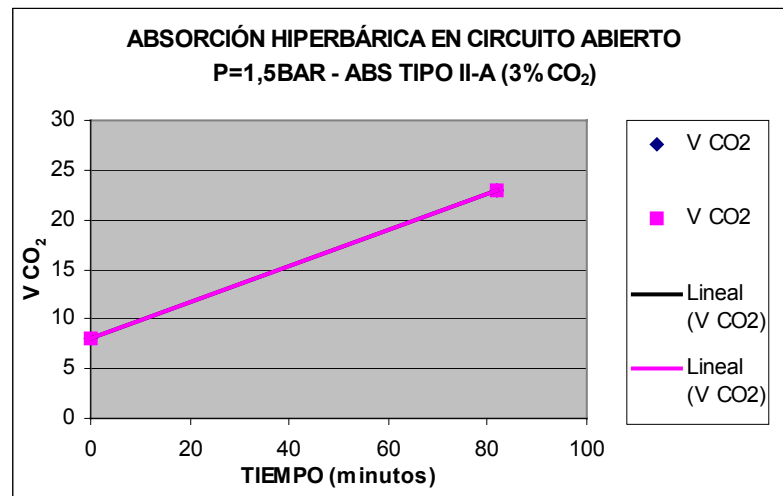


Ilustración 51. Representación gráfica. Absorción hiperbárica en circuito abierto a $P_a = 1,5$ bar del absorbente tipo II-A con 3 % CO₂

Para Tipo II-B con 3% CO₂

TIPO II-B (1,5 bar)		
TIEMPO	V CO ₂	V CO ₂
0	5	5
62	25,5	22,5

Tabla 80. Captación activa. Ambiente hiperbárico. Simulador. Carbonatación circuito abierto con compresor a $P_a = 1,5$ bar del absorbente tipo II-B con 3 % CO₂

Gráficamente

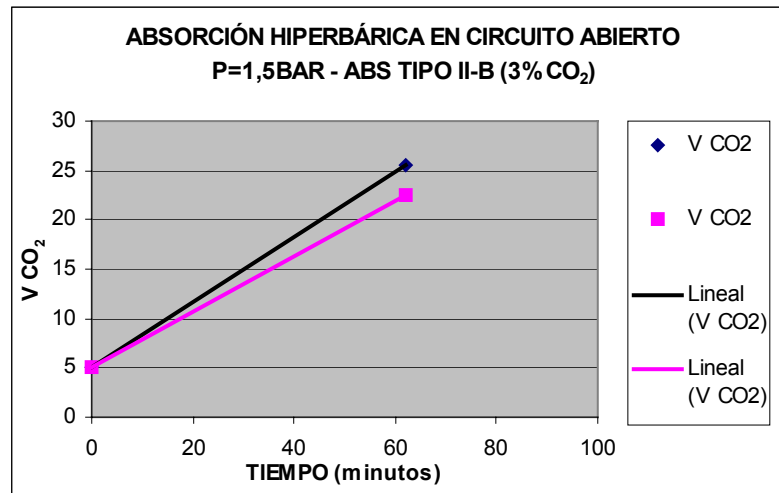


Ilustración 52. Representación gráfica. Absorción hiperbárica en circuito abierto a $P_a = 1,5$ bar del absorbente tipo II-B con 3 % CO₂

Agrupando ahora los datos según la presión y el porcentaje de estudio tenemos:

Para $P = 1$ bar y 4,5% CO₂

	TIPO I	TIPO II-A	TIPO II-B
TIEMPO	V CO ₂	V CO ₂	V CO ₂
0	5	8	5
45	16,5	-	-
71	-	23	-
79	-	-	27

Tabla 81. Captación activa. Ambiente hiperbárico. Simulador. Carbonatación circuito abierto con compresor a $P_a = 1$ bar de los tres absorbentes con 4,5 % CO₂

Gráficamente

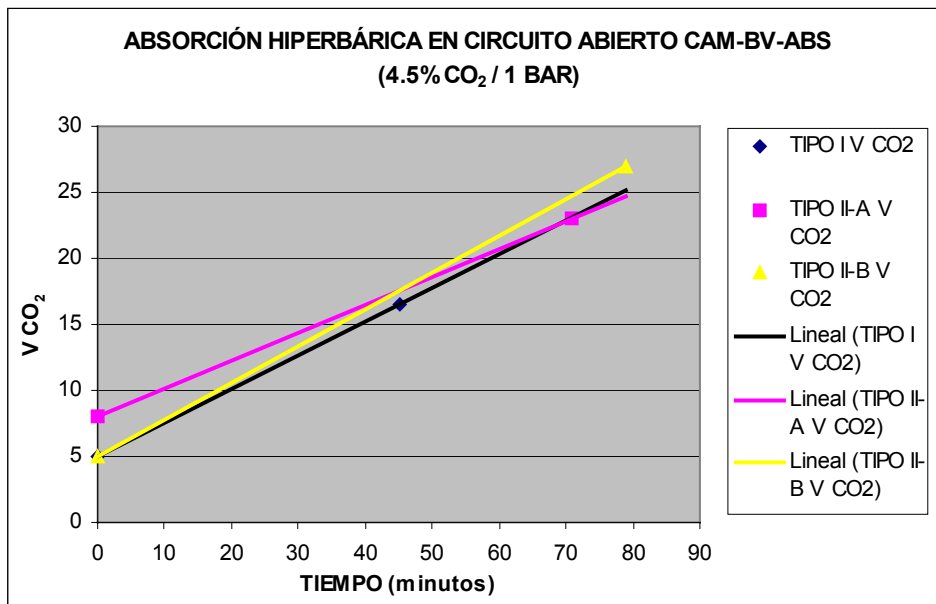


Ilustración 53. Representación gráfica. Absorción hiperbárica en circuito abierto a $P_a = 1$ bar de los tres absorbentes con 4,5 % CO₂

Para $P = 1$ bar y 1,5% CO₂

	TIPO I	TIPO II-A	TIPO II-B
TIEMPO	V CO ₂	V CO ₂	V CO ₂
0	5	8	5
44	-	13,5	-
45	15	-	-
58	-	-	16,5

Tabla 82. Captación activa. Ambiente hiperbárico. Simulador. Carbonatación circuito abierto con compresor a $P_a = 1$ bar de los tres absorbentes con 1,5 % CO₂

Gráficamente

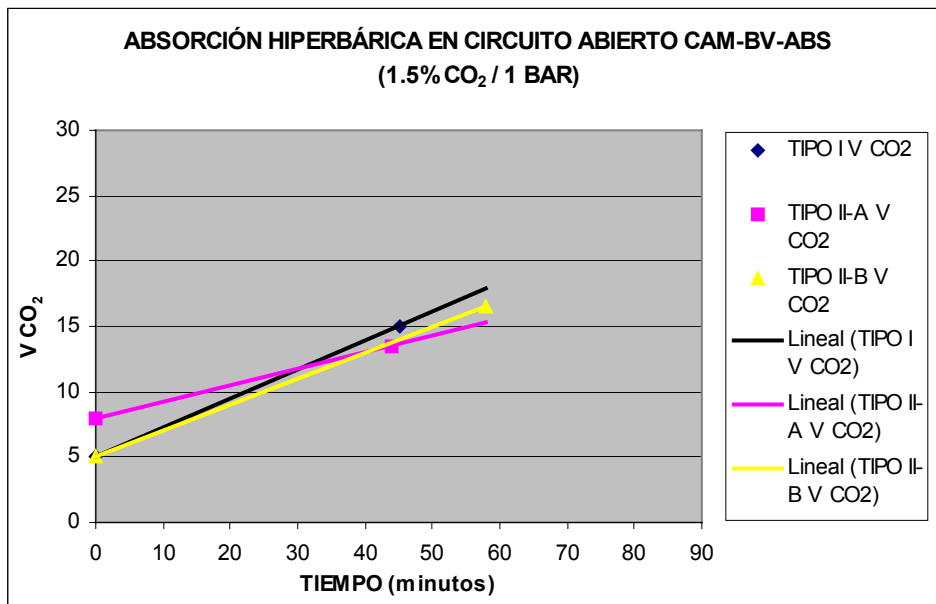


Ilustración 54. Representación gráfica. Absorción hiperbárica en circuito abierto a $P_a = 1,5$ bar de los tres absorbentes con 1,5 % CO₂

Para $P = 1,5$ bar y 1,5% CO₂

	TIPO I	TIPO II-A	TIPO II-B
TIEMPO	V CO ₂	V CO ₂	V CO ₂
0	5	8	5
40	-	19,5	-
49	-	-	19,5
59	16,5	-	-

Tabla 83. Captación activa. Ambiente hiperbárico. Simulador. Carbonatación circuito abierto con compresor a $P_a = 1,5$ bar de los tres absorbentes con 1,5 % CO₂

Gráficamente

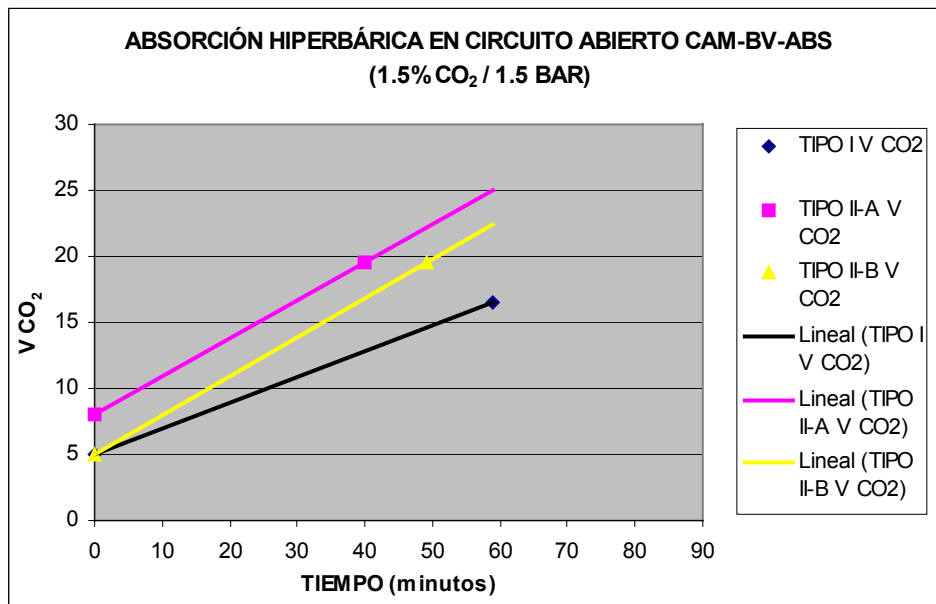


Ilustración 55. Representación gráfica. Absorción hiperbárica en circuito abierto a $P_a = 1,5$ bar de los tres absorbentes con 1,5 % CO₂

Para $P = 1,5$ bar y 3% CO₂

	TIPO I		TIPO II-B
TIEMPO	V CO ₂	V CO ₂	V CO ₂
0	5	8	5
62	-	-	22,5
82	-	23	-
83	20,5	-	-

Tabla 84. Captación activa. Ambiente hiperbárico. Simulador. Carbonatación circuito abierto con compresor a $P_a = 1,5$ bar de los tres absorbentes con 3 % CO₂

Gráficamente

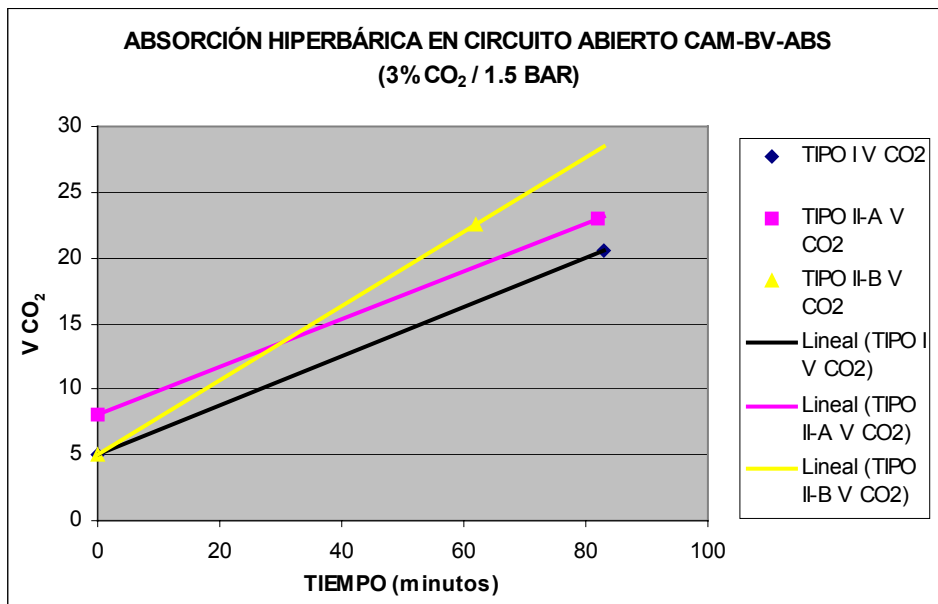


Ilustración 56. Representación gráfica. Absorción hiperbárica en circuito abierto a $P_a = 1,5$ bar de los tres absorbentes con 3 % CO₂

8. Análisis de resultados

8.1 Captación pasiva

8.1.1 Ambiente normobárico

8.1.1.1 Ambiente

Una vez obtenidos los resultados de los experimentos realizados mediante ventilación pasiva en el exterior del simulador y a presión ambiente, observamos mediante lectura de los mismos, que se produce un aumento del volumen de CO₂ absorbido por cada uno de los tres tipos de absorbente por separado (tipo I, II-A y II-B) correspondientes a Buceo, Submarino-I y Submarino-II respectivamente, conforme aumenta su tiempo de exposición en las condiciones anteriormente mencionadas.

De tal manera, se observa un incremento de volumen medio para cada absorbente de 1 ml de CO₂ en una diferencia de tiempo de 60 minutos.

Observamos también, apoyándonos en la representación gráfica y línea de tendencia obtenida de la prueba, que es el absorbente tipo II-A (Submarino-I) el que más CO₂ absorbe, representado por una ecuación de tipo lineal que aumenta su pendiente conforme aumenta el tiempo de exposición de la muestra, siendo éste el idóneo para las condiciones expuestas.

8.1.1.2 Simulador

La prueba de absorción de CO₂ mediante captación pasiva en ambiente normobárico y simulador fue tomada en cuenta en experiencias de años anteriores, por lo que para más información, a ellas debere-mos acudir.

8.1.2 Ambiente hiperbárico

8.1.2.1 Simulador

En la prueba realizada en simulador hiperbárico para distintas presiones absolutas, tras el estudio por separado de cada uno de los absorbentes, obtenemos el siguiente análisis:

A la presión absoluta de **2 bar** el absorbente tipo I (Buceo), absorbe 19 ml de CO₂ en un tiempo de 25 minutos. A diferencia el tipo II-A (Submarino-I) absorbe 43 ml en el mismo tiempo y finalmente el tipo II-B (Submarino-II) absorbe 27,5 ml en el mismo periodo.

Por lo tanto, si comparamos volúmenes absorbidos, llegamos a la conclusión de que es el tipo II-A quien más volumen de CO₂ absorbe, siendo el idóneo a emplear en dichas condiciones, dejando en segundo lugar el tipo II-B y por último el tipo I.

A la presión absoluta de **2,5 bar** obtenemos las mismas preferencias en cuanto a selección de absor-bente que a la presión anterior.

De manera análoga, a la presión absoluta de **3 bar**, el criterio a seguir sería el mismo que anteriormen-te.

Finalmente, observamos que los tres tipos de absorbente sufren un aumento de forma lineal en cuanto a volumen de CO₂ absorbido se refiere, conforme aumenta la presión absoluta.

8.2 Captación activa

8.2.1 Ambiente normobárico

8.2.1.1 Ambiente

8.2.1.1.1 Bomba de vacío

Del estudio de los tres tipos de absorbente mediante captación activa en ambiente normobárico ayudado por bomba de vacío, observamos que es el absorbente tipo II-A el que más volumen de CO₂ absorbe en el tiempo de exposición, siendo incluso mayor en captación activa que en pasiva, aunque no por muy elevada diferencia.

De la representación gráfica obtenemos una ecuación lineal que representa lo dicho mediante una pendiente, relativamente ascendente, en función del tiempo.

Al aplicar la condición de ambiente húmedo, observamos que para el absorbente mas interesante por el momento (tipo II-A) se produce un claro aumento de absorción de CO₂ del orden de cuatro a cinco veces mayor que en ambiente normal, produciendo la saturación del mismo a partir de los diez minutos de exposición.

Al hacer el estudio sin humedad observamos que funciona mejor el absorbente tipo I que el resto, obteniendo los tres una saturación a partir de los cinco minutos, siendo el volumen total de CO₂ absorbido para el tipo I de 52 ml, del tipo II-A de 47 ml y finalmente del tipo II-B de 37 ml.

8.2.2 Circuito abierto con bomba de vacío

8.2.2.1 Simulador

Para dicha experiencia hemos comparado los distintos tipos de absorbente para distintas concentraciones iniciales de CO_2 , en función del tiempo de exposición, obteniendo el siguiente resultado:

Observamos que dentro de un mismo tipo de absorbente, al bajar la concentración inicial de CO_2 , se produce un aumento de la capacidad de absorción del mismo, cosa que a simple vista parece normal, pues la saturación del absorbente se producirá con anterioridad si ya contiene una concentración elevada desde el principio, todo ello para un tiempo determinado y resto de condiciones experimentales.

Como hecho anecdótico, señalamos que, los tres absorbentes, para una concentración inicial de 5 % de CO_2 , a partir de un tiempo superior a 30 minutos, sufren la saturación y posterior disminución de su capacidad de absorción. Por causa de limitación de tiempo no podemos señalar lo mismo para el resto de porcentajes inferiores al anteriormente mencionado.

Gráficamente los tres absorbentes siguen una trayectoria rectilínea ascendente en función del tiempo.

8.2.3 Ambiente hiperbárico

8.2.3.1 Simulador

8.2.3.1.1 Circuito abierto con compresor

En el análisis de dicha prueba comparamos la absorción de cada uno de los tres absorbentes para la presión de 1 bar y 1,5 bar, para distintas concentraciones de CO₂ iniciales, todo ello en función del tiempo de exposición en el interior del simulador.

A la presión absoluta de **1 bar** deducimos que:

Manteniendo constante una concentración inicial de CO₂ del 4,5 %, es el absorbente tipo I quien mayor carbonatación realiza para un tiempo fijado, seguido del tipo II-A y finalmente del tipo II-B.

Para una concentración del 3 % de CO₂ inicial comprobamos que el absorbente tipo I necesita mayor tiempo que a la concentración anterior, para una misma carbonatación.

Es el tipo II-B quien en este caso absorbe un poco más de CO₂ que el tipo I, seguido del tipo II-A, quien tarda un poco más en realizar la misma función.

Finalmente a la concentración de 1,5 % de CO₂ inicial es el absorbente tipo II-A quien tarda más tiempo en realizar la misma carbonatación que el tipo I, siendo el tipo II-B el menos aconsejado para dicha experiencia por tardar más tiempo para una misma absorción de CO₂ final.

A la presión absoluta de **1,5 bar** observamos que:

Es en el absorbente tipo I al 3 % de CO₂ inicial donde encontramos un ligero aumento de volumen de CO₂ absorbido que a la presión absoluta de 1 bar, para un tiempo determinado. Manteniendo el resto de características constantes con respecto a la presión anteriormente descrita.

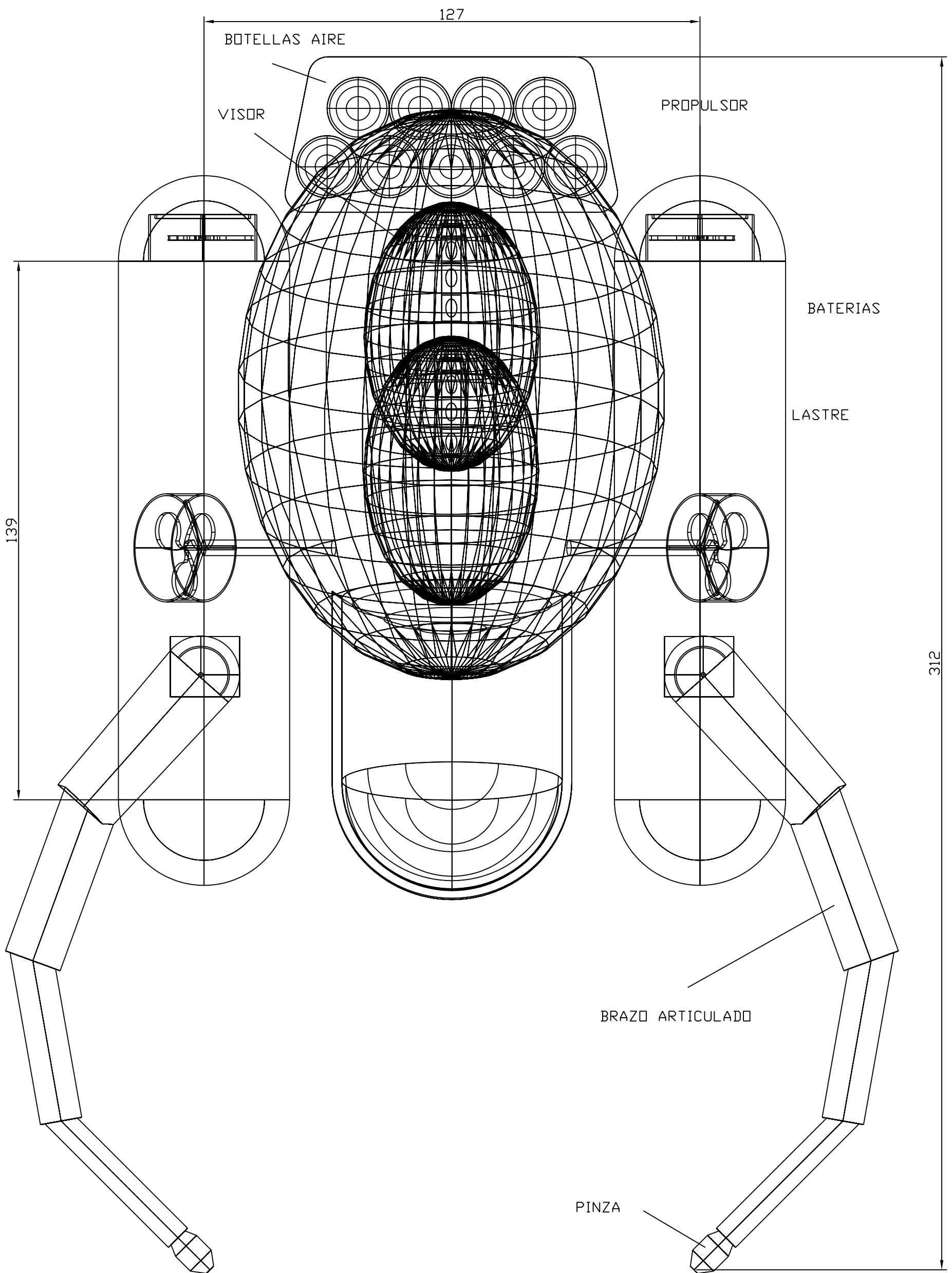
Para el caso de 1% de concentración inicial de CO₂ se deduce que necesita mayor tiempo de exposición del absorbente que a la presión de 1 bar, siendo el resto de conclusiones sin variación apreciable.

9. Conclusiones

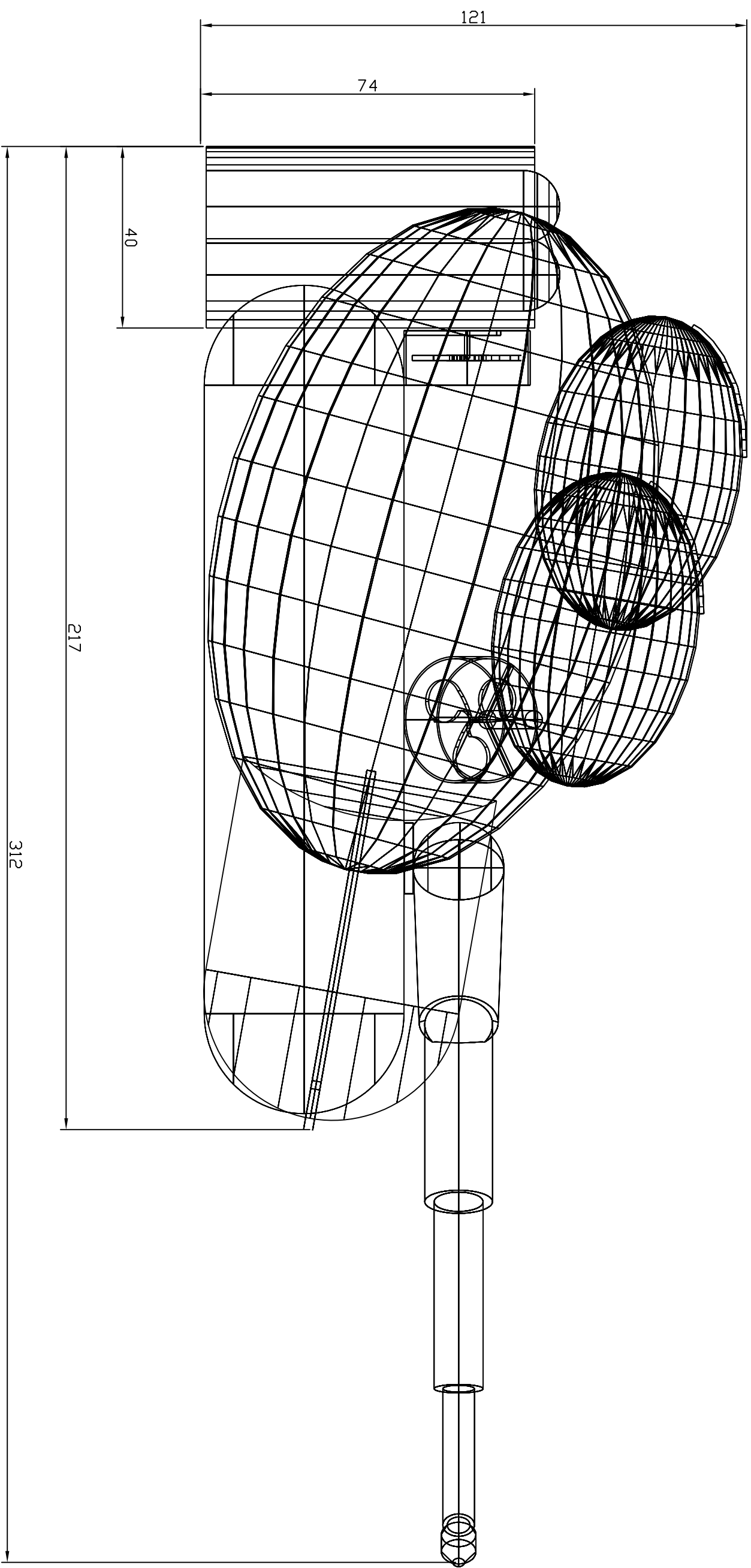
Tras analizar los resultados experimentales de los absorbentes, podemos completar nuestro estudio sobre la regeneración de atmósfera en un vehículo tripulado para trabajos submarinos, de manera:

- La capacidad de absorción estará entre 130 y 200 litros/kilogramo en condiciones normobáricas.
- La curva de representación para cada uno de ellos depende de las condiciones de exposición.
- En ambiente normobárico, es el absorbente tipo II-A (Submarino-I) quien mayor absorción de CO₂ realiza, siendo mayor en captación activa que en pasiva, manteniendo la elección en ambiente húmedo.
- Por el contrario en ambientes sin humedad emplearíamos el absorbente tipo I (Buceo), aunque la saturación se produzca demasiado pronto.
- En ambiente hiperbárico, escogeremos el absorbente tipo I (Buceo) por su capacidad de absorción a las presiones estudiadas en captación activa.
- A diferencia, manteniendo el ambiente hiperbárico, emplearemos el absorbente tipo II-A (Submarino-I) para captación pasiva.
- Es por tanto evidente, la gran influencia de factores como presión y porcentaje de CO₂ en ambiente, comparado con la que ejerce la humedad y la temperatura.

10. Planos

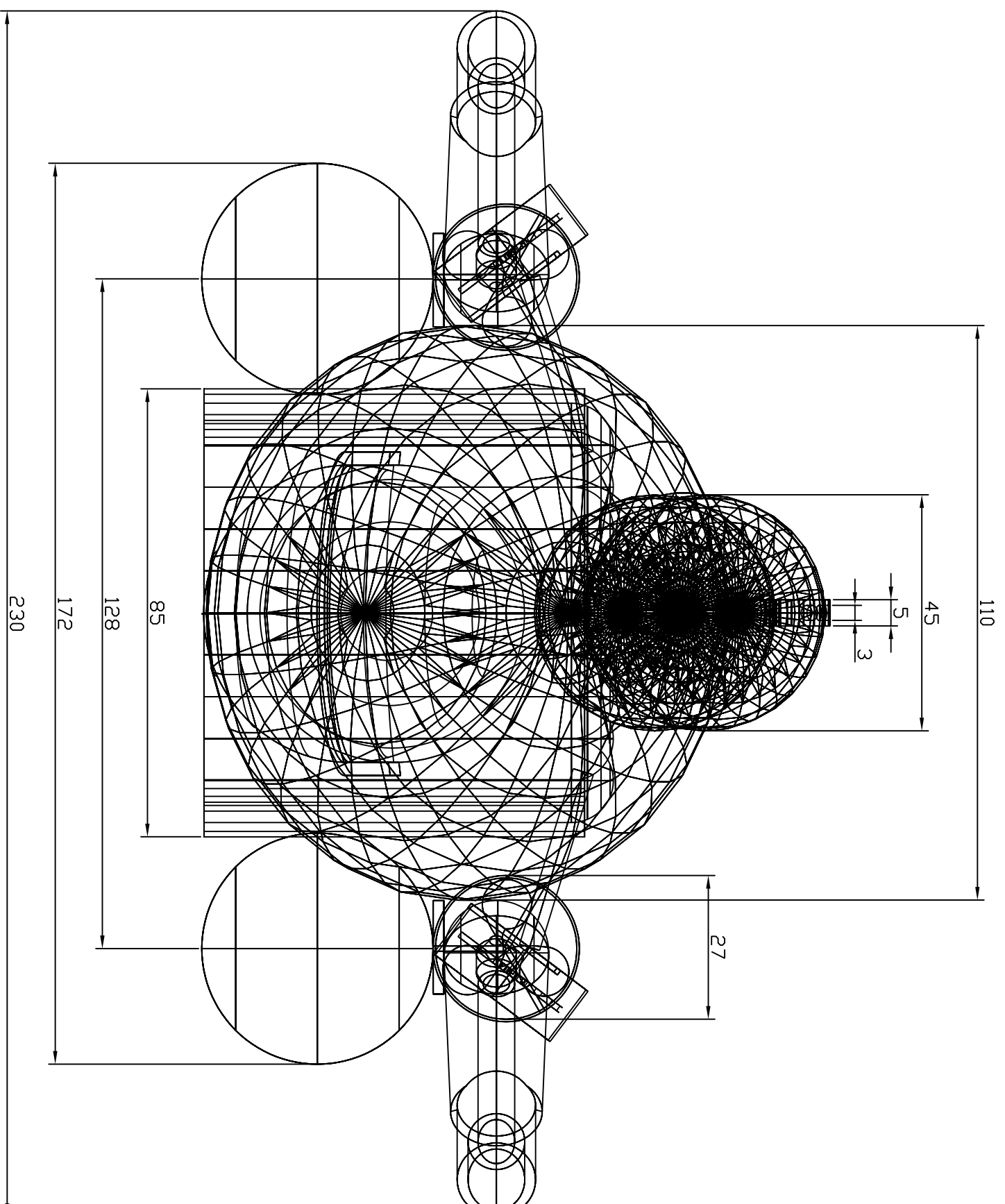


		ESCUELA UNIVERSITARIA DE INGENIERIA TECNICA NAVAL CARTAGENA	
Dibujado	David Mira Megías		Nº Plano: 1 de 5
Comprobado			
Escala	1/1		Sustituye a:
PLANTA			Sustituido por:



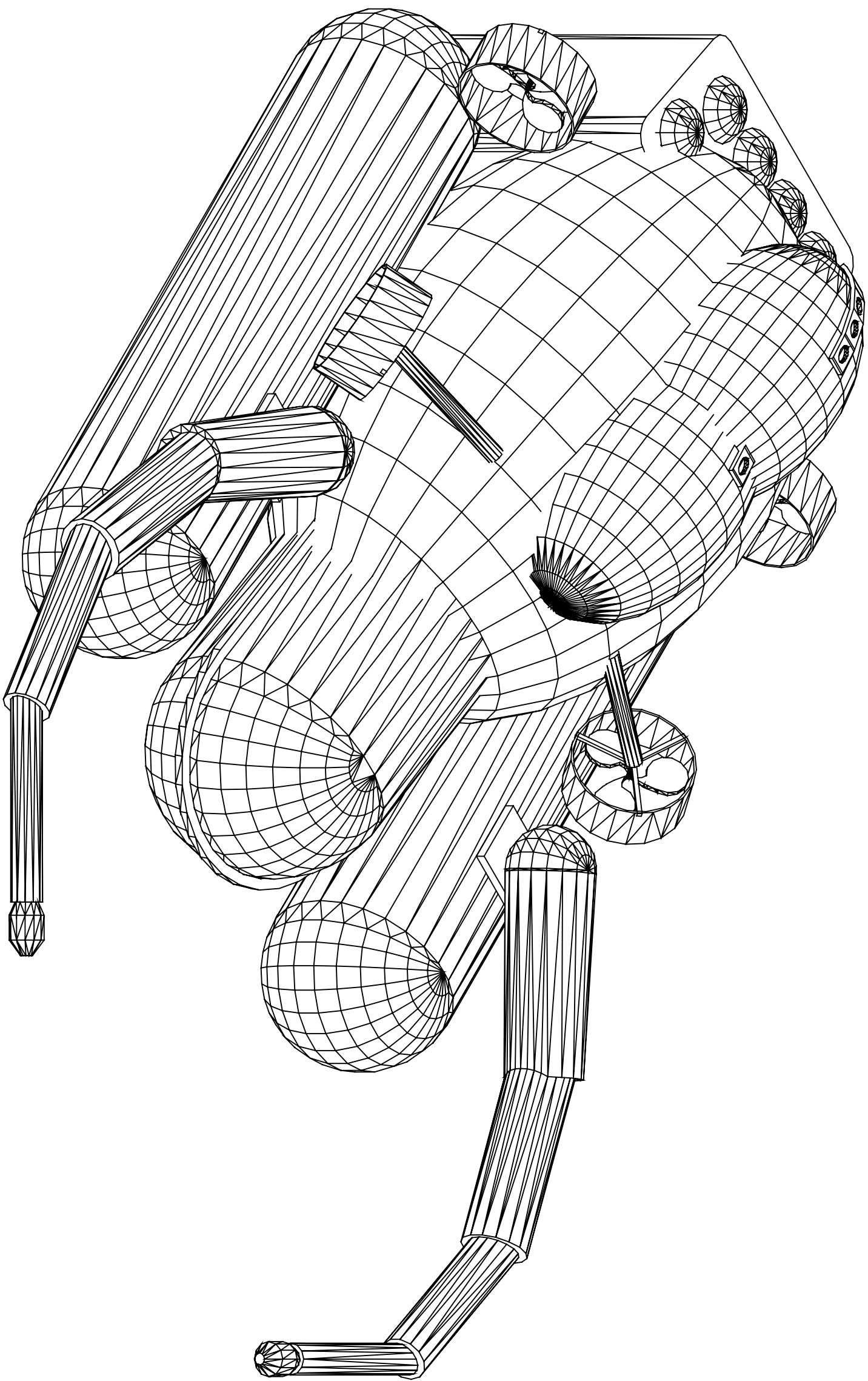
Dibujado	David Mira Megías	ESCUELA UNIVERSITARIA DE INGENIERIA TECNICA NAVAL CARTAGENA
Comprobado		
Escala	1/1	Nº Plano: 2 de 5
		Seguiente a:

PERFIL



Dibujado		David Mira Megías		ESCUELA UNIVERSITARIA DE INGENIERIA TECNICA NAVAL CARTAGENA	
Comprobado					
Escala		1/1		Nº Plano: 3 de 5	
				Suaviluze o:	

ALZADO



Dibujado	David Mira Megías	ESCUELA UNIVERSITARIA DE INGENIERIA TECNICA NAVAL CARTAGENA
Comprobado		
Escala	1/1	Nº Plano: 4 de 5
	3 D	Sueltos a:

11. Bibliografía

TITULO; AUTOR; PUBLICACIÓN; ORGANISMO; PÁGINAS; FECHA

- 2000-10 An End to Decompression; Bove Fred; Skin diver; 3; 2000
- A biophysical basis for inner ear decompression sickness; Doolette Dj & Mitchell SJ; Journal of Applied Physiology; Aceptado En2003; 2003
- A Learner's guide to closed-circuit rebreather operations; Pyle R.L.; Proceedings of Rebreathers Forum 2,0- 26-28 September ; pp:45-67; 1996
- A limited failure population model for ouset of grde IV venous gas emboli; D.Animal Physiol.Lund U.; 93(3):882-6; 2002
- A model for influence of exercise on formation and growth of tissue bubbles during altitude decompression; Foster P.F,Feiverson AH, Glowinski R , Izygon M & Boriek AM; Am J Physiol Regl Integr Comp Physiol; 279(6):2304-16; 2000
- A model of extravascular bubble evolution: effect of changes in breathing gas composition; Himm J.F. & Homer L.D.; Journal of Applied Physiology; 87(4):1521-31; 1999
- A new method for the measurement of gas solubility; Snedden W. , Le Dez K. & Manson H.J.; Journal of Applied Physiology; 80(4):1371-8; 1996
- A regenerable carbon dioxide removal and oxygen recovery systems for the Japanese Experimental Module; Otsuji K, Hirao M, Satoh S; Acta Astronaut; 15(1):45-54; 1987

- ABS: Life Support and Environmental Control Systems; Rules for building and classing underwater vehicles, systems and hyperbaric facilities; 2002
- Absorption of in vivo inert gas bubbles; Hlastala M.P & Van Liew H:D; *Respir Physiol.*; 24(2):147-58; 1975
- Absorption of nitrogen dioxide and nitric oxide by lime soda; Ishibe T, Sato T, Hayashi T, Kato N & Hata T; *British Journal of Anaesthesia*; 75(3):330-3; 1995
- Abstracts of the 23rd Annual Meeting of European Underwater and Baromedical Society; Varios; *European Journal of Underwater and Hiperbaric Medicine EJUHM*; 85 exposiciones; 1997
- Abstracts of the 27TH Annual Meeting of European Underwater and Baromedical Society; Varios; *European Journal of Underwater and Hiperbaric Medicine EJUHM*; Vol2,n3:63-94; 2001
- Abstracts of the 28TH Annual Meeting of European Underwater and Baromedical Society; Varios; *European Journal of Underwater and Hiperbaric Medicine EJUHM*; Vol3,N3 :70-97; 2002
- Accelerated Decompression Using Oxygen for Submarine Rescue-Summary Report and Operational Guidance; Latson G, Flynn ET, Gerth W & Thalmann E; *Storming Media; NEDU*; pp45; 2000
- Adsorption of carbon dioxide gas; Juniot A, Seltzer S, Louvier N, Milesi-Defrance N & Cros-Terraux N; *Ann Fr Anesth Reanim.*; 18:319-31; 1999
- Advanced Diving Physiology; Somers L.H; pp20; 1997
- ADVENTURES IN DIVING (PADI); Richarson D (Ed); PADI EU SERVICES AG; 1996
- Air and Nitrox Saturation Decompression : a Report of 4 schedules and 77 subjects.; Eckenhoff RG & Vann RD; *Undersea Biomed Res.*; PMID4035817; 12(1):41-52; 1985
- Aire enriquecido Nitrox. Speciality Diver; Ed Christini (Ed); SSI-Scuba Schools international; pp:76; 1997
- Algae and submarine hability; Leonard J.M; U.S.Naval Research Laboratory (NRL); 19:143-150; 1958
- Alkazida M as a regenerative carbon dioxide absorbent; Goan J.C.; U.S.Naval Research Laboratory (NRL); 12:92-100;
- Amsorb: a new carbon dioxide absorbents for use in anesthetic breathing system; MurrayJM, Renfrew CW,Bedi A,McCristal CB, Jones DS & Fee JP; *Anesthesiology*; 91(5):1342-8; 1999
- An Explanation professor AA.Bulhmann's ZHL-16 Algorithm; Chapman P.
- Análisis químico e instrumental moderno; Walton HF & Reyes J; Reverté Ed.SA; *Naval Medical Research Inst*; 86(6):1920-9; 1999

- Analysis of gas composition of intravascular bubbles produced by decompression; Ishiyama A; Bull Tokyo Med Dent Univ; 30(2):25-35; 1983
- Analysis of Volatile Contaminants in U.S.Navy Fleet Soda Lime; "Lillo R.S, Ruby,R; Gummin DD, Porter WR & Caldwell JM"; Naval Warfare and Marine Eng.; Naval medical Research Inst. Bethesda MD; 57pp; 1995
- Applications of a total dissolved gas pressure probe in groundwater studies; cap. 2;
- Artificial Gills; Ming-Chien Y & Cussier E.L; Journal of Membrane Science; 42(3): 273-84; 1989
- Ascent rate, age, maximal oxygen uptake, adiposity, and circulating venous bubbles after diving; Carturan D, Boussuges A, Vanuxem P, Bar-Hen A, Burnet H & Gardette B; Journal of Applied Physiology; 93(4):1349-56; 2002
- Aspectos biofísicos del buceo con mezclas de aire y nitrógeno o helio; García Gómez José; Facultad de Ciencias; 1988
- Breathing pattern and ventilatory response to carbon dioxide in divers; Florio J.T. Morrison JB & Butt Ws; Journal of Applied Physiology; 46(6):1076-80; 1979
- Bubble Decompression strategies; Meiken E; pp9;
- Bubble nucleation in binary mixtures : A semiempirical approach; Talanquer V, Cunningham C & Oxtoby DW; Journal of Chemical Physics; Vol 114 ,n°15:6759-62; 2001
- Bubble production in agarose gels subjected to different decompression schedules; D'Arrigo JS & Mano Y; Undersea Biomed Res.; 6(1):93-8; 1979
- Bubbles and Gradients; Baker E.C.
- Building the Blueprint on Bends; Maberry Steven Ray; Underwater Magazine; 1999
- Cal sodada con indicador / cal sodada ADOX; Mallinck Rodt Anesthesiology; pp 16; 2000
- Calcium Hydroxide mixture. Micropor; Micropore Inc; Micropore Inc ; MSDS0002; 2002
- Calculation of decompression schedules for nitrogen-oxygen and helium-oxygen dives; Workman R.D.; Navy Experimental Diving Unit (NEDU-Washington); Research Report 6-65; 1965
- Can high-frequency sound affect gas-bubble dynamics? A study in the intact prawn *Palaemon elegans*; Arieli Y, Arieli R & Shupak A.; Ultrasound Med Biol; PMID11179625; 26(9):1511-5; 2000
- Carbon Dioxide Control; Atwater J F; Oregon state edu; 1996
- Carbon Dioxide Control : Silver Oxide; Atwater J F; Oregon state edu; 1996
- Carbon Dioxide in Workplace Atmospheres; OSHA Technical Center; USDOL-OSHA

-
- Carbon dioxide removal from high pressure chambers; Miller J.N.; Royal Naval Physiological Laboratory Alverstoke; PMID9181036; 90(2):263-8; 1997
 - Carbon dioxide removal: Lithium hydroxide and soda lime as CO₂ absorbents for Naval Use; Miller R.R; U.S.Naval Research Laboratory (NRL); ***; 10:81-87; 1960
 - Carbon dioxide scrubbing with an alkaline amine solution; Smith S.H.; U.S.Naval Research Laboratory (NRL); 11:88-91;
 - Cardiovascular and respiratory effects of apnea in humans; Anderson J.PA. ;Proquest Dissertation Abstracts; Lund University; 120; 2002
 - Cerebral gas embolism absorption during hyperbaric therapy: theory; Branger A.B, Lambertsen CJ & McEckmann D; Journal of Applied Physiology; 90(2):593-600; 2001
 - Changes in cardiac function during recreational diving (Francés); Boussuges A & Lafay V.; Arch Mal Coeur Vais; PMID9181036; 90(2):263-8; 1997
 - Chemical safety of U.S.Navy Fleet soda lime; Lillo RS, Ruby a, Gummin DD, Porter WR & Caldwell JM; Undersea Hyperbaric Med; 23(1):43-53; 1996
 - Circuitos Anestésicos; D´Este J; pp23; 2000
 - Clean air on board submarines; TNO Prins Maurits Laboratory; 2003
 - Clearing Up the Confusion About Deep-Stop; Baker E.C.; 60(1):45-51; 1986
 - Closed circle absorption of carbon dioxide; Mathewson M.D.; Fragments of Science: A Syllabus on the chemistry and Physics of Anesthesia; NURA831
 - Closed-Circuit Rebreathers; Pyle R.L.; Bishop Museum; 1997
 - CO₂ retention during hyperbaric exercise while breathing 40/60 nitrox; Kerem D, Daskalovic YI, Arieli R & Shupak A; Undersea Hyperbaric Med; 22(4): 339-46; 1995
 - Commercial Diving Operations; U.S.Department of Labor. Occupational Safety & Health Administration; OSHAOffice of Publications; 68:1399-1414; 2003
 - Computation of decompression tables using continuous compartment half-lives; Egi SM & Gurmen NM ; Undersea Hyperbaric Med; PMID11191160; 27(3):143-53; 2000
 - Computation of low-risk compression.Computation model and results of experimental decompression research; Bühlmann AA; Schweiz Med Wochenscher; 118(6):185-97; 1988
 - Conception of a decompression Table; Imbert JP & Fructus X; Scweiz Z Sportmed; 37(1):27-38; 1989
 - Construcción de submarinos; Ulrich Gabler; Ed. San Martín

- Control de atmósferas en ambientes confinados (Libro homenaje al Profesor Doctor Joaquín Moreno Calvel); García Gómez José & Solano Oriá E; Universidad de Murcia Servicio de Publicaciones; Casacale Pujalté JA , Morno Grau S et Al; 1:277-90; 1999
- Cromatografía de gases II; Dabrio MV; Alhambra Ed; Schools of Biosc. Michigan; 16(5):222-7; 2001
- Current submarine atmosphere control technology; Mazurek W; Life Support Biosph Sci; Department Of Defence,Australia; 5:(3):279-85; 1998
- Development of the ANALOX Hiper-Gas Diving Bell Monitor -Research Report 030; Flook V; Health & Safety Executive Books; Unimed Scientific Limited; pp34; 2003
- Decompression after repeated dives; Bühlmann AA; Undersea Biomed Res.; 14(1):59-66; 1987
- Decompression comparison of helium and hydrogen in rats; Lillo R.S. Parker EC & Porter W.R; Journal of Applied Physiology; 82(3):892-901; 1997
- Decompression from a deep nitrogen-oxygen saturation dive.A case report; Barry PD, Vann RD,Youngblood DA, Peterson RE & Bennett PB; Undersea Biomed Res.; Lund University; 11(4):387-93; 1984
- Decompression induced nitrogen elimination; Dick AP,VannRD, Mebane GY & Feezor MD; Undersea Biomed Res.; PMID6535313; 11(4):369-80; 1984
- Decompression models and phase mechanics; Wienke B.R.; Los Alamos National Laboratory; 7;
- Decompression Practice (en Physiology and Medicine of Diving de Bennett & Elliotts; Hamilton R W & Thalmann E; Bennet P & Elliott D (Ed); Philadelphia: W.B Saunders ,1998; (4ed)10,2: 453-98; 1993
- Decompression problems in diving in mountain lakes; Bühlmann AA; Schweiz Z Sportmed; 37(2):99-102; 1989
- Decompression risk factors in compressed air tunnelling : options for health risk reduction; Flook V; HSE Books Health and Safety Executive; Contract Research Report 201/1998; pp66; 1998
- Decompression sickness and arterial gas embolism in sports scuba divers; Gorman DF; Sports Med; 8(1):32-42; 1989
- Decompression sickness risk in rats by microbial removal of dissolved gas; "Kayar S.R, Miller T.L. ; Wolin M.J. ; Aukhert E.O, Axley M.J. & Kiesow L.A"; Am.J.Physiology.Regulatory ,integrative and comparative Physiology; 275(3) : (677-82; 1998
- Decompression Theory - Bubble Models; Recopilación; Deep Ocean Diving; 2003
- Decompression Theory - Neo-Haldane Models; Recopilación; Deep Ocean Diving; 2003

-
- Decompression Theory -Calculating DecoProfiles; Recopilación; Deep Ocean Diving; 2003
 - Deep Diving. An Advanced Guide to Physiology, procedures and systems; Gilliam Bret , Von Maier R , Crea J & Webb D; Watersport Publishing, Inc; pp255; 1992
 - Deep Stops (The importance of deep safety stops:Rethinking ascent patterns from decompression dives); Pyle R.L.; DeepTech 5:64; Cave Divinggroup Newsletter 121:2-5; pp5; 1996
 - Deep-diving Humans; Naquet R & Rostain J.C.; News in Physiological Sciences
 - Designing for Human Presence in Space : An Introduction to Environmental Control and Life Support Systems; Wieland PO; National Aeronautics and Space Administration; Office of Management - Scientific and Technical Information Program; NASA Reference Publication 1324; 1994
 - Development of a compact artificial gill using concentrated hemoglobin solution as the oxygen carrier; Nagase K, Kohori F & Sakai K; Journal of Membrane Science; 215(1-2):281-92; 2003
 - Development and evaluation of a decompression stress index based on tissue bubble dynamics (scuba diving); Gernhardt, Michael Landon; UMI ProQuest Digital Dissertations; Pennsylvania University; 327; 1991
 - Diffusion and nucleation of gas in gel and some implications for the development of decompression procedures; Le Messurier DH,Smith TN & Wood WR; Undersea Biomed Res.; 6(2):175-88; 1979
 - Diffusion and nucleation of gas in gel and some implications for the development of decompression procedures
 - Discussion General .Valores M cálculo de decompresión; Baker E.C.; Deep Ocean; 2000
 - Dissociation of the behavioral and subjective components of nitrogen narcosis and diver adaptation; Hamilton; Journal of Applied Physiology; isbn -84-205-0465-3; 223pp; 1973
 - Dive Computer secrets-revealed; Hardy J.
 - Dive Computers. A Consumer's Guide to History,Theory, and Performance; LoystK, Huggins K & Steidley M; Watersport Publishing, Inc; pp183; 1991
 - Diving Above Sea Level; Wienke B.R.; Best Publishing Company; pp65; 1993
 - Diving and oxygen; Wilmschurst P; BMJ; PMID11236806; 317:996-9; 1998
 - Diving at altitude: a review of decompression strategies; Egi SM & Brubank AO; Undersea Hyperbaric Med; PMID7580768; 11(3):281-300; 1995
 - Diving behavior of air-breathing vertebrates : Allometry,classification, and interspecific comparisons; Schreer J F ; Proquest Dissertation Abstracts; Waterloo University; 160; 1998

-
- Diving beyond the limits; Butler P. J.; News in Physiological Sciences; 16(5):222-7; 2001
 - Diving emergencies and underwater medicine; Zagreb University of Medicine; 74(1):55-61; 1993
 - Diving response and arterial oxygen saturation during apnea and exercise in breath-hold divers; Anderson J.P.A. Et al; Journal of Applied Physiology; Keiser Medical Center
 - Diving Responses:Fact or Fiction.; Blix A. ; News in Physiological Sciences; 2:64-6; 1987
 - Duration of carbon dioxide absorption by soda lime at low rates of fresh gas flow; Ohrn M, Gravenstein N & Good ML; J Clin Anesth; Florida University; 3(2):104-7; 1991
 - Effect of a single air dive on pulmonary diffusing capacity in professional divers; Dujic Z., Eterovic D, Denoble P, Krstacic G, Tocijl J & Gosovic S; Journal of Applied Physiology; 74(1):55-61; 1993
 - Effect of combined recompression and air, oxygen, or heliox breathing on air bubbles in rats tissues; Hyldergaard O., Kerem D. & Melaned Y.; Journal of Applied Physiology; PMID 7580768; 22(3):281-300; 1995
 - Effect of immersion, submersion and scuba diving on heart rate variability; Schipke JD & Pelzer M; Br J Sports Med; 31:174-80; 2001
 - Effect of lipid on inert gas kinetics; "Hilm J.F. ; Homer L.D. & Novotny J.A."; Journal of Applied Physiology; 77(1):303-12; 1994
 - Effects of brief , repeated hyperbaric exposures on susceptibility to nitrogen narcosis; Roger W H; Undersea Biomed Res.; 16(3):227-32; 1989
 - Effects of decompression per se on nitrogen elimination; Hills B A, ; Journal of Applied Physiology; 45(6):916-21; 1978
 - Effects of heterogeneous structure and diffusion permeability of body tissues on decompression gas bubble dynamics; Nikolaev VP; Aviat Space Environ Med; 71(7):723-9; 2000
 - Effects of physical properties of the breathing gas on decompression sickness bubbles; Burkard M.E. & Van Liew H.D; Journal of Applied Physiology; 79(5):1828-36; 1995
 - Effects of variations in the ascending speed on the production of circulating gas bubble after compressed-air diving (Italiano); Marroni A & Zannini D; Minerva Med; 72(52):3567-72; 1981
 - El camino hacia las profundidades; Guarro J; Masdebuceo
 - El ordenador personal de buceo; pp59
 - Elimination of nitrogen and helium from divers saturated with nitrox and heliox; Sicko Z. ,Kot J. & Dobosznski; 26th Annual Scientific Meeting of EUBSD; European Underwater & Baromedical Society On Diving, Hiperbaric Medicine ,14-17 September 2000, Malta; 2000

- Enriched Air Diver Manual; Gorman DF; Padi eu Services AG; 1998
- Enviromental Control and life support system; Space Station Systems-ECLSS, SP-125; pp17
- Enviromental Control and Life Support Systems (CELSS) for MOONBASE 2015; Koelle HH; Technische Universität Berlin, Institut für Luft-und Raumfahrt Berlin; ILR Mitt.342(2000); 2000
- Enzyme-based CO2 capture for advanced life support; Ge J, Cowan RM, Tu C, McGregor ML & Trachtenberg MC; Life Support Biosph Sci; 883-49.181-9; 2002
- Especial Nitrox; Medina Ferrer J; Masdebuceo
- Especial Trimix I. La profundidad y el Helio; Medina Ferrer J; Masdebuceo.
- Evaluación de la utilidad de la oxigenoterapia hiperbárica en medicina interna; Desola Ala Jordi; CCMH; Autónoma -Barcelona; 1987
- Evaluation of different decompression schedules by agarose gel bubble technique; Mano Y, Shibayama M & Maeda H; Undersea Biomed Res.; 9(1):45-57; 1982
- Evaluation of standard decompression schedule by agarose gel method; Yano K et Mano Y; Bull Tokyo Med Dent Univ; PMID290418; 26(3):197-212; 1979
- Evolution in Hyperbaric Environmtes: A Simple guide to Some Recent Changes; David Smith Dives; Underwater Magazine; Ministerio de Defensa -Armada ZMM; otoño,5 pag; 1997
- Exercise tolerance and pulmonary gas exchange after deep saturation dives; Thorsen;Journal of Applied Physiology; Uni.Adelaide,Australia; 8(1):32-42; 1989
- Exhanced Carbonate Dissolution as a Merans of Capturing and Sequestering Carbon Dioxide; Rau GH, Caldeira K , Knauss KG, Downs B & Sarv H; First National Conference on Carbon Sequestration; Washinton D.C. May 14-17, 2001; pp7; 2001
- Experimental studies of effects of enriched air nitrox dive on shortening of decompression time and reduction of risks of decompression sickness (/Japonés); Kobayashi K; Sangyo Igaku; PMID8377268; 35(4):294-301; 1993
- Expriment of Nitrox saturation diving with Trimix excursion; Shi ZY; Appl Human Sci; PMID10052222; 17(6):249-52; 1998
- Facteur limitans de la performance en haute altitude : opération Everest III, Comex*97; Richalet J.P.; Science & Sport; Comex Sa, Marseille; 18(1):11-15; 2003
- Fatty acids in human platelets and plasma.Fish oils decrease sensitivity toward N2 microbubbles; Baken A.M, Farstad M. & Holmsen H; Journal of Applied Physiology; 70(6):2669-72; 1991
- Física del Buceo y Fizziología; Viñas J (Trad) Pyle RL

-
- Física General Aplicada; Ed. Ramón Sopena S.A. Barcelona.
 - Fisicoquímica de aguas; Rodriguez Mellado JM & Marín Galvín R; Ediciones Díaz de Santos S.A; 1999
 - Fundamentos de la cromatografía de gases; Storch de Gracia JM; Alhambra Ed.
 - Gas bubbles in rats after heliox saturation and different decompression steps and rates; Skogland S, Segadal K, Sundland H & Hope A; Journal of Applied Physiology; 92(6):2633-9; 2002
 - Gas bubbles in the circulation of divers after ascending excursion from 300 to 250 msw; Brubakk AO, Peterson R, Grip A; Journal of Applied Physiology; 60:45-51; 1986
 - Gas bubbles in the circulation of divers after ascending excursion from 300 to 250 msw; Brubakk et al
 - Gas embolism due to intravenous FC 80 liquid fluorocarbon; Sass D.J. Et col; Journal of Applied Physiology; 40(5):745-51; 1976
 - Gas Solubility; AccessScienceMcGraw-Hill; McGraw-Hill International Editions; 2002
 - Glossary and Units; Recopilación; Deep Ocean Diving; 2003
 - Guidance and Control of Ocean Vehicles; Fossen, T.I.; John & Sons, New York; 1994
 - Heat stress attenuates air bubble-induced acute lung injury - A novel mechanism of diving acclimatization; Huang K-L, Wu CP, Chen YI, Kang BH & Lin YC; Journal of Applied Physiology; 10:1152-60; 2002
 - Historia del buceo. Su desarrollo en España; Ivars Perelló J & Rodríguez Cuevas T; Ediciones Mediterraneo SA; pp:396; 1987
 - History of diving: Selects events; Somers L H; Naval Medical Research Inst; 87(4):1521-31; 1999
 - How well mixed is inert gas in tissues?; Homer LD & Weathersby PK; Journal of Applied Physiology; 60(6):2079-88; 1986
 - Hydrolab. Une semaine de séjour la mer par moins 15 m de fond; Bay D; National Oceanic and Atmospheric Administration -U.S. Department of Commerce; NOAA-RSMAS; 2002
 - Hydrostatically Loaded Structures; Nash, W. A.; Pergamon, Oxford; 1995
 - Hyperbaric bradycardia and hypoventilation in exercising men : effects of ambient pressure and breathing gas; Linnarsson D, Ostlund A, Lind F & Magnus Hesser K; Journal of Applied Physiology; 87(4): 1428-32; 1999

- Implication of the Varying Permeability Model for Reserve Dive Profiles; Yount DE, Maiken EB & Baker EC; The American Academy of Underwater Sciences; pp31; 2000
- Improved probabilistic decompression model risk predictions using linear-exponential kinetics; "Thalmann ED; Parker EC, Survashi SS & Weathersby PK"; Undersea Hyperbaric Med; PMID9444058; 24(4):255-74; 2002
- Incidents in sport diving (Alemán); Buhlmann AA; Schweiz Rundsch Med Prax; PMID2711075; 78(11):295-8; 1989
- Inert gas transport in the microcirculation: risk of isobaric supersaturation; Tepper R.S, Lighfoot EN, Baz A & Lanphier EH; Journal of Applied Physiology; 46:1157-63; 1979
- Influence of levels of carbon dioxide and oxygen upon gasping in perfused rat preparation; St.Jhon W M & Rybak I A; Respiration Physiology; 129 (3) : 279-87; 2002
- Inmersiones a saturación en cámara hiperbárica; Lara-Munóz & García Gómez; PMID8377268; 35(4):294-301; 1993
- Insights on Deep Source Dive Safety From the Technical Diving Community; Pyle RL; Proceedings of the 16th Meeting of United States-Japan Cooperative Program on National Resources(UJNR) 1-3 November 2002; East West Center , Honolulu Hawaii; 2002
- Instalaciones hiperbáricas: diseño, fabricación y normas de seguridad; pp557-73;
- Instrumentation for the remote monitoring of physiological and behavioral variables; Andrews RD; Journal of Applied Physiology; 85(5):1974-81; 1998
- Intercambio pulmonar de gases; Rodriguez-Roisin R; Capítulo 8
- Instrumentation for the remote monitoring of physiological and behavioral variables; Andrews R.D.; Journal of Applied Physiology; Scripps Inst.Ocean. California; "60:; 19-32"; 1998
- In-Water Recompression; Pyle R.L. & Youngblood DA
- Is it Time to abolish the 130 fsw depth Limit?; Somers LH; Proceedings of the International Conference On Underwater Education 1992; National Association of Underwater Instructor NAUI; 1992
- La descompresión en el buceo técnico (I-IV); Medina Ferrer J; Masdebuceo
- La Plongée: anatomie et physiologie du corps humain; Splichal P; Éditions Amphora S.A; pp269; 1987
- Limits to human performance: elevated risks on high mountains; Huey R.B. & Eguskitza X; The Journal of Experimental Biology; 204(18):3115-19; 2001

- Liquid ventilation in dogs: an apparatus for normobaric and hyperbaric studies; Harris D.J., Coggin R.R., Roby J., Feezor M., Turner G. & Bennett P.B.; Journal of Applied Physiology; 54(4):1141-48; 1983
- Lithium Hydroxide , anhydrous; Micropore Inc; Micropore Inc ; MSDS0001; pp6; 2003
- LSS for Eva (Physiology); pp5; 2003
- Manual de Buceo Autónomo. Centro de Buceo de la Armada; Armada: Secretaría General Técnica; XI Edición; 2000
- Manual de Fisiología y Biofísica para estudiantes de Medicina (TOMO I); Montereano R.
- Manual de instalación, uso y mantenimiento de la Cámara iperbárica de Investigación Mod.IBERCO-50; IBERCO.SA; Iberco; pp5; 1987
- Mathematical evaluation of multi-level diving; Huggins K.E. & Somers I; Michigan Sea Grant Publications Office; Underwater Technology Laboratory University of Michigan
- Mathematical modelling of mixed gas breathing equipment and associated systems.; Lo, J.K.W.; 1995
- Mathematical models of diffusion-limited gas bubble dynamics in tissue; Srinivasan R.S, Gerth Wa & Powell MR; Journal of Applied Physiology; 86(2):732-41; 1999
- Medicina Subacuática e Hiperbárica; Gallar F; Instituto Social de la Marina; (3°Ed) pp540; 1995
- Membrane-supplied nitrox saturation: Design and dynamic modeling for life-support in construction diving; Maberry Steven Ray; UMI ProQuest Digital Dissertations; Stanford University; 311; 2002
- Method for continuous measurement of carbon dioxide out put; Newell J P; Journal of Applied Physiology; cba; 1975
- Methods of water production; Atwater J F; Oregon state edu; 7;1996
- Microbubble dynamics visualized in the intact capillary circulation; Feinstein S.B , Shan P.M. & col; J Am Coll Cardiol; PMID6470341; 4(3):595-600; 1984
- Mixed Gas Diving. The Ultimate Challenge for Technical Diving; Mount T & Gilliam Bret; Watersport Publishing, Inc; pp392; 1993
- Mixed gas transport study trough polymeric membranes : a novel technique; Dhingra SS; Faculty of the Viginia Polytechnic Institute and State University; pp173; 1997
- Mixed Gases in Diving; Wienke B.R.; Los Alamos National Laboratory; Applied Physics Division
- Mixed-gas model for predicting decompression sickness in rats; Lillo R.S. & Parker E.C.; Journal of Applied Physiology; 89(6):2107-16; 2000

-
- Model for absorption rate of gaseous CO₂ by solid hydroxides; Houston D.B, Bailey T.L., & Kumar P; Carbon dioxide sorption methods; Florida University; pp12; 1982
 - Modeling of the inert gas desaturation from the human body during saturations conducted with two-component breathing mixtures; Kot J, Sisko Z, & Doboszyski T; Proceedings of 9th International Symposium on System Modelling Control, SMC-9, Zakopane, POLAND; 1998
 - Modeling pulmonary and CNS O₂ toxicity and estimation of parameters for humans; Arieli R, Yalov A, & Goldenshluger A; Journal of Applied Physiology; 92(1):248-56; 2002
 - Modelling of inert gas desaturation from the human body during saturation decompression conducted with two-component breathing mixtures; Kotv & col; Biom.Res.Dep.(NEDU); 93(1):216-26; 2002
 - Modelos sobre absorción de gases neutros. Descompresión en ambientes hiperbáricos; Hernández González A; pp114; 2002
 - Modern decompression algorithms: models, comparisons and statistics.; Wienke B.R.; Los Alamos National Laboratory; Applied Physics Division; pp1-40; 1994
 - Molecular Sieves for purification of submarine atmospheres; Musick J.K. & Gustafson P; U.S.Naval Research Laboratory (NRL); 13:101-112
 - Narcosis: efectos narcóticos de los gases respirados a altas presiones; Medina Ferrer J; Masdebuceo.
 - Natural history of severe decompression sickness after rapid ascent from air saturation in a porcine model; Dromsky DM, Toner CB, Survanshi S, Fahlman A, Parker E & Weathersby P; Journal of Applied Physiology; Naval Medical Research Institute; 89(2):791-8; 2000
 - NDC Diving Incidents Report-2000; Cumming B; The British Sub-Aqua Club; 2000
 - Neural net robot controller with guaranteed tracking performance; Lewis, F. L., K. Liu, and A. Yesildirek; IEEE Trans. Neural Networks, 6, 703-715; 1995
 - Neurological complications of scuba diving; Newton HB; America Family Physician; 63(11):2211-8; 2001
 - Neurological Diving Accidents in Japanese Breath-Hold Dives : A preliminary report; Kohshi K, Kato T, Abe H & Okuder T; Journal of Occupational Health; 43:56-60; 2000
 - Nitrogen elimination and venous gas embolism as related to the pathophysiology of decompression sickness : Effects of age, blood lipids, and negative pressure breathing; Curry Timothy Brian; Proquest Dissertation Abstracts; New York and Buffalo State Univ.; 194; 2001

-
- Nitrogen gas exchange in human knee; Weathersby PK, Meyer P, Flynn ET, Homer ID & Survanshi S; *Journal of Applied Physiology*; 61(4):1534-45; 1986
 - Nitrogen partial pressures in man after decompression from simulated scuba dives; Radermacher P, Santak B, Muth CM, Wenzel J, Vogt L, Hahn M & Dusseldorf KJ; *Scand.J Clin Lab Invest Suppl*; PMID2089615; 203:217-21; 1990
 - Nitrogen removal from natural gas using membranes; Lokhandwala KA, Ringer M, Wijmans H & Baker R W; *Membrane Technology and Research*.
 - Nitrogen tensions in brachial vein blood of Korean ama divers; Radermacher P, Falks KJ, Park YS, Ahn DW, Hong SK, Qvist J & Zapol WM; *Journal of Applied Physiology*; 73:2592-5; 1992
 - Nitrox saturation : The Road Not Taken; Maberry Steven Ray; *Underwater Magazine*; pp5; 2001
 - NOAA Diving Manual: Diving for Science and Technology -Fourth Edition; Toiner J.T (Editor); National Oceanic and Atmospheric Administration -U.S.Department of Commerce; 2000
 - NOBENDEM: Advanced Decompression Tables; Zwart B; Davis Hyperbaric Laboratory, Brooks AFB, Texas.
 - Oceans Engineering for Today's Technology and Tomorrow's Preservation; Fryxell, D., Oliveira, P., Pascoal, A., and Silvestre, C.; 1994
 - On the absorption of gases by water other liquids; Jhon dalton; 3:72-75; 1988
 - On the likelihood of decompression sickness during H₂ biochemical decompression in pigs; Fahlman A, Tikuisis P, Himm J.F., Weathersby P.K. & Kayar S. R.; *Journal of Applied Physiology*; NMRC; 91(6):2720-9; 2001
 - On the physiology of hydrogen diving and its implication for hydrogen biochemical decompression; Fahlman A; Proquest Dissertation Abstracts; Carleton University; 197; 2000
 - Online with the RGBM: A Modern Phase Algorithm and Diveware Implementation; Wienke B.R.; Los Alamos National Laboratory; pp15
 - Oxidative Degradation of Monoethanolamine; Chi S & Rochelle GT; The First Conference on Carbon Sequestration, Washinton,DC, May 14-17,2001; pp20; 2001
 - OXTOX: If you Dive Nitrox You Should Know About OXTOX; Thalmann ED; Divers Alert Network; DAN Medical Center; 2002
 - Oxygen Enriched Air: A New Breathing Mix?; Taylor L; *IANT Journal*; pp3; 1993
 - Oxygen toxicity calculations; Parker E.C.; 1976

-
- Oxygen-Generation Systems; Wilson Mausteller J; Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology; 1996
 - Perfluorocarbon Enhanced Gas Exchange; Hlastala M.P & Sourdors J.E; Am.J.Respir.Crit.Care Med; AJRCCM; 164(1) 2; 2001
 - Performance characteristics of a "to and fro" disposable lime canister; Shaw M & Scott DH; Anaesthesia; 53(5): 454-60; 1998
 - Physics; PMID11417773; 63(11):2211-8; 2001
 - Physiologic Basis for Limits Within Semiclosed and Closed-Circuit Underwater Breathing Apparatus; Knafelc ME; Storming Media; NEDU; pp17; 2000
 - Physiology of diving of birds and mammals; Butler P. J. & Jones D.R.; Physiological Reviews; 77:837-99; 1997
 - Plant and Equipment (Session IV) en Safety of Diving Operations; Waslker PA (ed); Graham & Trotman LTD; Comision of European Communities; pp29-58; 1986
 - Predicting risk of decompressionsickness in humans from outcomes in sheep; Ball R, Lehner C.E & Parker E.C.; Journal of Applied Physiology; 86(6):1920-9; 1999
 - Prediction of barometric pressures at high altitudes with the use of model atmospheres; West J.B; Journal of Applied Physiology; 81(4):1850-4; 1996
 - Preliminary development and evaluation of an algae-based air regeneration system; Nienow JA; Life Support Biosph Sci; 7(2):203-7; 2000
 - Probabilistic model of role of oxygen in human decompression sickness; Parker E.C., Survanshi S.S., Massell P.B. & Weathersby P.K.; Journal of Applied Physiology; 84(3):1096-102; 1998
 - Procedimiento de producción de granulos absorbentes de dióxido de carbono; González González CR; Oficina Cubana de Propiedad Industrial CL22505A1; Centro Nacional de Investigaciones científicas; 1998
 - Producción de monóxido de carbono en los circuitos anestésicos .Estudio clínico y experimental de la deshidratación de la cal sodada como factor condicionante; SoroDomingo M; TESEO; Autónoma -Madrid-Medicina; 1998
 - Prolonged oxygen exposures in immersed exercising divers at 25 fsw (1.76ATA); Piantadoni Ca, Clinton RL & Thalmann ED; Undersea Biomed Res.; 6(4):347-55; 1979
 - Properties of the compartment limiting rate of nitrox and heliox saturation decompression; Sicko Z., Kot J. & Dobosznski; 25th Annual Scientific Meeting of EUBSD; European Underwater & Ba-

- romedical Society On Diving, Hiperbaric Medicine and High Pressure Biology, 28 August-2 September 1999., Haifa and Eliat, Israel; 1999
- Proyecto Cuatro Estaciones; CBA; Centro de Buceo de la Armada; 1990
 - Psychophysiological reactions in humans during an open sea dive to 500 m with a hydrogen-helium-oxygen mixture; Abraini J.H et Al; Journal of Applied Physiology; isbn0-07-118971-8; 12cap+3apen; 2001
 - Reducción de la formación de microburbujas con paradas de descompresión en aguas profundas; Marroni A; Dan Europe News; N° 4; 2001
 - Reduced Gradient Bubble Model (Buhlmann's overlay) in Abyss; Wienke B.R.; Los Alamos National Laboratory; pp2
 - Regulatory mechanisms during apnea and diving; Zentrum fur Anaesthesiologie.FRG; 73(6):2592-5; 1992
 - Regulatory mechanisms during apnea and diving; Cardiorespiratory Physiology Group; Department of Cell and Organism Biology; PMID2089615; 203:217-21; 1990
 - Relative narcotic potency and mode of action of sulfur hexafluoride and nitrogen in humans; Ostlund A, Linnarson D, Lind F & Sporrang A; Journal of Applied Physiology; 76(1):439-44; 1994
 - Repetitive Diving Workshop (Scientific Diving Safety Manual ,Alaska University); Lang MA & Vann R D; (University of Alaska, Scientific Diving Program Ap12; 1991
 - Research and development of Advanced Life Support Equipment; Webb J.T; Storming Media; 1998
 - Research on nitrogen-oxygen saturation diving with repetitive excursions; Shi ZY; J Physiol Anthropol Appl Human Sci; 19(2):101-5; 2000
 - Respiratory gas exchange at lungs, gills and tissues: mechanisms and adjustments; Piiper J; Journal of Experimental Biology; 100 (1): 5-22; 1982
 - Respiratory mechanisms in men following a deep air dive; Catron P.W, Bertocini J, Layton RP, Bradley ME & Flynn Jr ET; Journal of Applied Physiology; 61(2):734-40; 1986
 - Review of Two Methods to Remove CO₂ Using Seawater From Submarines During Emergency Conditions; Warkander DE & Lillo RS; Storming Media; NEDU; pp20; 2000
 - Role of metabolic gases in bubble formation during hypobaric exposures; Foster P.F, Conkin J, Powell MR, Waligora JM & Chhikara RS; Journal of Applied Physiology; 84(3):1088-95; 1998
 - Rules and regulations of submersibles; Bureau Veritas; PMID10052222; 17(6):249-52; 1998

-
- Safety of diving operations; Walker P.A & col; Commission of European Communities; NCHM,Poland 2002; 2000
 - Saturation effects in diving, the Model ZH-L16, operation of dive computers; Schroder K & Reith S; 2003
 - Section IV: The Respiratory System (in Textbook in Medical Physiology and Patthophysiology, Essentials and clinical problems; Paulev PE; Copenhagen Medical Publishers 1999-2000
 - Severe vertigo after a scuba-dive to 290 m; Frigg; NCHM,Israel 1999; 1999
 - Simulation of dinamic bubble spectra in tissues; Gurmen NM, Llewellyn AJ, Gilbert RA & Egi SM; IEEE Trans Biomed Eng; PIMD11296874; 48(2):185-93; 2001
 - Síndrome de hipertensión intatorácica en un buceador en apnea; Sala-Sangacine & Desola ; Medicina Clínica; 111(20):798; 1998
 - Single tissue modeling of decompression schedules; Baz A & Seireg A; Undersea Biomed Res.; Vol6,n°3,217-29; 1979
 - Small Carbon Monoxide Formation in Absorbents Does Not Correlate with Small Carbon Dioxide Absorption; Knolle E , Heinze G & Gilly H; Anesth Analg; International Anesthesia Research Society; 95:650-5; 2002
 - Soda lime- service life, consumption and cost in relation to fresh gas flow; Baum J,Enzeneauer J, Krausse T & Sachs G; Anaesthesiol Reaim; 18:108-13; 1993
 - Solubilidad de los gases en ""Ingeniería Ambiental"; Kiely G; McGraw-Hila International Editions ; pp:113-121
 - Solubilidad, molaridad y actividad osmótica de los gases; Lehmann; temp/qks45u5sw.htm; 17
 - Solubilty of inet gases in biological fluid and tissues: a review; Weathersby PK & Homer LD; Undersea Biomed Res.; 7(4):277-96; 1980
 - Solving Cold Water Breathing Problems; Morgan B, ryan P,Schultz T & Ward M; Underwater Magazine; 2001
 - Some Decompression Dilemmas (Basic Diving physics and applications); Wienke B.R.; Los Alamos National Laboratory; Flagstaff,AZ:Best; pp10; 1994
 - Specification of the NHC Saturation Diving System; National Hyperbaric Centre ,Scotland , UK
 - Stabilized bubbles in the body : pressure-radius relationships and the limits to stabilitazion; Van Liew HD & Raychaudhuri S; Journal of Applied Physiology; 82(6):2045-53; 1997

-
- Standar Methods for the Examination of Water and Wastewater 20th Edition; Clesceri L , Greenberg AE & Eaton AD; American Public Health Association; 1998
 - Standars for Mixed Gas Diving; CMAS Technical Committee-Training and Techniques Commission; CMAS; 1995
 - Submarines Atmospheres; KnightDR, Tappan DV, Bowman JS, O'Neil HJ & Gordon SM; Toxicol Lett; Naval Submarine Medical Laboratory Groton; 49:243-51; 1989
 - Sunlight supply and gas exchange systems in the microalgal bioreactor; Mori K, Ohya H, Matsunoto K, & Furune H; Adv. Space Res.; 7(4):47-52; 1987
 - Symptoms of decompression sickness as predictors of post-hyperbaric treatment outcome; Corson Karen S.; Proquest Dissertation Abstracts; Tulane University; 99; 1999
 - Table Marine Nationale 1990 MN90; Trucco JN; FFESSM; Comité interrégional Bretagne & Pays de la Loire. Commission Technique Régionale (Version du 12/11/2000; pp26; 2000
 - The control system of an autonomous underwater vehicle; Jalving, B., and Storkersen, N.; Proc. Of the Third IEEE Conf. On Control Applications. 851-856; 1994
 - The Physiology of diving with scuba; Dwyer J; The Encyclopedia of sports medicine and exercise physiology (Thomas Fahey); 46(6):1157-63; 1979
 - The 36 Most Common Diving Physiology Myths; Bookspan J; Diving Physiology in Plain English;
 - The 600 gram absorption canister: an experimental study; Jorgensen B, Jorgensen S; Acta Anaesthesiol Scand; 21(5):637-44; 1977
 - The Anesthesia Gas Machine Part 1; Dosch MP; GasNet Anesthesiology; pp5
 - The Carbon Dioxide Absorption Capacity of Amsorb is Half That of Soda Lime; Higuchi H, Adachi Y, Arimura S, Mkanno M & Satoh T; Anesth Analg; International Anesthesia Research Society; 93:221-5; 2001
 - The CO₂ absorption capacity and color indication of a newly developed soda lime (Wakolime); Tsuchiya M, Ueda W, Tomoda M, Aono H, Hasegawa T, Aono J & Yokoyama M; Masui; 40(7):1128-31; 1991
 - The convective diffusion of oxygen, carbon dioxide and inert gas in blood; Eugene Spanth E; PMID9444058; 24(4):255-74; 1997
 - The Depth and Gas Dilemma; Somers L.H; Conference Proceedings for the 1991 NAUI International Conference on Underwater Education; NAUI (ed); pp16; 1991

-
- The dynamics of bubble spectra in tissues; Gurmen NM; Proquest Dissertation Abstracts; South Florida Un; 217; 1999
 - The effects of oxygen-argon gaseous mixtures on humans in long-term hypoxia exposure under hyperbaric condition; Paulov B.N & col; Institute for Biomedical Problems; State Scientific Centre of Russian Federation
 - The Elusive Bubble; Wienke B.R.; Los Alamos National Laboratory; Applied Physics Division
 - The in vitro performance of carbon dioxide absorbents with and without strong alkali apparatus; Bedi A, Gallagher AC, Fee JP, & Murray JM; Anaesthesia; 56(6):546-50; 2001
 - The influence of CO₂ in a space-like environment : study design; Wenzel J, Luks N, Pfath G, Wilke D & Gerzer R; Aviat Space Environ Med; 69:285-90; 1998
 - The M -Values; Recopilación; Deep Ocean Diving; 2003
 - The Physiological Basis of Diving to depth: Birds and mammals; Kooyman G.L. & Pongains P.J.; Annu.Rev. Physiol; 60:19-32; 1998
 - The physiological kinetics of nitrogen and the prevention of decompression sickness; Doolette Dj & Mitchell SJ; Clin. Pharmacokinet; PMID11236806; 40(1):1-14; 1981
 - The Properties of gases and liquids; Poling BE , Prausnitz JM & O'Connell JP; McGraw-Hill International Editions ; isbn -84-291-7519-9; 391pp; 1983
 - The respiratory systems.Chapter 19: Flying,Space and Diving; Pauler P E; 1980
 - The Role of Physiology in the behaviour of diving mammals : Insights from animals in nature; Costa D P; 1986
 - The square-root principle in the calculation of one-stage (no stop) decompression tables; Behnke A.R; Undersea Biomed Res.; Vol 6 (n° 4):357-65; 1979
 - The Technical Diving Handbook; Gentile G; Gary Gentile Productions; pp:192; 1998
 - The temperature inside carbon dioxide absorbers; Lumley J & Morgan M; Anaesthesia; 31:63-8; 1976
 - Tissue oxygen and carbon dioxide stores and breath-hold diving in humans; Liner M.H. & Linnarsson D.; Journal of Applied Physiology; 77(2):542-7; 1994
 - Transcranial Doppler Ultrasound in commercial air divers: A field study including cases with right-to-left shunting; Geln SK ,Georgiadis D, Grosset DG,Douglas JD & Lees KR; Undersea Hyperbaric Med; PMID7633274; 22(2)129-35; 1995

-
- Transfer of oxygen, nitrogen, and carbon dioxide through normal adult human skin; Hansen T.N, Sonoda Y & McIlroy MB; Journal of Applied Physiology; 49:438-43; 1980
 - U.S.NAVY Diving Manual; Direction of Commander , Naval Sea Systems Command; 2001
 - un estudio de DAN confirma un mayor riesgo en las inmersiones sucesivas; Apnea; chapter 9-12
 - Underwater Systems en Elements of Ocean Engineering; Randall RE; The Society of Naval Architects and Marine Engineers; 7:181-241; 1999
 - Understanding M-values; Baker E.C.; Immersed; Vol3,nº3; 1998
 - Unsteady-stage gas exchange and storage in diving marine mammals: the harbor porpoise and gray seal; "Boutilier R.G,C.; Reed J.Z & Fedak M.A."; AJP. Am J Physiol Regul Interg Comp Physiol; 281(2):490-4; 2001
 - Use of oxygen for optimizing decompression; Berghage TE & McCracken TM; Undersea Biomed Res.; 6(3):231-9; 1979
 - Using animal data to improve prediction of human decompression risk following air-saturation dives; Lillo R.S, Him JF, Weatherby PK, Temple DJ, Gault KA & Dromsky DM; Journal of Applied Physiology; 93(1):216-26; 2002
 - Validation of half-time of nitrogen desaturation using a method of continuous decrease of a pressure in hyperbaric environment; Sicko Z & Kot J; "The XX-th Congress of the Polish Physiological Society, Wroclaw, Poland ; Sept 1996"; 1996
 - Velocity of ultrasound as an indicator of bubble content; Hills B A, Kanani B & James PB; Undersea Biomed Res.; 10(1):17-22; 1983
 - Ventilatio-perfusion lines and gas exchange in liquid breathing :theory; Mantalon S.V. & Farhi L.E.; Journal of Applied Physiology; 49(2):262-9; 1980
 - Ventilatory response to exercise in subjects breathing CO₂ or HeO₂; Babb T.G.; Journal of Applied Physiology; 82(3):746-54; 1997

Anexo

En la confección de este trabajo, he empleado el siguiente software:

- Sistema Operativo: Microsoft Windows XP Professional
- Office XP 2002: Word y Excel
- Autocad 2000
- Adobe Photoshop Elements 2.0
- Adobe Acrobat 5.0
- Microsoft Paint
- Rhinosceros 1.1