



Universidad
Zaragoza

Trabajo Fin de Grado

Desarrollo conceptual, análisis y simulación de la capacidad de transporte de un vehículo de transporte de mercancías en tubos al vacío a alta velocidad (concepto Hyperloop)

Conceptual development, analysis and simulation of the transport capacity of a freight transport vehicle in vacuum tubes at high speed (Hyperloop concept)

Autor

David Santiago Pellicer Zubeldía

Director

Emilio Larrodé Pellicer

Escuela de Ingeniería y Arquitectura

2019

Resumen:

Desarrollo conceptual, análisis y simulación de la capacidad de transporte de un vehículo de transporte de mercancías en tubos al vacío a alta velocidad (concepto Hyperloop)

En este trabajo se abordan dos sistemas de transporte de mercancías en tubos al vacío, el primero de ellos para transportar carga en contenedores y el segundo para transportar carga en cajas. Se siguen las siguientes fases:

1. Establecimiento de las hipótesis del problema y características técnicas de los vehículos.
2. Estudio de antecedentes y soluciones al problema planteado.
3. Establecimiento de las variables de medida del problema de diseño y de transporte.
4. Establecimiento de diferentes escenarios de utilización.
5. Parametrización de las variables de diseño que afectan a las prestaciones del vehículo.
6. Análisis de las características técnicas del sistema de transporte.
7. Obtención de resultados y determinación del diseño final.

Además, previamente al análisis se hace una comparación entre un tren de alta velocidad, uno de levitación magnética y el primer modelo de Hyperloop diseñado por Elon Musk.

La obtención de resultados se efectuó en el programa EES (Engineering Equation Solver), en el cual se introdujeron las ecuaciones obtenidas tras la parametrización y se variaron los parámetros para obtener diversos resultados y tendencias.

Al final se hacen cálculos para la estimación de la energía necesaria para vaciar los tubos.

Índice

1. Introducción.....	1
1.1. Objeto y justificación del trabajo:.....	1
1.2. Alcance del trabajo:	1
2. Hipótesis del problema y características técnicas de los vehículos	2
2.1. Primer modelo	2
2.2. Segundo modelo	3
2.3. Lista de hipótesis.....	4
3. Antecedentes.....	5
4. Comparación del consumo energético de un tren de alta velocidad, uno de levitación magnética y el Hyperloop.....	7
4. 1. Cálculos	7
4. 2. Tabla comparativa.....	7
4. 3. Conclusiones	9
5. Establecimiento de diferentes escenarios de utilización	9
5.1. Primer escenario	10
5.2. Segundo escenario.....	10
5.3. Geometrías propuestas	11
6. Análisis de las características técnicas de la infraestructura	12
7. Establecimiento de las variables de medida del problema de diseño y de transporte	17
7.1. Límite de Kantrowitz	18
7.2. Compresores, sistema de refrigeración y tobera	20
7.3. Rodamientos de aire	24
7.4. Arrastre aerodinámico	27
7.5. Baterías	28
7.6. Cinemática	28
7.7. Levitación y propulsión	29
7.8. Transporte.....	30
7.9. Consumo energético	32
7.10. Efecto de la curvatura del tubo	33

8. Parametrización de las variables de diseño que afectan a las prestaciones del vehículo.....	34
8.1. Límite de Kantrowitz	34
8.2. Compresores	35
8.3. Intercambiadores de calor	35
8.4. Serpentín.....	35
8.5. Depósitos de agua.....	35
8.6. Tubería a la tobera	36
8.7. Tobera	36
8.8. Rodamientos de aire	37
8.9. Arrastre aerodinámico	38
8.10. Baterías	38
8.11. Cinemática	39
8.12. Levitación y propulsión	39
8.13. Transporte.....	40
8.14. Consumo energético	41
8.15. Efecto de la curvatura del tubo	42
9. Resultados de la parametrización del primer modelo	43
9.1. Primera geometría	44
9.1.1. Límite de Kantrowitz y arrastre aerodinámico	44
9.1.2. Cinemática.....	52
9.1.3. Levitación y propulsión	54
9.1.4. Transporte y consumo energético	60
9.2. Segunda geometría	73
9.3. Tercera geometría.....	74
10. Determinación del diseño final del primer modelo	80
10.1. Primera geometría	80
10.2. Segunda geometría	86
10.3. Tercera geometría.....	86
11. Resultados de la parametrización del segundo modelo	88
11.1. Primera geometría	88
11.1.1. Límite de Kantrowitz y aerodinámica	88

11.1.2. Cinemática.....	94
11.1.3. Rodamientos de aire	95
11.1.4. Compresores y baterías	107
11.1.5. Tobera y tubería	115
11.1.6. Intercambiadores de calor, serpentín y depósitos	121
11.1.7. Propulsión	126
11.1.8. Transporte y consumo energético	129
11.2. Segunda geometría	136
11.3. Tercera geometría.....	140
12. Determinación del diseño final del segundo modelo	143
12.1. Primera geometría	144
12.2. Segunda geometría	154
12.3. Tercera geometría.....	157
13. Valores numéricos del vaciado del tubo	161
14. Revisión de las fuentes de información.....	162
15. Fuentes de información.....	166
Anexo I: Transporte neumático	170
I.1. Primer ejemplo:	171
I.2. Segundo ejemplo	177
I.3. Tercer ejemplo	184
I.4. Cuarto ejemplo	185
I.4.(a) Ascenso de la cápsula	186
I.4.(b) Descenso de la cápsula y del material	190
Anexo II: Cálculo de la potencia de un compresor	193
II.1. Demostración teórica	193
II.2. Cálculo de R , \bar{c}_p , \bar{c}_v y γ para un determinado gas ideal	196
Anexo III: Cálculos del consumo energético del AVE, el Transrapid y el Hyperloop:...	198
III.1. AVE de la serie 103	198
III.2. Transrapid TR08 con 5 secciones	200
III.3. Hyperloop, cápsula para pasajeros.....	202
Anexo IV: Justificación u origen de las ecuaciones del apartado [8]	204
IV.1. Límite de Kantrowitz.....	205

IV.2. Compresores.....	205
IV.3. Intercambiadores de calor.....	206
IV.4. Serpentín	206
IV.5. Depósitos de agua	206
IV.6. Tubería a la tobera.....	207
IV.7. Tobera.....	208
IV.8. Rodamientos de aire.....	209
IV.9. Arrastre aerodinámico.....	213
IV.10. Baterías.....	215
IV.11. Cinemática	216
IV.12. Levitación y propulsión.....	217
IV.13. Transporte	218
IV.14. Consumo energético.....	219
IV.15. Efecto de la curvatura del tubo	221
Anexo V. Cálculos de las bombas de vacío para el vaciado del tubo	222
V.1. Compresión isoterma	222
V.1.1. Demostración de las fórmulas	222
V.1.2. Resultados numéricos.....	225
V.2. Compresión adiabática con refrigeración intermedia.....	226
V.2.1. Demostración de las fórmulas	227
V.2.2. Resultados numéricos.....	229

Índice de figuras

Fig. 2.1. Comparación de los sistemas EMS y EDS.....	3
Fig. 5.1. Esquema del acomodamiento del contenedor en la cápsula.....	10
Fig. 5.2. Esquema del empaquetamiento de las cajas en la cápsula.....	11
Fig. 5.3. Geometrías propuestas.....	12
Fig. 6.1. (a) Frecuencia fundamental y (b) velocidad no dimensional en función del intervalo.....	12
Fig. 6.2. DAF según la velocidad no dimensional	13

Fig. 6.3. Diferentes disposiciones para los paneles solares.....	14
Fig. 6.5. Esquema de una sección de la infraestructura del primer modelo.....	16
Fig. 6.6. Esquema de una sección de la infraestructura del segundo modelo.....	17
Fig. 7.1. Esquema de la vista frontal del vehículo del primer modelo en el interior del tubo.....	19
Fig. 7.2. Esquema de la vista frontal del vehículo del segundo modelo en el interior del tubo.....	20
Fig. 7.3. Esquema de los compresores, del sistema de refrigeración y de la tobera	24
Fig. 7.4. Esquema de un rodamiento de aire	27
Fig. 7.5. Circuito equivalente del LIM y de la parte propulsiva del EDS	30
Fig. 7.6. Fuerzas en los rodamientos debidas a la curvatura del tubo	33
Fig. 9.1. (a) D_t frente a v . (b) β frente a v	44
Fig. 9.2. D_t en función de T_t	46
Fig. 9.3. (a) Relación entre T_f y v . (b) Relación entre F_D y v . (c) Relación entre P_D y v ..	48
Fig. 9.4. (a) T_f , (b) F_D , (c) P_D en función de $C_{D_{ext}}$	49
Fig. 9.5. Dependencia de F_D con (a) p_t y con (b) T_t	51
Fig. 9.6. Relación entre t_{tot} y v	52
Fig. 9.7. (a) Relación entre R_1 e I_1 . (b) Relación entre R_1 y V_1 . (c) Relación entre R_1 y X_1	56
Fig. 9.8. (a) I_1 según η_{EDS} . (b) P_1 según η_{EDS}	57
Fig. 9.9. (a) $F_{D_{EDS}}$ y (b) $P_{D_{EDS}}$ frente a $C_{D_{EDS}}$	59
Fig. 9.10. E'_t contra e_{bat} para tres valores de m_{Li^+}	61
Fig. 9.11. E'_t en función de v	62
Fig. 9.12. Dependencia de E'_t con $C_{D_{ext}}$	63
Fig. 9.13. Dependencia de E'_t con $C_{D_{EDS}}$	64
Fig. 9.14. Correlación entre E'_t y η_{EDS}	65
Fig. 9.15. Dependencia de E'_t con m_{tot}	66
Fig. 9.16. Relación existente entre I_e e I_c^{-1} cuando varía v	67
Fig. 9.17. (a) Correlación entre I_e e I_c^{-1} dependiendo del número de contenedores y de m_{tot} . (b) Correlación entre e'_t y m_{tot}	69
Fig. 9.18. (a) Correlación entre I_e e I_c^{-1} según el número de contenedores y la longitud (puntos 1-9). (b) Interrelación entre E'_t y L_t	70
Fig. 9.19. Correlación entre I_e e I_c^{-1} según el número de contenedores y v	71

Fig. 9.20. Interrelación entre I_e e I_c^{-1} cuando varía el llenado.....	72
Fig. 9.21. Interrelación entre R_t y v para diferentes valores de a_c	74
Fig. 9.22. En función de α las siguientes variables: (a) P_1 , (b) P_{gx} , (c) P_{DEDS} , (d) I_1	75
Fig. 9.23. Dependencia entre α y las variables: (a) E_{ac} y E_{gen} , (b) E_v , (c) E'_t y (d) e'_t	76
Fig. 9.24. (a) I_e frente a I_c^{-1} para los puntos 1-18 de la tabla anterior. (b) e'_t según α y para diferente número de contenedores.....	78
Fig. 9.25. (a) I_e frente a I_c^{-1} dependiendo de diferentes valores de α y v para 3 contenedores llenos	79
Fig. 10.1. (a) Determinación de la zona de interés de la figura [9.1.], parte (a), y (b) de la figura [9.20].....	81
Fig. 10.2. Interrelación entre I_e e I_c^{-1} para 1, 2, 3, 4 y 5 contenedores llenos.....	83
Fig. 10.3. Resultados del apartado [10.1].....	85
Fig. 10.4. Resultados del [10.3] en ascenso.....	87
Fig. 10.5. Resultados del [10.3] en descenso	87
Fig. 11.1. Valores numéricos de partida del subapartado [11.1.1]	88
Fig. 11.2. Relación entre D_t y δ_{comp} a diferente v	89
Fig. 11.3. Influencia de v en D_t dependiendo de D_c	90
Fig. 11.4. Influencia de v en D_t para diferentes T_t	92
Fig. 11.5. Efecto de v en T_f y F_D para diferentes valores de D_c	93
Fig. 11.6. Interrelación entre t_{tot} y v para las distancias propuestas.....	94
Fig. 11.7. (a) Correlación entre w y q según n_{fc} . (b) Correlación entre p_a y w según n_{fc}	98
Fig. 11.8. Relación entre η_a y p_a y p_{as} cuando varía n_{fc} y Δp_a	99
Fig. 11.9. (a) Efecto de C_L en F_L . (b) Efecto de F_L en R_a	100
Fig. 11.10. Variación de R_a con Δh	103
Fig. 11.11. Interrelación entre S y L	104
Fig. 11.12. Evolución de m_a y m_{tob} según n_{caj}	105
Fig. 11.13. Variación de n_{caj} según m_{pzs}	106
Fig. 11.14. Efecto de η_{C_1} y η_{C_2} en P_{C_1} y P_{C_2}	108
Fig. 11.15. Influencia de p_1 en P_{C_1} y P_{C_2}	109
Fig. 11.16. Interrelación entre η_{mot} y $m_{bat_{tot}}$	111
Fig. 11.17. Impacto de e_{bat} en $m_{bat_{tot}}$	114

Fig. 11.18. Relación entre p_1 y F_{tob}	116
Fig. 11.19. Dependencia de F_{tob} con T_2	117
Fig. 11.20. Diversos valores de rugosidad en función del material.....	119
Fig. 11.21. Interdependencia entre F_{tob} y p_e	120
Fig. 11.22. V_I y m_{H_2O} en función de ΔT_s	122
Fig. 11.23. V_I y m_{H_2O} en función de T_2	123
Fig. 11.24. V_I y m_{H_2O} en función de τ_1	125
Fig. 11.25. (a) e'_t en función de m_{tot} . (b) E_{ac} y E_{gen} según m_{tot} . (c) E'_t en función de m_{tot}	130
Fig. 11.26. E_t' frente a m_{tot} . e'_t frente a L_t	131
Fig. 11.27. I_e en función de I_c^{-1} para varias L_t	132
Fig. 11.28. Influencia de v en la curva $I_e - I_c^{-1}$	133
Fig. 11.29. Curva $I_e - I_c^{-1}$ con variación de ψ	134
Fig. 11.30. Curva $I_e - I_c^{-1}$ con variación de m_{pzs}	135
Fig. 11.31. R_t en función de v para varios valores de a_c	138
Fig. 11.32. (a) p_{1a} y p_{2a} en función de a_c . (b) m_{1a} y m_{2a} en función de a_c	139
Fig. 11.33. I_e en función de α	143
Fig. 12.1. Determinación de la zona de interés de la figura [11.3]	144
Fig. 12.2. Determinación de la zona de interés de la figura [11.28]	145
Fig. 12.3. Gráfico $I_e - I_c^{-1}$ con los datos de la tabla	150
Fig. 12.4. Resultados para la primera geometría	151
Fig. 12.5. Resultados para el viaje de retorno en la primera geometría.....	154
Fig. 12.6. Resultados para la segunda geometría con $\psi = 1$	155
Fig. 12.7. Resultados para la segunda geometría con $\psi = 0$	156
Fig. 12.8. Resultados de la tercera geometría, viaje de ida	158
Fig. 12.9. Resultados de la tercera geometría, viaje de vuelta	159
Fig. I.1. Detalle del sistema de transporte del primer ejemplo.....	171
Fig. I.2. Sistema muy similar al del segundo ejemplo.....	178
Fig. I.3. Sistema muy similar al del cuarto ejemplo	186

Índice de tablas

Tabla 4.1. Comparación del consumo energético de los trenes analizados	9
Tabla 9.1. Influencia de v en M , D_t y β	44
Tabla 9.2. Influencia de δ_{rc} en D_t y β	45
Tabla 9.3. Influencia de p_t en D_t y β	45
Tabla 9.4. Influencia de T_t en M , D_t y β	46
Tabla 9.5. Influencia de v en T_f , F_D , P_D	47
Tabla 9.6. Influencia de $C_{D_{ext}}$ en T_f , F_D , P_D	48
Tabla 9.7. Influencia de p_t en T_f , F_D y P_D	50
Tabla 9.8. Influencia de T_t en T_f , F_D y P_D	50
Tabla 9.9. Influencia de v en t_{ac} , t_{dec} , t_v y t_{tot}	52
Tabla 9.10. Las mismas variables en función de L_t	52
Tabla 9.11. Influencia de a_1 y a_2 en esas mismas variables.....	53
Tabla 9.12. Efecto de las variables anteriores en L_{ac} , L_{dec} y L_v	53
Tabla 9.13. Impacto de R_1 en las variables de la parte propulsiva del EDS.....	55
Tabla 9.14. Impacto de la variación de φ en los demás parámetros.....	56
Tabla 9.15. Impacto de la variación de γ_0 en los demás parámetros.....	57
Tabla 9.16. Impacto de la variación de η_{EDS} en los demás parámetros.....	57
Tabla 9.17. m_{tot} , F_x , F_z y $F_{D_{EDS}}$ para diferentes masas de los componentes y diferente número de contenedores.....	58
Tabla 9.18. Impacto de $C_{D_{EDS}}$ en $F_{D_{EDS}}$ y $P_{D_{EDS}}$ para diferentes valores de m_{tot}	59
Tabla 9.19. Impacto de e_{bat} y m_{Li^+} en E_{bat} y E'_t	60
Tabla 9.20. Impacto de η_{bat} en E_{bat} y E'_t	61
Tabla 9.21. Efecto de v en E_{bat} , E_{ac} , E_{gen} , E_v , E'_t	62
Tabla 9.22. Impacto de a_1 y a_2 en las mismas variables.....	62
Tabla 9.23. Las variables anteriores frente a $C_{D_{ext}}$	63
Tabla 9.24. Efecto de $C_{D_{EDS}}$ en las mismas variables.....	64
Tabla 9.25. Las mismas variables según η_{EDS}	65
Tabla 9.26. Influencia de m_{tot} en E'_t	65
Tabla 9.27. E'_t según f_1 , f_2 y f_3	66

Tabla 9.28. . Efecto de v en e_t , I_e , I_c e I_c^{-1}	67
Tabla 9.29. Efecto de m_{tot} en las mismas variables	68
Tabla 9.30. Influencia de L_t en las E_t' y en las demás variables analizadas	69
Tabla 9.31. Efecto de v en las variables estudiadas	70
Tabla 9.32. Efecto de la variación de f_1 , f_2 y f_3 en las variables analizadas	71
Tabla 9.33. R_t según v y a_c	73
Tabla 9.34. Efecto de la variación de α en el EDS.....	75
Tabla 9.35. Efecto de α en E_{ac} , E_{gen} , E_v , E_t' y e_t'	76
Tabla 9.36. Impacto de α en E_t' , I_c e I_e para 1,2 y 3 contenedores llenos	77
Tabla 9.37. Influencia de α y v en las mismas variables	79
Tabla 10.1. Mismas variables para más contenedores.	82
Tabla 11.1. Influencia de δ_{comp} y v en D_t y β	89
Tabla 11.2. Correlación entre v y D_t y β cuando varía n_{fc}	90
Tabla 11.3. Influencia de v en D_t y β	91
Tabla 11.4. Efecto de v y n_{fc} en T_f , F_D y P_D	92
Tabla 11.5. Influencia de v y L_t en las longitudes y los tiempos	94
Tabla 11.6. Efecto de n_{fc} y q en w , n_a , p_a , m_a	98
Tabla 11.7. Efecto de η_a y Δp_a en p_a , p_aS y m_a dependiendo de n_{fc}	98
Tabla 11.8. Efecto de C_L en FL , p_a y R_a cuando varía n_{fc}	100
Tabla 11.9. Efecto de d en n_a y p_a	101
Tabla 11.10. Efecto de h_1 y h_2 en m_a , F_v y P_v	101
Tabla 11.11. Efecto de T_a y $\mu_a(T_a)$ en m_a , F_v y P_v	102
Tabla 11.12. Impacto de n_{fc} y c_a en m_a	102
Tabla 11.13. Efecto de Δh en R_a según n_{fc}	103
Tabla 11.14. Influencia de L y n_{fc} en S y n_a	104
Tabla 11.15. Evolución de n_a , p_aS , S , mC_1 , m_a , m_{tob} , L_c y m_{tot} en función de n_{caj} y n_{fc}	105
Tabla 11.16. Variación de las mismas variables en función de n_{fc} , $mpzs$ y n_{caj}	106
Tabla 11.17. Influencia de η_{C_1} y η_{C_2} en T_1 , T_3 , PC_1 , PC_1 , PC_2 y $m_{bat_{tot}}$	107
Tabla 11.18. Influencia de p_1 en las variables anteriores	109
Tabla 11.19. Impacto de T_2 en PC_2 y $m_{bat_{tot}}$	110
Tabla 11.20. Impacto de η_{mot} en $m_{bat_{tot}}$	111

Tabla 11.21. Impacto de C en $m_{bat_{tot}}$	112
Tabla 11.22. Impacto de τ_2 en $m_{bat_{tot}}$	113
Tabla 11.23. Impacto de e_{bat} en $m_{bat_{tot}}$	114
Tabla 11.24. Impacto de p_1 en Δp_{tub} , p_{tob} , D_{tub} , F_{tob} y P_{tob}	116
Tabla 11.25. Efecto de T_2 en las variables anteriores.....	117
Tabla 11.26. Efecto de c_{tub} en las mismas variables.....	118
Tabla 11.27. Influencia de ε_{tub} en las mismas variables.....	118
Tabla 11.28. Influencia de η_{tob} en c_e , T_e , A_e , F_{tob} y P_{tob}	119
Tabla 11.29. Influencia de p_e en las mismas variables.....	120
Tabla 11.30. Influencia de ΔT_{I_1} en VI, VII, VIII y mH2O.....	121
Tabla 11.31. Efecto de ΔT en las mismas variables.....	122
Tabla 11.32. Influencia de T_2 en T3, VI, VII, VIII y mH2O.....	123
Tabla 11.33. Impacto de T_a en las mismas variables.....	124
Tabla 11.34. Impacto de τ_1 en dichas variables.....	125
Tabla 11.35. Valores de m_{tot} , F_x , V_1 , I_1 y P_1 en función de las variables n_{caj} , $m_{est'}$, $m_{LIM'}$, m_{EB} , m_a , m_{comp} y m_{mot}	127
Tabla 11.36. Resultados de las mismas variables cuando varía ψ	128
Tabla 11.37. Resultados de las mismas variables cuando varía m_{pzs}	128
Tabla 11.38. Masas definitivas según la disposición de las cajas.....	129
Tabla 11.39. Influencia de las masas en E_{bat} , E_{ac} , E_{gen} , E_v , $E_{t'}$ y $e_{t'}$	129
Tabla 11.40. Mismo estudio que antes, aunque variando ψ	131
Tabla 11.41. Dependencia entre dichas variables y L_t	131
Tabla 11.42. Efecto de la variación de L_t en I_e e I_c	132
Tabla 11.43. Influencia de v en I_e e I_c	133
Tabla 11.44. Efecto de ψ en los índices.....	134
Tabla 11.45. Impacto del par $n_{caj}-m_{pzs}$ en los índices.....	135
Tabla 11.46. R_t para varias combinaciones $a_c -v$	137
Tabla 11.47. Valores iniciales para los parámetros de los cojinetes de ambos lados .	138
Tabla 11.48. p_{ia} , p_{iaS} , F_{iv} , P_v , R_{ia} , m_{ia} , m_a , m_{tob} y m_{C1} en función de a_c y de las entradas de la tabla anterior.....	139
Tabla 11.49. m_{tot} , E_{ac} , E_{gen} , E , I_e , $E_{t'}$ y $e_{t'}$ según a_c .	140
Tabla 11.50. Efecto de α en los consumos.....	141

Tabla 11.51. Efecto de α en los índices	142
Tabla 12.1. Cálculo para cada caso de I_e , I_c e I_c^{-1} partiendo de los valores antedichos	149
Tabla 12.2. Valores de E'_t en función de α y ψ	160
Tabla 13.1. Valores numéricos del vaciado de 1 km de tubo con una bomba isoterma	161
Tabla 13.2. Valores numéricos del vaciado de 1 km de tubo con una bomba adiabática	161

1. Introducción

1.1. Objeto y justificación del trabajo:

El objeto general de este trabajo es abordar el problema del transporte de mercancías en un medio de transporte novedoso como el Hyperloop. Hasta ahora se ha tratado más el transporte de viajeros, lo cual justifica la necesidad de estudiar la otra parte.

El objeto específico de este trabajo es parametrizar las prestaciones y características generales de un sistema de transporte de contenedores en tubos al vacío y otro de transporte de cajas. Gracias a esta parametrización es posible realizar una simulación y obtener resultados numéricos que muestran el comportamiento de los sistemas en función de los parámetros de partida. Finalmente, cotejando estos resultados se dimensionan los sistemas.

1.2. Alcance del trabajo:

El análisis se va a centrar en el transporte de mercancías en vez de en el transporte de pasajeros porque es algo que no se ha tratado mucho hasta la fecha y, además, se añade el problema del peso. Además, en el transporte de pasajeros hay que tener en cuenta la ergonomía y medidas de seguridad avanzadas, que no se consideran en el transporte de mercancías.

Los cálculos de los siguientes temas son objeto de otro estudio:

1. Fenómenos de transferencia de calor en el tubo.
2. Detalles del sistema de refrigeración.
3. Estructura de los vehículos.
4. Frenado de emergencia de los vehículos.
5. Infraestructura.
6. Mantenimiento de las condiciones de vacío.
7. Balance de energía de las placas solares.
8. Sistema eléctrico de los vehículos o de la infraestructura.
9. Control y estabilidad del sistema.
10. Economía del Hyperloop.
11. Parámetros geométricos del EDS y del LIM.
12. Discretización del LIM.

2. Hipótesis del problema y características técnicas de los vehículos

Se van a proponer dos modelos para el transporte de mercancías: Uno adaptado para el transporte de contenedores y otro para el transporte de cajas. Los vehículos tendrán dimensiones diferentes en cada caso y las tecnologías empleadas se van a variar de una tipología a la otra.

2.1. Primer modelo

El primer modelo transportará contenedores de aluminio de 20 pies longitud. Habrá varios vehículos con un contenedor cada uno por cada tren. Frente a los rodamientos de aire se hará uso de la levitación magnética, que se ha demostrado que es capaz de soportar un gran peso en las líneas de levitación magnética existentes. Al emplear la levitación magnética no es necesario ningún flujo másico de aire comprimido para la levitación, por lo que si se prescinde de la tobera propulsiva se puede prescindir también de los compresores, así que habrá que tener especial cuidado con el límite de Kantrowitz [13]. Hay dos sistemas de levitación magnética que podrían emplearse:

1. Suspensión electromecánica (EMS): Se basa en fuerzas de atracción en vez de fuerzas de atracción y repulsión. El tren está diseñado con dos perfiles en forma de 'C' que se adaptan a una pista sustentada por pilares cónicos. Entre los perfiles y la pista aparecen fuerzas atractivas que obligan al tren a levitar. También tiene imanes adicionales para el guiado. Como desventaja, este sistema requiere un complejo control para que las fuerzas se mantengan y el tren levita perfectamente a bajas velocidades.
2. Suspensión electrodinámica (EDS): Este sistema, en cambio, se basa en la repulsión magnética. El tren tiene imanes superconductores en el chasis y las guías ejercen un campo magnético deslizante. En la guía también hay bobinas pasivas para la levitación. Conforme la cápsula se desplaza sobre las bobinas pasivas, los imanes del chasis inducen una corriente en dichas bobinas. En consecuencia, el tren es capaz de levitar y propulsarse debido a las fuerzas repulsivas y atractivas de los polos norte y sur. Una ventaja frente al EMS es que se autocontrola, pero como contrapartida la cápsula solamente levita cuando la fuerza del campo magnético inducido es igual a su peso, lo cual sucede cuando la inducción es suficientemente importante, condición que no se satisface a bajas velocidades [1].

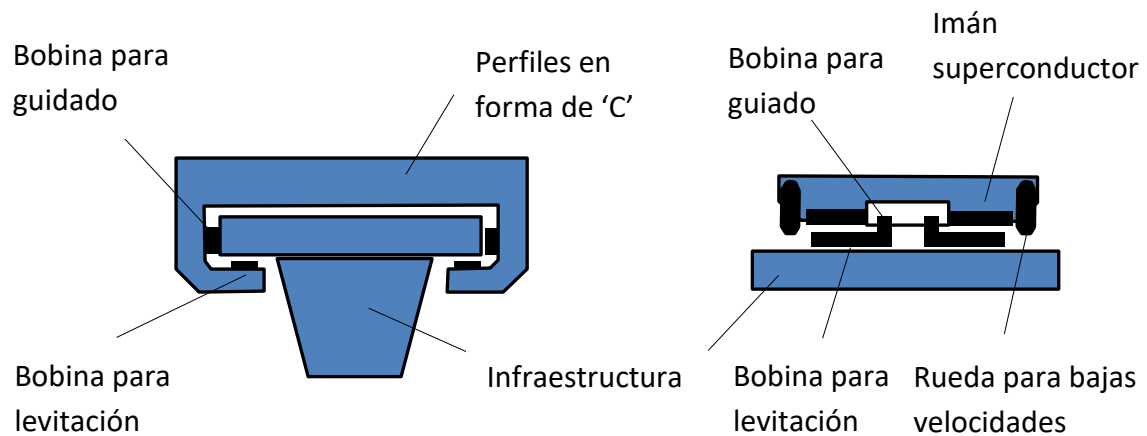


Fig. 2.1. Comparación de los sistemas EMS y EDS. Fuente: Elaboración propia.

Para este primer modelo se va a emplear un sistema EDS mejorado que puede levitar a bajas velocidades sin necesidad de ruedas, ya que no requiere un control tan sofisticado y es más sencillo de construir. El sistema EDS tradicional se puede modelar como un motor de inducción lineal (LIM) para el sistema de levitación y el control de la fuerza y como un motor síncrono lineal de rotor corto (LSM) para la propulsión, por lo que se deberá sustituir el LIM por el LSM para poder levitar a bajas velocidades o a velocidad nula [1]. Respecto a la seguridad del modelo, este contará con un freno de emergencia mecánico como propuso Elon Musk [18, p. 55].

2.2. Segundo modelo

El segundo modelo transportará cajas de cartón ondulado. A diferencia del primero levitará mediante el uso de rodamientos de aire, puesto que son más económicos que un sistema de levitación magnética [18, p. 20] y más apropiados para el transporte de cajas que para el de mercancías porque aquel se asemeja más a los modelos de transporte propuestos por Elon Musk en la referencia [18] en cuanto a peso y dimensiones, así que se podrán emplear los rodamientos de aire propuestos por Musk con poca variación. Dichos rodamientos serán alimentados por aire comprimido por dos compresores axiales. El primer compresor, que también servirá para evitar el límite de Kantrowitz entre la cápsula y el tubo [13], estará situado en el frontal del primer vehículo y de él saldrá aire comprimido caliente. El aire será enfriado en un intercambiador de calor agua-aire, después se derivará una parte hacia una tobera propulsiva localizada al final del tren y la otra parte hacia un segundo compresor. Este segundo compresor suministrará aire comprimido a la presión de entrada a los rodamientos tras haberlo enfriado en un segundo intercambiador de calor para bajar la temperatura de aplicación a los rodamientos. Por su parte, la tobera propulsiva mitigará hasta cierto punto la resistencia al avance. Puesto que la cápsula será

acelerada por un motor de inducción lineal (LIM), el deslizador (equivalente al rotor en un motor rotativo) de dicho motor irá montado sobre la cápsula, es decir, sobre los vehículos. El circuito de refrigeración comenzará en un depósito de agua, después se bombeará el agua hacia los intercambiadores de calor, donde se evaporará al absorber calor y, finalmente, condensará al ceder calor a un serpentín y se almacenará en otro depósito. Al final del trayecto se repondrán los depósitos. Respecto al consumo energético de los compresores y de la bomba de agua, esta energía será entregada por un conjunto de baterías situadas en la parte trasera de la cápsula. Finalmente, este modelo incorporará un freno de emergencia mecánico.

2.3. Lista de hipótesis

1. La velocidad a la que circula el tren es subsónica.
2. El aire se trata como gas ideal en todos los casos, ya que es una buena aproximación para los rangos de temperaturas y presiones del problema.
3. La contracción que el gas experimenta al pasar a la corona circular definida entre la cápsula y el tubo se considera isoentrópica.
4. La aceleración y desaceleración de la cápsula es constante.
5. El área frontal de los rodamientos de aire, del eje del compresor, del estátor y deslizador del LIM y del sistema EDS son despreciables en comparación con las demás áreas frontales.
6. Las fuerzas estabilizantes que induce el LIM en la cápsula son despreciables.
7. La fuerza de arrastre del sistema EDS se considera una pérdida externa que aumenta la resistencia al avance del tren. Por tanto, no aparece en la expresión del rendimiento del EDS.
8. Las pérdidas de potencia activa del LIM o del EDS se modelan con una única resistencia en el estátor.
9. Las tolerancias dimensionales del tubo son lo suficientemente pequeñas para que los rodamientos de aire no rocen con las irregulares del tubo.
10. Los rodamientos de aire se adaptan radialmente a la geometría del tubo de forma perfecta, por lo que el espesor inicial y final de la película de aire bajo ellos no varía con el radio.
11. El flujo másico de aire que entra por la sección frontal de los rodamientos de aire es despreciable.
12. Todo el aire suministrado a los rodamientos de aire escapa por la sección trasera, despreciándose las fugas por las secciones laterales.
13. El flujo de la película de aire bajo los rodamientos se comporta perfectamente como el flujo de Couette combinado con el de Poiseuille (flujo de Couette-Poiseuille).

14. La potencia media consumida por el compresor que alimenta a los rodamientos se considera igual a la máxima durante la aceleración y la frenada.
15. La potencia media disipada por el arrastre del sistema EDS se considera la mitad de la máxima durante la aceleración y la frenada.
16. La potencia media ofrecida por la tobera se considera un cuarto de la máxima durante la aceleración y la frenada.
17. Los compresores, la tobera, los intercambiadores de calor, los depósitos y todas las tuberías exceptuando la tubería a la tobera se consideran adiabáticos.
18. En la tubería a la tobera se considera flujo isoterma y con velocidad constante (se desprecia la variación de velocidad debida a la pérdida de carga).
19. El agua sale del primer intercambiador de calor en fase vapor a 100 °C y tras pasar por el segundo se enfría en el serpentín y se almacena en el segundo depósito en fase líquida justo por debajo de 100 °C.
20. Se asume que la velocidad transversal al área del aire no varía a lo largo de los compresores.
21. En el estudio aerodinámico analítico se desprecia el efecto de la succión trasera y de la longitud del vehículo.
22. Se considera que la capa límite es continua y envuelve todo el vehículo, sin tenerse en cuenta su rotura por parte de los elementos salientes.
23. En la geometría curva el rotor del LIM y el rotor de la parte propulsiva del EDS están centrados en todo momento respecto al estátor, por lo que no aumenta la distancia deslizador-estátor o imanes-estátor y, en consecuencia, tampoco se incrementa la potencia propulsiva.
24. Se considera que en la geometría curva la distribución de presiones se adapta a ambas cargas: la gravitatoria y la centrífuga, que son perpendiculares.

3. Antecedentes

El transporte de mercancías en tubos al vacío tiene varios antecedentes. El primer antecedente es el tren atmosférico, ideado por el ingeniero británico George Medhurst. George Medhurst desarrolló en 1800 su motor eólico, el cual serviría para propulsar vehículos mediante el uso de aire comprimido. En 1810 publicó "Un nuevo método para transportar cartas y mercancías con gran seguridad y rapidez por aire", en el que describía un ferrocarril neumático propulsado por aire comprimido y cuya infraestructura consistía en un tubo de hierro de 1,8 m de altura y 1,5 m de anchura con carriles en su interior [23]. Paralelamente, el ingeniero británico William Murdoch desarrolló el transporte neumático por tubos, que consistía en el envío de mensajes en el interior de cilindros propulsados por aire comprimido a través de un tubo [24].

Estos nuevos sistemas de transporte se comenzaron a utilizar a mediados del S. XIX en ciudades como Dublín, Londres y París para el transporte de paquetes [22]. Un ejemplo

de este sistema de transporte es el utilizado entre Exeter y Newton entre 1847 y 1848. En él los trenes se movían aspirados por el vacío a una velocidad de 32 km/h y se utilizaban tubos de 381 mm de diámetro si estaban nivelados y tubos de 559 mm si se usaban para salvar desniveles [25]. En 1859 se fundó la London Pneumatic Despatch Company (Compañía de envíos neumáticos de Londres), que se encargaba sobre todo del transporte de mercancías en cápsulas dotadas de ruedas a través de tubos [26]. Fue esta compañía la que en poco después agrandó la infraestructura, haciendo posible el transporte de pasajeros. El transporte de pasajeros en condiciones semejantes también se llevó a cabo en el Hyde Park de Londres (impelido por un ventilador de 6,7 m de diámetro) y en Manhattan (predecesor del metro de Nueva York e impelido por aire comprimido). Este método de transporte se fue popularizando en Europa y Estados Unidos y a finales del S. XIX ya se empleaba en muchos edificios para el transporte de mensajes [22]. Concretamente, en Estados Unidos fue William Stickney Lamson el que desarrolló la producción industrializada del sistema de envío encapsulado, por lo que se conoce como “tubo Lamson”. Las velocidades de las cápsulas impulsadas por vacío o aire comprimido iban de los 27 a los 36 km/h [28]. Véase el anexo I para más información acerca del transporte neumático.

En 1910 el ingeniero estadounidense Robert Hutchings Goddard diseñó un tren que iría de Boston a Nueva York en tan solo 12 minutos. El ferrocarril iría dentro de un tubo al vacío y levitaría magnéticamente [22]. Un concepto similar, aunque sin bombas de vacío, fue publicado por el catedrático ruso Boris Weinberg en 1914 en su libro “Movimiento sin fricción” [13]. Años más tarde, en 1945, Goddard patentó su idea, aunque nunca llegaría a construirse [20]. A lo largo del S. XX algunos escritores de ciencia ficción hablaron de los tubos al vacío [22] y a la vez el concepto de tren al vacío fue tomando forma, gracias también a las mejoras industriales en bombas de vacío. Robert Salter propuso un sistema de tren al vacío accionado electromagnéticamente cuya energía se recuperaría en las frenadas. También se propuso el sistema VHST (*Very high speed transit* o Tránsito a muy alta velocidad), en el cual se compartirían tubos con oleoductos, gasoductos y conducciones de agua. [13]. A principios de la década de 1990 unos investigadores del MIT diseñaron un tren magnético que operaría en un tubo al vacío y recorrería la distancia entre Boston y Nueva York en 45 minutos [22]. En esta década también surgen propuestas como el SwissMetro. [13] Diez años más tarde la empresa ET3 diseñó ETT (*Evacuated tube transport* o Transporte en tubos evacuados), un tren de levitación magnética neumático que funcionaría en tubos elevados. Diez años después se desveló un proyecto sobre el transporte subterráneo de comida por vacío a 96 km/h [22]. Finalmente, en 2012 el ingeniero y empresario Elon Musk introdujo el concepto Hyperloop (*hyper* (hiper) más *loop* (lazo, bucle)) [27] y en 2013 desveló su diseño de una línea Hyperloop entre Los Ángeles y San Francisco. Esta línea de 563 km [18, p. 26] constaría de dos tubos de acero (uno para cada sentido de la marcha) [18, p. 6] sostenidos sobre pilares separados cada 30 m [18, p. 10] a una altura promedio de 6 m [18, p. 28]. La velocidad

de las cápsulas de 28 pasajeros [18, p. 6] sería de 1.220 km/h y la presión interna de los tubos se mantendría en 100 Pa [18, p. 12]. Podría construirse una versión para pasajeros con un diámetro de tubo de 2,23 m [18, p. 26] y otra para pasajeros y carga con un diámetro de 3,3 m [18, p. 23] con un coste total estimado para la primera de 6.000 millones de dólares y para la segunda de 7.500 millones de dólares [18, pp. 56-57].

4. Comparación del consumo energético de un tren de alta velocidad, uno de levitación magnética y el Hyperloop

Para colocar el Hyperloop en el contexto ferroviario es necesario comparar su consumo energético, es decir, sus costes de explotación, con los costes de explotación de un tren de alta velocidad como el AVE y con los de un tren de levitación magnética como el Transrapid. Para ello se van a calcular el coste energético de mantener cada tren a plena velocidad, el coste de acelerar cada uno de ellos hasta su velocidad punta o de operación y la energía recuperada durante el frenado. Se va a considerar que los trenes circulan por tramos con pendiente nula y rectilíneos. Además, en el caso del AVE y del Transrapid no se van a considerar ni el efecto de los túneles ni el del viento, factores que junto a las rampas y las curvas incrementan la resistencia al avance de un tren [10, p. 53]. En concreto, se van a obtener los resultados para el AVE de la serie 103, el Transrapid TR08 con 5 secciones y el Hyperloop concebido únicamente para pasajeros diseñado por Elon Musk.

4. 1. Cálculos

Léase el anexo [III], que recoge las fórmulas aplicadas y su aplicación para la obtención de los resultados.

4. 2. Tabla comparativa

Se van a recopilar todos los resultados en la siguiente tabla. Se va a calcular también el consumo energético global de una ruta E'_{ruta} [kWh/km], para lo cual hay que sumar debidamente E'_{red} , E'_{acred} y E'_{gen} , teniendo en cuenta las distancias sobre las que actúa cada uno de estos términos. En general para una ruta de longitud L [km]:

$$E'_{ruta} = \frac{E'_{red}(L - 2L_{ac}) + (\bar{E}'_{acred} + \bar{E}'_{gen})L_{ac}}{L} \quad [\text{Ec. 4.1}]$$

Donde L_{ac} [km] es la distancia que tarda el tren en acelerar o frenar y se halla con la siguiente fórmula:

$$L_{ac} = \frac{1}{2} a \left(\frac{v}{a} \right)^2 10^{-3} \quad [\text{Ec. 4.2}]$$

Donde la velocidad v se expresa en m/s y la aceleración a en m/s^2 .

Como L_{ac} es fijo e independiente de L , cada vez será menor la razón L_{ac}/L y E'_{ruta} variará al tener menor importancia relativa $\bar{E}'_{acred} + \bar{E}'_{gen}$ frente a E'_{red} . Es por este motivo que es conveniente realizar los cálculos para una ruta de 250 km, otra de 500 km, otra de 750 km y otra de 1.000 km y realizar un promedio al final entre los cuatro valores para hallar \bar{E}'_{ruta} .

Finalmente, es habitual dividir los costes energéticos de explotación por el número de pasajeros en el caso de transporte de pasajeros (empleándose la unidad kWh/pkm) o por el número de toneladas transportadas (siendo la unidad kWh/tkm) en el caso de transporte de mercancías. En principio se va a dividir por el número de viajeros, ya que los tres trenes analizados llevan viajeros únicamente. Pero también puede suponerse que se reemplaza el peso de los viajeros y del equipaje (100 kg por plaza) por carga, por lo que se va a dividir también por la carga transportada por cada tren.

Dicho esto, la tabla queda tal que así:

	AVE S-103	Transrapid TR08 con 5 secciones	Hyperloop, cápsula para pasajeros
Velocidad de operación [km/h]	300	430	1.220
Número de viajeros	405	446	28
Peso útil [t]	40,500	44,600	2,800
Peso en vacío [t]	425	282	12,200
Peso total [t]	465,500	326,600	15
E'_{red} [kWh/km]	19,222 a 300 km/h	31,084 a 430 km/h	0,582 a 1.220 km/h
\bar{E}'_{acred} [kWh/km]	41,275	91,757	58,393
\bar{E}'_{gen} [kWh/km]	-1,870	-28,579	-28,613
$\bar{E}'_{acred} + \bar{E}'_{gen}$	39,405	63,178	29,780
L_{ac} [km]	14,838	12,320	5,854
E'_{ruta} (L=250 km)	19,279	31,134	1,252
E'_{ruta} (L=500 km)	19,251	31,109	0,917
E'_{ruta} (L=750 km)	19,241	31,101	0,805
E'_{ruta} (L=1.000 km)	19,236	31,096	0,750
\bar{E}'_{ruta} [kWh/km]	19,252	31,110	0,931
$\frac{\bar{E}'_{ruta}}{N.º \text{ pas.}}$ $\left[\frac{\text{kWh}}{\text{pkm}} \right]$	$4,754 \cdot 10^{-2}$	$6,975 \cdot 10^{-2}$	$3,325 \cdot 10^{-2}$
$\frac{\bar{E}'_{ruta}}{\text{Peso útil}}$ $\left[\frac{\text{kWh}}{\text{tkm}} \right]$	$4,754 \cdot 10^{-1}$	$6,975 \cdot 10^{-1}$	$3,325 \cdot 10^{-1}$

Tabla 4.1. Comparación del consumo energético de los trenes analizados. Fuente: Elaboración propia.

4. 3. Conclusiones

Comparando el AVE S-103 con el Transrapid TR08 con 5 secciones se aprecia que el segundo consume más que el primero. El consumo medio global del Transrapid es 31,110 kWh/km frente a los 19,252 kWh/km del AVE, lo cual es debido principalmente a que circula a 130 km/h más y la resistencia aerodinámica aumenta mucho, aunque hay otros factores como el menor rendimiento de los motores de inducción lineal frente a los rotativos (70 % y 90 %, respectivamente). La capacidad de transporte de pasajeros (o carga equivalente) de ambos es muy similar (405 y 446 viajeros), por lo que después de dividir se sigue apreciando que el AVE consume menos que el Transrapid, así que es menos costoso transportar un pasajero o una tonelada de carga en el primero. La ventaja del segundo, no obstante, es la mayor velocidad.

Si se coteja el Hyperloop con el AVE lo primero que se aprecia es que el Hyperloop consume globalmente 0,931 kWh/km frente a los 19,252 kWh/km del AVE, es decir, unas 20 veces menos. Es importante notar que la energía consumida por el Hyperloop por unidad de longitud es muy sensible con la longitud de la ruta, ya que disminuye bastante con la longitud. Dicha disminución se debe a que el lanzamiento de una cápsula de 15 t con una aceleración de $9,810 \text{ m/s}^2$ hasta los 1.220 km/h conlleva un consumo energético muy elevado y esta energía pierde relevancia frente al resto del consumo energético en rutas muy largas.

En conclusión, el Hyperloop es muy ventajoso respecto al AVE y al Transrapid porque consume globalmente de media unas 20 y unas 33 veces menos, respectivamente, y transportar un pasajero o una tonelada de carga es más económico en el él que en los otros, más todavía cuanto mayor sea la distancia. Además, su velocidad de operación es más de 4 veces superior a la del AVE y casi 3 veces superior a la del Transrapid, con lo que la duración de cada viaje se reduce en el mismo factor.

5. Establecimiento de diferentes escenarios de utilización

Se establecen dos escenarios de utilización de los vehículos. Después se establecen tres geometrías distintas para la ruta aplicables a ambos escenarios:

5.1. Primer escenario

El primer escenario es el transporte de contenedores marítimos de 20 pies de longitud de aluminio entre un puerto y un centro de distribución que pueden distar 500, 750 o 1.000 km. Dichos contenedores son del tipo *Dry Van* y cada uno de ellos cuenta con unas dimensiones externas de 6.058x2.438x2.591 mm (longitud, anchura y altura), una tara de 2.180 kg y puede transportar hasta 28.300 kg [29]. Cada tren transportará varios vehículos con un contenedor cada uno. Para que el envío de contenedores sea casi continuo, la frecuencia de envío será elevada y se dispondrá de dos tubos, el segundo de ellos para que retornen los trenes al puerto cargados con otras mercancías para su exportación.

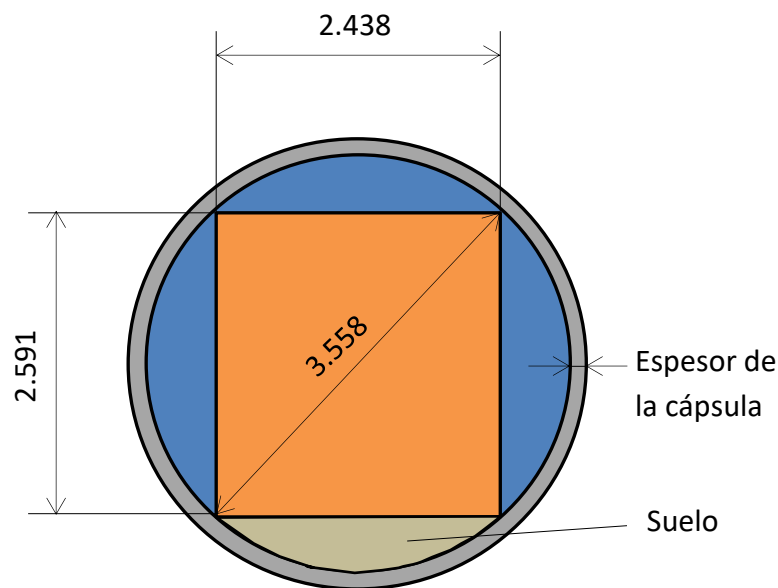


Figura 5.1. Esquema del acomodamiento del contenedor en la cápsula. Cotas en milímetros. Fuente: Elaboración propia.

5.2. Segundo escenario

El segundo es el transporte de cajas de cartón ondulado entre dos empresas que pueden distar 200, 350 o 500 km. Dichas cajas tienen unas dimensiones de 250x200x200 mm (valores de longitud, anchura y altura normalizados en el mercado [30]) y son de cartón ondulado doble, por lo que pueden transportar hasta 70 kg cada una [31]. La primera empresa genera piezas de acero que la segunda necesita como materias primas justo a tiempo para su producción, evitándose así costes de inventario. Esta línea únicamente tendrá un tubo, por lo que el tren tendrá que ir y volver por el mismo tubo. Llegará el tren a la fábrica cargado de cajas, se descargarán y el vehículo regresará vacío a la primera fábrica para ser cargado de nuevo. Entre tanto, los requisitos de materia prima serán satisfechos por las cajas previamente

descargadas, por lo que el número de cajas transportadas deberá ser igual a las necesidades materiales de la producción durante el tiempo que tarde el vehículo en volver a la primera estación, ser cargado, llegar a la segunda estación y ser descargado.

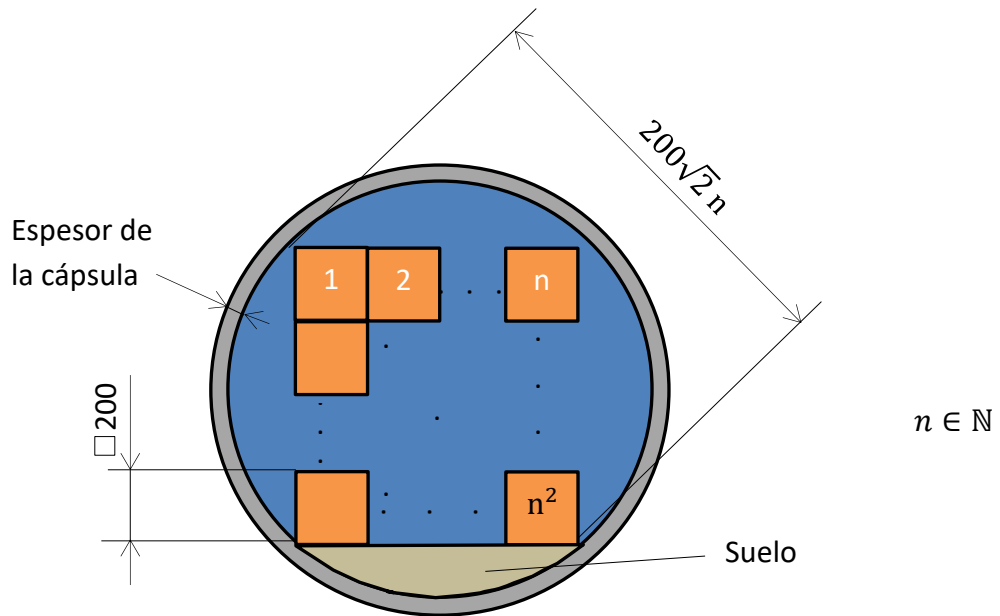


Fig. 5.2. Esquema del empaquetamiento de las cajas en la cápsula. Cotas en milímetros. Fuente: Elaboración propia.

5.3. Geometrías propuestas

Se proponen tres geometrías para ambos escenarios de transporte: Una trayectoria rectilínea y con pendiente nula, una curva y una última rectilínea y con desnivel:

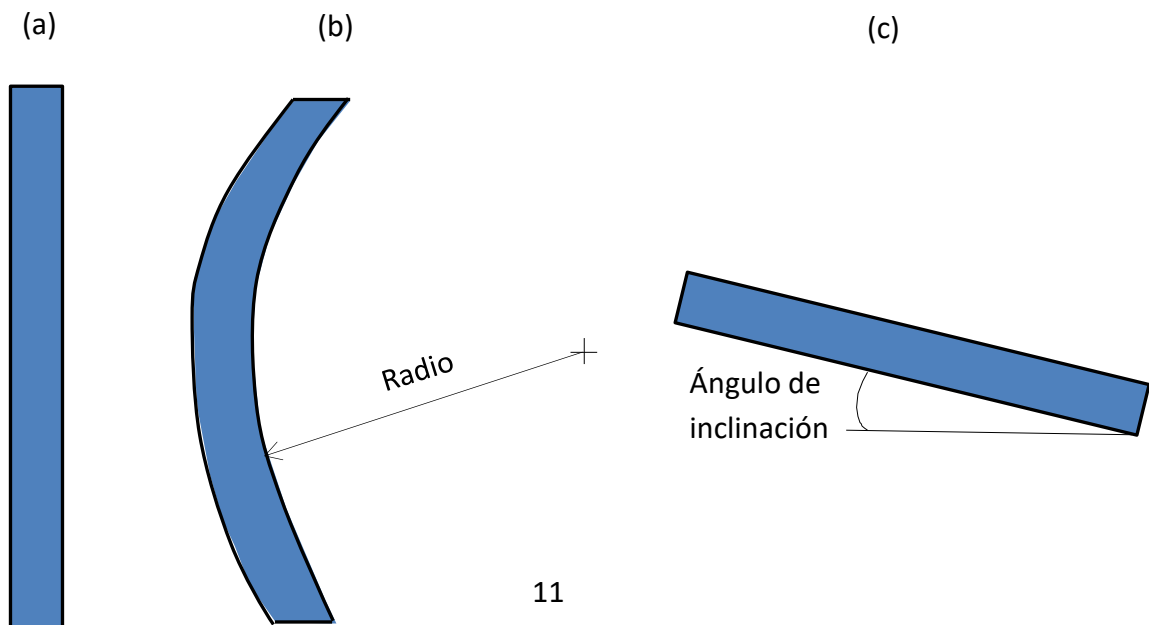


Fig. 5.3. (a) Trayectoria rectilínea y con pendiente nula vista en planta. (b) Trayectoria curva en planta. (c) Trayectoria rectilínea e inclinada vista de perfil. Fuente: Elaboración propia.

6. Análisis de las características técnicas de la infraestructura

La infraestructura consistirá en ambos casos en un tubo sostenido sobre pilares. En la figura de la izquierda se observa que la frecuencia fundamental de vibración de cada *punte* (cada par de pilares se define un *punte*) aumenta a medida que la distancia entre pilares disminuye, por lo que los pilares no pueden estar muy próximos si se quiere evitar la resonancia o frecuencias de vibración demasiado elevadas. Además, como se aprecia en la figura de la derecha, la velocidad adimensional decrece con dicha distancia [3].

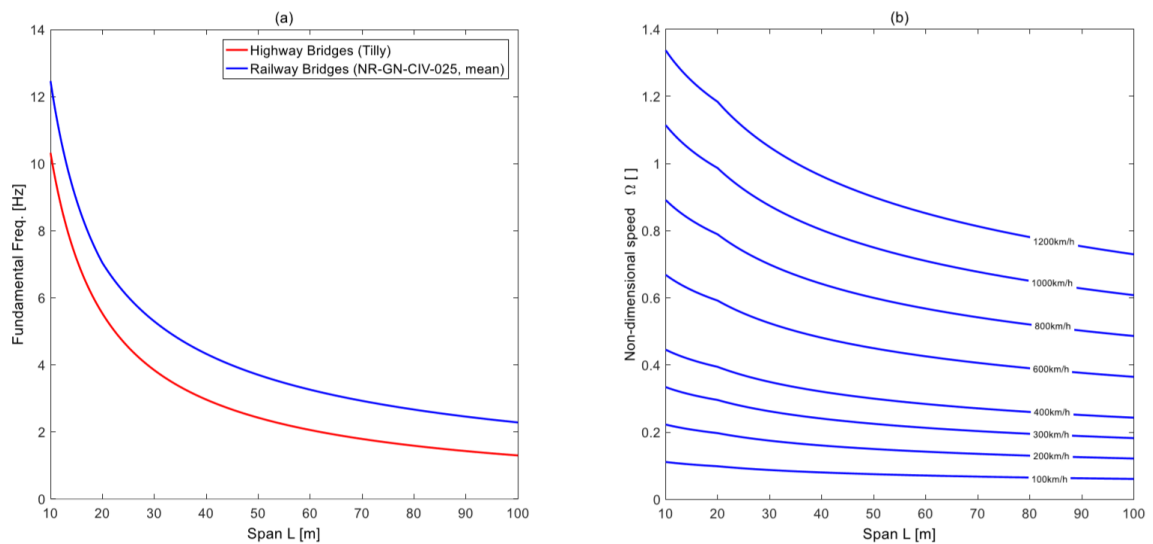


Figura 6.1. (a) Variación empírica de la frecuencia fundamental de cada *punte* con la distancia entre pilares para autovías y puentes de trenes ferroviarios (para el Hyperloop no se saben los datos exactos porque aún no se ha construido, pero la evolución se supone similar). (b) Variación de la velocidad adimensional con la distancia entre pilares. Fuente: [3].

Por otro lado, el factor de amplificación dinámica (DAF) crece conforme disminuye la distancia entre pilares, como se desprende de la siguiente gráfica:

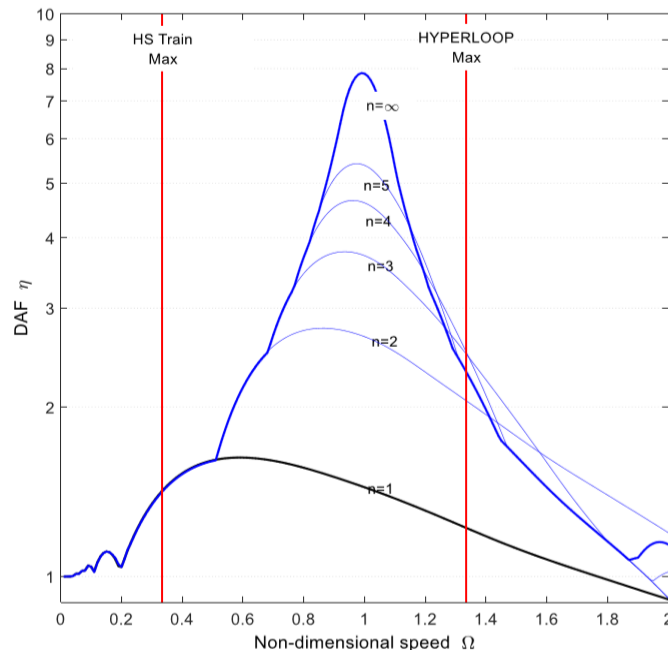


Figura 6.2. DAF para una única masa que cruza una estructura partida en un número n de puentes. Fuente: [3].

Por tanto, la distancia entre pilares no puede ser ni muy baja para evitar problemas de resonancia o de frecuencias muy altas, ni tampoco muy alta para evitar una gran amplificación dinámica de las cargas a 1.220 km/h o una baja rigidez estructural. Atendiendo a estas gráficas, un buen rango puede estar entre 20 y 30 m. De hecho, Elon Musk propuso 30 m en sus diseños [18, p. 10].

Para el primer modelo, que como se ha dicho en apartados anteriores soportará mucha carga y la distancia será muy grande, se optará por una distancia entre pilares de 25 m, mientras que en el segundo, similar al modelo pequeño de Elon Musk, la distancia será de 30 m. Además, en los pilares habrá dos amortiguadores laterales ajustables y un amortiguador vertical para mitigar el riesgo sísmico [18, p. 5]. Estos amortiguadores contribuirán también a reducir las frecuencias y el DAF [3].

En cuanto a la elevación de los tubos sobre el suelo, a fecha de hoy no hay ningún estudio en el que se obtenga la elevación óptima o la elevación en función de otros parámetros. Por tanto, se va adoptar la elevación de 6 m en ambos casos, que es la elevación media de los diseños de Musk [18, p. 28].

Respecto a las juntas de expansión térmica, estas se colocarán en la zona de contacto entre el tubo y los pilares, es decir, en los extremos de cada intervalo [3]. Para evitar fugas de aire en las juntas de expansión se propondrá un sellado laberíntico en el exterior.

Por otra parte, encima de cada tubo se emplazarán paneles solares para obtener energía que se aprovechará para propulsar el tren en cada caso. Hay varias configuraciones posibles para las placas solares, tal como se muestra en esta figura:

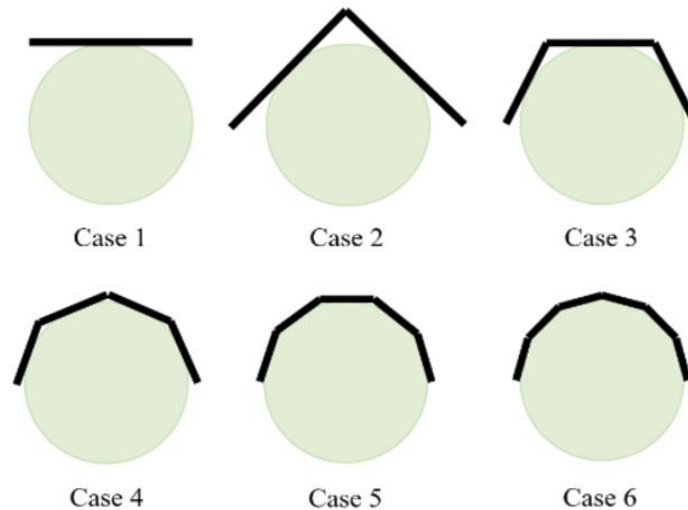


Figura 6.3. Diferentes disposiciones para los paneles solares. Fuente: [15].

En el estudio sobre la orientación óptima de los paneles solares se concluye que el segundo caso es el que más energía recoge sin importar que el tubo esté orientado de norte a sur, de este a oeste o de noroeste a suroeste. El primer caso es el que menos energía capta y los casos del 3 al 6 están entre el 1 y el 2 a este respecto. Además, en el caso 2 (y hasta el 6) el coeficiente de variación de la potencia a lo largo del día es bajo, por lo que los inversores conectados a los paneles se aprovechan más. No obstante, la energía solar captada por unidad de área es más baja en los casos del 2 al 6 que en el primer caso, por lo que el coste del primer caso será inferior al resto [15].

Para la infraestructura del primer modelo se elegirá la segunda configuración, ya que se requiere de mucha energía para mover grandes masas. En cambio, en el caso del segundo modelo no hace falta tanta energía y se busca abaratar costes de paneles e inversores, por lo que se seleccionará la primera configuración. Para conectar las placas con los motores de inducción lineal (LIM) o con el sistema EDS hacen falta más elementos eléctricos. Si se adopta un sistema eléctrico semejante al de los modelos propuestos por Elon Musk, dichos elementos con su conexionado serán los siguientes: La mayoría de placas solares o agrupaciones de ellas estarán conectadas a convertidores de nivel de tensión continua, mientras que otras estarán conectadas a inversores. La corriente que se invertirá se vertirá a la red. Toda la CC obtenida irá a parar a una línea de alta tensión (AT) de CC y de ahí al almacenamiento distribuido. Es este almacenamiento distribuido el que realmente liberará su energía cuando los sistemas magnéticos la requieran. Además, existirá una conexión a la red, así que será posible

comprar energía a la red cuando en el sistema haya un déficit (que se rectificará para poder almacenarla) y viceversa [18, p. 36-38].

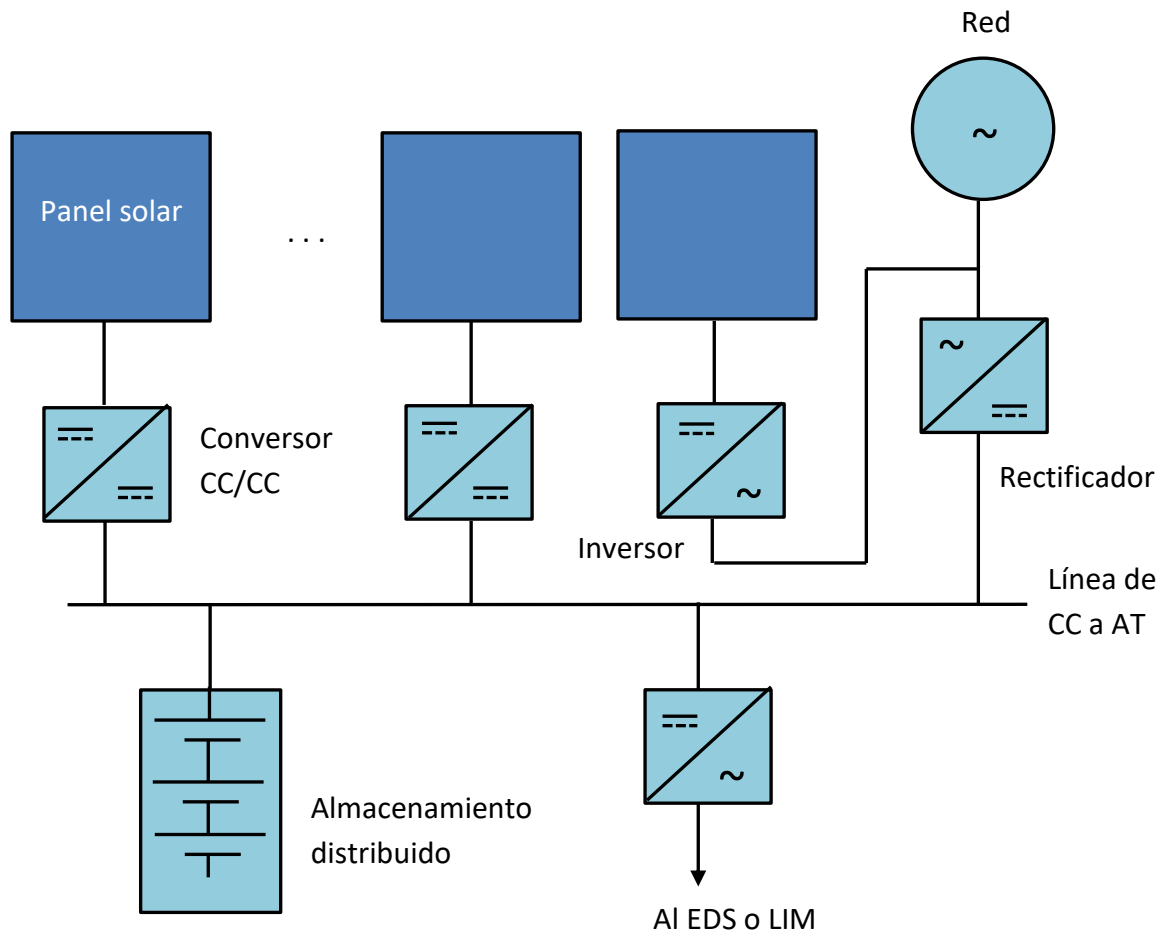


Figura 6.4. Esquema del sistema eléctrico, válido para ambos modelos. Fuente: Elaboración propia.

El sistema EDS es continuo, es decir, está presente en toda la longitud de la infraestructura para permitir la levitación en cualquier punto. Además, sus imanes se disponen según una matriz Halbach [8]. En contraste a su continuidad, no es necesario que el LIM sea continuo, aunque se ha simulado como tal porque su discretización se considera objeto de otro trabajo.

Por último, la primera infraestructura estará formada por dos tubos en paralelo para poder colocar los paneles solares encima de cada uno. La segunda por único tubo. Dichos tubos estarán al vacío o aproximadamente al vacío y bombas de vacío localizadas cada una determinada distancia mantendrán la presión interna constante.

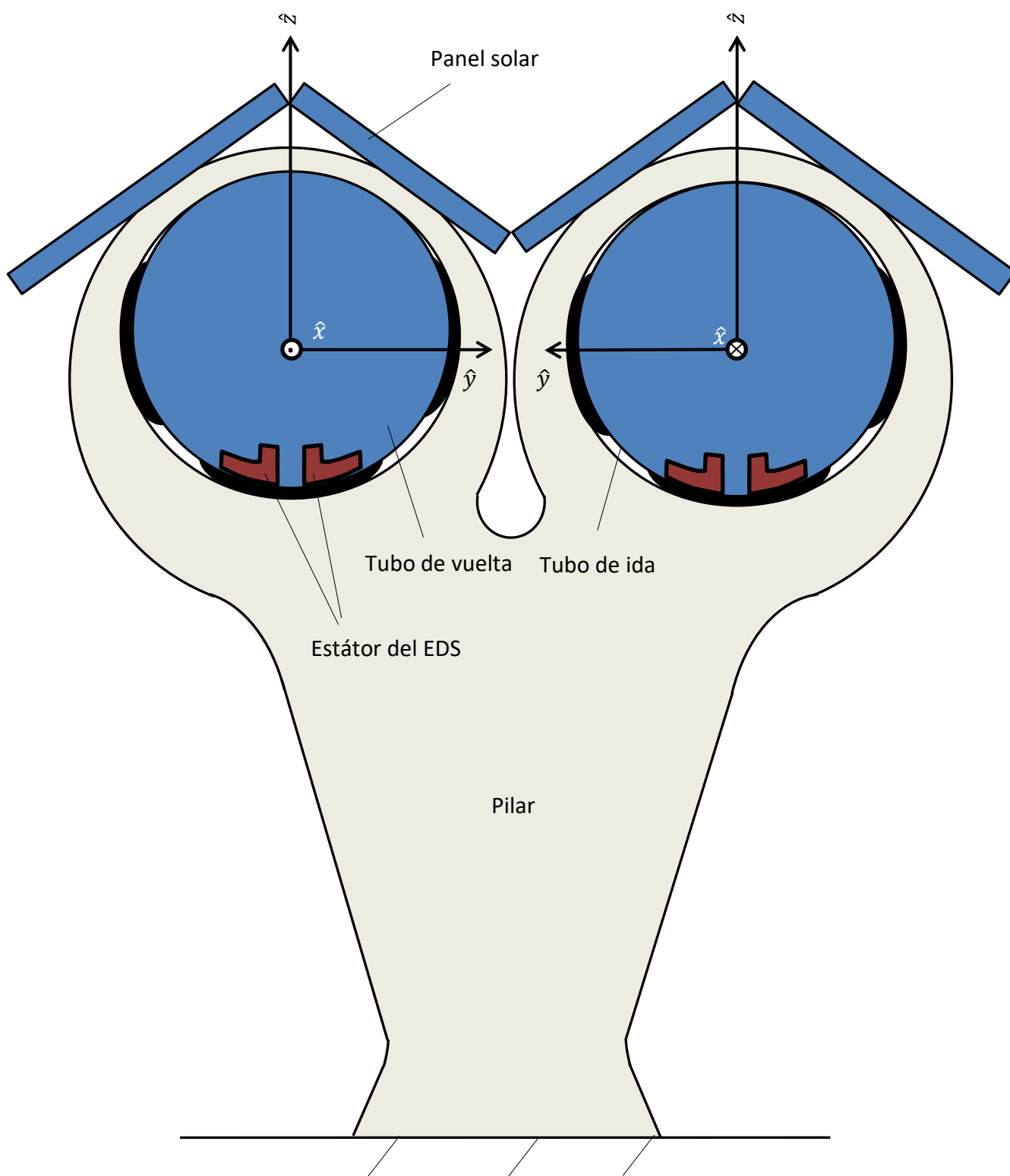


Figura 6.5. Esquema de una sección de la infraestructura del primer modelo con el hueco entre el tubo y el soporte sobreescalado. Fuente: Elaboración propia.

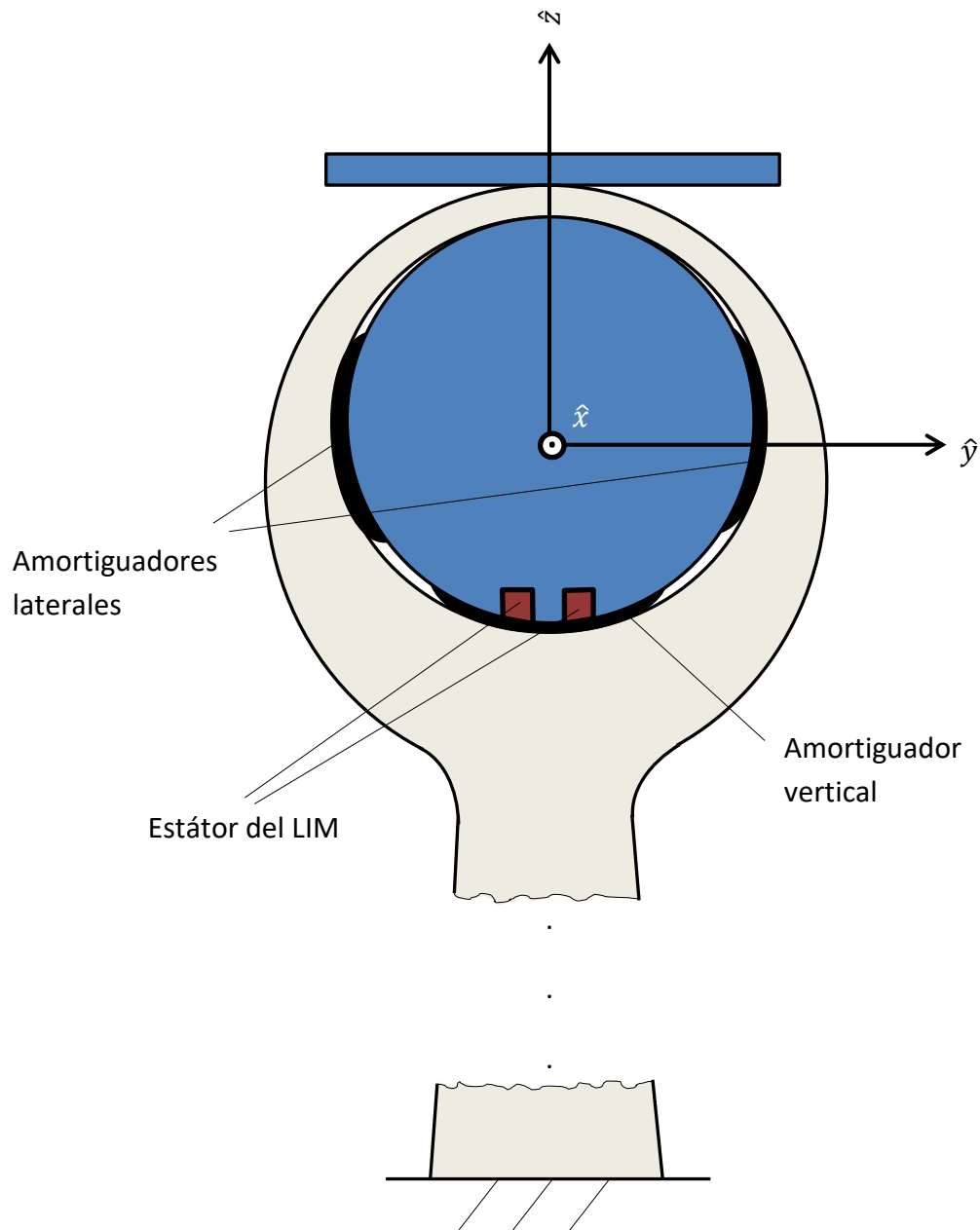


Figura 6.6. Esquema de una sección de la infraestructura del segundo modelo con el estátor del LIM presente y con el hueco entre el tubo y el soporte sobreescalado. Fuente: Elaboración propia.

7. Establecimiento de las variables de medida del problema de diseño y de transporte

A continuación se van a presentar las variables de medida ordenadas según el tema y dentro de cada tema por orden alfabético:

7.1. Límite de Kantrowitz

Variable	Definición	Unidad (SI)
a_s	Velocidad del sonido	$m \cdot s^{-1}$
A_c	Área transversal de la cápsula	m^2
A_{cc}	Área de la corona circular entre la cápsula y el tubo	m^2
A_{comp}	Área de admisión del compresor	m^2
A_t	Área transversal del tubo	m^2
D_c	Diámetro de la cápsula	m
D_{carga}	Diámetro necesario para acomodar la carga	m
D_{comp}	Diámetro del compresor	m
D_t	Diámetro del tubo	m
M	Número de Mach	ϕ
\dot{m}_{cc}	Flujo másico por la corona circular entre la cápsula y el tubo	$kg \cdot s^{-1}$
\dot{m}_t	Flujo másico por el tubo (relativo al tren)	$kg \cdot s^{-1}$
p	Presión	Pa
p_{ot}	Presión total	Pa
R	Constante de un gas ideal	$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$
T_t	Temperatura en el interior del tubo	K
T_{ot}	Temperatura total	K
v	Velocidad de operación del	$m \cdot s^{-1}$

	tren	
γ	Coefficiente de dilatación adiabática genérico	ϕ
δ_{rc}	Espesor radial de la cápsula	m
δ_{comp}	Diferencia radial entre la cápsula y el compresor	m
ρ_t	Densidad del aire en el interior del tubo	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$

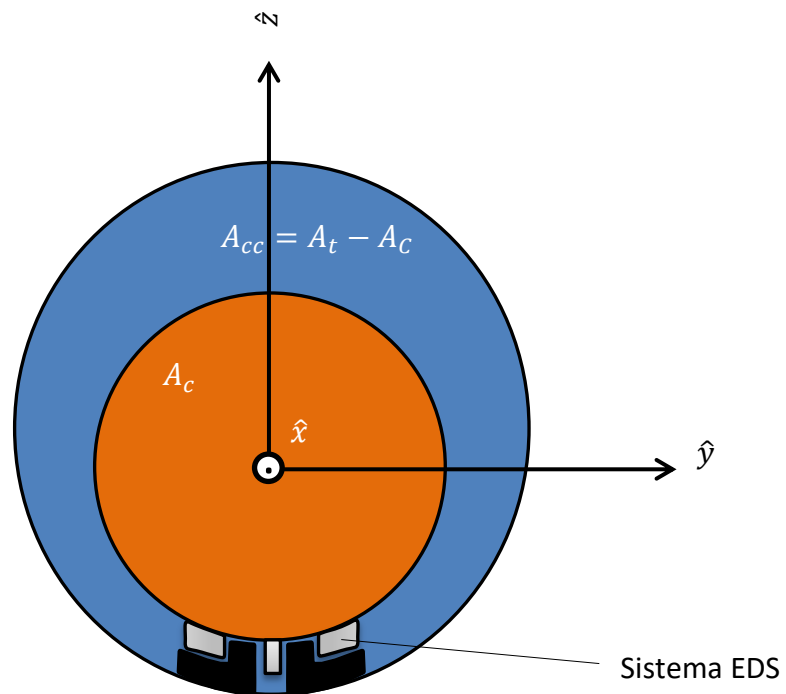


Figura 7.1. Esquema de la vista frontal del vehículo del primer modelo en el interior del tubo. Detalle de las áreas que son determinantes para el límite de Kantrowitz. El área frontal del sistema EDS se considera despreciable. Fuente: Elaboración propia.

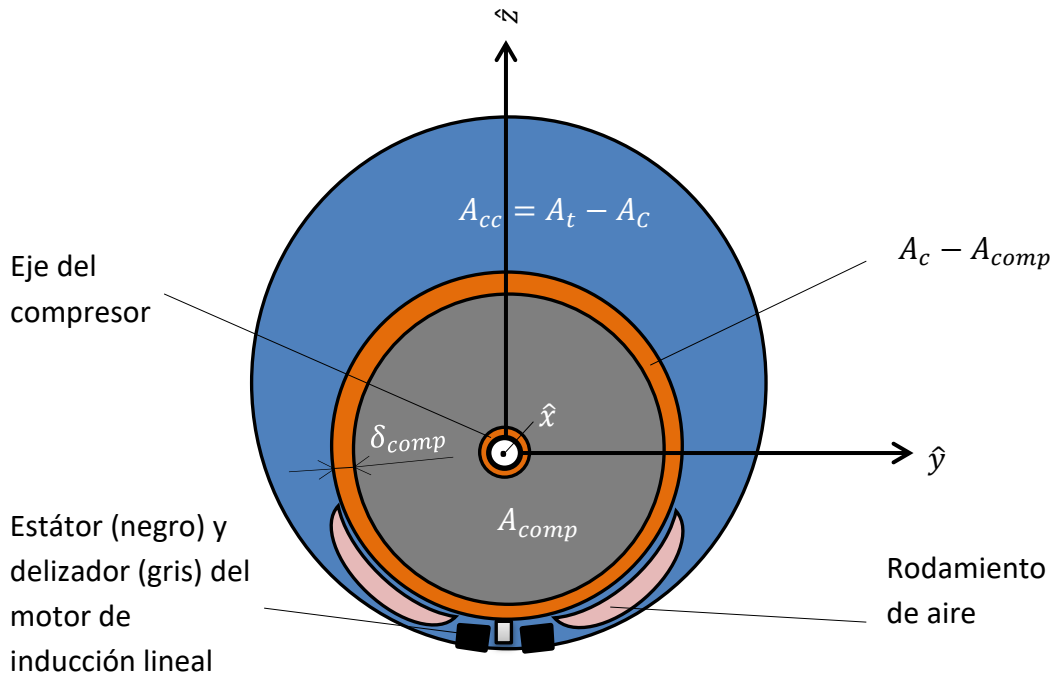


Figura 7.2. Esquema de la vista frontal del vehículo del segundo modelo en el interior del tubo. Detalle de las áreas que son determinantes para el límite de Kantrowitz. Las áreas frontales del eje, del estátor, del deslizador y del rodamiento se consideran despreciables. Fuente: Elaboración propia.

7.2. Compresores, sistema de refrigeración y tobera

A_e	Área de escape de la tobera	m^2
A_{tob}	Área de entrada de la tobera	m^2
A_{tub}	Sección de la tubería a la tobera	m^2
c_e	Velocidad de escape de la tobera	$m \cdot s^{-1}$
c_{pC_1}	Capacidad calorífica del aire en el primer compresor	$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$
c_{pC_2}	Capacidad calorífica del aire en el segundo compresor	$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$
c_{pH_2O}	Capacidad calorífica del agua en el primer intercambiador de calor	$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$

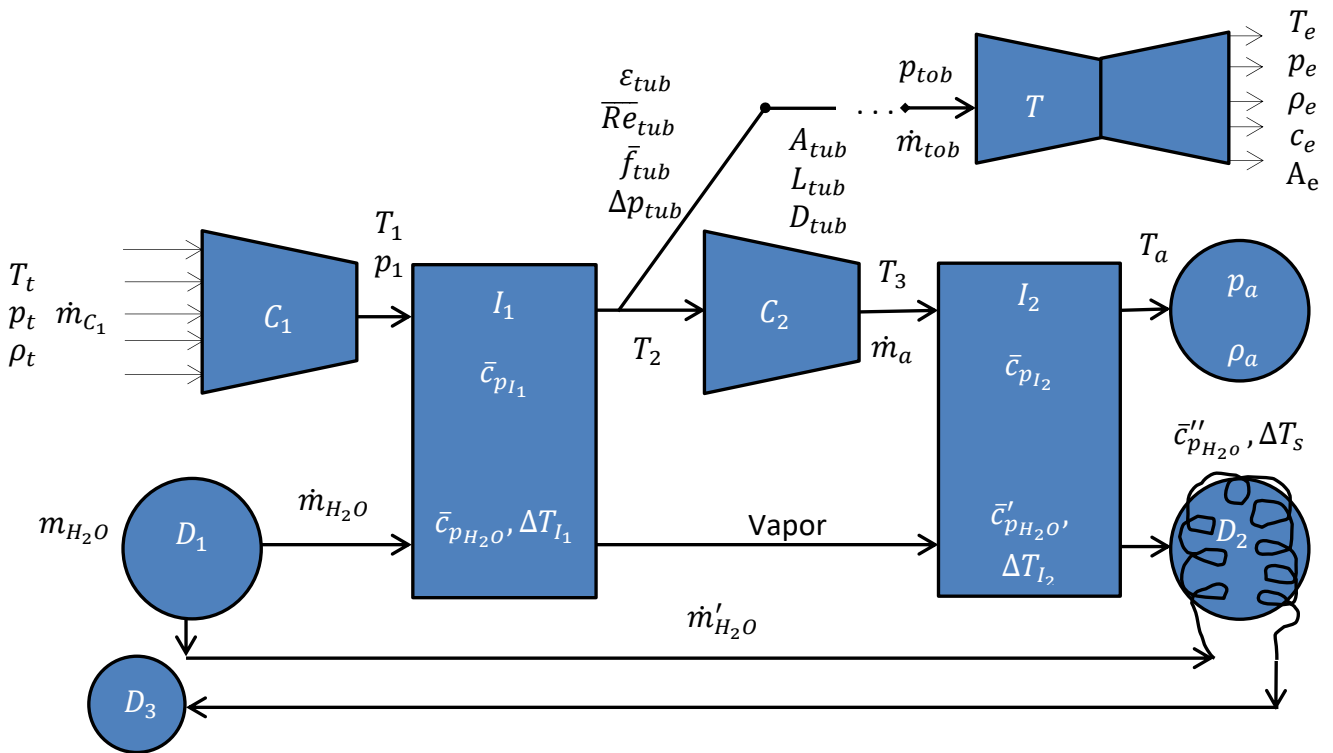
$c'_{p_{H_2O}}$	Capacidad calorífica del agua en el segundo intercambiador	$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$
$c''_{p_{H_2O}}$	Capacidad calorífica del agua en el serpentín	$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$
$c_{p_{I_1}}$	Capacidad calorífica del aire en el primer intercambiador	$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$
$c_{p_{I_2}}$	Capacidad calorífica del aire en el segundo intercambiador	$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$
$c_{p_{tob}}$	Capacidad calorífica en la tobera	$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$
c_{tub}	Velocidad del aire por la tubería	$m \cdot s^{-1}$
D_{tub}	Diámetro de la tubería	m
F_{tob}	Fuerza de empuje de la tobera	N
f_{tub}	Factor de fricción de Fanning de la tubería a la tobera	ϕ
h_v	Calor latente de vaporización del agua	$J \cdot kg^{-1}$
L_{tub}	Longitud de la tubería	m
\dot{m}_{C_1}	Flujo másico por el primer compresor	$kg \cdot s^{-1}$
m_{H_2O}	Masa de agua total	kg
\dot{m}'_{H_2O}	Flujo másico de agua por los dos intercambiadores	$kg \cdot s^{-1}$
\dot{m}''_{H_2O}	Flujo másico de agua por el serpentín	$kg \cdot s^{-1}$

\dot{m}_{tob}	Flujo másico por la tobera	$\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$
P_{tob}	Potencia propulsiva de la tobera	W
P_{C_1}	Potencia del primer compresor	W
P_{C_2}	Potencia del segundo compresor	W
p_1	Presión a la salida del primer compresor	Pa
p_2	Presión a la salida del segundo compresor	Pa
p_e	Presión de escape de la tobera	Pa
p_{tob}	Presión de entrada a la tobera	Pa
Δp_{tub}	Pérdida de carga en la tubería	Pa
Re_{tub}	Número de Reynolds del aire en la tubería	ϕ
T_1	Temperatura a la salida del primer compresor	K
T_2	Temperatura a la salida del primer intercambiador	K
T_3	Temperatura a la salida del segundo compresor	K
T_e	Temperatura de escape de la tobera	K
ΔT_{I_1}	Salto de temperatura del agua en el primer intercambiador	K
ΔT_{I_2}	Salto de temperatura del agua en el segundo	K

	intercambiador	
ΔT_s	Salto de temperatura del agua en el serpentín	K
t_d	Tiempo de duración del agua de los depósitos	s
V_1	Volumen del primer depósito de agua	m^3
V_2	Volumen del segundo depósito de agua	m^3
V_3	Volumen del tercer depósito de agua	m^3
γ_1	Coefficiente de dilatación adiabática en el primer compresor	ϕ
γ_2	Coefficiente de dilatación adiabática en el segundo compresor	ϕ
γ_{tob}	Coefficiente de dilatación adiabática en la tobera	ϕ
ε_{tub}	Rugosidad absoluta de la tubería a la tobera	m
η_{c_1}	Rendimiento isoentrópico del primer compresor	ϕ (p. u.)
η_{c_2}	Rendimiento isoentrópico del segundo compresor	ϕ (p. u.)
η_{tob}	Rendimiento isoentrópico de la tobera	ϕ (p. u.)
μ_{tub}	Viscosidad dinámica del aire en la tubería	Pa · s
ρ_{H_2O}	Densidad del agua	$kg \cdot m^{-3}$
ρ_{tub}	Densidad del aire en la tubería	$kg \cdot m^{-3}$

τ_1

Porcentaje del tiempo de duración del agua sobre el tiempo de viaje

 ϕ (%)

Leyenda: C₁, C₂: Compresores 1 y 2. D₁, D₂, D₃: Depósitos de agua 1, 2 y 3. I₁, I₂: Intercambiadores de calor 1 y 2. T: Tobera expansora.

Figura 7.3. Esquema de los compresores, del sistema de refrigeración y de la tobera.

Fuente: Elaboración propia.

7.3. Rodamientos de aire

 C_L

Coficiente de sustentación de los rodamientos de aire

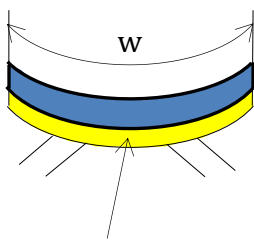
 ϕ c_a

Velocidad de salida del aire por el área de salida (véase el área en el esquema)

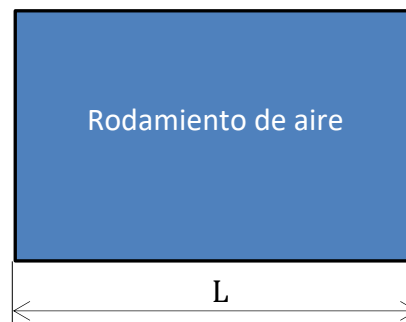
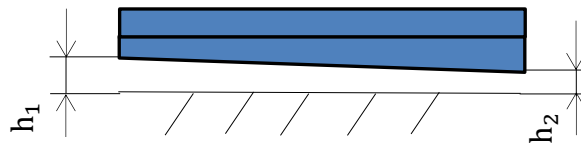
 $m \cdot s^{-1}$

d	Distancia entre un rodamiento y el siguiente	m
F_a	Fuerza de levitación	N
F_S	Fuerza de levitación de presión	N
F_L	Fuerza de sustentación de los rodamientos	N
F_v	Fuerza viscosa de la película de aire (flujo de Couette-Poiseuille)	N
h_1	Espesor 1 de la película de aire bajo los rodamientos	m
h_2	Espesor 2 de la película de aire bajo los rodamientos	m
Δh	Variación del espesor	m
L	Longitud de cada rodamiento	m
\dot{m}_a	Flujo másico consumido por los rodamientos	$\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$
n_a	Número de rodamientos	ϕ
P_v	Potencia disipada de la película de aire por la fuerza viscosa	W
p_{as}	Presión bajo los rodamientos	$\text{Pa} \cdot \text{s}$
Δp_a	Caída de presión porcentual a la entrada de los rodamientos	ϕ (%)
Δp_L	Diferencia de presión entre los extremos de cada rodamiento	Pa

q	Porcentaje de la circunferencia externa de la cápsula ocupada por los rodamientos y el LIM	ϕ (%)
R_a	Rigidez de cada rodamiento	N/m
S	Superficie total de los rodamientos	m^2
T_a	Temperatura del aire bajo los rodamientos	K
w	Anchura circular de cada rodamiento	m
w_{LIM}	Anchura del estátor del LIM	m
η_a	Rendimiento de los rodamientos	ϕ (p. u.)
μ_a	Viscosidad dinámica del aire bajo los rodamientos	$Pa \cdot s$
ρ_{as}	Densidad del aire bajo los rodamientos	$kg \cdot m^{-3}$



Área de salida del aire, la cual vale $h_2 \cdot w$



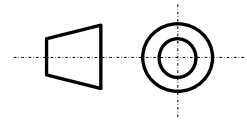


Figura 7.4. Esquema de un rodamiento de aire con h_1 y h_2 sobreescalados. Fuente: Elaboración propia.

7.4. Arrastre aerodinámico

A_f	Área frontal proyectada de la cápsula	m^2
$C_{D_{ext}}$	Coefficiente de arrastre a cielo abierto	ϕ
C_{D_t}	Coefficiente de arrastre dentro del tubo	ϕ
c_i	Velocidad del viento inducido dentro del tubo	$m \cdot s^{-1}$
D_{desp}	Diámetro de desplazamiento	m
D_{movto}	Diámetro de movimiento	m
$C_{D_{ext}}$	Coefficiente de arrastre a cielo abierto	ϕ
C_{D_t}	Coefficiente de arrastre dentro del tubo	ϕ
c_i	Velocidad del viento inducido dentro del tubo	$m \cdot s^{-1}$
F_D	Fuerza de arrastre	N
P_D	Potencia disipada por el arrastre	W
T_f	Factor de túnel	ϕ
β	Relación de bloqueo	ϕ
Δ_1	Sección de desplazamiento	m^2
Δ_2	Sección de cantidad de movimiento	m^2
δ^*	Espesor de desplazamiento de la capa límite	m

θ	Espesor de cantidad de movimiento de la capa límite	m
----------	---	---

7.5. Baterías

C	Relación porcentual entre las baterías para la compresión y las demás	ϕ (%)
e_{bat}	Energía de las baterías por unidad de masa	$J \cdot kg^{-1}$
m'_{bat}	Masa de baterías para la compresión	kg
m''_{bat}	Masa de baterías para los sistemas a bordo	kg
$m_{bat_{tot}}$	Masa de baterías total	kg
t_{des}	Tiempo de descarga de las baterías	s
η_{mot}	Rendimiento del motor que acciona los compresores	ϕ (p. u.)
τ_2	Porcentaje del tiempo de duración de las baterías sobre el tiempo de viaje	ϕ (%)

7.6. Cinemática

a_1	Aceleración del tren	$m \cdot s^{-2}$
a_2	Desaceleración del tren	$m \cdot s^{-2}$
L_{ac}	Longitud de aceleración	m
L_{dec}	Longitud de deceleración	m
L_v	Longitud de viaje a la	m

	velocidad v	
L_t	Longitud del tubo (igual a la longitud total de la ruta)	m
t_{ac}	Tiempo de aceleración	s
t_{dec}	Tiempo de deceleración	s
t_{tot}	Tiempo total de recorrido	s
t_v	Tiempo de viaje a la velocidad v	s

7.7. Levitación y propulsión

$C_{D_{EDS}}$	Coeficiente de arrastre del sistema EDS	ϕ
E_1	Tensión de fase en el estátor tras las pérdidas	V
$F_{D_{EDS}}$	Fuerza de arrastre del EDS	N
F_x	Fuerza de propulsión, en el eje horizontal (x)	N
F_{gx}	Componente en x de la fuerza gravitatoria	N
F_z	Fuerza de levitación en el eje vertical (z)	N
g	Aceleración de la gravedad	$m \cdot s^{-2}$
I_1	Intensidad de fase que circula por el estátor	A
m_{tot}	Masa total del tren	kg
P_{av}	Potencia disipada por la resistencia al avance	W
$P_{D_{EDS}}$	Potencia disipada por la fuerza de arrastre del sistema EDS	W

P_{gx}	Potencia asociada a componente gravitatoria en x	W
R_{av}	Resistencia al avance del tren	N
R_1	Resistencia del estátor	Ω
V_1	Tensión de fase aplicada al estátor	V
X_1	Reactancia del estátor	Ω
α	Ángulo de inclinación del tubo	rad
γ_0	Ángulo entre E_1 e I_1	rad
$\eta_{EDS LIM}$	Rendimiento del EDS/LIM	ϕ (p. u.)
φ	Ángulo de potencia	rad

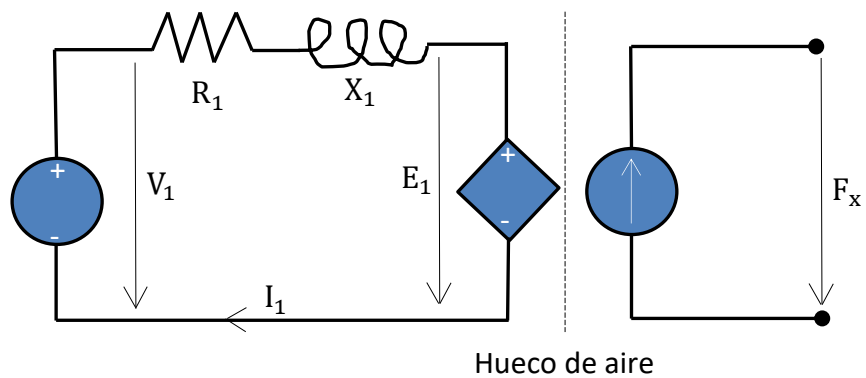


Figura 7.5. Circuito equivalente del LIM considerando que todas las pérdidas de potencia activa se dan en R_1 . También aplicable a la parte propulsiva del EDS si se considera que $F_{D_{EDS}}$ es una fuerza parásita externa. Fuente: Elaboración propia.

7.8. Transporte

D_{caj}	Diámetro de la circunferencia circunscrita a una sección con varias	m
-----------	---	---

	filas de cajas	
D_{cont}	Diámetro de la circunferencia circunscrita a un contenedor	m
f_i	Factor de llenado de un contenedor	ϕ (p. u.)
I_c	Índice de capacidad de transporte por unidad de tiempo	$\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$
l_1	Lado de una caja cuadrada	m
l_2	Longitud de una caja	m
L_{aux}	Longitud el tramo para el compresor (ambas partes), su motor y el sistema de refrigeración	m
L_{bat}	Longitud del tramo para baterías del segundo modelo	m
L_{caj}	Longitud de todas las cajas	m
L_{cont}	Longitud de un contenedor	m
m_a	Masa de cada cojinete de aire	kg
m_{caj}	Masa de todas las cajas	kg
m_{comp}	Masa del compresor (de ambas partes)	kg
m_{carga}	Carga máxima de un contenedor	kg
m_{EB}	Masa de los frenos de emergencia	kg
m'_{EDS}	Masa de los imanes el EDS por unidad de longitud	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-1}$

m'_{est}	Masa de la estructura por unidad de longitud	$kg \cdot m^{-1}$
m_{Li^+}	Masa de las baterías del primer modelo	kg
m'_{LIM}	Masa del deslizador del LIM por unidad de longitud	$kg \cdot m^{-1}$
m_{mot}	Masa del motor del compresor	kg
m_{pzs}	Masa de las piezas transportadas en las cajas	kg
m_{tara}	Tara de un contenedor	kg
n_{caj}	Número máximo de cajas transportables	ϕ
$n_{caj_{real}}$	Número de cajas realmente transportadas	ϕ
n_{cont}	Número de contenedores transportados	ϕ
n_{fc}	Número de filas de cajas	ϕ
n_s	Número de secciones de cajas	ϕ
δ_{lc}	Espesor longitudinal de la cápsula	m
ψ	Factor de ocupación de las cajas	ϕ (p. u.)

7.9. Consumo energético

E_{bat}	Energía consumida por las baterías	J
E_{ac}	Energía consumida en la aceleración	J
E_{gen}	Energía generada en la deceleración	J
E'_t	Energía total por unidad de	$J \cdot m^{-1}$

	longitud	
E_v	Energía consumida durante el viaje a una velocidad v	J
e'_t	Energía total por unidad de longitud y masa	$J \cdot m^{-1} \cdot kg^{-1}$
I_e	Índice de consumo energético por masa útil	$J \cdot kg^{-1}$
η_{bat}	Rendimiento de carga de las baterías	ϕ (p. u.)

7.10. Efecto de la curvatura del tubo

a_c	Aceleración centrípeta	$m \cdot s^{-2}$
R_t	Radio de curvatura del tubo	m

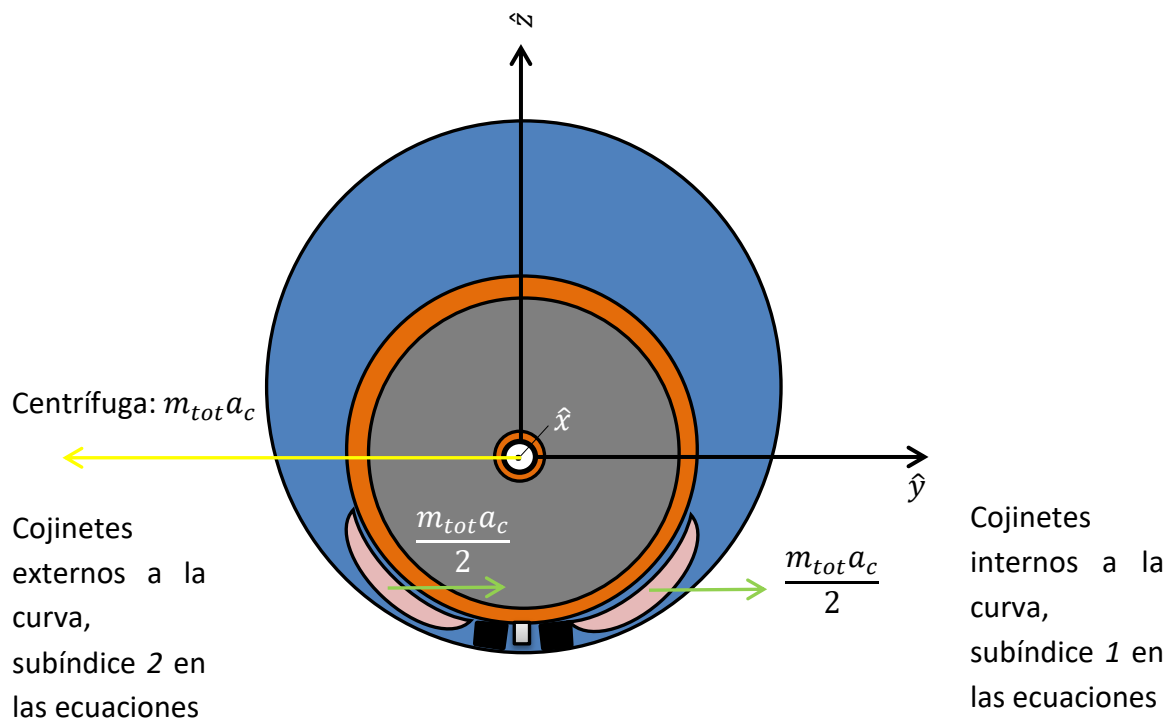


Fig. 7.6. Fuerzas en los cojinetes debidas a la curvatura del tubo. Fuente: Elaboración propia.

8. Parametrización de las variables de diseño que afectan a las prestaciones del vehículo

A continuación se van a presentar las ecuaciones clasificadas según el tema. Algunos temas aplican a un modelo, otros al otro modelo y el resto de temas a ambos. Acúdase al anexo [IV] para conocer la justificación o el origen de las mismas. Por otro lado, las ecuaciones para calcular las capacidades caloríficas y los coeficientes de dilatación se recurre a las ecuaciones correspondientes del anexo [II].

8.1. Límite de Kantrowitz

$$a_s = \sqrt{\gamma RT_t} \quad [\text{Ec. 8.1}]$$

$$M = \frac{v}{a_s} \quad [\text{Ec. 8.2}]$$

$$\dot{m}_{cc\text{máx}} = A_{cc} \frac{p_{0t}}{\sqrt{T_{0t}}} \sqrt{\frac{\gamma}{R}} \left(1 + \left(\frac{\gamma - 1}{2}\right) M^2\right)^{-\left(\frac{\gamma + 1}{2(\gamma - 1)}\right)} \quad [\text{Ec. 8.3}]$$

$$A_{cc} = A_t - A_c \quad [\text{Ec. 8.4}]$$

$$A_t = \frac{\pi}{4} D_t^2 \quad [\text{Ec. 8.5}]$$

$$A_{comp} = \frac{\pi}{4} D_{comp}^2 \quad [\text{Ec. 8.6}]$$

$$A_c = \frac{\pi}{4} D_c^2 \quad [\text{Ec. 8.7}]$$

$$D_c = D_{comp} + 2\delta_{comp} \quad [\text{Ec. 8.8}]$$

$$D_c = D_{carga} + 2\delta_{rc} \quad [\text{Ec. 8.9}]$$

$$T_{0t} = T_t \left(1 + \left(\frac{\gamma - 1}{2}\right) M^2\right) \quad [\text{Ec. 8.10}]$$

$$p_{0t} = p_t \left(1 + \left(\frac{\gamma - 1}{2}\right) M^2\right)^{\frac{\gamma}{\gamma - 1}} \quad [\text{Ec. 8.11}]$$

$$\dot{m}_t = \rho_t A_t v \quad [\text{Ec. 8.12}]$$

$$\rho_t = \frac{p_t}{RT_t} \quad [\text{Ec. 8.13}]$$

$$\dot{m}_{C_1} = \dot{m}_t - \dot{m}_{cc\text{máx}} \quad [\text{Ec. 8.14}]$$

$$\dot{m}_{C_1} = \rho_t A_{comp} v \quad [\text{Ec. 8.15}]$$

8.2. Compresores

$$P_{C_1} = \frac{\dot{m}_{C_1} \bar{c}_{p_{C_1}} T_t}{\eta_{C_1}} \left(\left(\frac{p_1}{p_t} \right)^{\frac{\gamma_1-1}{\gamma_1}} - 1 \right) \quad [\text{Ec. 8.16}]$$

$$T_1 = T_t \left(\frac{1}{\eta_{C_1}} \left(\frac{p_1}{p_t} \right)^{\frac{\gamma_1-1}{\gamma_1}} + \frac{\eta_{C_1} - 1}{\eta_{C_1}} \right) \quad [\text{Ec. 8.17}]$$

$$P_{C_2} = \frac{\dot{m}_a \bar{c}_{p_{C_2}} T_2}{\eta_{C_2}} \left(\left(\frac{p_a}{p_1} \right)^{\frac{\gamma_2-1}{\gamma_2}} - 1 \right) \quad [\text{Ec. 8.18}]$$

$$T_3 = T_2 \left(\frac{1}{\eta_{C_2}} \left(\frac{p_a}{p_1} \right)^{\frac{\gamma_2-1}{\gamma_2}} + \frac{\eta_{C_2} - 1}{\eta_{C_2}} \right) \quad [\text{Ec. 8.19}]$$

8.3. Intercambiadores de calor

$$\dot{m}_{C_1} \bar{c}_{p_{I_1}} (T_1 - T_2) = \dot{m}_{H_2O} (\bar{c}_{p_{H_2O}} \Delta T_{I_1} + h_v) \quad [\text{Ec. 8.20}]$$

$$\dot{m}_a \bar{c}_{p_{I_2}} (T_3 - T_a) = \dot{m}_{H_2O} \bar{c}'_{p_{H_2O}} \Delta T_{I_2} \quad [\text{Ec. 8.21}]$$

8.4. Serpentin

$$\dot{m}'_{H_2O} \bar{c}''_{p_{H_2O}} \Delta T_s = \dot{m}_{H_2O} (\bar{c}'_{p_{H_2O}} \Delta T_{I_2} + h_v) \quad [\text{Ec. 8.22}]$$

8.5. Depósitos de agua

$$(\dot{m}_{H_2O} + \dot{m}'_{H_2O}) t_d = \rho_{H_2O} V_I \quad [\text{Ec. 8.23}]$$

$$\dot{m}_{H_2O} t_d = \rho_{H_2O} V_{II} \quad [\text{Ec. 8.24}]$$

$$\dot{m}'_{H_2O} t_d = \rho_{H_2O} V_{III} \quad [\text{Ec. 8.25}]$$

$$t_d = \left(1 + \frac{\tau_1 (\%) }{100}\right) t_{tot} \quad [\text{Ec. 8.26}]$$

$$m_{H_2O} = \rho_{H_2O} V_I \quad [\text{Ec. 8.27}]$$

8.6. Tubería a la tobera

$$\dot{m}_{tob} = \dot{m}_{C_1} - \dot{m}_a \quad [\text{Ec. 8.28}]$$

$$A_{tub} = \frac{\dot{m}_{tob}}{\bar{\rho}_{tub} c_{tub}} \quad [\text{Ec. 8.29}]$$

$$A_{tub} = \frac{\pi}{4} D_{tub}^2 \quad [\text{Ec. 8.30}]$$

$$\bar{\rho}_{tub} = \frac{2p_1 - \Delta p_{tub}}{2RT_2} \quad [\text{Ec. 8.31}]$$

$$\overline{Re}_{tub} = \frac{\bar{\rho}_{tub} c_{tub} D_{tub}}{\mu_{tub}} \quad [\text{Ec. 8.32}]$$

$$\bar{f}_{tub} = \frac{0,33}{\left[\ln \left(\frac{\varepsilon_{tub}}{3,70 D_{tub}} + \frac{7}{\overline{Re}_{tub}} \right) \right]^2} \quad [\text{Ec. 8.33}]$$

$$\Delta p_{tub} = \left[2 \bar{\rho} \bar{f} \frac{L}{D} c^2 \right]_{tub} \quad [\text{Ec. 8.34}]$$

8.7. Tobera

$$p_{tob} = p_1 - \Delta p_{tub} \quad [\text{Ec. 8.35}]$$

$$T_e = T_2 \left[(1 - \eta_{tob}) + \eta_{tob} \left(\frac{p_e}{p_{tob}} \right)^{\frac{\gamma_{tob}-1}{\gamma_{tob}}} \right] \quad [\text{Ec. 8.36}]$$

$$c_e = \sqrt{\bar{c}_{p_{tob}} (T_2 - T_e) + \frac{c_{tub}^2}{2}} \quad [\text{Ec. 8.37}]$$

$$F_{tob} = \dot{m}_{tob} c_e + (p_e - p_t) A_e \quad [\text{Ec. 8.38}]$$

$$A_e = \frac{\dot{m}_{tob}}{\rho_e c_e} \quad [\text{Ec. 8.39}]$$

$$\rho_e = \frac{p_e}{RT_e} \quad [\text{Ec. 8.40}]$$

$$P_{tob} = F_{tob}v \quad [\text{Ec. 8.41}]$$

8.8. Rodamientos de aire

$$F_S = \eta_a p_a S \quad [\text{Ec. 8.42}]$$

$$F_L = \frac{1}{2} \rho_{a_s} v^2 S C_L \quad [\text{Ec. 8.43}]$$

$$S = n_a L W \quad [\text{Ec. 8.44}]$$

$$\rho_{a_s} = \frac{p_{a_s}}{RT_a} \quad [\text{Ec. 8.45}]$$

$$p_{a_s} = \left(1 - \frac{\Delta p_a(\%)}{100} \right) p_a \quad [\text{Ec. 8.46}]$$

$$F_a = F_S + F_L \quad [\text{Ec. 8.47}]$$

$$F_a = m_{tot} g \cos \alpha \quad [\text{Ec. 8.48}]$$

$$|F_v| = \left[\mu_a \frac{v}{h_1 - h_2} \ln \left(\frac{h_1}{h_2} \right) + \frac{|\Delta p_L|}{4L} (h_1 + h_2) \right] S \quad [\text{Ec. 8.49}]$$

$$\Delta p_L = p_{a_s} - p_t \quad [\text{Ec. 8.50}]$$

$$|P_v| = |F_v| v \quad [\text{Ec. 8.51}]$$

$$\dot{m}_a = n_a \rho_{a_s} c_a h_2 W \quad [\text{Ec. 8.52}]$$

$$n_a = 2 \left(\frac{L_c + d}{L + d} \right) \quad n_a \in \mathbb{N} \quad [\text{Ec. 8.53}]$$

$$w = \frac{\frac{q(\%)}{100} \pi D_c - w_{LIM}}{2} \quad [\text{Ec. 8.54}]$$

$$\bar{R}_a = \frac{F_L}{n_a \Delta \bar{h}} \quad [\text{Ec. 8.55}]$$

8.9. Arrastre aerodinámico

$$F_D = \frac{1}{2} \rho_t v^2 A_f T_f C_{D_{ext}} \quad [\text{Ec. 8.56}]$$

$$P_D = F_D v \quad [\text{Ec. 8.57}]$$

$$T_f = \frac{C_{D_t}}{C_{D_{ext}}} \quad [\text{Ec. 8.58}]$$

$$C_{D_t} = \left(C_{D_{ext}} + \beta \left(\frac{\Delta_1}{A_f} \right)^2 \right) \left(\frac{1 - \frac{C_i}{v}}{1 - \beta \left(\frac{\Delta_1}{A_f} \right)} \right)^2 \quad [\text{Ec. 8.59}]$$

$$C_{D_{ext}} = 2 \frac{\Delta_2}{A_f} \quad [\text{Ec. 8.60}]$$

$$A_f = A_c \quad [\text{Ec. 8.61}]$$

$$\beta = \frac{A_c}{A_t} \quad [\text{Ec. 8.62}]$$

$$\Delta_2 = \frac{\pi}{4} (D_{movto}^2 - D_c^2) \quad [\text{Ec. 8.63}]$$

$$D_{movto} = D_c + 2\theta \quad [\text{Ec. 8.64}]$$

$$\delta^* = 3\theta \quad [\text{Ec. 8.65}]$$

$$D_{desp} = D_c + 2\delta^* \quad [\text{Ec. 8.66}]$$

$$\Delta_1 = \frac{\pi}{4} (D_{desp}^2 - D_c^2) \quad [\text{Ec. 8.67}]$$

8.10. Baterías

$$m'_{bat} = \left(\frac{\bar{P}_{C_1} + \bar{P}_{C_2}}{\eta_{mot}} \right) \frac{t_{des}}{e_{bat}} \quad [\text{Ec. 8.68}]$$

$$m''_{bat} = \frac{C (\%)}{100} m'_{bat} \quad [\text{Ec. 8.69}]$$

$$m_{bat_{tot}} = m'_{bat} + m''_{bat} \quad [\text{Ec. 8.70}]$$

$$t_{des} = \left(1 + \frac{\tau_2 (\%)}{100}\right) t_{tot} \quad [\text{Ec. 8.71}]$$

$$\bar{P}_{C_1} = P_{C_1} \left[\frac{\left(\frac{t_{ac} + t_{dec}}{2} + t_v\right)}{t_{ac} + t_{dec} + t_v} \right] \quad [\text{Ec. 8.72}]$$

$$\bar{P}_{C_2} = P_{C_2} \quad [\text{Ec. 8.73}]$$

8.11. Cinemática

$$t_{ac} = \frac{v}{a_1} \quad [\text{Ec. 8.74}]$$

$$t_{dec} = \frac{v}{a_2} \quad [\text{Ec. 8.75}]$$

$$\bar{v} = \frac{\frac{v}{2}(t_{ac} + t_{dec}) + vt_v}{t_{ac} + t_{dec} + t_v} \quad [\text{Ec. 8.76}]$$

$$t_{tot} = \frac{L_t}{\bar{v}} \quad [\text{Ec. 8.77}]$$

$$t_v = t_{tot} - t_{ac} - t_{dec} \quad [\text{Ec. 8.78}]$$

$$L_{ac} = \frac{v^2}{2a_1} \quad [\text{Ec. 8.79}]$$

$$L_{dec} = \frac{v^2}{2a_2} \quad [\text{Ec. 8.80}]$$

$$L_v = L_t - L_{ac} - L_{dec} \quad [\text{Ec. 8.81}]$$

8.12. Levitación y propulsión

$$F_x v = 3E_1 I_1 \cos \gamma_0 \quad [\text{Ec. 8.82}]$$

$$F_x = m_{tot} a_1 + F_{gx} + R_{av} (-F_{tob}) \quad [\text{Ec. 8.83}]$$

$$P_x = F_x v \quad [\text{Ec. 8.84}]$$

$$R_{av} = F_D (+F_v) (+F_{D_{EDS}}) \quad [\text{Ec. 8.85}]$$

$$P_{av} = R_{av}v \quad [\text{Ec. 8.86}]$$

$$F_{D_{EDS}} = C_{D_{EDS}}|F_z| \quad [\text{Ec. 8.87}]$$

$$P_{D_{EDS}} = F_{D_{EDS}}v \quad [\text{Ec. 8.88}]$$

$$|F_z| = m_{tot}g\cos\alpha \quad [\text{Ec. 8.89}]$$

$$\eta_{EDS|LIM} = \frac{F_x v}{F_x v + 3R_1 I_1^2} \quad [\text{Ec. 8.90}]$$

$$\cos\varphi = \frac{F_x v + 3R_1 I_1^2}{3V_1 I_1} \quad [\text{Ec. 8.91}]$$

$$3V_1 I_1 \sin\varphi = 3X_1 I_1^2 \quad [\text{Ec. 8.92}]$$

$$P_1 = \frac{F_x v}{\eta_{EDS|LIM}} \quad [\text{Ec. 8.93}]$$

$$F_{gx} = mg\sin\alpha \quad [\text{Ec. 8.94}]$$

$$P_{gx} = F_{gx}v \quad [\text{Ec. 8.95}]$$

8.13. Transporte

$$m_{tot} = n_{cont}L_c(m'_{est} + m'_{EDS}) + m_{Li^+} + m_{EB} + m_{carga} \sum_{i=1}^{i=n_{cont}} f_i + n_{cont}m_{tara} \quad [\text{Ec. 8.96}]$$

$$m_{tot} = L_c(m'_{est} + m'_{LIM}) + m_{bat_{tot}} + n_a m_a + m_{comp} + m_{mot} + m_{H_2O} + m_{EB} + m_{caj} \quad [\text{Ec. 8.97}]$$

$$m_{caj} = n_{caj_{real}} m_{pzs} \quad [\text{Ec. 8.98}]$$

$$n_{caj_{real}} = \psi n_{caj} \quad [\text{Ec. 8.99}]$$

$$D_{carga} = D_{cont}|D_{caj} \quad [\text{Ec. 8.100}]$$

$$D_{caj} = l_1 \sqrt{2} n_{fc} \quad [\text{Ec. 8.101}]$$

$$L_c = (L_{cont}|L_{caj}) + 2\delta_{lc} \quad (+L_{aux} + L_{bat}) \quad [\text{Ec. 8.102}]$$

$$L_{caj} = n_s l_2 \quad [\text{Ec. 8.103}]$$

$$n_s = \frac{n_{caj}}{n_{fc}^2} \quad n_s \in \mathbb{N} \quad [\text{Ec. 8.104}]$$

$$L_{tub} = L_{caj} + L_{bat} \quad [\text{Ec. 8.105}]$$

$$I_c = \frac{(m_{carga} \sum_{i=1}^{i=n_{cont}} f_i) |m_{caj}}{t_{tot}} \quad [\text{Ec. 8.106}]$$

8.14. Consumo energético

$$E_{ac} = \left(\frac{m_{tot}(a_1 + g \text{sen} \alpha) \frac{v}{2} + \bar{P}_{av} (-\bar{P}_{tob})}{\eta_{EDS|LIM}} \right) t_{ac} \quad [\text{Ec. 8.107}]$$

$$E_{gen} = -\eta_{EDS|LIM} \left(m_{tot}(a_2 - g \text{sen} \alpha) \frac{v}{2} - \bar{P}_{av} (+\bar{P}_{tob}) \right) t_{dec} \quad [\text{Ec. 8.108}]$$

$$\bar{P}_{tob} = \frac{P_{tob}}{5} \quad [\text{Ec. 8.109}]$$

$$\bar{P}_{av} = \frac{P_D}{4} (+\bar{P}_v) \left(+\frac{P_{D_{EDS}}}{3} \right) \quad [\text{Ec. 8.110}]$$

$$\bar{P}_v = \left[\frac{\mu_a}{3} \frac{v^2}{h_1 - h_2} \ln \left(\frac{h_1}{h_2} \right) + \frac{|\Delta p_L| v}{8L} (h_1 + h_2) \right] S \quad [\text{Ec. 8.111}]$$

$$E_v = \frac{P_{av} + P_{gx} (-P_{tob})}{\eta_{EDS|LIM}} \quad P_{av} + P_{gx} (-P_{tob}) > 0 \quad [\text{Ec. 8.112}]$$

$$E_v = -\eta_{EDS|LIM} (P_{av} + P_{gx} (-P_{tob})) \quad P_{av} + P_{gx} (-P_{tob}) < 0 \quad [\text{Ec. 8.113}]$$

$$E_{bat} = \frac{(m_{Li+} |m_{bat_{tot}}) e_{bat} \frac{t_{tot}}{t_{des}}}{\eta_{bat}} \quad [\text{Ec. 8.114}]$$

$$E'_t = \frac{E_{ac} + E_{gen} + E_v + E_{bat}}{L_t} \quad [\text{Ec. 8.115}]$$

$$e'_t = \frac{E'_t}{(m_{carga} \sum_{i=1}^{i=n_{cont}} f_i) |m_{caj}} \quad [\text{Ec. 8.116}]$$

$$I_e = \frac{E_{ac} + E_{gen} + E_v + E_{bat}}{(m_{carga} \sum_{i=1}^{i=n_{cont}} f_i) |m_{caj}} \quad [\text{Ec. 8.117}]$$

8.15. Efecto de la curvatura del tubo

$$a_c = \frac{v^2}{R_t} \quad [\text{Ec. 8.118}]$$

$$F_{1a} = \frac{m_{tot}}{2} (g \cos \alpha + a_c) * \quad [\text{Ec. 8.119}]$$

$$F_{2a} = \frac{m_{tot}}{2} (g \cos \alpha - a_c) \quad [\text{Ec. 8.120}]$$

$$F_{ia} = \left(\eta_{ia} p_{ia} + \frac{1}{2} \rho_{ias} v^2 C_{iL} \right) \frac{S}{2} \quad i = 1, 2 \quad [\text{Ec. 8.121}]$$

$$\rho_{ias} = \frac{p_{ias}}{RT_a} \quad i = 1, 2 \quad [\text{Ec. 8.122}]$$

$$p_{ias} = \left(1 - \frac{\Delta p_{ia}(\%)}{100} \right) p_{ia} \quad i = 1, 2 \quad [\text{Ec. 8.123}]$$

$$|F_{iv}| = \left[\mu_a \frac{v}{h_{i1} - h_{i2}} \ln \left(\frac{h_{i1}}{h_{i2}} \right) + \frac{|\Delta p_{iL}|}{4L} (h_{i1} + h_{i2}) \right] S \quad i = 1, 2 \quad [\text{Ec. 8.124}]$$

$$\Delta p_{iL} = p_{ias} - p_t \quad i = 1, 2 \quad [\text{Ec. 8.125}]$$

$$|P_v| = v \sum_{i=1}^{i=2} |F_{iv}| \quad [\text{Ec. 8.126}]$$

$$\dot{m}_a = \sum_{i=1}^{i=2} \dot{m}_{ia} \quad [\text{Ec. 8.127}]$$

$$\dot{m}_{ia} = \frac{n_a}{2} \rho_{ias} C_{ia} h_{i2} w \quad i = 1, 2 \quad [\text{Ec. 8.128}]$$

$$\bar{R}_{ia} = \frac{F_{iL}}{\frac{n_a}{2} \Delta \bar{h}_i} \quad i = 1, 2 \quad [\text{Ec. 8.129}]$$

$$P_{C_2} = \sum_{i=1}^{i=2} P_{iC_2} \quad [\text{Ec. 8.130}]$$

$$P_{iC_2} = \frac{\dot{m}_{ia} \bar{c}_{p_{iC_2}} T_2}{\eta_{C_2}} \left(\left(\frac{p_{ia}}{p_1} \right)^{\frac{\gamma_{i2}-1}{\gamma_{i2}}} - 1 \right) \quad i = 1, 2 \quad [\text{Ec. 8.131}]$$

* Suma de cargas sobre los cojinetes, no de componentes de vectores de fuerza.

$$T_{i3} = T_2 \left(\frac{1}{\eta_{C_2}} \left(\frac{p_{ia}}{p_1} \right)^{\frac{\gamma_{i2}-1}{\gamma_{i2}}} + \frac{\eta_{C_2} - 1}{\eta_{C_2}} \right) \quad i = 1,2 \quad [\text{Ec. 8.132}]$$

$$\dot{m}_{ia} \bar{c}_{p_{i2}} (T_{i3} - T_a) = \dot{m}_{H_2O} \bar{c}'_{p_{iH_2O}} \Delta T_{i2} \quad i = 1,2 \quad [\text{Ec. 8.133}]$$

$$\dot{m}'_{H_2O} \bar{c}''_{p_{H_2O}} \Delta T_s = \dot{m}_{H_2O} \left(\sum_{i=1}^{i=2} \bar{c}'_{p_{iH_2O}} \Delta T_{i2} + h_v \right) \quad i = 1,2 \quad [\text{Ec. 8.134}]$$

9. Resultados de la parametrización del primer modelo

Todos los resultados mostrados a continuación se han obtenido mediante el programa EES (*Engineering Equation Solver*). Los resultados se van a presentar organizados por geometría y temáticamente y al final de cada tema se explicarán resumidamente. La simulación se ha enfocado en el transporte de uno, dos y tres contenedores.

Hay ciertos datos fijos de partida: $R = 287 \text{ J/kgK}$, $\gamma = 1,40$ (justificación en el anexo [II]) y $c_i = 0 \text{ m/s}$ (se supone que los trenes anteriores no inducen corrientes en el tubo). Además, como es sabido, $g = 9,81 \text{ m/s}^2$. Por otro lado, se comienza con $\delta_{rc} = 0,05 \text{ m}$, $\delta_{lc} = 0,03 \text{ m}$, $T_t = 20^\circ\text{C}$ y $p_t = 100 \text{ Pa}$. Más adelante se irá indicando qué variables se fijan en cada caso.

9.1. Primera geometría

9.1.1. Límite de Kantrowitz y arrastre aerodinámico

1..20	v [km/h]	M [-]	D_t [m]	β [-]
Run 1	500	0,40	6,05	3,65E-01
Run 2	538	0,44	6,40	3,27E-01
Run 3	576	0,47	6,78	2,91E-01
Run 4	614	0,50	7,22	2,57E-01
Run 5	652	0,53	7,71	2,25E-01
Run 6	690	0,56	8,28	1,95E-01
Run 7	728	0,59	8,94	1,68E-01
Run 8	766	0,62	9,70	1,42E-01
Run 9	804	0,65	10,61	1,19E-01
Run 10	842	0,68	11,69	9,78E-02
Run 11	880	0,71	13,02	7,90E-02
Run 12	918	0,74	14,66	6,23E-02
Run 13	956	0,77	16,76	4,76E-02
Run 14	994	0,80	19,52	3,51E-02
Run 15	1032	0,84	23,33	2,46E-02
Run 16	1070	0,87	28,89	1,60E-02
Run 17	1108	0,90	37,78	9,37E-03
Run 18	1146	0,93	54,24	4,55E-03
Run 19	1184	0,96	95,00	1,48E-03
Run 20	1222	0,99	364,88	1,01E-04

Tabla 9.1. Influencia de v en M, D_T y β a 20 °C y 100 Pa.

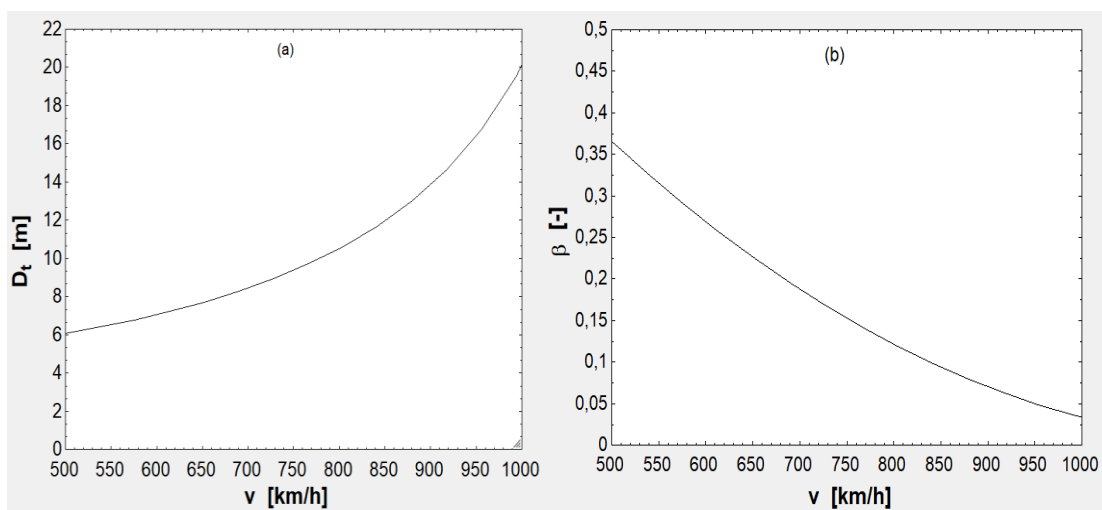


Fig. 9.1. (a) D_T frente a v. (b) β frente a v.

1..10	δ_{rc} [m]	D_t [m]	β [-]
Run 1	3,00E-02	8,69	1,73E-01
Run 2	3,50E-02	8,72	1,73E-01
Run 3	4,00E-02	8,74	1,73E-01
Run 4	4,50E-02	8,77	1,73E-01
Run 5	5,00E-02	8,79	1,73E-01
Run 6	5,50E-02	8,81	1,73E-01
Run 7	6,00E-02	8,84	1,73E-01
Run 8	6,50E-02	8,86	1,73E-01
Run 9	7,00E-02	8,89	1,73E-01
Run 10	7,50E-02	8,91	1,73E-01

Tabla 9.2. Influencia de δ_{rc} en D_T y β a 720 km/h.

1..15	p_t [Pa]	D_t [m]	β [-]
Run 1	75	8,79	1,73E-01
Run 2	400	8,79	1,73E-01
Run 3	725	8,79	1,73E-01
Run 4	1050	8,79	1,73E-01
Run 5	1375	8,79	1,73E-01
Run 6	1700	8,79	1,73E-01
Run 7	2025	8,79	1,73E-01
Run 8	2350	8,79	1,73E-01
Run 9	2675	8,79	1,73E-01
Run 10	3000	8,79	1,73E-01
Run 11	3325	8,79	1,73E-01
Run 12	3650	8,79	1,73E-01
Run 13	3975	8,79	1,73E-01
Run 14	4300	8,79	1,73E-01
Run 15	4625	8,79	1,73E-01

Tabla 9.3. Influencia de p_t en D_t y β a 720 km/h y con $\delta_{rc} = 0,05$ m.

1..11	1	2	3	4
	T_t [°C]	M [-]	D_t [m]	β [-]
Run 1	-30	0,64	10,27	1,27E-01
Run 2	-22	0,63	9,97	1,35E-01
Run 3	-14	0,62	9,70	1,42E-01
Run 4	-6	0,61	9,45	1,50E-01
Run 5	2	0,60	9,23	1,57E-01
Run 6	10	0,59	9,02	1,64E-01
Run 7	18	0,58	8,83	1,71E-01
Run 8	26	0,58	8,66	1,78E-01
Run 9	34	0,57	8,50	1,85E-01
Run 10	42	0,56	8,35	1,92E-01
Run 11	50	0,56	8,21	1,98E-01

Tabla 9.4. Influencia de T_t en M, D_t y β a 720 km/h y con $\delta_{rc} = 0,050$ m.

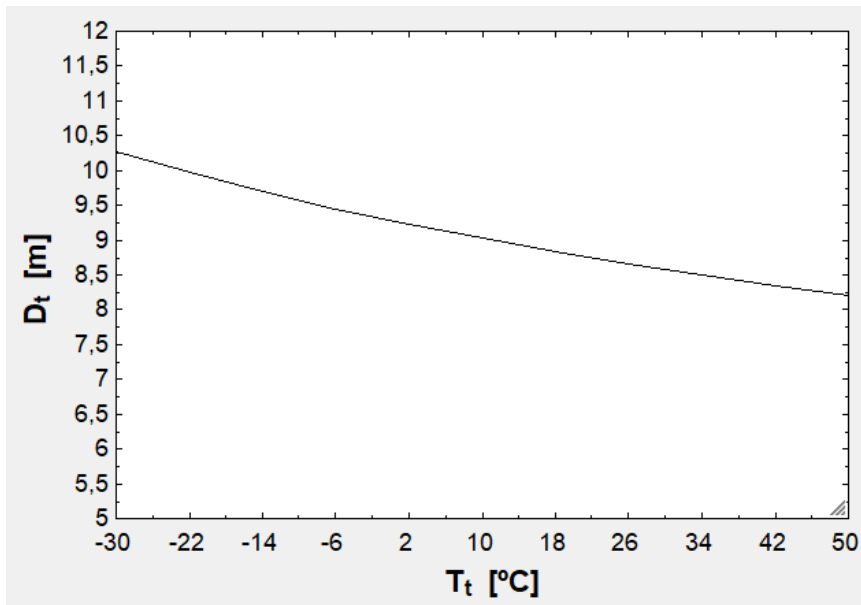
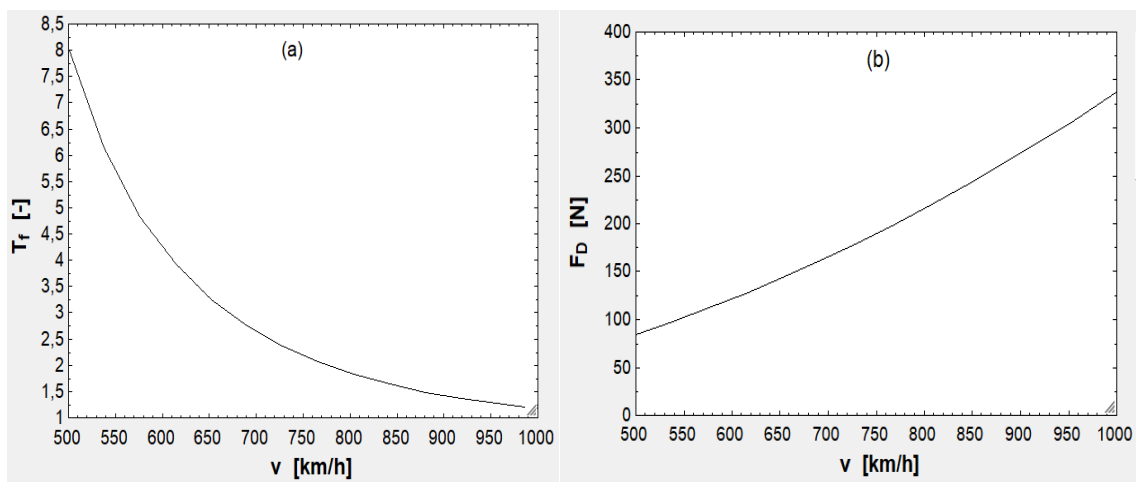


Fig. 9.2. D_t en función de T_t .

1..20	1	2	3	4
	v [km/h]	T_f [-]	F_D [N]	P_D [W]
Run 1	500	2,71	60,24	8366,58
Run 2	538	2,44	69,74	10422,81
Run 3	576	2,21	79,94	12791,03
Run 4	614	2,01	90,84	15493,27
Run 5	652	1,84	102,43	18551,57
Run 6	690	1,70	114,72	21987,98
Run 7	728	1,58	127,70	25824,51
Run 8	766	1,47	141,38	30083,22
Run 9	804	1,38	155,76	34786,13
Run 10	842	1,31	170,83	39955,29
Run 11	880	1,24	186,60	45612,72
Run 12	918	1,19	203,06	51780,48
Run 13	956	1,14	220,22	58480,58
Run 14	994	1,10	238,07	65735,07
Run 15	1032	1,07	256,63	73565,99
Run 16	1070	1,05	275,87	81995,37
Run 17	1108	1,03	295,81	91045,25
Run 18	1146	1,01	316,45	100737,66
Run 19	1184	1,00	337,79	111094,64
Run 20	1222	1,00	359,82	122138,23

Tabla 9.5. Influencia de v en T_f , F_D , P_D con $C_{D_{ext}} = 0,70$, a $20\text{ }^\circ\text{C}$ y 100 Pa .



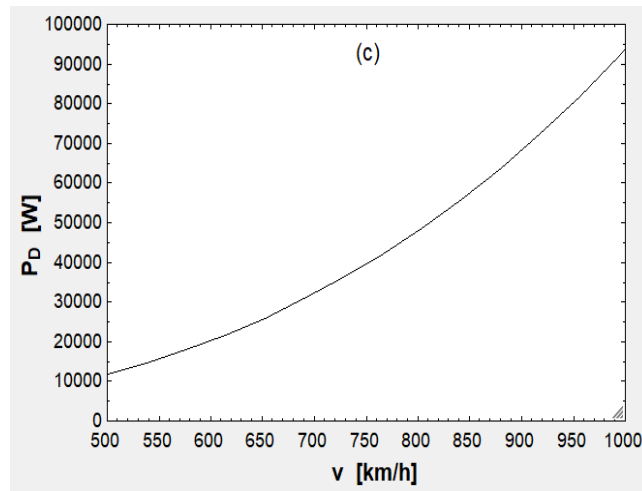


Fig. 9.3. (a) Relación entre T_f y v . (b) Relación entre F_D y v . (c) Relación entre P_D y v .

1..20	1 $C_{D,ext}$ [-]	2 T_f [-]	3 F_D [N]	4 P_D [W]
Run 1	0,05	1,02	12,77	2.553,23
Run 2	0,10	1,05	26,22	5.243,60
Run 3	0,15	1,08	40,59	8.117,15
Run 4	0,20	1,12	56,14	11.228,64
Run 5	0,25	1,17	73,22	14.644,42
Run 6	0,30	1,23	92,23	18.446,24
Run 7	0,35	1,30	113,68	22.736,58
Run 8	0,40	1,38	138,23	27.646,15
Run 9	0,45	1,48	166,72	33.344,57
Run 10	0,50	1,60	200,28	40.055,98
Run 11	0,55	1,75	240,41	48.082,39
Run 12	0,60	1,93	289,20	57.839,30
Run 13	0,65	2,15	349,56	69.911,85
Run 14	0,70	2,43	425,73	85.145,97
Run 15	0,75	2,80	524,01	104.802,06
Run 16	0,80	3,27	654,13	130.825,23
Run 17	0,85	3,92	831,72	166.344,84
Run 18	0,90	4,82	1.083,30	216.660,08
Run 19	0,95	6,14	1.456,61	291.322,21
Run 20	1,00	8,19	2.044,97	408.993,69

Tabla 9.6. Influencia de $C_{D,ext}$ en T_f , F_D , P_D a 720 km/h.

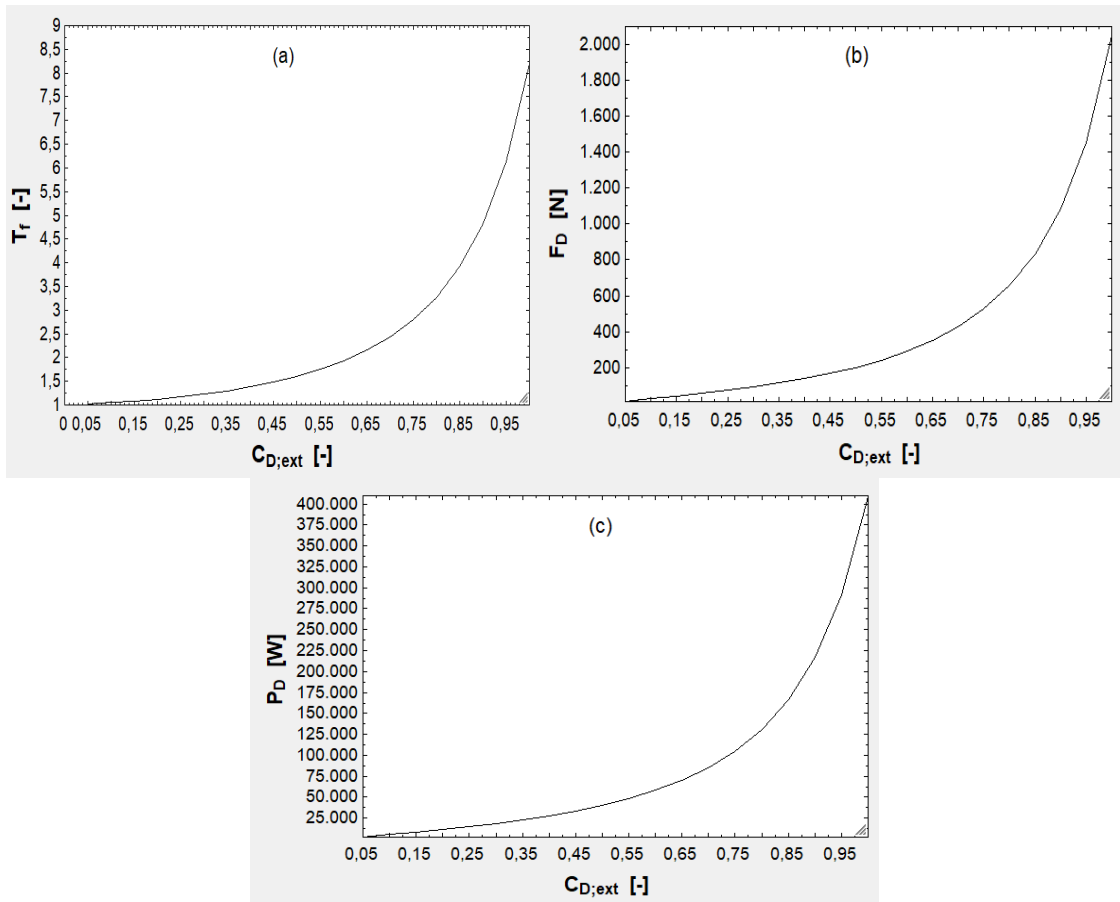


Fig. 9.4. (a) T_f , (b) F_D , (c) P_D en función de $C_{D:ext}$ a 720 km/h.

1..15	1 P_t [Pa]	2 T_f [-]	3 F_D [N]	4 P_D [W]
Run 1	75	1,60	150,21	30.041,99
Run 2	400	1,60	801,12	160.223,94
Run 3	725	1,60	1.452,03	290.405,88
Run 4	1.050	1,60	2.102,94	420.587,83
Run 5	1.375	1,60	2.753,85	550.769,78
Run 6	1.700	1,60	3.404,76	680.951,73
Run 7	2.025	1,60	4.055,67	811.133,68
Run 8	2.350	1,60	4.706,58	941.315,63
Run 9	2.675	1,60	5.357,49	1.071.497,58
Run 10	3.000	1,60	6.008,40	1.201.679,52
Run 11	3.325	1,60	6.659,31	1.331.861,47
Run 12	3.650	1,60	7.310,22	1.462.043,42
Run 13	3.975	1,60	7.961,13	1.592.225,37
Run 14	4.300	1,60	8.612,04	1.722.407,32
Run 15	4.625	1,60	9.262,95	1.852.589,27

Tabla 9.7. Influencia de p_t en T_f , F_D y P_D con $C_{D_{ext}} = 0,50$ a 720 km/h y a 20 °C.

1..11	1 T_t [°C]	2 T_f [-]	3 F_D [N]	4 P_D [W]
Run 1	-30	1,41	213,05	42.610,43
Run 2	-22	1,44	210,65	42.129,84
Run 3	-14	1,47	208,41	41.681,31
Run 4	-6	1,51	206,31	41.261,12
Run 5	2	1,54	204,33	40.866,11
Run 6	10	1,57	202,47	40.493,58
Run 7	18	1,60	200,71	40.141,18
Run 8	26	1,63	199,03	39.806,89
Run 9	34	1,66	197,44	39.488,93
Run 10	42	1,69	195,93	39.185,78
Run 11	50	1,72	194,48	38.896,07

Tabla 9.8. Influencia de T_t en T_f , F_D y P_D con $C_{D_{ext}} = 0,50$ a 720 km/h y a 100 Pa.

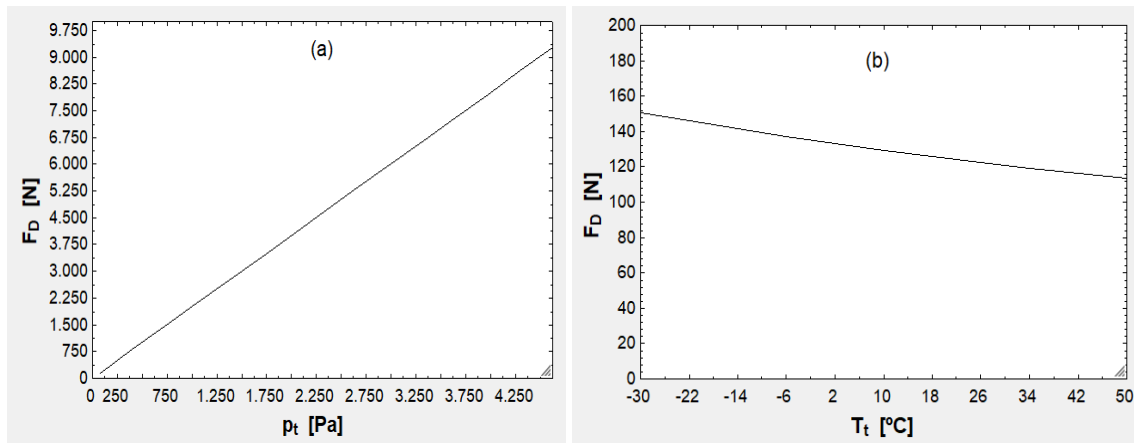


Fig. 9.5. Dependencia de F_D con (a) p_t y con (b) T_t .

En conclusión, acudiendo a la figura [9.1], en ella se observa que para cumplir con el límite de Kantrowitz el diámetro del tubo debe ser 10 m alrededor de los 800 km/h y que en el rango de 800-1.000 km/h aumenta rápidamente. Además, el bloqueo que causa el vehículo también lo hace rápidamente en dicho rango. En el entorno de 500-600 km/h el diámetro es de 6-7 m, pero el bloqueo es mayor (20-30 %) y son velocidades bajas para el Hyperloop. En la figura [9.2] se aprecia que el espesor radial de la cápsula no afecta mucho, ya que entre el mejor y peor de los casos la variación de D_t es de 30 cm. En la tabla [9.3] se ve que la presión no afecta al límite de Kantrowitz, aunque sí afecta bastante la temperatura, como se desprende de la gráfica [9.2]. También debe tenerse en cuenta que el rango de T_t propuesto es amplio y que en variaciones más comunes de 20 °C el D_t que cumple con la limitación de Kantrowitz solo varía 50 cm. De la gráfica [9.3] se desprende que el factor de túnel se desploma al subir v , mientras que F_D no se ve tan drásticamente afectada, aunque sí en el caso de P_D , que depende de su cubo. Otras consideraciones aerodinámicas importantes es que $C_{D_{ext}}$ tiene un impacto muy grande en F_D y P_D , ya que aumenta T_f enormemente a partir de cuando vale 0,60 aproximadamente (gráfica [9.4]). Por otra parte, F_D crece linealmente con p_t y se ve poco afectado con T_t (gráfica [9.5]).

9.1.2. Cinemática

1..11	1 v [km/h]	2 \bar{v} [km/h]	3 t _{ac} [s]	4 t _{dec} [s]	5 t _v [min]	6 t _{tot} [min]
Run 1	500	499,26	14,16	7,08	119,82	120,18
Run 2	550	549,02	15,57	7,79	108,90	109,29
Run 3	600	598,73	16,99	8,49	99,79	100,21
Run 4	650	648,38	18,41	9,20	92,08	92,54
Run 5	700	697,98	19,82	9,91	85,47	85,96
Run 6	750	747,52	21,24	10,62	79,73	80,27
Run 7	800	796,99	22,65	11,33	74,72	75,28
Run 8	850	846,39	24,07	12,03	70,29	70,89
Run 9	900	895,72	25,48	12,74	66,35	66,99
Run 10	950	944,97	26,90	13,45	62,82	63,49
Run 11	1000	994,14	28,32	14,16	59,65	60,35

Tabla 9.9. Influencia de v en t_{ac}, t_{dec}, t_v y t_{tot} para L_t = 1.000 km.

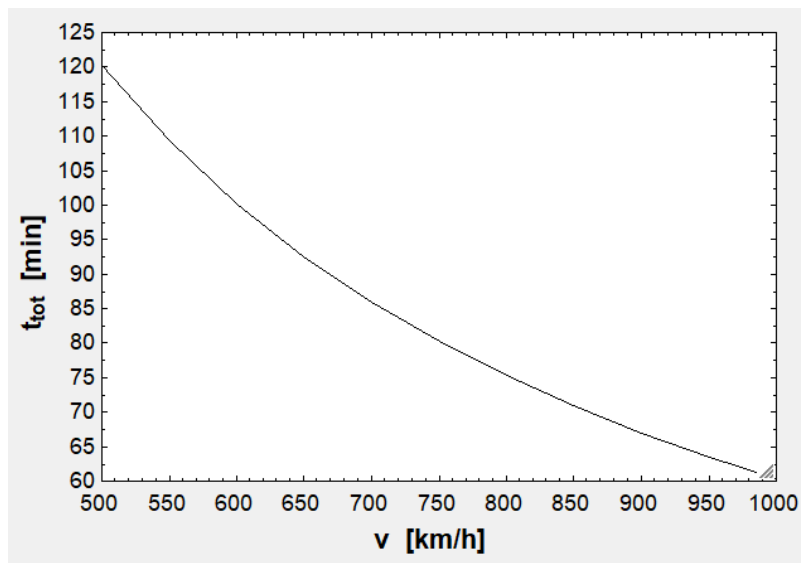


Fig. 9.6. Relación entre t_{tot} y v.

1..3	1 L _t [km]	2 \bar{v} [km/h]	3 t _{ac} [s]	4 t _{dec} [s]	5 t _v [min]	6 t _{tot} [min]
Run 1	500	715,62	20,39	10,19	41,41	41,92
Run 2	750	717,08	20,39	10,19	62,25	62,75
Run 3	1000	717,80	20,39	10,19	83,08	83,59

Tabla 9.10. Las mismas variables en función de L_t a 720 km/h.

1.20	1	2	3	4	5	6	7	8
	a_1 [m/s ²]	a_2 [m/s ²]	\bar{v} [km/h]	t_{ac} [s]	t_{dec} [s]	t_v [min]	t_{tot} [min]	
Run 1	1,00	1,00	683,54	200,00	200,00	59,17	65,83	
Run 2	2,26	3,58	706,41	88,37	55,88	61,30	63,70	
Run 3	3,53	6,16	711,54	56,72	32,48	61,76	63,24	
Run 4	4,79	8,74	713,85	41,76	22,89	61,96	63,04	
Run 5	6,05	11,32	715,16	33,04	17,67	62,08	62,92	
Run 6	7,32	13,89	716,02	27,34	14,39	62,15	62,85	
Run 7	8,58	16,47	716,61	23,31	12,14	62,20	62,80	
Run 8	9,84	19,05	717,05	20,32	10,50	62,24	62,76	
Run 9	11,11	21,63	717,39	18,01	9,25	62,27	62,73	
Run 10	12,37	24,21	717,66	16,17	8,26	62,30	62,70	
Run 11	13,63	26,79	717,88	14,67	7,47	62,32	62,68	
Run 12	14,89	29,37	718,06	13,43	6,81	62,33	62,67	
Run 13	16,16	31,95	718,22	12,38	6,26	62,34	62,66	
Run 14	17,42	34,53	718,35	11,48	5,79	62,36	62,64	
Run 15	18,68	37,11	718,46	10,70	5,39	62,37	62,63	
Run 16	19,95	39,68	718,56	10,03	5,04	62,37	62,63	
Run 17	21,21	42,26	718,64	9,43	4,73	62,38	62,62	
Run 18	22,47	44,84	718,72	8,90	4,46	62,39	62,61	
Run 19	23,74	47,42	718,79	8,43	4,22	62,39	62,61	
Run 20	25,00	50,00	718,85	8,00	4,00	62,40	62,60	

Tabla 9.11. Influencia de a_1 y a_2 en esas mismas variables a 720 km/h y en 750 km.

1.12	1	2	3	4	5	6	7	8
	v [km/h]	L_t [km]	a_1 [m/s ²]	a_2 [m/s ²]	L_{ac} [km]	L_{dec} [km]	L_v [km]	
Run 1	500	500	9,81	19,62	0,98	0,49	498,53	
Run 2	500	500	15,00	30,00	0,64	0,32	499,04	
Run 3	720	500	9,81	19,62	2,04	1,02	496,94	
Run 4	720	500	15,00	30,00	1,33	0,67	498,00	
Run 5	500	750	9,81	19,62	0,98	0,49	748,53	
Run 6	500	750	15,00	30,00	0,64	0,32	749,04	
Run 7	720	750	9,81	19,62	2,04	1,02	746,94	
Run 8	720	750	15,00	30,00	1,33	0,67	748,00	
Run 9	500	1000	9,81	19,62	0,98	0,49	998,53	
Run 10	500	1000	15,00	30,00	0,64	0,32	999,04	
Run 11	720	1000	9,81	19,62	2,04	1,02	996,94	
Run 12	720	1000	15,00	30,00	1,33	0,67	998,00	

Tabla 9.12. Efecto de las variables anteriores en L_{ac} , L_{dec} y L_v .

De estos resultados se puede decir que en la figura [9.6] se aprecia que el t_{tot} que se tarda en recorrer el tubo es inversamente proporcional al v . Además, en la tabla [9.10] se ve el efecto de L_t en \bar{v} y en los tiempos. A mayor L_t , mayor \bar{v} porque los periodos de

aceleración y deceleración se tornan insignificantes. En las tablas [9.11] y [9.12] se verifica que subir a_1 y a_2 reduce en gran medida t_{ac} y t_{dec} , pero apenas afecta a t_{tot} , que está en otro orden de magnitud superior. En la [9.12] se comprueba que aumentar v aumenta L_{ac} y L_{dec} , aunque incrementando a_1 y a_2 se reducen de nuevo.

9.1.3. Levitación y propulsión

Para este subapartado se van a emplear las masas definidas, por lo que es importante hacer una estimación inicial de las mismas para saber su orden de magnitud:

m'_{est} : Si la estructura de la cápsula para viajeros y mercancía de Elon Musk tiene una masa de 3.500 kg [18, p. 24] con un diámetro de 2,244 m [18, p. 26] y una longitud de unos 25 m (un poco más de 21 m, que es lo que ocupan 14 rodamientos de aire en línea de 1,500 m de longitud cada uno [18, p. 20]), la estructura de un vehículo que permita el transporte de contenedores será proporcional a 3.500 kg teniendo en cuenta que la longitud es de unos 6,200 m de longitud (poco más de 6,058+2·0,050 (espesor aproximado)) y 3.658 m de diámetro (3.558+2·0,050 (espesor aproximado)). También hay que tener en cuenta que la cápsula del modelo de Musk tiene una masa de 26 t [18, p. 24] y una cápsula para un contenedor puede tener 35 t con todas las masas incluidas. Si la densidad de los materiales se supone la misma, la estimación es la siguiente:

$$m'_{est} \sim 3.500 \cdot \frac{\frac{\pi}{4} \cdot 3,658^2 \cdot 35}{\frac{\pi}{4} \cdot 2,224^2 \cdot 25,000 \cdot 26} \cong 510 \frac{kg}{m} \sim 500 \frac{kg}{m}$$

m'_{EDS} : El deslizador del LIM tiene una masa de 800 kg para el segundo modelo de Musk [18, p.24]. Asumiendo que la masa del EDS será semejante:

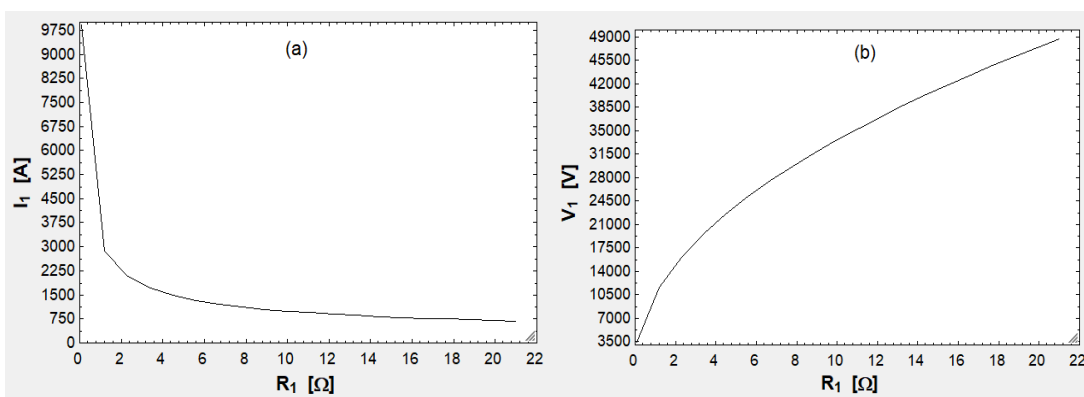
$$m'_{EDS} = \frac{800}{25} = 32 \frac{kg}{m}$$

m_{Li+} : Las baterías para el sistema potencia pesan 407 kg (5.500 kg menos la suma de 275, 818 y 1000 kg [18, p. 19-24]). Es decir, 400 kg aproximadamente.

m_{EB} : 800 kg [18, p.24].

1..20	1 R_1 [Ω]	2 I_1 [A]	3 X_1 [Ω]	4 V_1 [V]	5 E_1 [V]
Run 1	0,10	9926,42	0,06	3359,85	2674,48
Run 2	1,20	2865,51	0,71	11638,86	9264,66
Run 3	2,30	2069,80	1,35	16113,28	12826,34
Run 4	3,40	1702,37	2,00	19591,12	15594,74
Run 5	4,50	1479,74	2,64	22538,56	17940,93
Run 6	5,60	1326,47	3,29	25142,82	20013,95
Run 7	6,70	1212,71	3,94	27501,56	21891,54
Run 8	7,80	1123,95	4,58	29673,40	23620,34
Run 9	8,90	1052,20	5,23	31696,77	25230,96
Run 10	10,00	992,64	5,88	33598,51	26744,77
Run 11	11,10	942,17	6,52	35398,22	28177,36
Run 12	12,20	898,70	7,17	37110,74	29540,51
Run 13	13,30	860,73	7,82	38747,67	30843,53
Run 14	14,40	827,20	8,46	40318,19	32093,69
Run 15	15,50	797,31	9,11	41829,79	33296,94
Run 16	16,60	770,44	9,76	43288,64	34458,20
Run 17	17,70	746,12	10,40	44699,90	35581,58
Run 18	18,80	723,96	11,05	46067,94	36670,56
Run 19	19,90	703,67	11,70	47396,52	37728,13
Run 20	21,00	684,99	12,34	48688,85	38756,84

Tabla 9.13. Impacto de R_1 en las variables de la parte propulsiva del EDS. $\eta_{EDS} = 0,70$, $\varphi = 10^\circ$, $\gamma_0 = 30^\circ$. Un solo contenedor lleno y 720 km/h.



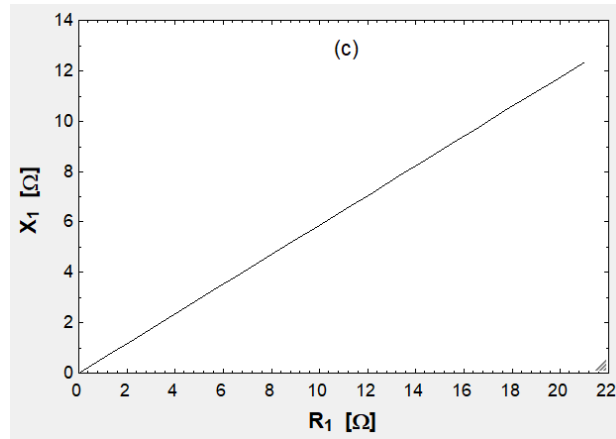


Fig. 9.7. (a) Relación entre R_1 e I_1 . (b) Relación entre R_1 y V_1 . (c) Relación entre R_1 y X_1 .

1.9	1	2	3	4	5
ϕ [°]	I_1 [A]	V_1 [V]	X_1 [Ω]	E_1 [V]	
Run 1	10	991,69	33.566,22	5,88	26.719,07
Run 2	20	991,69	35.149,92	12,05	26.719,07
Run 3	30	991,69	38.074,54	19,05	26.719,07
Run 4	40	991,69	42.917,12	27,60	26.719,07
Run 5	50	991,69	50.899,03	39,03	26.719,07
Run 6	59	991,69	64.890,41	56,31	26.719,07
Run 7	69	991,69	93.302,60	87,98	26.719,07
Run 8	79	991,69	175.209,68	173,51	26.719,07
Run 9	89	991,69	1.894.085,71	1.909,67	26.719,07

Tabla 9.14. Impacto de la variación de ϕ en los demás parámetros para $R_1 = 10 \Omega$ y las demás condiciones anteriores.

1.10	γ_0 [°]	I_1 [A]	V_1 [V]	X_1 [Ω]	E_1 [V]
Run 1	10	991,69	33.566,22	5,88	23.496,35
Run 2	19	991,69	33.566,22	5,88	24.440,24
Run 3	28	991,69	33.566,22	5,88	26.100,12
Run 4	36	991,69	33.566,22	5,88	28.723,76
Run 5	45	991,69	33.566,22	5,88	32.787,69
Run 6	54	991,69	33.566,22	5,88	39.262,36
Run 7	63	991,69	33.566,22	5,88	50.394,34
Run 8	71	991,69	33.566,22	5,88	72.714,16
Run 9	80	991,69	33.566,22	5,88	136.252,52
Run 10	89	991,69	33.566,22	5,88	1.325.860,01

Tabla 9.15. Impacto de la variación de γ_0 en los demás parámetros para $R_1 = 10 \Omega$ y las demás condiciones de la tabla [9.13].

1.10	η_{EDS} [-]	X_1 [Ω]	I_1 [A]	V_1 [V]	E_1 [V]	P_1 [W]
Run 1	0,50	3,53	1.516,15	30.790,86	17.507,04	137.923.392,82
Run 2	0,54	3,87	1.386,88	30.913,23	19.138,98	126.664.340,35
Run 3	0,59	4,29	1.266,79	31.289,28	20.953,17	117.104.767,49
Run 4	0,63	4,81	1.153,62	31.947,73	23.008,76	108.886.889,07
Run 5	0,68	5,47	1.045,39	32.943,56	25.390,93	101.746.765,20
Run 6	0,72	6,35	940,28	34.372,23	28.229,25	95.485.425,80
Run 7	0,77	7,56	836,43	36.399,90	31.734,21	89.950.038,80
Run 8	0,81	9,33	731,66	39.332,22	36.278,53	85.021.269,55
Run 9	0,86	12,21	622,97	43.794,27	42.607,53	80.604.580,22
Run 10	0,90	17,63	505,39	51.318,02	52.521,01	76.624.107,12

Tabla 9.16. Impacto de la variación de η_{EDS} en los demás parámetros cuando $R_1 = 10 \Omega$ y las demás condiciones de la tabla [9.13].

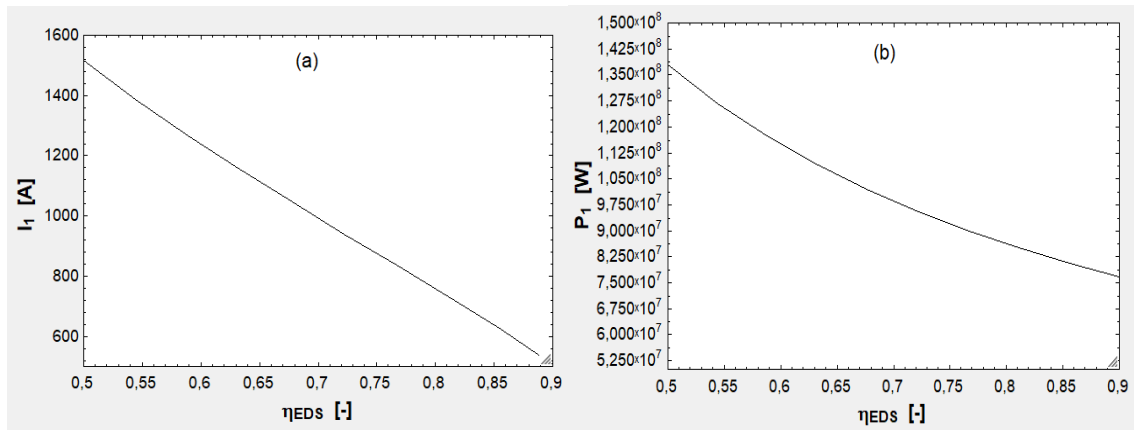


Fig. 9.8. (a) I_1 según η_{EDS} . (b) P_1 según η_{EDS} .

1.9	1	2	3	4	5	6	7	8
n_{cont} [-]	m'_{est} [kg/m]	m'_{EDS} [kg/m]	m_{EB} [kg]	m_{Li} [kg]	f_1 [-]	f_2 [-]	f_3 [-]	
Run 1	1	400	25	750	350	1	0	0
Run 2	1	500	32	800	400	1	0	0
Run 3	1	600	40	900	450	1	0	0
Run 4	2	400	25	750	350	1	1	0
Run 5	2	500	32	800	400	1	1	0
Run 6	2	600	40	900	450	1	1	0
Run 7	3	400	25	750	350	1	1	1
Run 8	3	500	32	800	400	1	1	1
Run 9	3	600	40	900	450	1	1	1

9	10	11	12
m_{tot} [kg]	F_x [N]	F_z [N]	$F_{D,EDS}$ [N]
34.180	336.773,41	335.307,27	1.341,23
34.935	344.205,91	342.710,15	1.370,84
35.746	352.191,12	350.663,55	1.402,65
67.260	662.587,75	659.823,54	2.639,29
68.670	676.467,81	673.648,31	2.694,59
70.141	690.960,85	688.083,60	2.752,33
100.340	988.402,09	984.339,81	3.937,36
102.404	1.008.729,72	1.004.586,46	4.018,35
104.537	1.029.730,58	1.025.503,65	4.102,01

Tabla 9.17. m_{tot} , F_x , F_z y $F_{D,EDS}$ para diferentes masas de los componentes y diferente número de contenedores (todos llenos). Fuerzas al final de la aceleración con $a_1 = 9,81 \text{ m/s}^2$, $v = 720 \text{ km/h}$ y $C_{D,EDS} = 4 \cdot 10^{-3}$. $\delta_{lc} = 0,03 \text{ m}$.

1	2	3	4
1...30	$C_{D,EDS}$ [-]	m_{tot} [kg]	$F_{D,EDS}$ [N]
Run 1	5,00E-03	35.000	1.716,75
Run 2	5,56E-03	35.000	1.907,50
Run 3	6,11E-03	35.000	2.098,25
Run 4	6,67E-03	35.000	2.289,00
Run 5	7,22E-03	35.000	2.479,75
Run 6	7,78E-03	35.000	2.670,50
Run 7	8,33E-03	35.000	2.861,25
Run 8	8,89E-03	35.000	3.052,00
Run 9	9,44E-03	35.000	3.242,75
Run 10	1,00E-02	35.000	3.433,50
Run 11	5,00E-03	67.250	3.298,61
Run 12	5,56E-03	67.250	3.665,13
Run 13	6,11E-03	67.250	4.031,64
Run 14	6,67E-03	67.250	4.398,15
Run 15	7,22E-03	67.250	4.764,66
Run 16	7,78E-03	67.250	5.131,18
Run 17	8,33E-03	67.250	5.497,69
Run 18	8,89E-03	67.250	5.864,20
Run 19	9,44E-03	67.250	6.230,71
Run 20	1,00E-02	67.250	6.597,23
Run 21	5,00E-03	102.500	5.027,63
Run 22	5,56E-03	102.500	5.586,25
Run 23	6,11E-03	102.500	6.144,87
Run 24	6,67E-03	102.500	6.703,50
Run 25	7,22E-03	102.500	7.262,12
Run 26	7,78E-03	102.500	7.820,75
Run 27	8,33E-03	102.500	8.379,37
Run 28	8,89E-03	102.500	8.938,00
Run 29	9,44E-03	102.500	9.496,62
Run 30	1,00E-02	102.500	10.055,25

Tabla 9.18. Impacto de $C_{D,EDS}$ en $F_{D,EDS}$ y $P_{D,EDS}$ para diferentes valores de m_{tot} (para cada valor de n_{cont} se ha escogido el más plausible de la tabla [9.16]). $v = 720$ km/h.

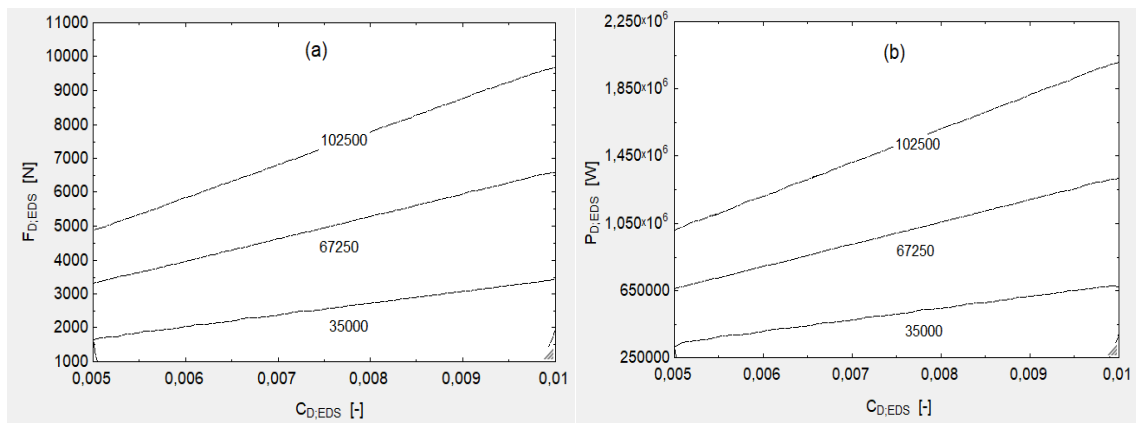


Fig. 9.9. (a) $F_{D,EDS}$ y (b) $P_{D,EDS}$ frente a $C_{D,EDS}$ a 720 km/h.

En cuanto al EDS, en la figura [9.7] se aprecia que I_1 cae fuertemente a medida que aumenta R_1 . Esto es así porque estos términos constituyen las pérdidas de potencia activa del EDS ($3R_1I_1^2$) y para un η_{EDS} y una P_1 estas pérdidas son fijas, por lo que $3R_1I_1^2 = \text{cte}$. En esta figura también se ve que al reducir I_1 debe incrementarse V_1 para mantener una P_1 fija ($P_1 = 3V_1I_1\cos\varphi$) y que la relación entre X_1 y R_1 es lineal para unas condiciones dadas. En la tabla [9.14] se ve que al aumentar φ crece V_1 y X_1 (mayor potencia reactiva en juego), mientras que en la tabla [9.15] se aprecia que E_1 sube notablemente con γ_0 . Respecto al η_{EDS} , en la figura [9.8] se ve que es muy importante su aumento a fin de bajar tanto P_1 cuanto I_1 . En la tabla [9.17] se puede observar que la incertidumbre existente en cuanto a las masas totales no altera mucho los resultados de las fuerzas del EDS. Por último, en la gráfica [9.9] se puede ver que entre el peor y el mejor de los casos de $C_{D_{ext}}$ se da una variación de varios miles de [N] o de [W] si se habla de $P_{D_{EDS}}$. En cualquier caso, no se cambia el orden de magnitud, aunque la afección es importante en el caso de tres contenedores.

9.1.4. Transporte y consumo energético

1..12	1 e_{bat} [Wh/kg]	2 m_{Li} [kg]	3 E_{bat} [kWh]	4 E'_t [kWh/km]
Run 1	100	400	34,19	0,77
Run 2	150	400	51,28	0,79
Run 3	200	400	68,38	0,80
Run 4	250	400	85,47	0,82
Run 5	100	500	42,74	0,78
Run 6	150	500	64,1	0,80
Run 7	200	500	85,47	0,82
Run 8	250	500	106,8	0,84
Run 9	100	600	51,28	0,79
Run 10	150	600	76,92	0,82
Run 11	200	600	102,6	0,84
Run 12	250	600	128,2	0,87

Tabla 9.19. Impacto de e_{bat} y m_{Li^+} en E_{bat} y E'_t . 720 km/h, $a_1 = 9,81 \text{ m/s}^2$, $a_2 = 19,62 \text{ m/s}^2$, $L_t = 1.000 \text{ km}$, un contenedor lleno y masas del subpartado [9.1.3]. $C_{D_{ext}} = 0,50$, $C_{D_{EDS}} = 4 \cdot 10^{-3}$, $\eta_{EDS} = 0,70$, $\eta_{bat} = 0,90$ y $\tau_2 = 30 \%$. Se ha variado e_{bat} entre sus valores típicos para una batería de iones de litio [32].

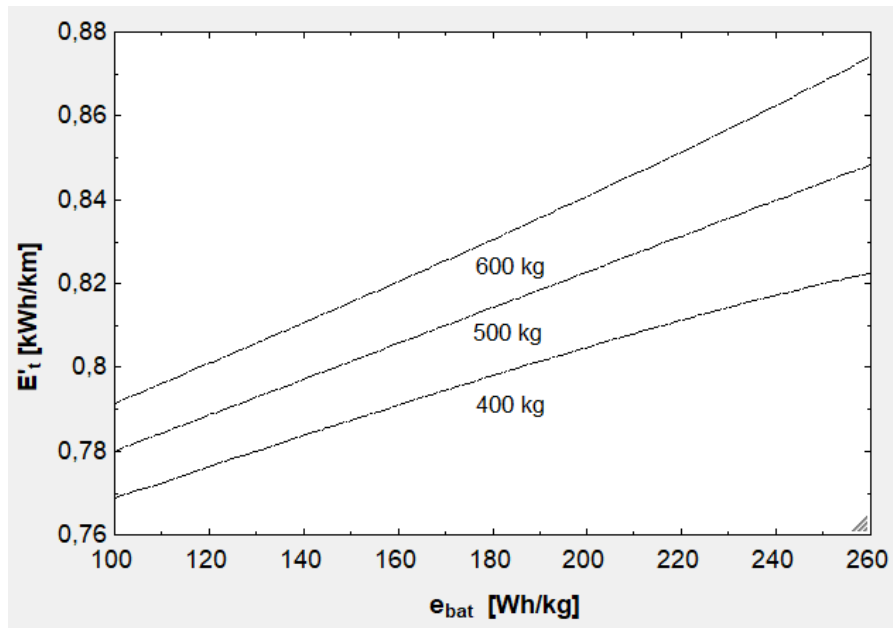


Fig. 9.10. E'_t contra e_{bat} para tres valores de m_{Li^+} .

1..10	1 η_{bat} [-]	2 E_{bat} [kWh]	3 E'_t [kWh/km]
Run 1	0,70	87,91	0,82
Run 2	0,73	84,56	0,82
Run 3	0,76	81,45	0,82
Run 4	0,78	78,56	0,81
Run 5	0,81	75,87	0,81
Run 6	0,84	73,36	0,81
Run 7	0,87	71,01	0,81
Run 8	0,89	68,8	0,80
Run 9	0,92	66,73	0,80
Run 10	0,95	64,78	0,80

Tabla 9.20. Impacto de η_{bat} en E_{bat} y E'_t para $m_{Li^+} = 400$ kg, $e_{bat} = 200$ Wh/kg y el resto de datos de la tabla [9.19].

1..11	1 v [km/h]	2 E _{bat} [kWh]	3 E _{ac} [kWh]	4 E _{gen} [kWh]	5 E _v [kWh]	6 E' _t [kWh/km]
Run 1	500	68,38	134,31	-65,54	568,00	0,71
Run 2	550	68,38	162,52	-79,31	572,84	0,72
Run 3	600	68,38	193,42	-94,38	578,13	0,75
Run 4	650	68,38	227,00	-110,76	583,88	0,77
Run 5	700	68,38	263,27	-128,46	590,08	0,79
Run 6	750	68,38	302,24	-147,46	596,74	0,82
Run 7	800	68,38	343,89	-167,78	603,84	0,85
Run 8	850	68,38	388,23	-189,40	611,40	0,88
Run 9	900	68,38	435,26	-212,34	619,41	0,91
Run 10	950	68,38	484,98	-236,58	627,87	0,94
Run 11	1000	68,38	537,39	-262,13	636,78	0,98

Tabla 9.21. Efecto de v en E_{bat}, E_{ac}, E_{gen}, E_v, E'_t para m_{Li+} = 400 kg, e_{bat} = 200 Wh/kg y el resto de datos de la tabla [9.19].

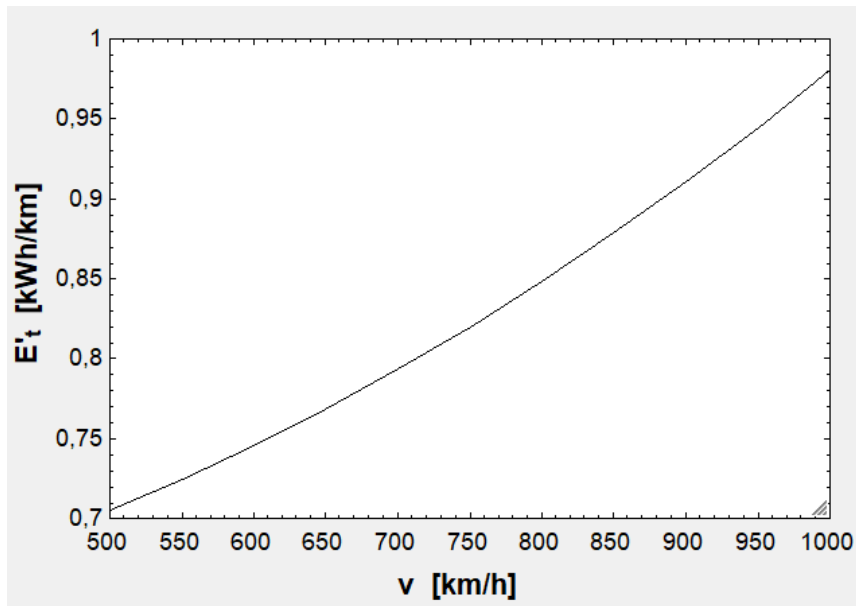


Fig. 9.11. E'_t en función de v.

1..5	1 a ₁ [m/s ²]	2 a ₂ [m/s ²]	3 E _{bat} [kWh]	4 E _{ac} [kWh]	5 E _{gen} [kWh]	6 E _v [kWh]	7 E' _t [kWh/km]
Run 1	5,00	7,50	68,38	279,30	-135,59	590,54	0,80
Run 2	7,50	10,63	68,38	278,78	-135,74	591,80	0,80
Run 3	10,00	13,75	68,38	278,52	-135,82	592,45	0,80
Run 4	12,50	16,88	68,38	278,37	-135,87	592,85	0,80
Run 5	15,00	20,00	68,38	278,26	-135,91	593,12	0,80

Tabla 9.22. Impacto de a₁ y a₂ en las mismas variables a 720 km/h y con los datos anteriores.

1.20	1 $C_{D;ext}$ [-]	2 E_{ac} [kWh]	3 E_{gen} [kWh]	4 E_v [kWh]	5 E'_t [kWh/km]
Run 1	0,05	278,00	-135,68	547,37	0,76
Run 2	0,10	278,01	-135,67	552,69	0,76
Run 3	0,15	278,02	-135,67	558,38	0,77
Run 4	0,20	278,02	-135,67	564,53	0,78
Run 5	0,25	278,03	-135,67	571,29	0,78
Run 6	0,30	278,04	-135,67	578,81	0,79
Run 7	0,35	278,05	-135,67	587,30	0,80
Run 8	0,40	278,06	-135,66	597,01	0,81
Run 9	0,45	278,07	-135,66	608,28	0,82
Run 10	0,50	278,08	-135,66	621,55	0,83
Run 11	0,55	278,10	-135,65	637,43	0,85
Run 12	0,60	278,12	-135,65	656,73	0,87
Run 13	0,65	278,14	-135,64	680,61	0,89
Run 14	0,70	278,17	-135,63	710,74	0,92
Run 15	0,75	278,21	-135,62	749,63	0,96
Run 16	0,80	278,26	-135,61	801,10	1,01
Run 17	0,85	278,34	-135,59	871,36	1,08
Run 18	0,90	278,44	-135,57	970,89	1,18
Run 19	0,95	278,59	-135,53	1118,57	1,33
Run 20	1,00	278,83	-135,47	1351,33	1,56

Tabla 9.23. Las variables anteriores (excepto E_{bat} , que es constante) frente a $C_{D;ext}$.

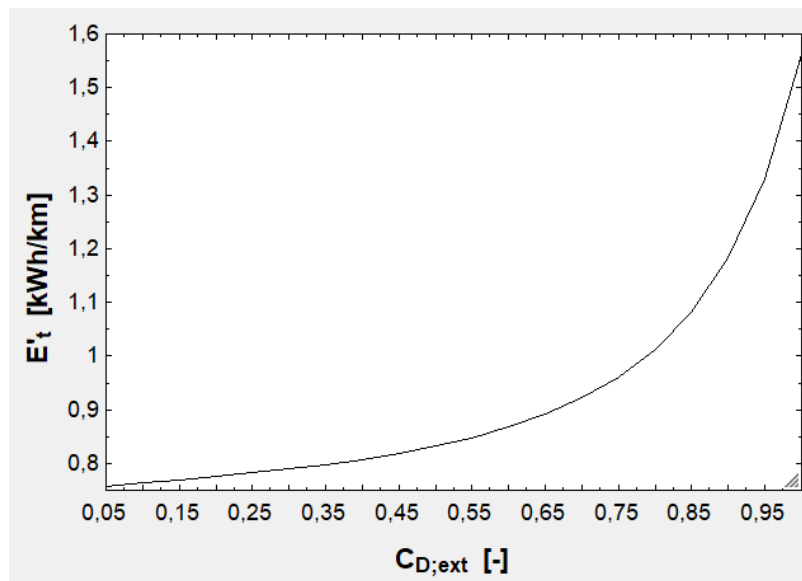


Fig. 9.12. Dependencia de E'_t con $C_{D;ext}$.

1..19	1 $C_{D;EDS}$ [-]	2 E_{ac} [kWh]	3 E_{gen} [kWh]	4 E_v [kWh]	5 E'_t [kWh/km]
Run 1	1,00E-03	277,50	-135,80	185,00	0,40
Run 2	1,50E-03	277,59	-135,78	252,79	0,46
Run 3	2,00E-03	277,68	-135,75	320,58	0,53
Run 4	2,50E-03	277,77	-135,73	388,37	0,60
Run 5	3,00E-03	277,87	-135,71	456,16	0,67
Run 6	3,50E-03	277,96	-135,69	523,95	0,73
Run 7	4,00E-03	278,05	-135,66	591,74	0,80
Run 8	4,50E-03	278,14	-135,64	659,53	0,87
Run 9	5,00E-03	278,23	-135,62	727,32	0,94
Run 10	5,50E-03	278,33	-135,60	795,11	1,01
Run 11	6,00E-03	278,42	-135,57	862,90	1,07
Run 12	6,50E-03	278,51	-135,55	930,69	1,14
Run 13	7,00E-03	278,60	-135,53	998,48	1,21
Run 14	7,50E-03	278,70	-135,51	1066,27	1,28
Run 15	8,00E-03	278,79	-135,48	1134,06	1,35
Run 16	8,50E-03	278,88	-135,46	1201,85	1,41
Run 17	9,00E-03	278,97	-135,44	1269,64	1,48
Run 18	9,50E-03	279,07	-135,41	1337,43	1,55
Run 19	1,00E-02	279,16	-135,39	1405,22	1,62

Tabla 9.24. Efecto de $C_{D_{EDS}}$ en las mismas variables con $C_D = 0,50$.

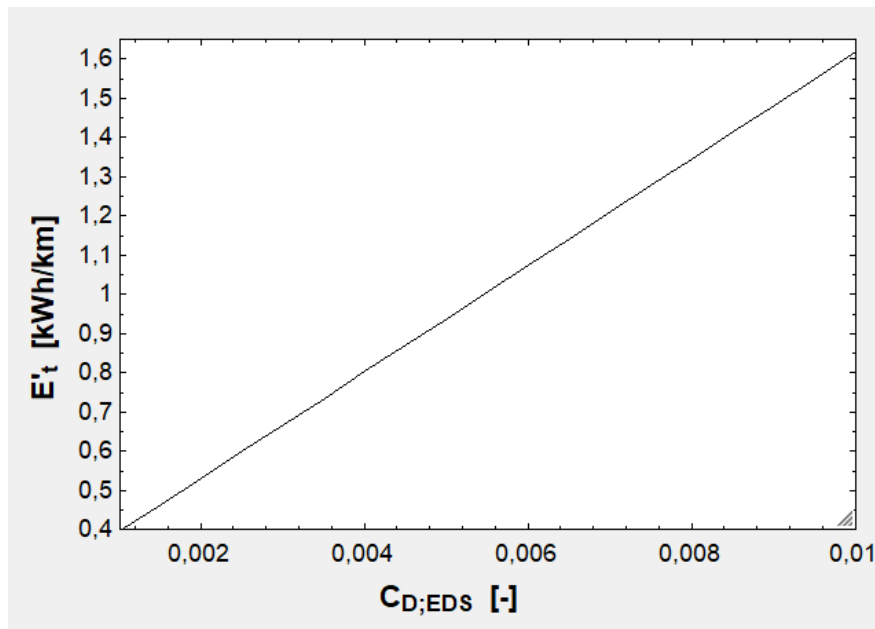


Fig. 9.13. Dependencia de E'_t con $C_{D_{EDS}}$.

1..10	1 η_{EDS} [-]	2 E_{ac} [kWh]	3 E_{gen} [kWh]	4 E_v [kWh]	5 E'_t [kWh/km]
Run 1	0,50	389,27	-96,90	828,43	1,19
Run 2	0,54	357,49	-105,52	760,81	1,08
Run 3	0,59	330,51	-114,13	703,39	0,99
Run 4	0,63	307,32	-122,74	654,03	0,91
Run 5	0,68	287,17	-131,36	611,14	0,84
Run 6	0,72	269,49	-139,97	573,53	0,77
Run 7	0,77	253,87	-148,58	540,28	0,71
Run 8	0,81	239,96	-157,20	510,68	0,66
Run 9	0,86	227,50	-165,81	484,15	0,61
Run 10	0,90	216,26	-174,43	460,24	0,57

Tabla 9.25. Las mismas variables según η_{EDS} con $C_{D_{ext}} = 0,50$ y $C_{D_{EDS}} = 4 \cdot 10^{-3}$.

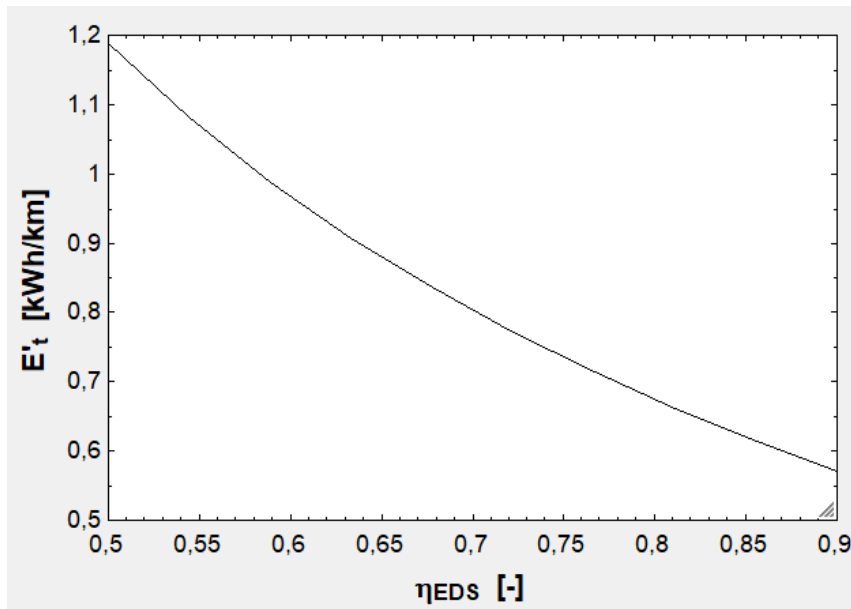


Fig. 9.14. Correlación entre E'_t y η_{EDS} .

1..9	1 η_{cont} [-]	2 f_1 [-]	3 f_2 [-]	4 f_3 [-]	5 m'_{est} [kg/m]	6 m'_{EDS} [kg/m]	7 m_{Li} [kg]	8 m_{EB} [kg]	9 m_{tot} [kg]	10 E'_t [kWh/km]
Run 1	1	1	0	0	400	24	400	750	34224	0,79
Run 2	1	1	0	0	500	32	500	800	35035	0,82
Run 3	1	1	0	0	600	40	600	850	35846	0,85
Run 4	2	1	1	0	400	24	400	750	67298	1,44
Run 5	2	1	1	0	500	32	500	800	68770	1,48
Run 6	2	1	1	0	600	40	600	850	70241	1,53
Run 7	3	1	1	1	400	24	400	750	100372	2,08
Run 8	3	1	1	1	500	32	500	800	102504	2,14
Run 9	3	1	1	1	600	40	600	850	104637	2,20

Tabla 9.26. Influencia de m_{tot} (contenedores llenos) en E'_t .

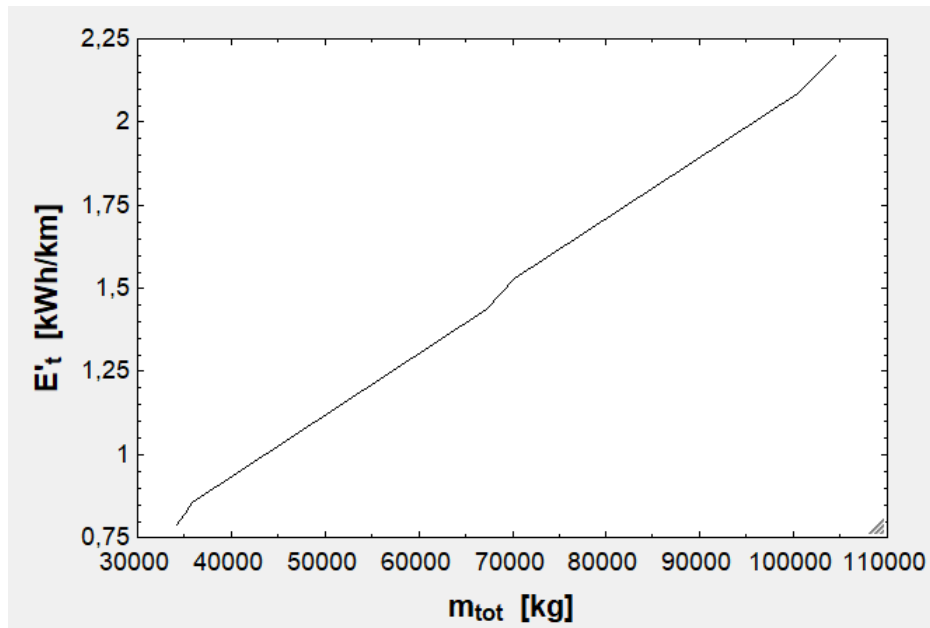


Fig. 9.15. Dependencia de E'_t con m_{tot} .

1..18	1 n_{cont} [-]	2 f_1 [-]	3 f_2 [-]	4 f_3 [-]	5 E'_t [kWh/km]
Run 1	1	0,75	0	0	0,66
Run 2	1	0,85	0	0	0,72
Run 3	1	0,95	0	0	0,77
Run 4	2	0,75	0,75	0	1,19
Run 5	2	0,85	0,85	0	1,30
Run 6	2	0,95	0,95	0	1,41
Run 7	2	0,75	0,95	0	1,30
Run 8	2	0,85	0,85	0	1,30
Run 9	2	0,95	0,75	0	1,30
Run 10	3	0,75	0,75	0,75	1,71
Run 11	3	0,85	0,85	0,85	1,88
Run 12	3	0,95	0,95	0,95	2,04
Run 13	3	0,75	0,95	0,75	1,82
Run 14	3	0,85	0,85	0,85	1,88
Run 15	3	0,95	0,75	0,95	1,93
Run 16	3	0,75	0,95	0,85	1,88
Run 17	3	0,85	0,75	0,75	1,76
Run 18	3	0,95	0,85	0,95	1,99

Tabla 9.27. E'_t según f_1 , f_2 y f_3 .

1..11	1 v [km/h]	2 e_t [kWh/tkm]	3 I_e [kWh/t]	4 I_c [t/min]	5 $I_{c;inv}$ [min/t]
Run 1	500	2,49E-02	24,88	0,24	4,25
Run 2	550	2,56E-02	25,56	0,26	3,86
Run 3	600	2,63E-02	26,30	0,28	3,54
Run 4	650	2,71E-02	27,11	0,31	3,27
Run 5	700	2,80E-02	27,99	0,33	3,04
Run 6	750	2,89E-02	28,93	0,35	2,84
Run 7	800	2,99E-02	29,93	0,38	2,66
Run 8	850	3,10E-02	31,00	0,40	2,50
Run 9	900	3,21E-02	32,13	0,42	2,37
Run 10	950	3,33E-02	33,33	0,45	2,24
Run 11	1000	3,46E-02	34,59	0,47	2,13

Tabla 9.28. Efecto de v en e_t , I_e , I_c e I_c^{-1} para un contenedor lleno y las masas definidas en [9.1.3].

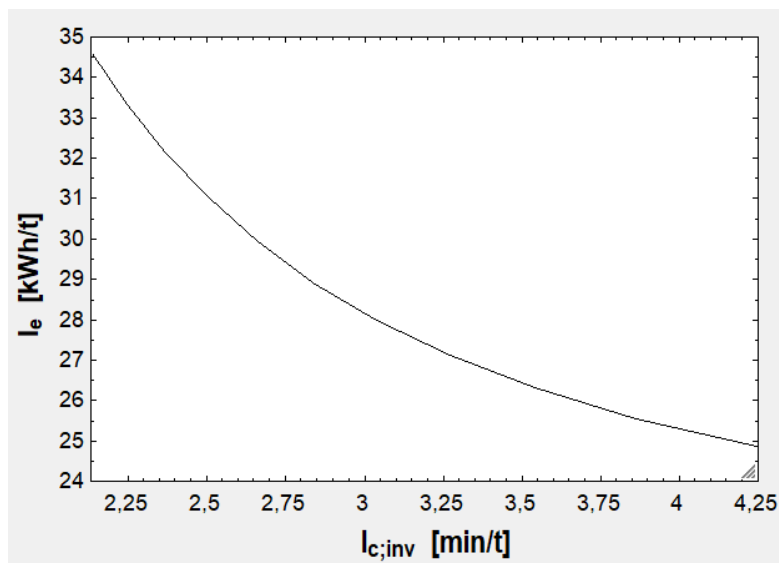


Fig. 9.16. Relación existente entre I_e e I_c^{-1} cuando varía v .

1..9	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	n_{cont} [-]	f_1 [-]	f_2 [-]	f_3 [-]	m'_{est} [kg/m]	m'_{EDS} [kg/m]	m_{Li} [kg]	m_{EB} [kg]	m_{tot} [kg]
Run 1	1	1	0	0	400	24	400	750	34224
Run 2	1	1	0	0	500	32	500	800	35035
Run 3	1	1	0	0	600	40	600	850	35846
Run 4	2	1	1	0	400	24	400	750	67298
Run 5	2	1	1	0	500	32	500	800	68770
Run 6	2	1	1	0	600	40	600	850	70241
Run 7	3	1	1	1	400	24	400	750	100372
Run 8	3	1	1	1	500	32	500	800	102504
Run 9	3	1	1	1	600	40	600	850	104637

10	11	12	13
e_t [kWh/tkm]	I_c [t/min]	I_e [kWh/t]	I_c [t/min]
2,79E-02	0,34	27,86	2,95
2,90E-02	0,34	29,03	2,95
3,02E-02	0,34	30,20	2,95
2,54E-02	0,68	25,38	1,48
2,62E-02	0,68	26,20	1,48
2,70E-02	0,68	27,01	1,48
2,46E-02	1,02	24,56	0,98
2,53E-02	1,02	25,25	0,98
2,59E-02	1,02	25,94	0,98

Tabla 9.29. Impacto de m_{tot} en las mismas variables a 720 km/h.

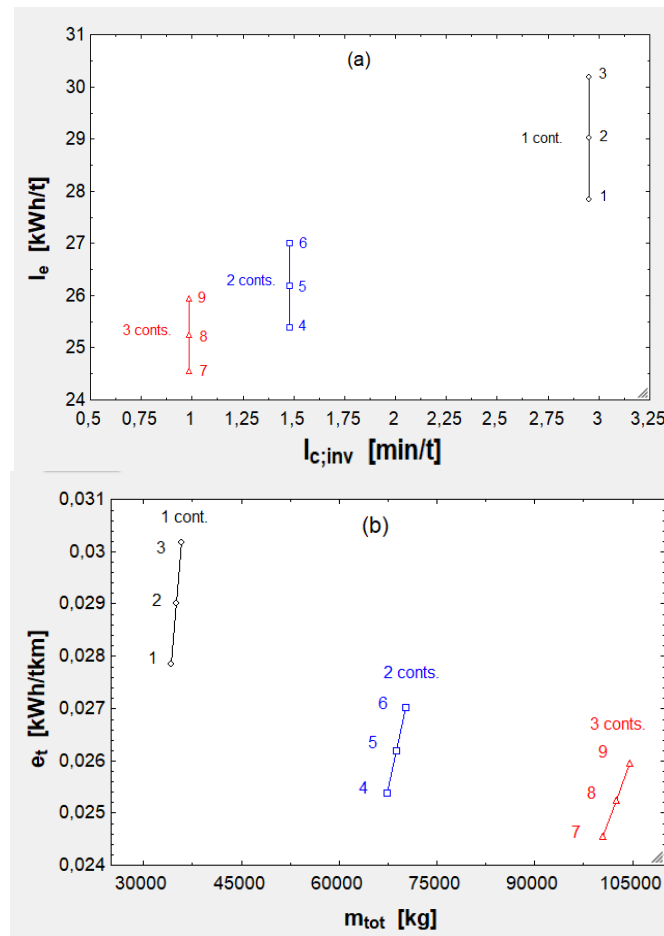


Fig. 9.17. (a) Correlación entre I_e e I_c^{-1} dependiendo del número de contenedores y de m_{tot} . (b) Correlación entre e_t y m_{tot} . Puntos del 1 al 9 en la tabla [9.29].

1..9	1 n_{cont} [-]	2 f_1 [-]	3 f_2 [-]	4 f_3 [-]	5 L_t [km]	6 m_{tot} [kg]
Run 1	1	1	0	0	500	34.250
Run 2	1	1	0	0	750	34.250
Run 3	1	1	0	0	1.000	34.250
Run 4	2	1	1	0	500	68.750
Run 5	2	1	1	0	750	68.750
Run 6	2	1	1	0	1.000	68.750
Run 7	3	1	1	1	500	104.500
Run 8	3	1	1	1	750	104.500
Run 9	3	1	1	1	1.000	104.500

7 E'_t [kWh/km]	8 e_t [kWh/tkm]	9 I_c [t/min]	10 I_e [kWh/t]	11 I_c [t/min]
1,03	3,62E-02	0,68	18,11	1,48
0,89	3,14E-02	0,45	23,52	2,22
0,82	2,89E-02	0,34	28,94	2,95
1,84	3,25E-02	1,35	16,26	0,74
1,61	2,84E-02	0,90	21,33	1,11
1,50	2,64E-02	0,68	26,41	1,48
2,68	3,16E-02	2,03	15,81	0,49
2,36	2,78E-02	1,35	20,84	0,74
2,20	2,59E-02	1,02	25,86	0,98

Tabla 9.30. Influencia de L_t en las E'_t y en las variables analizadas para los valores de m_{tot} de la tabla [9.29].

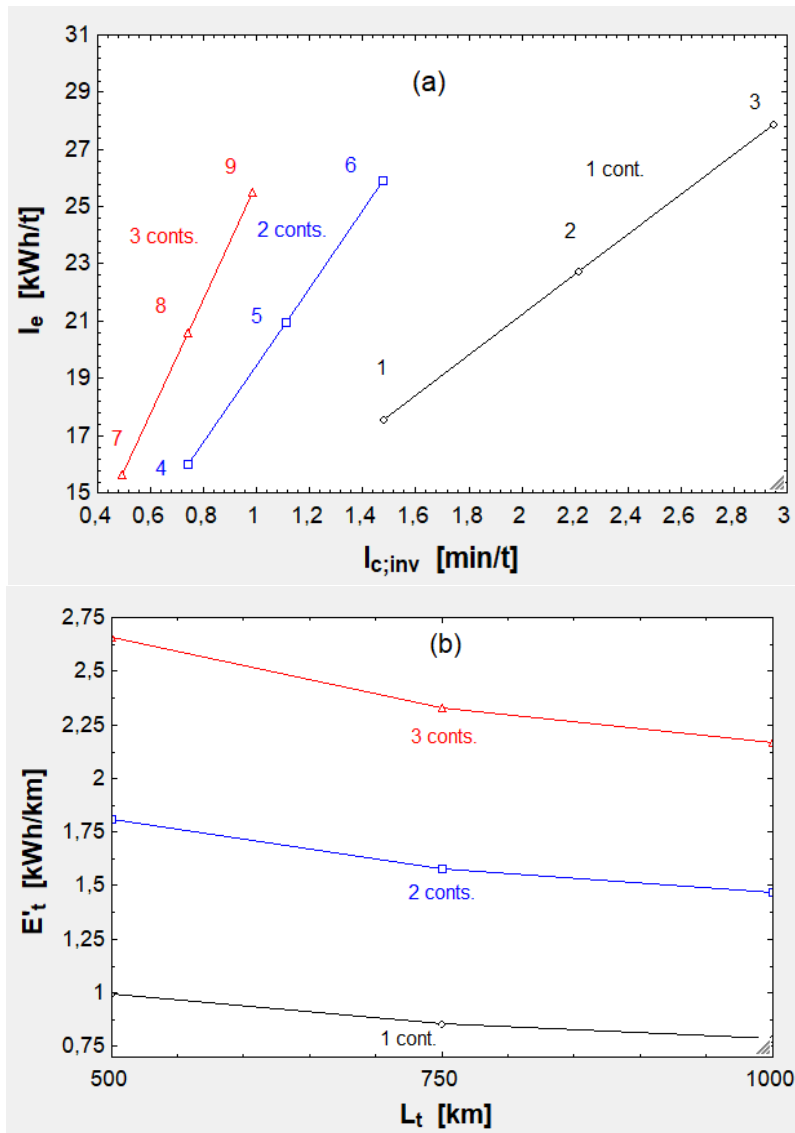


Fig. 9.18. (a) Correlación entre I_e e I_c^{-1} según el número de contenedores y la longitud (puntos 1-9). (b) Interrelación entre E'_t y L_t .

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	n_{cont} [-]	f_1 [-]	f_2 [-]	f_3 [-]	f_4 [-]	v [km/h]	m_{tot} [kg]	I_c [t/h]	I_e [kWh/t]	$I_{c;inv}$ [h/t]
Run 1	1	1	0	0	0	700	34.250	0,33	28,62	3,04
Run 2	1	1	0	0	0	800	34.250	0,38	30,28	2,66
Run 3	1	1	0	0	0	900	34.250	0,42	32,18	2,37
Run 4	1	1	0	0	0	1.000	34.250	0,47	34,35	2,13
Run 5	2	1	1	0	0	700	68.750	0,66	26,12	1,52
Run 6	2	1	1	0	0	800	68.750	0,75	27,66	1,33
Run 7	2	1	1	0	0	900	68.750	0,84	29,42	1,18
Run 8	2	1	1	0	0	1.000	68.750	0,94	31,40	1,07
Run 9	3	1	1	1	0	700	104.500	0,99	25,57	1,01
Run 10	3	1	1	1	0	800	104.500	1,13	27,09	0,89
Run 11	3	1	1	1	0	900	104.500	1,27	28,82	0,79
Run 12	3	1	1	1	0	1.000	104.500	1,41	30,76	0,71

Tabla 9.31. Efecto de v en las variables estudiadas para los tres valores de m_{tot} antes usados.

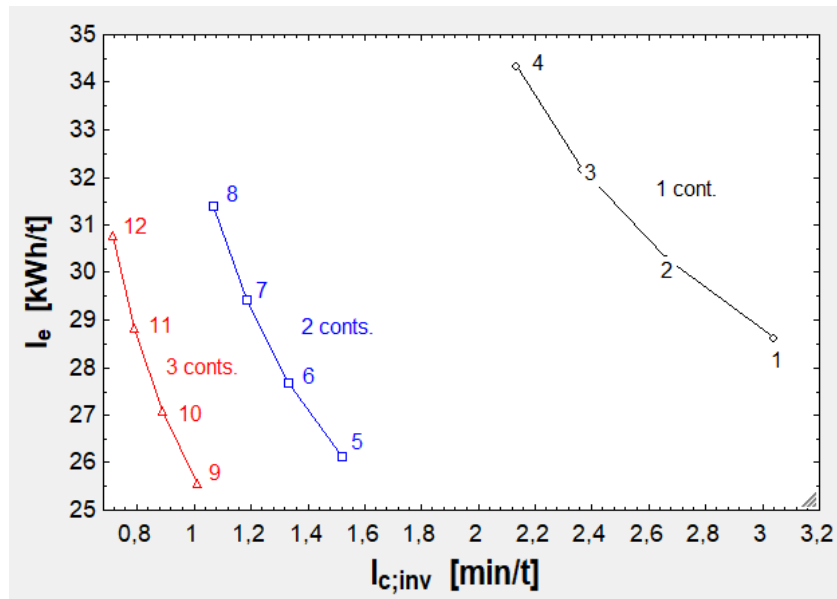


Fig. 9.20. Correlación entre I_e e I_c^{-1} según el número de contenedores y v (puntos 1-12).

1..18	1 n_{cont} [-]	2 f_1 [-]	3 f_2 [-]	4 f_3 [-]	5 I_c [t/min]	6 I_e [kWh/t]	7 $I_{c,inv}$ [min/t]
Run 1	1	0,75	0	0	0,25	31,28	3,94
Run 2	1	0,85	0	0	0,29	29,90	3,47
Run 3	1	0,95	0	0	0,32	28,82	3,11
Run 4	2	0,75	0,75	0	0,51	27,95	1,97
Run 5	2	0,85	0,85	0	0,58	26,96	1,74
Run 6	2	0,95	0,95	0	0,64	26,19	1,55
Run 7	2	0,75	0,95	0	0,58	26,96	1,74
Run 8	2	0,85	0,85	0	0,58	26,96	1,74
Run 9	2	0,95	0,75	0	0,58	26,96	1,74
Run 10	3	0,75	0,75	0,75	0,76	26,84	1,31
Run 11	3	0,85	0,85	0,85	0,86	25,98	1,16
Run 12	3	0,95	0,95	0,95	0,96	25,31	1,04
Run 13	3	0,75	0,95	0,75	0,83	26,25	1,21
Run 14	3	0,85	0,85	0,85	0,86	25,98	1,16
Run 15	3	0,95	0,75	0,95	0,90	25,74	1,11
Run 16	3	0,75	0,95	0,85	0,86	25,98	1,16
Run 17	3	0,85	0,75	0,75	0,80	26,53	1,26
Run 18	3	0,95	0,85	0,95	0,93	25,52	1,07

Tabla 9.32. Efecto de la variación de f_1 , f_2 y f_3 en las variables analizadas a 720 km/h y con $L_t = 1.000$ km.

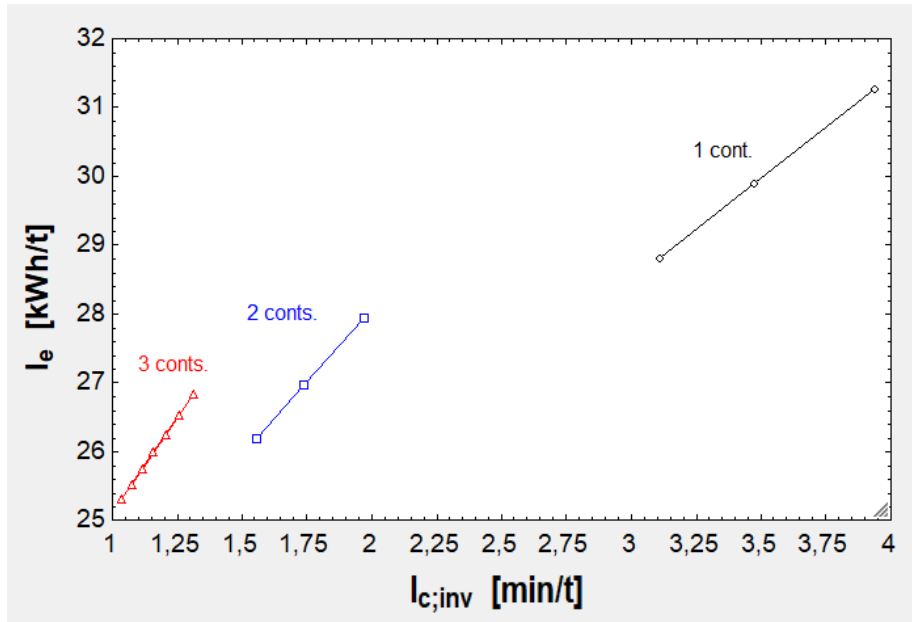


Fig. 9.20. Interrelación entre I_e e I_c^{-1} cuando varía el llenado.

Para comenzar la conclusión, cabe decir que en la gráfica [9.10] se observa que la diferencia de llevar una gran cantidad de energía en las baterías y una cantidad pequeña es de 0,10 kWh/km en E'_t , es decir, tiene poco impacto. De la tabla [9.20] se deduce que la variación de η_{bat} solamente supone una variación de 0,02 kWh/h en E'_t , que es despreciable. En la gráfica [9.11] se observa que duplicar la velocidad únicamente supone un aumento de consumo de 0,27 kWh/km. En la tabla [9.22] se ve que aumentar a_1 y a_2 no hacen que se incremente el consumo energético, aunque sí lo hará en gran medida la potencia pico (la energía es potencia media por tiempo y el tiempo se reduce al aumentar esos dos parámetros). En la gráfica [9.12] se ve cómo se dispara E'_t con $C_{D_{ext}}$ a partir de 0,60. En cambio, la relación entre E'_t y $C_{D_{EDS}}$ es lineal, como se observa en la gráfica [9.14]. En la gráfica [9.16] se ve que η_{EDS} cambia mucho el resultado de E'_t , partiéndolo por la mitad al pasar de 0,50 a 0,90. En la gráfica [9.17] se puede ver la relación entre I_e e I_c^{-1} . Interesa que los valores de kWh/t y h/t sean bajos al mismo tiempo, lo cual no se satisface ni para bajas velocidades (I_e bajo, pero I_c^{-1} alto) ni para altas (ocurre lo contrario). De la figura [9.18] se colige que I_e e I_c^{-1} mejoran sustancialmente al pasar de uno a dos contenedores, pero la mejora al pasar de uno a tres es mucho menor. También se colige que e_t baja al llevar más masa, pero de dos a tres contenedores los resultados son casi idénticos porque parte del consumo no es escalable con la masa. En la figura [9.19] se ve una dispersión de la figura [9.18] (a) al variar L_t . En la parte (b) se ve que E'_t disminuye ligeramente con L_t . Finalmente, en la figura [9.20] se observa una dispersión de la gráfica base [9.18] según v o según f_1 , f_2 y f_3 .

9.2. Segunda geometría

En la segunda geometría se considera que el hueco de aire entre el estátor y los imanes de la cápsula es constante, por lo que no hay variación en el campo magnético ni, en consecuencia, en el consumo. Sin embargo, es importante el diseño del radio de curvatura en función de la velocidad o de la aceleración centrípeta.

1..18	1 v [km/h]	2 a _c [m/s ²]	3 R _t [m]
Run 1	500	9,81	1,97
Run 2	600	9,81	2,83
Run 3	700	9,81	3,85
Run 4	800	9,81	5,03
Run 5	900	9,81	6,37
Run 6	1000	9,81	7,87
Run 7	500	19,62	0,98
Run 8	600	19,62	1,42
Run 9	700	19,62	1,93
Run 10	800	19,62	2,52
Run 11	900	19,62	3,19
Run 12	1000	19,62	3,93
Run 13	500	29,43	0,66
Run 14	600	29,43	0,94
Run 15	700	29,43	1,28
Run 16	800	29,43	1,68
Run 17	900	29,43	2,12
Run 18	1000	29,43	2,62

Tabla 9.33. R_t según v y a_c.

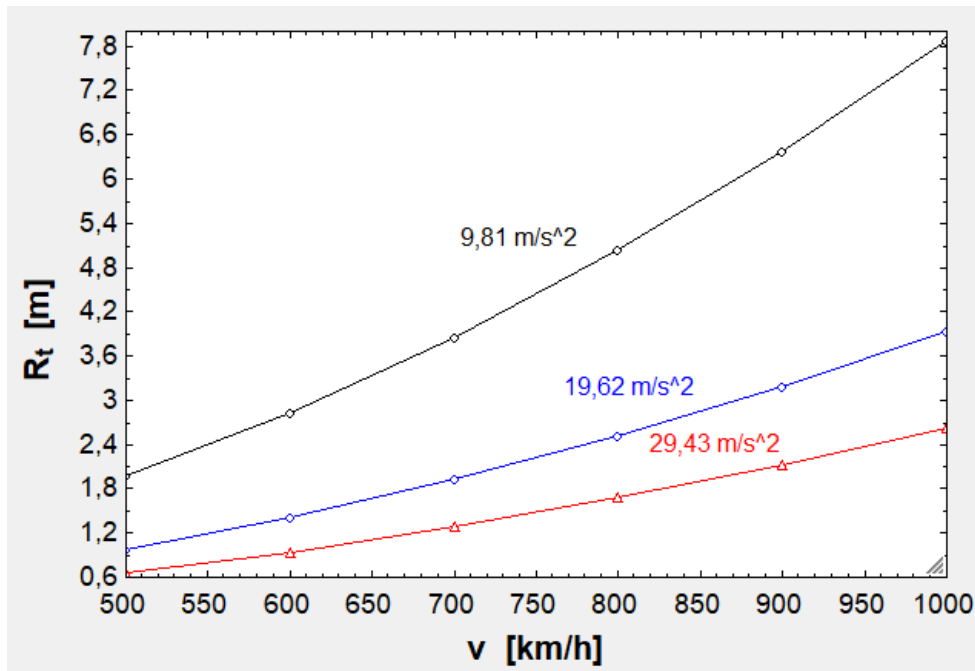


Fig. 9.21. Interrelación entre R_t y v para diferentes valores de a_c .

Se desprende que duplicar la aceleración centrípeta permite reducir bastante el radio de curvatura, sobre todo a 1.000 km/h. Sin embargo, la diferencia entre duplicarla y triplicarla no es muy grande, ni siquiera a 1.000 km/h. Además, toda la carga tendría que estar bien ajustada para soportar 30 m/s^2 , lo que complicaría los soportes y ajustes.

9.3. Tercera geometría

En esta geometría la gravedad tiene un impacto en el EDS y en el consumo del tren, pero no en los demás aspectos. Este impacto se muestra a continuación.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	α [°]	R_1 [Ω]	V_1 [V]	I_1 [A]	E_1 [V]	X_1 [Ω]	P_1 [W]	$P_{D,EDS}$ [W]	P_{gx} [W]
Run 1	-20	2,50	13.638,58	1.611,77	10.856,44	1,47	6,49E+07	258.084,94	-2,35E+07
Run 2	-15	2,50	14.471,18	1.710,16	11.519,22	1,47	7,31E+07	265.289,85	-1,78E+07
Run 3	-10	2,50	15.276,26	1.805,30	12.160,08	1,47	8,15E+07	270.475,74	-1,19E+07
Run 4	-5	2,50	16.052,30	1.897,01	12.777,80	1,47	9,00E+07	273.603,14	-5,98E+06
Run 5	0	2,50	16.797,80	1.985,11	13.371,23	1,47	9,85E+07	274.648,26	0,00E+00
Run 6	5	2,50	17.511,35	2.069,44	13.939,22	1,47	1,07E+08	273.603,14	5,98E+06
Run 7	10	2,50	18.191,58	2.149,82	14.480,69	1,47	1,16E+08	270.475,74	1,19E+07
Run 8	20	2,50	19.447,00	2.298,18	15.480,03	1,47	1,32E+08	258.084,94	2,35E+07
Run 9	-20	5,00	19.287,87	1.139,69	15.353,35	2,94	6,49E+07	258.084,94	-2,35E+07
Run 10	-15	5,00	20.465,34	1.209,26	16.290,64	2,94	7,31E+07	265.289,85	-1,78E+07
Run 11	-10	5,00	21.603,90	1.276,54	17.196,94	2,94	8,15E+07	270.475,74	-1,19E+07
Run 12	-5	5,00	22.701,38	1.341,39	18.070,54	2,94	9,00E+07	273.603,14	-5,98E+06
Run 13	0	5,00	23.755,67	1.403,69	18.909,77	2,94	9,85E+07	274.648,26	0,00E+00
Run 14	5	5,00	24.764,78	1.463,31	19.713,04	2,94	1,07E+08	273.603,14	5,98E+06
Run 15	10	5,00	25.726,78	1.520,16	20.478,79	2,94	1,16E+08	270.475,74	1,19E+07
Run 16	20	5,00	27.502,20	1.625,06	21.892,07	2,94	1,32E+08	258.084,94	2,35E+07

Tabla 9.34. Efecto de la variación de α en el EDS para $R_1 = 2,50 \Omega$ y $R_1 = 5 \Omega$. Final de aceleración, $a_1 = 9,81 \text{ m/s}^2$ y $v = 720 \text{ km/h}$. Además, $\varphi = 10^\circ$, $\gamma_0 = 30^\circ$, $C_{D,EDS} = 4 \cdot 10^{-3}$ y $C_{D,ext} = 0,50$. 1 solo contenedor transportado (masas definidas en el apartado [9.1.3]).

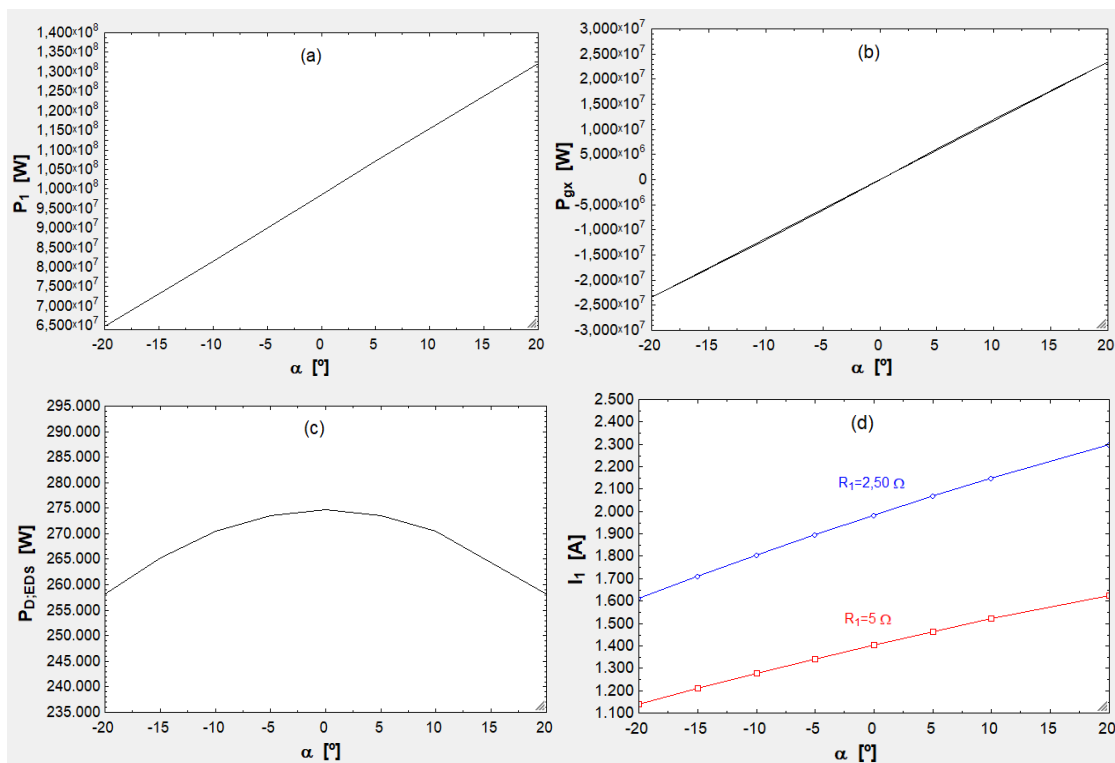


Fig. 9.22. En función de α las siguientes variables: (a) P_1 , (b) P_{gx} , (c) $P_{D,EDS}$, (d) I_1 (esta última también depende de R_1).

1..11	1	2	3	4	5	6
	α [°]	E_{ac} [kWh]	E_{gen} [kWh]	E_v [kWh]	E'_t [kWh/km]	e_t [kWh/tkm]
Run 1	-20	183,50	-159,19	-22.487,30	-22,39	-7,91E-01
Run 2	-16	201,95	-154,67	-18.063,74	-17,95	-6,34E-01
Run 3	-12	220,77	-150,05	-13.552,06	-13,41	-4,74E-01
Run 4	-8	239,87	-145,37	-8.974,23	-8,811	-3,11E-01
Run 5	-4	259,16	-140,65	-4.352,57	-4,166	-1,47E-01
Run 6	0	278,54	-135,90	592,69	0,8037	2,84E-02
Run 7	4	297,91	-131,16	10.065,52	10,3	3,64E-01
Run 8	8	317,18	-126,43	19.489,56	19,75	6,98E-01
Run 9	12	336,27	-121,76	28.818,89	29,1	1,03E+00
Run 10	16	355,07	-117,15	38.008,06	38,31	1,35E+00
Run 11	20	373,49	-112,64	47.012,29	47,34	1,67E+00

Tabla 9.35. Efecto de α en E_{ac} , E_{gen} , E_v , E'_t y e_t .

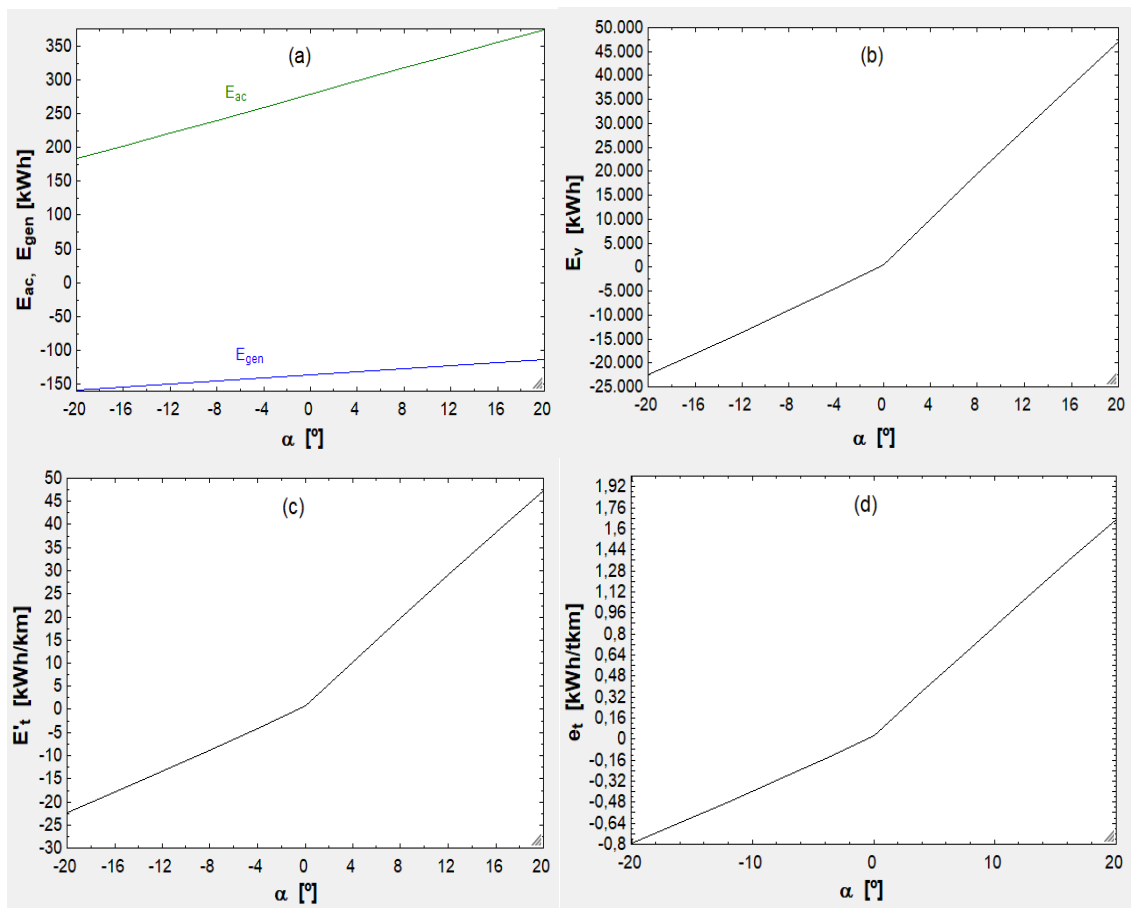


Fig. 9.23. Dependencia entre α y las variables: (a) E_{ac} y E_{gen} , (b) E_v , (c) E'_t y (d) e_t .

1..18	1 α [°]	2 n_{cont} [-]	3 f_1 [-]	4 f_2 [-]	5 f_3 [-]	6 m_{tot} [kg]
Run 1	-20	1	1	0	0	34.250
Run 2	-12	1	1	0	0	34.250
Run 3	-4	1	1	0	0	34.250
Run 4	4	1	1	0	0	34.250
Run 5	12	1	1	0	0	34.250
Run 6	20	1	1	0	0	34.250
Run 7	-20	2	1	1	0	68.750
Run 8	-12	2	1	1	0	68.750
Run 9	-4	2	1	1	0	68.750
Run 10	4	2	1	1	0	68.750
Run 11	12	2	1	1	0	68.750
Run 12	20	2	1	1	0	68.750
Run 13	-20	3	1	1	1	104.500
Run 14	-12	3	1	1	1	104.500
Run 15	-4	3	1	1	1	104.500
Run 16	4	3	1	1	1	104.500
Run 17	12	3	1	1	1	104.500
Run 18	20	3	1	1	1	104.500

7 E'_t [kWh/km]	8 e_t [kWh/tkm]	9 I_c [t/min]	10 I_e [kWh/t]	11 $I_{c,inv}$ [min/t]
-21,92	-7,74E-01	0,34	-774,39	2,95
-13,13	-4,64E-01	0,34	-463,78	2,95
-4,075	-1,44E-01	0,34	-143,99	2,95
10,08	3,56E-01	0,34	356,31	2,95
28,48	1,01E+00	0,34	1.006,50	2,95
46,33	1,64E+00	0,34	1.637,28	2,95
-44,08	-7,79E-01	0,68	-778,87	1,48
-26,44	-4,67E-01	0,68	-467,13	1,48
-8,273	-1,46E-01	0,68	-146,16	1,48
20,12	3,56E-01	0,68	355,51	1,48
57,06	1,01E+00	0,68	1.008,08	1,48
92,89	1,64E+00	0,68	1.641,15	1,48
-67,06	-7,90E-01	1,02	-789,82	0,98
-40,24	-4,74E-01	1,02	-473,92	0,98
-12,62	-1,49E-01	1,02	-148,68	0,98
30,52	3,60E-01	1,02	359,53	0,98
86,67	1,02E+00	1,02	1.020,80	0,98
141,1	1,66E+00	1,02	1.662,31	0,98

Tabla 9.36. Impacto de α en E'_t , I_c e I_e para 1, 2 y 3 contenedores llenos (valores de m_{tot} del subapartado [9.1]).

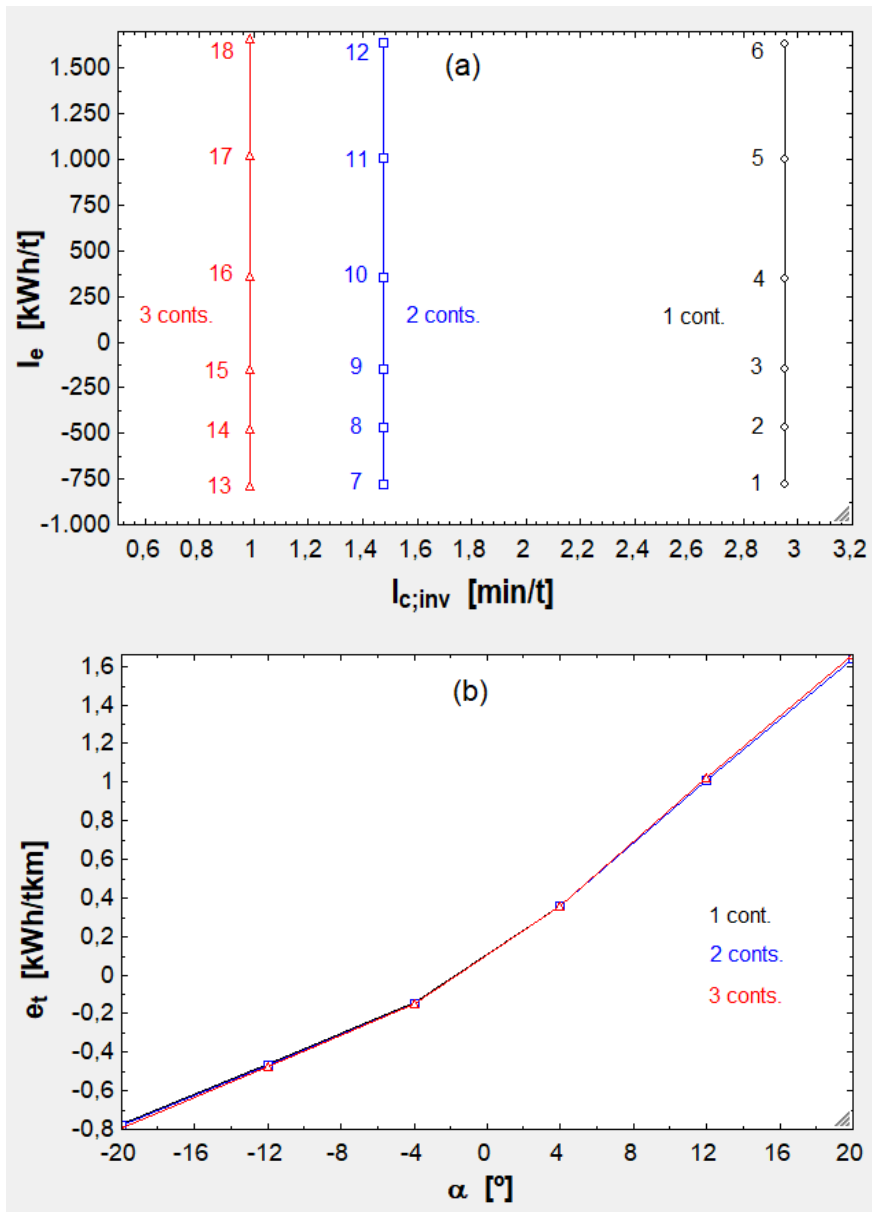


Fig. 9.24. (a) I_e frente a I_c^{-1} para los puntos 1-18 de la tabla anterior. (b) e_t según α y para diferente número de contenedores.

1..18	1	2	3	4	5	6	7	8
	α [°]	v [km/h]	E'_t [kWh/km]	e_t [kWh/tkm]	I_c [t/min]	I_e [kWh/t]	$I_{c,inv}$ [min/t]	
Run 1	-20	750	-67,03	-7,90E-01	1,06	-789,52	0,95	
Run 2	-20	850	-66,94	-7,88E-01	1,20	-788,41	0,83	
Run 3	-20	950	-66,83	-7,87E-01	1,34	-787,18	0,75	
Run 4	-12	750	-40,21	-4,74E-01	1,06	-473,56	0,95	
Run 5	-12	850	-40,09	-4,72E-01	1,20	-472,25	0,83	
Run 6	-12	950	-39,97	-4,71E-01	1,34	-470,78	0,75	
Run 7	-4	750	-12,59	-1,48E-01	1,06	-148,26	0,95	
Run 8	-4	850	-12,46	-1,47E-01	1,20	-146,74	0,83	
Run 9	-4	950	-12,31	-1,45E-01	1,34	-145,03	0,75	
Run 10	4	750	30,56	3,60E-01	1,06	359,99	0,95	
Run 11	4	850	30,7	3,62E-01	1,20	361,64	0,83	
Run 12	4	950	30,86	3,64E-01	1,34	363,51	0,75	
Run 13	12	750	86,7	1,02E+00	1,06	1.021,22	0,95	
Run 14	12	850	86,83	1,02E+00	1,20	1.022,77	0,83	
Run 15	12	950	86,98	1,02E+00	1,34	1.024,51	0,75	
Run 16	20	750	141,2	1,66E+00	1,06	1.662,71	0,95	
Run 17	20	850	141,3	1,66E+00	1,20	1.664,16	0,83	
Run 18	20	950	141,4	1,67E+00	1,34	1.665,79	0,75	

Tabla 9.37. Influencia de α y v en las mismas variables.

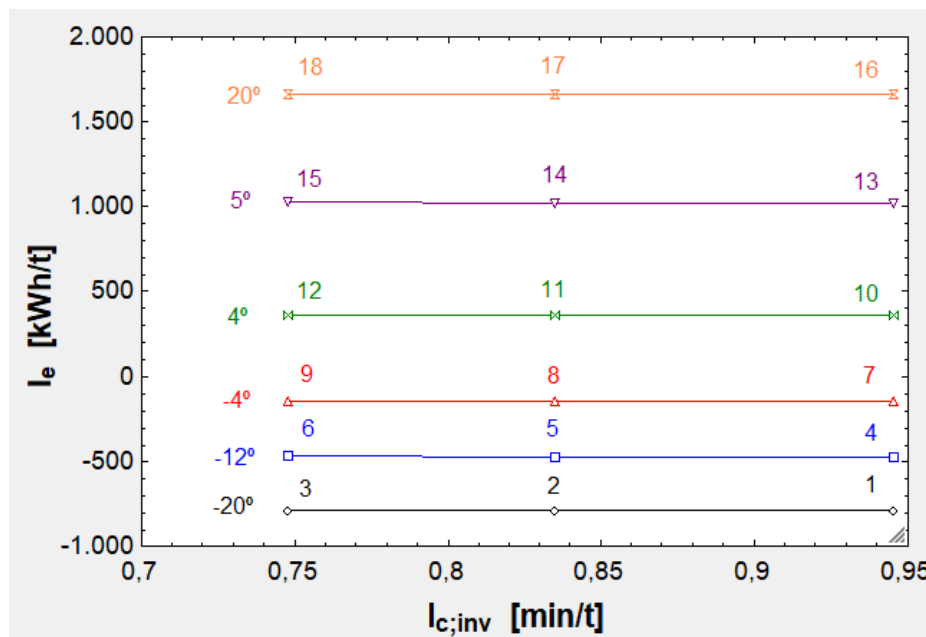


Fig. 9.25. I_e frente a I_c^{-1} dependiendo de diferentes valores de α y v para 3 contenedores llenos ($m_{tot} = 104.500$ kg).

En la figura [9.23] se aprecian varias cosas: P_1 y P_{gx} aumentan grandemente con α y lo hacen linealmente. Respecto a P_{DEDS} , esta se reduce con valores de α extremos porque entonces el EDS soporta menos peso (se multiplica el peso por $\cos\alpha$). Además, conforme sube P_1 es preciso inyectar una I_1 mayor, aunque nuevamente se reduce al

aumentar R_1 . En el gráfico [9.24] se ve que α tiene un impacto moderado en E_{ac} y E_{gen} , pero enorme en E_v y E'_t y e_t , que siguen la tendencia de E_v mostrando un acodamiento porque cerca de 0° el consumo no sube tanto. Este consumo tan alto es debido a que se están subiendo grandes pendientes a gran velocidad a lo largo de 1.000 km. Cuando la pendiente es negativa E_v es negativa y el EDS recoge la energía ganada debido a la disminución de energía potencial y la transforma en energía eléctrica. En el gráfico [9.25] se ve que el consumo específico en kWh/t prácticamente no depende del número de contenedores, ya que el gasto para subir pendientes es alto (también la energía generada lo es). Al representar e_t frente a α se nota lo mismo, que el consumo específico es indiferente a la carga trasladada. Por último, en la [9.26] se observa que I_e apenas depende de v porque su dependencia fuerte es con α .

10. Determinación del diseño final del primer modelo

En este apartado se va a determinar el diseño final del primer modelo a partir de los resultados de su parametrización. El diseño final se va a centrar en la primera geometría, eligiéndose después los parámetros que cambien para la segunda y tercera.

10.1. Primera geometría

Dos parámetros muy relevantes son la velocidad de operación y el diámetro del tubo. También hay que saber cuántos contenedores se van a transportar y determinar la presión del tubo, los parámetros del EDS y otros parámetros de operación como la aceleración y deceleración. Comenzando por v (gráfica [9.1], parte (a)) y por n_{cont} (gráfica [9.20]):

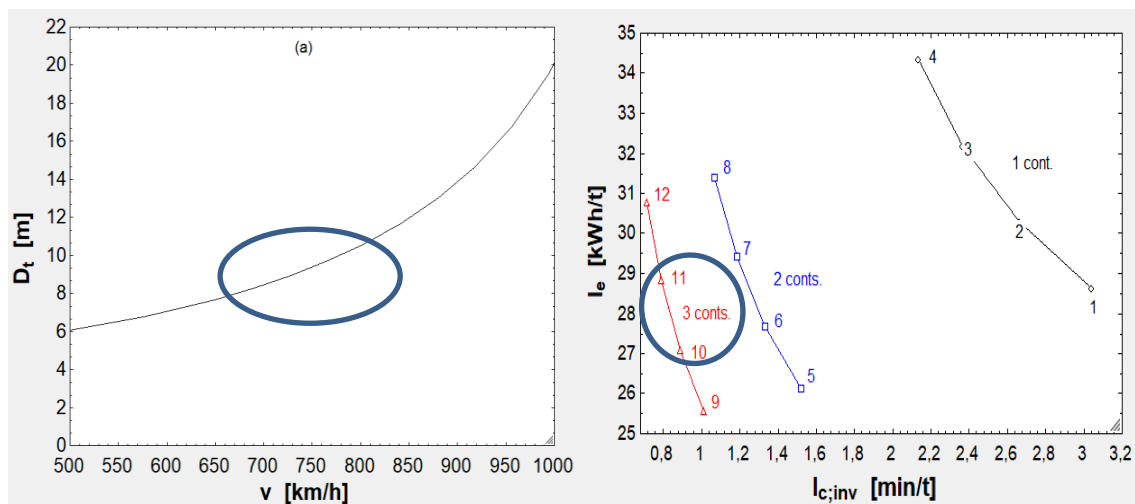


Fig. 10.1. (a) Determinación de la zona de interés de la figura [9.1.], parte (a), y (b) de la figura [9.20].

Donde se ha rodeado la zona de interés. Cabe preguntarse qué sucede al agregar más contenedores. En las simulaciones anteriores se probó con varios conjuntos de masas para cada caso y se eligió para cada caso ($n_{cont} = 1, 2, 3$) uno de esos conjuntos. Ahora se van a fijar ciertos valores para tratar de minimizar el peso muerto de los vehículos (que con $n_{cont} = 5$ llega a ser importante):

$$m'_{est}: 500 \frac{kg}{m}$$

$$m'_{EDS}: 32 \frac{kg}{m}$$

m_{Li+} : Se puede tomar 350 kg para $n_{cont} = 1$ e irá aumentando de 50 en 50 kg a medida que n_{cont} suba en una unidad.

m_{EB} : Un valor de partida puede ser 750 kg para $n_{cont} = 1$ e irá creciendo de 250 en 250 kg conforme n_{cont} suba en una unidad.

En la siguiente tabla se pueden apreciar la nueva simulación teniendo en cuenta estos datos (m'_{est} y m'_{EDS} están fijos en el programa principal porque son constantes) para $n_{cont} = 1, 2, 3, 4$ y 5:

1.20	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	n_{cont} [-]	f_1 [-]	f_2 [-]	f_3 [-]	f_4 [-]	f_5 [-]	v [km/h]	m_{Li} [kg]	m_{EB} [kg]
Run 1	1	1	0	0	0	0	700	350	750
Run 2	1	1	0	0	0	0	800	350	750
Run 3	1	1	0	0	0	0	900	350	750
Run 4	1	1	0	0	0	0	1.000	350	750
Run 5	2	1	1	0	0	0	700	400	1.000
Run 6	2	1	1	0	0	0	800	400	1.000
Run 7	2	1	1	0	0	0	900	400	1.000
Run 8	2	1	1	0	0	0	1.000	400	1.000
Run 9	3	1	1	1	0	0	700	450	1.250
Run 10	3	1	1	1	0	0	800	450	1.250
Run 11	3	1	1	1	0	0	900	450	1.250
Run 12	3	1	1	1	0	0	1.000	450	1.250
Run 13	4	1	1	1	1	0	700	500	1.500
Run 14	4	1	1	1	1	0	800	500	1.500
Run 15	4	1	1	1	1	0	900	500	1.500
Run 16	4	1	1	1	1	0	1.000	500	1.500
Run 17	5	1	1	1	1	1	700	550	1.750
Run 18	5	1	1	1	1	1	800	550	1.750
Run 19	5	1	1	1	1	1	900	550	1.750
Run 20	5	1	1	1	1	1	1.000	550	1.750

10	11	12	13
m_{tot} [kg]	I_c [t/h]	I_e [kWh/t]	$I_{c,inv}$ [h/t]
34.845	26,32	24,11	3,80E-02
34.845	30,05	25,46	3,33E-02
34.845	33,77	27,19	2,96E-02
34.845	37,47	29,36	2,67E-02
68.891	52,65	19,29	1,90E-02
68.891	60,10	20,58	1,66E-02
68.891	67,54	22,15	1,48E-02
68.891	74,94	24,01	1,33E-02
102.936	78,97	17,68	1,27E-02
102.936	90,16	18,95	1,11E-02
102.936	101,31	20,46	9,87E-03
102.936	112,41	22,23	8,90E-03
136.982	105,29	16,88	9,50E-03
136.982	120,21	18,14	8,32E-03
136.982	135,08	19,62	7,40E-03
136.982	149,89	21,33	6,67E-03
171.027	131,62	16,40	7,60E-03
171.027	150,26	17,65	6,66E-03
171.027	168,84	19,12	5,92E-03
171.027	187,36	20,80	5,34E-03

Tabla 10.1. Mismas variables para más contenedores. Ruta de 750 km. I_c se ha expresado ahora en t/h para ver más claramente el efecto en ella. Además, se han colocado los valores de m_{tot} para su consulta. Para la obtención de estos resultados se han usado todos los parámetros descritos más abajo.

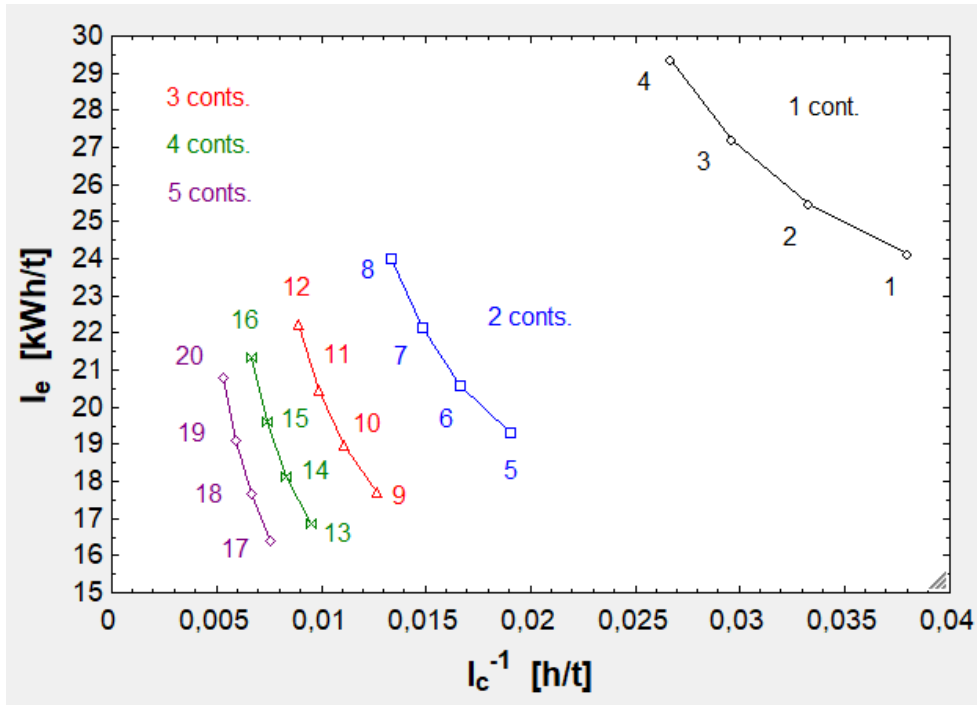


Fig. 10.2. Interrelación entre I_e e I_c^{-1} para 1, 2, 3, 4 y 5 contenedores llenos.

Se concluye que la mejora al aumentar n_{cont} es cada vez menor, ya que la capacidad cada vez sube menos (la masa del nuevo contenedor frente a la suma de las masas de los demás se va haciendo menos relevante) y el consumo específico a la carga útil cada vez se va reduciendo menos porque aumenta la masa muerta (tanto m_{Li^+} cuanto m_{EB}). Dado que al pasar de 4 a 5 la mejora ya es pequeña, se va a escoger 5 contenedores para no sobredimensionar demasiado el sistema.

Dicho esto, se va a elegir el número de 5 contenedores. Respecto a v , la óptima está entre 700 y 800 km/h. Concretamente, estará cerca de 750 km/h. Además, a esa velocidad el diámetro está en torno a 8 m, que es un valor adecuado teniendo en cuenta que la cápsula tiene un D_c de más de 3,50 m, así que la obstrucción que cause no será elevada.

δ_{rc} y δ_{lc} no son muy influyentes en los resultados, por lo que se pueden tomar de manera menos restrictiva. Por ejemplo, 5 y 4 cm (la cápsula soporta un esfuerzo axial menor, por eso δ_{lc} se puede tomar un poco más pequeño).

Respecto a la temperatura, el modelo puede diseñarse para que cumpla la limitación de Kantrowitz a 20 °C y si hay variaciones de 20 °C se actuará sobre v para seguir cumpliendo el límite. Como se ve en la tabla [9.4], a 0° haría falta un diámetro mayor que a 40 °C, por lo que a 0 °C se trabajará por encima del límite si no reduce v (y la acumulación de aire frente a la cápsula la frenará hasta volver al límite si no se

aumenta la fuerza propulsiva) y a 40 °C se trabajará por debajo del límite si no se quiere aumentar v .

Respecto al arrastre aerodinámico y el del EDS, según la gráfica [9.4] es indeseable tener $C_{D_{ext}}$ mayor de 0,60-0,70. Por tanto, se va a trabajar con $C_{D_{ext}} = 0,60$; mientras que según la gráfica [9.14], a partir de $C_{D_{EDS}} = 5 \cdot 10^{-3}$ ya se supera 1 kWh/km. Además, en este caso se lleva una gran masa, por lo que el arrastre subirá mucho (para 3 contenedores y $C_{D_{EDS}} = 5 \cdot 10^{-3}$ se llega a los 5 kN). Por tanto, se va a proponer un sistema EDS mejorado con $C_{D_{EDS}} = 3 \cdot 10^{-3}$ (dicho factor depende mucho de la distancia entre polos, como se lee en la referencia [8]).

Dado que el EDS propuesto es un sistema mejorado, se propone $\eta_{EDS} = 0,73$, ya que es uno de los factores más influyentes en los consumos, como se deduce en la figura [9.15]. Ahora se requiere una gran potencia para el transporte de 4 contenedores, por lo que es conveniente reducir mucho I_1 y aumentar V_1 , lo cual hará el sistema de potencia más factible. En la figura [9.8] se ve que a partir de $R_1 = 8 \Omega$ la reducción de I_1 es lenta, por lo que se tomará ese valor. En cuanto a φ y γ_0 (su efecto en las tablas [9.14] y [9.15]) se elige $\varphi = 10^\circ$ y $\gamma_0 = 30^\circ$ para no tener una V_1 demasiado alta y tener una buena relación R_1/X_1 (relación observable en [9.7] para $\varphi = 10^\circ$) y, además, no tener una caída de tensión excesiva en los bobinados ni que V_1 y E_1 sean muy parejos porque entonces estarán bastante desfasados.

En cuanto a p_t , no merece la pena hacer un gran esfuerzo para reducirla al mínimo cuando la fuerza predominante va a ser $F_{D_{EDS}}$ en vez de F_D . En ese sentido valdría más bajar $C_{D_{ext}}$. Según la gráfica [9.5], para 250 Pa se tiene $F_D \sim 500$ N, por lo que se tomará $p_t = 250$ Pa.

Respecto a las aceleraciones, estas no van a influir en el consumo (tabla [9.22]), pero sí en la potencia pico. Para construir un sistema EDS uniforme a lo largo del tubo, puede ser conveniente tomar $a_1 = a_2$ para que no haya partes preparadas para comunicar o evacuar mayor potencia que otras. Un buen valor puede estar entre 14,72 m/s² (1 g), media entre 1 y 2 g.

Para el diseño de las baterías es mejor aumentar su densidad de energía y bajar su masa, por lo que se escoge 225 Wh/kg y 550 kg, respectivamente. Además, se supone que durarán un 30 % que la duración total del viaje por si hubiere una emergencia. η_{bat} apenas influye (tabla [9.20]) y puede tomarse un valor de 0,90).

El resto de masas se toman tal que así: $m'_{est} = 500 \frac{kg}{m}$ (δ_{rc} y δ_{lc} mayores que los simulados), $m'_{EDS} = 32 \frac{kg}{m}$ (más solicitado por la alta a_1 o a_2) y $m_{EB} = 1.750$ kg (ha de frenar una gran masa).

Finalmente, la longitud del tubo puede tomarse 750 km para que el trayecto se complete en 1 h, aumentándose así la capacidad.

Para el diseño hay que suponer que todos los contenedores van llenos. Introduciendo todos estos parámetros en el EES, se obtiene este resultado:

$a_1 = 14,72 \text{ [m/s}^2\text{]}$	$a_2 = 14,72 \text{ [m/s}^2\text{]}$	$A_c = 10,51 \text{ [m}^2\text{]}$	$A_{cc} = 58,38 \text{ [m}^2\text{]}$	$A_f = 10,51 \text{ [m}^2\text{]}$
$C_{D,ext} = 0,60 \text{ [-]}$	$C_{D,t} = 1,07 \text{ [-]}$	$c_i = 0 \text{ [m/s]}$	$\delta_1 = 10,70 \text{ [m}^2\text{]}$	$\delta_2 = 3,15 \text{ [m}^2\text{]}$
$D_{carga} = 3,558 \text{ [m]}$	$D_{desp} = 5,20 \text{ [m]}$	$D_{movto} = 4,17 \text{ [m]}$	$D_t = 9,37 \text{ [m]}$	$\eta_{bat} = 0,90 \text{ [-]}$
$E_{bat} = 105,77 \text{ [kWh]}$	$E_{gen} = -751,50 \text{ [kWh]}$	$E_{t} = 3,21 \text{ [kWh/km]}$	$e_t = 2,27E-02 \text{ [kWh/tkm]}$	$E_v = 1.636,83 \text{ [kWh]}$
$f_5 = 1 \text{ [-]}$	$F_D = 724,76 \text{ [N]}$	$F_{D,EDS} = 5.033,33 \text{ [N]}$	$F_x = 2,52E+06 \text{ [N]}$	$F_z = 1,68E+06 \text{ [N]}$
$I_c = 140,95 \text{ [t/h]}$	$I_{c,inv} = 7,09E-03 \text{ [h/t]}$	$I_e = 17,00 \text{ [kWh/t]}$	$L_{ac} = 1,47 \text{ [km]}$	$L_c = 6,138 \text{ [m]}$
$M = 0,61 \text{ [-]}$	$m_{carga} = 28.300 \text{ [kg]}$	$\dot{m}_{cc,m\acute{a}x} = 42,64 \text{ [kg/s]}$	$\dot{m}_t = 42,64 \text{ [kg/s]}$	$m_{EB} = 1.750 \text{ [kg]}$
$m_{tot} = 171.027 \text{ [kg]}$	$n_{cont} = 5 \text{ [-]}$	$\phi = 10 \text{ [}^\circ\text{]}$	$P_1 = 7,20E+08 \text{ [W]}$	$P_{av} = 1,20E+06 \text{ [W]}$
$p_t = 250 \text{ [Pa]}$	$R = 287 \text{ [J/kg}\cdot\text{K]}$	$\rho_t = 2,97E-03 \text{ [kg/m}^3\text{]}$	$R_1 = 8 \text{ [}\Omega\text{]}$	$R_{av} = 5.758 \text{ [N]}$
$t_{dec} = 14,15 \text{ [s]}$	$t_{dec,h} = 3,93E-03 \text{ [s]}$	$t_{des} = 78,31 \text{ [min]}$	$t_{des,h} = 1,31 \text{ [h]}$	$T_f = 1,78 \text{ [-]}$
$T_{t,conv} = 293,15 \text{ [K]}$	$t_v = 59,76 \text{ [min]}$	$t_{v,h} = 1 \text{ [h]}$	$t_{v,s} = 3.586 \text{ [s]}$	$v = 750 \text{ [km/h]}$
$a_s = 343,20 \text{ [m/s]}$	$A_t = 68,89 \text{ [m}^2\text{]}$	$\beta = 0,15 \text{ [-]}$	$C_{D,EDS} = 3,00E-03 \text{ [-]}$	
$\delta_{lc} = 0,04 \text{ [m]}$	$\delta_{rc} = 0,05 \text{ [m]}$	$\delta^{star} = 0,77 \text{ [m]}$	$D_c = 3,658 \text{ [m]}$	
$\eta_{EDS} = 0,73 \text{ [-]}$	$E_1 = 71.087,81 \text{ [V]}$	$E_{ac} = 1.414,39 \text{ [kWh]}$	$e_{bat} = 225 \text{ [Wh/kg]}$	
$f_1 = 1 \text{ [-]}$	$f_2 = 1 \text{ [-]}$	$f_3 = 1 \text{ [-]}$	$f_4 = 1 \text{ [-]}$	
$g = 9,81 \text{ [m/s}^2\text{]}$	$\gamma = 1,4 \text{ [-]}$	$\gamma_o = 30 \text{ [}^\circ\text{]}$	$I_1 = 2.846,27 \text{ [A]}$	
$L_{cont} = 6,058 \text{ [m]}$	$L_{dec} = 1,47 \text{ [km]}$	$L_t = 750 \text{ [km]}$	$L_v = 747,05 \text{ [km]}$	
$m_{Li} = 550 \text{ [kg]}$	$m_{v,EDS} = 32 \text{ [kg/m]}$	$m_{v,est} = 500 \text{ [kg/m]}$	$m_{tara} = 2.180 \text{ [kg]}$	
$\bar{P}_{av} = 387.284 \text{ [W]}$	$P_D = 150.991 \text{ [W]}$	$P_{D,EDS} = 1,05E+06 \text{ [W]}$	$p_{o,t} = 320,65 \text{ [Pa]}$	
$\tau_2 = 30 \text{ [%]}$	$\theta = 0,26 \text{ [m]}$	$t_{ac} = 14,15 \text{ [s]}$	$t_{ac,h} = 3,93E-03 \text{ [h]}$	
$T_{o,t} = 314,75 \text{ [K]}$	$T_t = 20 \text{ [}^\circ\text{C]}$	$t_{tot} = 60,24 \text{ [min]}$	$t_{tot,h} = 1 \text{ [h]}$	
$V_1 = 85.635 \text{ [V]}$	$\bar{v} = 747,06 \text{ [km/h]}$	$X_1 = 5,22 \text{ [}\Omega\text{]}$		

Fig. 10.3. Resultados del apartado [10.1].

Como $e_t = 2,27 \cdot 10^{-2} \text{ kWh/tkm}$, este dato supera al del AVE, que según la tabla [4.1] presenta un valor de $4,75 \cdot 10^{-1} \text{ kWh/tkm}$ y al Transrapid, que presenta $6,97 \cdot 10^{-1} \text{ kWh/tkm}$. También debe tenerse en cuenta que estos dos trenes analizados fueron diseñados para transportar pasajeros en vez de mercancías.

La longitud total del conjunto será 5.6,138 m más lo que se añada por la parte del frontal y la parte trasera, que se supone 2,50 m (serán muy ligeros, apenas afectarán al peso). Por tanto, 33,19 m en total.

Por último, se calculan los TEU anuales, para lo cual hay que asignar una frecuencia de envío. Si se fija que se envía un tren por minuto (sin paradas) y se supone $\bar{f} = 0,90$:

$$\text{Uds. transportadas} = 365 \cdot 24 \cdot 60 \cdot 1 \cdot 5 = 2.628.000 \frac{\text{conts.}}{\text{año}}$$

$$2.628.000 \cdot 0,90 = 2.365.200 \frac{\text{TEU}}{\text{año}}$$

Este es el resultado de transporte desde el puerto hasta el centro de logística. Como hay un tubo de vuelta existe también un flujo inverso de transporte, por lo que se duplican estos resultados: 5.265.000 conts./año y 4.730.400 TEU/año.

10.2. Segunda geometría

Para esta geometría se escoge un radio de curvatura pequeño. Atendiendo a las conclusiones del subapartado [9.2], es bueno subir a_c para reducir R_t , pero no demasiado porque entonces dicha reducción se hará cada vez menos notoria. Se escoge $a_c = 14,72 \text{ m/s}^2$ para que de esta manera todo el contenedor esté ajustado para dicha aceleración en todas las direcciones. Por tanto, recurriendo a la ecuación [8.115]:

$$R_t = \frac{\left(\frac{750}{3,60}\right)^2}{14,72} \cdot 10^{-3} = 2,95 \text{ km}$$

10.3. Tercera geometría

Como se ha visto en el subapartado [9.3], el ángulo de inclinación influye mucho en los consumos. En consecuencia, es desfavorable tomar valores muy altos. Se va a tomar 4° de inclinación, es decir, el tubo de 750 km subirá $750 \cdot \cos(4^\circ) \cdot \text{tg}(4^\circ) = 52,32 \text{ m}$ (pendiente de 70 milésimas ($1000 \cdot \text{tg}(4^\circ)$), el cuádruple o quíntuple que la de los ferrocarriles actuales). En caso de no poder vencer así el desnivel se tunelará. Con estos datos y los del apartado [10.1] se obtienen los siguientes resultados:

$\alpha = 4 \text{ [}^\circ\text{]}$	$a_1 = 14,72 \text{ [m/s}^2\text{]}$	$a_2 = 14,72 \text{ [m/s}^2\text{]}$	$A_c = 10,51 \text{ [m}^2\text{]}$	$A_{cc} = 58,38 \text{ [m}^2\text{]}$
$C_{D,EDS} = 3,00E-03 \text{ [-]}$	$C_{D,ext} = 0,60 \text{ [-]}$	$C_{D,t} = 1,07 \text{ [-]}$	$c_i = 0 \text{ [m/s]}$	$\delta_1 = 10,70 \text{ [m}^2\text{]}$
$D_c = 3,658 \text{ [m]}$	$D_{carga} = 3,558 \text{ [m]}$	$D_{desp} = 5,20 \text{ [m]}$	$D_{movto} = 4,17 \text{ [m]}$	$D_t = 9,37 \text{ [m]}$
$e_{bat} = 225 \text{ [Wh/kg]}$	$E_{bat} = 105,77 \text{ [kWh]}$	$E_{gen} = -716,52 \text{ [kWh]}$	$E_{t} = 47,7 \text{ [kWh/km]}$	$e_t = 3,37E-01 \text{ [kWh/tkm]}$
$f_4 = 1 \text{ [-]}$	$f_5 = 1 \text{ [-]}$	$F_D = 724,76 \text{ [N]}$	$F_{D,EDS} = 5.021,07 \text{ [N]}$	$F_x = 2,64E+06 \text{ [N]}$
$I_1 = 2.911,53 \text{ [A]}$	$I_c = 2,35 \text{ [t/h]}$	$I_{c,inv} = 0,43 \text{ [h/t]}$	$I_e = 252,81 \text{ [kWh/t]}$	$L_{ac} = 1,47 \text{ [km]}$
$L_V = 747,05 \text{ [km]}$	$M = 0,61 \text{ [-]}$	$m_{carga} = 28.300 \text{ [kg]}$	$\dot{m}_{cc,m\acute{a}x} = 42,64 \text{ [kg/s]}$	$\dot{m}_t = 42,64 \text{ [kg/s]}$
$m_{tara} = 2.180 \text{ [kg]}$	$m_{tot} = 171.027 \text{ [kg]}$	$n_{cont} = 5 \text{ [-]}$	$\phi = 10 \text{ [}^\circ\text{]}$	$P_1 = 7,54E+08 \text{ [W]}$
$P_{gx} = 2,44E+07 \text{ [W]}$	$p_{o,t} = 320,6 \text{ [Pa]}$	$p_t = 250 \text{ [Pa]}$	$R = 287 \text{ [J/kg-K]}$	$\rho_t = 2,97E-03 \text{ [Pa]}$
$t_{ac} = 14,15 \text{ [s]}$	$t_{ac,h} = 3,93E-03 \text{ [h]}$	$t_{dec} = 14,15 \text{ [s]}$	$t_{dec,h} = 3,93E-03 \text{ [h]}$	$t_{des} = 78,31 \text{ [min]}$
$t_{tot} = 60,24 \text{ [min]}$	$t_{tot,h} = 1 \text{ [h]}$	$T_{t,conv} = 293,15 \text{ [K]}$	$t_v = 59,76 \text{ [min]}$	$t_{v,h} = 1 \text{ [h]}$
$X_1 = 5,22 \text{ [}^\circ\text{]}$				

$A_f = 10,51 \text{ [m}^2\text{]}$	$a_s = 343,2 \text{ [m/s]}$	$A_t = 68,89 \text{ [m}^2\text{]}$	$\beta = 0,15 \text{ [-]}$
$\delta_2 = 3,15 \text{ [m}^2\text{]}$	$\delta_{lc} = 0,04 \text{ [m]}$	$\delta_{rc} = 0,05 \text{ [m]}$	$\delta_{star} = 0,77 \text{ [m]}$
$\eta_{bat} = 0,90 \text{ [-]}$	$\eta_{EDS} = 0,73 \text{ [-]}$	$E_1 = 72.717,56 \text{ [V]}$	$E_{ac} = 1.480,04 \text{ [kWh]}$
$E_v = 34.902,64 \text{ [kWh]}$	$f_1 = 1 \text{ [-]}$	$f_2 = 1 \text{ [-]}$	$f_3 = 1 \text{ [-]}$
$F_z = 1,67E+06 \text{ [N]}$	$g = 9,81 \text{ [m/s}^2\text{]}$	$\gamma = 1,40 \text{ [-]}$	$\gamma_o = 30 \text{ [}^\circ\text{]}$
$L_c = 6,138 \text{ [m]}$	$L_{cont} = 6,058 \text{ [m]}$	$L_{dec} = 1,47 \text{ [km]}$	$L_t = 750 \text{ [km]}$
$m_{EB} = 1.750 \text{ [kg]}$	$m_{Li} = 550 \text{ [kg]}$	$m_{r,EDS} = 32 \text{ [kg]}$	$m_{r,est} = 500 \text{ [kg]}$
$P_{av} = 1,20E+06 \text{ [W]}$	$\bar{P}_{av} = 386.433 \text{ [W]}$	$P_D = 150.991 \text{ [W]}$	$P_{D,EDS} = 1,05E+06 \text{ [W]}$
$R_1 = 8 \text{ [}\Omega\text{]}$	$R_{av} = 5.746 \text{ [N]}$	$\tau_2 = 30 \text{ [%]}$	$\theta = 0,26 \text{ [m]}$
$t_{des,h} = 1,305 \text{ [h]}$	$T_f = 1,78 \text{ [-]}$	$T_{o,t} = 314,75 \text{ [K]}$	$T_t = 20 \text{ [}^\circ\text{C]}$
$t_{v,s} = 3.586 \text{ [s]}$	$v = 750 \text{ [km/h]}$	$V_1 = 87.598 \text{ [V]}$	$\bar{v} = 747,06 \text{ [km/h]}$

Fig. 10.4. Resultados del [10.3] en ascenso.

Los resultados durante el descenso serán:

$\alpha = -4 \text{ [}^\circ\text{]}$	$a_1 = 14,72 \text{ [m/s}^2\text{]}$	$a_2 = 14,72 \text{ [m/s}^2\text{]}$	$A_c = 10,51 \text{ [m}^2\text{]}$	$A_{cc} = 58,38 \text{ [m}^2\text{]}$
$C_{D,EDS} = 3,00E-03 \text{ [-]}$	$C_{D,ext} = 0,60 \text{ [-]}$	$C_{D,t} = 1,07 \text{ [-]}$	$c_i = 0 \text{ [m/s]}$	$\delta_1 = 10,70 \text{ [m}^2\text{]}$
$D_c = 3,658 \text{ [m]}$	$D_{carga} = 3,558 \text{ [m]}$	$D_{desp} = 5,20 \text{ [m]}$	$D_{movto} = 4,17 \text{ [m]}$	$D_t = 9,37 \text{ [m]}$
$e_{bat} = 225 \text{ [Wh/kg]}$	$E_{bat} = 105,77 \text{ [kWh]}$	$E_{gen} = -786,49 \text{ [kWh]}$	$E_{r,t} = -21,59 \text{ [kWh/km]}$	$e_t = -1,53E-01 \text{ [kWh/tkm]}$
$f_4 = 1 \text{ [-]}$	$f_5 = 1 \text{ [-]}$	$F_D = 724,76 \text{ [N]}$	$F_{D,EDS} = 5.021,07 \text{ [N]}$	$F_x = 2,41E+06 \text{ [N]}$
$I_1 = 2.779,47 \text{ [A]}$	$I_c = 2,35 \text{ [t/h]}$	$I_{c,inv} = 0,43 \text{ [h/t]}$	$I_e = -114,42 \text{ [kWh/t]}$	$L_{ac} = 1,47 \text{ [km]}$
$L_v = 747,05 \text{ [km]}$	$M = 0,61 \text{ [-]}$	$m_{carga} = 28.300 \text{ [kg]}$	$\dot{m}_{cc,m\acute{a}x} = 42,64 \text{ [kg/s]}$	$\dot{m}_t = 42,64 \text{ [kg/s]}$
$m_{tara} = 2.180 \text{ [kg]}$	$m_{tot} = 171.027 \text{ [kg]}$	$n_{cont} = 5 \text{ [-]}$	$\phi = 10 \text{ [}^\circ\text{]}$	$P_1 = 6,87E+08 \text{ [W]}$
$P_{gx} = -2,44E+07 \text{ [W]}$	$p_{o,t} = 320,6 \text{ [Pa]}$	$p_t = 250 \text{ [Pa]}$	$R = 287 \text{ [J/kg}\cdot\text{K]}$	$\rho_t = 2,97E-03 \text{ [Pa]}$
$t_{ac} = 14,15 \text{ [s]}$	$t_{ac,h} = 3,93E-03 \text{ [h]}$	$t_{dec} = 14,15 \text{ [s]}$	$t_{dec,h} = 3,93E-03 \text{ [h]}$	$t_{des} = 78,31 \text{ [min]}$
$t_{tot} = 60,24 \text{ [min]}$	$t_{tot,h} = 1 \text{ [h]}$	$T_{t,conv} = 293,15 \text{ [K]}$	$t_v = 59,76 \text{ [min]}$	$t_{v,h} = 1 \text{ [h]}$
$X_1 = 5,22 \text{ [}\Omega\text{]}$				

$A_f = 10,51 \text{ [m}^2\text{]}$	$a_s = 343,2 \text{ [m/s]}$	$A_t = 68,89 \text{ [m}^2\text{]}$	$\beta = 0,15 \text{ [-]}$
$\delta_2 = 3,15 \text{ [m}^2\text{]}$	$\delta_{lc} = 0,04 \text{ [m]}$	$\delta_{rc} = 0,05 \text{ [m]}$	$\delta_{star} = 0,77 \text{ [m]}$
$\eta_{bat} = 0,90 \text{ [-]}$	$\eta_{EDS} = 0,73 \text{ [-]}$	$E_1 = 69.419,44 \text{ [V]}$	$E_{ac} = 1.348,73 \text{ [kWh]}$
$E_v = -16.858,80 \text{ [kWh]}$	$f_1 = 1 \text{ [-]}$	$f_2 = 1 \text{ [-]}$	$f_3 = 1 \text{ [-]}$
$F_z = 1,67E+06 \text{ [N]}$	$g = 9,81 \text{ [m/s}^2\text{]}$	$\gamma = 1,40 \text{ [-]}$	$\gamma_o = 30 \text{ [}^\circ\text{]}$
$L_c = 6,138 \text{ [m]}$	$L_{cont} = 6,058 \text{ [m]}$	$L_{dec} = 1,47 \text{ [km]}$	$L_t = 750 \text{ [km]}$
$m_{EB} = 1.750 \text{ [kg]}$	$m_{Li} = 550 \text{ [kg]}$	$m_{r,EDS} = 32 \text{ [kg]}$	$m_{r,est} = 500 \text{ [kg]}$
$P_{av} = 1,20E+06 \text{ [W]}$	$\bar{P}_{av} = 386.433 \text{ [W]}$	$P_D = 150.991 \text{ [W]}$	$P_{D,EDS} = 1,05E+06 \text{ [W]}$
$R_1 = 8 \text{ [}\Omega\text{]}$	$R_{av} = 5.746 \text{ [N]}$	$\tau_2 = 30 \text{ [%]}$	$\theta = 0,26 \text{ [m]}$
$t_{des,h} = 1,305 \text{ [h]}$	$T_f = 1,78 \text{ [-]}$	$T_{o,t} = 314,75 \text{ [K]}$	$T_t = 20 \text{ [}^\circ\text{C]}$
$t_{v,s} = 3.586 \text{ [s]}$	$v = 750 \text{ [km/h]}$	$V_1 = 83.625 \text{ [V]}$	$\bar{v} = 747,06 \text{ [km/h]}$

Fig. 10.5. Resultados del [10.3] en descenso.

Por tanto, si el ascenso se produce con una carga similar a la del descenso, el consumo global habrá sido: $39,56 - 17,79 = 22$ kWh/km. También: $(3,37 - 1,53) \cdot 10^{-1} = 1,84 \cdot 10^{-1}$ kWh/tkm.

Este último dato supera al AVE, que según la tabla [4.1] presenta un valor de $4,75 \cdot 10^{-1}$ kWh/tkm y al Transrapid, que presenta $6,97 \cdot 10^{-1}$ kWh/tkm. También debe tenerse en cuenta que estos dos trenes analizados fueron diseñados para transportar pasajeros en vez de mercancías.

11. Resultados de la parametrización del segundo modelo

Se va a proceder como en la simulación del primer modelo. Al principio de cada tema se especificará qué parámetros de partida se consideran, incluyendo las constantes. Se van a probar varias maneras de apilar las cajas dependiendo del número de cajas en cada sección, que es n_{fc}^2 . Concretamente, el estudio se va a basar en 2, 3 y 4 filas de cajas.

11.1. Primera geometría

11.1.1. Límite de Kantrowitz y aerodinámica

Se parte de estos valores numéricos:

$$\begin{aligned}C_{D;ext} [-] &= 0,70 \\c_i [m/s] &= 0 \\\gamma [-] &= 1,40 \\\delta_{comp} [m] &= 1 \cdot 10^{-2} \\\delta_{rc} [m] &= 3,50 \cdot 10^{-2} \\l_1 [m] &= 0,20 \\R [J/kg \cdot K] &= 287 \\T_t [^\circ C] &= 20 \\p_t [Pa] &= 100\end{aligned}$$

Fig. 11.1. Valores numéricos de partida del subapartado [11.1.1].

1.30	δ_{comp} [m]	v [km/h]	M [-]	D_t [m]	β [-]
Run 1	1,50E-02	1.220	0,99	20,24	2,06E-03
Run 2	1,33E-02	1.220	0,99	19,11	2,31E-03
Run 3	1,17E-02	1.220	0,99	17,91	2,63E-03
Run 4	1,00E-02	1.220	0,99	16,61	3,06E-03
Run 5	8,38E-03	1.220	0,99	15,20	3,65E-03
Run 6	6,72E-03	1.220	0,99	13,63	4,54E-03
Run 7	5,07E-03	1.220	0,99	11,85	6,00E-03
Run 8	3,41E-03	1.220	0,99	9,75	8,88E-03
Run 9	1,76E-03	1.220	0,99	7,03	1,71E-02
Run 10	1,00E-04	1.220	0,99	1,90	2,33E-01
Run 11	1,50E-02	1.100	0,89	2,43	1,43E-01
Run 12	1,33E-02	1.100	0,89	2,31	1,58E-01
Run 13	1,17E-02	1.100	0,89	2,19	1,76E-01
Run 14	1,00E-02	1.100	0,89	2,06	1,99E-01
Run 15	8,38E-03	1.100	0,89	1,92	2,29E-01
Run 16	6,72E-03	1.100	0,89	1,77	2,70E-01
Run 17	5,07E-03	1.100	0,89	1,60	3,29E-01
Run 18	3,41E-03	1.100	0,89	1,42	4,20E-01
Run 19	1,76E-03	1.100	0,89	1,20	5,85E-01
Run 20	1,00E-04	1.100	0,89	0,94	9,61E-01
Run 21	1,50E-02	1.000	0,81	1,55	3,49E-01
Run 22	1,33E-02	1.000	0,81	1,50	3,76E-01
Run 23	1,17E-02	1.000	0,81	1,44	4,07E-01
Run 24	1,00E-02	1.000	0,81	1,38	4,44E-01
Run 25	8,38E-03	1.000	0,81	1,31	4,88E-01
Run 26	6,72E-03	1.000	0,81	1,25	5,43E-01
Run 27	5,07E-03	1.000	0,81	1,18	6,11E-01
Run 28	3,41E-03	1.000	0,81	1,10	7,00E-01
Run 29	1,76E-03	1.000	0,81	1,02	8,19E-01
Run 30	1,00E-04	1.000	0,81	0,92	9,88E-01

Tabla 11.1. Influencia de δ_{comp} y v en D_t y β .

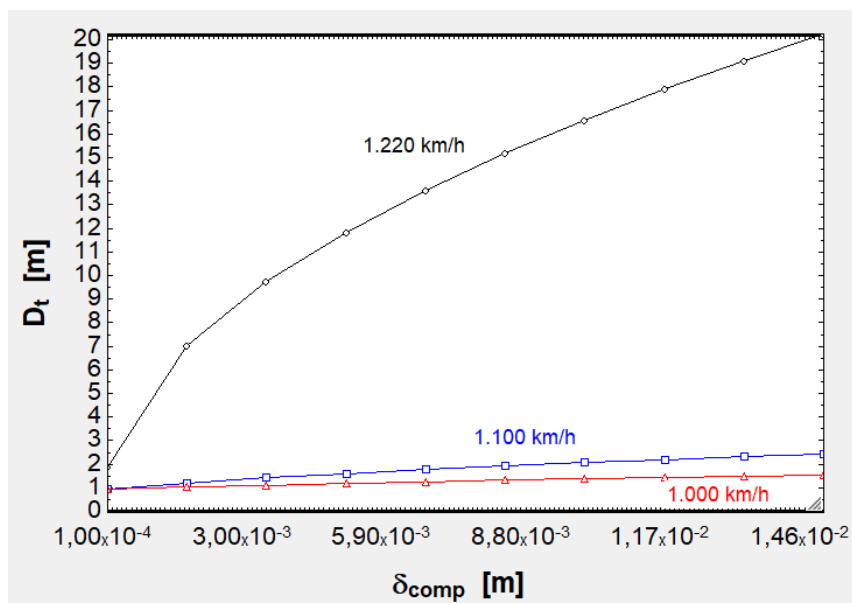


Fig. 11.2. Relación entre D_t y δ_{comp} a diferente v.

1..15	1 v [km/h]	2 n _{fc} [-]	3 D _c [m]	4 D _t [m]	5 β [-]
Run 1	1.200	2	0,64	6,01	1,12E-02
Run 2	1.150	2	0,64	2,53	6,30E-02
Run 3	1.100	2	0,64	1,65	1,48E-01
Run 4	1.050	2	0,64	1,27	2,51E-01
Run 5	1.000	2	0,64	1,06	3,58E-01
Run 6	1.200	3	0,92	7,26	1,60E-02
Run 7	1.150	3	0,92	3,09	8,81E-02
Run 8	1.100	3	0,92	2,06	2,00E-01
Run 9	1.050	3	0,92	1,61	3,25E-01
Run 10	1.000	3	0,92	1,38	4,44E-01
Run 11	1.200	4	1,20	8,34	2,08E-02
Run 12	1.150	4	1,20	3,59	1,12E-01
Run 13	1.100	4	1,20	2,43	2,45E-01
Run 14	1.050	4	1,20	1,93	3,86E-01
Run 15	1.000	4	1,20	1,68	5,11E-01

Tabla 11.2. Correlación entre v y D_t y β cuando varía n_{fc}.

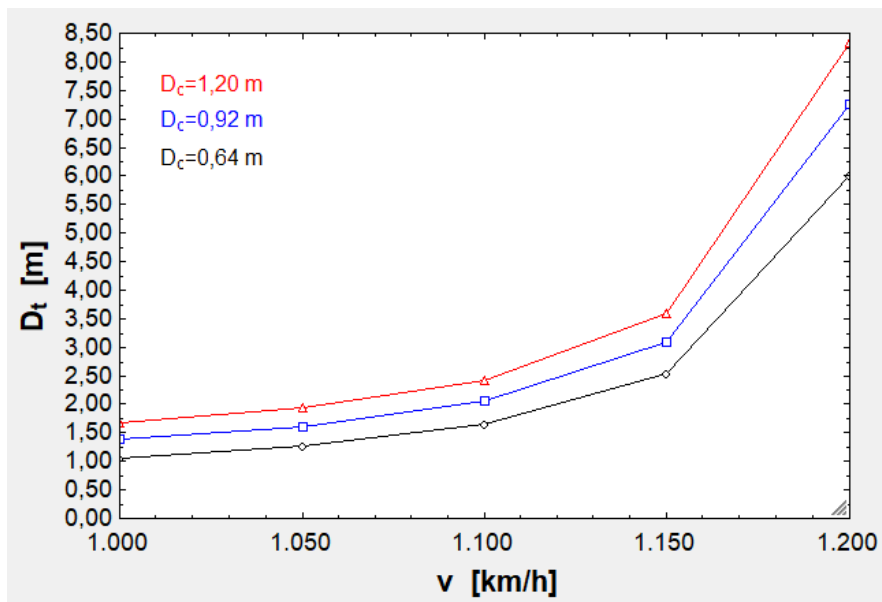


Fig. 11.3. Influencia de v en D_t dependiendo de D_c.

1.28	1	2	3	4	5
	v	T _t	M	D _t	β
	[km/h]	[°C]	[-]	[m]	[-]
Run 1	1.200	-30	1,07	3,33	7,62E-02
Run 2	1.150	-30	1,02	9,59	9,17E-03
Run 3	1.100	-30	0,98	9,30	9,76E-03
Run 4	1.050	-30	0,93	3,20	8,26E-02
Run 5	1.000	-30	0,89	2,03	2,04E-01
Run 6	1.200	-15	1,03	6,09	2,27E-02
Run 7	1.150	-15	0,99	25,84	1,28E-03
Run 8	1.100	-15	0,95	4,12	4,98E-02
Run 9	1.050	-15	0,91	2,34	1,54E-01
Run 10	1.000	-15	0,86	1,72	2,85E-01
Run 11	1.200	0	1,01	33,89	7,34E-04
Run 12	1.150	0	0,96	5,85	2,46E-02
Run 13	1.100	0	0,92	2,78	1,09E-01
Run 14	1.050	0	0,88	1,92	2,30E-01
Run 15	1.000	0	0,84	1,53	3,60E-01
Run 16	1.200	15	0,98	10,24	8,05E-03
Run 17	1.150	15	0,94	3,48	6,98E-02
Run 18	1.100	15	0,90	2,19	1,77E-01
Run 19	1.050	15	0,86	1,67	3,02E-01
Run 20	1.000	15	0,82	1,41	4,25E-01
Run 21	1.200	30	0,96	4,68	3,85E-02
Run 22	1.150	30	0,92	2,57	1,27E-01
Run 23	1.100	30	0,88	1,86	2,45E-01
Run 24	1.050	30	0,84	1,51	3,68E-01
Run 25	1.000	30	0,80	1,32	4,81E-01
Run 26	1.200	45	0,93	3,16	8,45E-02
Run 27	1.150	45	0,89	2,11	1,90E-01
Run 28	1.100	45	0,85	1,65	3,10E-01
Run 29	1.050	45	0,82	1,41	4,26E-01
Run 30	1.000	45	0,78	1,26	5,30E-01

Tabla 11.3. Influencia de v en D_t y β.

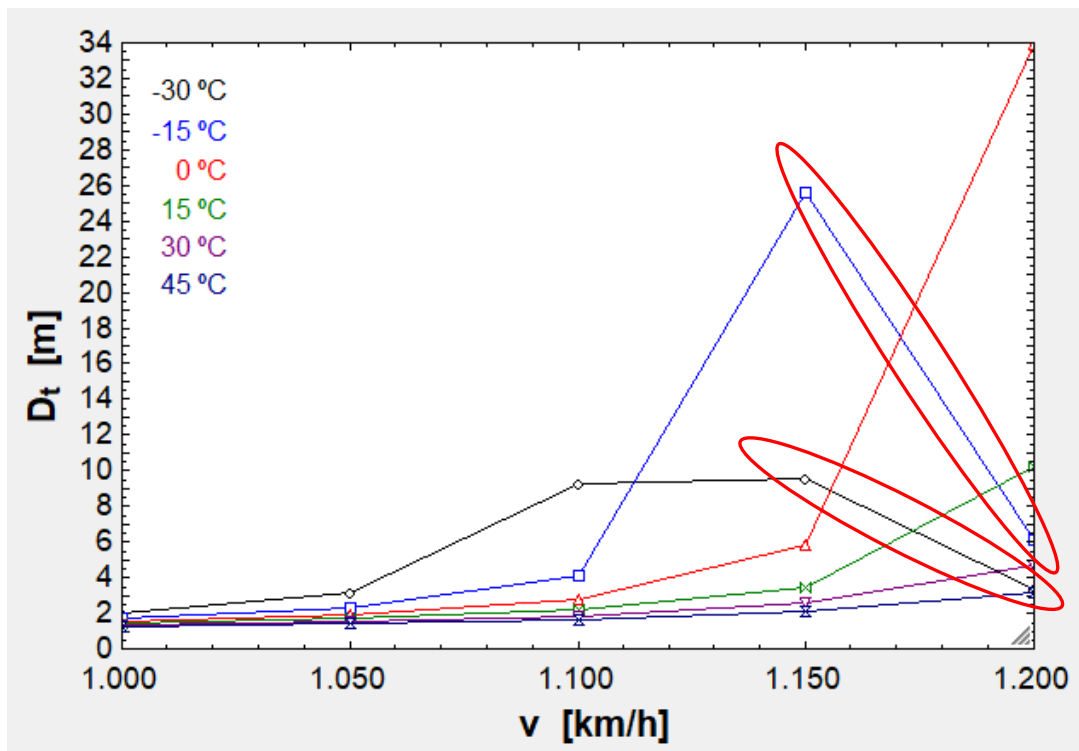


Fig. 11.4. Influencia de v en D_t para diferentes T_t .

	1	2	3	4	5	6	7
	v [km/h]	n_{fc} [-]	D_c [m]	T_f [-]	F_D [N]	P_D [W]	
Run 1	1.200	2	0,64	1,06	15,51	5.171	
Run 2	1.150	2	0,64	1,37	18,47	5.901	
Run 3	1.100	2	0,64	2,12	26,18	7.999	
Run 4	1.050	2	0,64	3,78	42,43	12.376	
Run 5	1.000	2	0,64	7,60	77,47	21.521	
Run 6	1.200	3	0,92	1,08	33,18	11.060	
Run 7	1.150	3	0,92	1,56	43,82	13.998	
Run 8	1.100	3	0,92	2,81	72,42	22.129	
Run 9	1.050	3	0,92	6,04	141,69	41.327	
Run 10	1.000	3	0,92	15,52	330,18	91.718	
Run 11	1.200	4	1,20	1,11	58,13	19.376	
Run 12	1.150	4	1,20	1,76	84,72	27.065	
Run 13	1.100	4	1,20	3,66	161,19	49.253	
Run 14	1.050	4	1,20	9,39	376,76	109.888	
Run 15	1.000	4	1,20	31,57	1.148,71	319.086	

Tabla 11.4. Efecto de v y n_{fc} en T_f , F_D y P_D .

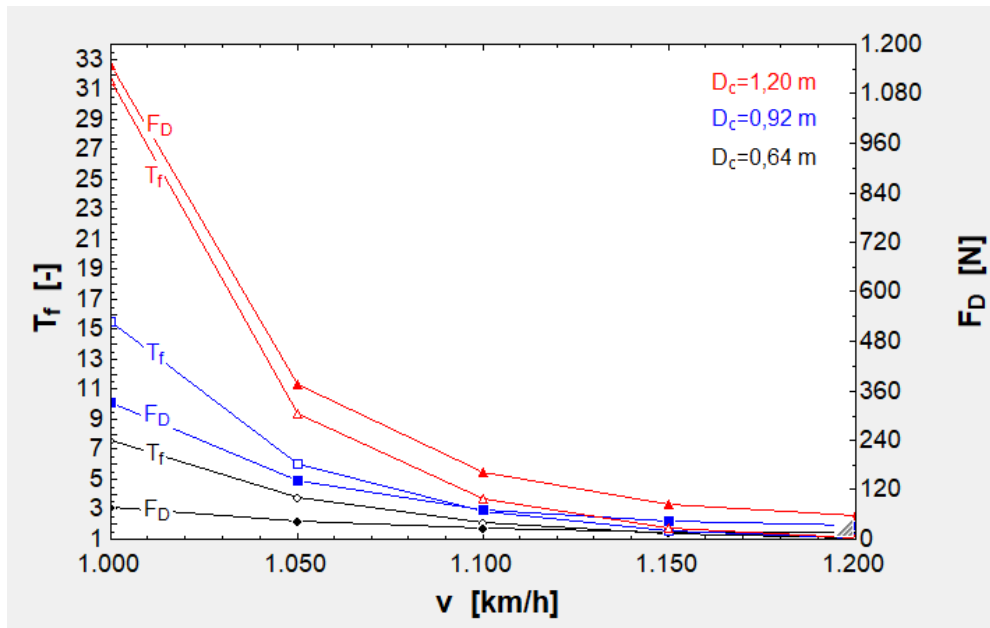


Fig. 11.5. Efecto de v en T_f y F_D para diferentes valores de D_c .

Como conclusión, cabe decir que en la figura [11.2] se ve que δ_{comp} es un factor muy influyente a 1.220 km/h porque entonces $M(20^\circ\text{C}) \cong 1$ y el propio tubo está prácticamente en bloqueo sónico y en ese caso lo ideal es que el aire pase directamente a A_{cc} y al compresor sin comprimirse. En cambio, cuando δ_{comp} aumenta, el flujo másico que incide en esa zona tendrá que comprimirse para pasar a A_{cc} , por lo que es necesario incrementar D_t para que A_{cc} pueda admitir ese flujo. En la figura [11.3] δ_{comp} tiene un valor fijo de 0,01 m, pero no se obtienen valores tan elevados de D_t como los de la figura anterior porque ahora la velocidad máxima es 1.200 km/h y M es inferior a 1. Los mayores valores de D_t obtenidos en este caso se dan para el tramo 1.150-1.200 km/h, ya que M sigue siendo alto. Respecto a la figura [11.4], en este caso se desprende que la influencia térmica es poco importante por debajo de 1.150 km/h y que por encima de esta cifra los menores valores de D_t se obtienen para temperaturas altas porque entonces M disminuye al aumentar a_s . Además, se han rodeado en rojo los valores en los que $M > 1$, que son incongruentes porque el Hyperloop se ha planteado para velocidades subsónicas. Por tanto, el Hyperloop planteado tendría que circular más despacio en regiones con climas fríos. Por último, en la figura [11.5] se aprecia cómo F_D sigue la tendencia de T_f y para v y D_c altos ostentan valores muy elevados, puesto que el D_t que cumple el límite de Kantrowitz es cercano a D_c y la obstrucción causada por la cápsula es muy grande. De hecho, en la tabla [11.2] se lee que β es 0,51 en el peor de los casos, valor muy elevado.

Otros efectos como la influencia de p_t , de $C_{D_{ext}}$ y de δ_{rc} pueden verse en el subapartado [9.1.1].

11.1.2. Cinemática

En este caso se parte de $a_1 = 19,62 \text{ m/s}^2$ y $a_2 = 19,62 \text{ m/s}^2$.

1..15	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	L_t [Km]	v [km/h]	L_{ac} [km]	L_{dec} [km]	L_v [km]	t_{ac} [s]	t_{dec} [s]	t_v [min]	t_{tot} [min]
Run 1	200	1.200	2,83	2,83	194,34	16,99	16,99	9,72	10,28
Run 2	200	1.150	2,60	2,60	194,80	16,28	16,28	10,16	10,71
Run 3	200	1.100	2,38	2,38	195,24	15,57	15,57	10,65	11,17
Run 4	200	1.050	2,17	2,17	195,66	14,87	14,87	11,18	11,68
Run 5	200	1.000	1,97	1,97	196,07	14,16	14,16	11,76	12,24
Run 6	350	1.200	2,83	2,83	344,34	16,99	16,99	17,22	17,78
Run 7	350	1.150	2,60	2,60	344,80	16,28	16,28	17,99	18,53
Run 8	350	1.100	2,38	2,38	345,24	15,57	15,57	18,83	19,35
Run 9	350	1.050	2,17	2,17	345,66	14,87	14,87	19,75	20,25
Run 10	350	1.000	1,97	1,97	346,07	14,16	14,16	20,76	21,24
Run 11	500	1.200	2,83	2,83	494,34	16,99	16,99	24,72	25,28
Run 12	500	1.150	2,60	2,60	494,80	16,28	16,28	25,82	26,36
Run 13	500	1.100	2,38	2,38	495,24	15,57	15,57	27,01	27,53
Run 14	500	1.050	2,17	2,17	495,66	14,87	14,87	28,32	28,82
Run 15	500	1.000	1,97	1,97	496,07	14,16	14,16	29,76	30,24

Tabla 11.5. Influencia de v y L_t en las longitudes y los tiempos.

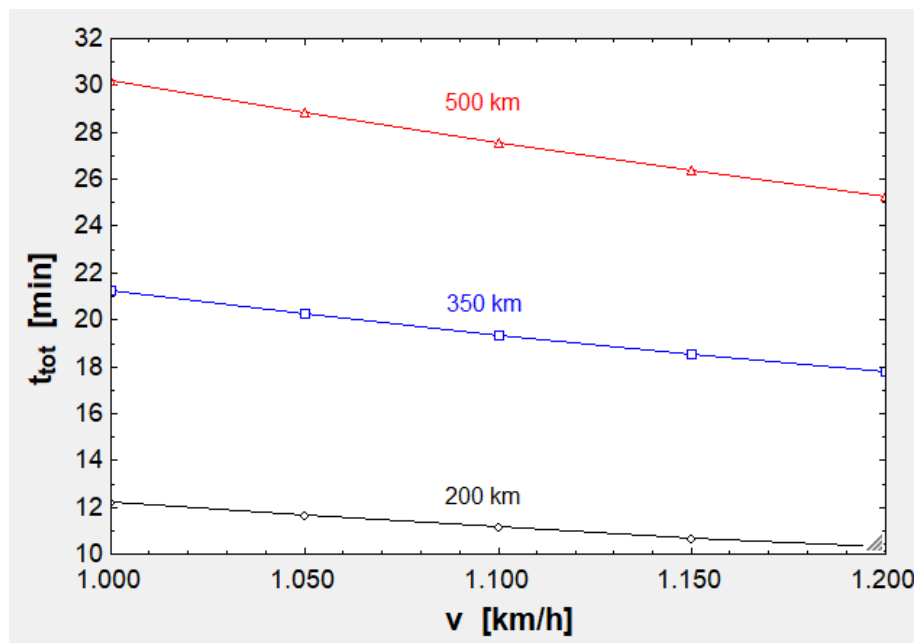


Fig. 11.6. Interrelación entre t_{tot} y v para las distancias propuestas.

En conclusión, la variación de v en el rango 1.000-1.200 km/h acorta muy poco t_{tot} en distancias cortas, notándose más el efecto para la ruta de 500 km.

El efecto de a_1 y a_2 puede consultarse en el subapartado [9.1.2].

11.1.3. Rodamientos de aire

Un factor muy influyente en los rodamientos es la carga que han de soportar, por lo que primero se va a dar una relación de las masas empleadas:

m'_{est} : Este segundo modelo es muy similar al primer modelo de Musk, que, al igual que el segundo de Musk, tiene una longitud estimada de 25 m como ya se dijo en el subapartado [9.1.3]. Además, tiene un peso de 3.100 kg [18, p. 23]. En consecuencia:

$$m'_{est} = \frac{3.100}{25} = 124 \frac{kg}{m} \cong 125 \frac{kg}{m}$$

m'_{LIM} : El rotor del LIM del primer modelo de Musk pesa 700 kg [18, p. 23]. Consecuentemente:

$$m'_{LIM} = \frac{700}{25} = 28 \frac{kg}{m}$$

m_a : Como ya se dijo en el subapartado [9.1.3], ambos modelos de Musk cuentan con 28 cojinetes. Estos 28 cojinetes pesan 1.000 kg [18, p. 23], por lo que el peso unitario será:

$$m_a = \frac{1.000}{28} = 35,71 kg \cong 36 kg$$

m_{comp} : 1.800 kg [18, p. 23].

m_{EB} : 600 kg [18, p. 23].

m_{mot} : 169 kg [18, p. 17].

Otros parámetros que tienen que ver con el peso y se pueden deducir del documento son:

C: En el último apartado del anexo [III] se calculó a partir de la referencia [18] que el primer modelo de Musk cuenta con 1.500 kg de baterías para alimentar el motor del compresor y con 541 kg de baterías adicionales. Por tanto:

$$C = \frac{541}{1500} \cdot 100 \cong 36 \%$$

τ_2 : Las baterías duran 45 min [18, p. 18], mientras que el viaje 35 min [18, p. 6]. Por ende:

$$\tau_2 = \left(\frac{45}{35} - 1 \right) \cdot 100 = 28,57 \% \approx 30 \%$$

Para τ_1 puede considerarse algo inferior, ya que no es tan importante tener una reserva de agua como una de electricidad. Por tanto, se toma el 15 %.

Además, hay otros parámetros que determinan el peso de las baterías y del agua:

e_{bat} : 200 Wh/kg, valor habitual en las baterías de iones de litio [32].

η_{mot} : 0,90 porque es eléctrico.

η_{C_1} y η_{C_2} : 0,72, valor con el que se obtienen los resultados de [18, p. 18].

ρ_{H_2O} : 1.000 kg/m³.

ΔT_{I_1} : 100 – 20 K [18, p. 18].

ΔT_s : 99 – 20 K para evitar que el agua del serpentín se vaporice, ya que almacenar vapor requiere 1.000 veces más de espacio que almacenar agua.

T_2 y T_a : 300 K y 400 K, respectivamente [18, p. 18].

p_1 : 2.100 Pa [18, p. 18].

$c_{p_{H_2O}}$ y $c''_{p_{H_2O}}$: 4.186 J/kgK porque se trata de agua líquida [43, p. 39].

h_v : 2.258 kJ/kg [33].

Respecto a los parámetros iniciales de los cojinetes, estos son los siguientes:

h_1 y h_2 : 1,30 y 0,50 mm, respectivamente [18, p. 20].

L : 1,50 m [18, p. 20].

w_{LIM} : El estátor del LIM presenta una anchura de 0,50 m [18, p. 37].

q : Con la ecuación [8.54] y teniendo en cuenta que la cápsula de Musk tiene $D_c = 1,34$ m (porque $D_t = 2,23$ y D_c es el 60 % de D_t , [18, p. 26]) y $w = 0,90$ m [18, p. 20] se puede deducir este parámetro:

$$0,90 = \frac{\frac{q(\%)}{100} \cdot \pi \cdot 1,34 - 0,50}{2} \rightarrow q(\%) = 54,63 \%$$

Para este segundo modelo se puede considerar 45 %, ya que no es conveniente que los rodamientos lleguen a una gran altura porque dificultará la carga/descarga del tren al estar las puertas más arriba.

η_a y Δp_a : η_a depende de la distribución de presión bajo el rodamiento y para rodamientos pequeños es comúnmente el 30 % [34]. En otros la presión de salida es el 40-50 % de la de alimentación [19, p. 10]. En el caso de Musk la pérdida de carga es

pequeña (9.400 Pa a la salida [18, p. 20] y la de alimentación es 11.000 Pa [18, p. 18]). En este caso se puede considerar $\Delta p_a(\%) = 30\%$ y $\eta_a = 60\%$ porque el rodamiento es grande y no afecta demasiado el efecto de los bordes [19, p. 11].

C_L : El rodamiento está inclinado $0,05^\circ$ respecto a la horizontal y se toma $C_L = 10\%$ porque incluso a ángulos de ataque nulos es posible tener un determinado coeficiente de sustentación [35].

$\Delta \bar{h}$: Se toma $175 \mu\text{m}$ para que h_2 no se reduzca demasiado.

c_a : Se estima que el fluido se acelera bajo cada cojinete hasta los 150 m/s .

d : $0,10 \text{ m}$ para que la salida de un rodamiento no interfiera demasiado con la entrada del siguiente y, a la vez, quepan muchos.

μ_a : $2,33 \cdot 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ a 400 K y el impacto de la presión es despreciable [36].

Por último, respecto a las longitudes se hacen estas estimaciones:

L_{aux} : $5,50 \text{ m}$.

L_{bat} : $1,50 \text{ m}$.

δ_{IC} : Puede tomarse como 3 mm si se considera que los espesores principales ya se han tenido en cuenta en L_{aux} y L_{bat} .

Dicho lo cual se procede a la simulación de los rodamientos de aire a $v=1.150 \text{ km/h}$, con $n_{\text{fc}} = 3$, $n_{\text{caj}} = 200$, $m_{\text{pzs}} = 50 \text{ kg}$ y $\psi = 1$. Además, $L_t = 200 \text{ km}$.

El dato de n_{caj} habrá que reducirlo a veces porque cuando \dot{m}_{tob} es próximo a 0 o \dot{m}_a casi igual a \dot{m}_{C_1} el programa no converge. El significado físico de esto es que el compresor no admite suficiente aire para alimentar a los cojinetes.

	1	2	3	4	5	6	7	8
	n_{fc} [-]	q [%]	w [m]	n_a [-]	P_a [Pa]	\dot{m}_a [kg/s]	L_c [m]	m_{tot} [kg]
Run 1	2	40	0,15	24	48.609	7,97E-02	19,51	16.821
Run 2	2	44	0,19	24	38.309	7,96E-02	19,51	16.800
Run 3	2	48	0,23	24	31.606	7,95E-02	19,51	16.784
Run 4	3	40	0,33	16	31.109	7,45E-02	12,76	15.713
Run 5	3	44	0,38	16	26.424	7,44E-02	12,76	15.701
Run 6	3	48	0,44	16	22.963	7,44E-02	12,76	15.691
Run 7	4	40	0,50	12	26.564	7,36E-02	10,26	15.530
Run 8	4	44	0,58	12	23.094	7,35E-02	10,26	15.520
Run 9	4	48	0,66	12	20.425	7,35E-02	10,26	15.512

Tabla 11.6. Efecto de n_{fc} y q en w , n_a , p_a , \dot{m}_a . Últimas columnas para consultar L_c y m_{tot} .

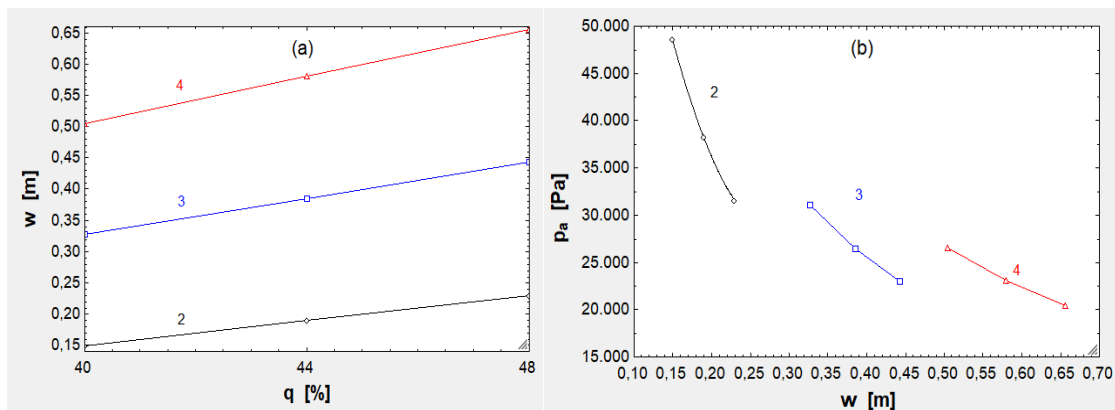


Fig. 11.7. (a) Correlación entre w y q según n_{fc} . (b) Correlación entre p_a y w según n_{fc} .

1.15	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	n_{fc} [-]	η_a [-]	Δp_a [%]	p_a [Pa]	$p_{a;S}$ [Pa]	\dot{m}_a [kg/s]	n_a [-]	L_c [m]	m_{tot} [kg]
Run 1	2	0,30	45	64.097	35.253	0,08	18	14,01	11.410
Run 2	2	0,40	40	48.494	29.096	0,07	18	14,01	11.352
Run 3	2	0,50	35	39.007	25.355	0,06	18	14,01	11.319
Run 4	2	0,60	30	32.628	22.840	0,05	18	14,01	11.298
Run 5	2	0,70	25	28.043	21.032	0,05	18	14,01	11.283
Run 6	3	0,30	45	45.625	25.094	0,08	12	10,26	10.845
Run 7	3	0,40	40	34.541	20.725	0,06	12	10,26	10.797
Run 8	3	0,50	35	27.795	18.066	0,06	12	10,26	10.769
Run 9	3	0,60	30	23.255	16.278	0,05	12	10,26	10.752
Run 10	3	0,70	25	19.991	14.993	0,05	12	10,26	10.740
Run 11	4	0,30	45	30.686	16.877	0,08	12	8,76	10.946
Run 12	4	0,40	40	23.247	13.948	0,07	12	8,76	10.905
Run 13	4	0,50	35	18.715	12.164	0,06	12	8,76	10.882
Run 14	4	0,60	30	15.662	10.963	0,05	12	8,76	10.867
Run 15	4	0,70	25	13.466	10.100	0,05	12	8,76	10.857

Tabla 11.7. Efecto de η_a y Δp_a en p_a , $p_{a;S}$ y \dot{m}_a dependiendo de n_{fc} . Columnas de n_a , L_c y m_{tot} para consulta. n_{caj} vale 112 puntualmente en este caso porque era necesario deslastrar carga para tener suficiente \dot{m}_a en los casos más críticos.

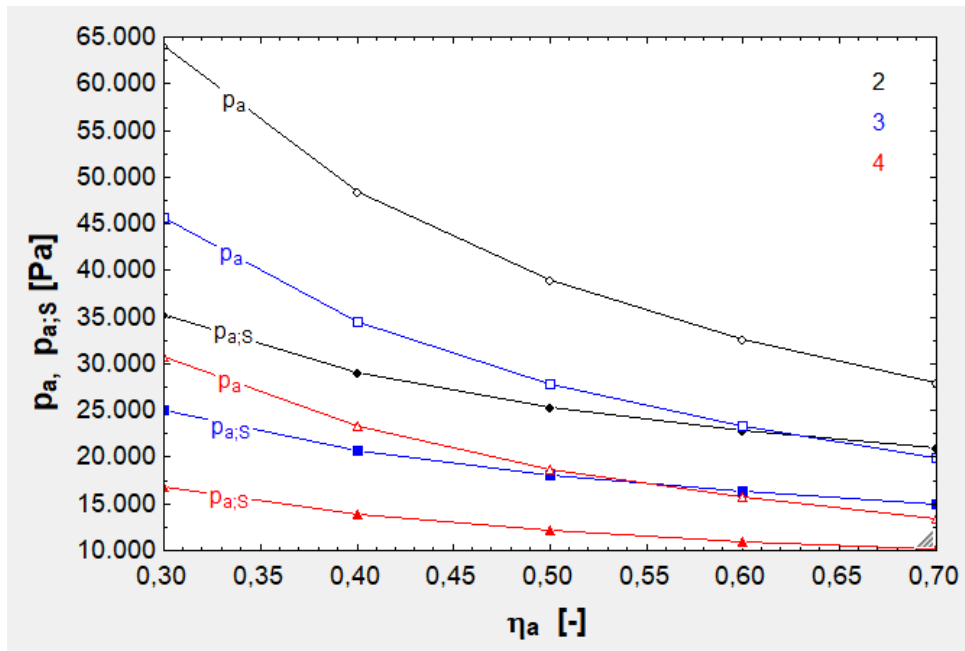


Fig. 11.8. Relación entre η_a y p_a y $p_{a,s}$ cuando varía n_{fc} y Δp_a (este último parámetro asociado a η_a).

1	2	3	4	5	6	7
1..30	n_{fc} [-]	C_L [-]	F_L [N]	p_a [Pa]	R_a [N/m]	n_a [-]
Run 1	2	0,01	851,20	38.126	2,03E+05	24
Run 2	2	0,03	2.527,14	37.731	6,02E+05	24
Run 3	2	0,05	4.168,70	37.344	9,93E+05	24
Run 4	2	0,07	5.776,95	36.965	1,38E+06	24
Run 5	2	0,09	7.352,88	36.593	1,75E+06	24
Run 6	2	0,01	935,83	38.106	2,23E+05	24
Run 7	2	0,01	1.104,82	38.066	2,63E+05	24
Run 8	2	0,15	11.896,27	35.523	2,83E+06	24
Run 9	2	0,17	13.352,24	35.180	3,18E+06	24
Run 10	2	0,19	14.780,37	34.843	3,52E+06	24
Run 11	3	0,01	795,86	26.696	2,84E+05	16
Run 12	3	0,03	2.362,88	26.420	8,44E+05	16
Run 13	3	0,05	3.897,85	26.149	1,39E+06	16
Run 14	3	0,07	5.401,71	25.884	1,93E+06	16
Run 15	3	0,09	6.875,43	25.625	2,46E+06	16
Run 16	3	0,01	874,98	26.682	3,12E+05	16
Run 17	3	0,01	1.032,99	26.654	3,69E+05	16
Run 18	3	0,15	11.124,49	24.877	3,97E+06	16
Run 19	3	0,17	12.486,25	24.637	4,46E+06	16
Run 20	3	0,19	13.822,03	24.402	4,94E+06	16
Run 21	4	0,01	787,00	23.454	3,75E+05	12
Run 22	4	0,03	2.336,60	23.211	1,11E+06	12
Run 23	4	0,05	3.854,51	22.974	1,84E+06	12
Run 24	4	0,07	5.341,70	22.742	2,54E+06	12
Run 25	4	0,09	6.799,10	22.514	3,24E+06	12
Run 26	4	0,01	865,24	23.442	4,12E+05	12
Run 27	4	0,01	1.021,50	23.417	4,86E+05	12
Run 28	4	0,15	11.001,21	21.857	5,24E+06	12
Run 29	4	0,17	12.347,97	21.646	5,88E+06	12
Run 30	4	0,19	13.669,04	21.440	6,51E+06	12

Tabla 11.8. Efecto de C_L en F_L , p_a y R_a cuando varía n_{fc} .

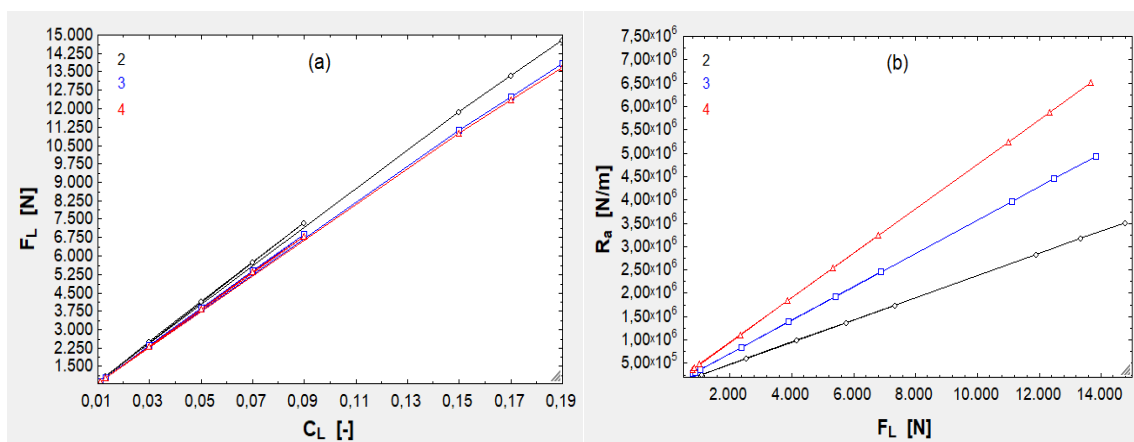


Fig. 11.9. (a) Efecto de C_L en F_L . (b) Efecto de F_L en R_a .

1..12	1 n_{fc} [-]	2 d [m]	3 n_a [-]	4 p_a [Pa]
Run 1	2	0,05	26	33.715
Run 2	2	0,10	24	36.381
Run 3	2	0,15	24	36.381
Run 4	2	0,20	24	36.381
Run 5	3	0,05	16	25.465
Run 6	3	0,10	16	25.465
Run 7	3	0,15	16	25.465
Run 8	3	0,20	16	25.465
Run 9	4	0,05	14	19.246
Run 10	4	0,10	12	22.364
Run 11	4	0,15	12	22.364
Run 12	4	0,20	12	22.364

Tabla 11.9. Efecto de d en n_a y p_a .

1..10	1 h_1 [-]	2 h_2 [-]	3 \dot{m}_a [kg/s]	4 F_v [N]	5 P_v [W]
Run 1	5,00E-04	1,30E-04	2,09E-02	278,95	89.109
Run 2	5,22E-04	1,32E-04	2,13E-02	271,24	86.645
Run 3	5,44E-04	1,34E-04	2,16E-02	264,08	84.359
Run 4	5,67E-04	1,37E-04	2,20E-02	257,43	82.234
Run 5	5,89E-04	1,39E-04	2,23E-02	251,23	80.255
Run 6	6,11E-04	1,41E-04	2,27E-02	245,45	78.408
Run 7	6,33E-04	1,43E-04	2,31E-02	240,05	76.682
Run 8	6,56E-04	1,46E-04	2,34E-02	234,99	75.065
Run 9	6,78E-04	1,48E-04	2,38E-02	230,24	73.549
Run 10	7,00E-04	1,50E-04	2,41E-02	225,79	72.126

Tabla 11.10. Efecto de h_1 y h_2 en \dot{m}_a , F_v y P_v .

1..11	1 T_a [K]	2 μ_a [Pa·s]	3 \dot{m}_a [kg/s]	4 F_v [N]	5 P_v [W]
Run 1	380	2,24E-05	8,49E-02	137,19	43.824
Run 2	400	2,33E-05	8,09E-02	140,59	44.911
Run 3	420	2,41E-05	7,71E-02	143,62	45.877
Run 4	440	2,50E-05	7,38E-02	147,00	46.958
Run 5	460	2,57E-05	7,07E-02	149,64	47.802
Run 6	480	2,65E-05	6,78E-02	152,64	48.761
Run 7	500	2,73E-05	6,52E-02	155,64	49.718

Tabla 11.11. Efecto de T_a y $\mu_a(T_a)$ en \dot{m}_a , F_v y P_v . Valores de $\mu_a(T_a)$ obtenidos con la calculadora de la referencia [36].

1..16	1 n_{fc} [-]	2 c_a [m/s]	3 \dot{m}_a [kg/s]
Run 1	3	275	1,49E-01
Run 2	3	250	1,35E-01
Run 3	3	225	1,22E-01
Run 4	3	200	1,08E-01
Run 5	3	175	9,44E-02
Run 6	3	150	8,09E-02
Run 7	3	125	6,73E-02
Run 8	3	100	5,38E-02
Run 9	4	275	1,48E-01
Run 10	4	250	1,34E-01
Run 11	4	225	1,21E-01
Run 12	4	200	1,07E-01
Run 13	4	175	9,38E-02
Run 14	4	150	8,03E-02
Run 15	4	125	6,69E-02
Run 16	4	100	5,34E-02

Tabla 11.12. Impacto de n_{fc} y c_a en \dot{m}_a . $n_{fc} = 2$ no se ha empleado porque habría sido necesario un deslastre de carga.

1.21	1	2	3	4
	n_{fc} [-]	Δh_{bar} [m]	F_L [N]	R_a [N/m]
Run 1	2	1,00E-04	8.905,15	3,43E+06
Run 2	2	1,25E-04	8.905,15	2,74E+06
Run 3	2	1,50E-04	8.905,15	2,28E+06
Run 4	2	1,75E-04	8.905,15	1,96E+06
Run 5	2	2,00E-04	8.905,15	1,71E+06
Run 6	2	2,25E-04	8.905,15	1,52E+06
Run 7	2	2,50E-04	8.905,15	1,37E+06
Run 8	3	1,00E-04	8.250,46	5,16E+06
Run 9	3	1,25E-04	8.250,46	4,13E+06
Run 10	3	1,50E-04	8.250,46	3,44E+06
Run 11	3	1,75E-04	8.250,46	2,95E+06
Run 12	3	2,00E-04	8.250,46	2,58E+06
Run 13	3	2,25E-04	8.250,46	2,29E+06
Run 14	3	2,50E-04	8.250,46	2,06E+06
Run 15	4	1,00E-04	8.195,26	5,85E+06
Run 16	4	1,25E-04	8.195,26	4,68E+06
Run 17	4	1,50E-04	8.195,26	3,90E+06
Run 18	4	1,75E-04	8.195,26	3,35E+06
Run 19	4	2,00E-04	8.195,26	2,93E+06
Run 20	4	2,25E-04	8.195,26	2,60E+06
Run 21	4	2,50E-04	8.195,26	2,34E+06

Tabla 11.13. Efecto de $\Delta \bar{h}$ en R_a según n_{fc} (que determina F_L).

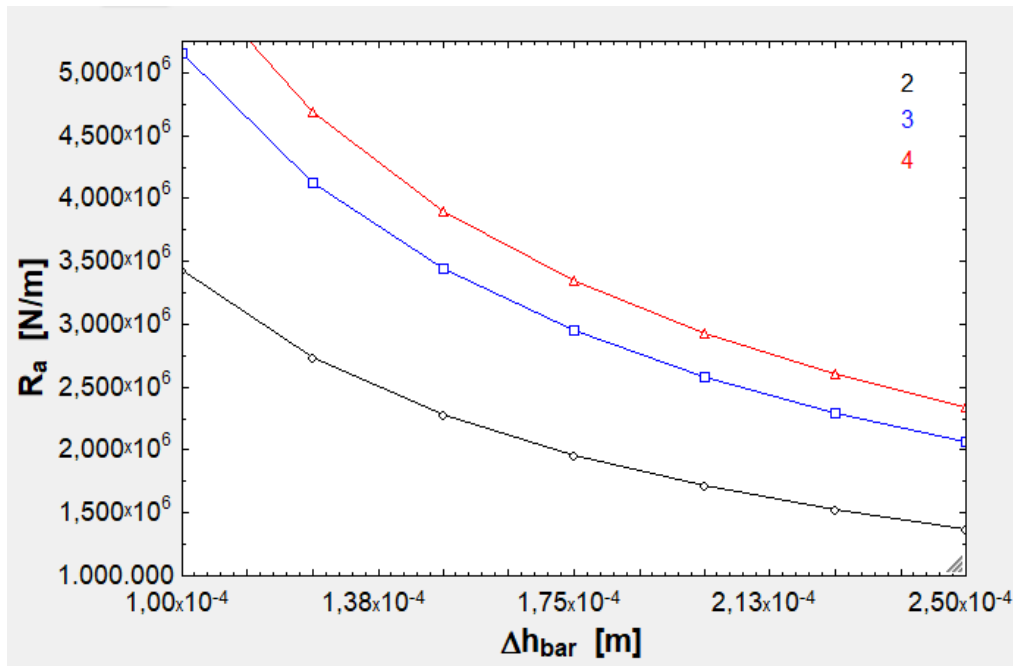


Fig. 11.10. Variación de R_a con $\Delta \bar{h}$.

1..15	1 n_{fc} [-]	2 L [m]	3 S [m ²]	4 n_a [-]
Run 1	2	1,00	5,18	26
Run 2	2	1,25	4,98	20
Run 3	2	1,50	5,38	18
Run 4	2	1,75	5,58	16
Run 5	2	2,00	5,58	14
Run 6	3	1,00	7,19	18
Run 7	3	1,25	7,99	16
Run 8	3	1,50	7,19	12
Run 9	3	1,75	8,38	12
Run 10	3	2,00	7,99	10
Run 11	4	1,00	9,59	16
Run 12	4	1,25	10,49	14
Run 13	4	1,50	10,79	12
Run 14	4	1,75	10,49	10
Run 15	4	2,00	9,59	8

Tabla 11.14 Influencia de L y n_{fc} en S y n_a . $n_{caj} = 112$ porque ha sido necesario el deslastre.

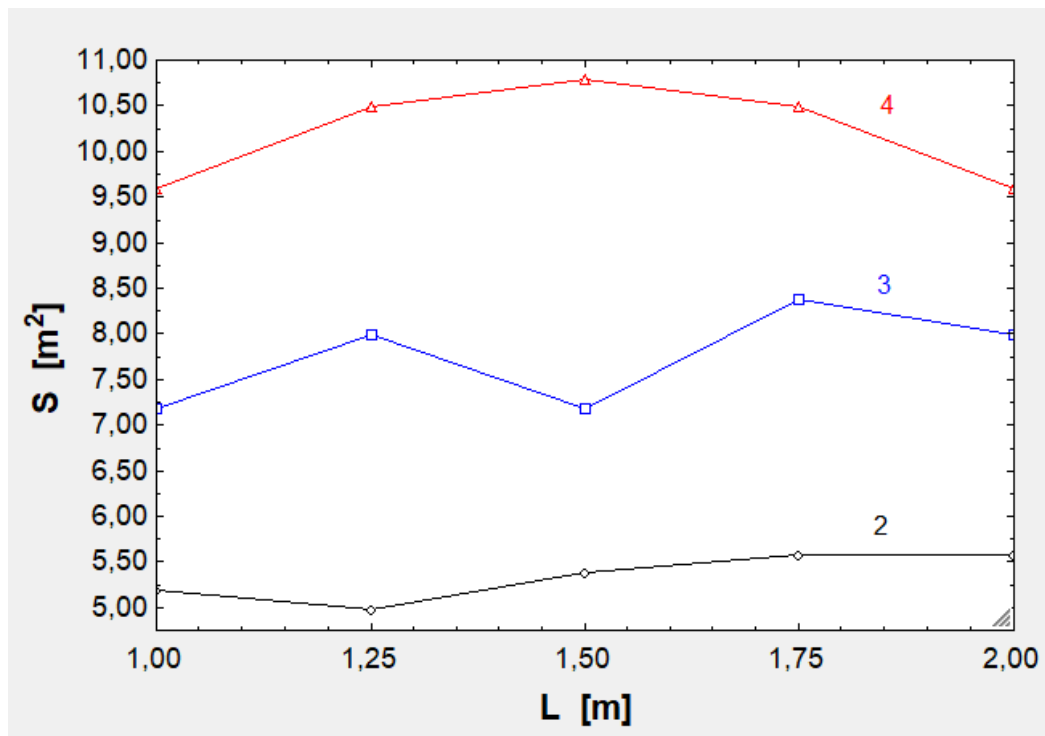


Fig 11.11. Interrelación entre S y L .

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	n_{fc} [-]	n_{caj} [-]	n_a [-]	$p_{a,S}$ [Pa]	S [m ²]	$\dot{m}_{C,1}$ [kg/s]	\dot{m}_a [kg/s]	\dot{m}_{tob} [kg/s]	L_c [m]	m_{tot} [kg]
Run 1	2	100	16	23.864	4,78	0,11	4,97E-02	0,06	13,26	10.493
Run 2	2	125	18	24.457	5,38	0,11	5,73E-02	0,06	15,01	12.098
Run 3	2	150	20	24.861	5,98	0,11	6,48E-02	0,05	16,51	13.664
Run 4	2	175	22	25.191	6,58	0,11	7,22E-02	0,04	18,01	15.230
Run 5	2	200	24	25.466	7,18	0,11	7,96E-02	0,03	19,51	16.796
Run 6	2	212	26	24.614	7,77	0,11	8,33E-02	0,03	20,26	17.587
Run 7	3	250	18	18.658	10,78	0,24	8,76E-02	0,15	14,01	18.485
Run 8	3	300	20	19.359	11,98	0,24	1,01E-01	0,14	15,51	21.311
Run 9	3	350	22	19.901	13,18	0,24	1,14E-01	0,13	16,76	24.098
Run 10	3	400	22	22.183	13,18	0,24	1,27E-01	0,11	18,26	26.863
Run 11	3	450	24	22.445	14,37	0,24	1,41E-01	0,10	19,51	29.650
Run 12	3	500	26	22.694	15,57	0,24	1,54E-01	0,09	21,01	32.477
Run 13	3	550	28	22.906	16,77	0,24	1,67E-01	0,07	22,51	35.303
Run 14	3	600	30	23.068	17,97	0,24	1,81E-01	0,06	23,76	38.091
Run 15	3	650	32	23.231	19,16	0,24	1,94E-01	0,05	25,26	40.917
Run 16	3	654	32	23.346	19,16	0,24	1,95E-01	0,05	25,26	41.120
Run 17	4	700	22	23.285	19,77	0,42	2,01E-01	0,22	18,01	42.316
Run 18	4	1.000	28	25.257	25,17	0,42	2,77E-01	0,14	22,76	58.417
Run 19	4	1.300	34	26.533	30,56	0,42	3,53E-01	0,06	27,51	74.519
Run 20	4	1.327	34	27.034	30,56	0,42	3,60E-01	0,06	27,76	75.927

Tabla 11.15. Evolución de n_a , $p_{a,S}$, S , $\dot{m}_{C,1}$, \dot{m}_a , \dot{m}_{tob} , L_c y m_{tot} en función de n_{caj} y n_{fc} .

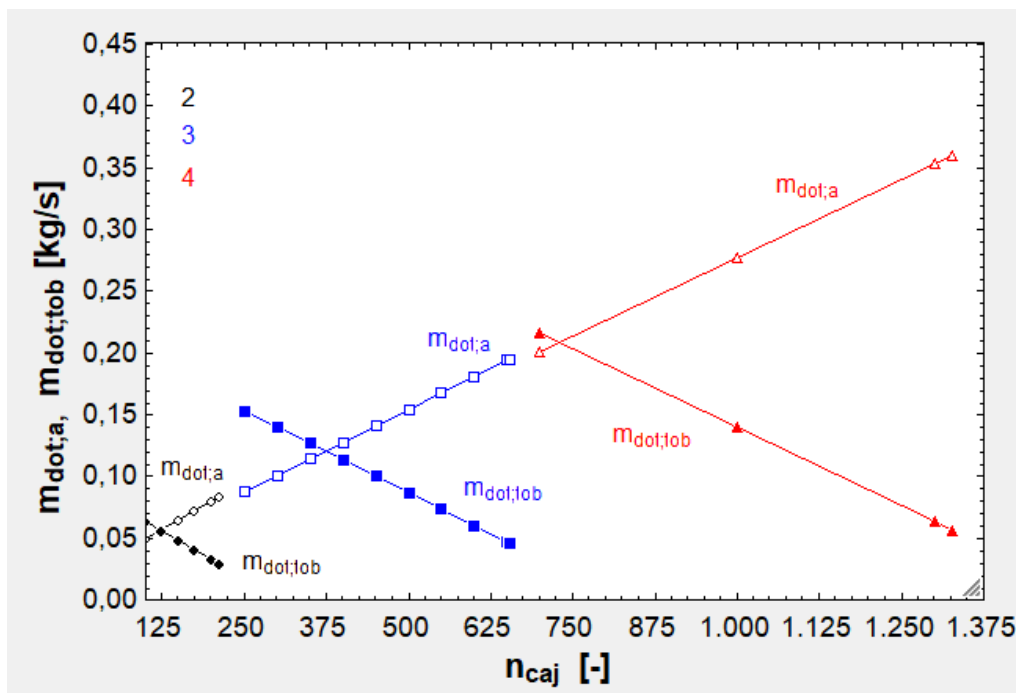


Fig. 11.12. Evolución de \dot{m}_a y \dot{m}_{tob} según n_{caj} .

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
	n_{fc} [-]	m_{pzs} [kg]	n_{caj} [-]	n_a [-]	$p_a; S$ [Pa]	S [m ²]	$\dot{m}_{c;1}$ [kg/s]	\dot{m}_a [kg/s]	\dot{m}_{tot} [kg/s]	L_c [m]	m_{tot} [kg]
Run 1	2	60	194	24	27.930	7,18	0,11	0,09	0,03	19,26	18.420
Run 2	2	50	212	26	24.614	7,77	0,11	0,08	0,03	20,26	17.587
Run 3	2	40	226	26	22.619	7,77	0,11	0,08	0,04	21,26	16.161
Run 4	3	60	576	28	27.601	16,77	0,24	0,20	0,04	23,01	42.538
Run 5	3	50	654	32	23.346	19,16	0,24	0,19	0,05	25,26	41.120
Run 6	3	40	749	36	19.628	21,56	0,24	0,18	0,06	28,01	38.894
Run 7	4	60	1.152	32	29.607	28,76	0,42	0,37	0,05	25,01	78.261
Run 8	4	50	1.327	34	27.034	30,56	0,42	0,36	0,06	27,76	75.927
Run 9	4	40	1.563	40	22.028	35,95	0,42	0,34	0,07	31,51	72.786

Tabla 11.16. Variación de las mismas variables en función de n_{fc} , m_{pzs} y n_{caj} .

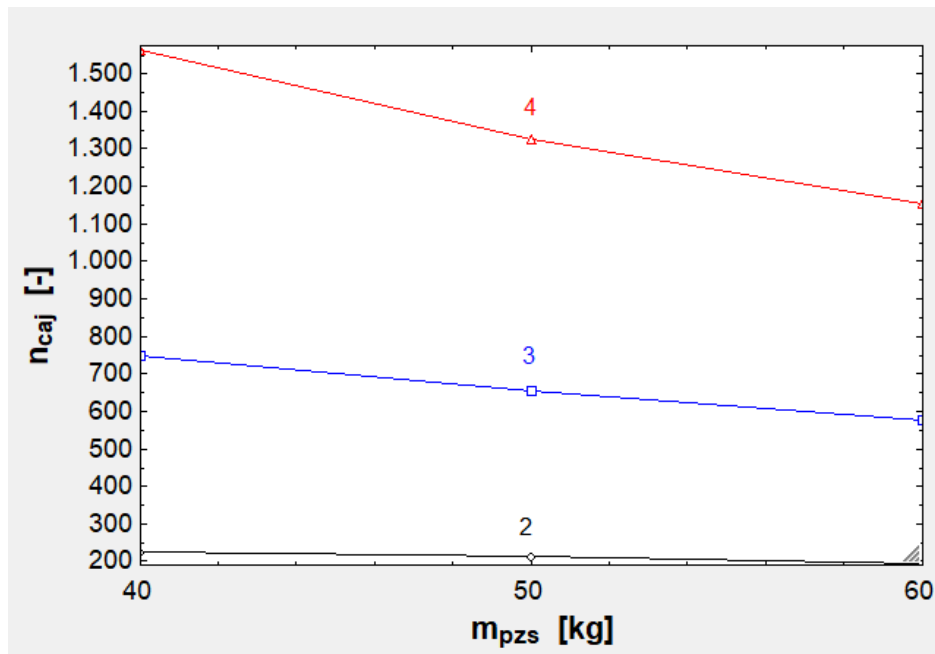


Fig. 11.13. Variación de n_{caj} según m_{pzs} .

En la figura [11.6], parte (a) se observa cómo w tiene un valor elevado para $D_c = 1,20$ m ($n_{fc} = 4$). En este caso hay menos rodamientos que los anteriores, pero disponen de una gran anchura, por lo que su área crece enormemente y la presión disminuye de la misma manera (parte (b)), reduciéndose a más de la mitad entre el caso inicial y el final. También se ve que \dot{m}_a es prácticamente constante. En la gráfica [11.7] se ve cómo para η_a bajo y Δp_a alta se dispara p_a , llegando a más de 60 kPa. Las malas condiciones afectan mucho a la cápsula más pequeña, ya que es en esta donde w tiene un valor bajo y S también, a pesar de tener unos pocos cojinetes más. En el gráfico [11.8], parte (a) se ve que la relación entre F_L y C_L es prácticamente lineal, aunque no es exactamente así porque también existe una cierta variación de p_{as} y F_L depende de ella a través de ρ_{as} . En la parte (b) sí se ve una relación lineal entre R_a y F_L , como era de esperar. Respecto a las tablas [11.9], [11.10] y [11.11], en la primera se ve que el parámetro d modifica muy poco n_a y p_a , ya que es pequeño frente a L . En

la segunda se observa que tanto h_1 cuanto h_2 tienen una influencia muy pequeña en \dot{m}_a , F_v y P_v . En la [11.11] se ve cómo T_a sí tiene una determinada influencia sobre \dot{m}_a , pero despreciable sobre F_v y P_v . En cuanto a la [11.12], aquí se puede notar cómo va disminuyendo \dot{m}_a conforme lo hace c_a . Por otro lado, en la gráfica [11.10] se ve la disminución de R_a con $\Delta \bar{h}$. Después, en el gráfico [11.11] se percibe cómo la L que optimiza S va bajando a medida que sube D_c , lo cual es debido al aumento de w provocado. En la tabla [11.15] se puede leer el n_{caj} máximo para cada disposición: 212, 654 y 1.327 cajas, respectivamente. Al colocar una caja más no converge el EES porque $\dot{m}_{tob} \approx 0$ y el programa falla al calcular los parámetros de la tobera. Tampoco tiene sentido tener $\dot{m}_{tob} \approx 0$ porque entonces la tobera no proporciona prácticamente empuje y está desaprovechada. Además, viendo la gráfica [11.12] se colige algo muy importante: \dot{m}_a es proporcional a n_{caj} . Esto sucede a través de F_a y p_a . Finalmente, en la figura [11.13] se ve la dependencia entre n_{caj} y m_{pzs} . Nuevamente es la tercera disposición la más flexible, la que permite mayor variación de n_{caj} al alterar m_{pzs} .

11.1.4. Compresores y baterías

Se parte de los valores definidos en subpartados previos. Se simula a 1.150 km/h y con $L_t = 200$ km de nuevo.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	n_{fc} [-]	$\eta_{C,1}$ [-]	$\eta_{C,2}$ [-]	T_1 [K]	T_3 [K]	$P_{C,1}$ [W]	$\bar{P}_{C,1}$ [W]	$P_{C,2}$ [W]	$m_{bat,tot}$ [kg]
Run 1	2	0,50	0,50	1.034,44	996,57	89.587	87.317	59.696	257,66
Run 2	2	0,55	0,55	972,70	937,28	81.659	79.589	54.153	234,40
Run 3	2	0,60	0,60	920,50	887,34	75.023	73.122	49.553	215,00
Run 4	2	0,65	0,65	875,79	844,66	69.387	67.629	45.674	198,58
Run 5	2	0,70	0,70	837,03	807,78	64.540	62.905	42.358	184,49
Run 6	2	0,75	0,75	803,13	775,58	60.327	58.798	39.491	172,27
Run 7	2	0,80	0,80	773,20	747,22	56.631	55.196	36.988	161,56
Run 8	2	0,85	0,85	746,59	722,05	53.362	52.009	34.783	152,11
Run 9	3	0,50	0,50	1.034,44	888,04	190.806	185.970	46.943	408,21
Run 10	3	0,55	0,55	972,70	836,63	173.920	169.511	42.423	371,44
Run 11	3	0,60	0,60	920,50	793,49	159.787	155.737	38.694	340,77
Run 12	3	0,65	0,65	875,79	756,76	147.784	144.038	35.567	314,78
Run 13	3	0,70	0,70	837,03	725,11	137.460	133.976	32.906	292,48
Run 14	3	0,75	0,75	803,13	697,56	128.487	125.230	30.614	273,14
Run 15	3	0,80	0,80	773,20	673,36	120.615	117.558	28.620	256,20
Run 16	3	0,85	0,85	746,59	651,93	113.652	110.771	26.870	241,24
Run 17	4	0,50	0,50	1.034,44	852,27	329.838	321.478	43.850	640,29
Run 18	4	0,55	0,55	972,70	802,94	300.647	293.027	39.442	582,70
Run 19	4	0,60	0,60	920,50	761,69	276.217	269.216	35.833	534,64
Run 20	4	0,65	0,65	875,79	726,66	255.467	248.992	32.824	493,92
Run 21	4	0,70	0,70	837,03	696,57	237.622	231.599	30.279	458,98
Run 22	4	0,75	0,75	803,13	670,42	222.110	216.481	28.097	428,66
Run 23	4	0,80	0,80	773,20	647,51	208.502	203.217	26.207	402,10
Run 24	4	0,85	0,85	746,59	627,25	196.465	191.486	24.555	378,64

Tabla 11.17. Influencia de η_{C_1} y η_{C_2} en T_1 , T_3 , P_{C_1} , \bar{P}_{C_1} , P_{C_2} y $m_{bat,tot}$.

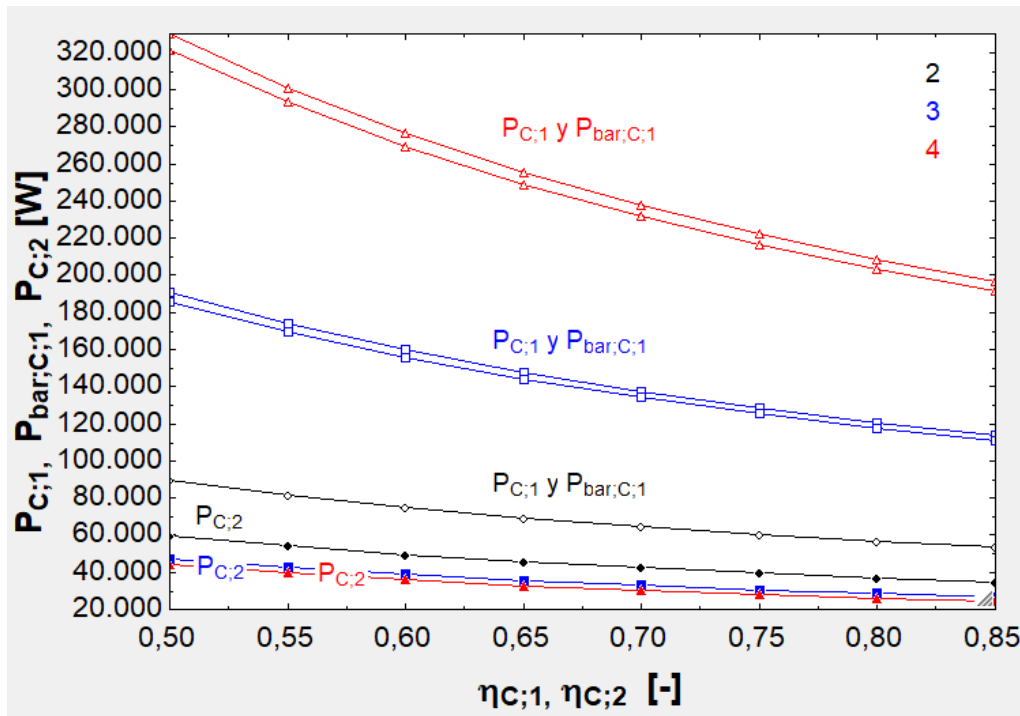


Fig. 11.14. Efecto de η_{C_1} y η_{C_2} en P_{C_1} , \bar{P}_{C_1} y P_{C_2} .

1.23	1	2	3	4	5	6	7	8
	n_{fc} [-]	P_1 [Pa]	$P_{C;1}$ [W]	T_1 [K]	$P_{C;2}$ [W]	T_3 [K]	$m_{bat,tot}$ [kg]	
Run 1	2	1.000	42.601	658,08	57.676	981,17	173,86	
Run 2	2	2.000	61.344	811,33	42.160	805,87	178,68	
Run 3	2	3.000	73.852	911,24	34.229	713,85	186,15	
Run 4	3	1.000	90.734	658,08	45.729	886,51	235,14	
Run 5	3	2.000	130.652	811,33	32.782	724,23	280,64	
Run 6	3	3.000	157.292	911,24	26.155	639,54	314,53	
Run 7	3	4.000	177.765	986,82	21.839	583,88	341,94	
Run 8	3	5.000	194.581	1.048,16	18.697	543,15	365,15	
Run 9	3	6.000	208.945	1.100,07	16.256	511,42	385,41	
Run 10	3	7.000	221.540	1.145,22	14.278	485,65	403,46	
Run 11	3	8.000	232.790	1.185,29	12.625	464,09	419,78	
Run 12	3	9.000	242.980	1.221,38	11.211	445,66	434,71	
Run 13	3	10.000	252.311	1.254,26	9.982	429,62	448,50	
Run 14	4	1.000	156.847	658,08	42.087	852,20	341,69	
Run 15	4	2.000	225.853	811,33	30.138	695,86	438,63	
Run 16	4	3.000	271.904	911,24	23.986	614,45	506,51	
Run 17	4	4.000	307.295	986,82	19.958	560,99	559,90	
Run 18	4	5.000	336.363	1.048,16	17.014	521,91	604,40	
Run 19	4	6.000	361.195	1.100,07	14.718	491,48	642,79	
Run 20	4	7.000	382.967	1.145,22	12.850	466,77	676,71	
Run 21	4	8.000	402.414	1.185,29	11.284	446,11	707,19	
Run 22	4	9.000	420.030	1.221,38	9.942	428,44	734,92	
Run 23	4	10.000	436.160	1.254,26	8.771	413,07	760,43	

Tabla 11.18. Influencia de p_1 en las variables anteriores (excepto \bar{P}_{C_1} , que es similar a P_{C_1})

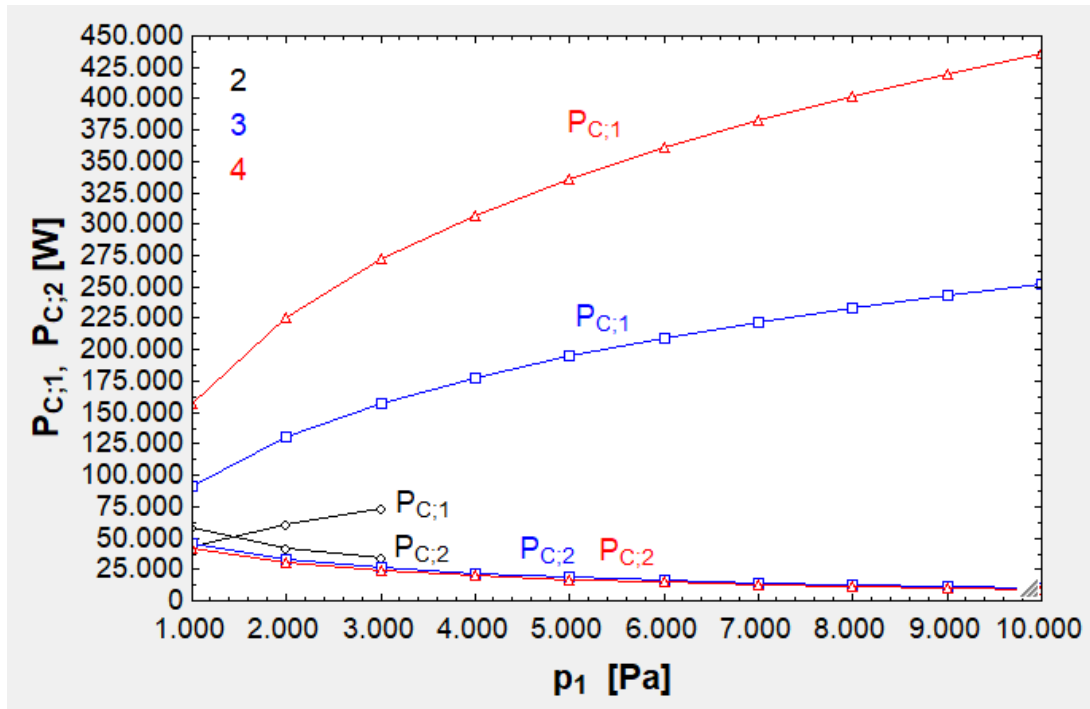


Fig. 11.15. Influencia de p_1 en P_{C_1} y P_{C_2} .

1..27	1 n_{fc} [-]	2 T_2 [K]	3 $P_{C;1}$ [W]	4 $P_{C;2}$ [W]	5 $m_{bat,tot}$ [kg]
Run 1	2	300	62.786	41.163	179,40
Run 2	2	325	62.786	44.491	185,23
Run 3	2	350	62.786	47.804	191,04
Run 4	2	375	62.786	51.105	196,82
Run 5	2	400	62.786	54.394	202,58
Run 6	2	425	62.786	57.671	208,33
Run 7	2	450	62.786	60.940	214,06
Run 8	2	475	62.786	64.200	219,77
Run 9	2	500	62.786	67.452	225,47
Run 10	3	300	133.725	31.949	284,43
Run 11	3	325	133.725	34.526	288,94
Run 12	3	350	133.725	37.091	293,44
Run 13	3	375	133.725	39.643	297,91
Run 14	3	400	133.725	42.183	302,36
Run 15	3	425	133.725	44.712	306,79
Run 16	3	450	133.725	47.230	311,21
Run 17	3	475	133.725	49.739	315,60
Run 18	3	500	133.725	52.238	319,98
Run 19	4	300	231.164	29.367	446,35
Run 20	4	325	231.164	31.713	450,46
Run 21	4	350	231.164	34.042	454,54
Run 22	4	375	231.164	36.357	458,60
Run 23	4	400	231.164	38.657	462,63
Run 24	4	425	231.164	40.943	466,64
Run 25	4	450	231.164	43.214	470,62
Run 26	4	475	231.164	45.473	474,57
Run 27	4	500	231.164	47.718	478,51

Tabla 11.19. Impacto de T_2 en P_{C_2} y $m_{bat,tot}$. P_{C_1} de consulta.

1.21	1	2	3
	η_{fc} [-]	η_{mot} [-]	$m_{bat,tot}$ [kg]
Run 1	2	0,65	249,02
Run 2	2	0,70	231,08
Run 3	2	0,75	215,56
Run 4	2	0,80	201,98
Run 5	2	0,85	190,02
Run 6	2	0,90	179,40
Run 7	2	0,95	169,90
Run 8	3	0,65	394,67
Run 9	3	0,70	366,27
Run 10	3	0,75	341,69
Run 11	3	0,80	320,20
Run 12	3	0,85	301,26
Run 13	3	0,90	284,43
Run 14	3	0,95	269,38
Run 15	4	0,65	619,28
Run 16	4	0,70	574,74
Run 17	4	0,75	536,18
Run 18	4	0,80	502,47
Run 19	4	0,85	472,75
Run 20	4	0,90	446,35
Run 21	4	0,95	422,74

Tabla 11.20. Impacto de η_{mot} en $m_{bat,tot}$.

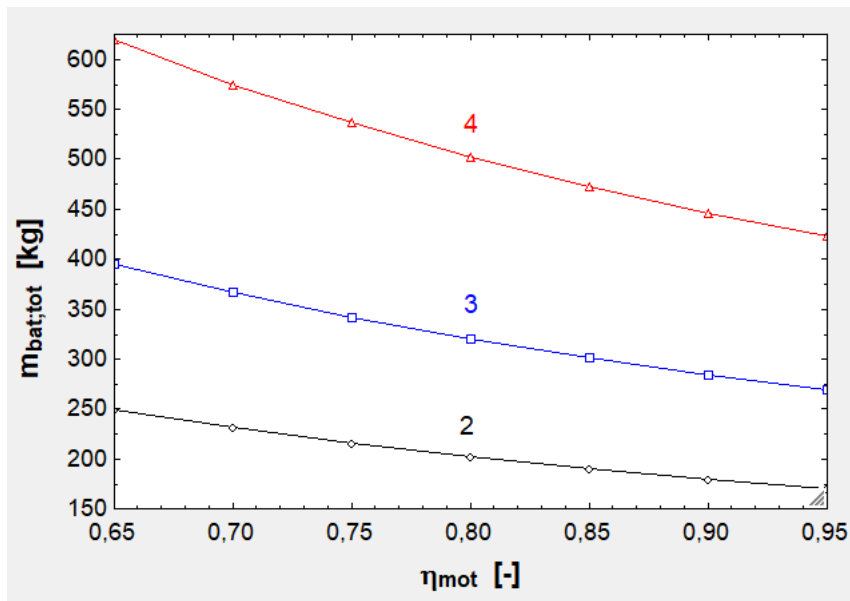


Fig. 11.16. Interrelación entre η_{mot} y $m_{bat,tot}$.

1..21	n_{fc} [-]	C [%]	$m_{bat,tot}$ [kg]
Run 1	2	15	151,54
Run 2	2	20	158,17
Run 3	2	25	164,80
Run 4	2	30	171,43
Run 5	2	35	178,07
Run 6	2	40	184,71
Run 7	2	45	191,35
Run 8	3	15	240,30
Run 9	3	20	250,80
Run 10	3	25	261,30
Run 11	3	30	271,81
Run 12	3	35	282,32
Run 13	3	40	292,84
Run 14	3	45	303,36
Run 15	4	15	377,12
Run 16	4	20	393,59
Run 17	4	25	410,07
Run 18	4	30	426,56
Run 19	4	35	443,05
Run 20	4	40	459,55
Run 21	4	45	476,05

Tabla 11. 21. Impacto de C en $m_{bat,tot}$.

1.21	1 n_{fc} [-]	2 τ_2 [%]	3 $m_{bat,tot}$ [kg]
Run 1	2	15	158,58
Run 2	2	20	165,51
Run 3	2	25	172,45
Run 4	2	30	179,40
Run 5	2	35	186,34
Run 6	2	40	193,29
Run 7	2	45	200,25
Run 8	3	15	251,45
Run 9	3	20	262,43
Run 10	3	25	273,43
Run 11	3	30	284,43
Run 12	3	35	295,43
Run 13	3	40	306,44
Run 14	3	45	317,45
Run 15	4	15	394,61
Run 16	4	20	411,85
Run 17	4	25	429,09
Run 18	4	30	446,35
Run 19	4	35	463,61
Run 20	4	40	480,88
Run 21	4	45	498,15

Tabla 11.22. Impacto de τ_2 en $m_{bat,tot}$.

1.21	1 n_{fc} [-]	2 e_{bat} [Wh/kg]	3 $m_{bat,tot}$ [kg]
Run 1	2	100	361,15
Run 2	2	125	288,16
Run 3	2	150	239,72
Run 4	2	175	205,21
Run 5	2	200	179,40
Run 6	2	225	159,35
Run 7	2	250	143,33
Run 8	3	100	572,06
Run 9	3	125	456,61
Run 10	3	150	379,94
Run 11	3	175	325,32
Run 12	3	200	284,43
Run 13	3	225	252,67
Run 14	3	250	227,29
Run 15	4	100	897,45
Run 16	4	125	716,43
Run 17	4	150	596,18
Run 18	4	175	510,50
Run 19	4	200	446,35
Run 20	4	225	396,52
Run 21	4	250	356,70

Tabla 11.23. Impacto de e_{bat} en $m_{bat,tot}$.

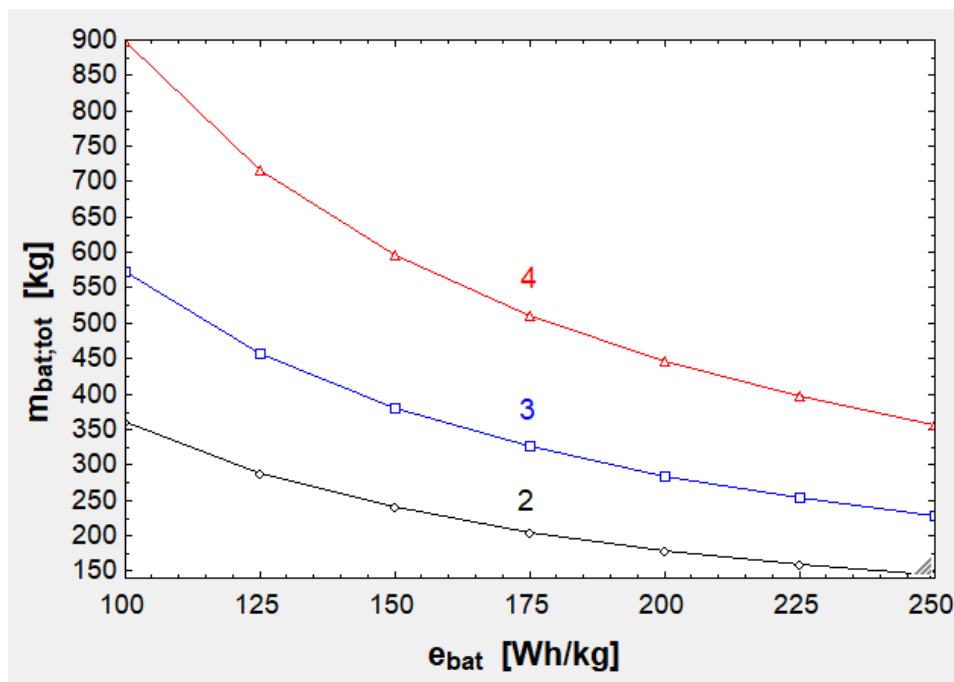


Fig 11.17. Impacto de e_{bat} en $m_{bat,tot}$.

Primero de todo, en la gráfica [11.14] se ve cómo η_{C_1} y η_{C_2} afectan en gran medida al caso de $n_{fc} = 4$ y, en menor medida, al de $n_{fc} = 3$. Estos dos casos presentan una P_{C_2} semejante porque p_a también lo es. En el caso de $n_{fc} = 1$ la influencia es mucho menor porque los flujos que trasiegan son menores. También es notable que P_{C_1} y \bar{P}_{C_1} son prácticamente iguales en los tres casos, lo cual obedece a que la aceleración y deceleración es muy grande (de 2 g). En cuanto a la gráfica [11.15], se ve que con $n_{fc} = 1$ se da una p_1 óptima en torno a 1.500 Pa, no siendo así en los otros dos casos (estaría por debajo de 1.000 Pa, pero entonces a la tobera le llegaría poca presión). Con 2 filas de cajas el programa no converge cuando p_1 es 4.000 Pa o superior debido a que Δp_{tub} supera a p_1 . En la tabla [11.19] se observa que T_2 es poco influyente, aunque en la primera disposición tiene más influencia porque p_a es grande. En la figura [11.16] es apreciable que el impacto de η_{mot} es grande en la tercera disposición porque los consumos son los mayores. Por otra parte, en las tablas [11.21] y [11.12] se lee que los parámetros C y τ_2 apenas influyen en m_{tot} , variando 100 kg cuando $n_{fc} = 4$. Finalmente, en la figura [11.17] es visible el enorme impacto de e_{bat} cuando $n_{fc} = 4$.

11.1.5. Tobera y tubería

Como datos iniciales se toman los anteriores. Además, se considera $c_{tub} = \nu$, $p_e = p_t$, $\mu_{tub} = 1,83 \cdot 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ (valor a 300 K, [36]) y $\varepsilon_{tub} = 2,40 \cdot 10^{-6} \text{ m}$ (valor para los tubos estirados de acero, [39]).

1.23	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	n_{fc} [-]	p_1 [Pa]	Δp_{tub} [Pa]	P_{tob} [Pa]	D_{tub} [m]	\dot{m}_{tob} [kg/s]	F_{tob} [N]	P_{tob} [W]	
Run 1	2	1.000	792,33	207,67	0,14	0,03	10,70	3.419	
Run 2	2	2.000	1.805,30	194,70	0,10	0,03	10,48	3.347	
Run 3	2	3.000	2.906,25	93,75	0,09	0,03	7,16	2.288	
Run 4	3	1.000	252,28	747,72	0,26	0,17	68,66	21.932	
Run 5	3	2.000	630,52	1.369,48	0,18	0,17	73,17	23.373	
Run 6	3	3.000	1.073,91	1.926,09	0,15	0,17	75,21	24.025	
Run 7	3	4.000	1.564,30	2.435,70	0,13	0,17	76,44	24.418	
Run 8	3	5.000	2.092,08	2.907,92	0,12	0,17	77,28	24.685	
Run 9	3	6.000	2.651,13	3.348,87	0,11	0,17	77,89	24.882	
Run 10	3	7.000	3.237,19	3.762,81	0,10	0,17	78,36	25.033	
Run 11	3	8.000	3.847,11	4.152,89	0,10	0,17	78,74	25.154	
Run 12	3	9.000	4.478,42	4.521,58	0,09	0,16	79,05	25.252	
Run 13	3	10.000	5.129,16	4.870,84	0,09	0,16	79,31	25.334	
Run 14	4	1.000	117,79	882,21	0,35	0,34	144,31	46.100	
Run 15	4	2.000	303,15	1.696,85	0,25	0,34	153,60	49.067	
Run 16	4	3.000	526,58	2.473,42	0,21	0,34	157,87	50.430	
Run 17	4	4.000	778,76	3.221,24	0,18	0,34	160,46	51.259	
Run 18	4	5.000	1.054,61	3.945,39	0,16	0,34	162,26	51.832	
Run 19	4	6.000	1.350,83	4.649,17	0,15	0,34	163,59	52.259	
Run 20	4	7.000	1.665,09	5.334,91	0,14	0,34	164,64	52.592	
Run 21	4	8.000	1.995,61	6.004,39	0,13	0,34	165,48	52.862	
Run 22	4	9.000	2.340,99	6.659,01	0,12	0,34	166,18	53.085	
Run 23	4	10.000	2.700,11	7.299,89	0,12	0,34	166,77	53.274	

Tabla 11.24. Impacto de p_1 en Δp_{tub} , p_{tob} , D_{tub} , F_{tob} y $P_{tob} \cdot \dot{m}_{tob}$ de consulta.

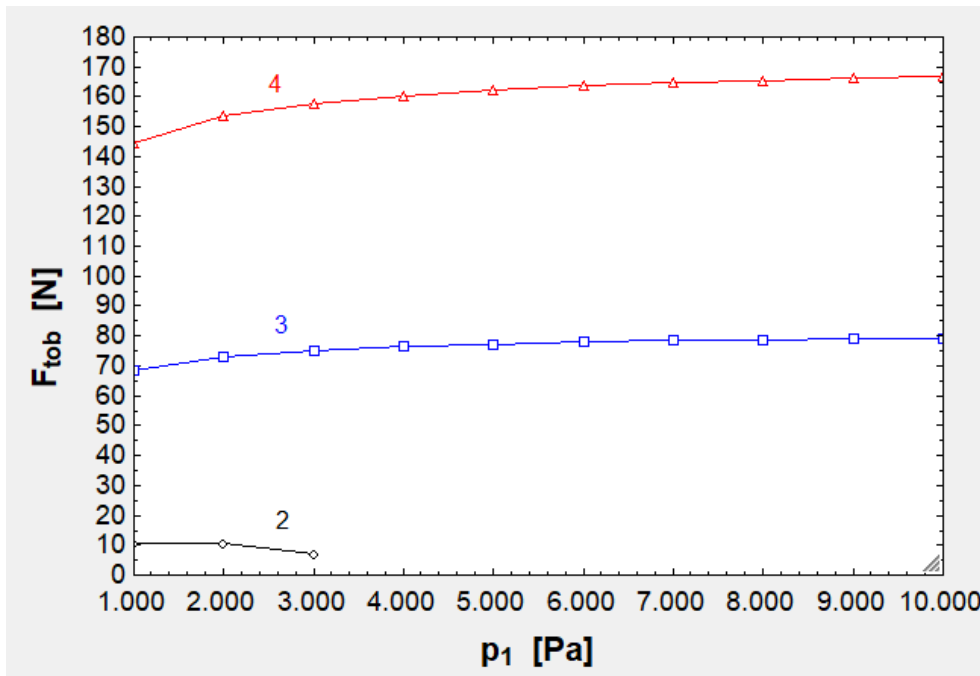


Fig. 11.18. Relación entre p_1 y F_{tob} .

1.27	n_{fc} [-]	T_2 [K]	μ_{tub} [Pa·s]	Δp_{tub} [Pa]	p_{tob} [Pa]	D_{tub} [m]	\dot{m}_{tob} [kg/s]	F_{tob} [N]	P_{tob} [W]
Run 1	2	300	1,83E-05	1.912,18	187,82	0,10	0,03	10,35	3.307
Run 2	2	325	1,99E-05	1.833,26	266,74	0,10	0,03	11,71	3.739
Run 3	2	350	2,10E-05	1.755,62	344,38	0,10	0,03	12,71	4.059
Run 4	2	375	2,22E-05	1.685,21	414,79	0,11	0,03	13,49	4.310
Run 5	2	400	2,33E-05	1.619,31	480,69	0,11	0,03	14,17	4.527
Run 6	2	425	2,43E-05	1.557,44	542,56	0,11	0,03	14,78	4.721
Run 7	2	450	2,53E-05	1.500,07	599,93	0,11	0,03	15,33	4.898
Run 8	2	475	2,63E-05	1.446,74	653,26	0,11	0,03	15,85	5.062
Run 9	2	500	2,73E-05	1.397,05	702,95	0,12	0,03	16,33	5.217
Run 10	3	300	1,83E-05	672,33	1.427,67	0,18	0,17	73,43	23.458
Run 11	3	325	1,99E-05	623,96	1.476,04	0,19	0,17	75,91	24.250
Run 12	3	350	2,10E-05	579,31	1.520,69	0,19	0,17	78,33	25.021
Run 13	3	375	2,22E-05	540,69	1.559,31	0,20	0,17	80,66	25.768
Run 14	3	400	2,33E-05	506,21	1.593,79	0,20	0,17	82,94	26.494
Run 15	3	425	2,43E-05	475,23	1.624,77	0,21	0,17	85,16	27.203
Run 16	3	450	2,53E-05	447,61	1.652,39	0,21	0,17	87,32	27.894
Run 17	3	475	2,63E-05	422,83	1.677,17	0,22	0,17	89,43	28.569
Run 18	3	500	2,73E-05	400,50	1.699,50	0,22	0,17	91,50	29.230
Run 19	4	300	1,83E-05	323,99	1.776,01	0,25	0,34	154,16	49.244
Run 20	4	325	1,99E-05	297,45	1.802,55	0,26	0,34	159,16	50.842
Run 21	4	350	2,10E-05	273,49	1.826,51	0,26	0,34	164,03	52.397
Run 22	4	375	2,22E-05	253,09	1.846,91	0,27	0,34	168,76	53.909
Run 23	4	400	2,33E-05	235,15	1.864,85	0,28	0,34	173,38	55.384
Run 24	4	425	2,43E-05	219,26	1.880,74	0,29	0,34	177,89	56.825
Run 25	4	450	2,53E-05	205,24	1.894,76	0,30	0,34	182,29	58.233
Run 26	4	475	2,63E-05	192,80	1.907,20	0,30	0,34	186,61	59.611
Run 27	4	500	2,73E-05	181,69	1.918,31	0,31	0,34	190,84	60.962

Tabla 11.25. Efecto de T_2 en las variables anteriores. Valores de μ_{tub} (T_2) extraídos de la referencia [36].

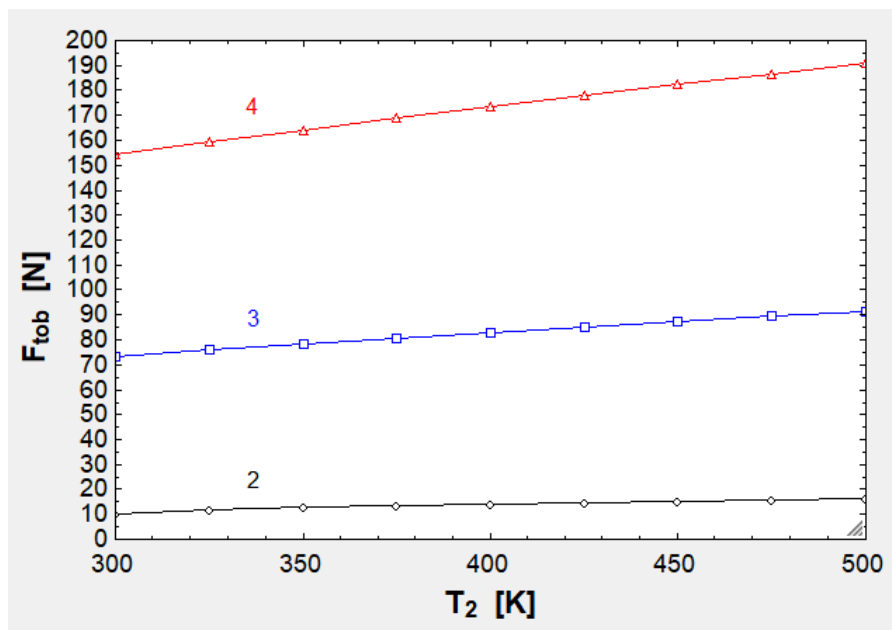


Fig. 11.19. Dependencia de F_{tob} con T_2 .

1.21	n_{fc} [-]	c_{tub} [m/s]	Δp_{tub} [Pa]	P_{tob} [Pa]	D_{tub} [m]	\dot{m}_{tob} [kg/s]	F_{tob} [N]	P_{tob} [W]
Run 1	2	200	997,72	1.102,28	0,11	0,03	13,14	4.196
Run 2	2	220	1.163,33	936,67	0,10	0,03	13,04	4.166
Run 3	2	240	1.326,20	773,80	0,10	0,03	12,90	4.120
Run 4	2	260	1.484,14	615,86	0,10	0,03	12,67	4.048
Run 5	2	280	1.635,63	464,37	0,10	0,03	12,31	3.932
Run 6	2	300	1.779,70	320,30	0,10	0,03	11,67	3.728
Run 7	2	320	1.915,85	184,15	0,10	0,03	10,29	3.287
Run 8	3	200	255,93	1.844,07	0,22	0,17	69,13	22.082
Run 9	3	220	314,84	1.785,16	0,21	0,17	69,75	22.280
Run 10	3	240	378,88	1.721,12	0,20	0,17	70,41	22.493
Run 11	3	260	447,48	1.652,52	0,19	0,17	71,12	22.718
Run 12	3	280	520,05	1.579,95	0,19	0,17	71,86	22.956
Run 13	3	300	595,95	1.504,05	0,18	0,17	72,64	23.206
Run 14	3	320	674,55	1.425,45	0,18	0,17	73,46	23.465
Run 15	4	200	113,41	1.986,59	0,30	0,34	143,37	45.800
Run 16	4	220	141,18	1.958,82	0,29	0,34	144,90	46.287
Run 17	4	240	172,10	1.927,90	0,28	0,34	146,54	46.812
Run 18	4	260	206,09	1.893,91	0,27	0,34	148,30	47.374
Run 19	4	280	243,03	1.856,97	0,26	0,34	150,17	47.971
Run 20	4	300	282,79	1.817,21	0,25	0,34	152,14	48.601
Run 21	4	320	325,20	1.774,80	0,25	0,34	154,22	49.263

Tabla 11.26. Efecto de c_{tub} en las mismas variables.

1.21	n_{fc} [-]	ϵ_{tub} [m]	Δp_{tub} [Pa]	P_{tob} [Pa]	D_{tub} [m]	\dot{m}_{tob} [kg/s]	F_{tob} [N]	P_{tob} [W]
Run 1	2	1,50E-06	1.910,44	189,56	0,10	0,03	10,38	3.317
Run 2	2	1,00E-05	1.926,31	173,69	0,10	0,03	10,07	3.217
Run 3	2	2,40E-06	1.912,18	187,82	0,10	0,03	10,35	3.307
Run 4	2	3,00E-06	1.913,33	186,67	0,10	0,03	10,33	3.300
Run 5	2	6,00E-05	2.001,46	98,54	0,10	0,03	7,47	2.387
Run 6	3	1,50E-06	670,92	1.429,08	0,18	0,17	73,44	23.460
Run 7	3	1,00E-05	683,73	1.416,27	0,18	0,17	73,38	23.441
Run 8	3	2,40E-06	672,33	1.427,67	0,18	0,17	73,43	23.458
Run 9	3	3,00E-06	673,27	1.426,73	0,18	0,17	73,43	23.457
Run 10	3	1,20E-04	793,61	1.306,39	0,18	0,17	72,82	23.263
Run 11	3	3,60E-04	919,59	1.180,41	0,19	0,17	72,10	23.032
Run 12	3	6,00E-05	742,78	1.357,22	0,18	0,17	73,09	23.348
Run 13	3	1,50E-04	814,47	1.285,53	0,18	0,17	72,71	23.227
Run 14	4	1,50E-06	323,18	1.776,82	0,25	0,34	154,16	49.246
Run 15	4	1,00E-05	330,52	1.769,48	0,25	0,34	154,11	49.229
Run 16	4	2,40E-06	323,99	1.776,01	0,25	0,34	154,16	49.244
Run 17	4	3,00E-06	324,53	1.775,47	0,25	0,34	154,15	49.243
Run 18	4	1,20E-04	393,72	1.706,28	0,25	0,34	153,64	49.079
Run 19	4	3,60E-04	468,05	1.631,95	0,25	0,34	153,06	48.893
Run 20	4	6,00E-05	364,36	1.735,64	0,25	0,34	153,86	49.150
Run 21	4	1,50E-04	405,85	1.694,15	0,25	0,34	153,55	49.050

Tabla 11.27. Influencia de ϵ_{tub} en las mismas variables. Valores de ϵ_{tub} tomados de [39]. Cuando había dos valores se ha tomado el promedio.

RUGOSIDAD ABSOLUTA DE MATERIALES			
Material	ϵ (mm)	Material	ϵ (mm)
Plástico (PE, PVC)	0,0015	Fundición asfaltada	0,06-0,18
Poliéster reforzado con fibra de vidrio	0,01	Fundición	0,12-0,60
Tubos estirados de acero	0,0024	Acero comercial y soldado	0,03-0,09
Tubos de latón o cobre	0,0015	Hierro forjado	0,03-0,09
Fundición revestida de cemento	0,0024	Hierro galvanizado	0,06-0,24
Fundición con revestimiento bituminoso	0,0024	Madera	0,18-0,90
Fundición centrifugada	0,003	Hormigón	0,3-3,0

Fig 11.20. Diversos valores de rugosidad en función del material. Fuente: [39].

1..24	1 n_{fc} [-]	2 η_{tob} [-]	3 c_e [m/s]	4 T_e [K]	5 A_e [m ²]	6 F_{tob} [N]	7 P_{tob} [W]
Run 1	2	0,60	284,27	270,23	0,09	9,51	3.038
Run 2	2	0,65	288,61	267,75	0,09	9,66	3.085
Run 3	2	0,70	292,87	265,26	0,09	9,80	3.130
Run 4	2	0,75	297,08	262,77	0,08	9,94	3.175
Run 5	2	0,80	301,23	260,29	0,08	10,08	3.220
Run 6	2	0,85	305,32	257,80	0,08	10,22	3.263
Run 7	2	0,90	309,36	255,31	0,08	10,35	3.307
Run 8	2	0,95	313,34	252,82	0,08	10,48	3.349
Run 9	3	0,60	383,37	203,68	0,25	63,79	20.376
Run 10	3	0,65	393,64	195,61	0,24	65,49	20.922
Run 11	3	0,70	403,64	187,54	0,22	67,16	21.453
Run 12	3	0,75	413,39	179,47	0,21	68,78	21.972
Run 13	3	0,80	422,92	171,39	0,19	70,37	22.478
Run 14	3	0,85	432,24	163,30	0,18	71,92	22.974
Run 15	3	0,90	441,35	155,21	0,17	73,43	23.458
Run 16	3	0,95	450,28	147,11	0,16	74,92	23.933
Run 17	4	0,60	389,92	198,55	0,50	133,62	42.684
Run 18	4	0,65	400,55	190,06	0,47	137,26	43.847
Run 19	4	0,70	410,89	181,56	0,43	140,80	44.979
Run 20	4	0,75	420,97	173,05	0,40	144,26	46.083
Run 21	4	0,80	430,82	164,54	0,38	147,63	47.161
Run 22	4	0,85	440,44	156,03	0,35	150,93	48.214
Run 23	4	0,90	449,86	147,50	0,32	154,16	49.244
Run 24	4	0,95	459,07	138,98	0,30	157,31	50.253

Tabla 11.28. Influencia de η_{tob} en c_e , T_e , A_e , F_{tob} y P_{tob} .

1.23	η_{fc} [-]	p_e [Pa]	p_{tob} [Pa]	c_e [m/s]	T_e [K]	A_e [m ²]	F_{tob} [N]	P_{tob} [W]
Run 1	2	50	187,82	369,19	214,45	0,11	6,77	2.164
Run 2	2	100	187,82	309,36	255,31	0,08	10,35	3.307
Run 3	2	150	187,82	260,57	283,15	0,07	12,20	3.896
Run 4	3	50	1.427,67	466,12	132,33	0,27	64,00	20.444
Run 5	3	100	1.427,67	441,35	155,21	0,17	73,43	23.458
Run 6	3	150	1.427,67	423,52	170,87	0,13	76,89	24.562
Run 7	3	200	1.427,67	408,99	183,14	0,11	78,74	25.153
Run 8	3	400	1.427,67	365,48	217,20	0,07	82,09	26.224
Run 9	3	600	1.427,67	332,39	240,46	0,06	84,09	26.863
Run 10	3	800	1.427,67	303,93	258,65	0,05	86,13	27.513
Run 11	3	1.000	1.427,67	277,94	273,80	0,05	88,58	28.297
Run 12	3	1.200	1.427,67	253,29	286,89	0,05	91,72	29.301
Run 13	4	50	1.776,01	472,71	126,03	0,52	135,77	43.370
Run 14	4	100	1.776,01	449,86	147,50	0,32	154,16	49.244
Run 15	4	150	1.776,01	433,48	162,21	0,25	160,81	51.370
Run 16	4	200	1.776,01	420,18	173,74	0,20	164,32	52.490
Run 17	4	400	1.776,01	380,70	205,74	0,13	170,32	54.408
Run 18	4	600	1.776,01	351,08	227,61	0,11	173,44	55.404
Run 19	4	800	1.776,01	325,96	244,71	0,09	176,31	56.320
Run 20	4	1.000	1.776,01	303,41	258,97	0,08	179,52	57.347
Run 21	4	1.200	1.776,01	282,41	271,29	0,08	183,38	58.580
Run 22	4	1.400	1.776,01	262,38	282,21	0,08	188,14	60.100
Run 23	4	1.600	1.776,01	242,88	292,05	0,07	194,10	62.004

Tabla 11.29. Influencia de p_e en las mismas variables. p_{tob} para comprobar que se satisface $p_e < p_{tob}$.

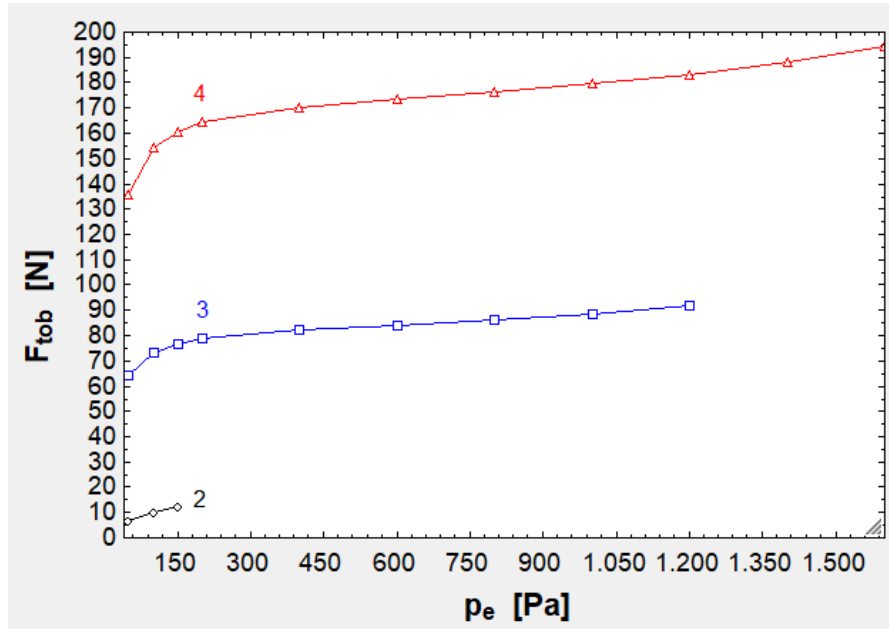


Fig. 11.21. Interdependencia entre F_{tob} y p_e .

Para comenzar, en la figura [11.18] se ve que F_{tob} permanece casi constante al variar p_1 y en la tabla correspondiente se puede ver cómo Δp_{tub} va subiendo, pero también

lo hace p_{tob} al convertirse Δp_{tub} en menos importante en relación a ella. En la figura [11.19] se ve cómo T_2 incrementa ligeramente F_{tob} , siendo el efecto más acusado en la tercera disposición, ya que la ganancia de entalpía es mayor. En las tablas [11.26] y [11.27] se percibe cómo c_{tub} y ε_{tub} apenas influyen en F_{tob} . En concreto, al incrementar c_{tub} se incrementa F_{tob} , pero también Δp_{tub} , lo cual reduce F_{tob} . En la tabla [11.28] se pone de relieve que η_{tob} varía poco los resultados, excepto en la cuarta disposición, cuando la variación es de unos 25 N. También es remarcable el hecho de que T_e va disminuyendo a medida que sube η_{tob} , lo que indica que el proceso es más adiabático. Este gas frío refrigerará un poco el tubo (calentado por las pérdidas del tren). Por último, en la figura [11.21] se pone de manifiesto cómo una mayor p_e contribuye al empuje, aunque también debe tomarse en consideración que esto afecta a las condiciones de vacío internas.

11.1.6. Intercambiadores de calor, serpentín y depósitos

Para este subapartado se utilizan los mismos datos de partida.

1.15	1 η_{fc} [-]	2 $\Delta T_{i,1}$ [K]	3 V_I [m ³]	4 V_{II} [m ³]	5 V_{III} [m ³]	6 m_{H_2O} [kg]
Run 1	2	60	0,22	0,02	0,20	198,67
Run 2	2	70	0,21	0,02	0,20	196,61
Run 3	2	80	0,21	0,02	0,19	194,62
Run 4	2	90	0,21	0,02	0,19	192,68
Run 5	2	100	0,21	0,02	0,19	190,81
Run 6	3	60	0,36	0,04	0,32	320,13
Run 7	3	70	0,35	0,04	0,32	315,74
Run 8	3	80	0,35	0,04	0,31	311,50
Run 9	3	90	0,34	0,04	0,31	307,40
Run 10	3	100	0,34	0,04	0,30	303,42
Run 11	4	60	0,58	0,07	0,51	508,04
Run 12	4	70	0,57	0,07	0,50	500,47
Run 13	4	80	0,56	0,07	0,49	493,14
Run 14	4	90	0,55	0,06	0,49	486,04
Run 15	4	100	0,54	0,06	0,48	479,17

Tabla 11.30. Influencia de ΔT_{I_1} en V_I , V_{II} , V_{III} y \dot{m}_{H_2O} .

1..15	1	2	3	4	5	6
	n_{fc} [-]	ΔT_s [K]	V_I [m ³]	V_{II} [m ³]	V_{III} [m ³]	m_{H_2O} [kg]
Run 1	2	59	0,28	0,02	0,26	261,23
Run 2	2	69	0,24	0,02	0,22	223,05
Run 3	2	79	0,21	0,02	0,19	194,62
Run 4	2	89	0,19	0,02	0,17	172,61
Run 5	2	99	0,17	0,02	0,16	155,07
Run 6	3	59	0,46	0,04	0,42	417,95
Run 7	3	69	0,39	0,04	0,36	356,96
Run 8	3	79	0,35	0,04	0,31	311,50
Run 9	3	89	0,31	0,04	0,28	276,32
Run 10	3	99	0,29	0,04	0,25	248,27
Run 11	4	59	0,73	0,07	0,66	661,57
Run 12	4	69	0,63	0,07	0,57	565,07
Run 13	4	79	0,56	0,07	0,49	493,14
Run 14	4	89	0,50	0,07	0,44	437,46
Run 15	4	99	0,46	0,07	0,39	393,07

Tabla 11.31. Efecto de ΔT_s en las mismas variables.

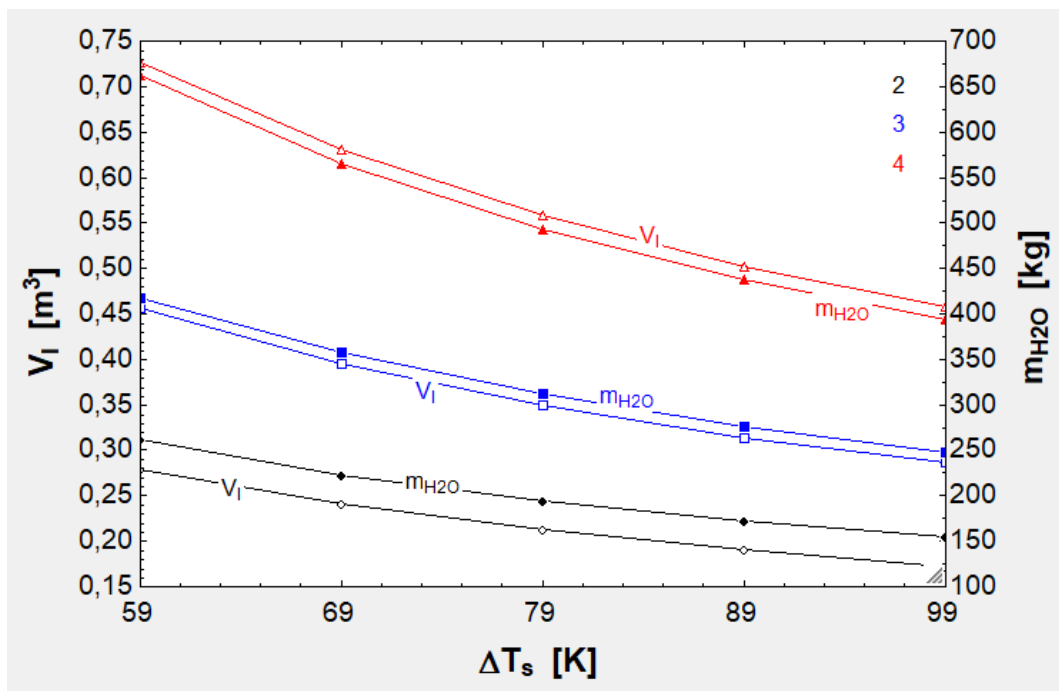


Fig. 11.22. V_I y m_{H_2O} en función de ΔT_s .

1	2	3	4	5	6	7	
1.27	n_{fc} [-]	T_2 [K]	T_3 [K]	V_I [m ³]	V_{II} [m ³]	V_{III} [m ³]	m_{H_2O} [kg]
Run 1	2	300	794,39	0,21	0,02	0,19	194,62
Run 2	2	325	854,87	0,22	0,02	0,20	200,98
Run 3	2	350	914,56	0,22	0,02	0,21	207,32
Run 4	2	375	973,52	0,23	0,02	0,21	213,63
Run 5	2	400	1031,78	0,23	0,01	0,22	219,91
Run 6	2	425	1089,39	0,24	0,01	0,23	226,18
Run 7	2	450	1146,42	0,25	0,01	0,23	232,42
Run 8	2	475	1202,90	0,25	0,01	0,24	238,65
Run 9	2	500	1258,89	0,26	0,01	0,24	244,86
Run 10	3	300	713,65	0,35	0,04	0,31	311,50
Run 11	3	325	768,76	0,35	0,04	0,31	309,67
Run 12	3	350	823,23	0,34	0,03	0,31	307,77
Run 13	3	375	877,09	0,34	0,03	0,31	305,82
Run 14	3	400	930,38	0,33	0,03	0,30	303,82
Run 15	3	425	983,11	0,33	0,03	0,30	301,76
Run 16	3	450	1035,33	0,33	0,03	0,30	299,64
Run 17	3	475	1087,07	0,32	0,03	0,30	297,47
Run 18	3	500	1138,36	0,32	0,02	0,30	295,25
Run 19	4	300	685,68	0,56	0,07	0,49	493,14
Run 20	4	325	738,79	0,54	0,06	0,48	482,17
Run 21	4	350	791,31	0,53	0,06	0,47	471,10
Run 22	4	375	843,25	0,52	0,06	0,46	459,93
Run 23	4	400	894,64	0,50	0,05	0,45	448,66
Run 24	4	425	945,51	0,49	0,05	0,44	437,28
Run 25	4	450	995,88	0,47	0,05	0,43	425,80
Run 26	4	475	1045,79	0,46	0,04	0,41	414,21
Run 27	4	500	1095,26	0,44	0,04	0,40	402,52

Tabla 11.32. Influencia de T_2 en T_3 , V_I , V_{II} , V_{III} y m_{H_2O} .

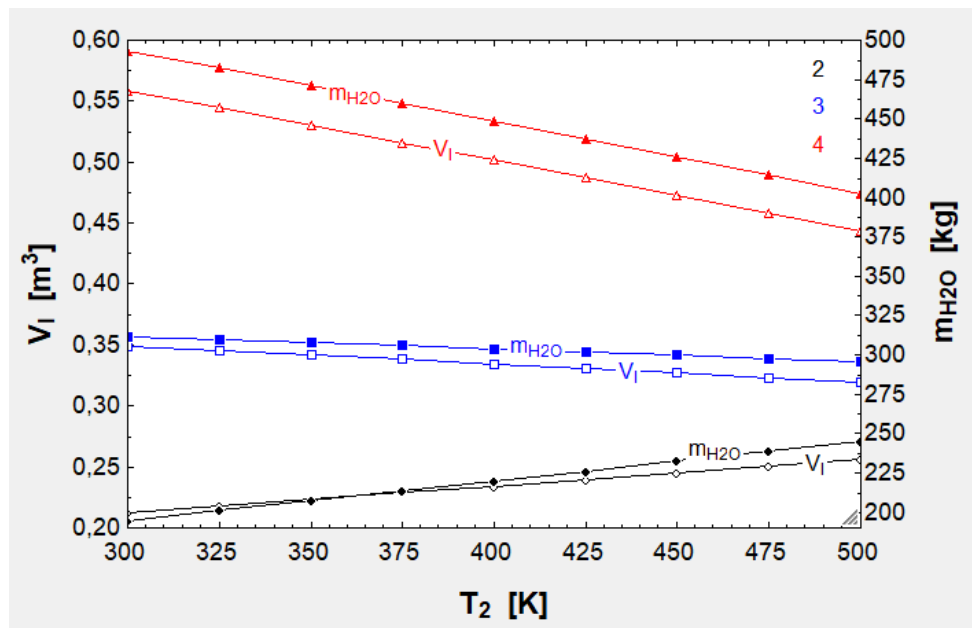


Fig. 11.23. V_I y m_{H_2O} en función de T_2 .

1..33	1 n_{fc} [-]	2 T_a [K]	3 V_I [m ³]	4 V_{II} [m ³]	5 V_{III} [m ³]	6 m_{H_2O} [kg]
Run 2	2	425	0,20	0,02	0,19	186,23
Run 3	2	450	0,20	0,02	0,18	178,71
Run 4	2	475	0,19	0,02	0,17	171,94
Run 5	2	500	0,18	0,02	0,17	165,81
Run 6	2	525	0,18	0,02	0,16	160,22
Run 7	2	550	0,17	0,02	0,16	155,10
Run 8	2	575	0,17	0,02	0,15	150,40
Run 9	2	600	0,16	0,02	0,15	146,07
Run 10	2	625	0,16	0,02	0,14	142,06
Run 11	2	650	0,16	0,02	0,14	138,33
Run 12	3	400	0,35	0,04	0,31	311,50
Run 13	3	425	0,34	0,04	0,30	304,49
Run 14	3	450	0,34	0,04	0,30	298,21
Run 15	3	475	0,33	0,04	0,29	292,54
Run 16	3	500	0,33	0,04	0,29	287,40
Run 17	3	525	0,32	0,04	0,28	282,72
Run 18	3	550	0,32	0,04	0,28	278,44
Run 19	3	575	0,31	0,04	0,27	274,50
Run 20	3	600	0,31	0,04	0,27	270,86
Run 21	3	625	0,31	0,04	0,27	267,49
Run 22	3	650	0,30	0,04	0,26	264,36
Run 23	4	400	0,56	0,07	0,49	493,14
Run 24	4	425	0,55	0,07	0,49	486,49
Run 25	4	450	0,55	0,07	0,48	480,53
Run 26	4	475	0,54	0,07	0,48	475,15
Run 27	4	500	0,54	0,07	0,47	470,28
Run 28	4	525	0,53	0,07	0,47	465,84
Run 29	4	550	0,53	0,07	0,46	461,77
Run 30	4	575	0,52	0,07	0,46	458,02
Run 31	4	600	0,52	0,07	0,45	454,57
Run 32	4	625	0,52	0,07	0,45	451,37
Run 33	4	650	0,51	0,07	0,45	448,40

Tabla 11.33. Impacto de T_a en las mismas variables (excepto T_3 , que es anterior a T_a en el sistema de refrigeración).

1.27	1	2	3	4	5	6
	n_{fc} [-]	τ_1 [%]	V_I [m ³]	V_{II} [m ³]	V_{III} [m ³]	m_{H_2O} [kg]
Run 1	2	5	0,19	0,02	0,18	177,58
Run 2	2	10	0,20	0,02	0,19	186,10
Run 3	2	15	0,21	0,02	0,19	194,62
Run 4	2	20	0,22	0,02	0,20	203,14
Run 5	2	25	0,23	0,02	0,21	211,67
Run 6	2	30	0,24	0,02	0,22	220,21
Run 7	2	35	0,25	0,02	0,23	228,75
Run 8	2	40	0,26	0,02	0,24	237,30
Run 9	2	45	0,27	0,02	0,25	245,85
Run 10	3	5	0,32	0,03	0,28	284,27
Run 11	3	10	0,33	0,04	0,30	297,88
Run 12	3	15	0,35	0,04	0,31	311,50
Run 13	3	20	0,36	0,04	0,33	325,13
Run 14	3	25	0,38	0,04	0,34	338,77
Run 15	3	30	0,39	0,04	0,35	352,41
Run 16	3	35	0,41	0,04	0,37	366,06
Run 17	3	40	0,43	0,05	0,38	379,72
Run 18	3	45	0,44	0,05	0,39	393,38
Run 19	4	5	0,51	0,06	0,45	450,04
Run 20	4	10	0,53	0,06	0,47	471,58
Run 21	4	15	0,56	0,07	0,49	493,14
Run 22	4	20	0,58	0,07	0,51	514,71
Run 23	4	25	0,61	0,07	0,54	536,29
Run 24	4	30	0,63	0,07	0,56	557,87
Run 25	4	35	0,66	0,08	0,58	579,47
Run 26	4	40	0,68	0,08	0,60	601,08
Run 27	4	45	0,70	0,08	0,62	622,70

Tabla 11.34. Impacto de τ_1 en dichas variables.

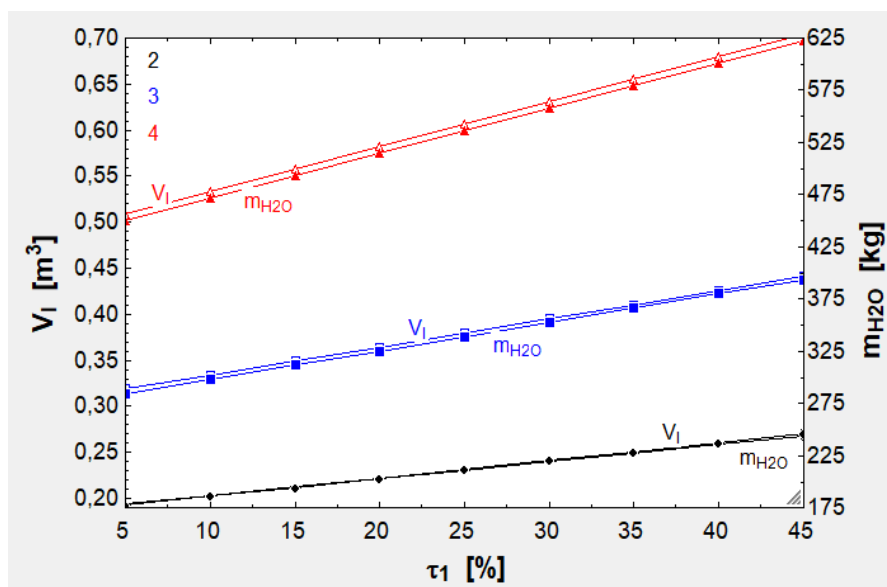


Fig. 11.24. V_I y m_{H_2O} en función de τ_1 .

Como conclusión, en la tabla [11.30] se ve cómo la variación de ΔT_{I_1} tiene un efecto pequeño en las variables estudiadas. Por el contrario, es muy remarcable el hecho observado en la figura [11.22]: ΔT_s sí tiene una magna influencia en las variables consideradas. Esto sucede porque el serpentín requiere de mucha agua para intercambiar calor, ya que no cambia de fase (no hay que almacenar vapor porque ocupa 1.000 veces más volumen que el agua líquida). Si aumenta ΔT_s , entonces mejora la refrigeración y se requiere menos agua. En la siguiente figura, la [11.23], se ve cómo se reduce V_I y m_{H_2O} al crecer T_2 . No obstante, esto no sucede cuando hay dos filas de cajas, ya que la carga térmica del segundo intercambiador y en el serpentín aumenta mucho (véase la alta T_3 en la tabla correspondiente a la figura). En esta disposición también se aprecia que alrededor de 362 K se minimiza tanto V_I cuanto m_{H_2O} . En la tabla [11.33] se observa cómo T_a influye muy poco en V_I y m_{H_2O} , ya que el segundo intercambiador no es tan importante como el serpentín y reducir su carga térmica no conlleva una reducción importante de V_I y m_{H_2O} . Por último, en la figura [11.24] se ve cómo crece V_I y m_{H_2O} cuando sube τ_1 , efecto muy relevante en la cuarta disposición, donde hay una diferencia de 0,20 m³ y 175 kg entre los valores máximos y los mínimos.

11.1.7. Propulsión

Para la propulsión el segundo modelo utiliza el LIM, que se ha modelado de la misma manera que el EDS, con la salvedad de que ahora no hay una fuerza parásita de arrastre. Por tanto, las tendencias que siguen los parámetros del LIM pueden ser consultadas en el subapartado [9.1.3]. En consecuencia, a continuación solo se van a obtener los del LIM para varios casos de carga, donde también se van a considerar varias masas posibles de los diversos componentes del tren. Al igual que en el subapartado [9.1.3] se consideran estos datos de partida: $\eta_{LIM} = 0,70$, $\varphi = 10^\circ$ y $\gamma_0 = 30^\circ$. Asimismo se emplea $R_1 = 8 \Omega$ por los motivos expuestos en el apartado [10.1]. $m_{pzs} = 50$ kg y $\psi = 1$ en un principio. Además, ahora se utiliza $\delta_{lc} = 1$ cm así L_{aux} y L_{bat} serán mejor aprovechados en cada caso.

1.9	1	2	3	4	5	6	7	8
	n_{fc} [-]	n_{caj} [-]	m'_{est} [kg/m]	m'_{LIM} [kg/m]	m_{EB} [kg]	m_a [kg]	m_{comp} [kg]	m_{mot} [kg]
Run 1	2	200	115	24	500	28	1.600	130
Run 2	2	200	120	26	550	30	1.700	150
Run 3	2	200	125	28	600	32	1.800	170
Run 4	3	625	130	30	650	34	1.900	190
Run 5	3	625	135	32	700	36	2.000	210
Run 6	3	625	140	34	750	38	2.100	230
Run 7	4	1.275	145	36	800	40	2.200	250
Run 8	4	1.275	150	38	850	42	2.300	270
Run 9	4	1.275	155	40	900	44	2.400	290

9	10	11	12	13
m_{tot} [kg]	F_x [N]	V_1 [V]	I_1 [A]	$P_{1;}$ [W]
15.984	313.741	36.225	1.337,79	1,43E+08
16.344	320.799	36.630	1.352,76	1,46E+08
16.703	327.859	37.031	1.367,56	1,50E+08
39.760	780.429	57.133	2.109,94	3,56E+08
40.168	788.422	57.425	2.120,72	3,60E+08
40.575	796.415	57.715	2.131,44	3,63E+08
74.764	1,467E+06	78.344	2.893,26	6,70E+08
75.197	1,476E+06	78.571	2.901,63	6,74E+08
75.631	1,484E+06	78.797	2.909,98	6,77E+08

Tabla 11.35. Valores de m_{tot} , F_x , V_1 , I_1 y P_1 en función de las variables n_{caj} , m'_{est} , m'_{LIM} , m_{EB} , m_a , m_{comp} y m_{mot} .

De ahora en adelante se tomarán los valores rodeados. Para $n_{fc} = 2$ o $n_{fc} = 3$ el programa no converge si se aumenta n_{caj} en 25, pero sí lo hace para $n_{fc} = 4$ cuando $n_{caj} = 1.300$, por lo que se tomará este valor.

1.9	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	n_{fc} [-]	n_{caj} [-]	ψ [-]	$n_{caj;real}$ [-]	m'_{est} [kg/m]	m'_{LIM} [kg/m]	m_{EB} [kg]	m_a [kg]	m_{comp} [kg]	m_{mot} [kg]
Run 1	2	200	1,00	200	115	24	500	28	1.600	130
Run 2	2	200	0,85	170	115	24	500	28	1.600	130
Run 3	2	200	0,70	140	115	24	500	28	1.600	130
Run 4	3	625	1,00	625	130	30	650	34	1.900	190
Run 5	3	625	0,85	532	130	30	650	34	1.900	190
Run 6	3	625	0,70	438	130	30	650	34	1.900	190
Run 7	4	1.300	1,00	1.300	145	36	800	40	2.200	250
Run 8	4	1.300	0,85	1.105	145	36	800	40	2.200	250
Run 9	4	1.300	0,70	910	145	36	800	40	2.200	250

11	12	13	14	15
m_{tot} [kg]	F_x [N]	V_1 [V]	I_1 [A]	$P_{1;}$ [W]
15.984	313.741	36.225	1.337,79	1,43E+08
14.464	283.919	34.460	1.272,63	1,30E+08
12.946	254.116	32.601	1.203,98	1,16E+08
39.760	780.429	57.133	2.109,94	3,56E+08
35.050	687.993	53.643	1.981,05	3,14E+08
30.292	594.637	49.871	1.841,75	2,71E+08
76.123	1,494E+06	79.053	2.919,44	6,82E+08
66.239	1,300E+06	73.744	2.723,37	5,93E+08
56.365	1,106E+06	68.027	2.512,25	5,05E+08

Tabla 11.36. Resultados de las mismas variables cuando varía ψ .

1.9	1	2	3	4	5	6	7	8	9
n_{fc} [-]	n_{caj} [-]	m_{pzs} [kg]	m'_{est} [kg/m]	m'_{LIM} [kg/m]	m_{EB} [kg]	m_a [kg]	m_{comp} [kg]	m_{mot} [kg]	
Run 1	2	225	40	115	24	500	28	1.600	130
Run 2	2	200	50	115	24	500	28	1.600	130
Run 3	2	200	60	115	24	500	28	1.600	130
Run 4	3	650	40	130	30	650	34	1.900	190
Run 5	3	625	50	130	30	650	34	1.900	190
Run 6	3	575	60	130	30	650	34	1.900	190
Run 7	4	1.300	40	145	36	800	40	2.200	250
Run 8	4	1.300	50	145	36	800	40	2.200	250
Run 9	4	1.125	60	145	36	800	40	2.200	250

10	11	12	13	14
m_{tot} [kg]	F_x [N]	V_1 [V]	I_1 [A]	$P_{1;}$ [W]
15.268	299.698	35.405	1.307,51	1,37E+08
15.984	313.741	36.225	1.337,79	1,43E+08
18.012	353.529	38.453	1.420,09	1,61E+08
34.622	679.613	53.315	1.968,95	3,10E+08
39.760	780.429	57.133	2.109,94	3,56E+08
42.757	839.224	59.246	2.187,98	3,83E+08
62.947	1,236E+06	71.888	2.654,84	5,64E+08
76.123	1,494E+06	79.053	2.919,44	6,82E+08
78.097	1,533E+06	80.070	2.957,01	7,00E+08

Tabla 11.37. Resultados con n_{caj} ajustado para que el programa converja. Ahora varía m_{pzs} .

Como conclusión de estas tres tablas, al final de la aceleración P_1 tiene valores muy elevados: Unos 150 MW, 350 MW y 600 MW, dependiendo de cada caso de n_{fc} . Estos valores pueden reducirse a la mitad reduciendo a_1 a la mitad.

11.1.8. Transporte y consumo energético

Para este subpartado se va a partir de todos los datos dichos en subpartados anteriores, añadiéndose a ellos $\eta_{bat} = 0,90$ e incluyendo estas cifras:

n_{fc} [-]	2	3	4
m'_{est} [kg/m]	115	130	145
m'_{LIM} [kg/m]	24	30	36
m_{EB} [kg]	500	650	800
m_a [kg]	24	30	36
m_{comp} [kg]	1.600	1.900	2.200
m_{mot} [kg]	130	190	250
n_{caj} ($m_{pzs} = 40$ kg)	225	650	1.300
n_{caj} ($m_{pzs} = 50$ kg)	200	625	1.300
n_{caj} ($m_{pzs} = 60$ kg)	200	575	1.150

Tabla 11.38. Datos de partida para el cálculo de las masas.

1.9	2	3	4	5	6	7	8	9	
n_{fc} [-]	n_{caj} [-]	m_{pzs} [kg]	m'_{est} [kg/m]	m'_{LIM} [kg/m]	m_{EB} [kg]	m_a [kg]	m_{comp} [kg]	m_{mot} [kg]	
Run 1	2	225	40	115	24	500	28	1.600	130
Run 2	2	200	50	115	24	500	28	1.600	130
Run 3	2	200	60	115	24	500	28	1.600	130
Run 4	3	650	40	130	30	650	34	1.900	190
Run 5	3	625	50	130	30	650	34	1.900	190
Run 6	3	575	60	130	30	650	34	1.900	190
Run 7	4	1.300	40	145	36	800	40	2.200	250
Run 8	4	1.300	50	145	36	800	40	2.200	250
Run 9	4	1.125	60	145	36	800	40	2.200	250

10	11	12	13	14	15	16
m_{tot} [kg]	E_{bat} [kWh]	E_{ac} [kWh]	E_{gen} [kWh]	E_v [kWh]	E'_t [kWh/km]	e'_t [kWh/tkm]
15.268	28,59	309,24	-151,43	9,63	0,98	1,09E-01
15.984	29,79	323,73	-158,53	9,41	1,02	1,02E-01
18.012	32,03	364,79	-178,64	10,48	1,14	9,53E-02
34.622	61,31	701,24	-343,37	23,11	2,21	8,51E-02
39.760	67,44	805,28	-394,34	24,53	2,51	8,05E-02
42.757	71,80	865,97	-424,06	25,34	2,70	7,81E-02
62.947	110,85	1.274,91	-624,29	39,85	4,01	7,70E-02
76.123	125,15	1.541,74	-754,98	46,14	4,79	7,37E-02
78.097	129,16	1.581,70	-774,56	45,28	4,91	7,27E-02

Tabla 11.39. Influencia de las masas en E_{bat} , E_{ac} , E_{gen} , E_v , E'_t y e'_t .

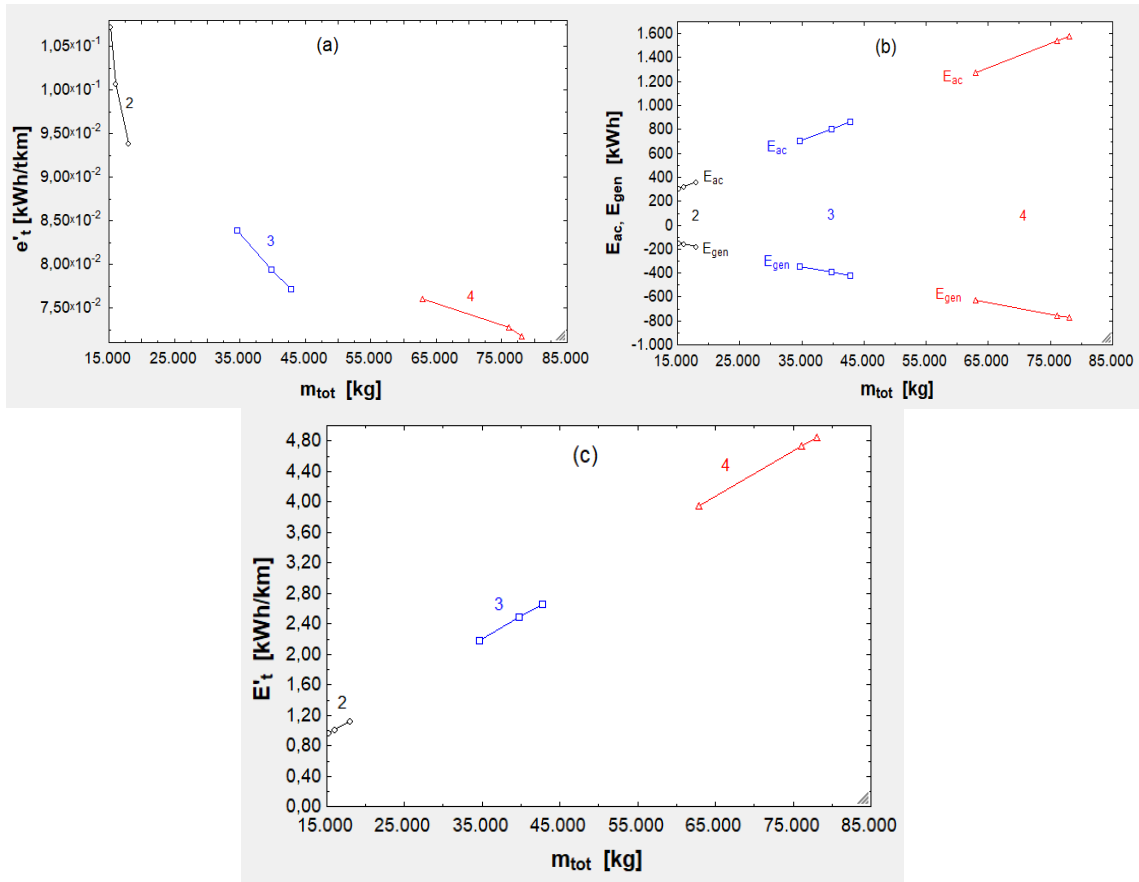


Fig. 11.25. (a) e'_t en función de m_{tot} . (b) E_{ac} y E_{gen} según m_{tot} . (c) E'_t en función de m_{tot} .

1.9	2	3	4	5	6	7	8	9	10
n_{caj} [-]	ψ [-]	$n_{caj,real}$ [-]	m'_{est} [kg/m]	m'_{LIM} [kg/m]	m_{EB} [kg]	m_a [kg]	m_{comp} [kg]	m_{mot} [kg]	
Run 1	200	1,00	200	115	24	500	28	1.600	130
Run 2	200	0,85	170	115	24	500	28	1.600	130
Run 3	200	0,70	140	115	24	500	28	1.600	130
Run 4	625	1,00	625	130	30	650	34	1.900	190
Run 5	625	0,85	532	130	30	650	34	1.900	190
Run 6	625	0,70	438	130	30	650	34	1.900	190
Run 7	1.300	1,00	1.300	145	36	800	40	2.200	250
Run 8	1.300	0,85	1.105	145	36	800	40	2.200	250
Run 9	1.300	0,70	910	145	36	800	40	2.200	250

11	12	13	14	15	16	17
m_{tot} [kg]	E_{bat} [kWh]	E_{ac} [kWh]	E_{gen} [kWh]	E_v [kWh]	E'_t [kWh/km]	e'_t [kWh/tkm]
15.984	29,79	323,73	-158,53	9,41	1,02	1,02E-01
14.464	28,18	292,95	-143,45	8,74	0,93	1,10E-01
12.946	26,65	262,20	-128,39	8,10	0,84	1,20E-01
39.760	67,44	805,28	-394,34	24,53	2,51	8,05E-02
35.050	62,52	709,89	-347,61	22,43	2,24	8,41E-02
30.292	57,82	613,55	-300,42	20,42	1,96	8,94E-02
76.123	125,15	1.541,74	-754,98	46,14	4,79	7,37E-02
66.239	114,32	1.341,59	-656,95	41,24	4,20	7,60E-02
56.365	104,15	1.141,61	-559,00	37,10	3,62	7,95E-02

Tabla 11.40. Mismo estudio que antes, aunque variando ψ .

1.9	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	n_{fc} [-]	n_{caj} [-]	L_t [km]	m'_{est} [kg/m]	m'_{LIM} [kg/m]	m_{EB} [kg]	m_a [kg]	m_{comp} [kg]	m_{mot} [kg]
Run 1	2	200	200	115	24	500	28	1.600	130
Run 2	2	200	350	115	24	500	28	1.600	130
Run 3	2	200	500	115	24	500	28	1.600	130
Run 4	3	625	200	130	30	650	34	1.900	190
Run 5	3	625	350	130	30	650	34	1.900	190
Run 6	3	625	500	130	30	650	34	1.900	190
Run 7	4	1.300	200	145	36	800	40	2.200	250
Run 8	4	1.275	350	145	36	800	40	2.200	250
Run 9	4	1.250	500	145	36	800	40	2.200	250

10	11	12	13	14	15	16
m_{tot} [kg]	$E_{bat,t}$ [kWh]	E_{ac} [kWh]	E_{gen} [kWh]	E_v [kWh]	E'_t [kWh/km]	e'_t [kWh/tkm]
15.984	29,79	323,73	-158,53	9,41	1,02	1,02E-01
16.258	52,42	329,28	-161,24	16,87	0,68	6,78E-02
16.537	75,51	334,93	-164,02	24,54	0,54	5,42E-02
39.760	67,44	805,28	-394,34	24,53	2,51	8,05E-02
40.379	118,64	817,81	-400,47	44,00	1,66	5,30E-02
41.010	170,85	830,59	-406,73	64,12	1,32	4,22E-02
76.123	125,15	1.541,74	-754,98	46,14	4,79	7,37E-02
75.899	217,48	1.537,21	-752,76	80,84	3,09	4,85E-02
75.717	309,56	1.533,53	-750,96	115,53	2,42	3,86E-02

Tabla 11.41. Dependencia entre dichas variables y L_t . Para los dos últimos casos ha sido preciso retirar 25 y 50 cajas porque el programa no convergía al haber un exceso de masa debido al incremento del peso del agua y de las baterías.

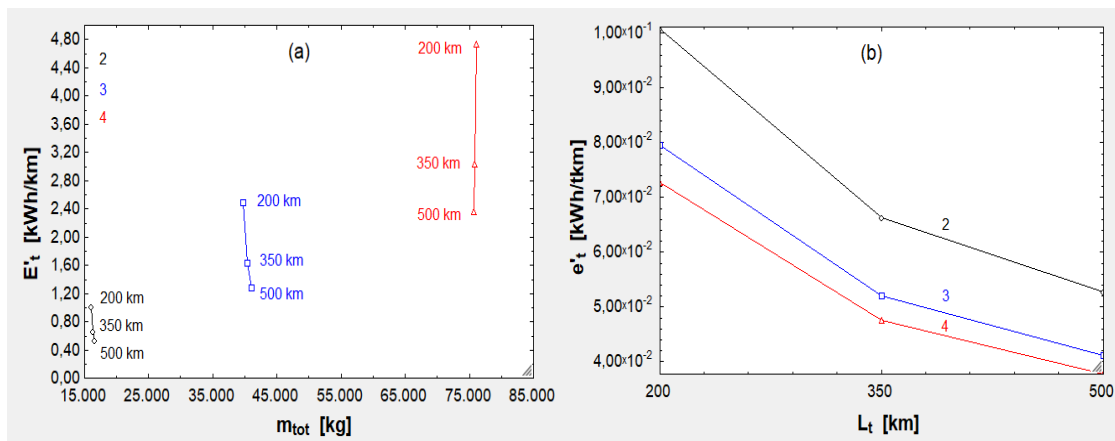


Fig. 11.26. E'_t frente a m_{tot} . e'_t frente a L_t .

1.9	2	3	4	5	6	7	8	9
η_{fc} [-]	η_{caj} [-]	L_t [km]	m'_{est} [kg/m]	m'_{LIM} [kg/m]	m_{EB} [kg]	m_a [kg]	m_{comp} [kg]	m_{mot} [kg]
Run 1	2	200	200	115	24	500	28	1.600
Run 2	2	200	350	115	24	500	28	1.600
Run 3	2	200	500	115	24	500	28	1.600
Run 4	3	625	200	130	30	650	34	1.900
Run 5	3	625	350	130	30	650	34	1.900
Run 6	3	625	500	130	30	650	34	1.900
Run 7	4	1.300	200	145	36	800	40	2.200
Run 8	4	1.275	350	145	36	800	40	2.200
Run 9	4	1.250	500	145	36	800	40	2.200

10	11	12
I_e [kWh/t]	I_c [t/h]	$I_{c,inv}$ [h/t]
20,44	56,04	1,78E-02
23,73	32,38	3,09E-02
27,10	22,76	4,39E-02
16,09	175,13	5,71E-03
18,56	101,18	9,88E-03
21,08	71,14	1,41E-02
14,74	364,28	2,75E-03
16,98	206,40	4,85E-03
19,32	142,27	7,03E-03

Tabla 11.42. Efecto de la variación de L_t en I_e e I_c .

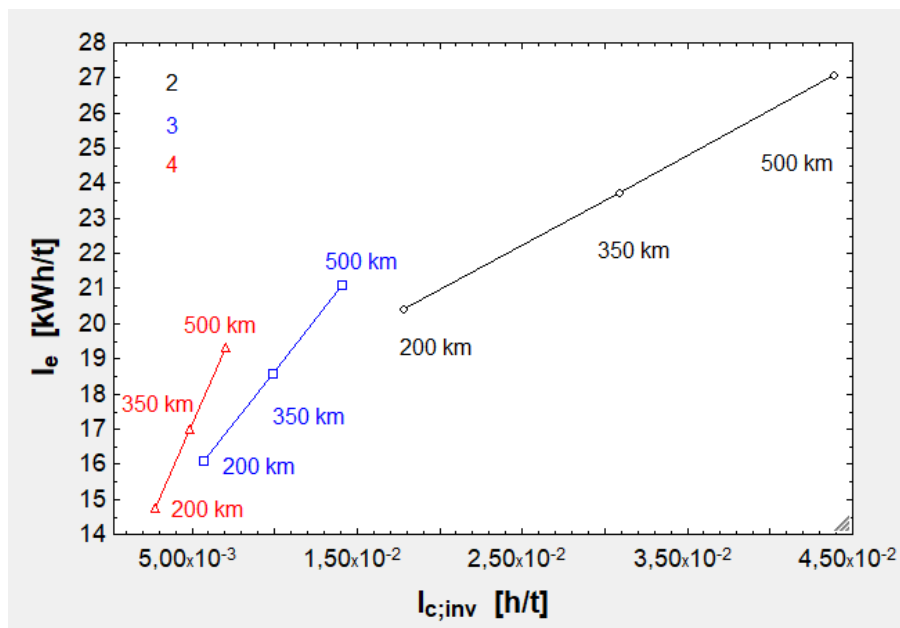


Fig. 11.27. I_e en función de I_c^{-1} para varias L_t .

1.9	1	2	3	4	5	6	7	8	9
η_{fc}	η_{caj}	v	m'_{est}	m'_{LIM}	m_{EB}	m_a	m_{comp}	m_{mot}	
[-]	[-]	[km/h]	[kg/m]	[kg/m]	[kg]	[kg]	[kg]	[kg]	
Run 1	2	200	1.000	115	24	500	28	1.600	130
Run 2	2	200	1.100	115	24	500	28	1.600	130
Run 3	2	200	1.200	115	24	500	28	1.600	130
Run 4	3	600	1.000	130	30	650	34	1.900	190
Run 5	3	625	1.100	130	30	650	34	1.900	190
Run 6	3	625	1.200	130	30	650	34	1.900	190
Run 7	4	1.175	1.000	145	36	800	40	2.200	250
Run 8	4	1.250	1.100	145	36	800	40	2.200	250
Run 9	4	1.300	1.200	145	36	800	40	2.200	250

10	11	12
I_e	I_c	$I_{c;inv}$
[kWh/t]	[t/h]	[h/t]
17,07	49,04	2,04E-02
19,16	53,72	1,86E-02
21,83	58,35	1,71E-02
13,90	147,11	6,80E-03
15,10	167,88	5,96E-03
17,19	182,34	5,48E-03
13,54	288,09	3,47E-03
13,92	335,76	2,98E-03
15,73	379,26	2,64E-03

Tabla 11.43. Influencia de v en I_e e I_c . También ha sido preciso un ligero deslastre (a bajas velocidades el compresor admite menos flujo).

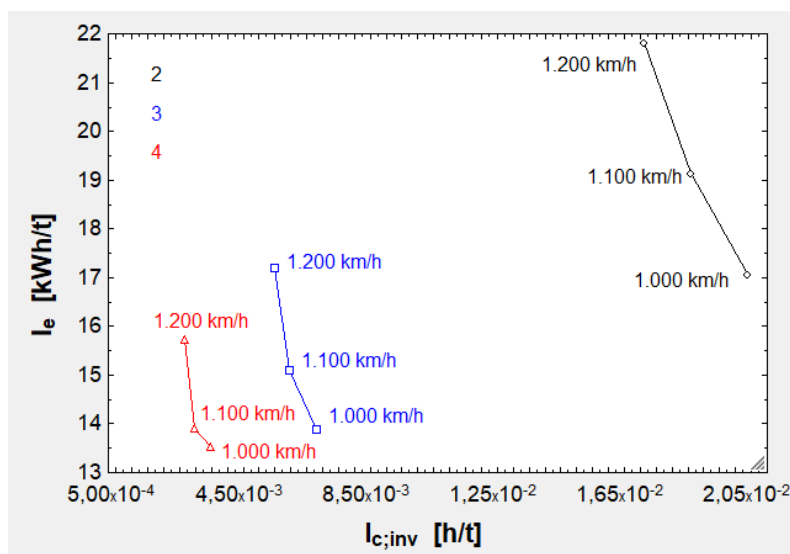


Fig. 11.28. Influencia de v en la curva $I_e - I_c^{-1}$.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	n_{fc} [-]	n_{caj} [-]	ψ [-]	$n_{caj,real}$ [-]	m'_{est} [kg/m]	m'_{LIM} [kg/m]	m_{EB} [kg]	m_a [kg]	m_{comp} [kg]	m_{mot} [kg]
Run 1	2	200	1,00	200	115	24	500	28	1.600	130
Run 2	2	200	0,85	170	115	24	500	28	1.600	130
Run 3	2	200	0,70	140	115	24	500	28	1.600	130
Run 4	3	625	1,00	625	130	30	650	34	1.900	190
Run 5	3	625	0,85	532	130	30	650	34	1.900	190
Run 6	3	625	0,70	438	130	30	650	34	1.900	190
Run 7	4	1.300	1,00	1.300	145	36	800	40	2.200	250
Run 8	4	1.300	0,85	1.105	145	36	800	40	2.200	250
Run 9	4	1.300	0,70	910	145	36	800	40	2.200	250

11	12	13
I_e [kWh/t]	I_c [t/h]	$I_{c,inv}$ [h/t]
20,44	56,04	1,78E-02
21,93	47,64	2,10E-02
24,08	39,23	2,55E-02
16,09	175,13	5,71E-03
16,81	149,07	6,71E-03
17,87	122,73	8,15E-03
14,74	364,28	2,75E-03
15,21	309,64	3,23E-03
15,91	254,99	3,92E-03

Tabla 11.44. Efecto de ψ en los índices.

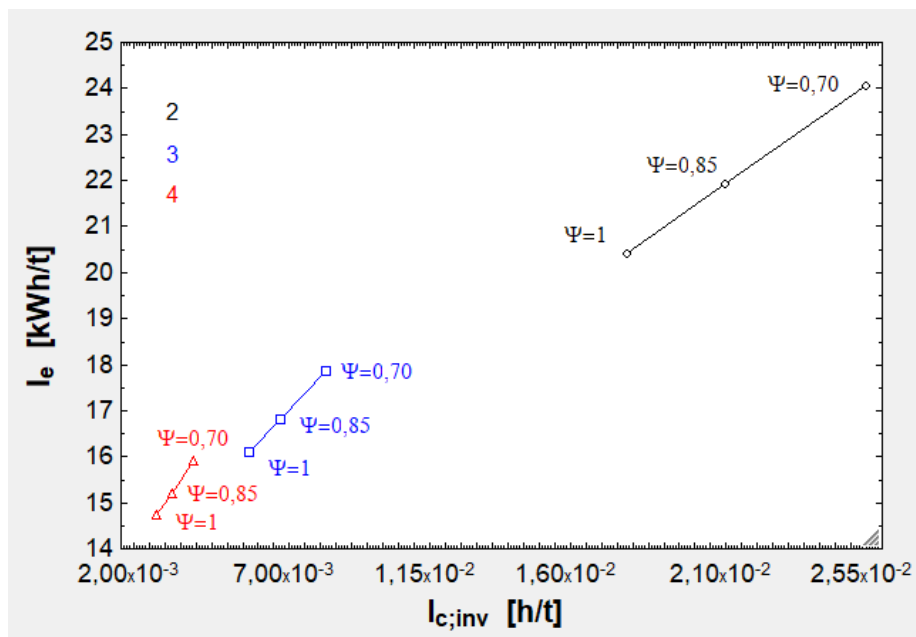


Fig. 11.29. Curva $I_e - I_c^{-1}$ con variación de ψ .

1	2	3	4	5	6	7	8	9	
n_{fc} [-]	n_{caj} [-]	m_{pzs} [kg]	m'_{est} [kg/m]	m'_{LIM} [kg/m]	m_{EB} [kg]	m_a [kg]	m_{comp} [kg]	m_{mot} [kg]	
Run 1	2	225	40	115	24	500	28	1.600	130
Run 2	2	200	50	115	24	500	28	1.600	130
Run 3	2	200	60	115	24	500	28	1.600	130
Run 4	3	650	40	130	30	650	34	1.900	190
Run 5	3	625	50	130	30	650	34	1.900	190
Run 6	3	575	60	130	30	650	34	1.900	190
Run 7	4	1.300	40	145	36	800	40	2.200	250
Run 8	4	1.300	50	145	36	800	40	2.200	250
Run 9	4	1.125	60	145	36	800	40	2.200	250

10	11	12
I_e [kWh/t]	I_c [t/h]	$I_{c,inv}$ [h/t]
21,78	50,44	1,98E-02
20,44	56,04	1,78E-02
19,06	67,25	1,49E-02
17,01	145,71	6,86E-03
16,09	175,13	5,71E-03
15,62	193,35	5,17E-03
15,41	291,42	3,43E-03
14,74	364,28	2,75E-03
14,54	378,29	2,64E-03

Tabla. 11.45. Impacto del par $n_{caj} - m_{pzs}$ en los índices.

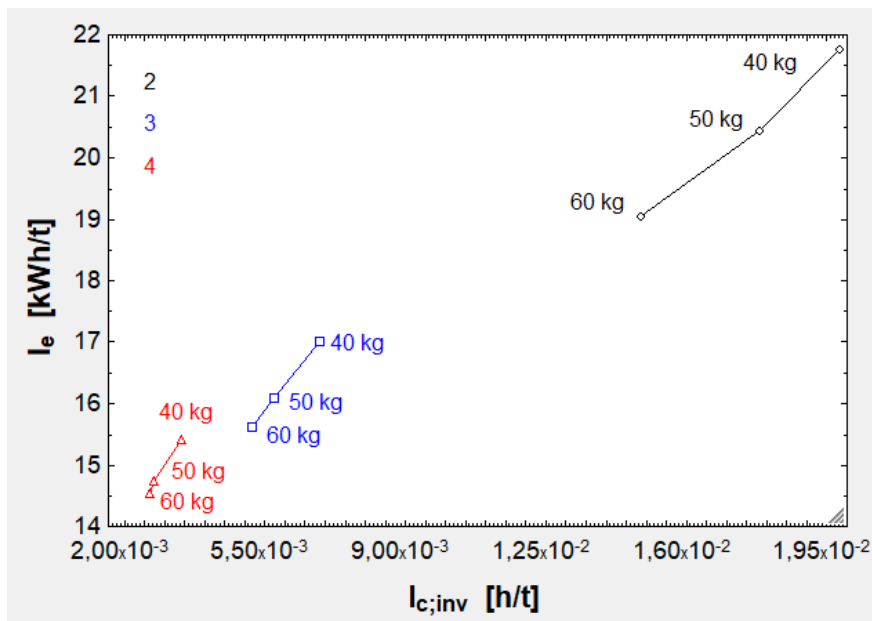


Fig. 11.30. Curva $I_e - I_c^{-1}$ con variación de m_{pzs} .

En suma, en la parte (a) figura [11.25] se observa cómo se desploma e'_t al aumentar m_{pzs} , ya que n_{caj} decrece poco al readaptarse la configuración del tren. En la parte (b) se ve la linealidad de E_{ac} y E_{gen} y cómo el valor absoluto de la segunda es menor que

E_{ac} por culpa de las pérdidas (resistencia al avance y pérdidas del LIM). En la parte (c) se aprecia cómo E'_t es lineal con m_{tot} , lo cual se debe a que E_{ac} , que escala con m_{tot} , es muy influyente en E'_t . En la gráfica (a) de la figura [11.26] se percibe la caída de E'_t con L_t , que es debido a la pérdida de importancia relativa de E_{ac} frente a E_v . En la parte (b) se aprecia la gran caída de e'_t con L_t , sobre todo al pasar de 200 a 350 km y de 2 a 3 filas de cajas. En la figura [11.27] se ve cómo el mejor caso es el transporte con 4 filas y a 200 km, ya que la capacidad es grande e I_e experimenta una gran reducción. También es destacable el hecho de que algunos puntos de $n_{fc} = 3$ y $n_{fc} = 4$ quedan muy cercanos, por lo que una ruta $n_{fc} = 3$ de 200 km es mejor que una de $n_{fc} = 4$ de 350 km. En el gráfico [11.28] se ve cómo es mejor pasar de 1.000 a 1.100 km/h, que mejora bastante la capacidad e incrementa un poco el consumo, ya que subir de 1.100 a 1.200 km/h mejora poco la capacidad e incrementa mucho el consumo. Del [11.29] se desprende que llevar un 30 % menos de cajas empeora bastante los índices en la primera disposición, pero no tanto en las otras dos, que están preparados para llevar muchas cajas y admiten una mayor variación. Finalmente, en el [11.30] se aprecia cómo los mejores datos se obtienen cuando se transportan cajas de 60 kg, a pesar de la ligera disminución de n_{caj} .

11.2. Segunda geometría

Primero se van a hallar los valores de R_t para $1 < a_c < 9,81 \text{ m/s}^2$, valores no muy elevados para que no afecten demasiado a los cojinetes (se considera no afecta al LIM porque está adaptado a la curva y el deslizador permanece centrado respecto al estátor). Se utiliza exclusivamente $n_{fc} = 4$, ya que soporta mayor carga que $n_{fc} = 2$ o $n_{fc} = 3$.

1.30	1 a_c [m/s ²]	2 v [km/h]	3 R_t [km]
Run 1	1,00	1.000	77,16
Run 2	1,00	1.100	93,36
Run 3	1,00	1.200	111,11
Run 4	2,00	1.000	38,58
Run 5	2,00	1.100	46,68
Run 6	2,00	1.200	55,56
Run 7	3,00	1.000	25,72
Run 8	3,00	1.100	31,12
Run 9	3,00	1.200	37,04
Run 10	4,00	1.000	19,29
Run 11	4,00	1.100	23,34
Run 12	4,00	1.200	27,78
Run 13	5,00	1.000	15,43
Run 14	5,00	1.100	18,67
Run 15	5,00	1.200	22,22
Run 16	6,00	1.000	12,86
Run 17	6,00	1.100	15,56
Run 18	6,00	1.200	18,52
Run 19	7,00	1.000	11,02
Run 20	7,00	1.100	13,34
Run 21	7,00	1.200	15,87
Run 22	8,00	1.000	9,65
Run 23	8,00	1.100	11,67
Run 24	8,00	1.200	13,89
Run 25	9,00	1.000	8,57
Run 26	9,00	1.100	10,37
Run 27	9,00	1.200	12,35
Run 28	9,81	1.000	7,87
Run 29	9,81	1.100	9,52
Run 30	9,81	1.200	11,33

Tabla 11.46. R_t para varias combinaciones $a_c - v$.

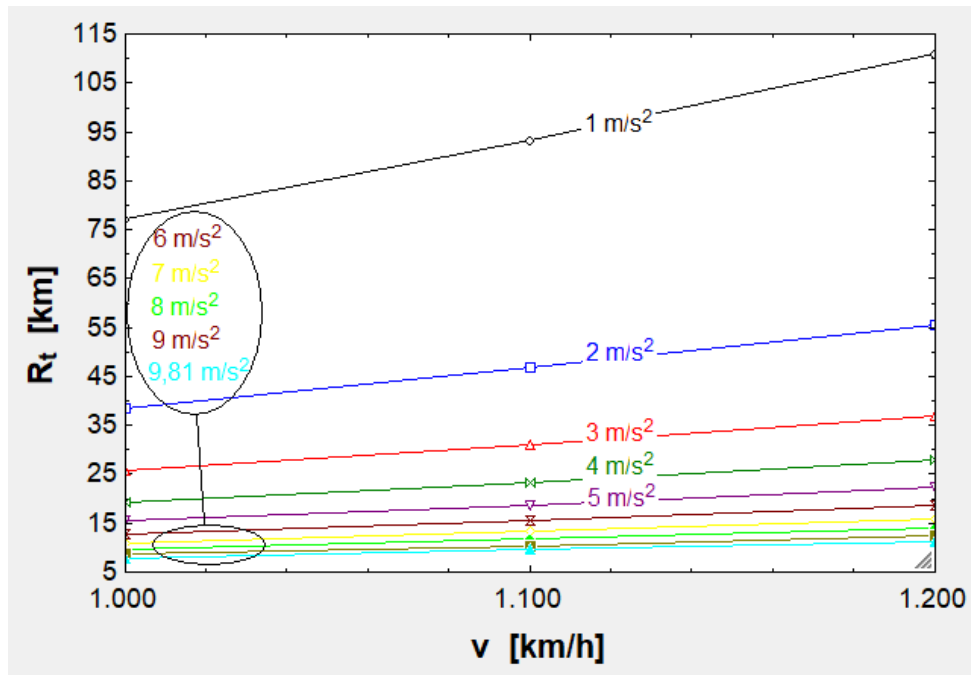


Fig. 11.31. R_t en función de v para varios valores de a_c .

Para la simulación del comportamiento de los cojinetes se toman estos valores iniciales:

Tipo de rodamiento	$i = 1$	$i = 2$
η_{ia} [-]	0,70	0,50
Δp_{ia} [%]	0,20	0,40
C_{iL} [-]	0,08	0,12
h_{i1} [μm]	1.175	1.420
h_{i2} [μm]	375	625
$\Delta \bar{h}_i$ [μm]	100	250
c_{ia} [m/s]	175	125

Tabla 11.47. Valores de los parámetros de partida de los cojinetes para su simulación.

1..10	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	a_c [m/s ²]	p_{1a} [Pa]	$p_{1a,S}$ [Pa]	p_{2a} [Pa]	$p_{2a,S}$ [Pa]	F_{1v} [N]	F_{2v} [N]	P_v [W]	R_{1a} [N/m]	R_{2a} [N/m]
Run 1	1,00	36.952	29.561	41.235	24.741	278,65	245,80	167.534	9,447E+06	4,7E+06
Run 2	2,00	40.364	32.292	36.550	21.930	289,43	231,13	166.288	1,032E+07	4,2E+06
Run 3	3,00	43.779	35.023	31.868	19.121	300,21	216,46	165.047	1,119E+07	3,7E+06
Run 4	4,00	47.196	37.757	27.188	16.313	311,00	201,80	163.812	1,207E+07	3,1E+06
Run 5	5,00	50.617	40.494	22.510	13.506	321,80	187,15	162.582	1,294E+07	2,6E+06
Run 6	6,00	54.043	43.234	17.833	10.700	332,62	172,50	161.357	1,382E+07	2,1E+06
Run 7	7,00	57.475	45.980	13.155	7.893	343,46	157,85	160.139	1,469E+07	1,5E+06
Run 8	8,00	60.916	48.733	8.477	5.086	354,32	143,19	158.929	1,557E+07	9,8E+05
Run 9	9,00	64.368	51.495	3.795	2.277	365,23	128,53	157.727	1,646E+07	4,4E+05
Run 10	9,81	67.181	53.745	0	0	374,11	116,64	156.767	1,718E+07	5,4E-05

11	12	13	14	15
\dot{m}_{1a} [kg/s]	\dot{m}_{2a} [kg/s]	\dot{m}_a [kg/s]	\dot{m}_{tob} [kg/s]	$\dot{m}_{C,1}$ [kg/s]
0,17	0,17	0,34	0,07	0,42
0,19	0,15	0,34	0,08	0,42
0,20	0,13	0,34	0,08	0,42
0,22	0,11	0,33	0,08	0,42
0,24	0,09	0,33	0,09	0,42
0,25	0,07	0,33	0,09	0,42
0,27	0,05	0,32	0,09	0,42
0,28	0,04	0,32	0,10	0,42
0,30	0,02	0,32	0,10	0,42
0,31	0,00	0,31	0,10	0,42

Tabla 11.48. p_{1a} , p_{1aS} , F_{1v} , P_v , R_{1a} , \dot{m}_{1a} , \dot{m}_a , \dot{m}_{tob} y $\dot{m}_{C,1}$ en función de a_c y de las entradas de la tabla anterior.

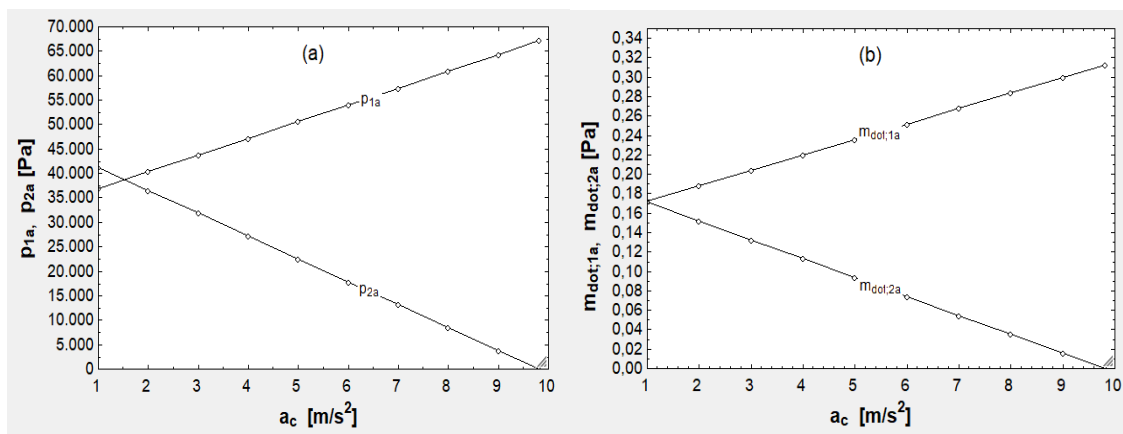


Fig. 11.32. (a) p_{1a} y p_{2a} en función de a_c . (b) \dot{m}_{1a} y \dot{m}_{2a} en función de a_c .

1.10	1	2	3	4	5	6	7	8
	a_c [m/s ²]	m_{tot} [kg]	E_{ac} [kWh]	E_{gen} [kWh]	E_v [kWh]	I_e [kWh/t]	E'_t [kWh/km]	e'_t [kWh/tkm]
Run 1	1,00	76.094	1.541,14	-754,69	45,28	14,68	4,77	7,34E-02
Run 2	2,00	76.083	1.540,92	-754,59	44,83	14,66	4,76	7,33E-02
Run 3	3,00	76.077	1.540,80	-754,53	44,38	14,65	4,76	7,32E-02
Run 4	4,00	76.077	1.540,79	-754,53	43,94	14,64	4,76	7,32E-02
Run 5	5,00	76.082	1.540,89	-754,58	43,51	14,64	4,76	7,32E-02
Run 6	6,00	76.093	1.541,11	-754,70	43,08	14,64	4,76	7,32E-02
Run 7	7,00	76.112	1.541,48	-754,88	42,66	14,66	4,76	7,33E-02
Run 8	8,00	76.138	1.542,02	-755,15	42,24	14,69	4,77	7,34E-02
Run 9	9,00	76.177	1.542,79	-755,53	41,83	14,73	4,79	7,37E-02
Run 10	9,81	76.223	1.543,73	-756,00	41,50	14,79	4,81	7,39E-02

Tabla 11.49. m_{tot} , E_{ac} , E_{gen} , E_v , I_e , E'_t y e'_t según a_c .

En compendio, en la figura [11.31] se observa cómo cae R_t a medida que se maximiza a_c . R_t cae bastante al pasar de 1 a 2 m/s² y de 2 a 3 m/s², pero después varía poco. Tampoco varía mucho con v , ya que el rango de v es relativamente estrecho. En la tabla [11.46] se han tomado unos valores para la simulación, teniendo en cuenta que los cojinetes más próximos al tubo mejoran sus prestaciones al tener un hueco de aire más estrecho. En la parte (a) de la gráfica [11.32] se ve cómo p_{1a} se equipara con p_{2a} entre 1 y 2 m/s², lo cual es interesante porque ambas son mínimas. En la parte (b) se ve que \dot{m}_{ia} sigue el comportamiento de p_{ia} , dado que hay una relación de proporcionalidad entre ambas. Se aprecia que la suma de \dot{m}_{1a} y \dot{m}_{2a} es bastante constante, sin haber grandes diferencias. Por último, en la tabla [11.48] se ve cómo los consumos permanecen casi invariantes en todos los casos. La masa varía un poco porque las necesidades de refrigerante y de baterías van variando de caso en caso. Consecuentemente, I_e apenas sí se ve afectado.

11.3. Tercera geometría

Se va a simular para varias inclinaciones teniendo en cuenta todos los datos de partida recopilados hasta el final del subapartado [11.1.8].

1.21	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	n_{fc} [-]	n_{caj} [-]	α [°]	m'_{est} [kg/m]	m'_{LM} [kg/m]	m'_{EB} [kg]	m_a [kg]	m_{comp} [kg]	m_{mot} [kg]
Run 1	2	225	-15	115	24	500	28	1.600	130
Run 2	2	200	-10	115	24	500	28	1.600	130
Run 3	2	200	-5	115	24	500	28	1.600	130
Run 4	2	200	0	115	24	500	28	1.600	130
Run 5	2	200	5	115	24	500	28	1.600	130
Run 6	2	200	10	115	24	500	28	1.600	130
Run 7	2	225	15	115	24	500	28	1.600	130
Run 8	3	650	-15	130	30	650	34	1.900	190
Run 9	3	650	-10	130	30	650	34	1.900	190
Run 10	3	650	-5	130	30	650	34	1.900	190
Run 11	3	625	0	130	30	650	34	1.900	190
Run 12	3	650	5	130	30	650	34	1.900	190
Run 13	3	650	10	130	30	650	34	1.900	190
Run 14	3	625	15	130	30	650	34	1.900	190
Run 15	4	1.325	-15	145	36	800	40	2.200	250
Run 16	4	1.300	-10	145	36	800	40	2.200	250
Run 17	4	1.300	-5	145	36	800	40	2.200	250
Run 18	4	1.300	0	145	36	800	40	2.200	250
Run 19	4	1.300	5	145	36	800	40	2.200	250
Run 20	4	1.300	10	145	36	800	40	2.200	250
Run 21	4	1.325	15	145	36	800	40	2.200	250

10	11	12	13	14	15	16
m_{tot} [kg]	$E_{bat,t}$ [kWh]	E_{ac} [kWh]	E_{gen} [kWh]	E_v [kWh]	E'_t [kWh/km]	e'_t [kWh/tkm]
17.540	30,34	309,28	-196,47	-1.681,60	-7,69	-6,84E-01
15.981	29,52	295,57	-172,26	-1.026,59	-4,37	-4,37E-01
15.983	29,72	309,61	-165,43	-513,02	-1,70	-1,70E-01
15.984	29,79	323,73	-158,53	9,41	1,02	1,02E-01
15.983	29,72	337,82	-151,61	1.065,75	6,41	6,41E-01
15.981	29,52	351,76	-144,73	2.113,67	11,75	1,18E+00
17.540	30,34	401,19	-151,44	3.453,12	18,67	1,66E+00
41.186	66,55	726,25	-461,36	-3.948,48	-18,09	-5,56E-01
41.197	67,38	761,96	-444,06	-2.645,43	-11,30	-3,48E-01
41.203	67,88	798,15	-426,45	-1.321,37	-4,41	-1,36E-01
39.760	67,44	805,28	-394,34	24,53	2,51	8,05E-02
41.203	67,88	870,86	-390,82	2.749,69	16,49	5,07E-01
41.197	67,38	906,80	-373,09	5.450,82	30,26	9,31E-01
39.742	65,98	909,04	-343,14	7.824,05	42,28	1,35E+00
77.399	123,62	1.364,78	-867,02	-7.421,51	-34,00	-5,13E-01
76.107	123,83	1.407,62	-820,38	-4.888,56	-20,89	-3,21E-01
76.119	124,82	1.474,50	-787,85	-2.442,68	-8,16	-1,25E-01
76.123	125,15	1.541,74	-754,98	46,14	4,79	7,37E-02
76.119	124,82	1.608,82	-722,03	5.076,70	30,44	4,68E-01
76.107	123,83	1.675,20	-689,27	10.067,07	55,88	8,60E-01
77.399	123,62	1.770,38	-668,28	15.236,24	82,31	1,24E+00

Tabla 11.50. Efecto de α en los consumos. Se han colocado más cajas donde ha sido posible.

1.21	1 n_{fc} [-]	2 n_{caj} [-]	3 α [°]	4 m'_{est} [kg/m]	5 m'_{LIM} [kg/m]	6 m_{EB} [kg]	7 m_a [kg]	8 m_{comp} [kg]	9 m_{mot} [kg]
Run 1	2	225	-15	115	24	500	28	1.600	130
Run 2	2	200	-10	115	24	500	28	1.600	130
Run 3	2	200	-5	115	24	500	28	1.600	130
Run 4	2	200	0	115	24	500	28	1.600	130
Run 5	2	200	5	115	24	500	28	1.600	130
Run 6	2	200	10	115	24	500	28	1.600	130
Run 7	2	225	15	115	24	500	28	1.600	130
Run 8	3	650	-15	130	30	650	34	1.900	190
Run 9	3	650	-10	130	30	650	34	1.900	190
Run 10	3	650	-5	130	30	650	34	1.900	190
Run 11	3	625	0	130	30	650	34	1.900	190
Run 12	3	650	5	130	30	650	34	1.900	190
Run 13	3	650	10	130	30	650	34	1.900	190
Run 14	3	625	15	130	30	650	34	1.900	190
Run 15	4	1.325	-15	145	36	800	40	2.200	250
Run 16	4	1.300	-10	145	36	800	40	2.200	250
Run 17	4	1.300	-5	145	36	800	40	2.200	250
Run 18	4	1.300	0	145	36	800	40	2.200	250
Run 19	4	1.300	5	145	36	800	40	2.200	250
Run 20	4	1.300	10	145	36	800	40	2.200	250
Run 21	4	1.325	15	145	36	800	40	2.200	250

10 I_e [kWh/t]	11 I_c [t/h]	12 $I_{c,inv}$ [h/t]
-136,75	63,05	1,59E-02
-87,38	56,04	1,78E-02
-33,91	56,04	1,78E-02
20,44	56,04	1,78E-02
128,17	56,04	1,78E-02
235,02	56,04	1,78E-02
331,84	63,05	1,59E-02
-111,29	182,14	5,49E-03
-69,54	182,14	5,49E-03
-27,13	182,14	5,49E-03
16,09	175,13	5,71E-03
101,46	182,14	5,49E-03
186,21	182,14	5,49E-03
270,59	175,13	5,71E-03
-102,64	371,28	2,69E-03
-64,27	364,28	2,75E-03
-25,10	364,28	2,75E-03
14,74	364,28	2,75E-03
93,67	364,28	2,75E-03
171,95	364,28	2,75E-03
248,48	371,28	2,69E-03

Tabla 11.51. Efecto de α en los índices.

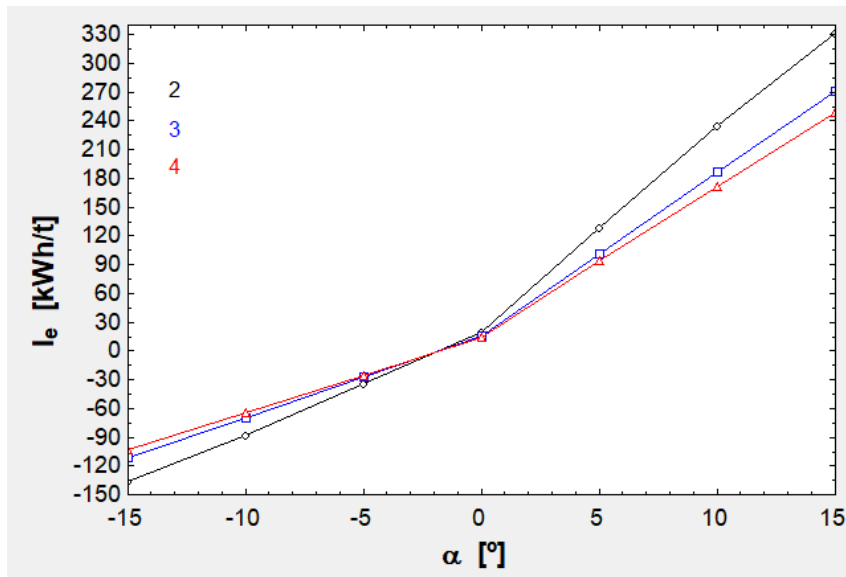


Fig. 11.33. I_e en función de α .

En compendio, en la tabla [11.49] se puede ver cómo aumenta E'_t cuando α lo hace y cómo es cada vez más negativo (se genera energía) cuanto más negativo es α . También es notable cómo la pendiente positiva incrementa E_{ac} (la componente F_{gx} puede verse como un incremento del peso del tren) y cómo la negativa lo reduce respecto a los 0° . Además, para los casos de $\pm 15^\circ$ en $n_{fc} = 2$, $n_{fc} = 3$ y $n_{fc} = 4$ y de $\pm 10^\circ$ en $n_{fc} = 3$ ha sido posible agregar 25 cajas porque los rodamientos soportan una carga menor ($m_{tot}g\cos\alpha$, para $\pm 15^\circ$ el coseno vale 0,97 y para $\pm 10^\circ$ es 0,98). Finalmente, en la gráfica [11.33] se aprecia cómo a ángulos positivos y grandes se da una gran diferencia entre las tres disposiciones, mientras que a ángulos negativos y con gran valor absoluto esta diferencia es menor. Esto es debido a que al consumir energía el parámetro η_{LIM} se encuentra en el denominador de E_v (término mucho más influyente que E_{ac} a partir de $\pm 5^\circ$, aunque empieza a serlo un poco antes) y al generar energía η_{LIM} está en su numerador.

12. Determinación del diseño final del segundo modelo

Para determinar el diseño final se van a tomar las gráficas más relevantes, que muestran las tendencias más importantes. Además, se va a plantear el diseño final en función de cada geometría, tal como se hizo en el capítulo [10].

12.1. Primera geometría

Para comenzar, en la gráfica [11.2] se aprecia que δ_{comp} no será muy influyente cuando $M \approx 1$. Un buen valor para mantener una buena resistencia estructural (que se cumpla la función de carcasa) puede ser 12,50 mm. Respecto a la velocidad, en la siguiente gráfica, que es la [11.3], se indica en un óvalo verde el rango de interés:

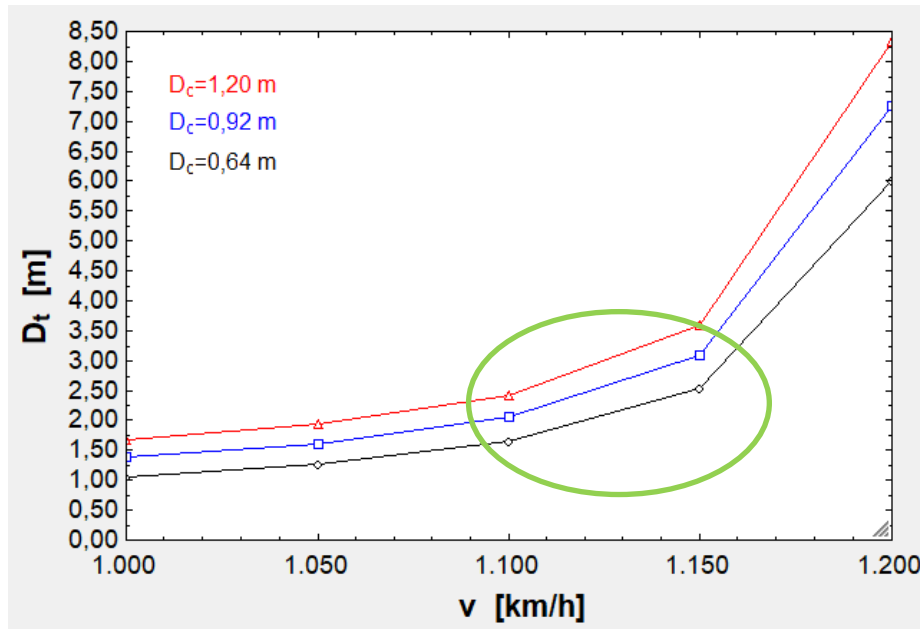


Fig. 12.1. Determinación de la zona de interés de la figura [11.3].

Por encima de 1.150 km/h D_t crece muy rápido, por lo que no conviene el rango 1.150-1.200 km/h. En la gráfica [11.4] se ve que por debajo de 1.150 km/h las variaciones de temperatura no afectan mucho, sobre todo si se trabaja en un entorno de 15 ± 20 °C (a 1.150 km/h sí que aumenta de manera más considerable D_t al enfriarse el tubo, mas no al calentarse). Otro factor decisivo para la elección de v es F_D , que se ve muy incrementada a bajas velocidades porque el D_t requerido para superar el límite de Kantrowitz es pequeño y la obstrucción que causa la cápsula es importante (se alcanza un gran T_f). En la gráfica [11.5] se ve esto último. Respecto a F_v , este factor no es decisivo porque le afecta poco v (F_v depende linealmente de v en un solo término porque también está el término de salto de presión correspondiente a flujo de Poiseuille). Para la selección de v también habrán de considerarse los índices. A continuación se muestra el gráfico [11.28] con la zona de interés rodeada con el mismo óvalo:

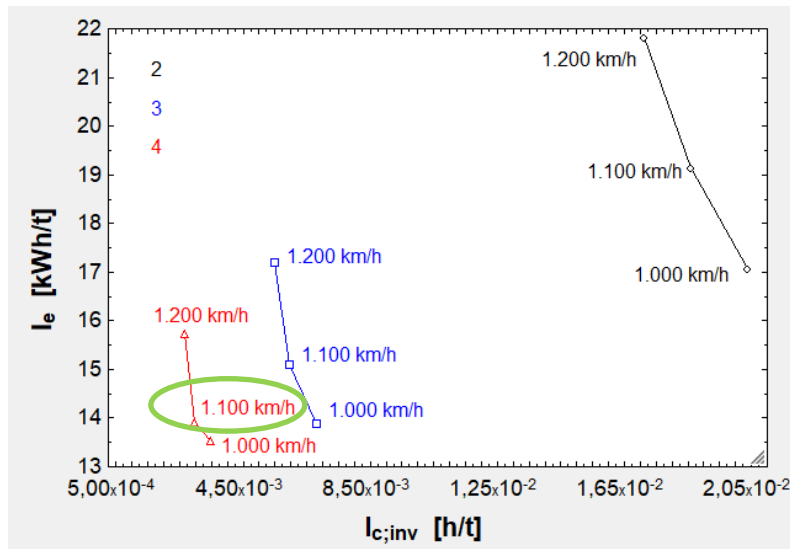


Fig. 12.2. Determinación de la zona de interés de la figura [11.28].

Donde se ve que pasar de 1.100 km/h a 1.200 km/h no mejora tan apenas la capacidad, es decir, apenas reduce el tiempo por tonelada transportada, a pesar del incremento de carga debido a la mayor disponibilidad de flujo másico a 1.200 km/h.

En definitiva, una velocidad que satisfaga todos los requisitos puede ser 1.125 km/h, por tanto se escogerá esta. Además, es acertado desde un punto de vista meramente cinemático porque en la figura [11.6] se ve que la variación de v en el rango considerado no modifica apenas t_{tot} para ninguna L_t .

Lo siguiente que debe elegirse D_c , para lo cual hay que ver cuántas filas de cajas conviene disponer de acuerdo a la curva $I_e - I_c^{-1}$. La curva se presentará posteriormente en función de las tres L_t posibles y al final se elegirá n_{fc} y L_t . Puesto que ya se sabe que $n_{fc} = 2$ es el peor caso en la curva $I_e - I_c^{-1}$, se va a descartar.

Antes de presentar la información susodicha, conviene fijar otros parámetros como δ_{rc} , un factor que también influirá en \dot{m}_{C_1} y para el cual interesa que δ_{rc} sea grande. Si antes se estaba considerando $\delta_{rc} = 3,50$ cm, ahora se puede considerar que se empieza con $\delta_{rc} = 3,50$ cm cuando $n_{fc} = 3$ y que al aumentar n_{fc} en 1 δ_{rc} se incrementa en 0,50 cm.

Respecto a p_t , T_t y $C_{D_{ext}}$; p_t se puede tomar como 100 Pa, teniendo así una buena F_D , puesto que vale unos 120 N a 100 Pa y 1.125 km/h para 4 filas más o menos (interpolación de la tabla [11.4]). Para T_t se puede estimar 15 °C como media de una distribución de 15 ± 20 °C. Y $C_{D_{ext}}$ puede considerarse 0,68, dado que es más complicado dar una forma aerodinámicamente bondadosa a un tren con compresor frontal que a uno sin compresor.

Otros factores relevantes son e_{bat} , τ_1 y τ_2 . El primero puede seleccionarse como 250 Wh/kg, ya que es imperioso reducir la masa de las baterías, sobre todo para $\eta_{\text{fc}} \geq 4$ y se en la gráfica [11. 17] ve que 250 Wh/kg es buen valor para ello. Para τ_1 y τ_2 pueden ser razonables valores de 10 y 20 %, respectivamente. En la tabla [11.22] y en la gráfica [11.24] se ve que suponen un aumento de peso mínimo respecto a valores más bajos.

η_{bat} y η_{mot} son factores menos influyentes (sobre todo η_{bat} , como se ve en la tabla [9.20]). El efecto de η_{mot} es visible en la figura [11.16]. Para ambos puede tomarse 0,92, que es un valor viable para la carga de las baterías de iones de litio actuales y para un motor eléctrico rotativo de la actualidad.

C es otro parámetro menos influyente, aunque tendrá su importancia cuando haya varias filas (alto consumo). En la tabla [11.21] se ve que la diferencia que supone un C alto o bajo en $m_{\text{bat}_{\text{tot}}}$ es de 100 kg. Se va a asumir $C = 36 \%$, el valor de Musk como se demostró en el subapartado [11.1.3].

η_{LIM} es uno de los aspectos más importantes de cara al consumo, como se colige de la figura [9.15] con η_{EDS} . Se puede tomar como 0,73 si se considera que es un LIM mejorado, al igual que en el subapartado [10.1] se consideró un EDS mejorado. Además de esto, y dado que el LIM se ha modelado igual que el EDS, se utilizan los valores optimizados para el EDS: $R_1 = 8 \Omega$, $\varphi = 10^\circ$, $\gamma_0 = 30^\circ$

η_{C_1} y η_{C_2} pueden considerarse iguales y se puede tomar 0,75, un valor aceptable para compresores axiales. En la figura [11.14] se ve que a grandes potencias es relevante pasar de 0,72 a 0,75.

η_a es un factor que no influye demasiado en el rango $0,60 < \eta_a < 0,70$ (grafo [11.7]), por lo que puede tomarse sin problemas 0,60. Este rendimiento se deberá a que hay una Δp_a y a un área efectiva de presurización menor que la nominal. Es razonable suponer $\Delta p_a = 30 \%$, valor que se aparejó a $\eta_a = 0,60$ en la tabla [11.7].

C_L puede tomarse 0,10, un valor para el cual no se necesitan cojinetes con una excesiva rigidez (figura [11.9]). Además, con inclinaciones tan bajas como $0,05^\circ$, los valores de C_L no pueden ser muy altos.

Para h_1 y h_2 se toman los valores de Musk: 0,50 y 1,3 mm, respectivamente. Funcionan bien y el cambiarlos prácticamente no afecta a al binomio $F_v - P_v$ ni a \dot{m}_a (gráfica [11.10]). La variación media de estos parámetros, o sea, $\Delta \bar{h}$, se estima en 200 μm o 2 mm para que la rigidez requerida no sea muy alta (gráfica [11.10]). En este grafo se ve que a partir de 2 mm la mejora (reducción de R_a , que es lo que interesa para que los cojinetes no sean demasiado costosos) es pequeña.

c_a puede mantenerse en 150 m/s, ya que es un factor que puede llegar a afectar demasiado (tabla [11.12]) y mantenerlo en ese valor es una solución intermedia de cara al cálculo de \dot{m}_a .

La interdistancia d se elige como 10 cm, ya que es conveniente que un cojinete no interfiera con el siguiente. Este parámetro no afecta casi nada a n_a (tabla [11.9]).

Con respecto a w_{LIM} y q , es razonable tomar diversos valores para w_{LIM} según n_{fc} . Así pues, para $n_{fc} = 3$ se emplea 0,50 m, el valor de Musk. Al incrementar n_{fc} en 1, es razonable incrementar w_{LIM} en 0,03 m porque las necesidades de propulsión locales son mayores. El impacto de esto en w será despreciable, ya que w depende fuertemente de q y de D_c , tal como se desprende de la figura [11.6], de donde también se desprende que aumentar w es beneficioso para rebajar p_a . Finalmente, se va a tomar el 45 %, que es un valor razonable para permitir una buena carga y descarga del vehículo.

En relación a L , conforme crece n_{fc} su disminución maximiza S (figura [11.11]). Para $n_{fc} = 3$ se obtuvo $L = 1,75$ m como el valor que optimiza S (esto reduce n_a respecto a $L = 1,50$ m, p_a cae y \dot{m}_a también). Para $n_{fc} = 4$ se obtuvo $L = 1,50$ m. Para $n_{fc} > 4$ no es conveniente bajar más L porque n_a crece bastante, lo que provoca un incremento de \dot{m}_a , a pesar del ligero incremento de S y del ligero decremento de p_a que esto trae consigo. Por tanto, es razonable usar $L = 1,75$ m para $n_{fc} = 3$ y $L = 1,50$ m, el valor de Musk, para $n_{fc} \geq 4$.

T_a es otro parámetro de los rodamientos que debe fijarse. Un buen valor puede ser 460 K, ya que el binomio $F_v - P_v$ se ve muy poco afectado al pasar de 400 a 460 K (tabla [11.11]) y se puede reducir ligeramente V_I y V_{III} (tabla [11.33]). A 460 K el parámetro $\mu_a(T_a)$ vale $2,57 \cdot 10^{-5}$ Pa · s según la primera tabla mencionada. Este incremento de 60 K también contribuye a la reducción de \dot{m}_a (ρ_{aS} se ve decrementada).

En cuanto a T_2 , subir esta temperatura no aumenta significativamente P_{C_2} (tabla [11.19]), reduce un poco Δp_{tub} (F_{tob} crece como consecuencia, como se aprecia en la gráfica [11.19]) y V_I y V_{III} se reducen también (figura [11.23]). Un buen valor es, por tanto, 350 K, ya que D_{tub} apenas aumentará (tabla [11.25]).

El parámetro ΔT_s es fundamental para el dimensionado de los tanques de agua. En la figura [11.23] se observa cómo su aumento de 10 en 10 °C provoca un gran descenso en V_I y V_{III} . Un buen valor puede ser 89 °C. Es decir, el agua se mantendrá en el depósito V_I , adiabático, a 10 °C. Por ende, ΔT_{I_1} (influencia en la tabla [11.30]) valdrá exactamente 90 °C (desde 10 °C hasta el punto de ebullición).

p_1 es otro parámetro de relevancia para varios frentes: Desde el punto de vista de los compresores, al incrementar p_1 crece T_1 y P_{C_1} , bajando P_{C_2} (acúdase a la tabla [11.18])

y figura [11.15] para ver los datos). Estas dos últimas potencias se igualan cuando $1.000 < p_1 < 2.000$ Pa para $n_{fc} = 2$, aunque en las otras disposiciones se igualan por debajo de 1.000 Pa, como se ve en dicha figura. Desde el punto de vista de la tobera, al aumentar p_1 decae Δp_{tub} relativa y crece p_{tob} , aumentando el empuje que genera (sobre todo al pasar de 1.000 a 2.000 Pa, figura [11.18]). Desde la perspectiva de la tubería, D_{tub} cae a altas p_1 , como se observa en la tabla [11.24]. Un valor que satisface a todos los frentes es 2.100 Pa, el valor aportado por Musk.

p_e es otro parámetro de interés de la tobera. Si $p_e > p_t$ se consigue un sobreempuje. En la figura [11.21] se ve que al subir de 100 a 150 Pa se aprecia una mejora, pero después esta mejora se estanca. Al final se elige 125 Pa, valor que apenas afectará al vacío del tubo.

η_{tob} modifica en pequeña medida F_{tob} de acuerdo a la tabla [11.28]. Cuanto mayor sea η_{tob} , menores ángulos de convergencia y divergencia tendrá la tobera (tobera más larga y pesada), por lo que se va a escoger 0,80 como valor, que permite una tobera más corta y ligera y sigue estando cerca de 0,90, valor correspondiente a algunas toberas industriales.

Para la tubería a la tobera se selecciona una tubería de latón, que presenta una baja ε_{tub} , concretamente de 150 μm [39]. Se supone que el fluido fluirá a $c_{tub} = 1.125$ km/h, ya que su frenado en el compresor supondría el alza de P_{C_1} . A pesar de esto, en la tabla [11.26] se observa el importante efecto de aminorar c_{tub} en Δp_{tub} , pero no compensa el incremento de P_{C_1} (habría que tener en cuenta las variables de remanso en la fórmula para su cálculo) y de las consiguientes baterías. En dicha tubería se tendrá $\mu_{tub} = 2,10 \cdot 10^{-5}$ Pa \cdot s a 350 K [39].

Con respecto a las aceleraciones, se considera $a_1 = 1,50g = 14,72$ m/s² = a_2 para que no haya partes del estátor preparadas para trasegar una mayor potencia.

Con respecto a las longitudes, δ_{lc} puede valer 4 cm, ya que hace las funciones de aislante térmico y de vibraciones. Es plausible que L_{bat} valga 1,50 m para $n_{fc} = 3$ y que aumente en 0,30 m al subir n_{fc} en 1 unidad. También es plausible que L_{aux} comience en 5,50 m (los compresores axiales ocupan una gran longitud porque en cada etapa comprimen menos que los centrífugos) y que escale de 0,75 m en 0,75 m.

Por último, se va a seleccionar $m_{pzs} = 60$ kg, dado que en la gráfica [11.30] se vio que transportar cajas de 60 kg es lo más conveniente.

A continuación, la tabla y su correspondiente gráfica. Para $n_{fc} > 4$ se ha considerado que las masas se escalan siguiendo la tendencia de la tabla [11.38]. Es decir, se ha hecho una extrapolación.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1.18	n_{fc} [-]	n_{caj} [-]	L_t [km]	L_{aux} [m]	L_{bat} [m]	L [m]	w_{LIM} [m]	δ_{rc} [m]	m'_{est} [kg/m]	m'_{LIM} [kg/m]	m_{EB} [kg]	m_a [kg]	m_{comp} [kg]	m_{mot} [kg]
Run 1	3	925	200	5,50	1,50	1,75	0,50	3,50E-02	130	30	650	34	1.900	190
Run 2	3	925	350	5,50	1,50	1,75	0,50	3,50E-02	130	30	650	34	1.900	190
Run 3	3	900	500	5,50	1,50	1,75	0,50	3,50E-02	130	30	650	34	1.900	190
Run 4	4	1.475	200	6,25	1,80	1,50	0,53	4,00E-02	145	36	800	40	2.200	250
Run 5	4	1.450	350	6,25	1,80	1,50	0,53	4,00E-02	145	36	800	40	2.200	250
Run 6	4	1.425	500	6,25	1,80	1,50	0,53	4,00E-02	145	36	800	40	2.200	250
Run 7	5	2.350	200	7,00	2,10	1,50	0,56	4,50E-02	160	42	950	46	2.500	310
Run 8	5	2.325	350	7,00	2,10	1,50	0,56	4,50E-02	160	42	950	46	2.500	310
Run 9	5	2.300	500	7,00	2,10	1,50	0,56	4,50E-02	160	42	950	46	2.500	310
Run 10	6	3.450	200	7,75	2,40	1,50	0,59	5,00E-02	175	48	1.100	46	2.500	370
Run 11	6	3.400	350	7,75	2,40	1,50	0,59	5,00E-02	175	48	1.100	52	2.800	370
Run 12	6	3.350	500	7,75	2,40	1,50	0,59	5,00E-02	175	48	1.100	52	2.800	370
Run 13	7	4.725	200	8,50	2,70	1,50	0,62	5,50E-02	190	54	1.250	58	2.800	430
Run 14	7	4.675	350	8,50	2,70	1,50	0,62	5,50E-02	190	54	1.250	58	2.800	430
Run 15	7	4.600	500	8,50	2,70	1,50	0,62	5,50E-02	190	54	1.250	58	3.100	430
Run 16	8	6.200	200	9,25	3,00	1,50	0,65	6,00E-02	205	60	1.400	64	3.100	490
Run 17	8	6.125	350	9,25	3,00	1,50	0,65	6,00E-02	205	60	1.400	64	3.100	490
Run 18	8	6.075	500	9,25	3,00	1,50	0,65	6,00E-02	205	60	1.400	64	3.100	490

15	16	17	18	19	20	21
m_{tot} [kg]	L_c [m]	D_c [m]	D_t [m]	I_e [kWh/t]	I_c [t/h]	$I_{c,inv}$ [h/t]
65.468	32,83	0,92	2,94	12,26	302,16	3,31E-03
66.027	32,83	0,92	2,94	13,88	175,07	5,71E-03
64.896	32,08	0,92	2,94	15,58	119,91	8,34E-03
100.399	31,38	1,21	3,43	12,07	481,83	2,08E-03
99.752	30,88	1,21	3,43	13,90	274,44	3,64E-03
99.201	30,63	1,21	3,43	15,77	189,86	5,27E-03
155.424	32,68	1,50	3,88	11,77	767,66	1,30E-03
155.499	32,43	1,50	3,88	13,55	440,05	2,27E-03
155.576	32,18	1,50	3,88	15,38	306,43	3,26E-03
223.823	34,23	1,80	4,31	11,57	1.126,99	8,87E-04
223.718	33,98	1,80	4,31	13,38	643,52	1,55E-03
223.041	33,73	1,80	4,31	15,20	446,33	2,24E-03
303.767	35,53	2,09	4,71	11,49	1.543,49	6,48E-04
304.048	35,28	2,09	4,71	13,27	884,84	1,13E-03
303.030	34,78	2,09	4,71	15,11	612,87	1,63E-03
395.695	36,58	2,38	5,10	11,43	2.025,32	4,94E-04
395.555	36,33	2,38	5,10	13,22	1.159,28	8,63E-04
396.966	36,08	2,38	5,10	15,05	809,39	1,24E-03

Tabla 12.1. Tabla que incorpora todos los valores dichos (n_{caj} ajustado para $\dot{m}_{tob} \approx 0$). Cálculo para cada caso de I_e , I_c e I_c^{-1} . Valores de m_{tot} , L_c , D_c , D_t de referencia.

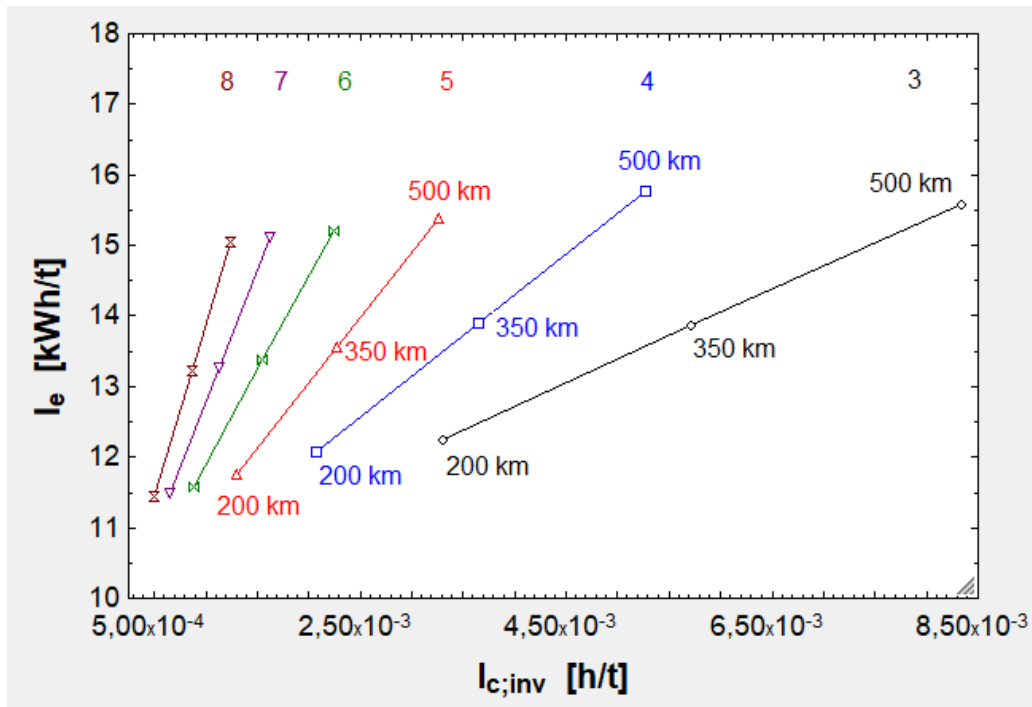


Fig. 12.3. Gráfico $I_e - I_c^{-1}$ con los datos de la tabla.

En el gráfico se ve cómo pasar de 3 a 4 filas supone una gran ventaja. Al pasar de 4 a 5 filas se obtiene una ventaja menor, ya que el aumento de capacidad tiene una menor importancia frente a la capacidad total. Las curvas para $n_{fc} = 6, 7$ y 8 son casi iguales en capacidad y en consumo, por lo que al ir de una a la siguiente no se obtienen ventajas sustanciales. Por tanto, estas tres últimas se descartan.

Para decantarse por $n_{fc} = 3, 4$ o 5 hay que tener en cuenta que lo ideal es que el Hyperloop trabaje de manera continua, es decir, que vaya cargado, vuelva vacío y se vuelvan a enviar mercancías (teniendo en cuenta los tiempos muertos de carga y descarga). Así la empresa receptora de mercancías no tendrá que invertir en costes de almacenamiento. Los valores de I_c no tienen en cuenta la vuelta del tren vacío, por lo que la capacidad horaria real será más de 2 veces inferior para tener en cuenta esto y los tiempos muertos. Las empresas que puedan contar con una línea Hyperloop serán muy grandes, por lo que en primera aproximación se va a suponer que no se superarán las 100 t/h de tráfico. Si se dividen las 302,16 t/h de la primera entrada de la tabla por 2,50 se tiene 120,84 t/h. No tiene sentido que se sobredimensione el tren así, ya que la mayoría de las veces se demandará entre el 70 y el 95 % de 100 t/h. Por tanto, se reduce el número de cajas en un 27 % ($120,84 \cdot 0,83 = 100,30$ t/h). Además, así se podrá aprovechar bien la tobera al darse la condición de $\dot{m}_{tob} > 0$.

Por ende, se selecciona $n_{fc} = 3$, $L_t = 200$ km y $n_{caj} = 750$ (aproximación por lo bajo yendo de 25 en 25 cajas de $925 \cdot 0,83$, que son 768 cajas).

Introduciendo estos datos en el EES se obtiene la siguiente hoja de resultados:

$a_1 = 14,72 \text{ [m/s}^2\text{]}$	$a_2 = 14,72 \text{ [m/s}^2\text{]}$	$A_c = 0,66 \text{ [m}^2\text{]}$	$A_{cc} = 6,10 \text{ [m}^2\text{]}$
$A_t = 6,77 \text{ [m}^2\text{]}$	$A_{tub} = 1,29E-02 \text{ [m}^2\text{]}$	$\beta = 9,79E-02 \text{ [-]}$	$C = 36 \text{ [%]}$
$\bar{c}_{p,H2O1} = 2.212 \text{ [J/kg}\cdot\text{K]}$	$\bar{c}_{p,H2O2} = 4.186 \text{ [J/kg}\cdot\text{K]}$	$\bar{c}_{p,l,1} = 1.050 \text{ [J/kg}\cdot\text{K]}$	$\bar{c}_{p,l,2} = 1.073 \text{ [J/kg}\cdot\text{K]}$
$c_i = 0 \text{ [m/s]}$	$C_L = 0,10 \text{ [-]}$	$c_{tub} = 312,5 \text{ [m/s]}$	$d = 0,10 \text{ [m]}$
$\Delta T_{l,1} = 90 \text{ [K]}$	$\Delta T_{l,2} = 1.030 \text{ [K]}$	$\Delta T_s = 89 \text{ [K]}$	$\delta_1 = 0,77 \text{ [m}^2\text{]}$
$\delta_{sl} = 0,22 \text{ [m]}$	$D_c = 0,92 \text{ [m]}$	$D_{carga} = 0,85 \text{ [m]}$	$D_{comp} = 0,89 \text{ [m]}$
$\epsilon_{tub} = 1,50E-06 \text{ [m]}$	$\eta_a = 0,6 \text{ [-]}$	$\eta_{bat} = 0,92$	$\eta_{c,1} = 0,75 \text{ [-]}$
$E_1 = 48.846 \text{ [V]}$	$E_{ac} = 1.002,39 \text{ [kWh]}$	$e_{bat} = 250 \text{ [Wh/kg]}$	$E_{bat} = 69,86 \text{ [kWh]}$
$E_v = 28,02 \text{ [kWh]}$	$F_a = 529.051 \text{ [N]}$	$\bar{f}_{tub} = 5,15E-03 \text{ [-]}$	$F_D = 42,44 \text{ [N]}$
$F_x = 794.227 \text{ [N]}$	$g = 9,81 \text{ [m/s}^2\text{]}$	$\gamma = 1,40 \text{ [-]}$	$\gamma_1 = 1,38 \text{ [-]}$
$h_2 = 5,00E-04 \text{ [m]}$	$h_v = 2,26E+06 \text{ [J/kg]}$	$I_1 = 1.955,74 \text{ [A]}$	$I_c = 245,00 \text{ [t/h]}$
$l_2 = 0,25 \text{ [m]}$	$L_{ac} = 3,32 \text{ [km]}$	$L_{aux} = 5,50 \text{ [m]}$	$L_{bat} = 1,50 \text{ [m]}$
$L_{tub} = 22,50 \text{ [m]}$	$L_v = 193,37 \text{ [km]}$	$M = 0,92 \text{ [-]}$	$\mu_a = 2,57E-05 \text{ [Pa}\cdot\text{s]}$
$m_{comp} = 1.900 \text{ [kg]}$	$\dot{m}_a = 0,19 \text{ [kg/s]}$	$\dot{m}_{cc,m\acute{a}x} = 2,32 \text{ [kg/s]}$	$\dot{m}_{c,1} = 0,24 \text{ [kg/s]}$
$m_{r,bat} = 81,66 \text{ [kg]}$	$m_{EB} = 650 \text{ [kg]}$	$m_{H2O} = 368,49 \text{ [kg]}$	$m_{mot} = 190 \text{ [kg]}$
$m_{tot} = 53.930 \text{ [kg]}$	$n_a = 30 \text{ [-]}$	$n_{caj} = 750 \text{ [-]}$	$n_{caj,real} = 750 \text{ [-]}$
$p_1 = 2.100 \text{ [Pa]}$	$P_1 = 3,40E+08 \text{ [W]}$	$p_a = 40.325 \text{ [Pa]}$	$P_{av} = 123.475 \text{ [W]}$
$\bar{P}_{tob} = 895,3 \text{ [W]}$	$P_{C,1} = 124.392 \text{ [W]}$	$P_{C,2} = 116.316 \text{ [W]}$	$P_D = 13.261 \text{ [W]}$
$P_{tob} = 4.477 \text{ [W]}$	$P_v = 110.214 \text{ [W]}$	$q = 45 \text{ [%]}$	$R = 287 \text{ [J/kg}\cdot\text{K]}$
$\rho_{H2O} = 1.000 \text{ [kg/m}^3\text{]}$	$\rho_t = 1,21E-03 \text{ [kg/m}^3\text{]}$	$R_1 = 8,00 \text{ [\Omega]}$	$R_a = 3,65E+06 \text{ [N/m]}$
$\theta = 0,07 \text{ [m]}$	$T_1 = 790,6 \text{ [K]}$	$T_2 = 350 \text{ [K]}$	$T_3 = 919,68 \text{ [K]}$
$t_{dec} = 21,23 \text{ [s]}$	$t_{dec,h} = 5,90E-03 \text{ [h]}$	$t_{des} = 13,22 \text{ [min]}$	$t_{des,s} = 793,48 \text{ [s]}$
$T_t = 15 \text{ [}^\circ\text{C]}$	$t_{tot} = 11,02 \text{ [min]}$	$t_{tot,h} = 0,18 \text{ [h]}$	$t_{tot,s} = 661,2 \text{ [s]}$
$v = 1.125 \text{ [km/h]}$	$V_1 = 58.842 \text{ [V]}$	$\bar{v} = 1.089 \text{ [km/h]}$	$v_{conv} = 312,50 \text{ [m/s]}$
$w_{LIM} = 0,50 \text{ [m]}$	$X_1 = 5,22 \text{ [\Omega]}$		
$A_{comp} = 0,63 \text{ [m}^2\text{]}$	$A_e = 0,15 \text{ [m}^2\text{]}$	$A_f = 0,66 \text{ [m}^2\text{]}$	$a_s = 340,26 \text{ [m/s]}$
$c_a = 150 \text{ [m/s]}$	$\bar{c}_{p,c,1} = 1.045 \text{ [J/kg}\cdot\text{K]}$	$\bar{c}_{p,c,2} = 1.063 \text{ [J/kg}\cdot\text{K]}$	$\bar{c}_{p,H2O} = 4.186 \text{ [J/kg}\cdot\text{K]}$
$\bar{c}_{p,tob} = 1.010 \text{ [J/kg}\cdot\text{K]}$	$C_{D,ext} = 0,68 \text{ [-]}$	$C_{D,t} = 1,08 \text{ [-]}$	$c_e = 235,6 \text{ [m/s]}$
$\Delta h = 2,00E-04$	$\Delta p_a = 30 \text{ [Pa]}$	$\Delta p_L = 28.128 \text{ [Pa]}$	$\Delta p_{tub} = 1.964,03 \text{ [Pa]}$
$\delta_2 = 0,23 \text{ [m}^2\text{]}$	$\delta_{comp} = 1,25E-02 \text{ [m]}$	$\delta_{ic} = 4,00E-02 \text{ [m]}$	$\delta_{rc} = 3,50E-02 \text{ [m]}$
$D_{desp} = 1,35 \text{ [m]}$	$D_{movto} = 1,06 \text{ [m]}$	$D_t = 2,94 \text{ [m]}$	$D_{tub} = 0,13 \text{ [m]}$
$\eta_{c,2} = 0,75 \text{ [-]}$	$\eta_{LIM} = 0,73 \text{ [-]}$	$\eta_{mot} = 0,92 \text{ [-]}$	$\eta_{tob} = 0,80 \text{ [-]}$
$e_{bat,conv} = 900.000 \text{ [J/kg]}$	$E_{gen} = -533,77 \text{ [kWh]}$	$E_{r,t} = 2,83 \text{ [kWh/km]}$	$e_{r,t} = 6,29E-02 \text{ [kWh/tkm]}$
$F_L = 21.884 \text{ [N]}$	$F_S = 507.167 \text{ [N]}$	$F_{tob} = 14,33 \text{ [N]}$	$F_v = 352,68 \text{ [N]}$
$\gamma_2 = 1,37 \text{ [-]}$	$\gamma_o = 30 \text{ [}^\circ\text{]}$	$\gamma_{tob} = 1,40 \text{ [-]}$	$h_1 = 1,30E-03 \text{ [m]}$
$I_{c,inv} = 4,08E-03 \text{ [h/t]}$	$I_e = 12,59 \text{ [kWh/t]}$	$L = 1,75 \text{ [m]}$	$I_1 = 0,20 \text{ [m]}$
$L_c = 28,08 \text{ [m]}$	$L_{caj} = 21,00 \text{ [m]}$	$L_{dec} = 3,32 \text{ [km]}$	$L_t = 200 \text{ [km]}$
$\mu_{tub} = 2,10E-05 \text{ [Pa}\cdot\text{s]}$	$m_a = 34 \text{ [kg]}$	$m_{bat,tot} = 308,51 \text{ [kg]}$	$m_{caj} = 45.000 \text{ [kg]}$
$\dot{m}_{H2O} = 4,16E-02 \text{ [kg/s]}$	$\dot{m}_{H2O,s} = 0,51 \text{ [kg/s]}$	$\dot{m}_t = 2,557 \text{ [kg/s]}$	$\dot{m}_{tob} = 4,49E-02 \text{ [kg/s]}$
$m_{r,bat} = 226,84 \text{ [kg]}$	$m_{r,est} = 130 \text{ [kg/m]}$	$m_{r,LIM} = 30 \text{ [kg/m]}$	$m_{pzs} = 60 \text{ [kg]}$
$n_{fc} = 3 \text{ [-]}$	$n_s = 84 \text{ [-]}$	$\phi = 10 \text{ [}^\circ\text{]}$	$\psi = 1,00 \text{ [-]}$
$p_{a,s} = 28.228 \text{ [Pa]}$	$\bar{P}_{av} = 47.950 \text{ [W]}$	$\bar{P}_{C,1} = 120.398 \text{ [W]}$	$\bar{P}_{C,2} = 116.316 \text{ [W]}$
$p_e = 125 \text{ [Pa]}$	$p_{o,t} = 172,57 \text{ [Pa]}$	$p_t = 100 \text{ [Pa]}$	$p_{tob} = 136 \text{ [Pa]}$
$\bar{R}e_{tub} = 21.227 \text{ [-]}$	$\rho_{a,s} = 0,21 \text{ [kg/m}^3\text{]}$	$\bar{\rho}_{tub} = 1,11E-02 \text{ [kg/m}^3\text{]}$	$\rho_e = 1,27E-03 \text{ [kg/m}^3\text{]}$
$R_{av} = 395,12 \text{ [N]}$	$S = 20,96 \text{ [m}^2\text{]}$	$\tau_1 = 10 \text{ [%]}$	$\tau_2 = 20 \text{ [%]}$
$T_a = 460 \text{ [K]}$	$t_{ac} = 21,23 \text{ [s]}$	$t_{ac,h} = 5,90E-03 \text{ [h]}$	$t_d = 12,12 \text{ [min]}$
$t_{d,s} = 727,35 \text{ [s]}$	$T_e = 343,39 \text{ [K]}$	$T_f = 1,60 \text{ [-]}$	$T_{o,t} = 336,76 \text{ [K]}$
$T_{t,conv} = 288,15 \text{ [K]}$	$t_v = 10,31 \text{ [min]}$	$t_{v,h} = 0,17 \text{ [h]}$	$t_{v,s} = 618,77 \text{ [s]}$
$V_1 = 0,40 \text{ [m}^3\text{]}$	$V_{II} = 0,03 \text{ [m}^3\text{]}$	$V_{III} = 0,37 \text{ [m}^3\text{]}$	$w = 0,40 \text{ [m]}$

Fig. 12.4. Resultados para la primera geometría.

Es decir, se transportan 750 cajas o 45 t en 11 min. Después el tren se descarga, lo cual lleva 7,50 min. Hace el camino de vuelta vacío en 11 min y se carga en otros 7,50 min. En total, el ciclo es de 37 min. Por tanto, I_c real será, en base a la ecuación [8.106]:

$$I_{c_{real}} = \frac{45 t}{37 \text{ min}} = 1,22 \frac{t}{\text{min}} = 73 \frac{t}{h}$$

Que es una capacidad suficiente para dos empresas grandes, por lo que es aceptable. Las estimaciones anteriores de primera aproximación no son importantes, ya que tampoco se sabe cuál será la capacidad exacta.

Por tanto, la capacidad anual será, suponiendo que trabaja todos los días del año y a tiempo completo:

$$I_{c_{real}} = 639.480 \frac{t}{\text{año}}$$

No obstante, $\bar{\psi}$ será 0,83 (media entre 0,70 y 0,95), así que realmente se transportarán 530.768 t/año.

1 TEU equivale a 28.300 kg, por lo que el equivalente en TEU vale esto:

$$\frac{530.768 t}{28,30 t} = 18.755 \frac{TEU}{\text{año}}$$

Por último, cabe presentar los resultados cuando el tren retorna, es decir, cuando $\psi = 0$:

$a_1 = 14,72 \text{ [m/s}^2\text{]}$	$a_2 = 14,72 \text{ [m/s}^2\text{]}$	$A_c = 0,66 \text{ [m}^2\text{]}$	$A_{cc} = 6,10 \text{ [m}^2\text{]}$
$A_t = 6,77 \text{ [m}^2\text{]}$	$A_{tub} = 4,37E-02 \text{ [m}^2\text{]}$	$\beta = 9,79E-02 \text{ [-]}$	$C = 36 \text{ [%]}$
$\bar{c}_{p,H2O1} = 1.907 \text{ [J/kg-K]}$	$\bar{c}_{p,H2O2} = 4.186 \text{ [J/kg-K]}$	$\bar{c}_{p,l,1} = 1.050 \text{ [J/kg-K]}$	$\bar{c}_{p,l,2} = 1.035 \text{ [J/kg-K]}$
$c_i = 0 \text{ [m/s]}$	$C_L = 0,10 \text{ [-]}$	$c_{tub} = 312,5 \text{ [m/s]}$	$d = 0,10 \text{ [m]}$
$\Delta T_{l,1} = 90 \text{ [K]}$	$\Delta T_{l,2} = 24,69 \text{ [K]}$	$\Delta T_s = 89 \text{ [K]}$	$\delta_1 = 0,77 \text{ [m}^2\text{]}$
$\delta^{star} = 0,22 \text{ [m]}$	$D_c = 0,92 \text{ [m]}$	$D_{carga} = 0,85 \text{ [m]}$	$D_{comp} = 0,89 \text{ [m]}$
$\epsilon_{tub} = 1,50E-06 \text{ [m]}$	$\eta_a = 0,6 \text{ [-]}$	$\eta_{bat} = 0,92$	$\eta_{C,1} = 0,75 \text{ [-]}$
$E_1 = 19.519 \text{ [V]}$	$E_{ac} = 160,04 \text{ [kWh]}$	$e_{bat} = 250 \text{ [Wh/kg]}$	$E_{bat} = 37,13 \text{ [kWh]}$
$F_a = 84.406 \text{ [N]}$	$\bar{f}_{tub} = 4,15E-03 \text{ [-]}$	$F_D = 42,44 \text{ [N]}$	$F_L = 3.491 \text{ [N]}$
$g = 9,81 \text{ [m/s}^2\text{]}$	$\gamma = 1,40 \text{ [-]}$	$\gamma_1 = 1,38 \text{ [-]}$	$\gamma_2 = 1,39 \text{ [-]}$
$h_v = 2,26E+06 \text{ [J/kg]}$	$I_1 = 781,53 \text{ [A]}$	$L = 1,75 \text{ [m]}$	$I_1 = 0,20 \text{ [m]}$
$L_c = 28,08 \text{ [m]}$	$L_{caj} = 21,00 \text{ [m]}$	$L_{dec} = 3,32 \text{ [km]}$	$L_t = 200 \text{ [km]}$
$\mu_{tub} = 2,10E-05 \text{ [Pa-s]}$	$m_a = 34 \text{ [kg]}$	$m_{bat,tot} = 163,95 \text{ [kg]}$	$m_{caj} = 0 \text{ [kg]}$
$\dot{m}_{H2O} = 0,04 \text{ [kg/s]}$	$\dot{m}_{H2O_s} = 0,26 \text{ [kg/s]}$	$\dot{m}_t = 2,557 \text{ [kg/s]}$	$\dot{m}_{tob} = 0,21 \text{ [kg/s]}$
$m_{,bat} = 120,55 \text{ [kg]}$	$m_{,est} = 130 \text{ [kg/m]}$	$m_{,LIM} = 30 \text{ [kg/m]}$	$m_{pzs} = 60 \text{ [kg]}$
$n_{fc} = 3 \text{ [-]}$	$n_s = 84 \text{ [-]}$	$\phi = 10 \text{ [}^\circ\text{]}$	$\psi = 0,00 \text{ [-]}$
$p_{a,S} = 4.503 \text{ [Pa]}$	$\bar{P}_{av} = 27.969 \text{ [W]}$	$\bar{P}_{C,1} = 120.398 \text{ [W]}$	$\bar{P}_{C,2} = 5.397 \text{ [W]}$
$p_e = 125 \text{ [Pa]}$	$p_{o,t} = 172,57 \text{ [Pa]}$	$p_t = 100 \text{ [Pa]}$	$p_{tob} = 933,5 \text{ [Pa]}$
$\bar{Re}_{tub} = 53.014 \text{ [-]}$	$\rho_{a,S} = 0,03 \text{ [kg/m}^3\text{]}$	$\bar{\rho}_{tub} = 1,51E-02 \text{ [kg/m}^3\text{]}$	$\rho_e = 1,92E-03 \text{ [kg/m}^3\text{]}$
$R_{av} = 267,24 \text{ [N]}$	$S = 20,96 \text{ [m}^2\text{]}$	$\tau_1 = 10 \text{ [%]}$	$\tau_2 = 20 \text{ [%]}$
$T_a = 460 \text{ [K]}$	$t_{ac} = 21,23 \text{ [s]}$	$t_{ac,h} = 5,90E-03 \text{ [h]}$	$t_d = 12,12 \text{ [min]}$
$t_{d,s} = 727,35 \text{ [s]}$	$T_e = 227,37 \text{ [K]}$	$T_f = 1,60 \text{ [-]}$	$T_{o,t} = 336,76 \text{ [K]}$
$T_{t,conv} = 288,15 \text{ [K]}$	$t_v = 10,31 \text{ [min]}$	$t_{v,h} = 0,17 \text{ [h]}$	$t_{v,s} = 618,77 \text{ [s]}$
$V_1 = 0,22 \text{ [m}^3\text{]}$	$V_{II} = 0,03 \text{ [m}^3\text{]}$	$V_{III} = 0,19 \text{ [m}^3\text{]}$	$w = 0,40 \text{ [m]}$
$A_{comp} = 0,63 \text{ [m}^2\text{]}$	$A_e = 0,26 \text{ [m}^2\text{]}$	$A_f = 0,66 \text{ [m}^2\text{]}$	$a_s = 340,26 \text{ [m/s]}$
$c_a = 150 \text{ [m/s]}$	$\bar{c}_{p,C,1} = 1.045 \text{ [J/kg-K]}$	$\bar{c}_{p,C,2} = 1.025 \text{ [J/kg-K]}$	$\bar{c}_{p,H2O} = 4.186 \text{ [J/kg-K]}$
$\bar{c}_{p,tob} = 1.001 \text{ [J/kg-K]}$	$C_{D,ext} = 0,68 \text{ [-]}$	$C_{D,t} = 1,08 \text{ [-]}$	$c_e = 414,3 \text{ [m/s]}$
$\Delta h = 2,00E-04$	$\Delta p_a = 30 \text{ [Pa]}$	$\Delta p_L = 4.403 \text{ [Pa]}$	$\Delta p_{tub} = 1.166,54 \text{ [Pa]}$
$\delta_2 = 0,23 \text{ [m}^2\text{]}$	$\delta_{comp} = 1,25E-02 \text{ [m]}$	$\delta_{ic} = 4,00E-02 \text{ [m]}$	$\delta_{rc} = 3,50E-02 \text{ [m]}$
$D_{desp} = 1,35 \text{ [m]}$	$D_{movto} = 1,06 \text{ [m]}$	$D_t = 2,94 \text{ [m]}$	$D_{tub} = 0,24 \text{ [m]}$
$\eta_{C,2} = 0,75 \text{ [-]}$	$\eta_{LIM} = 0,73 \text{ [-]}$	$\eta_{mot} = 0,92 \text{ [-]}$	$\eta_{tob} = 0,80 \text{ [-]}$
$e_{bat,conv} = 900.000 \text{ [J/kg]}$	$E_{gen} = -85,10 \text{ [kWh]}$	$E_{,t} = 0,62 \text{ [kWh/km]}$	$E_v = 12,90 \text{ [kWh]}$
$F_S = 80.914 \text{ [N]}$	$F_{tob} = 91,97 \text{ [N]}$	$F_v = 224,81 \text{ [N]}$	$F_x = 126.827 \text{ [N]}$
$\gamma_o = 30 \text{ [}^\circ\text{]}$	$\gamma_{tob} = 1,40 \text{ [-]}$	$h_1 = 1,30E-03 \text{ [m]}$	$h_2 = 5,00E-04 \text{ [m]}$
$l_2 = 0,25 \text{ [m]}$	$L_{ac} = 3,32 \text{ [km]}$	$L_{aux} = 5,50 \text{ [m]}$	$L_{bat} = 1,50 \text{ [m]}$
$L_{tub} = 22,50 \text{ [m]}$	$L_v = 193,37 \text{ [km]}$	$M = 0,92 \text{ [-]}$	$\mu_a = 2,57E-05 \text{ [Pa-s]}$
$m_{comp} = 1.900 \text{ [kg]}$	$\dot{m}_a = 0,03 \text{ [kg/s]}$	$\dot{m}_{cc,m\acute{a}x} = 2,32 \text{ [kg/s]}$	$\dot{m}_{C,1} = 0,24 \text{ [kg/s]}$
$m_{,bat} = 43,40 \text{ [kg]}$	$m_{EB} = 650 \text{ [kg]}$	$m_{H2O} = 187,29 \text{ [kg]}$	$m_{mot} = 190 \text{ [kg]}$
$m_{tot} = 8.604 \text{ [kg]}$	$n_a = 30 \text{ [-]}$	$n_{caj} = 750 \text{ [-]}$	$n_{caj,real} = 0 \text{ [-]}$
$p_1 = 2.100 \text{ [Pa]}$	$P_1 = 5,43E+07 \text{ [W]}$	$p_a = 6.434 \text{ [Pa]}$	$P_{av} = 83.514 \text{ [W]}$
$\bar{P}_{tob} = 5.748 \text{ [W]}$	$P_{C,1} = 124.392 \text{ [W]}$	$P_{C,2} = 5.397 \text{ [W]}$	$P_D = 13.261 \text{ [W]}$
$P_{tob} = 28.740 \text{ [W]}$	$P_v = 70.253 \text{ [W]}$	$q = 45 \text{ [%]}$	$R = 287 \text{ [J/kg-K]}$
$\rho_{H2O} = 1.000 \text{ [kg/m}^3\text{]}$	$\rho_t = 1,21E-03 \text{ [kg/m}^3\text{]}$	$R_1 = 8,00 \text{ [}\Omega\text{]}$	$R_a = 5,82E+05 \text{ [N/m]}$
$\theta = 0,07 \text{ [m]}$	$T_1 = 790,59 \text{ [K]}$	$T_2 = 350 \text{ [K]}$	$T_3 = 521,79 \text{ [K]}$
$t_{dec} = 21,23 \text{ [s]}$	$t_{dec,h} = 5,90E-03 \text{ [h]}$	$t_{des} = 13,22 \text{ [min]}$	$t_{des,s} = 793,48 \text{ [s]}$
$T_t = 15 \text{ [}^\circ\text{C]}$	$t_{tot} = 11,02 \text{ [min]}$	$t_{tot,h} = 0,18 \text{ [h]}$	$t_{tot,s} = 661,2 \text{ [s]}$
$v = 1.125 \text{ [km/h]}$	$V_1 = 23.514 \text{ [V]}$	$\tilde{v} = 1.089 \text{ [km/h]}$	$v_{conv} = 312,50 \text{ [m/s]}$
$w_{LIM} = 0,50 \text{ [m]}$	$X_1 = 5,22 \text{ [}\Omega\text{]}$		

Fig. 12.5. Resultados para el viaje de retorno en la primera geometría. Se han eliminado $e'_t I_e$ e I_c^{-1} porque no tienen sentido en este caso ni el EES las puede hallar al tender a infinito. $I_c = 0$ t/h en esta situación, por lo que también ha sido retirado.

En este caso $D_{tub} = 0,24$ m, casi el doble del valor alcanzado para $\psi = 1$. En el eje \hat{z} de la cápsula hay una diferencia de D_{carga} y la altura de las 3 filas de cajas de 0,25 m. Es decir, unos 0,13 m por cada lado. Por tanto, la tubería de 0,13 m para $\psi = 1$ cabe por encima de las cajas o por un lateral (podría embeberse un poco en la pared interna de la cápsula también). En el hueco libre entre las cajas y la circunferencia de D_{carga} pueden insertarse otras tuberías hasta alcanzar $A_{tub} = 4,37 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2$ y así tener suficiente área para trasegar \dot{m}_{tob} en ambas situaciones: con $\psi = 1$ y $\psi = 0$.

Respecto a la tobera, dado que $D_c = 0,92$ m y la tobera tiene una parte convergente y otra divergente puede escogerse una longitud de 0,60 m y mantener así un buen η_{tob} . Sumando $L_{tob} = 0,60$ m a L_c se obtiene una longitud total de la cápsula de 28,68 m.

Finalmente, cabe resaltar que en el viaje de ida el consumo por unidad de longitud es 2,83 kWh/km y en el de vuelta 0,62 kWh/km (el 21, 91 % de 2,83 kWh/km). En suma, el consumo del ciclo adquiere el valor de 3,45 kWh/km.

12.2. Segunda geometría

Para esta segunda geometría se considera que el tren es el mismo y se utilizan los mismos valores del apartado anterior, excepto para los cojinetes, para los cuales se aplican las cifras presentes en la tabla [11.46].

Debe elegirse un valor para a_c . Según la figura [11.31], a partir de $a_c = 4 \text{ m/s}^2$ no se mejora (se reduce) prácticamente nada R_t . Y de acuerdo a la figura [11.32], entre 1 y 2 m/s^2 se igualan p_{1a} y p_{2a} , lo cual es bueno desde el punto de vista del consumo y equilibrado del sistema de refrigeración. Por tanto, se escoge $a_c = 3 \text{ m/s}^2$, puesto que se encuentra a medio camino entre 2 y 4 m/s^2 .

A continuación, los resultados para $\psi = 1$:

$\alpha = 0$ [°]	$a_1 = 14,72$ [m/s ²]	$a_2 = 14,72$ [m/s ²]	$A_c = 0,6626$ [m ²]
$A_f = 0,66$ [m ²]	$a_s = 340,26$ [m/s]	$A_t = 6,77$ [m ²]	$A_{tub} = 8,87E-03$ [m ²]
$c_{2a} = 125$ [m/s]	$C_{2L} = 0,12$ [-]	$\bar{c}_{p,C,1} = 1,045$ [J/kg·K]	$\bar{c}_{p,C,12} = 1,066$ [J/kg·K]
$\bar{c}_{p,H_2O21} = 2,017$ [J/kg·K]	$\bar{c}_{p,l,1} = 1,050$ [J/kg·K]	$\bar{c}_{p,l,12} = 1,076$ [J/kg·K]	$\bar{c}_{p,l,22} = 1,068$ [J/kg·K]
$c_i = 0$ [m/s]	$c_{tub} = 312,50$ [m/s]	$d = 0,10$ [m]	$\Delta \bar{h}_1 = 1,00E-04$ [m]
$\Delta p_{2L} = 19,390$ [Pa]	$\Delta p_{tub} = 2,246$ [Pa]	$\Delta T_{l,1} = 90$ [K]	$\Delta T_{l,12} = 751,69$ [K]
$\delta_{comp} = 1,25E-02$ [m]	$\delta_{lc} = 4,00E-02$ [m]	$\delta_{rc} = 3,50E-02$ [m]	$\delta_{s10} = 0,22$ [m]
$D_{movto} = 1,06$ [m]	$D_t = 2,94$ [m]	$D_{tub} = 0,11$ [m]	$\epsilon_{tub} = 1,50E-06$ [m]
$\eta_{C,2} = 0,75$ [-]	$\eta_{LIM} = 0,73$ [-]	$\eta_{mot} = 0,92$ [-]	$\eta_{tob} = 0,80$ [-]
$e_{bat,conv} = 900,000$ [J/kg]	$E_{gen} = -536,04$ [kWh]	$E_{,t} = 2,86$ [kWh/km]	$e_{,t} = 6,36E-02$ [kWh/tkm]
$F_{1v} = 210,85$ [N]	$F_{2a} = 184,417$ [N]	$F_{2L} = 9,325$ [N]	$F_{2S} = 175,091$ [N]
$F_x = 797,640$ [N]	$g = 9,81$ [m/s ²]	$\gamma = 1,40$ [-]	$\gamma_1 = 1,38$ [-]
$h_{11} = 1,18E-03$ [m]	$h_{12} = 3,75E-04$ [m]	$h_{21} = 1,43E-03$ [m]	$h_{22} = 6,25E-04$ [m]
$l_e = 12,72$ [kWh/t]	$L = 1,50$ [m]	$l_1 = 0,20$ [m]	$l_2 = 0,25$ [m]
$L_{caj} = 21,00$ [m]	$L_{dec} = 3,32$ [km]	$L_t = 200$ [km]	$L_{tub} = 22,50$ [m]
$m_a = 34$ [kg]	$m_{bat,tot} = 320,77$ [kg]	$m_{caj} = 45,000$ [kg]	$m_{comp} = 1,900$ [kg]
$\dot{m}_{C,1} = 0,24$ [kg/s]	$\dot{m}_{H_2O} = 4,16E-02$ [kg/s]	$\dot{m}_{H_2O_s} = 0,53$ [kg/s]	$\dot{m}_t = 2,557$ [kg/s]
$m_{mot} = 190$ [kg]	$m_{,bat} = 235,86$ [kg]	$m_{,est} = 130$ [kg/m]	$m_{,LIM} = 30$ [kg/m]
$n_{caj,real} = 750$ [-]	$n_{fc} = 3$ [-]	$n_s = 84$ [-]	$\phi = 10$ [°]
$P_{,1} = 3,41E+08$ [W]	$p_{2a} = 32,484$ [Pa]	$p_{2a,S} = 19,490$ [Pa]	$P_{av} = 126,740$ [W]
$P_{C,1} = 124,392$ [W]	$P_{C,12} = 80,611$ [W]	$P_{C,2} = 125,724$ [W]	$P_{C,22} = 45,113$ [W]
$p_{tob} = 100$ [Pa]	$P_{tob,} = 2,491$ [h]	$P_v = 113,479$ [W]	$q = 45$ [%]
$\bar{\rho}_{tub} = 9,73E-03$ [kg/m ³]	$\rho_e = 1,18E-03$ [kg/m ³]	$\rho_{H_2O} = 1,000$ [kg/m ³]	$\rho_t = 1,21E-03$ [kg/m ³]
$R_t = 32,55$ [km]	$S = 21,56$ [m ²]	$\tau_1 = 10$ [%]	$\tau_2 = 20$ [%]
$T_{23} = 864,62$ [K]	$T_a = 460$ [K]	$t_{ac} = 21,23$ [s]	$t_{ac,h} = 5,90E-03$ [h]
$t_{des,s} = 793,48$ [s]	$t_{d,s} = 727,35$ [s]	$T_e = 368,29$ [K]	$T_f = 1,60$ [-]
$t_{tot,s} = 661,2$ [s]	$T_{t,conv} = 288,2$ [K]	$t_v = 10,31$ [min]	$t_{v,h} = 0,17$ [h]
$v_{conv} = 312,50$ [m/s]	$V_1 = 0,41$ [m ³]	$V_{II} = 0,03$ [m ³]	$V_{III} = 0,38$ [m ³]
$A_{cc} = 6,105$ [m ²]	$A_{comp} = 0,6271$ [m ²]	$a_c = 3$ [m/s ²]	$A_e = 0,13$ [m ²]
$\beta = 9,79E-02$ [-]	$C = 36$ [%]	$c_{1a} = 175$ [m/s]	$C_{1L} = 0,08$ [-]
$\bar{c}_{p,C,22} = 1,058$ [J/kg·K]	$\bar{c}_{p,H_2O} = 4,186$ [J/kg·K]	$\bar{c}_{p,H_2O11} = 2,121$ [J/kg·K]	$\bar{c}_{p,H_2O2} = 4,186$ [J/kg·K]
$\bar{c}_{p,tob} = 1,012$ [J/kg·K]	$C_{D,ext} = 0,68$ [-]	$C_{D,t} = 1,08$ [-]	$c_e = 174,1$ [m/s]
$\Delta \bar{h}_2 = 2,50E-04$ [m]	$\Delta p_{1a} = 20$ [%]	$\Delta p_{1L} = 35,473$ [Pa]	$\Delta p_{2a} = 40$ [%]
$\Delta T_{1,22} = 426,60$ [K]	$\Delta T_s = 89$ [K]	$\delta_1 = 0,77$ [m ²]	$\delta_2 = 0,23$ [m ²]
$D_c = 0,92$ [m]	$D_{carga} = 0,85$ [m]	$D_{comp} = 0,89$ [m]	$D_{desp} = 1,35$ [m]
$\eta_{1a} = 0,70$ [-]	$\eta_{2a} = 0,50$ [-]	$\eta_{bat} = 0,92$ [-]	$\eta_{C,1} = 0,75$ [-]
$E_1 = 48,951$ [V]	$E_{ac} = 1,006,70$ [kWh]	$e_{bat} = 250$ [Wh/kg]	$E_{bat,} = 72,64$ [kWh]
$E_v = 29,25$ [kWh]	$F_{1a} = 346,898$ [N]	$F_{1L} = 11,347$ [N]	$F_{1S} = 335,551$ [N]
$F_{2v} = 152,28$ [N]	$\bar{f}_{tub} = 5,58E-03$ [-]	$F_D = 42,44$ [N]	$F_{tob} = 7,97$ [N]
$\gamma_{12} = 1,37$ [-]	$\gamma_{22} = 1,37$ [-]	$\gamma_o = 30$ [°]	$\gamma_{tob} = 1,40$ [-]
$h_v = 2,26E+06$ [J/kg]	$l_1 = 1,959,94$ [A]	$l_c = 245,00$ [t/h]	$l_{c,inv} = 4,08E-03$ [h/t]
$L_{ac} = 3,32$ [km]	$L_{aux} = 5,50$ [m]	$L_{bat} = 1,50$ [m]	$L_c = 28,08$ [m]
$L_v = 193,37$ [km]	$M = 0,92$ [-]	$\mu_a = 2,33E-05$ [Pa·s]	$\mu_{tub} = 2,10E-05$ [Pa·s]
$\dot{m}_{1a} = 0,13$ [kg/s]	$\dot{m}_{2a} = 0,08$ [kg/s]	$\dot{m}_a = 0,21$ [kg/s]	$\dot{m}_{cc,max} = 2,32$ [kg/s]
$\dot{m}_{tob} = 0,03$ [kg/s]	$m_{,bat} = 84,91$ [kg]	$m_{EB} = 650$ [kg]	$m_{H_2O} = 382,9$ [kg]
$m_{pzs} = 60$ [kg]	$m_{tot} = 54,161$ [kg]	$n_a = 36$ [-]	$n_{caj} = 750$ [-]
$\psi = 1,00$ [-]	$p_1 = 2,100$ [Pa]	$p_{1a} = 44,466$ [Pa]	$p_{1a,S} = 35,573$ [Pa]
$\bar{P}_{av} = 50,007$ [W]	$\bar{P}_{C,1} = 120,398$ [W]	$\bar{P}_{C,2} = 125,724$ [W]	$\bar{P}_{tob} = 498,3$ [W]
$P_D = 13,261$ [W]	$p_e = 125$ [Pa]	$p_{o,t} = 172,6$ [Pa]	$p_t = 100$ [Pa]
$R = 287$ [J/kg·K]	$\bar{R}_{e,tub} = 15,386$ [-]	$\rho_{1a,S} = 0,27$ [kg/m ³]	$\rho_{2a,S} = 0,15$ [kg/m ³]
$R_1 = 8,00$ [Ω]	$R_{1a} = 6,30E+06$ [N/m]	$R_{2a} = 2,07E+06$ [N/m]	$R_{av} = 405,57$ [N]
$\theta = 0,07$ [m]	$T_1 = 790,59$ [K]	$T_{13} = 945,31$ [K ^{-1/dim}]	$T_2 = 350$ [K]
$t_d = 12,12$ [min]	$t_{dec} = 21,23$ [s]	$t_{dec,h} [K]$	$t_{des} = 13,22$ [min]
$T_{o,t} = 336,76$ [K]	$T_t = 15$ [°C]	$t_{tot} = 11,02$ [min]	$t_{tot,h} = 0,18$ [h]
$t_{v,s} = 618,77$ [s]	$v = 1,125$ [km/h]	$V_1 = 58,968$ [V]	$\bar{v} = 1,089$ [km/h]
$w = 0,40$ [m]	$w_{LIM} = 0,50$ [m]	$X_1 = 5,22$ [Ω]	

Fig. 12.6. Resultados para la segunda geometría con $\psi = 1$.

Y para $\psi = 0$ se obtienen estos resultados:

$a_1 = 14,72$ [m/s ²]	$a_2 = 14,72$ [m/s ²]	$A_c = 0,66$ [m ²]	$A_{cc} = 6,10$ [m ²]
$A_t = 6,77$ [m ²]	$A_{tub} = 4,37E-02$ [m ²]	$\beta = 9,79E-02$ [-]	$C = 36$ [%]
$\bar{c}_{p,H2O1} = 1.907$ [J/kg·K]	$\bar{c}_{p,H2O2} = 4.186$ [J/kg·K]	$\bar{c}_{p,l,1} = 1.050$ [J/kg·K]	$\bar{c}_{p,l,2} = 1.035$ [J/kg·K]
$c_i = 0$ [m/s]	$C_L = 0,10$ [-]	$c_{tub} = 312,5$ [m/s]	$d = 0,10$ [m]
$\Delta T_{l,1} = 90$ [K]	$\Delta T_{l,2} = 24,69$ [K]	$\Delta T_s = 89$ [K]	$\delta_1 = 0,77$ [m ²]
$\delta_{slab} = 0,22$ [m]	$D_c = 0,92$ [m]	$D_{carga} = 0,85$ [m]	$D_{comp} = 0,89$ [m]
$\epsilon_{tub} = 1,50E-06$ [m]	$\eta_a = 0,6$ [-]	$\eta_{bat} = 0,92$	$\eta_{c,1} = 0,75$ [-]
$E_1 = 19.519$ [V]	$E_{ac} = 160,04$ [kWh]	$e_{bat} = 250$ [Wh/kg]	$E_{bat} = 37,13$ [kWh]
$F_a = 84.406$ [N]	$\bar{f}_{tub} = 4,15E-03$ [-]	$F_D = 42,44$ [N]	$F_L = 3.491$ [N]
$g = 9,81$ [m/s ²]	$\gamma = 1,40$ [-]	$\gamma_1 = 1,38$ [-]	$\gamma_2 = 1,39$ [-]
$h_v = 2,26E+06$ [J/kg]	$I_1 = 781,53$ [A]	$L = 1,75$ [m]	$I_1 = 0,20$ [m]
$L_c = 28,08$ [m]	$L_{caj} = 21,00$ [m]	$L_{dec} = 3,32$ [km]	$L_1 = 200$ [km]
$\mu_{tub} = 2,10E-05$ [Pa·s]	$m_a = 34$ [kg]	$m_{bat,tot} = 163,95$ [kg]	$m_{caj} = 0$ [kg]
$\dot{m}_{H2O} = 0,04$ [kg/s]	$\dot{m}_{H2Os} = 0,26$ [kg/s]	$\dot{m}_t = 2,557$ [kg/s]	$\dot{m}_{tob} = 0,21$ [kg/s]
$m_{bat} = 120,55$ [kg]	$m_{est} = 130$ [kg/m]	$m_{LIM} = 30$ [kg/m]	$m_{pzs} = 60$ [kg]
$n_{fc} = 3$ [-]	$n_s = 84$ [-]	$\phi = 10$ [°]	$\psi = 0$ [-]
$p_{a,s} = 4.503$ [Pa]	$\bar{P}_{av} = 27.969$ [W]	$\bar{P}_{C,1} = 120.398$ [W]	$\bar{P}_{C,2} = 5.397$ [W]
$p_e = 125$ [Pa]	$p_{o,t} = 172,57$ [Pa]	$p_t = 100$ [Pa]	$p_{tob} = 933,5$ [Pa]
$\bar{R}e_{tub} = 53.014$ [-]	$\rho_{a,s} = 0,03$ [kg/m ³]	$\bar{\rho}_{tub} = 1,51E-02$ [kg/m ³]	$\rho_e = 1,92E-03$ [kg/m ³]
$R_{av} = 267,24$ [N]	$S = 20,96$ [m ²]	$\tau_1 = 10$ [%]	$\tau_2 = 20$ [%]
$T_a = 460$ [K]	$t_{ac} = 21,23$ [s]	$t_{ac,h} = 5,90E-03$ [h]	$t_d = 12,12$ [min]
$t_{d,s} = 727,35$ [s]	$T_e = 227,37$ [K]	$T_f = 1,60$ [-]	$T_{o,t} = 336,76$ [K]
$T_{t,conv} = 288,15$ [K]	$t_v = 10,31$ [min]	$t_{v,h} = 0,17$ [h]	$t_{v,s} = 618,77$ [s]
$V_1 = 0,22$ [m ³]	$V_{II} = 0,03$ [m ³]	$V_{III} = 0,19$ [m ³]	$w = 0,40$ [m]
$A_{comp} = 0,63$ [m ²]	$A_e = 0,26$ [m ²]	$A_f = 0,66$ [m ²]	$a_s = 340,26$ [m/s]
$c_a = 150$ [m/s]	$\bar{c}_{p,c,1} = 1.045$ [J/kg·K]	$\bar{c}_{p,c,2} = 1.025$ [J/kg·K]	$\bar{c}_{p,H2O} = 4.186$ [J/kg·K]
$\bar{c}_{p,tob} = 1.001$ [J/kg·K]	$C_{D,ext} = 0,68$ [-]	$C_{D,t} = 1,08$ [-]	$c_e = 414,3$ [m/s]
$\Delta \bar{h} = 2,00E-04$	$\Delta p_a = 30$ [Pa]	$\Delta p_L = 4.403$ [Pa]	$\Delta p_{tub} = 1.166,54$ [Pa]
$\delta_2 = 0,23$ [m ²]	$\delta_{comp} = 1,25E-02$ [m]	$\delta_{ic} = 4,00E-02$ [m]	$\delta_{rc} = 3,50E-02$ [m]
$D_{desp} = 1,35$ [m]	$D_{movto} = 1,06$ [m]	$D_t = 2,94$ [m]	$D_{tub} = 0,24$ [m]
$\eta_{c,2} = 0,75$ [-]	$\eta_{LIM} = 0,73$ [-]	$\eta_{mot} = 0,92$ [-]	$\eta_{tob} = 0,80$ [-]
$e_{bat,conv} = 900.000$ [J/kg]	$E_{gen} = -85,10$ [kWh]	$E_{t} = 0,62$ [kWh/km]	$E_v = 12,90$ [kWh]
$F_S = 80.914$ [N]	$F_{tob} = 91,97$ [N]	$F_v = 224,81$ [N]	$F_x = 126.827$ [N]
$\gamma_o = 30$ [°]	$\gamma_{tob} = 1,40$ [-]	$h_1 = 1,30E-03$ [m]	$h_2 = 5,00E-04$ [m]
$l_2 = 0,25$ [m]	$L_{ac} = 3,32$ [km]	$L_{aux} = 5,50$ [m]	$L_{bat} = 1,50$ [m]
$L_{tub} = 22,50$ [m]	$L_v = 193,37$ [km]	$M = 0,92$ [-]	$\mu_a = 2,57E-05$ [Pa·s]
$m_{comp} = 1.900$ [kg]	$\dot{m}_a = 0,03$ [kg/s]	$\dot{m}_{cc,m\acute{a}x} = 2,32$ [kg/s]	$\dot{m}_{c,1} = 0,24$ [kg/s]
$m_{bat} = 43,40$ [kg]	$m_{EB} = 650$ [kg]	$m_{H2O} = 187,29$ [kg]	$m_{mot} = 190$ [kg]
$m_{tot} = 8.604$ [kg]	$n_a = 30$ [-]	$n_{caj} = 750$ [-]	$n_{caj,real} = 0$ [-]
$p_1 = 2.100$ [Pa]	$P_1 = 5,43E+07$ [W]	$p_a = 6.434$ [Pa]	$P_{av} = 83.514$ [W]
$\bar{P}_{tob} = 5.748$ [W]	$P_{C,1} = 124.392$ [W]	$P_{C,2} = 5.397$ [W]	$P_D = 13.261$ [W]
$P_{tob} = 28.740$ [W]	$P_v = 70.253$ [W]	$q = 45$ [%]	$R = 287$ [J/kg·K]
$\rho_{H2O} = 1.000$ [kg/m ³]	$\rho_t = 1,21E-03$ [kg/m ³]	$R_1 = 8,00$ [Ω]	$R_a = 5,82E+05$ [N/m]
$\theta = 0,07$ [m]	$T_1 = 790,59$ [K]	$T_2 = 350$ [K]	$T_3 = 521,79$ [K]
$t_{dec} = 21,23$ [s]	$t_{dec,h} = 5,90E-03$ [h]	$t_{des} = 13,22$ [min]	$t_{des,s} = 793,48$ [s]
$T_t = 15$ [°C]	$t_{tot} = 11,02$ [min]	$t_{tot,h} = 0,18$ [h]	$t_{tot,s} = 661,2$ [s]
$v = 1.125$ [km/h]	$V_1 = 23.514$ [V]	$\bar{v} = 1.089$ [km/h]	$v_{conv} = 312,50$ [m/s]
$w_{LIM} = 0,50$ [m]	$X_1 = 5,22$ [Ω]		

Fig. 12.7. Resultados para la segunda geometría con $\psi = 0$.

La suma de los consumos de ida y retorno es 2,86 kWh/km más 0,62 kWh/km (que es el 21,68 % sobre el primero). En total, 3,48 kWh/km.

La capacidad es la misma que en el caso anterior y las consideraciones acerca de A_{tub} , D_{tub} o L_{tob} siguen en pie.

12.3. Tercera geometría

En este caso se consideran también los mismos datos de partida. Sobre la elección de la inclinación, en este caso se puede elegir un ángulo grande, por la siguiente razón: Lo ideal es que se diseñe esta línea Hyperloop de forma que el tren baje la pendiente desde la primera hasta la segunda empresa con toda la carga ($\alpha < 0$) y después haga el camino inverso vacío y cuesta arriba ($\alpha > 0$). En tanto esto sea así puede escogerse cualquier ángulo. Se cogerá 8° , el doble que el seleccionado en el apartado [10.3] para ver el efecto del doble de inclinación (pendiente de 140,54 milésimas).

A continuación los resultados para $\psi = 1$ y $\alpha = -8^\circ$:

$\alpha = -8$ [°]	$a_1 = 14,72$ [m/s ²]	$a_2 = 14,72$ [m/s ²]	$A_c = 0,66$ [m ²]
$a_s = 340,26$ [m/s]	$A_t = 6,77$ [m ²]	$A_{tub} = 1,33E-02$ [m ²]	$\beta = 9,79E-02$ [-]
$\bar{c}_{p,H2O} = 4.186$ [J/kg·K]	$\bar{c}_{p,H2O1} = 2.207$ [J/kg·K]	$\bar{c}_{p,H2O2} = 4.186$ [J/kg·K]	$\bar{c}_{p,l,1} = 1.050$ [J/kg·K]
$c_e = 259,7$ [m/s]	$c_i = 0$ [m/s]	$C_L = 0,10$ [-]	$c_{tub} = 312,5$ [m/s]
$\Delta P_{tub} = 1.941$ [Pa]	$\Delta T_{l,1} = 90$ [K]	$\Delta T_{l,2} = 1.016$ [K]	$\Delta T_s = 89$ [K]
$\delta_{rc} = 3,50E-02$ [m]	$\delta_{\text{staf}} = 0,22$ [m]	$D_c = 0,92$ [m]	$D_{carga} = 0,85$ [m]
$D_{tub} = 0,13$ [m]	$\epsilon_{tub} = 1,50E-06$ [m]	$\eta_a = 0,6$ [-]	$\eta_{bat} = 0,92$
$\eta_{tob} = 0,80$ [-]	$E_1 = 46.525$ [V]	$E_{ac} = 909,37$ [kWh]	$e_{bat} = 250$ [Wh/kg]
$e_{t,t} = -2,75E-01$ [kWh/tkm]	$E_v = -2.871,95$ [kWh]	$F_a = 523.853$ [N]	$\tilde{f}_{tub} = 5,11E-03$ [-]
$F_v = 351,19$ [N]	$F_x = 720.527$ [N]	$g = 9,81$ [m/s ²]	$\gamma = 1,40$ [-]
$h_1 = 1,30E-03$ [m]	$h_2 = 5,00E-04$ [m]	$h_v = 2,26E+06$ [J/kg]	$I_1 = 1.862,79$ [A]
$I_1 = 0,20$ [m]	$I_2 = 0,25$ [m]	$L_{ac} = 3,32$ [km]	$L_{aux} = 5,50$ [m]
$L_t = 200$ [km]	$L_{tub} = 22,5$ [m]	$L_v = 193,37$ [km]	$M = 0,92$ [-]
$m_{caj} = 45.000$ [kg]	$m_{comp} = 1.900$ [kg]	$\dot{m}_a = 0,19$ [kg/s]	$\dot{m}_{cc,m\acute{a}x} = 2,32$ [kg/s]
$\dot{m}_{tob} = 0,05$ [kg/s]	$m_{r,bat} = 81,08$ [kg]	$m_{EB} = 650$ [kg]	$m_{H2O} = 365,61$ [kg]
$m_{pzs} = 60$ [kg]	$m_{tot} = 53.925$ [kg]	$n_a = 30$ [-]	$n_{caj} = 750$ [-]
$\psi = 1,00$ [-]	$p_1 = 2.100$ [Pa]	$P_1 = 3,08E+08$ [W]	$p_a = 39.929$ [Pa]
$\bar{P}_{C,2} = 114.628$ [W]	$\bar{P}_{tob} = 973,07$ [W]	$P_{C,1} = 124.392$ [W]	$P_{C,2} = 114.628$ [W]
$P_{tob} = 158,84$ [Pa]	$P_{tob} = 4.865$ [h]	$P_v = 109.747$ [W]	$q = 45$ [%]
$\rho_e = 1,31E-03$ [kg/m ³]	$\rho_{H2O} = 1.000$ [kg/m ³]	$\rho_t = 1,21E-03$ [kg/m ³]	$R_1 = 8,00$ [Ω]
$\tau_2 = 20$ [%]	$\theta = 0,07$ [m]	$T_1 = 790,59$ [K]	$T_2 = 350$ [K]
$t_d = 12,12$ [min]	$t_{dec} = 21,23$ [s]	$t_{dec,h} = 5,90E-03$ [h]	$t_{des} = 13,22$ [min]
$T_{o,t} = 336,76$ [K]	$T_t = 15$ [°C]	$t_{tot} = 11,02$ [min]	$t_{tot,h} = 0,18$ [h]
$t_{v,s} = 618,77$ [s]	$v = 1.125$ [km/h]	$V_1 = 56.045$ [V]	$\bar{v} = 1.089$ [km/h]
$w = 0,40$ [m]	$w_{LIM} = 0,50$ [m]	$X_1 = 5,22$ [Ω]	

$A_{cc} = 6,10 \text{ [m}^2\text{]}$	$A_{comp} = 0,63 \text{ [m}^2\text{]}$	$A_e = 0,14 \text{ [m}^2\text{]}$	$A_f = 0,66 \text{ [m}^2\text{]}$
$C = 36 \text{ [%]}$	$c_a = 150 \text{ [m/s]}$	$\bar{c}_{p,C,1} = 1.045 \text{ [J/kg}\cdot\text{K]}$	$\bar{c}_{p,C,2} = 1.063 \text{ [J/kg}\cdot\text{K]}$
$\bar{c}_{p,1,2} = 1.073 \text{ [J/kg}\cdot\text{K]}$	$\bar{c}_{p,tob} = 1.009 \text{ [J/kg}\cdot\text{K]}$	$C_{D,ext} = 0,68 \text{ [-]}$	$C_{D,t} = 1,08 \text{ [-]}$
$d = 0,1 \text{ [m]}$	$\Delta\bar{h} = 0,0002$	$\Delta p_a = 30 \text{ [Pa]}$	$\Delta p_L = 27.850 \text{ [Pa]}$
$\delta_1 = 0,77 \text{ [m}^2\text{]}$	$\delta_2 = 0,23 \text{ [m}^2\text{]}$	$\delta_{comp} = 1,25E-02 \text{ [m]}$	$\delta_{ic} = 4,00E-02 \text{ [m]}$
$D_{comp} = 0,89 \text{ [m]}$	$D_{desp} = 1,35 \text{ [m]}$	$D_{movto} = 1,06 \text{ [m]}$	$D_t = 2,94 \text{ [m]}$
$\eta_{C,1} = 0,75 \text{ [-]}$	$\eta_{C,2} = 0,75 \text{ [-]}$	$\eta_{LIM} = 0,73 \text{ [-]}$	$\eta_{mot} = 0,92 \text{ [-]}$
$E_{bat,} = 69,36 \text{ [kWh]}$	$e_{bat,conv} = 900.000 \text{ [J/kg]}$	$E_{gen} = -583,24 \text{ [kWh]}$	$E_{t,t} = -12,38 \text{ [kWh/km]}$
$F_D = 42,44 \text{ [N]}$	$F_L = 21.669 \text{ [N]}$	$F_S = 502.184 \text{ [N]}$	$F_{tob} = 15,57 \text{ [N]}$
$\gamma_1 = 1,38 \text{ [-]}$	$\gamma_2 = 1,37 \text{ [-]}$	$\gamma_o = 30 \text{ [}^\circ\text{]}$	$\gamma_{tob} = 1,40 \text{ [-]}$
$I_c = 245,00 \text{ [t/h]}$	$I_{c,inv} = 4,08E-03 \text{ [h/t]}$	$I_e = -55,03 \text{ [kWh/t]}$	$L = 1,75 \text{ [m]}$
$L_{bat} = 1,50 \text{ [m]}$	$L_c = 28,08 \text{ [m]}$	$L_{caj} = 21,00 \text{ [m]}$	$L_{dec} = 3,32 \text{ [km]}$
$\mu_a = 2,57E-05 \text{ [Pa}\cdot\text{s]}$	$\mu_{tub} = 2,10E-05 \text{ [Pa}\cdot\text{s]}$	$m_a = 34 \text{ [kg]}$	$m_{bat,tot} = 306,31 \text{ [kg]}$
$\dot{m}_{C,1} = 0,24 \text{ [kg/s]}$	$\dot{m}_{H_2O} = 4,16E-02 \text{ [kg/s]}$	$\dot{m}_{H_2O_s} = 0,50 \text{ [kg/s]}$	$\dot{m}_t = 2,557 \text{ [kg/s]}$
$m_{mot} = 190 \text{ [kg]}$	$m_{r,bat} = 225,23 \text{ [kg]}$	$m_{r,est} = 130 \text{ [kg/m]}$	$m_{r,LIM} = 30 \text{ [kg/m]}$
$n_{caj,real} = 750 \text{ [-]}$	$n_{fc} = 3 \text{ [-]}$	$n_s = 84 \text{ [-]}$	$\phi = 10 \text{ [}^\circ\text{]}$
$P_{av} = 123.008 \text{ [W]}$	$p_{a,S} = 27.950 \text{ [Pa]}$	$\bar{P}_{av} = 47.716 \text{ [W]}$	$\bar{P}_{C,1} = 120.398 \text{ [W]}$
$P_D = 13.261 \text{ [W]}$	$p_e = 125 \text{ [Pa]}$	$p_{o,t} = 172,6 \text{ [Pa]}$	$p_t = 100 \text{ [Pa]}$
$R = 287 \text{ [J/kg}\cdot\text{K]}$	$\bar{R}e_{tub} = 21.779 \text{ [-]}$	$\rho_{a,S} = 0,21 \text{ [kg/m}^3\text{]}$	$\bar{\rho}_{tub} = 1,12E-02 \text{ [kg/m}^3\text{]}$
$R_a = 3,61E+06 \text{ [N/m]}$	$R_{av} = 393,63 \text{ [N]}$	$S = 20,96 \text{ [m}^2\text{]}$	$\tau_1 = 10 \text{ [%]}$
$T_3 = 917,11 \text{ [K]}$	$T_a = 460 \text{ [K]}$	$t_{ac} = 21,23 \text{ [s]}$	$t_{ac,h} = 5,90E-03 \text{ [h]}$
$t_{des,s} = 793,48 \text{ [s]}$	$t_{d,s} = 727,35 \text{ [s]}$	$T_e = 331,56 \text{ [K]}$	$T_f = 1,60 \text{ [-]}$
$t_{tot,s} = 661,23 \text{ [s]}$	$T_{t,conv} = 288,15 \text{ [K]}$	$t_v = 10,31 \text{ [min]}$	$t_{v,h} = 0,17 \text{ [h]}$
$v_{conv} = 312,50 \text{ [m/s]}$	$V_I = 0,40 \text{ [m}^3\text{]}$	$V_{II} = 0,03 \text{ [m}^3\text{]}$	$V_{III} = 0,37 \text{ [m}^3\text{]}$

Fig. 12.8. Resultados de la tercera geometría, viaje de ida.

Mientras que si $\psi = 0$ y $\alpha = 8^\circ$ se llega a estos resultados:

$\alpha = 8$ [°]	$a_1 = 14,72$ [m/s ²]	$a_2 = 14,72$ [m/s ²]	$A_c = 0,66$ [m ²]
$a_s = 340,26$ [m/s]	$A_t = 6,77$ [m ²]	$A_{tub} = 4,38E-02$ [m ²]	$\beta = 9,79E-02$ [-]
$\bar{c}_{p,H_2O} = 4.186$ [J/kg·K]	$\bar{c}_{p,H_2O1} = 1.906$ [J/kg·K]	$\bar{c}_{p,H_2O2} = 4.186$ [J/kg·K]	$\bar{c}_{p,l,1} = 1.050$ [J/kg·K]
$c_e = 414,3$ [m/s]	$c_i = 0$ [m/s]	$C_L = 0,10$ [-]	$c_{tub} = 312,5$ [m/s]
$\Delta p_{tub} = 1.166$ [Pa]	$\Delta T_{l,1} = 90$ [K]	$\Delta T_{l,2} = 23,77$ [K]	$\Delta T_s = 89$ [K]
$\delta_{rc} = 3,50E-02$ [m]	$\delta_{s,ab} = 0,22$ [m]	$D_c = 0,92$ [m]	$D_{carga} = 0,85$ [m]
$D_{tub} = 0,24$ [m]	$\epsilon_{tub} = 1,50E-06$ [m]	$\eta_a = 0,6$ [-]	$\eta_{bat} = 0,92$
$\eta_{tob} = 0,80$ [-]	$E_1 = 20.403$ [V]	$E_{ac} = 174,86$ [kWh]	$e_{bat} = 250$ [Wh/kg]
$E_v = 877,17$ [kWh]	$F_a = 83.581$ [N]	$\bar{f}_{tub} = 4,15E-03$ [-]	$F_D = 42,44$ [N]
$F_x = 138.569$ [N]	$g = 9,81$ [m/s ²]	$\gamma = 1,40$ [-]	$\gamma_1 = 1,38$ [-]
$h_2 = 5,00E-04$ [m]	$h_v = 2,26E+06$ [J/kg]	$I_1 = 816,91$ [A]	$L = 1,75$ [m]
$L_{bat} = 1,50$ [m]	$L_c = 28,08$ [m]	$L_{caj} = 21,00$ [m]	$L_{dec} = 3,32$ [km]
$\mu_a = 2,57E-05$ [Pa·s]	$\mu_{tub} = 2,10E-05$ [Pa·s]	$m_a = 34$ [kg]	$m_{bat,tot} = 163,81$ [kg]
$\dot{m}_{c,1} = 0,24$ [kg/s]	$\dot{m}_{H_2O} = 4,16E-02$ [kg/s]	$\dot{m}_{H_2O_s} = 0,26$ [kg/s]	$\dot{m}_t = 2,557$ [kg/s]
$m_{mot} = 190$ [kg]	$m_{,bat} = 120,45$ [kg]	$m_{,est} = 130$ [kg/m]	$m_{,LIM} = 30$ [kg/m]
$n_{caj,real} = 0$ [-]	$n_{fc} = 3$ [-]	$n_s = 84$ [-]	$\phi = 10$ [°]
$P_{av} = 83.440$ [W]	$p_{a,s} = 4.459$ [Pa]	$\bar{P}_{av} = 27.932$ [W]	$\bar{P}_{C,1} = 120.398$ [W]
$P_D = 13.261$ [W]	$p_e = 125$ [Pa]	$p_{o,t} = 172,6$ [Pa]	$p_t = 100$ [Pa]
$R = 287$ [J/kg·K]	$\bar{R}_{e,tub} = 53.059$ [-]	$\rho_{a,s} = 0,03$ [kg/m ³]	$\bar{\rho}_{tub} = 1,51E-02$ [kg/m ³]
$R_a = 5,76E+05$ [N/m]	$R_{av} = 267,01$ [N]	$S = 20,96$ [m ²]	$\tau_1 = 10$ [%]
$T_3 = 520,07$ [K]	$T_a = 460$ [K]	$t_{ac} = 21,23$ [s]	$t_{ac,h} = 5,90E-03$ [h]
$t_{des,s} = 793,48$ [s]	$t_{d,s} = 727,35$ [s]	$T_e = 227,33$ [K]	$T_f = 1,60$ [-]
$t_{tot,s} = 661,23$ [s]	$T_{t,conv} = 288,15$ [K]	$t_v = 10,31$ [min]	$t_{v,h} = 0,17$ [h]
$v_{conv} = 312,50$ [m/s]	$V_1 = 0,22$ [m ³]	$V_{II} = 0,03$ [m ³]	$V_{III} = 0,19$ [m ³]
$A_{cc} = 6,10$ [m ²]	$A_{comp} = 0,63$ [m ²]	$A_e = 0,26$ [m ²]	$A_f = 0,66$ [m ²]
$C = 36$ [%]	$c_a = 150$ [m/s]	$\bar{c}_{p,C,1} = 1.045$ [J/kg·K]	$\bar{c}_{p,C,2} = 1.025$ [J/kg·K]
$\bar{c}_{p,l,2} = 1.035$ [J/kg·K]	$\bar{c}_{p,tob} = 1.001$ [J/kg·K]	$C_{D,ext} = 0,68$ [-]	$C_{D,t} = 1,08$ [-]
$d = 0,1$ [m]	$\Delta \bar{h} = 0,0002$	$\Delta p_a = 30$ [Pa]	$\Delta p_L = 4.359$ [Pa]
$\delta_1 = 0,77$ [m ²]	$\delta_2 = 0,23$ [m ²]	$\delta_{comp} = 1,25E-02$ [m]	$\delta_{lc} = 4,00E-02$ [m]
$D_{comp} = 0,89$ [m]	$D_{desp} = 1,35$ [m]	$D_{movto} = 1,06$ [m]	$D_t = 2,94$ [m]
$\eta_{C,1} = 0,75$ [-]	$\eta_{C,2} = 0,75$ [-]	$\eta_{LIM} = 0,73$ [-]	$\eta_{mot} = 0,92$ [-]
$E_{bat} = 37,09$ [kWh]	$e_{bat,conv} = 900.000$ [J/kg]	$E_{gen} = -77,19$ [kWh]	$E_{,t} = 5,06$ [kWh/km]
$F_L = 3.457$ [N]	$F_S = 80.124$ [N]	$F_{tob} = 92,11$ [N]	$F_v = 224,57$ [N]
$\gamma_2 = 1,39$ [-]	$\gamma_o = 30$ [°]	$\gamma_{tob} = 1,40$ [-]	$h_1 = 1,30E-03$ [m]
$I_1 = 0,20$ [m]	$I_2 = 0,25$ [m]	$L_{ac} = 3,32$ [km]	$L_{aux} = 5,50$ [m]
$L_t = 200$ [km]	$L_{tub} = 22,5$ [m]	$L_v = 193,37$ [km]	$M = 0,92$ [-]
$m_{caj} = 0$ [kg]	$m_{comp} = 1.900$ [kg]	$\dot{m}_a = 0,03$ [kg/s]	$\dot{m}_{cc,m\acute{a}x} = 2,32$ [kg/s]
$\dot{m}_{tob} = 0,21$ [kg/s]	$m_{,bat} = 43,36$ [kg]	$m_{EB} = 650$ [kg]	$m_{H_2O} = 187,15$ [kg]
$m_{pzs} = 60$ [kg]	$m_{tot} = 8.604$ [kg]	$n_a = 30$ [-]	$n_{caj} = 750$ [-]
$\psi = 0,00$ [-]	$p_1 = 2.100$ [Pa]	$P_{1,} = 5,93E+07$ [W]	$p_a = 6.371$ [Pa]
$\bar{P}_{C,2} = 5.290$ [W]	$\bar{P}_{tob} = 5.756,82$ [W]	$P_{C,1} = 124.392$ [W]	$P_{C,2} = 5.290$ [W]
$p_{tob} = 934,13$ [Pa]	$P_{tob,} = 28.784$ [h]	$P_v = 70.179$ [W]	$q = 45$ [%]
$\rho_e = 1,92E-03$ [kg/m ³]	$\rho_{H_2O} = 1.000$ [kg/m ³]	$\rho_t = 1,21E-03$ [kg/m ³]	$R_1 = 8,00$ [Ω]
$\tau_2 = 20$ [%]	$\theta = 0,07$ [m]	$T_1 = 790,59$ [K]	$T_2 = 350$ [K]
$t_d = 12,12$ [min]	$t_{dec} = 21,23$ [s]	$t_{dec,h} = 5,90E-03$ [h]	$t_{des} = 13,22$ [min]
$T_{o,t} = 336,76$ [K]	$T_t = 15$ [°C]	$t_{tot} = 11,02$ [min]	$t_{tot,h} = 0,18$ [h]
$t_{v,s} = 618,77$ [s]	$v = 1.125$ [km/h]	$V_1 = 24.578$ [V]	$\bar{v} = 1.089$ [km/h]
$w = 0,40$ [m]	$w_{LIM} = 0,50$ [m]	$X_1 = 5,22$ [Ω]	

Fig. 12.9. Resultados de la tercera geometría, viaje de vuelta.

El consumo global es -12,38 más 5,06 kWh/km, cuyo resultado es -7,32 kWh/km. Por tanto, en esta ruta se generan 7,32 kWh/km porque se aprovecha la diferencia de potencial gravitatorio cuando el tren está lleno.

Cabe preguntarse para qué α se empieza a generar energía. En la siguiente tabla se pueden ver los valores de E'_t en función de α y ψ . Para $\alpha > 0$ y $\psi = 0$ la cápsula asciende vacía y para $\alpha < 0$ y $\psi = 1$ desciende llena.

1..12	1 α [°]	2 ψ [-]	3 E'_t [kWh/km]
Run 1	0,50	0	0,90
Run 2	-0,50	1	1,82
Run 3	1,00	0	1,18
Run 4	-1,00	1	0,87
Run 5	1,50	0	1,46
Run 6	-1,50	1	-0,08
Run 7	2,00	0	1,74
Run 8	-2,00	1	-1,03
Run 9	2,50	0	2,01
Run 10	-2,50	1	-1,98
Run 11	3,00	0	2,29
Run 12	-3,00	1	-2,93

Tabla 12.2. Valores de E'_t en función de α y ψ .

Se concluye que para $0 < \alpha < 2,50$ la ruta consume netamente energía porque la inclinación es pequeña y la diferencia de energía potencial gravitatoria apenas influye (las pérdidas del LIM y de la cápsula predominan sobre ella), pero a partir de $\alpha = 2,50$ el balance neto de energía es prácticamente nulo y para $\alpha \geq 3$ se genera netamente energía ($2,29 - 2,93 = -0,64$ kWh/km en el caso de $\alpha = 3$). Por ende, será conveniente que la pendiente supere los 3º de inclinación (52 milésimas).

Por último, en cuanto a las demás consideraciones acerca de I_c , A_{tub} , D_{tub} y L_{tob} , estas siguen vigentes.

13. Valores numéricos del vaciado del tubo

El tubo se puede vaciar con bombas de vacío siguiendo un proceso isoterma o uno adiabático (idealmente isoentrópico) con refrigeración intermedia, como se explica al comienzo del anexo [V]. En dicho anexo pueden verse la demostración de las fórmulas, la definición de las nuevas variables y los cálculos hechos para el tubo del primer modelo y para el del segundo. En las próximas tablas pueden consultarse los valores numéricos obtenidos junto con los tres principales datos de partida (p_t, T_t, D_t) de las operaciones realizadas para la compresión isoterma (primera tabla) y para la adiabática (segunda):

	Primer modelo	Segundo modelo
p_t [Pa]	250	100
T_t [°C]	20	20
D_t [m]	9,37	2,94
$ \bar{w}_{red} $ [kWh/kg]	0,20	0,23
Δm [kg]	82.840,18	8.167,71
$ \bar{W}_{red} $ [kWh]	16.562,16	1.931,94
t_{ev} [h]	30,43	3,45
P_{red} [kW]	544,27	559,56

Tabla 13.1. Valores numéricos del vaciado de 1 km de tubo con una bomba isoterma.

	Primer modelo	Segundo modelo
p_t [Pa]	250	100
T_t [°C]	20	20
D_t [m]	9,37	2,94
\bar{w}_{red} [kWh/kg]	$5,17 \cdot 10^{-2}$	$5,67 \cdot 10^{-2}$
Δm [kg]	82.840,18	8.167,71
\bar{W}_{red} [kWh]	4.264,02	461,99

Tabla 13.2. Valores numéricos del vaciado de 1 km de tubo con una bomba adiabática.

En conclusión, la compresión isoterma es unas 4 veces más costosa energéticamente que la isoentrópica, lo cual es debido a que el área contenida en el diagrama p-V bajo la curva isoterma $pV = cte.$ es mayor que la contenida bajo $pV^\gamma = cte.$ al cumplirse $\gamma > 1$ (curva con mayor pendiente).

No obstante, las bombas adiabáticas con el intercambiador de calor son más complejas, pero el hecho de ser menos potentes (suministran cuatro veces menos energía al fluido en un tiempo que será del mismo orden) contribuirá a abaratarlas.

14. Revisión de las fuentes de información

Para la elaboración de este trabajo se han consultado varias fuentes de información:

El artículo [1] trata sobre la levitación y propulsión del tren. Al principio describe cualitativamente la suspensión electromagnética (EMS) y electrodinámica (EDS). Inmediatamente después se explica que el objetivo del artículo es explicar cómo aplicar la suspensión EDS sin necesidad de ruedas en la cápsula para las bajas velocidades, para lo cual hay que emplear un motor síncrono lineal (LSM) en vez de un motor de inducción lineal (LIM) en la levitación. En el resto del texto se detalla la disposición constructiva del LSM y las fórmulas que modelan su comportamiento. Lo más relevante de este documento para el trabajo es la reseña que se hace de los sistemas de levitación y propulsión y algunas de las fórmulas que aparecen.

El artículo [2] de nuevo trata el sistema EDS sin ruedas, aunque esta vez se centra más en su diseño y control basándose en las ecuaciones de los campos magnéticos que aparecen. Algo importante sobre el control es que debe mantener la cápsula siempre paralela a las bobinas de levitación, evitándose el cabeceo u otros movimientos indeseables del tren. Este documento aporta al proyecto menos que el anterior, pero se puede aprovechar parte de la teoría y alguna fórmula.

El [3] abarca el tema de las vibraciones en la estructura. El texto parte de las cargas a las que se ve sometida la estructura y mediante una formulación Lagrangiana calcula la frecuencia de las vibraciones de la estructura en función de la distancia entre pilares. Es importante resaltar que se le da mucha importancia al cálculo del factor de amplificación dinámico (DAF), ya que cobra especial relevancia en el Hyperloop debido a sus elevadas velocidades. Este texto aporta al proyecto unas pocas fórmulas y, sobre todo, ayuda mucho a elegir la distancia entre pilares correcta para que la resonancia no haya lugar.

El archivo [4] contiene toda la información sobre los sistemas de transporte neumático existentes en la actualidad. Se proporcionan datos, fórmulas y consejos ingenieriles acerca de la construcción de líneas para el transporte neumático de materiales diversos. Este archivo contribuye al proyecto porque este tipo de transporte es un antecedente de los trenes de tubo al vacío y hay que tener en cuenta sus datos de relevancia ingenieril y las fórmulas para calcular los sistemas.

El artículo [5] trata acerca del transporte neumático encapsulado. Se describen dichos sistemas y se aportan datos ingenieriles y fórmulas basadas en las leyes de Newton para calcularlos. Este texto contribuye al proyecto porque el transporte neumático encapsulado es un antecedente directo de los trenes de tubo al vacío y usando los datos y las fórmulas es posible calcular dichos sistemas que antecedieron a estos trenes.

El artículo [6] aborda las ventajas del sistema Hyperloop. Por una parte describe el motor de inducción lineal que se emplearía para la aceleración y, por otra, dice que el uso del cojín de aire requeriría una potencia de 21 MW, cifra inferior a los 57 MW generados por los paneles fotovoltaicos que se colocarían sobre el tubo. Habla de los modelos propuestos por Elon Musk en [18] para el transporte de pasajeros y otro para el transporte combinado de pasajeros y mercancías y calcula los coeficientes aerodinámicos asociados al límite de Kantrowitz para cada modelo, es decir, la ratio α entre la proyección del área frontal de la cápsula y la sección del tubo y la ratio β de diámetros. Por ende, lo importante de este artículo son los datos y el cálculo de los coeficientes.

El documento [7] es un documento técnico hecho por la Autoridad Federal Ferroviaria de Alemania acerca de los principios que permiten diseñar una línea de levitación magnética. Dichos principios se analizan extensamente. Para el proyecto se emplea el análisis de las resistencias al avance de un Transrapid con N secciones expuesto hacia el principio del documento.

El artículo [8] trata también el sistema EDS sin ruedas, pero desde otra perspectiva. En él se parte de las leyes fundamentales de la electromagnética para deducir otras fórmulas y se estudia de forma más profunda las pérdidas ocasionadas y cómo poder minimizarlas. Un dato importante que se menciona es que el arrastre que genera el EDS se reduce con la velocidad, al contrario que el arrastre aerodinámico (el cual se desprecia todo el texto). Este documento aporta al proyecto algunas fórmulas y algunos dibujos o gráficas.

El documento [9] es una comparación del consumo energético entre los trenes de alta velocidad ICE 3, Shinkansen N 700 y TGV Duplex Dasye y los trenes de levitación magnética Transrapid TR08 y Chuo Shinkansen. De este documento se toman los datos de masa y número de asientos del Transrapid TR08 con 5 secciones.

El libro [10] analiza la dinámica de los trenes de alta velocidad. En él se analizan todas las resistencias que un tren ha de vencer en su trayecto. Además, se dan valores de los coeficientes para el cálculo de dichas resistencias. Este libro contribuye al proyecto con varias fórmulas y los coeficientes que en ellas deben introducirse para hallar la resistencia al avance de un AVE de la serie 103.

El artículo [11] compara las características definitorias (tracción, tipo de línea y compatibilidad, tráfico de pasajeros o de carga, máxima velocidad y coste) de tres trenes de alta velocidad (Shinkansen, TGV, ICE), de trenes de levitación magnética (Transrapid, HSST, Indutrack y SCMaglev) y del Hyperloop. En cuestión de coste, el Hyperloop es más barato que los trenes de levitación magnética (excepto el Transrapid, que es igual de costoso) y en general es más caro que los de alta velocidad. Al término del documento se concluye que el futuro ferroviario no es solamente una cuestión de

velocidad, sino también de los servicios ofertados a los usuarios y de la eficiencia energética. Este documento es necesario para el trabajo porque es preciso comparar el Hyperloop con otras alternativas ferroviarias de alta velocidad que se han ido desarrollando en las últimas décadas.

El [12] aborda los sistemas de transporte neumático encapsulados aplicados al almacenamiento de residuos radiactivos en cementerios nucleares. Estos se describen con fórmulas basadas en las leyes de Newton, entre otras. Para este trabajo son importantes las fórmulas que permiten calcular estos sistemas.

El [13] es un compendio de diversos aspectos acerca del Hyperloop: Sistemas de propulsión y levitación, efectos aerodinámicos del trayecto del vehículo dentro del tubo, respuesta del tubo a una carga móvil (vehículo desplazándose en el interior del tubo), la oscilación natural y dinámica del tubo y, al final, las fuerzas dinámicas del tubo causadas por la aerodinámica del viento fuera del tubo. En el primer apartado se explica la levitación según las ecuaciones de Maxwell y la propulsión de un modo más resumido, enfocándose en el empleo de motores de inducción lineal para dicho cometido. En el segundo apartado se pone el acento en cómo superar el límite de Kantrowitz, para lo cual se proponen tres alternativas: un tubo lo suficientemente ancho para que el aire pase sin problemas alrededor del tren, una densidad del aire reducida y una derivación de aire a través del propio vehículo. Se trata el compresor como un tipo de derivación que apartaría el aire del camino del tren, con lo cual la fricción se vería reducida y el aire comprimido podría usarse para generar un empuje secundario en una tobera en la parte trasera del tren. Del tercer tema se habla menos, principalmente se exponen los tipos de cargas que entran en juego. El cuarto tema es estudiado teniendo en cuenta todos los factores que determinan la amplitud de las oscilaciones y el quinto y último se estudia con el número de Strouhal y con una ley del perfil de viento que se ha supuesto. Este artículo es grandemente útil para el trabajo porque explica muy bien las cargas que entran en juego (hay un esquema con todas ellas) y la frecuencia de las oscilaciones que cada carga causará en la estructura (en el mismo esquema). Además, estudia el efecto del viento en la estructura y propone soluciones para poder superar el límite de Kantrowitz.

El [14] trata la integración de la propulsión, la levitación y el control (el guiado) en un único dispositivo. Se analizan varios casos con datos numéricos obtenidos gracias a un modelo computacional. Para el proyecto lo más útil son los datos numéricos.

El [15] es un estudio acerca de la disposición óptima de los paneles solares sobre el tubo. Se analizan varios casos (varias configuraciones) teniendo en cuenta también cómo podría estar orientado al tubo respecto al sol. Tras el análisis se explica qué caso es menos costoso, cuál recoge más energía solar, cuál tiene un menor coeficiente de variación diario y cuál tiene una potencia de pico mayor, la cual se produce en las

horas centrales del día. Este estudio es relevante para el proyecto porque a la hora de definir la infraestructura es preciso escoger una configuración para las placas solares.

El documento [16] es un compendio de todos los aspectos técnicos que hacen posible un tren de levitación magnética. Se enfoca en el Transrapid TR07, que no es muy distinto al Transrapid TR08 analizado en este trabajo, por lo que el dato de aceleración promedio del TR07 puede considerarse el mismo para el TR08, ya que en la realidad o bien será similar o bien será viable hacerlo similar.

El artículo [17] trata los aspectos aerodinámicos de los trenes cuando transitan en el interior de túneles y las ondas de presión que en se generan en estas situaciones. El artículo se enfoca en el AVE y se calculan los factores de túnel para varios casos de túneles del AVE. Este artículo aporta al proyecto las fórmulas para el cálculo del factor de túnel, ya que el tubo del Hyperloop se puede ver como el túnel de un tren de alta velocidad convencional.

El documento [18] es una propuesta de construcción de una línea Hyperloop entre Los Ángeles y San Francisco. En ella se analizan dos versiones, una destinada al transporte de pasajeros y otra al transporte de pasajeros y mercancías. Para cada caso se describen las características técnicas con las cuales contará la línea y los vehículos. También se proponen alternativas para la levitación, que puede ser magnética mediante un cojín de aire, opción esta última que acaba escogiéndose debido a su coste más barato. Por otro lado, se proponen soluciones para superar el límite de Kantrowitz y evitar la formación de ondas de choque, para lo cual se prevé el uso de un compresor axial y tener una ratio área de la cápsula/área del tubo razonablemente pequeño. Al final del texto se analiza el coste de cada opción y se concluye que construir el Hyperloop es más barato que el corredor de alta velocidad proyectado (actualmente en construcción) entre ambas urbes. Este documento es altamente útil para el trabajo porque aporta la teoría general del Hyperloop y muchos datos de utilidad (véanse los más sobresalientes en la sección [2]), así como propuestas y soluciones ingenieriles a los problemas que podrían surgir.

El documento [19] es una guía de la empresa New Way Air Bearings en la cual se explican los diferentes tipos de rodamientos de aire y todos sus aspectos relevantes con gráficas experimentales y fórmulas. Para el trabajo lo más relevante de la guía son las fórmulas y conceptos como la rigidez de un rodamiento o la distinción entre un rodamiento aerodinámico y otro aerostático.

El artículo [20] se centra en la problemática del Hyperloop. Comienza mencionando las ideas de Robert H. Goddard (cuya patente aparece al final) y de Elon Musk y sigue enunciando las dos opciones principales para conseguir la levitación de una cápsula Hyperloop: Levitación mediante a un cojín de aire comprimido (en este caso el compresor limitaría la velocidad del tren por debajo de la sónica) y levitación

electromagnética. Después menciona que alcanzar 100 Pa es complicado, pero conseguible con bombas de desplazamiento positivo. También enuncia los problemas asociados al transporte de pasajeros: Problemas de evacuación en caso de accidentes, deceleraciones bruscas, choques de trenes. Por último, habla de que pequeñas desviaciones en el tubo pueden causar bataneo y de la existencia de obstáculos económicos, legales y políticos para la construcción del Hyperloop. Por tanto, este artículo es útil para el trabajo porque da una visión global de los problemas del sistema Hyperloop.

El [21] es un análisis de las prestaciones operativas, financieras y del entorno social del sistema Hyperloop. Para hacer el análisis se emplean numerosas fórmulas para el cálculo de las capacidades, de los tiempos, de las velocidades y de los costes, entre otras variables. Se concluye que el Hyperloop puede competir con los aviones en distancias largas, pero tiene desventajas operativas y financieras que habrá que solventar. Este texto aporta algunas fórmulas y las líneas generales al trabajo.

Las referencias que abarcan de la [22] a la [28] son diversas páginas en las que se explican los antecedentes de los trenes de tubo al vacío, por lo que también contribuyen al proyecto en el apartado [3].

En las referencias de la [29] a la [31] se encuentran las medidas y los pesos de los cargamentos descritos en el apartado [5].

En las páginas que abarcan de la [32] a la [36] se hallan datos empleados para fijar algunos datos de partida de las simulaciones.

Las referencias que van de la [37] a la [44] son datos y valores numéricos utilizados principalmente en los cálculos del transporte neumático del anexo [I], pudiéndose consultar algunos de ellos en el anexo [II].

Las páginas web de la [45] a la [47] contienen datos técnicos empleados en el anexo [III] para obtener los resultados que permiten comparar los tres trenes.

Las páginas de la [48] a la [54] contienen parte de las ecuaciones o de los datos usados para el anexo [IV] para la justificación de las demás ecuaciones.

15. Fuentes de información

[1] Abdelrahman, A. S., Sayeed, J. M., Youssef, M. Z. "Hyperloop Transportation System: Control, and Drive System Design", *2018 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*, septiembre de 2018.

- [2] Abdelrahman, A. S., Sayeed, J. M., Youssef, M. Z. "Hyperloop Transportation System: Analysis, Design, Control and Implementation", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 65, no. 9, pp. 7427-7436, septiembre de 2018.
- [3] Alexander, N. A., Kashani, M. M. "Exploring Bridge Dynamics for Ultra-high-speed, Hyperloop, Trains", *ELSEVIER Structures*, vol. 14, pp. 69-74, junio de 2018.
- [4] Bhatia, A. "Pneumatic Conveying Systems", *Continuing Education and Development, Inc.*, Course No.: M05-010.
- [5] Belova, O.V., Vulf, M.D. "Pneumatic capsule transport", *ELSEVIER Procedia Engineering*, vol. 152, pp. 276-280, abril de 2016.
- [6] Dudnikov, E. E. "Advantages of a New Hyperloop Transport Technology", *2017 Tenth International Conference Management of Large-Scale System Development (MLSD)*, octubre de 2017.
- [7] Federal Railway Authority. "High-speed Maglev System Design Principles", *White Paper*, febrero de 2007.
- [8] Flankl, M., Wellerdieck, T., Tüysüz, A., Kolar, J. W. "Scaling laws for electrodynamic suspension in high-speed transportation", *IET Electric Power Applications*, vol. 12, no. 3, pp. 357-364, marzo de 2018.
- [9] Fritz, E., Klüspies, J., Kircher, R., Witt, M., Blow, L. "Energy Consumption of Track-Based High-Speed Transportation Systems", *The International Maglev Board*, Research Series vol. 3, noviembre de 2018.
- [10] García, A. "Dinámica de los trenes en alta velocidad", Fundación de los Ferrocarriles Españoles, 2015.
- [11] González-González, E., Nogués, S. "The future of rail: Evolution and perspectives of high-speed rail, maglev and Hyperloop", *DYNA*, vol. 92, pp. 371-373, no. 4, julio de 2017.
- [12] Hane, K., Okutsu, K., Matsui, N., Kosugi, S. "Applicability of Pneumatic Capsule Pipeline System to Radioactive Waste Disposal Facility", *ResearchGate*, julio de 2003.
- [13] Janzen, R. "TransPod Ultra-High-Speed Tube Transportation: Dynamics of Vehicles and Infrastructure", *ELSEVIER Procedia Engineering*, vol. 199, pp. 8-17, 2017.
- [14] Ji, W. Y., Jeong, G., Park, C. B., Jo, I. H., Lee, H. W. "A Study of Non-Symmetric Double-Sided Linear Induction Motor for Hyperloop All-In-One System (Propulsion, Levitation, and Guidance)", *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 54, no. 11, noviembre de 2018.

- [15] Kwon, K., Yeom, J., Kim, K. A. "Photovoltaic Panel Orientation Study for Tube-Enclosed Transportation Systems", *2017 IEEE 3rd International Future Energy Electronics Conference and ECCE Asia (IFEEC 2017 - ECCE Asia)*, julio de 2017.
- [16] Lever, J. H. "Technical Assesment of Maglev System Concepts", US Army Corps of Engineers®, octubre de 1998.
- [17] Melis, R. J., de Matías, I., Alonso, J. M., Navarro, J. L., Tasis, J. L. "Diseño de túneles para trenes de alta velocidad. Rozamiento tren-aire-túnel y ondas de presión", *Revista de obras públicas*, vol. 148, no. 3415, pp. 27-44, noviembre de 2001.
- [18] Musk, E. "Hyperloop Alpha", *White Paper*, agosto de 2013.
- [19] New Way Air Bearings, "Air bearing application and design guide", *White Paper*, enero de 2006.
- [20] Ross, P. E. "Hyperloop: No pressure", *IEEE Spectrum*, vol. 53, no. 1, pp. 51-54, enero de 2016.
- [21] van Goeverden, K., Milakis, D., Janic, M., Konings, R. "Analysis and modelling performances of the Hyperloop transport system", *European Transport Reseach Review*, septiembre de 2018.
- [22] <https://www.businessinsider.com/history-hyperloop-pneumatic-tubes-as-transportation-2017-8>
- [23] https://www.gracesguide.co.uk/George_Medhurst
- [24] https://www.gracesguide.co.uk/William_Murdoch
- [25] <http://www.ikbrunel.org.uk/atmospheric-railway>
- [26] <http://vauxhallhistory.org/london-pneumatic-despatch-company/>
- [27] <https://www.businessinsider.com/elon-musks-hyper-loop-2012-9>
- [28] <http://tectonicablog.com/?p=14517>
- [29] <https://www.contenedores-maritimos.net/estandar-dry-van/contenedor-20-dv/>
- [30] <http://www.estalki.com/embalaje/cajas-carton-estandar/>
- [31] <https://www.rajapack.es/blog-es/embalaje/te-ayudamos-elegir-la-caja-que-buscas/>
- [32] <https://evtrader.com/innolith-claims-to-1000-wh-kg-battery-energy-density/>
- [33] <https://personales.unican.es/rene/doc/Trasperecias%20WEB/Trasp%20Termo%20y%20MF/00%20GRADOS/Tablas%20Termo.pdf>

- [34] http://www.nelsonair.com/NA_primer.htm
- [35] <https://secretosf1.wordpress.com/2010/03/27/los-alerones-el-angulo-de-ataque/>
- [36] <https://www.lmnoeng.com/Flow/GasViscosity.php>
- [37] https://neutrium.net/fluid_flow/pressure-loss-in-pipe/
- [38] http://www.vaxasoftware.com/doc_edu/fis/densidades.pdf
- [39] https://previa.uclm.es/area/ing_rural/Hidraulica/Temas/TablaRugosidadAbsolutaMateriales.pdf
- [40] <http://didactica.fisica.uson.mx/tablas/viscosidad.htm>
- [41] <https://quimica.laguia2000.com/conceptos-basicos/constante-universal-de-los-gases-ideales>
- [42] <https://es.calcprofi.com/masa-molar-de-aire.html>
- [43] <https://www.modeloingenieria.edu.ar/images/IntegracionIII/Material-ext/20102BT24022421824010402121073.pdf>
- [44] <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/thermo/adiab.html>
- [45] http://www.renfe.com/viajeros/nuestros_trenes/aves103_ficha.html
- [46] <http://blog.renfe.com/2010/12/23/ahorramos-energia-y-la-recuperamos/>
- [47] <http://www.smtdc.com/en/gycf3.html>
- [48] <https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/isentrop.html>
- [49] <https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/mflchk.html>
- [50] <http://www.braeunig.us/space/sup1.htm>
- [51] <https://www2.uned.es/ing-fluidos/IntroMF/node70.html>
- [52] <https://www2.uned.es/ing-fluidos/IntroMF/node71.html>
- [53] <https://es.slideshare.net/keniarp/ley-de-viscosidad-de-newton>
- [54] http://www.dicis.ugto.mx/profesores/agallegos/documentos/Cap.%209_Flujo%20viscoso%20externo.pdf

Anexo I: Transporte neumático

El transporte neumático es un sistema desarrollado durante los siglos XIX y XX que permite transportar objetos a lo largo de una determinada distancia mediante el uso de un gas, generalmente el aire.

Presenta tres ventajas frente a otros sistemas (tornillo sinfín, cinta transportadora, transporte por vibración, transporte por arrastre y otras metodologías):

1. Los sistemas neumáticos son relativamente económicos de instalar y operar.
2. Están totalmente encerrados, por lo que son limpios y fáciles de mantener. Además, los materiales transportados no entran en contacto con partes móviles.
3. Son flexibles en términos de expansión y reordenación. Pueden llevar un producto a cualquier parte que pueda alcanzar una línea neumática.

Tradicionalmente se han transportado materiales en polvo o granulados [4, p. 2] y cápsulas (en tubos de Lamson) [28]. Cuando se transportan materiales en polvo o granulados, estos materiales deben tener una densidad comprendida entre 16 y 3.200 kg/m³ y un diámetro de hasta 5 cm [4, p. 2].

Actualmente se distingue entre tres tipos de transporte neumático, con sus correspondientes especificaciones [4, pp. 2-3]:

1. Transporte en fase diluida: Es un proceso continuo en el que el material permanece en suspensión en la corriente de aire y es soplado o aspirado a través del tubo [4, p. 2]. Se caracteriza por una velocidad de transporte entre 55 y 146 km/h, una presión de 136.000 a 184.000 Pa si se sopla el material (presión manométrica positiva) o de 13.500 a 40.600 Pa si se aspira el material (presión de vacío) y una relación aire/material mayor de 2 [4, pp. 3-4]. Concretando más, en los sistemas de presión positiva la tasa de transporte varía entre menos de 1 y 50 Tm/h, la distancia de transporte llega a 183 m o más y el aire se desplaza con un soplante de tipo Roots o con un ventilador [4, p. 6]; mientras que en los sistemas de presión negativa la tasa de transporte es típicamente inferior a 10 Tm/h, la distancia alcanza 91,5 m o más y el aire se mantiene en movimiento gracias a un soplante de tipo Roots o un ventilador [4, p. 8]. En cualquier caso, la velocidad del material es típicamente un 70 % de la velocidad de transporte en tubos verticales y un 80 % en tubos horizontales porque existe un cierto deslizamiento cuando se transporta en fase diluida [4, p. 12].

2. Transporte en fase densa: Es un proceso discontinuo en el que el material es transportado mediante el empuje de pulsos de aire [4, p. 3]. Se caracteriza por una tasa de transporte de más 100 Tm/h, una velocidad de transporte entre 3,65 y 36,5 km/h, una distancia de transporte de hasta 3.050 m o más, una presión de hasta 963.000 Pa y una relación aire/material menor de 0,2. Con respecto al transporte en

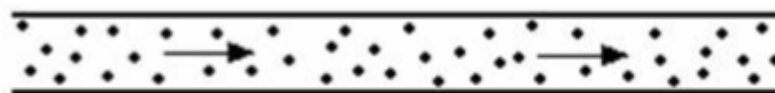
fase diluida, en este caso la velocidad puede ser de uno o dos órdenes de magnitud inferior (3,6-36,5 frente a 55-146 km/h), lo que hace que el transporte en fase densa se utilice principalmente para materiales friables o abrasivos, ya que es menos probable que un material friable se desmenuce si impacta contra el tubo a estas velocidades y, por el otro lado, la erosión específica del tubo causada por un material abrasivo es menor. Para mover el aire se emplea un compresor de tornillo o alternativo [4, pp. 31-33]. Una consideración relevante en este tipo de transporte es la expansión del aire [4, p. 42], ya que a medida que se expande el aire en un tubo de área constante disminuye su densidad, por lo que la velocidad se incrementa para mantener el flujo másico (producto de las tres variables mencionadas) constante. Por ello, en algunos diseños puede ser necesario incrementar la sección del paso de manera telescópica [4, pp. 10-12].

3. Transporte por gravedad activado por aire: En este caso la fuerza impulsora es la gravitatoria en vez de la debida a la presión, pero el material sigue inmerso en una corriente de aire [4, p. 3].

A continuación, cuatro ejemplos de transporte neumático con diferente formulación en cada caso:

I.1. Primer ejemplo:

Se transportan en fase diluida 0,23 kg/s de serrín en una tubería de 0,15 m de diámetro y la ratio aire/material es 2:1 y se desea estimar la velocidad de transporte, el caudal de aire y la potencia requerida por unidad de longitud.



Dilute-Phase - (Suspension Flow)

Fig. I.1. Detalle del transporte de serrín en fase diluida. Fuente: [4, p. 3].

Primero de todo, la velocidad de transporte será de 74,50 km/h y el caudal de aire requerido de 0,38 m³/s por segundo [4, p. 16]. Para estimar la potencia necesaria por cada 100 ft o 30,48 m de recorrido hay que tener en cuenta qué salto de presión se necesita. Dicho salto de presión puede estimarse con la siguiente ecuación [4, p. 51]:

$$\Delta p_{tot} = \Delta p_{ac} + \Delta p_g + \Delta p_s + \Delta H_g + \Delta H_s + \Delta p_{misc} \quad [\text{Ec. I. 1}]$$

Donde cada término significa lo siguiente:

1. Δp_{ac} [Pa] es la diferencia de presión requerida para acelerar el material desde el reposo hasta la velocidad terminal. Se calcula con la siguiente fórmula:

$$\Delta P_{ac} = \frac{F_{impulso}}{A} = \frac{\dot{m}_s v_s}{A} = \frac{\dot{m}_s s v_g}{A} \quad [\text{Ec. I. 2}]$$

Donde $F_{impulso}$ [N] es la fuerza que se requiere para impulsar el sólido desde el reposo hasta su velocidad terminal v_s [m/s], la cual se puede expresar en función de la velocidad del gas v_g [m/s] y del deslizamiento s [ϕ] existente entre ambas. Con la letra A se denota el área transversal de tubo [m^2].

2. Δp_g [Pa] es la caída de presión debida a la fricción del gas con las paredes de la tubería. Este dato se puede obtener de tablas [4, p. 19], aunque también existen diversas fórmulas para su cálculo:

$$\Delta p_g = \rho_g g \left((4f) \frac{L v_g^2}{D 2g} \right) = 2 \rho_g f \frac{L}{D} v_g^2 \quad [\text{Ec. I. 3}]$$

$$f = \frac{0,33}{\left[\ln \left(\frac{\varepsilon}{3,70 D} + \frac{7}{Re} \right) \right]^2} \quad [\text{Ec. I. 4}]$$

$$Re = \frac{\rho_g v_g D}{\mu_g} \quad [\text{Ec. I. 5}]$$

Donde la primera fórmula es la pérdida de carga según la expresión de Darcy-Weisbach; la segunda se corresponde con el factor de fricción de Fanning f , que se multiplica por 4 al introducirlo en la ecuación de Darcy-Weisbach porque el factor de fricción de Darcy-Weisbach es cuatro veces el de Fanning [37]; mientras que la última ecuación permite el hallazgo del número de Reynolds Re [ϕ]. Con respecto a las variables aún no presentadas, ρ_g [kg/m^3] es la densidad del gas, g [m/s^2] la aceleración de la gravedad, L [m] la longitud de la tubería, D [m] su diámetro, ε [m] su rugosidad y μ_g [$\text{Pa}\cdot\text{s}$] la viscosidad dinámica del gas.

3. Δp_s [Pa] es la pérdida de presión debida a la fricción del sólido con el gas y se halla en función de Δp_g :

$$\Delta p_s = \Delta p_g K R \quad [\text{Ec. I. 6}]$$

Donde K es el multiplicador de fricción y R la relación material/aire, ambos adimensionales.

4. El término ΔH_g [Pa] representa la pérdida de presión debida a la elevación del gas y responde a la siguiente fórmula:

$$\Delta H_g = \rho_g g \Delta z = \frac{\dot{m}_g}{A v_g} g \Delta z \quad [\text{Ec. I. 7}]$$

Donde \dot{m}_g [kg/s] es el flujo másico de gas y Δz [m] la diferencia de cotas.

5. El término ΔH_s [Pa] es análogo al término ΔH_g , pero se aplica al sólido transportado. Se calcula también de forma análoga:

$$\Delta H_s = \rho_s g \Delta z = \frac{\dot{m}_s}{A v_s} g \Delta z \quad [\text{Ec. I. 8}]$$

Donde \dot{m}_s [kg/s] es el flujo másico de material.

6. El último sumando es Δp_{misc} [Pa] y engloba pérdidas de carga misceláneas [4, pp. 52-56].

Sustituyendo los datos numéricos en las ecuaciones y obteniendo Δp_g de la tabla:

Para el cálculo de Δp_{ac} se puede considerar que el deslizamiento s vale 0,90 porque el serrín es un polvo fino [4, p. 52]:

$$\Delta p_{\text{ac}} = \frac{0,23 \cdot 0,90 \cdot \frac{74,50}{3,60}}{\pi \cdot \frac{0,15^2}{4}} = 242,42 \text{ Pa}$$

Con el dato de velocidad 4.073 ft/min (74,50 km/h) y el dato de diámetro 6'' (0,15 m) se entra en la tabla e interpolando se halla que Δp_g para una distancia de 100 ft (30,48 m) vale 4,44 in w.g. (1.105,60 Pa) [4, p. 19].

Para este ejemplo el factor multiplicador de fricción K vale 1,17 [4, p. 20], por lo que:

$$\Delta p_s = 1.105,60 \cdot 1,17 \cdot \frac{1}{2} = 646,78 \text{ Pa}$$

Los términos ΔH_g y ΔH_s pueden despreciarse en estos cálculos iniciales si se considera que la tubería es horizontal. Para considerar Δp_{misc} puede aumentarse ligeramente la presión tras sumar los términos ya calculados.

Sumando los términos:

$$\Delta p' = 242,42 + 1.105,60 + 646,78 = 1.994,80 \text{ Pa}$$

Si se incrementa en un 20 % para tener en cuenta la incertidumbre de este método (que es del 10 % [4, p. 51]) y Δp_{misc} :

$$\Delta p_{\text{tot}} = 1.994,80 \cdot 1,20 = 2.393,76 \text{ Pa}$$

Con este dato, el caudal y suponiendo que se emplea un soplante Roots con un rendimiento global del 50 % se puede calcular la potencia, aunque antes hay que hacer determinadas correcciones al caudal:

Las fugas de aire pueden alcanzar el 50 % en el alimentador de material [4, p. 42]. Incrementando el caudal en un 30 %:

$$Q_{tot} = 0,38 \cdot 1,30 = 0,50 \frac{m^3}{s}$$

Además, para el cálculo de $0,38 \text{ m}^3/\text{s}$ se tuvo en cuenta que la densidad del aire valía $1,20 \text{ kg}/\text{m}^3$ [4, p. 16]. No obstante, para hallar la potencia del motor que acciona el soplante hay que considerar la densidad del conjunto serrín más aire, que vale $1,80 \text{ kg}/\text{m}^3$ y es lo que el soplante al final mueve mediante el suministro de potencia, a pesar de que solamente trasiegue el aire. Dividiendo esta densidad entre aquella se obtiene un factor de corrección F de 1,50 [4, p. 21].

Puesto que el salto de presión es pequeño y la fase diluida de presión negativa trabaja con saltos de presión menores que aquellos de presión positiva, para calcular la potencia se puede considerar que el compresor de tipo Roots (habitual en fase diluida) se sitúa al final de la línea y hace un ligero vacío para mover el aire con su carga (entonces, $\Delta p_{tot} < 0$, por lo que de ahora en adelante se denotará $|\Delta p_{tot}|$). Dicho esto, se procede a calcular la potencia recurriendo a las ecuaciones [II.12], [II.16], [II.19] e [II.20] del anexo [II] y a las constantes del aire presentes en dicho anexo (R , a , b , c y d):

$$P_{real} = \frac{Q_1 p_1 \bar{c}_p}{\eta R} \left(\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right) \quad [\text{Ec. II. 12}]$$

$$R = 0,29 \frac{kJ}{kg \cdot K}$$

$$\bar{c}_p = a + \frac{c}{3} T_1^2 + (T_1 + T_2) \left(\frac{b}{2} + \frac{c}{3} T_2 + \frac{d}{4} (T_1^2 + T_2^2) \right) \quad [\text{Ec. II. 16}]$$

$$a = 6,71 \frac{kcal}{kmol \cdot K}, b = 4,70 \cdot 10^{-4} \frac{kcal}{kmol \cdot K^2}, c = 1,15 \cdot 10^{-6} \frac{kcal}{kmol \cdot K^3},$$

$$d = -4,70 \cdot 10^{-10} \frac{kcal}{kmol \cdot K^4}$$

$$\gamma = \frac{\bar{c}_p}{\bar{c}_v} = \frac{\bar{c}_p}{\bar{c}_p - R} \quad [\text{Ec. II. 19}]$$

$$T_2 = T_1 \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \quad [\text{Ec. II. 20}]$$

Suponiendo que el aire ingresa al compresor a 20 °C (293,15 K) y suponiendo de partida que γ vale 1,40, tal como se indica en el anexo [II]:

$$T_2 = 293,15 \left(\frac{101.325}{98.931,24} \right)^{\frac{1,40-1}{1,40}} = 295,17 \text{ K}$$

$$\bar{c}_p = 6,71 + \frac{1,15 \cdot 10^{-6}}{3} 293,15^2 + (293,15 + 295,17) \left(\frac{4,70 \cdot 10^{-4}}{2} + \frac{1,15 \cdot 10^{-6}}{3} 295,17 + \frac{-4,70 \cdot 10^{-10}}{4} (293,15^2 + 295,17^2) \right) \cong 6,94 \frac{\text{kcal}}{\text{kmol} \cdot \text{K}} \cong 1,01 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

$$\gamma = \frac{\bar{c}_p}{\bar{c}_v} = \frac{\bar{c}_p}{\bar{c}_p - R} = \frac{1,01}{1,01 - 0,29} = 1,40$$

Finalmente se agrega el factor de corrección F a la ecuación [II.12] y se calcula la potencia corregida. El rendimiento del compresor Roots en tanto por unidad se puede suponer 0,50:

$$P_{corr} = \frac{0,5 \cdot 98.931,24 \cdot 1,01}{0,5 \cdot 0,29} \left(\left(\frac{101.325}{98.931,24} \right)^{\frac{1,40-1}{1,40}} - 1 \right) \cdot 1,50 = 3.542,50 \text{ W}$$

Por tanto, para transportar 0,23 kg/s de serrín en una cañería horizontal de 0,15 m de diámetro y una longitud de 30,48 m con una relación aire/serrín de 2:1 se requiere aproximadamente 3,54 kW. La densidad lineal de potencia será:

$$P' = \frac{3.540}{30,48} \cong 116 \frac{\text{W}}{\text{m}}$$

Para una longitud del doble se demandará prácticamente el doble de potencia, aunque no será así porque ΔP_{acc} no depende de la distancia y la fórmula para el cálculo de la potencia no es lineal con la presión. La potencia en este caso será:

$$|\Delta p_{tot}| = 1,20 \cdot (242,42 + 2 \cdot (1.105,60 + 646,78)) = 4.496,62 \text{ Pa}$$

$$T_2 = 293,15 \left(\frac{101.325}{96.828,38} \right)^{\frac{1,40-1}{1,40}} = 296,97 \text{ K} \rightarrow c_p \cong 1,01 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}, \gamma = 1,40$$

$$P_{corr} = \frac{0,5 \cdot 96.828,38 \cdot 1,01}{0,5 \cdot 0,29} \left(\left(\frac{101.325}{96.828,38} \right)^{\frac{1,40-1}{1,40}} - 1 \right) \cdot 1,50 = 6.603,25 \cong 6,60 \text{ kW}$$

$$P' = \frac{6.600}{2 \cdot 30,48} \cong 108 \frac{W}{m}$$

Para el séxtuple de la longitud inicial:

$$|\Delta p_{tot}| = 1,20 \cdot (242,42 + 6 \cdot (1.105,60 + 646,78)) = 12.908,04 Pa$$

$$T_2 = 293,15 \left(\frac{101.325}{88.416,96} \right)^{\frac{1,40-1}{1,40}} = 304,79 K \rightarrow c_p \cong 1,01 \frac{kJ}{kg \cdot K}, \gamma = 1,40$$

$$P_{corr} = \frac{0,5 \cdot 88.416,96 \cdot 1,01}{0,5 \cdot 0,29} \left(\left(\frac{101.325}{88.416,96} \right)^{\frac{1,40-1}{1,40}} - 1 \right) \cdot 1,50 = 18.338,44 W \cong \cong 18,34 kW$$

$$P' = \frac{18.340}{6 \cdot 30,48} \cong 100 \frac{W}{m}$$

En promedio:

$$\frac{116 + 108 + 100}{3} = 108 \frac{W}{m}$$

Si se asume que el rendimiento del motor que acciona el compresor es 0,90, la potencia que absorberá de la red por cada metro de circuito será esta:

$$P'_{red} = \frac{108}{0,90} = 120 \frac{W}{m}$$

Si se hubiera considerado la presión para elevar el material y el gas se habría visto que no es muy influyente para pequeñas diferencias de cotas. Esto se puede comprobar numéricamente considerando una diferencia de niveles de 1 m:

$$\Delta H_g = \frac{2 \cdot 0,23}{\frac{74,50}{3,60} \cdot \pi \cdot \frac{0,15^2}{4}} \cdot 9,81 \cdot 1 = 12,34 Pa$$

$$\Delta H_s = \frac{0,23}{0,90 \cdot \frac{74,50}{3,60} \cdot \pi \cdot \frac{0,15^2}{4}} \cdot 9,81 \cdot 1 = 6,86 Pa$$

$$\Delta H_g + \Delta H_s = 12,34 + 6,86 = 19,20 Pa$$

Escalándolo para 10 m:

$$19,20 \frac{Pa}{m \text{ elevado}} \cdot 10 m = 192 Pa$$

Incluyéndolo en el cálculo de P y P' para 200 ft (60,96 m, de los cuales 10 m son de tubería vertical):

$$|\Delta p_{tot}| = 1,20 \cdot (242,42 + 192 + 2 \cdot (1.105,60 + 646,78)) = 4.727,02 \text{ Pa}$$

$$T_2 = 293,15 \left(\frac{101.325}{96.597,98} \right)^{\frac{1,40-1}{1,40}} = 297,18 \text{ K} \rightarrow c_p \cong 1,01 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}, \gamma = 1,40$$

$$P_{corr} = \frac{0,5 \cdot 96.597,98 \cdot 1,01}{0,5 \cdot 0,29} \left(\left(\frac{101.325}{96.597,98} \right)^{\frac{1,40-1}{1,40}} - 1 \right) \cdot 1,50 = 6.935,63 \cong \\ \cong 6,94 \text{ kW}$$

$$P' = \frac{6.940}{2 \cdot 30,48} \cong 114 \frac{\text{W}}{\text{m}}$$

Considerando lo que el motor absorberá de la red:

$$P'_{red} = \frac{114}{0,9} \cong 127 \frac{\text{W}}{\text{m}}$$

Dado que hay cañerías verticales y horizontales harán falta codos para unirlos. También puede haber otros elementos como válvulas. Todos estos elementos se tratan con su longitud equivalente [4, p. 56]. Por ejemplo, la longitud equivalente de un codo a 90° es 40 veces su diámetro o 20 ft (6,10 m), el valor más grande. Todos estos elementos se tienen en cuenta en la longitud total.

Por tanto, la conclusión de este ejemplo es que para transportar 0,23 kg/s de serrín en una tubería de 0,15 m de diámetro con una relación aire/material de 2:1 se requiere poco más de 100 W en el compresor y unos 120 W en la red por cada metro de recorrido.

I.2. Segundo ejemplo

Se va a impulsar una cápsula cilíndrica de caucho a lo largo de un tubo neumático de policloruro de vinilo (PVC). La cápsula tiene un diámetro de 15,98 cm, una longitud de 32 cm, un espesor de 2 mm y se va a emplear para el transporte de 1 kg de material de oficina. El tubo presenta un diámetro de 16 cm y en los extremos de la cápsula están sus trapas, de 16 cm de diámetro y 0,75 cm de espesor cada una, por lo que contactan con el tubo. Sabiendo que la velocidad de transporte será 32 km/h se quiere estimar la potencia por unidad de longitud que requiere este sistema de transporte.

Para empezar, cabe decir que este sistema de transporte se asemeja al transporte en fase densa porque la velocidad es baja, el aire no pasa de un extremo a otro de la

cápsula y es un proceso discontinuo, a diferencia del serrín del primer ejemplo, que fluía continuamente inmerso en una corriente de aire. En las tapas de la cápsula que contactan con el tubo se produce un deslizamiento, por lo que habrá que considerar la fuerza de fricción que aparezca. El sistema es similar al que se puede ver en la siguiente imagen:

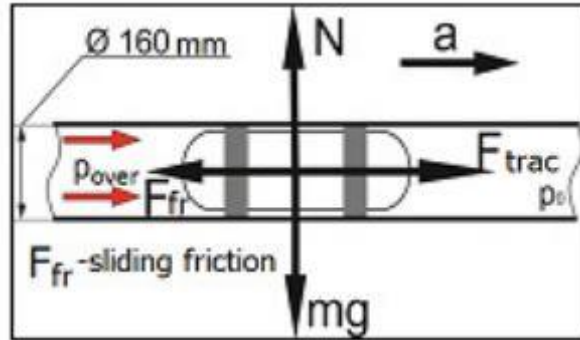


Fig. I.2. Sistema muy similar al descrito arriba. Fuente: [5, p. 2].

Lo primero que hay que realizar es el cálculo de la masa de la cápsula m_c y de las tapas m_t y sumarlas a la masa de los sólidos m_s que va a portar la capsula para obtener la masa total m (expresando todas ellas en kg). La densidad del caucho vale $0,95 \text{ g/cm}^3$ [38].

$$m_c = \rho_c V_c = \rho_c \frac{\pi L}{4} (D_e^2 - D_i^2) \quad [\text{Ec. I.9}]$$

$$m_t = 2 \rho_c V_t = 2 \rho_c \frac{\pi D_t^2}{4} e \quad [\text{Ec. I.10}]$$

$$m = m_c + m_t + m_s \quad [\text{Ec. I.11}]$$

Donde ρ_c [kg/m^3] es la densidad del caucho, V_c y V_t [m^3] los volúmenes de la cápsula y de una tapa, e [m] el espesor de una tapa y D_e , D_i y D_t [m] los diámetros externo e interno de la cápsula y el diámetro de una tapa, respectivamente.

Aplicando las fórmulas con los datos de partida:

$$m_c = 0,95 \cdot \frac{\pi \cdot 32}{4} (15,98^2 - 15,94^2) = 30,49 \text{ g}$$

$$m_t = 2 \cdot 0,95 \cdot \frac{\pi \cdot 16^2}{4} \cdot 0,75 = 286,51 \text{ g}$$

$$m = 30,49 + 286,51 + 1000 = 1317 \text{ g} \cong 1,32 \text{ kg}$$

Ahora se procede al cálculo de las presiones. La pérdida de presión debida al rozamiento del aire con la superficie interna del tubo Δp_g se encuentra en la tabla

utilizada en el ejemplo I, localizable en la página 19 de la referencia [4]. Velocidades del aire inferiores a 3500 ft/min (64 km/h) no aparecen en la tabla, por lo que la misma no sirve para determinar la pérdida de carga en este caso en el que el aire fluye a 32 km/h. Por tanto, hay que recurrir a las fórmulas descritas en el primer ejemplo (ecuaciones [I.3], [I.4] e [I.5]):

$$\Delta p_g = \rho_g g \left((4f) \frac{L v_g^2}{D} \right) = 2 \rho_g f \frac{L}{D} v_g^2 \quad [\text{Ec. I.3}]$$

$$f = \frac{0,33}{\left[\ln \left(\frac{\varepsilon}{3,70 D} + \frac{7}{Re} \right) \right]^2} \quad [\text{Ec. I.4}]$$

$$Re = \frac{\rho_g v_g D}{\mu_g} \quad [\text{Ec. I.5}]$$

Antes de hacer los cálculos hay que tomar un valor para la rugosidad ε , para la viscosidad dinámica del aire μ_g [Pa·s] y para la densidad ρ_g . El primero puede tomarse como $1,50 \cdot 10^{-6}$ m [39], el segundo como $1,80 \cdot 10^{-5}$ Pa·s (valor a 20 °C, [40]) y el tercero como $1,20$ kg/m³ (valor a 20 °C y 1 atm, [4, p. 16]). Por otro lado, la pérdida de carga se calcula cada 100 m. Los resultados son los siguientes:

$$Re = \frac{1,20 \cdot \left(\frac{32}{3,60} \right) \cdot 0,16}{1,80 \cdot 10^{-5}} = 94814,82$$

$$f = \frac{0,33}{\left[\ln \left(\frac{1,50 \cdot 10^{-6}}{3,70 \cdot 0,16} + \frac{7}{94814,82} \right) \right]^2} = 3,67 \cdot 10^{-3}$$

$$\Delta p_g = 2 \cdot 1,20 \cdot 3,67 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{100}{0,16} \cdot \left(\frac{32}{3,60} \right)^2 = 434,96 \text{ Pa}$$

El término Δp_s no se considera porque en este ejemplo la fricción del aire con la cápsula no se puede cuantificar la ecuación [I.6].

Los términos ΔH_g y ΔH_s se desprecian en primera aproximación al considerarse la cañería horizontal.

Falta hallar el salto de presión necesario para la tracción de la cápsula, para lo cual se recurre a la formulación del artículo [5], la cual permite también el cálculo del tiempo de aceleración t [s] hasta la velocidad terminal:

$$t = \frac{mv}{\frac{\pi D^2}{4} \Delta p_{ac} - \mu_d mg} \quad [\text{Ec. I.12}]$$

$$m = \frac{\pi D^2}{4} \Delta p_{ac} \rightarrow \Delta p_{ac} = \frac{m(a + \mu_d g)}{\frac{\pi D^2}{4}} \quad [\text{Ec. I. 13}]$$

Donde a [m/s^2] es la aceleración de la cápsula y μ_d [ϕ] el coeficiente de fricción dinámico.

En el mismo artículo aparece el coeficiente de fricción estático para el para el par caucho-PVC, que vale 0,2, y se recomienda el empleo del coeficiente de fricción dinámico en las fórmulas para obtener resultados más próximos a la realidad (este es coeficiente que interviene en el deslizamiento). El coeficiente de fricción dinámico es casi siempre inferior al estático, por lo que a falta de datos en Internet se puede considerar 0,15. Para el periodo de aceleración se puede considerar que la aceleración vale 1 m/s^2 . Así pues, la presión necesaria para acelerar la cápsula y el tiempo de aceleración valdrán:

$$\Delta p_{ac} = \frac{1,32 \cdot (1 + 0,15 \cdot 9,81)}{\frac{\pi \cdot 0,16^2}{4}} = 162,26 \text{ Pa}$$

$$t = \frac{1,32 \cdot 8,89}{\frac{\pi \cdot 0,16^2}{4} \cdot 162,26 - 0,15 \cdot 1,32 \cdot 9,81} = 8,89 \text{ s}$$

En ese tiempo la cápsula habrá recorrido la distancia x_f [m], calculada mediante esta fórmula:

$$x_f = x_o + v_o t + \frac{1}{2} a t^2 \quad [\text{Ec. I. 14}]$$

Donde x_o [m] es la distancia inicial y v_o [m/s] la velocidad inicial. Ambos valores se consideran nulos en el siguiente cálculo de x_f :

$$x_f = 0 + 0 + \frac{1}{2} \cdot 1 \cdot 8,89^2 = 39,51 \text{ m}$$

Que es una distancia elevada comparada con los 100 m propuestos. Si se duplica la aceleración:

$$\Delta p_{ac} = \frac{1,32 \cdot (2 + 0,15 \cdot 9,81)}{\frac{\pi \cdot 0,16^2}{4}} = 227,91 \text{ Pa}$$

$$t = \frac{1,32 \cdot 8,89}{\frac{\pi \cdot 0,16^2}{4} \cdot 227,91 - 0,15 \cdot 1,32 \cdot 9,81} = 4,45 \text{ s}$$

$$x_f = x_o + v_o t + \frac{1}{2} a t^2 = 0 + 0 + \frac{1}{2} \cdot 2 \cdot 4,45^2 = 19,81 \text{ m}$$

Que es un valor más aceptable comparado con los 100 m propuestos. Tras alcanzar la velocidad terminal habrá que reducir la presión con una válvula de alivio para que el cilindro deje de acelerar y la presión restante Δp_t (donde el subíndice t hace referencia a tracción) se invierta en superar la fricción:

$$\Delta p_t = \frac{1,32 \cdot (0 + 0,15 \cdot 9,81)}{\frac{\pi \cdot 0,16^2}{4}} = 96,61 \text{ Pa}$$

La necesidad total de presión para una cañería de 100 m (si hay codos se incluyen en dicha longitud calculando su longitud equivalente, lo mismo para las válvulas) es la que sigue, considerando un incremento del 15 % por la incertidumbre del 10 % y otras pérdidas no consideradas (como la fricción del aire que se queda atrapado entre la cápsula y el tubo con las paredes o de la tapa frontal al chocar con el aire):

$$\Delta p = 1,15 \cdot (\Delta p_{ac} + \Delta p_g) = 1,15 \cdot (227,91 + 434,96) = 762,30 \text{ Pa}$$

El caudal a la salida del compresor localizado al inicio de la línea será el siguiente:

$$Q = v_g A \quad [\text{Ec. I. 15}]$$

$$Q = 8,89 \cdot \frac{\pi \cdot 0,16^2}{4} = 0,18 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

Se supone que no hay fugas de aire en el sistema, por lo que no hay que incrementar el caudal.

La potencia del compresor de tornillo (habitual en fase densa) se calculará aplicando las ecuaciones [II.13], [II.16], [II.19] e [II.20] del anexo [II] como en el primer ejemplo; tomando $R=0,29 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K}$, $\gamma = 1,40$ (inicialmente); las constantes a , b , c y d del anexo [II] y asumiendo que el aire sale del compresor a $20 \text{ }^\circ\text{C}$ ($293,15 \text{ K}$):

$$T_2 = T_1 \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \rightarrow T_1 = T_2 \left(\frac{p_1}{p_2}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \quad [\text{Ec. II. 20}]$$

$$T_1 = 293,15 \left(\frac{101,325}{102,087,30}\right)^{\frac{1,40-1}{1,40}} = 292,52 \text{ K}$$

$$\bar{c}_p = 6,71 + \frac{1,15 \cdot 10^{-6}}{3} 292,52^2 + (292,52 + 293,15) \left(\frac{4,70 \cdot 10^{-4}}{2} + \frac{1,15 \cdot 10^{-6}}{3} 293,15 + \frac{-4,70 \cdot 10^{-10}}{4} (292,52^2 + 293,15^2)\right) \cong 6,94 \frac{\text{kcal}}{\text{kmol}\cdot\text{K}} \cong 1,01 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}\cdot\text{K}}$$

$$\gamma = \frac{\bar{c}_p}{\bar{c}_v} = \frac{\bar{c}_p}{\bar{c}_p - R} = \frac{1,01}{1,01 - 0,29} = 1,40$$

Finalmente, se emplea la ecuación [II.13] asumiendo que el valor de η es 0,70 (compresor de tornillo):

$$P = \frac{Q_2 p_2 c_p}{\eta R} \left(1 - \left(\frac{p_1}{p_2} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right) \quad [\text{Ec. II. 13}]$$

$$P = \frac{0,18 \cdot 102.087,30 \cdot 1,01}{0,70 \cdot 0,29} \cdot \left(1 - \left(\frac{101.325}{102.087,30} \right)^{\frac{1,40-1}{1,40}} \right) = 195,57 \text{ W}$$

La densidad lineal de potencia equivaldrá a:

$$P' = \frac{195,57}{100} = 1,96 \frac{\text{W}}{\text{m}}$$

Si se duplica la distancia no se duplicará la potencia porque Δp_{ac} permanecerá constante y, además, la ecuación de la potencia no depende linealmente del salto de presión:

$$\Delta p = 1,15 \cdot (227,91 + 2 \cdot 434,96) = 1.262,50 \text{ Pa}$$

$$T_1 = 293,15 \left(\frac{101.325}{102.587,50} \right)^{\frac{1,40-1}{1,40}} = 292,11 \text{ K} \rightarrow c_p \cong 1,01 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}, \gamma = 1,40$$

$$P = \frac{0,18 \cdot 102.587,50 \cdot 1,01}{0,70 \cdot 0,29} \cdot \left(1 - \left(\frac{101.325}{102.587,50} \right)^{\frac{1,40-1}{1,40}} \right) = 324,47 \text{ W}$$

$$P' = \frac{324,47}{2 \cdot 100} = 1,62 \frac{\text{W}}{\text{m}}$$

Si se sextuplica la distancia no se sextuplicará la potencia porque Δp_{ac} no variará. En ese caso se llega a la siguiente densidad de potencia:

$$\Delta p = 1,15 \cdot (227,91 + 6 \cdot 434,96) = 3.263,32 \text{ Pa}$$

$$T_1 = 293,15 \left(\frac{101.325}{104.588,32} \right)^{\frac{1,40-1}{1,40}} = 290,51 \text{ K} \rightarrow c_p \cong 1,01 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}, \gamma = 1,40$$

$$P = \frac{0,18 \cdot 104.588,32 \cdot 1,01}{0,70 \cdot 0,29} \cdot \left(1 - \left(\frac{101.325}{104.588,32} \right)^{\frac{1,40-1}{1,40}} \right) = 844,48 \text{ W}$$

$$P' = \frac{844,48}{6 \cdot 100} = 1,41 \frac{\text{W}}{\text{m}}$$

En el transporte en fase densa se pueden alcanzar distancias de hasta 3.050 m o más, por lo que es interesante ver qué potencia se requiere con distancias tan grandes como 3.000 m:

$$\Delta p = 1,15 \cdot (227,91 + 30 \cdot 434,96) = 15.268,22 \text{ Pa}$$

$$T_1 = 293,15 \left(\frac{101.325}{116.593,22} \right)^{\frac{1,40-1}{1,40}} = 281,62 \text{ K} \rightarrow c_p \cong 1,01 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}, \gamma = 1,40$$

$$P = \frac{0,18 \cdot 116.593,22 \cdot 1,01}{0,70 \cdot 0,29} \cdot \left(1 - \left(\frac{101325}{116.593,22} \right)^{\frac{1,40-1}{1,40}} \right) = 4.104,51 \text{ W}$$

$$P' = \frac{4.104,51}{3.000} = 1,37 \frac{\text{W}}{\text{m}}$$

La potencia por unidad de longitud media será:

$$\frac{1,96 + 1,62 + 1,41 + 1,37}{4} = 1,59 \frac{\text{W}}{\text{m}}$$

Si se asume que el rendimiento del motor que acciona el compresor es 0,90, la potencia que absorberá de la red por cada metro de circuito será esta:

$$\frac{1,59}{0,90} = 1,77 \frac{\text{W}}{\text{m}}$$

En conclusión, para desplazar una cápsula de caucho con un 1 kg de carga a lo largo de 1 m de una tubería horizontal de 16 cm de diámetro se necesitan casi 2 W de la red eléctrica.

En comparación con el ejemplo anterior, se precisan unas 70 veces menos potencia que en el ejemplo anterior. Esto es debido principalmente a la reducción de la velocidad a la mitad y a la elección del PVC (material poco rugoso) y a la ligera ampliación del diámetro del tubo. Esto hace que la fricción se reduzca en un factor de 8,34 ($1.105,60 \cdot 100 / (30,48 \cdot 434,96)$). Además, el caudal ahora es 2,78 veces menor ($0,5/0,18$) y no se considera el factor de corrección 1,5. Por último, la presión antes se incrementó en un 20 % y ahora un 15 %, lo que supone un factor de reducción del 1,04. Multiplicando estos factores se obtiene 36,17 en vez de 70. La diferencia se debe a que en este último caso la fricción entre el sólido y el aire es despreciable respecto al primero. En esta comparación también se ha de tener en cuenta que la dependencia entre la potencia y el salto de presión no es lineal.

I.3. Tercer ejemplo

Si la cápsula del segundo ejemplo asciende por una tubería del mismo diámetro e inclinada 45° con respecto a la horizontal, ¿cuál será el nuevo requisito de potencia por unidad de longitud?, ¿y si la inclinación es de 90°?

Este caso es similar al anterior, la diferencia es que el salto de presión ha de ser mayor ahora a fin de vencer la componente longitudinal de la fuerza gravitatoria y para elevar el aire. Tras introducir el ángulo de inclinación θ en las fórmulas, estas quedan tal que así:

$$\Delta p_{ac} = \frac{m(a + g \operatorname{sen}\theta + \mu_d g \operatorname{cos}\theta)}{\frac{\pi D^2}{4}} \quad [\text{Ec. I. 16}]$$

$$t = \frac{mv}{\frac{\pi D^2}{4} \Delta p_{ac} - m g \operatorname{sen}\theta - \mu_d m g \operatorname{cos}\theta} \quad [\text{Ec. I. 17}]$$

Considerando que x es la coordenada empleada para el eje de la tubería, x' para su proyección horizontal y z para su proyección vertical, el resto de la formulación queda tal que así:

$$\Delta x_{ac} = x_{f,ac} - x_o = v_o t + \frac{1}{2} a t^2 \quad [\text{Ec. I. 18}]$$

$$\Delta p_t = \frac{m(g \operatorname{sen}\theta + \mu_d g \operatorname{cos}\theta)}{\frac{\pi D^2}{4}} \quad [\text{Ec. I. 19}]$$

$\Delta H_s \rightarrow$ Tenida en cuenta en las ecuaciones de arriba

$$\Delta H_g = \rho_g g \Delta z \cong \rho_g g \Delta x \operatorname{sen}\theta \quad [\text{Ec. I. 20}]$$

Nota: Δz no es exactamente $\Delta x \operatorname{sen}\theta$ porque en la distancia total se incluyen las equivalencias en distancia de los codos y elementos como válvulas. En este caso puede considerarse que no hay codos, pero sí hay una válvula de alivio, que se puede despreciar frente a grandes distancias.

$$\Delta p = \left(1 + \frac{C_{corr} (\%)}{100}\right) \cdot \left(\Delta p_{ac} + \Delta H_g + \frac{\Delta x}{100} \cdot \Delta p_g (100 \text{ m})\right) \quad [\text{Ec. I. 21}]$$

$$P = \frac{Q_2 p_2 \bar{c}_p}{\eta R} \left(1 - \left(\frac{p_1}{p_2}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}\right) \quad [\text{Ec. II. 13}]$$

$$P' = \frac{P}{\Delta x} \quad [\text{Ec. I. 22}]$$

$$P_{red} = \frac{P}{\eta_{motor}}$$

[Ec. I. 23]

He aquí la tabla con los resultados de las variables expuestas para ambos ángulos (todos los valores empleados en las fórmulas que no han sido indicados en la tabla pueden verse en el segundo ejemplo, ya que se utilizan los mismos al estimarse que el margen de variación será pequeño o nulo):

	45°	90°
Δp_{ac} [Pa]	655,02	775,34
t [s]	4,45	4,45
Δx_{ac} [m]	19,80	19,80
Δp_t [Pa]	523,72	644,04
ΔH_g [Pa] para 100 m	832,41	1.177,20
ΔH_g [Pa] para 500 m	4.162,03	5.886
Δp [Pa] para 100 m	2.210,75	2.745,63
Δp [Pa] para 500 m	8.040,63	10.161,56
P [W] para 100 m	570,05	709,26
P [W] para 500 m	2.113,82	2.689,44
P' [W/m] para 100 m	5,70	7,09
P' [W/m] para 500 m	4,22	5,38
\bar{P}' [W/m]	4,96	6,24
\bar{P}'_{red} [W/m]	5,51	6,93

De esta tabla se desprende que para mover la cápsula a lo largo de 1 m de tubo de 16 cm de calibre inclinado 45° se precisan entre 5 y 6 W/m de la red eléctrica y casi 7 W/m cuando el tubo es vertical. En este caso cobra influencia el término Δp_{ac} , que no se escala con la distancia, por lo que se aprecia una divergencia ligeramente mayor entre los valores de P' partiendo de 100 o de 500 m.

Con respecto al ejemplo anterior se han triplicado y casi cuadruplicado, respectivamente, los valores de potencia porque ahora influye la gravedad en el requerimiento de potencia.

I.4. Cuarto ejemplo

Se va a implantar el transporte neumático en un cementerio nuclear. Para ello se diseña una línea vertical de PVC de 1.000 m de longitud y 2,99 m de diámetro (reforzada externamente para aumentar la resistencia estructural [12]). Por dicha línea ascenderá una cápsula de 3.677 kg de masa, 2,93 m de diámetro en sus tapas y 2,50 m en su cuerpo y una altura de 3,15 m. Tras llegar a la superficie la cápsula se llenará con un paquete de residuos nucleares y material de apantallamiento con una masa de 23.980 kg y unas dimensiones de 2,22 m de diámetro y 3,12 m de altura. El conjunto

descenderá y el paquete se almacenará las instalaciones, dejando la cápsula libre para un nuevo ascenso. Tanto la velocidad ascensional cuanto la descensional se limitan a 5 m/s [12]. En la imagen de abajo se puede apreciar un sistema semejante:

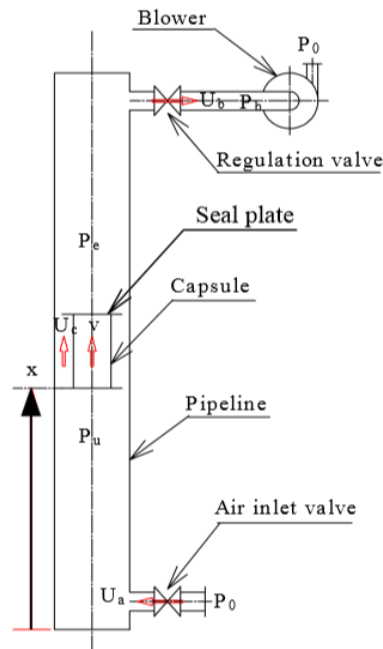


Fig. I.3. Sistema muy similar al descrito arriba. Fuente: [9, p. 5].

Se quiere conocer cuánta potencia hace falta por unidad de longitud para el ascenso (a) y el descenso de los objetos descritos (b).

I.4.(a) Ascenso de la cápsula

Para este caso, que recuerda al transporte en fase diluida aunque no lo sea, lo primero que puede hacerse es ver qué salto de presión aproximado hace falta con un simple balance de fuerzas como el mostrado en la referencia [9]:

$$m_c \frac{dv_c}{dt} = \Delta p_{ac} A_c - m_c g \quad [\text{Ec. I. 24}]$$

Donde se ha despreciado la fuerza de fricción que experimenta la cápsula. Respecto a las variables no introducidas en los ejemplos anteriores, m_c [kg] representa la masa de la cápsula, v_c [m/s] su velocidad y A_c [m²] el área de la tapa inferior o superior, que es la misma.

Si la aceleración de la cápsula a_c [m/s²] se mantiene en un valor de 0,50 m/s² para que el proceso de aceleración sea suave, entonces Δp_{ac} valdrá lo siguiente:

$$\Delta p_{ac} = \frac{m_c(a_c + g)}{A_c} = \frac{3.677 \cdot (0,50 + 9,81)}{\frac{\pi}{4} \cdot 2,93^2} = 5.622,47 \text{ Pa}$$

El tiempo de aceleración y la distancia recorrida tendrán el siguiente valor:

$$t = \frac{m_c v_c}{\Delta p_{ac} A_c - m_c g} = \frac{3.677 \cdot 5}{5.622,47 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot 2,93^2 - 3.677 \cdot 9,81} = 10 \text{ s}$$

$$\Delta x_{ac} = \frac{1}{2} a t^2 = \frac{1}{2} \cdot 0,5 \cdot 1 \cdot 10^2 = 25 \text{ m}$$

Cuando se haya alcanzado la velocidad constante de 5 m/s, la presión de tracción Δp_t valdrá:

$$\Delta p_t = \frac{3.677 \cdot 9,81}{\frac{\pi}{4} \cdot 2,93^2} = 5.349,80 \text{ Pa}$$

Se aprecia que los valores Δp_t y Δp_{ac} son muy semejantes, por lo que la regulación de presión será pequeña.

En la referencia [12] se encuentra otra fórmula para calcular Δp_{ac} o Δp_t , pero no es muy útil porque se encuentra en función de la velocidad del aire en el estrecho espacio existente entre la cápsula y la pared del tubo u_c [m/s]:

$$\Delta p_t = \frac{\rho (u_c - v_c)^2}{2 \varphi^2} \quad [\text{Ec. I. 25}]$$

$$\varphi = \frac{1}{2} \left(\frac{A}{A_c} - 1 \right) = \frac{1}{2} \left(\frac{D^2}{D_c^2} - 1 \right) \quad [\text{Ec. I. 26}]$$

Aquí φ es la tasa de fugas, que es adimensional. A [m²] el área de la cañería, D [m] su diámetro y D_c [m] el diámetro de cualquiera de las dos tapas, que presentan las mismas dimensiones.

Si se emplea Δp_t , u_c adquirirá el siguiente valor:

$$\varphi = \frac{1}{2} \left(\frac{2,99^2}{2,93^2} - 1 \right) = 2,1 \cdot 10^{-2}$$

$$u_c = \varphi \sqrt{\frac{2 \Delta p_t}{\rho}} + v = 2,1 \cdot 10^{-2} \sqrt{\frac{2 \cdot 5.349,80}{1,20}} + 5 = 6,98 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Si, en cambio, se utiliza Δp_{ac} :

$$u_c = 2,1 \cdot 10^{-2} \sqrt{\frac{2 \cdot 5.622,47}{1,20}} + 5 = 7,03 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Continuando con el cálculo de los términos que contribuyen al salto de presión total, el término ΔH_g cobra importancia porque la columna de aire se eleva 1.000 m:

$$\Delta H_g = \rho_g g \Delta z = 1,20 \cdot 9,81 \cdot 1.000 = 11.772 \text{ Pa}$$

El término Δp_g es poco importante porque la tubería es muy ancha. Para su cálculo se toman los valores de ε (PVC) y μ_g del segundo ejemplo y se considera previamente que la velocidad del aire es 5 m/s (no hay deslizamiento respecto a la cápsula porque la cápsula asciende por la fuerza proveniente de la diferencia de presión y no por la fuerza de arrastre). A continuación, su valor numérico:

$$Re = \frac{\rho_g v_g D}{\mu_g} = \frac{1,20 \cdot 5 \cdot 2,99}{1,80 \cdot 10^{-5}} = 996.666,67$$

$$f = \frac{0,33}{\left[\ln \left(\frac{\varepsilon}{3,70 D} + \frac{7}{Re} \right) \right]^2} = \frac{0,33}{\left[\ln \left(\frac{1,50 \cdot 10^{-6}}{3,70 \cdot 2,99} + \frac{7}{996.666,67} \right) \right]^2} = 2,35 \cdot 10^{-3}$$

$$\Delta p_g = 2 \rho_g f \frac{L}{D} v_g^2 = 2 \cdot 1,20 \cdot 2,35 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{1000}{2,99} \cdot 5^2 = 47,16 \text{ Pa}$$

Para el cálculo de la diferencia de presión se va a considerar un incremento del 12 % debido a la incertidumbre del 10 % y a las pérdidas misceláneas (como la fricción entre el aire y la cápsula). Para tener en cuenta el efecto de las válvulas se puede emplear su longitud equivalente L_{eq} :

$$L_{eq} = 2 \cdot 20 D_v \quad [\text{Ec. I. 27}]$$

En esta fórmula D_v [m] es el diámetro de la válvula [4, p. 56].

El diámetro de cada válvula se puede considerar 0,75 m, a juzgar por la imagen de la página 5 de la referencia [12] (véase al principio de este ejemplo):

$$L_{eq} = 2 \cdot 20 \cdot 0,75 = 30 \text{ m}$$

Ahora se suman todas las contribuciones de Δp teniendo en cuenta lo antedicho:

$$\Delta p = 1,12 \cdot \left(5.622,47 + 11.772 + \frac{1.030}{1.000} \cdot 47,16 \right) = 19.536,21 \text{ Pa}$$

El flujo másico de aire es, calculándolo en el inicio de la línea:

$$\dot{m}_g = \rho_g v_g A \quad [\text{Ec. I. 28}]$$

$$\dot{m}_g = 1,20 \cdot 5 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot 2,99^2 = 42,23 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

El compresor se colocará al final de la línea y será de tipo industrial para poder trasegar un caudal tan elevado. El caudal que aspirará se puede encontrar mediante la densidad en ese tramo, la cual se obtiene a partir de la ley de los gases ideales:

$$p = \rho RT \rightarrow \rho = \frac{p}{RT} \quad [\text{Ec. I. 29}]$$

La temperatura T se mantiene alrededor de los 20 °C bajo tierra y la constante del aire vale 287 J/kg·K (anexo [II]):

$$\rho = \frac{101.325 - 19.536,21}{287 \cdot (273,15 + 20)} = 0,97 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Así pues, el caudal que aspirará el compresor será:

$$Q = \frac{\dot{m}_g}{\rho} \quad [\text{Ec. I. 30}]$$

$$Q = \frac{42,23}{0,97} = 43,54 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

La potencia del compresor será, empleando las mismas fórmulas y valores prefijados que en el primer ejemplo (donde el compresor también sirve para hacer un determinado vacío en el tubo) y presuponiendo que el rendimiento global de compresión es 0,70:

$$T_2 = 293,15 \left(\frac{101.325}{81.788,79} \right)^{\frac{1,40-1}{1,40}} = 311,65 \text{ K} \rightarrow \bar{c}_p \cong 1,01 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}, \gamma = 1,40$$

$$P = \frac{Q_1 p_1 \bar{c}_p}{\eta R} \left(\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right) = \frac{43,54 \cdot 81.788,79 \cdot 1,01}{0,70 \cdot 0,29} \left(\left(\frac{101.325}{81.788,79} \right)^{\frac{1,40-1}{1,40}} - 1 \right) =$$

$$= 1.118.563,62 \text{ W} \cong 1.119 \text{ kW}$$

Siendo la potencia por unidad de longitud:

$$P' = \frac{1.119}{1.000} \cong 1,12 \frac{\text{kW}}{\text{m}}$$

Si se estima el rendimiento eléctrico del motor como 0,90, la potencia absorbida de la red será:

$$P'_{red} = \frac{1,12}{0,90} = 1,24 \frac{\text{kW}}{\text{m}}$$

Por tanto, se requieren 1,24 kW de la red por cada metro de línea. Es más de 10 veces superior al valor en el caso del serrín (primer ejemplo) y más de 500 veces si es comparado con la cápsula para transportar material de oficina en el circuito horizontal

(segundo ejemplo). Esto es debido a la gran masa de la cápsula y a la gran anchura de la cañería, que se traduce en un gran caudal.

Por último, hay que considerar que cuando la cápsula vaya llegando a la superficie habrá que frenarla, lo cual se puede conseguir mediante el alivio de presión o con muelles o amortiguadores. En cualquier caso, este frenado no es tan importante como el de la cápsula más el material de apantallamiento y radiactivo, que es más delicado, como se verá en el siguiente apartado.

I.4.(b) Descenso de la cápsula y del material

Para este caso, que es parecido al transporte por gravedad activado por aire, lo primero que puede hacerse es ver qué salto de presión entre las tapas de la cápsula hace falta para tener unos valores contenidos de aceleración y de velocidad terminal de $0,5 \text{ m/s}^2$ y 5 m/s , respectivamente:

$$\Delta p_{ac} = \frac{(3.677 + 23.980) \cdot (9,81 - 0,50)}{\frac{\pi}{4} \cdot 2,93^2} = 38.188,24 \text{ Pa}$$

Donde se ha invertido el signo de la aceleración porque ahora va en sentido contrario.

Δp_t equivaldrá a:

$$\Delta p_t = \frac{27.657 \cdot 9,81}{\frac{\pi}{4} \cdot 2,93^2} = 40.239,16 \text{ Pa}$$

Ahora Δp_t es mayor que Δp_{ac} porque una vez se ha acelerado el conjunto hay que oponer más resistencia para evitar que se siga acelerando por efecto de la gravedad.

Ahora el tiempo que tardará en acelerar será:

$$t = \frac{5 \cdot 27.657}{27.657 \cdot 9,81 - \frac{\pi}{4} \cdot 2,93^2 \cdot 38.188,24} = 10 \text{ s}$$

Donde se ha invertido el denominador porque ahora la gravedad acelera el conjunto y la fuerza derivada de la presión reduce la aceleración resultante de $9,81$ a $0,5 \text{ m/s}^2$.

Y la distancia recorrida durante la aceleración:

$$\Delta x_{ac} = \frac{1}{2} \cdot 0,5 \cdot 10^2 = 25 \text{ m}$$

Para frenar el conjunto cuando llegue al suelo habrá que incrementar la presión para generar una aceleración de $0,5 \text{ m/s}^2$ que se oponga a la velocidad [9, p. 9]. La presión de deceleración Δp_{dec} :

$$\Delta p_{dec} = \frac{23.657 \cdot (9,81 + 0,50)}{\frac{\pi}{4} \cdot 2,93^2} = 42.290,09 \text{ Pa}$$

Ya se pueden sumar los sumandos contribuyentes al salto de presión total, conservando todos los datos del apartado a):

$$|\Delta p| = 1,12 \cdot \left(42.290,09 + 11.772 + \frac{1.030}{1.000} \cdot 47,16 \right) = 60.603,94 \text{ Pa}$$

Donde se ha utilizado el valor absoluto porque el compresor está situado al final del trayecto del aire y se ha tomado el valor mayor de entre Δp_{ac} , Δp_t y Δp_{dec} , que es Δp_{dec} .

Es un delta de presión muy elevado, por lo que la densidad y la velocidad variarán bastante del inicio (subíndice 1) al final de la línea (subíndice 2) debido a la conservación del flujo másico y a la constancia del área. Es conveniente hallar un valor medio de densidad:

$$\bar{\rho}_g = \frac{1}{|\Delta p|} \int_{p_1}^{p_2} \rho dp \quad [\text{Ec. I. 31}]$$

Se puede integrar fácilmente relacionando la densidad con la presión a través de la ley de los gases ideales y considerando condiciones isothermas en toda la longitud (bastante razonable, dado que está bajo tierra):

$$\bar{\rho}_g = \frac{1}{|\Delta p|} \int_{p_1}^{p_2} \frac{p}{RT} dp = \frac{p_2^2 - p_1^2}{2(p_2 - p_1)RT} = \frac{p_2 + p_1}{2RT} \quad [\text{Ec. I. 32}]$$

Considerando una temperatura T de 20 °C, tomando el valor de R usado en a) y las presiones recién halladas se llega a:

$$\bar{\rho}_g = \frac{(101.325 - 60.603,94) + 101.325}{2 \cdot 287 \cdot (273,15 + 20)} = 0,84 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Ahora ΔH_g y Δp_g tomarán otros valores. Es conveniente iterar recalculando ΔH_g y Δp_g con esta densidad media, después recalculando $|\Delta p|$ y, finalmente, $\bar{\rho}_g$:

$$\Delta H_g = 0,84 \cdot 9,81 \cdot 1.000 = 8.240,40 \text{ Pa}$$

$$Re = \frac{\rho_g v_g D}{\mu_g} = \frac{0,84 \cdot 5 \cdot 2,99}{1,80 \cdot 10^{-5}} = 697.666,67$$

$$f = \frac{0,33}{\left[\ln \left(\frac{\varepsilon}{3,70 D} + \frac{7}{Re} \right) \right]^2} = \frac{0,33}{\left[\ln \left(\frac{1,50 \cdot 10^{-6}}{3,70 \cdot 2,99} + \frac{7}{697.666,67} \right) \right]^2} = 2,50 \cdot 10^{-3}$$

$$\Delta p_g = 2 \rho_g f \frac{L}{D} v_g^2 = 2 \cdot 0,84 \cdot 2,50 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{1000}{2,99} \cdot 5^2 = 35,12 \text{ Pa}$$

$$|\Delta p| = 1,12 \cdot \left(42.290,09 + 8.240,40 + \frac{1.030}{1.000} \cdot 35,12 \right) = 56.634,26 \text{ Pa}$$

$$\bar{\rho}_g = \frac{2 \cdot 101.325 - 56.634,26}{2 \cdot 287 \cdot 293,15} = 0,87 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Reiterando:

$$\Delta H_g = 0,87 \cdot 9,81 \cdot 1.000 = 8.544,70 \text{ Pa}$$

$$Re = \frac{\rho_g v_g D}{\mu_g} = \frac{0,87 \cdot 5 \cdot 2,99}{1,80 \cdot 10^{-5}} = 722.583,33$$

$$f = \frac{0,33}{\left[\ln \left(\frac{\varepsilon}{3,70 D} + \frac{7}{Re} \right) \right]^2} = \frac{0,33}{\left[\ln \left(\frac{1,50 \cdot 10^{-6}}{3,70 \cdot 2,99} + \frac{7}{722.583,33} \right) \right]^2} = 2,48 \cdot 10^{-3}$$

$$\Delta p_g = 2 \rho_g f \frac{L}{D} v_g^2 = 2 \cdot 0,87 \cdot 2,48 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{1000}{2,99} \cdot 5^2 = 36,08 \text{ Pa}$$

$$|\Delta p| = 1,12 \cdot \left(42.290,09 + 8.544,7 + \frac{1.030}{1.000} \cdot 36,08 \right) = 56.965,39 \text{ Pa}$$

$$\bar{\rho}_g = \frac{2 \cdot 101.325 - 56.965,39}{2 \cdot 287 \cdot 293,15} = 0,87 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Con este dato y recuperando φ del apartado a) se puede estimar la velocidad u_c entre el conjunto y el tubo, que para Δp_t (valor medio entre Δp_{ac} y Δp_{dec}) será:

$$u_c = 2,1 \cdot 10^{-2} \sqrt{\frac{2 \cdot 40.239,16}{0,87}} + 5 = 11,39 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Ahora se procede a hallar el caudal. Para ello debe imponerse una velocidad media de 5 m/s y hallar el flujo másico primero:

$$\dot{m}_g = \bar{\rho}_g \bar{v}_g A = 0,87 \cdot 5 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot 2,99^2 = 30,54 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

Al final de la línea la densidad y el caudal serán iguales a:

$$\rho = \frac{101.325 - 56.965,39}{287 \cdot 293,15} = 0,52 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$Q = \frac{30,54}{0,52} = 58,73 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

La potencia será:

$$T_2 = 293,15 \left(\frac{101.325}{44.359,61} \right)^{\frac{1,40-1}{1,40}} = 371,18 \text{ K} \rightarrow c_p \cong 1,01 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}, \gamma = 1,40$$

$$\bar{c}_p = 6,71 + \frac{1,15 \cdot 10^{-6}}{3} 293,15^2 + (293,15 + 371,18) \left(\frac{4,70 \cdot 10^{-4}}{2} + \frac{1,15 \cdot 10^{-6}}{3} 371,18 + \frac{-4,70 \cdot 10^{-10}}{4} (293,15^2 + 371,18^2) \right) \cong 6,98 \frac{\text{kcal}}{\text{kmol} \cdot \text{K}} \cong 1,01 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

$$P = \frac{58,73 \cdot 44.359,61 \cdot 1,01}{0,70 \cdot 0,29} \left(\left(\frac{101.325}{44.359,61} \right)^{\frac{1,40-1}{1,40}} - 1 \right) = 3.450.177,49 \cong 3.450 \text{ kW}$$

Por unidad de longitud:

$$P' = \frac{3.450}{1.000} = 3,45 \frac{\text{kW}}{\text{m}}$$

De la red:

$$P'_{red} = \frac{3,45}{0,90} = 3,83 \frac{\text{kW}}{\text{m}}$$

En conclusión, se ha triplicado la potencia (3,83/1,24=3,08) habiendo septuplicado la masa (27.657/3.677=7,52). Esto es debido a que el caudal únicamente es 1,35 veces mayor (58,73/43,54=1,35) y el delta de presión 2,91 veces mayor (56.965,39/19.536,21=2,91). Multiplicando ambos factores se obtiene 3,93, pero hay que tener en cuenta que la potencia no es lineal con el salto de presión, por eso se obtiene 3,93 en vez de 3,83. Puesto que el incremento de potencia es grande, podría estudiarse su reducción mediante la reducción del caudal, para lo cual habría que reducir la velocidad media del aire por debajo de 5 m/s. La potencia es lineal con el caudal, por lo que la reducción de caudal se traduciría en una reducción proporcional de la potencia.

Anexo II: Cálculo de la potencia de un compresor

II.1. Demostración teórica

Para calcular la potencia P [W] de un compresor que se supone adiabático se realiza la siguiente integral entre la entrada del compresor (variables con el subíndice 1) y la salida del compresor (variables con el subíndice 2):

$$P = \int_{p_1}^{p_2} Q dp \quad [\text{Ec. II. 1}]$$

Primero se expresa el caudal Q [m^3/s] en función del flujo másico \dot{m} [kg/s] y de la temperatura T [K] y presión del gas p [Pa] teniendo en cuenta que los dos primeros parámetros se relacionan a través de la densidad ρ [kg/m^3] y que estas tres últimas variables se relacionan mediante la ecuación de estado de los gases ideales a través de la constante R específica para ese gas (expresada en $\text{J}/\text{kg}\cdot\text{K}$ porque es específica de cada gas). Matemáticamente:

$$\begin{cases} Q = \rho \dot{m} \\ p = \rho RT \end{cases} \rightarrow Q = \frac{\dot{m}}{\rho} = \frac{\dot{m} R T}{p} \quad [\text{Ec. II. 2}]$$

Después se expresa la temperatura en función de la presión teniendo en cuenta que la compresión de un gas de volumen específico v [m^3/kg] es un proceso termodinámico politrópico con un índice de politropía n [ϕ] y una constante C [$\text{Pa} \left(\frac{\text{m}^3}{\text{kg}}\right)^n$] y considerando que el gas es ideal:

$$\begin{cases} pv^n = C \\ pv = RT \end{cases} \rightarrow v = \frac{RT}{p} \rightarrow p \left(\frac{RT}{p}\right)^n = C \rightarrow T = \frac{p}{R} \left(\frac{C}{p}\right)^{\frac{1}{n}} \quad [\text{Ec. II. 3}]$$

Combinando las ecuaciones [II.2] y [II.3] se obtiene lo siguiente:

$$Q = \dot{m} \left(\frac{C}{p}\right)^{\frac{1}{n}} \quad [\text{Ec. II. 4}]$$

A continuación se introduce la ecuación [II.4] en la [II.1] y se integra, tomando en consideración que \dot{m} es constante por la conservación de la masa:

$$P = \int_{p_1}^{p_2} \dot{m} \left(\frac{C}{p}\right)^{\frac{1}{n}} dp = \dot{m} C^{\frac{1}{n}} \int_{p_1}^{p_2} p^{-\frac{1}{n}} dp = \dot{m} C^{\frac{1}{n}} \frac{n}{n-1} \left(p_2^{\frac{n-1}{n}} - p_1^{\frac{n-1}{n}}\right)$$

Si el proceso se considera isoentrópico (ideal, sin pérdidas), el índice de politropía n equivaldrá a γ , el coeficiente de dilatación adiabática, que es adimensional. Dicho coeficiente se calcula como el cociente entre la capacidad calorífica a presión constante promedio del proceso de compresión \bar{c}_p y la capacidad calorífica a volumen constante promedio \bar{c}_v , estas dos últimas en $\text{J}/\text{kg}\cdot\text{K}$. Además, la diferencia entre ambos valores es igual a R para un determinado gas ideal (más adelante se explica cómo calcular todas estas variables):

$$P = \dot{m} C^{\frac{1}{\gamma}} \frac{\bar{c}_p}{\bar{c}_v - 1} \left(p_2^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - p_1^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right) = \dot{m} C^{\frac{1}{\gamma}} \frac{\bar{c}_p}{R} \left(p_2^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - p_1^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right) \quad [\text{Ec. II. 5}]$$

La constante C se puede expresar en función de las propiedades termodinámicas de entrada o en función de aquellas de salida:

$$\left\{ \begin{array}{l} v_1 = \frac{R T_1}{p_1} \\ v_2 = \frac{R T_2}{p_2} \\ p_1 v_1^\gamma = C = p_2 v_2^\gamma \rightarrow \begin{cases} C = p_1^{1-\gamma} (R T_1)^\gamma & [\text{Ec. II. 6}] \\ C = p_2^{1-\gamma} (R T_2)^\gamma & [\text{Ec. II. 7}] \end{cases} \end{array} \right.$$

El flujo másico \dot{m} se puede expresar en función de Q_1 y las propiedades termodinámicas de entrada o en función de Q_2 y las propiedades de salida:

$$\left\{ \begin{array}{l} \rho_1 = \frac{p_1}{R T_1} \\ \rho_2 = \frac{p_2}{R T_2} \\ \rho_1 Q_1 = \dot{m} = \rho_2 Q_2 \rightarrow \begin{cases} \dot{m} = \frac{p_1 Q_1}{R T_1} & [\text{Ec. II. 8}] \\ \dot{m} = \frac{p_2 Q_2}{R T_2} & [\text{Ec. II. 9}] \end{cases} \end{array} \right.$$

Combinando las ecuaciones [II.5], [II.6] e [II.8] se obtiene la ecuación [II.10]:

$$P = \frac{p_1 Q_1}{R T_1} [p_1^{1-\gamma} (R T_1)^\gamma]^{\frac{1}{\gamma}} \frac{\bar{c}_p}{R} \left(p_2^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - p_1^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right)$$

$$P = \frac{Q_1 p_1 \bar{c}_p}{R} \left(\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right) \quad [\text{Ec. II. 10}]$$

Del mismo modo, combinando las igualdades [II.5], [II.7] e [II.9] se obtiene la ecuación [II.11]:

$$P = \frac{p_2 Q_2}{R T_2} [p_2^{1-\gamma} (R T_2)^\gamma]^{\frac{1}{\gamma}} \frac{\bar{c}_p}{R} \left(p_2^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - p_1^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right)$$

$$P = \frac{Q_2 p_2 \bar{c}_p}{R} \left(1 - \left(\frac{p_1}{p_2} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right) \quad [\text{Ec. II. 11}]$$

Las ecuaciones [II.10] e [II.11] se corresponden con las potencias de compresión isoentrópica. En realidad la compresión no es isoentrópica ni el rendimiento

volumétrico η_v del compresor es la unidad, así que hay que obtener la potencia real mediante el uso del rendimiento isoentrópico η_s y del volumétrico η_v , siendo su producto la eficiencia global η . Todos ellos son adimensionales, aunque se suelen introducir directamente en las fórmulas en tanto por unidad. Expresado matemáticamente:

$$\eta_s \eta_v = \eta = \frac{P}{P_{real}}$$

Finalmente, dividiendo la ecuación [II.10] por η se obtiene la igualdad [II.13] y dividiendo la [II.11] por η se llega a la igualdad [II.14]:

$$P_{real} = \frac{Q_1 p_1 \bar{c}_p}{\eta R} \left(\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right) \quad [\text{Ec. II. 12}]$$

$$P_{real} = \frac{Q_2 p_2 \bar{c}_p}{\eta R} \left(1 - \left(\frac{p_1}{p_2} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right) \quad [\text{Ec. II. 13}]$$

II.2. Cálculo de R, \bar{c}_p , \bar{c}_v y γ para un determinado gas ideal

1. R para un gas específico se obtiene de la división de la constante universal de los gases ideales, que vale 8,314 J/mol·K [41], por la masa molecular de dicho gas P_m :

$$R = \frac{8,314}{P_m} \quad [\text{Ec. II. 14}]$$

En el caso del aire, cuya masa molar vale 28,97 g/mol [42]:

$$R_{aire} = \frac{8,314}{28,97} = 0,287 \frac{J}{g \cdot K} = 287 \frac{J}{kg \cdot K}$$

2. \bar{c}_p [J/kg·K] se calcula promediando la función $c_p(T)$ entre una temperatura T_1 [K] y otra temperatura T_2 [K]. La función $c_p(T)$ se expresa en función de las constantes a, b, c y d, que son distintas para cada gas [43, p. 20]:

$$c_p(T) = a + b T + c T^2 + d T^3 \quad [\text{Ec. II. 15}]$$

Promediándola entre T_1 y T_2 :

$$\bar{c}_p = \frac{1}{T_2 - T_1} \int_{T_1}^{T_2} c_p(T) dT = \frac{1}{\Delta T} \int_{T_1}^{T_2} (a + b T + c T^2 + d T^3) dT$$

$$\bar{c}_p = a + \frac{b}{2} \left(\frac{T_2^2 - T_1^2}{T_2 - T_1} \right) + \frac{c}{3} \left(\frac{T_2^3 - T_1^3}{T_2 - T_1} \right) + \frac{d}{4} \left(\frac{T_2^4 - T_1^4}{T_2 - T_1} \right)$$

Después de simplificar queda lo siguiente:

$$\bar{c}_p = a + \frac{c}{3} T_1^2 + (T_1 + T_2) \left(\frac{b}{2} + \frac{c}{3} T_2 + \frac{d}{4} (T_1^2 + T_2^2) \right) \quad [\text{Ec. II. 16}]$$

Las constantes en el caso del aire son las de abajo [43, p. 26]:

$$a = 6,713 \frac{\text{kcal}}{\text{kmol} \cdot \text{K}}, b = 0,04697 \cdot 10^{-2} \frac{\text{kcal}}{\text{kmol} \cdot \text{K}^2}, c = 0,1147 \cdot 10^{-5} \frac{\text{kcal}}{\text{kmol} \cdot \text{K}^3}$$

$$d = -0,4696 \cdot 10^{-9} \frac{\text{kcal}}{\text{kmol} \cdot \text{K}^4}$$

Después se pasa de kcal/kmol·K a J/kg·K.

3. Una vez hallada \bar{c}_p se halla \bar{c}_v [J/kg·K] mediante la siguiente relación, que se cumple para cualquier gas ideal [43, p. 18]:

$$\bar{c}_v = \bar{c}_p - R \quad [\text{Ec. II. 17}]$$

4. Finalmente, γ se obtiene dividiendo \bar{c}_p entre \bar{c}_v :

$$\gamma = \frac{\bar{c}_p}{\bar{c}_v} \quad [\text{Ec. II. 18}]$$

Insertando la ecuación [II. 17] en esta última:

$$\gamma = \frac{\bar{c}_p}{\bar{c}_v} = \frac{\bar{c}_p}{\bar{c}_p - R} \quad [\text{Ec. II. 19}]$$

Un valor típico de γ para el aire es 1,40, ya que es un gas predominantemente diatómico [44].

Como puede verse, R no depende de la temperatura, pero las demás variables recién explicadas sí. Para poder aplicarlas al cálculo de la potencia del compresor es necesario conocer la temperatura ideal de salida si se conoce la de entrada (primer caso) o la temperatura ideal de entrada si se sabe cuánto vale la de entrada (segundo caso). La temperatura real no es necesaria para estos cálculos porque se está dividiendo la potencia ideal del compresor por su rendimiento global, con lo cual se tienen en cuenta todas las pérdidas que aumentan la temperatura.

1. Temperatura ideal de salida T_2 [K] en función de la de entrada:

$$T_2 = T_1 \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \quad [\text{Ec. II. 20}]$$

2. Temperatura ideal de entrada T_1 [K] en función de la de entrada: En este caso se aplica también la ecuación [II.20].

Anexo III: Cálculos del consumo energético del AVE, el Transrapid y el Hyperloop:

III.1. AVE de la serie 103

Para evaluar su consumo energético a su velocidad de operación (300 km/h) se recurre a la fórmula de Davis, una fórmula que permite calcular la resistencia al avance de un tren R_{av} [daN] en función de tres coeficientes (A, B, C) y de la velocidad del tren [10, p. 12]:

$$R_{av} = A + Bv + Cv^2 \quad [\text{Ec. III. 1}]$$

Donde A [daN] representa la fricción de las ruedas con los carriles y los rozamientos mecánicos internos, B la resistencia debida a la entrada de aire para la renovación del aire del tren [daN/(km/h)], C el arrastre aerodinámico [daN/(km/h)²] y v la velocidad del tren [km/h], [10, pp. 13-25].

En el caso del AVE S-103 estos coeficientes son los siguientes [10, p. 41]:

$$A = 356 \text{ daN}, B = 3,343 \text{ daN}/(\text{km}/\text{h}), C = 5,410 \cdot 10^{-2} \text{ daN}/(\text{km}/\text{h})^2$$

Por tanto, la resistencia al avance del AVE a 300 km/h es la que sigue:

$$R_{av} = 356 + 3,343 \cdot 300 + 5,410 \cdot 10^{-2} \cdot 300^2 = 6.227,900 \text{ daN} = 62.279 \text{ N}$$

Con esta fuerza el AVE habrá de suministrar la siguiente potencia P [kW] para mantener su velocidad constante:

$$P = 62.279 \cdot \frac{300}{3,600} \cdot 10^{-3} = 5.189,917 \text{ kW}$$

A 300 km/h el tren tarda 1/300 h en recorrer 1 km. Por tanto, el consumo energético por kilómetro E' [kWh/km] es:

$$E' = 5.189,917 \cdot \frac{1}{300} = 17,300 \frac{\text{kWh}}{\text{km}}$$

No obstante, de la red eléctrica se demandará un poco más porque los motores eléctricos tienen un rendimiento genérico del 90 %:

$$E'_{red} = \frac{17,300}{0,90} = 19,222 \frac{\text{kWh}}{\text{km}}$$

Acelerar el tren de 0 a 300 km/h tiene un consumo energético considerable, el cual es posible calcular partiendo de un balance de fuerzas y de la segunda ley de Newton:

$$\frac{1}{10 \cdot 3,600} m \frac{dv}{dt} = F_{ac} - R_{av} = F_t - A - Bv - Cv^2 \quad [\text{Ec. III. 2}]$$

Donde m representa la masa total del AVE [kg], t es el tiempo [s] y F_{ac} [daN] simboliza la fuerza de aceleración.

Si se considera la aceleración media en vez de la instantánea, el término $m \frac{dv}{dt}$ se puede tratar como una constante y entonces la ecuación diferencial pasa a ser una ecuación algebraica. Por ello, se reescribe como ma , siendo a la aceleración [m/s^2]. El término A se va a suponer válido para dicho rango de velocidades, a pesar de que es pequeño a velocidades próximas a 0 (por ejemplo, la resistencia de rozamientos internos es aplicable en el rango 7-10 km/h [10, p. 15]). Con esta ecuación dinámica del tren es posible hallar la energía de aceleración por kilómetro E'_{ac} [kWh/km]:

$$E'_{ac} = \frac{10 F_{ac} \frac{v [km/h]}{3,600} 10^{-3}}{v [km/h]} = \frac{10^{-2} F_{ac}}{3,600} \quad [\text{Ec. III. 3}]$$

Su valor medio \bar{E}'_{ac} será el siguiente:

$$\begin{aligned} \bar{E}'_{ac} &= \frac{1}{v_f} \int_0^{v_f} \frac{10}{3,600} \left(\frac{ma}{10} + A + Bv + Cv^2 \right) dv \\ \bar{E}'_{ac} &= \frac{10}{3,600} \left(\frac{ma}{10} + A + \frac{B}{2} v_f + \frac{C}{3} v_f^2 \right) \quad [\text{Ec. III. 4}] \end{aligned}$$

Donde v_f es la velocidad final del tren [km/h].

Para calcular la masa del AVE de la serie 103 se consulta en la ficha técnica dada por Renfe [45]. Dicho cálculo arroja un resultado de 465,500 t (425 t en vacío más 405 pasajeros (datos de la ficha) por 100 kg cada uno (estimación que incluye el equipaje)). Para hallar el valor de aceleración se puede tomar el siguiente dato de la misma ficha: Aceleración de 0 a 320 km/h en 380 s:

$$a = \frac{320/3,600}{380} = 0,234 \frac{m}{s^2}$$

Aplicando la ecuación [III.4] con todos los datos recopilados se obtiene este resultado:

$$\begin{aligned} \bar{E}'_{ac} &= \frac{10^{-2}}{3,600} \left(\frac{465.500 \cdot 0,234}{10} + 356 + \frac{3,343}{2} 300 + \frac{5,410 \cdot 10^{-2}}{3} 300^2 \right) = \\ &= 37,148 \frac{kWh}{km} \end{aligned}$$

Considerando el rendimiento de los motores:

$$\bar{E}'_{acred} = \frac{37,148}{0,900} = 41,275 \frac{kWh}{km}$$

El frenado regenerativo del AVE permite recuperar entre el 6 y el 10 % de la energía cinética del tren [46]. Por tanto, es necesario calcular cuánta energía recupera el AVE durante la frenada. Para ello se parte de la suposición de que la deceleración es idéntica a la aceleración. El primer término de \bar{E}'_{ac} es la energía que se comuniza al tren durante la aceleración y pasa a formar parte de su energía cinética, mientras que los demás términos son la energía necesaria para vencer las pérdidas durante la aceleración. Durante la desaceleración parte de la energía cinética del tren se disipará por el rozamiento y el resto irá a parar a los frenos. Por tanto, al primer término de \bar{E}'_{ac} habrá que restarle las pérdidas para saber cuánta energía irá a disiparse en los frenos. De esta energía se podrá regenerar entre el 6 y el 10 %. Dicho esto, es posible calcular cuánta energía se devuelve a la red por cada km de frenada \bar{E}'_{gen} suponiendo que se recupera el 8 % de la energía que recogen los frenos:

$$\begin{aligned} \bar{E}'_{gen} &= -0,080 \frac{10^{-2}}{3,600} \left(\frac{465.500 \cdot 0,234}{10} - \left(356 + \frac{3,343}{2} 300 + \frac{5,410 \cdot 10^{-2}}{3} 300^2 \right) \right) = \\ &= -1,870 \frac{kWh}{km} \end{aligned}$$

III.2. Transrapid TR08 con 5 secciones

Para calcular la resistencia al avance del Transrapid se recurre a la siguiente fórmula:

$$R_{av} = R_a + R_m + R_b \quad [\text{Ec. III. 5}]$$

El término R_a [kN] es la resistencia aerodinámica y la resistencia de ingesta de aire para la renovación del aire interno, que se han combinado en un único término. Obedece a la siguiente ecuación:

$$R_a = 2,800 v^2 \left(0,530 \frac{N}{2} + 0,300 \right) 10^{-3} \quad [\text{Ec. III. 6}]$$

El término R_m [kN] es la resistencia de magnetización y responde a la próxima igualdad:

$$R_m = N (0,100 v^{0,500} + 0,020 v^{0,700}) \quad [\text{Ec. III. 7}]$$

Finalmente, el sumando R_b [kN] es la resistencia de generación de potencia a bordo. Se define como una función a trozos, según tres tramos de velocidad [Ec. III.8]:

$$\begin{cases} R_b = 0 & \text{de 0 a 20 km/h} \\ R_b = N \cdot 7,300 & \text{de 20 a 70 km/h} \\ R_b = N \left(\frac{146}{v} - 0,200 \right) & \text{de 70 a 500 km/h} \end{cases}$$

Para la aplicación de todas las fórmulas recién descritas debe tenerse en cuenta que N es el número de secciones que se acoplen al Transrapid en un momento concreto y la velocidad v se introduce en m/s [7, p. 39].

El Transrapid opera a una velocidad máxima de 430 km/h [47] (119,444 m/s). Si se considera como modelo un Transrapid TR08 con 5 secciones como el descrito en la referencia [9], la resistencia al avance a esa velocidad es la siguiente:

$$R_{av} = 2,800 \cdot 119,444^2 \cdot \left(0,530 \cdot \frac{5}{2} + 0,300 \right) \cdot 10^{-3} + 5 \cdot (0,100 \cdot 119,444^{0,500} + 0,020 \cdot 119,444^{0,700}) + 5 \cdot \left(\frac{146}{119,444} - 0,200 \right) = 78,334 \text{ kN}$$

La potencia y la energía por kilómetro a 430 km/h presentan los siguientes valores:

$$P = 78,334 \cdot 119,444 = 9.356,526 \text{ kW}$$

$$E' = 9.356,526 \cdot \frac{1}{430} = 21,759 \frac{\text{kWh}}{\text{km}}$$

Toda esta energía se la proporciona al tren un motor de inducción lineal. Un motor de inducción lineal presenta un rendimiento genérico del 70 % (véase el motor estudiado en la referencia [14]), así que la densidad lineal de energía requerida de la red E'_{red} será la que sigue:

$$E'_{red} = \frac{21,759}{0,700} = 31,084 \frac{\text{kWh}}{\text{km}}$$

Para calcular la energía media de aceleración de 0 a 430 km/h se procede como en el caso del AVE:

$$E'_{ac} = \frac{F_{ac} [\text{kN}]}{3,600} = \frac{1}{3,600} \left(\frac{ma}{1.000} + R_a + R_b + R_m \right) \quad [\text{Ec. III. 9}]$$

Para hallar \bar{E}'_{ac} primero se calcula \bar{F}_{ac} :

$$\bar{F}_{ac} = \frac{1}{v_f} \int_0^{v_f} \left(\frac{ma}{1.000} + R_a + R_m + R_b \right) dv$$

$$\begin{aligned} \bar{F}_{ac} = & \frac{ma}{1.000} + \frac{1}{v_f} \left[\int_0^{v_f} [2,800 v^2 \left(0,530 \frac{N}{2} + 0,300 \right) 10^{-3} + N (0,100 v^{0,500} + \right. \\ & \left. 0,020 v^{0,700})] dv \right] + \frac{1}{v_f} \left[\int_0^{5,556} 0 dv + \int_{5,556}^{19,444} N \cdot 7,300 dv + \int_{19,444}^{119,444} N \left(\frac{146}{v} - \right. \right. \\ & \left. \left. - 0,200 \right) dv \right] \end{aligned}$$

$$\bar{F}_{ac} = \frac{ma}{1.000} + \frac{2,800}{3} v_f^2 \left(0,530 \frac{N}{2} + 0,300 \right) 10^{-3} + N \left(\frac{0,100}{1,500} v_f^{0,500} + \frac{0,020}{1,700} v_f^{0,700} \right) + N 7,300 \frac{13,888}{v_f} + \frac{N 146}{v_f} \ln \left(\frac{119,444}{19,444} \right) - 0,200 \frac{100}{v_f} \quad [\text{Ec. III. 10}]$$

Sustituyendo a por $0,579 \text{ m/s}^2$ (valor de aceleración promedio entre los valores de aceleración de la tabla de [16, p. 67] para un Transrapid TR07 de dos secciones; se va a suponer que es la misma para un TR08 de 5 secciones), m por 326.600 kg (282.000 kg en vacío para un Transrapid TR08 con 5 secciones más 446 personas [9] por 100 kg por persona (estimación que incluye el equipaje)), N por 5 y v_f por $119,444 \text{ m/s}$ se obtiene el siguiente resultado:

$$\bar{F}_{ac} = \frac{326.600 \cdot 0,579}{1.000} + 42,125 = 231,226 \text{ kN}$$

Dividiendo este valor por $3,600$ se llega al resultado buscado:

$$\bar{E}'_{ac} = \frac{231,226}{3,600} = 64,230 \frac{\text{kWh}}{\text{km}}$$

Teniendo en cuenta la eficiencia del motor:

$$\bar{E}'_{ac_{red}} = \frac{64,230}{0,700} = 91,757 \frac{\text{kWh}}{\text{km}}$$

En el frenado de los trenes de levitación magnética el motor de inducción lineal pasa a trabajar como generador. Si se asume que la deceleración es idéntica a la aceleración y que el comportamiento del motor es simétrico y la eficiencia como generador es también del 70% , la potencia que se puede devolver a la red se puede calcular procediendo como en el caso del AVE:

$$\bar{E}'_{gen} = -0,700 \left(\frac{326.600 \cdot 0,579}{1.000 \cdot 3,600} - \frac{42,125}{3,600} \right) = -28,579 \frac{\text{kWh}}{\text{km}}$$

III.3. Hyperloop, cápsula para pasajeros

En el caso del Hyperloop se puede hacer uso de los datos proporcionados en el documento "Hyperloop Alpha" (referencia [18]). Para el modelo que solamente transporta 28 viajeros [18, p. 6], la resistencia aerodinámica a 1.130 km/h vale 320 N [18, p. 15], mientras que la resistencia de la película de aire bajo los rodamientos de aire tiene el valor de 140 N [18, p. 21]. Por otro lado, la tobera expansora proporciona una fuerza de 72 N [18, p. 19]. Se va a suponer que la velocidad se mantiene en los 1.220 km/h gracias a la actuación del motor de inducción lineal y se va a calcular el consumo como a partir de la fuerza de tracción que a tal efecto debe suministrar dicho motor, F_t [N]:

$$F_t = 320 \cdot \left(\frac{1.220}{1.130} \right)^2 + 140 - 72 = 441 \text{ N}$$

Donde se ha escalado la fuerza de arrastre teniendo en cuenta que depende de la velocidad al cuadrado.

La potencia y la densidad lineal de energía son las siguientes:

$$P_t = 441 \cdot \frac{1.220}{3.600} \cdot 10^{-3} = 149,450 \text{ kW}$$

$$E' = 149,450 \cdot \frac{1}{1.220} = 0,123 \frac{\text{kWh}}{\text{km}}$$

Teniendo en cuenta que el rendimiento genérico de un motor de inducción lineal es el 70 %, la energía demandada de la red eléctrica será la siguiente:

$$E'_{red} = \frac{0,123}{0,700} = 0,175 \frac{\text{kWh}}{\text{km}}$$

También debe considerarse que a 1.220 km/h las potencias de los compresores son 276 kW y 52 kW [18, p. 18]. Dado que son accionados por motores eléctricos rotativos y estos tienen un rendimiento del 90 %, la energía por unidad de longitud necesaria para moverlos es la siguiente:

$$E'_{bat} = \frac{276 + 52}{0,90} \cdot \frac{1}{1.220} = 0,299 \frac{\text{kWh}}{\text{km}}$$

El motor de los compresores es accionados con 1.500 kg de baterías [18, p. 18], pero en el Hyperloop hay baterías adicionales para los demás sistemas de potencia de la cápsula. La suma de 1.500, 290 (masa de refrigerante), 169 kg (masa del motor) y de las baterías adicionales es igual a 2.500 kg [18, pp. 17-23]. De ahí se deduce que hay 541 kg de baterías adicionales. Si los 1.500 kg para el motor del compresor suministran 0,299 kWh/km, se puede estimar cuánto suministran los 541 kg adicionales mediante proporcionalidad:

$$E'_{bat_{ads}} = 0,299 \cdot \frac{541}{1500} = 0,108 \frac{\text{kWh}}{\text{km}}$$

Las baterías que suministran esta energía se recargan e intercambian en las estaciones [18, p. 18]. No se van a considerar pérdidas de recarga o descarga de las baterías, que suelen ser pequeñas en comparación con la energía que almacenan. Sumando el valor recién obtenido a E'_{red} se obtiene este valor:

$$E'_{red_{tot}} = 0,175 + 0,299 + 0,108 = 0,582 \frac{\text{kWh}}{\text{km}}$$

Con respecto a la aceleración, la masa de la cápsula incluyendo a los viajeros y sus equipajes es 15.000 kg [18, p. 23] y la aceleración de 1 g [18, p. 22]. El producto de estas variables es el siguiente:

$$15.000 \cdot 9,810 = 147.150 \text{ N}$$

Que es una fuerza mucho mayor que 441 N, por lo que puede despreciarse frente a 147.150 N. Por tanto:

$$F_{ac} = 147.150 \text{ N} \cong cte.$$

Y considerando que la velocidad media durante la aceleración es 610 km/h:

$$\bar{P}_{ac} = 147.150 \cdot \frac{610}{3,600} \cdot 10^{-3} = 24.933,750 \text{ kW}$$

$$\bar{E}'_{ac} = 24.933,750 \cdot \frac{1}{610} = 40,875 \frac{\text{kWh}}{\text{km}}$$

Tomando en consideración el rendimiento del motor:

$$\bar{E}'_{acred} = \frac{40,875}{0,700} = 58,393 \frac{\text{kWh}}{\text{km}}$$

Al igual que el Transrapid y el AVE, el Hyperloop recupera energía al frenar. La cuantía de energía recuperada se calcula a partir de la fuerza de frenado, igual en módulo a la de aceleración porque se ha despreciado el rozamiento. Además, como en el caso del Transrapid se supone que el motor pasa a trabajar como generador con el mismo rendimiento. La velocidad media durante la deceleración también se considera que vale 610 km/h. Dicho esto, los resultados numéricos son los siguientes:

$$F_{frenado} = -147.150 \text{ N} = cte.$$

$$\bar{P}_{frenado} = -147.150 \cdot \frac{610}{3,600} \cdot 10^{-3} = -24.933,750 \text{ kW}$$

$$\bar{P}_{gen} = -0,700 \cdot 24.933,750 = -17.453,625 \text{ kW}$$

$$\bar{E}'_{gen} = -17.453,625 \cdot \frac{1}{610} = -28,613 \frac{\text{kWh}}{\text{km}}$$

Anexo IV: Justificación u origen de las ecuaciones del apartado [8]

Manteniendo la clasificación hecha en el apartado [8], la justificación o el origen de las ecuaciones según el tema es la siguiente:

IV.1. Límite de Kantrowitz

Las ecuaciones [8.1], [8.2], [8.10] y [8.11] son relaciones isoentrópicas que se estudian en la carrera y que se pueden consultar en una página web hecha por la NASA, la referencia [48].

Las ecuación [8.3] es el máximo flujo másico que puede pasar por una sección bloqueada sónicamente. En este caso la sección es A_{cc} y el flujo másico $\dot{m}_{cc\text{máx}}$. Se puede consultar en una página web hecha por la NASA, la referencia [49]. Si después de producirse el bloqueo sónico acelera el tren aumentará el flujo másico por el tubo relativo al tren. La diferencia entre el nuevo flujo y $\dot{m}_{cc\text{máx}}$ no podrá entrar en la sección bloqueada A_{cc} , por lo que se acumulará en el frontal del tren y la resistencia aerodinámica crecerá notablemente, frenándolo. Este es el límite de Kantrowitz.

Las ecuaciones que van de la [8.4] a la [8.9] son relaciones geométricas, principalmente para el cálculo de las áreas involucradas en el límite de Kantrowitz.

La igualdad [8.12] es la ecuación de continuidad aplicada al flujo unidimensional y estacionario \dot{m}_t .

La igualdad [8.13] es la ecuación de los gases ideales.

La igualdad [8.14] es una relación de flujos másicos.

La última de este bloque, la [8.15] es la ecuación de continuidad aplicada al flujo unidimensional y estacionario \dot{m}_{c_1} .

IV.2. Compresores

Las ecuaciones [8.16] y [8.18] provienen de la ecuación [II.12] (demostrada en el anexo [II]), pero son distintas porque se ha hecho una ligera modificación. Dicha modificación es la siguiente, manteniendo la nomenclatura del anexo [II]:

$$\left\{ \begin{array}{l} P_{real} = \frac{Q_1 p_1 \bar{c}_p}{\eta R} \left(\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right) \quad [\text{Ec. II. 12}] \\ Q = \frac{\dot{m} RT}{p} \quad [\text{Ec. II. 2}] \rightarrow Q_1 = \frac{\dot{m} RT_1}{p_1} \end{array} \right. \rightarrow$$
$$\rightarrow P = \frac{\dot{m} RT_1}{\eta} \left(\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right) \quad [\text{Ec. IV. 1}]$$

Esta ecuación [IV.1] se transforma en [8.16] y [8.18] colocando los subíndices que interesan en cada caso.

Por otra parte, las ecuaciones [8.17] y [8.19] proceden de la ecuación [II.20] y de la definición del rendimiento isoentrópico. Si se combinan estas dos últimas ecuaciones y se despeja $T_{2,real}$ (la temperatura real de la salida del compresor, a diferencia de la isoentrópica, denotada aquí y en el anexo [II] como T_2) se obtiene lo siguiente:

$$\begin{cases} T_2 = T_1 \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} & \text{[Ec. II. 20]} \\ \eta = \frac{T_2 - T_1}{T_{2,real} - T_1} & \text{[Ec. IV. 2]} \end{cases} \rightarrow T_{2,real} = T_1 \left(\frac{1}{\eta} \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} + \frac{\eta - 1}{\eta} \right) \quad \text{[Ec. IV. 3]}$$

Esta ecuación [IV.3] se transforma en [8.17] y [8.19] colocando los subíndices que interesan en cada caso.

IV.3. Intercambiadores de calor

Las ecuaciones [8.20] y [8.21] proceden de las siguientes ecuaciones básicas de transferencia de calor:

$$\begin{cases} \text{Calor sensible por unidad de tiempo: } \dot{Q} = \dot{m} \bar{c}_p \Delta T & \text{[Ec. IV. 4]} \\ \text{Calor latente de vaporización por unidad de tiempo: } \dot{Q}_v = \dot{m} h_v & \text{[Ec. IV. 5]} \end{cases}$$

IV.4. Serpentín

La ecuación [8.22] igualmente se puede explicar a partir de [IV. 4] y [IV.5].

IV.5. Depósitos de agua

Las fórmulas desde la [8.23] hasta la [8.25] se explican rápidamente con las igualdades que vienen a continuación:

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{m} = \frac{dm}{dt} \rightarrow \int_0^m m = \int_0^{t_d} \dot{m} dt \rightarrow \dot{m} t_d = \rho V \\ m = \rho V \end{array} \right. \quad [\text{Ec. IV. 6}]$$

Donde se ha usado que el flujo másico es constante (estado estacionario). En este caso se ha mantenido la variable t_d , que es el tiempo de duración del agua que efluye de los depósitos. Alterando el resto de las variables se obtienen las referidas fórmulas de los depósitos.

La fórmula [8.26] es el tiempo de duración del agua almacenada en los depósitos en función del tiempo de viaje. Como el primero debe ser mayor que el segundo por si hubiere una emergencia, se usa el coeficiente τ_1 para ampliarlo (el cual se aplica de manera porcentual).

Finalmente, la [8.27] es la masa total de agua que lleva el vehículo en cada viaje, que es V_I por la densidad del agua, ya que toda el agua ocupa el 100 % de este primer depósito al principio y conforme avanza el viaje se va vaciando y acumulando en V_{II} y V_{III} .

IV.6. Tubería a la tobera

La fórmula [8.28] es una relación entre dos flujos másicos.

La igualdad [8.29] es la ecuación de continuidad reorganizada.

La fórmula [8.30] es una relación geométrica.

La fórmula [8.31] es un promedio calculado de esta manera:

$$\bar{\rho}_{tub} = \frac{1}{p_{tob} - p_1} \int_{p_1}^{p_{tob}} \frac{p}{RT_2} dp = \frac{1}{\Delta p_{tub} RT_2} \int_{p_1}^{p_{tob}} p dp = \frac{p_{tob}^2 - p_1^2}{2\Delta p_{tub} RT_2} = \frac{2p_1 - \Delta p_{tub}}{2RT_2}$$

Donde se han usado las variables originales y se ha considerado, según una de las hipótesis iniciales, que la temperatura es constante a lo largo de la tubería. Compárese este procedimiento con el ejecutado en el ejemplo [IV] del anexo [I], que es muy similar (ecuaciones [I.31] y [I.32]).

Las ecuaciones [8.32]-[8.34] son las mismas que se presentaron en el ejemplo [I] del anexo [I], pero con otros subíndices.

IV.7. Tobera

La ecuación [8.35] es la definición de p_{tob} .

La ecuación [8.36] proviene de estas dos ecuaciones:

$$\left\{ \begin{array}{l} T_{e_s} = \left(\frac{p_e}{p_{tob}} \right)^{\frac{\gamma_{tob}-1}{\gamma_{tob}}} \quad [\text{Ec. IV. 8}] \\ \eta_{tob} = \frac{T_2 - T_e}{T_2 - T_{e_s}} \quad [\text{Ec. IV. 9}] \end{array} \right. \rightarrow T_e = T_2 \left[(1 - \eta_{tob}) + \eta_{tob} \left(\frac{p_e}{p_{tob}} \right)^{\frac{\gamma_{tob}-1}{\gamma_{tob}}} \right]$$

Donde T_{e_s} es la temperatura isoentrópica de escape de la tobera [K] y la definición de η_{tob} representa el alejamiento de la tobera real (cuya temperatura de escape es T_e) respecto de la tobera isoentrópica. Nótese la cercanía de estas ecuaciones a las ecuaciones [II.20] y [IV.2]. El principal cambio es que el rendimiento isoentrópico de una tobera se define “a la inversa” que el rendimiento isoentrópico de un compresor porque mientras que en el compresor se divide la situación ideal entre la real al ser la ideal la que consume menos trabajo de compresión, en la tobera se divide la situación real entre la ideal al ser la ideal la que resulta en un menor empuje en la tobera. Es decir, el compresor consume trabajo y la tobera lo genera a partir de un empuje, de ahí que las definiciones de los rendimientos sean diferentes.

La fórmula [8.37] se halla a partir de estas dos ecuaciones. La primera es el balance energético válido para flujo unidireccional, adiabático (isoentrópico o no) y que no intercambia trabajo (en la tobera el trabajo se debe a un empuje generado en el escape, pero no se genera en las secciones intermedias ni en la sección inicial). La segunda es la expresión del salto entálpico a lo largo de la tobera:

$$\left\{ \begin{array}{l} h_{tub} + \frac{c_{tub}^2}{2} = h_e + \frac{c_e^2}{2} \quad [\text{Ec. IV. 10}] \\ h_{tub} - h_e = \bar{c}_{p_{tob}}(T_2 - T_e) \quad [\text{Ec. IV. 11}] \end{array} \right. \rightarrow c_e = \sqrt{\bar{c}_{p_{tob}}(T_2 - T_e) + \frac{c_{tub}^2}{2}}$$

Donde h_{tub} es la entalpía disponible al final de la tubería y a la entrada de la tobera y h_e es la entalpía en el escape de la tobera. Ambas variables se miden en [J/kg·K] en el SI.

La fórmula [8.38] se halla a partir de la ecuación de conservación del momento lineal para flujo unidireccional y de la segunda ley de Newton aplicadas en la sección de escape de la tobera:

$$\begin{cases} \frac{d(m_{tob}c_e)}{dt} = \dot{m}_{tob}c_e + m_{tob}\dot{c}_e = 0 & \text{[Ec. IV. 12]} \rightarrow F_{tob} = \dot{m}_{tob}c_e + (p_e - p_t)A_e \\ m_{tob}\dot{c}_e = F_{tob} - (p_e - p_t)A_e & \text{[Ec. IV. 13]} \end{cases}$$

Es importante recalcar que al haber introducido la fuerza de reacción, el momento lineal global ($m_{tob}c_e$) en el escape se conserva, por lo que su derivada es igual a 0. En la referencia [50] se muestra también la fórmula [8.38] y se explica que hay varios tipos de toberas propulsivas y que el máximo empuje se consigue cuando la presión de escape de la tobera iguala a la atmosférica (en el caso del Hyperloop la presión del tubo). Es decir, interesa que la tobera para el Hyperloop tenga la extensión adecuada para que se dé dicha condición de empuje máximo.

La igualdad [8.39] es la ecuación de continuidad reorganizada aplicada al escape.

La [8.40] es la ecuación de los gases ideales aplicada al escape.

Finalmente, la [8.41] es la expresión de la potencia instantánea cedida por la tobera en función de la fuerza de empuje y de la velocidad a la que se ejerce dicha fuerza, que es la velocidad del vehículo.

IV.8. Rodamientos de aire

La ecuación [8.42] proviene de [19, p. 11].

La ecuación [8.43] representa la fuerza de sustentación que se produce en los rodamientos por la acción aerodinámica (existe una diferencia de presión existente entre la cara inferior y superior e cada rodamiento). Se trata de rodamientos aerostáticos, es decir, externamente presurizados [19, p. 11], pero con un efecto de sustentación especialmente importante a altas velocidades y con grandes superficies de sustentación [18, p. 20-21].

La igualdad [8.44] es una relación geométrica.

La igualdad [8.45] es la ecuación de los gases ideales aplicada en la cara inferior de los rodamientos.

La igualdad [8.46] permite relacionar la presión en la cara inferior de los rodamientos con la presión de suministro a través de la pérdida de carga que se produce a medida que sale el aire.

La igualdad [8.47] es la suma de las ecuaciones [8.42] y [8.43]. Así se obtiene la capacidad de carga total de todos los rodamientos.

La [8.48] es la equiparación de la capacidad de carga total de todos los rodamientos con la componente en z de la fuerza gravitatoria.

A la [8.49] se llega a través de varios pasos:

1. Se toman los perfiles de velocidades para el flujo de Couette y el flujo de Poiseuille:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Couette: } u_c = v \frac{y'}{h} \quad [\text{Ec. IV. 14}] \\ \text{Poiseuille: } u_p = y'(h - y') \frac{\Delta p_L}{2\mu_a L} \quad [\text{Ec. IV. 15}] \end{array} \right.$$

Donde u_c es el perfil de velocidades [m/s] de un flujo de Couette con la placa (el rodamiento) desplazándose a la velocidad v [m/s] (la del vehículo) una separación entre la placa y el suelo (el rodamiento y el tubo) de h [m] y una coordenada vertical local y' [m], [51]. Por otro lado, u_p es el perfil de velocidades [m/s] de un flujo de Poiseuille bajo la misma placa con el salto de presión Δp_L ($|\Delta p_L|$ para que quede claro que es positivo con el criterio de sentidos asignado) entre sus extremos [52].

2. Se suman ambos perfiles teniendo en cuenta el sentido de cada uno. El flujo de Couette va de izquierda a derecha (sentido tomado como positivo en este caso), mientras que el de Poiseuille va de derecha a izquierda, es decir, de mayor a menor presión porque bajo el rodamiento hay aire presurizado a mayor presión que la presión del tubo y por la sección inicial del rodamiento ingresa una cantidad despreciable de aire a la presión del tubo, mientras que por la sección final sale una cantidad de aire mucho más grande a una presión mayor que la interna del tubo. La suma de los perfiles es u_{CP} [m/s]:

$$u_{CP} = v \frac{y'}{h} - y'(h - y') \frac{|\Delta p_L|}{2\mu_a L} \quad [\text{Ec. IV. 16}]$$

3. Se toma la ley de Newton de la viscosidad, aplicable a este caso porque el aire es un fluido newtoniano:

$$\tau_v = -\mu_a \frac{du_{CP}}{dy'} \quad [\text{Ec. IV. 17}]$$

Donde τ_v es la tensión que aparece en la pared debida al esfuerzo viscoso $[\text{N/m}^2]$. Esta ecuación proviene de [53], solamente se han cambiado los subíndices.

- Después se aplica la ley de Newton de la viscosidad a este perfil combinado para llegar a la tensión debida al esfuerzo viscoso que actúa en la pared del tubo (la ecuación [IV.16] se introduce en [IV.17]):

$$\tau_v = -\mu_a \frac{du_{CP}}{dy'} = -\mu_a \frac{v}{h} + (h - 2y') \frac{|\Delta p_L|}{2L} \quad [\text{Ec. IV. 18}]$$

- A continuación se reemplaza la coordenada y' por h , ya que el esfuerzo viscoso se evalúa en el extremo de la película, que está a una distancia h del origen del eje y' :

$$\tau_v = -\mu_a \frac{v}{h} - \frac{|\Delta p_L|}{2L} h \quad [\text{Ec. IV. 19}]$$

- Luego se modifica esta última ecuación para hallar mediante integración el espesor de la película medio \bar{h} [m], teniendo en cuenta que varía entre h_1 y h_2 ($h_1 > h_2$, por eso se integra de h_2 a h_1) y que en la formulación inicial h se consideraba constante:

$$\tau_v = - \left(\frac{1}{h_1 - h_2} \int_{h_2}^{h_1} \mu_a \frac{v}{h} dh + \frac{1}{h_1 - h_2} \int_{h_2}^{h_1} \frac{|\Delta p_L|}{2L} h dh \right)$$

$$\tau_v = - \left(\mu_a \frac{v}{h_1 - h_2} \ln \left(\frac{h_1}{h_2} \right) + \frac{|\Delta p_L|}{2L} \frac{h_1 + h_2}{2} \right) \quad [\text{Ec. IV. 20}]$$

- Finalmente se multiplica esta expresión del esfuerzo viscoso por la superficie en que actúa para obtener F_v , llegando a la ecuación [8.46] tras multiplicar tomar el valor absoluto de F_v :

$$|F_v| = \left| - \left[\mu_a \frac{v}{h_1 - h_2} \ln \left(\frac{h_1}{h_2} \right) + \frac{|\Delta p_L|}{4L} (h_1 + h_2) \right] S \right| =$$

$$= \left[\mu_a \frac{v}{h_1 - h_2} \ln \left(\frac{h_1}{h_2} \right) + \frac{|\Delta p_L|}{4L} (h_1 + h_2) \right] S$$

La [8.50] es la expresión de Δp_L en función de la presión de salida del aire de los rodamientos y la presión del tubo, que es la que afecta a la primera sección de los rodamientos en el sentido de la marcha.

La [8.51] es la potencia disipada por F_v , que se obtiene multiplicando esta por la velocidad del vehículo.

La [8.52] es el flujo másico requerido por todos los rodamientos, el cual se calcula aplicando la ecuación de continuidad a cada rodamiento (recordando que el área de salida del aire es $h_2 w$, como está indicado en la figura [7.4]) y se ha multiplicado por el número de rodamientos.

La [8.53] es el cálculo del número de cojinetes de aire en función de la longitud de la cápsula, de la longitud de cada cojinete y de la distancia entre ellos. Es una relación geométrica que se deduce así:

$$n_a L + (n_a - 2)d = 2L_c \rightarrow n_a = 2 \left(\frac{L_c + d}{L + d} \right)$$

Donde se ha tenido en cuenta que la suma de la longitud de cada hilera de rodamientos y sus respectivas interdistancias equivale al doble de la longitud de la cápsula. Tras este cálculo se aproxima n_a al entero más próximo. Si el más próximo está por debajo, entonces habrá un hueco en los extremos de la cápsula sin cojinetes. En cambio, si el más próximo está por encima, los cojinetes sobresaldrán de la cápsula. Es preferible esto último para poder disponer de mayor área de presurización y sustentación, ya que es asumible que los últimos cojinetes de ambas hileras sobresalgan bajo la tobera, que en ese tramo inicial será convergente.

La [8.54] es el cálculo de la anchura de cada cojinete según la longitud de la circunferencia externa de la cápsula que ocupan (la longitud de la circunferencia total por un determinado porcentaje) y el espesor que ocupa el estátor del LIM.

Por último, la [8.55] es la rigidez media de cada cojinete, que va en función de la variación de la fuerza en cada uno (de ahí la división por n_a) y de la variación del espesor medio de la película de aire. Dicha variación experimentada es F_L , que va de 0 a su valor máximo dependiendo de la velocidad.

IV.9. Arrastre aerodinámico

Para comenzar, una versión simplificada fórmula [8.56] es la ecuación [IV.21], explicada en [10, p. 26]. El coeficiente C de la fórmula de Davis es la ecuación [IV.22], explicada en [10, p. 22]. Aunando ambas ecuaciones se llega a [8.56]:

$$\begin{cases} F_D = T_f C v^2 & \text{[Ec. IV. 21]} \\ C = \frac{1}{2} \rho_t A_f C_{D_{ext}} & \text{[Ec. IV. 22]} \end{cases} \rightarrow F_D = \frac{1}{2} \rho_t v^2 A_f T_f C_{D_{ext}}$$

La igualdad [8.57] es la potencia instantánea disipada por F_D . Ambas variables se relacionan a través de v .

Las ecuaciones [8.58], [8.59], [8.60] y [8.62] sirven para calcular el arrastre aerodinámico y se encuentran en la referencia [17].

La ecuación [8.61] proviene de la hipótesis de considerar el área de la cápsula igual al área frontal del vehículo.

La ecuaciones [8.63], [8.64], [8.66] y [8.67] son relaciones geométricas.

Finalmente, las igualdades [8.65] se obtiene siguiendo estos pasos:

1. Se toman dos expresiones para el número de Reynolds: La global y la local:

$$\begin{cases} Re_{D_c} = \frac{\rho_t v D_c}{\mu_t} & \text{[Ec. IV. 23]} \\ Re_x = \frac{\rho_t v x}{\mu_t} & \text{[Ec. IV. 24]} \end{cases}$$

Donde Re_{D_c} es el número de Reynolds global $[\phi]$ que ve la cápsula y Re_x el número de Reynolds local $[\phi]$, que depende de la coordenada horizontal (x [m]). Además, μ_t es la viscosidad dinámica del aire en el interior del tubo [Pa·s].

2. Se calcula Re_{D_c} y Re_x con los valores de la referencia [18] y con el valor de μ_t para la cápsula de pasajeros:

$$Re_{D_c} = \frac{1,18 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{1.220}{3,60} \cdot 1.34}{1,80 \cdot 10^{-5}} = 29.769,51$$

$$Re_x = \frac{1,18 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{1.220}{3,60} \cdot 25}{1,80 \cdot 10^{-5}} = 555.401,23$$

En ambos cálculos se ha usado el valor de la viscosidad dinámica a 19°C [40], que es la temperatura interna del tubo diseñado por Musk. Además, el segundo cálculo se ha hecho en el final del tren, es decir, considerando su longitud total. Dicha longitud no se especifica en [18], pero se puede estimar. Teniendo en cuenta que la cápsula para viajeros cuenta con 14 rodamientos de aire a cada lado y cada uno de ellos mide 1,50 m de longitud, la longitud total del tren será superior a 21 m (1,50·14). Se considera 25 m, que es una cifra redonda.

La conclusión es que el número de Reynolds está en el rango laminar, que aproximadamente va de 0 a 500.000 en placas planas [54].

3. Se toman las expresiones para calcular δ^* y θ teniendo en cuenta que la capa límite es laminar [54]:

$$\begin{cases} \delta^* = \int_0^\delta \left(1 - \frac{u(y'')}{U}\right) dy'' & \text{[Ec. IV. 25]} \\ \theta = \int_0^\delta \frac{u(y'')}{U} \left(1 - \frac{u(y'')}{U}\right) dy'' & \text{[Ec. IV. 26]} \end{cases}$$

Donde $u(y'')$ es el perfil de velocidades de la capa límite [m/s], y'' es la coordenada vertical local de la capa límite [m] y U [m/] es el 99 % de la velocidad del vehículo.

4. Asumiendo que el perfil de velocidades es lineal, este se integra en las ecuaciones [IV.25] y [IV.26] y así se obtienen las ecuaciones [IV.28] y [IV.29]:

$$\begin{cases} \text{Capa límite lineal: } u(y'') = \frac{u}{\delta} y'' & \text{[Ec. IV. 27]} \\ \delta^* = \int_0^\delta \left(1 - \frac{u(y'')}{U}\right) dy'' & \text{[Ec. IV. 28]} \\ \theta = \int_0^\delta \frac{u(y'')}{U} \left(1 - \frac{u(y'')}{U}\right) dy'' & \text{[Ec. IV. 29]} \end{cases} \rightarrow \begin{cases} \delta^* = \frac{\delta}{2} & \text{[Ec. IV. 30]} \\ \theta = \frac{\delta}{6} & \text{[Ec. IV. 31]} \end{cases}$$

Donde δ es el espesor de la capa límite [m].

5. Finalmente se relacionan las ecuaciones [IV.30] y [IV.31]. Es decir, δ^* es el triple que θ . Así se elimina δ y se obtiene la igualdad buscada, la [8.65].

IV.10. Baterías

La expresión [8.68] es la masa de baterías que alimentan el compresor. Se calcula combinando estas dos ecuaciones:

$$\begin{cases} E_{mot} = \frac{(\bar{P}_{C_1} + \bar{P}_{C_2})}{\eta_{mot}} t_{des} & \text{[Ec. IV.32]} \\ e_{bat} = \frac{E_{mot}}{m'_{bat}} & \text{[Ec. IV.33]} \end{cases} \rightarrow m'_{bat} = \left(\frac{\bar{P}_{C_1} + \bar{P}_{C_2}}{\eta_{mot}} \right) \frac{t_{des}}{e_{bat}}$$

Donde la variable E_{mot} es la energía total que consume el motor del compresor [J].

La expresión [8.69] relaciona la masa de las baterías que alimentan el motor del compresor con la masa de las baterías que sirven para el control del vehículo y su sistema eléctrico.

La expresión [8.70] es la suma de [8.68] y [8.69].

La expresión [8.71] es el tiempo de descarga de las baterías en función del tiempo de viaje. Como el primero debe ser mayor que el segundo por si hubiere una emergencia, se usa el coeficiente τ_2 para ampliarlo (el cual se aplica de manera porcentual).

La expresión [8.72] es la potencia media que consume el primer compresor y se calcula haciendo una media ponderada con la potencia media durante el tiempo de aceleración, el de frenado y el tiempo a la velocidad de operación. Los términos de la media ponderada vienen a continuación:

$$\begin{cases} \frac{P_{C_1}}{2} t_{ac} & \text{[Ec. IV.34]} \\ \frac{P_{C_1}}{2} t_{dec} & \text{[Ec. IV.35]} \\ P_{C_1} t_v & \text{[Ec. IV.36]} \end{cases} \rightarrow \bar{P}_{C_1} = \frac{P_{C_1}}{t_{ac} + t_{dec} + t_v} \left[\frac{(t_{ac} + t_{dec})}{2} + t_v \right]$$

Donde se ha considerado que la potencia de compresión durante la aceleración o deceleración es la máxima entre 2 porque aumenta o decrece linealmente en este intervalo debido al crecimiento o decrecimiento lineal del flujo másico que admite el compresor.

La [8.73] atiende a la hipótesis planteada que dice que la potencia del compresor 2 varía poco durante la frenada o aceleración debe mantenerse la capacidad de levantar. Para ello, el flujo másico que se suministra a los rodamientos de aire no es muy variable, aunque va disminuyendo poco a poco (no linealmente) conforme el tren va decelerando porque la fuerza de sustentación va decayendo y los rodamientos se aproximan más al tubo, requiriendo menos flujo másico.

IV.11. Cinemática

La [8.74] atiende a las leyes básicas de la cinemática, teniendo en cuenta que la aceleración se considera constante.

Lo mismo para la [8.75], mas en este caso es la deceleración la considerada invariable.

Por otro lado, la [8.76] es la velocidad media y se calcula de un modo similar a la potencia media del compresor 1:

$$\begin{cases} \frac{v}{2}t_{ac} & [\text{Ec. IV. 37}] \\ \frac{v}{2}t_{dec} & [\text{Ec. IV. 38}] \\ vt_v & [\text{Ec. IV. 39}] \end{cases} \rightarrow \bar{v} = \frac{\frac{v}{2}(t_{ac} + t_{dec}) + vt_v}{t_{ac} + t_{dec} + t_v}$$

Donde se ha considerado que la velocidad compresión durante la aceleración o deceleración es la máxima entre 2 porque aumenta o decrece linealmente en este intervalo debido al crecimiento o decrecimiento lineal de la misma (tanto a_1 cuanto a_2 son constantes).

La [8.77] es el tiempo total de recorrido, que se obtiene dividiendo la longitud del tubo entre la velocidad media.

La [8.78] es el tiempo de viaje a la velocidad de operación v , que se calcula deduciendo el tiempo de aceleración y deceleración del tiempo total de recorrido.

La [8.79] proviene de la conjunción de estas otras:

$$\begin{cases} L_{ac} = L_0 + v_0 t_{ac} + \frac{1}{2} a_1 t_{ac}^2 & [\text{Ec. IV. 40}] \\ t_{ac} = \frac{v}{a_1} & [\text{Ec. IV. 41}] \end{cases} \rightarrow L_{ac} = \frac{v^2}{2a_1}$$

Donde se ha considerado que la longitud inicial L_0 [m] y la velocidad inicial v_0 [m/s] son nulas (condiciones de partida nulas).

Por otro lado, respecto a la [8.80], esta es análoga a la [8.79], la única diferencia es que se considera la deceleración a_2 en vez de la aceleración a_1 .

Por último, la [8.81] es la longitud de viaje a la velocidad de operación v , que se calcula deduciendo la longitud de aceleración y deceleración de la longitud del tubo (igual a la longitud de la ruta).

IV.12. Levitación y propulsión

La expresión [8.82] procede de [16, p.63]. El motor que lleva el Hyperloop es trifásico, por lo que el número de fases es 3 [1].

La expresión [8.83] es la segunda ley de Newton aplicada al Hyperloop. Para más detalles, véase su aplicación al AVE y al Transrapid en el anexo [III].

La expresión [8.84] es la potencia instantánea propulsiva, que se relaciona con F_x a través de la velocidad del vehículo.

La [8.85] es la obtención de la resistencia al avance a partir de suma las resistencias individuales al avance, que son F_D y $F_{D_{EDS}}$ para el primer modelo y F_D y F_V para el segundo.

La [8.86] es la potencia disipada por la resistencia al avance. Ambas variables se relacionan a través de la velocidad del vehículo.

La [8.87] es la fuerza de arrastre del sistema EDS y se puede encontrar en la referencia [8].

La [8.88] es la potencia instantánea disipada por $F_{D_{EDS}}$. Ambas variables se relacionan a través de la velocidad del vehículo.

La [8.89] representa la fuerza necesaria para levitar, que es la componente en z de la fuerza gravitatoria.

Las expresiones [8.90] y [8.91] provienen de [1].

La [8.92], su miembro izquierdo viene de [16, p.64] y su miembro derecho es la potencia reactiva en términos de la I_1 y X_1 .

La [8.93] es la potencia de entrada al estátor, que es la potencia de salida dividida entre el rendimiento.

Respecto a la [8.94], es la componente de la fuerza gravitatoria en x .

Por último, la [8.95] es la potencia asociada a F_{gx} y ambas se relacionan a través de la velocidad del vehículo.

IV.13. Transporte

La ecuación [8.96] permite calcular la masa total del primer modelo teniendo en cuenta todas las masas: la masa lineal de la estructura y la de los imanes del EDS por la longitud de cada cápsula y por el número total de cápsulas (igual al número de contenedores), la masa de las baterías que incorpora para los sistemas de control y potencia, la carga máxima de cada contenedor por su factor de llenado y la tara de cada uno por el número de ellos.

La ecuación [8.97] permite calcular la masa total del segundo modelo teniendo en cuenta sus masas: la masa lineal de la estructura por la longitud de la cápsula (una única cápsula), la masa lineal del rotor del LIM por la misma longitud, la de cada cojinete de aire por el número de cojinetes, la del compresor (ambas partes), la del motor que acciona el compresor, la del agua de refrigeración, la del sistema de frenado de emergencia y la masa total de las cajas.

La fórmula [8.98] es la masa total de las cajas, calculada como la masa de las piezas transportadas en cada caja por el número de cajas transportadas.

La fórmula [8.99] es el número de cajas transportado, que es el máximo transportable por el factor de ocupación, que tiene en cuenta que el tren no siempre lleva el máximo número de cajas que podría.

La fórmula [8.100] muestra que el diámetro de la carga para el primer modelo es el diámetro de la circunferencia inscrita al contenedor o el diámetro de la circunferencia inscrita a una sección con varias filas de cajas para el segundo modelo.

La [8.101] permite calcular el diámetro de la circunferencia inscrita a una sección con varias filas de cajas para el segundo modelo. Para ello se tiene en cuenta el lado de cada caja y el número de filas de cajas existente.

La [8.102] sirve para hallar la longitud de cada cápsula, que es la longitud de un contenedor más el doble del espesor longitudinal en el primer caso; mientras que en el segundo caso es la longitud total que ocupa el conjunto de cajas más el doble del espesor longitudinal (la zona de cajas se separa de las otras zonas mediante paneles de

espesor δ_{lc}) más la longitud del tramo que ocupan los sistemas auxiliares (compresor, motor, depósitos, intercambiadores) y más la longitud del tramo que ocupa el conjunto de baterías al final de la cápsula, antes de la tobera.

La [8.103] sirve para calcular la longitud del conjunto de cajas. Este valor se obtiene de la multiplicación del número de secciones que ocupan las cajas por la longitud o profundidad de cada caja.

La [8.104] permite hallar el número de secciones necesarias para albergar las cajas. Este valor se obtiene de la división del número total de cajas por el número de cajas que caben en una sección (que es el número de filas de cajas al cuadrado). Si no es un número entero, entonces se redondea al número entero superior, significando esto que la última sección está incompleta, pero hay que tenerla en cuenta porque también una longitud l_2 .

La [8.105] es la longitud de la tubería a la tobera, que es la longitud del conjunto de cajas más la longitud del tramo ocupado por las baterías, ya que dicha tubería comienza antes del panel de espesor δ_{lc} que separa las cajas de la zona de sistemas auxiliares.

Finalmente, la [8.106] es el índice que capacidad del sistema, que es la masa transportada por el sistema por unidad de tiempo. En el primer caso la masa transportada es el número de contenedores por la carga máxima y el factor de llenado de cada uno y en el segundo la calculada a través de la [8.98].

IV.14. Consumo energético

Para comenzar, la expresión [8.107] es la energía requerida para acelerar y se calcula combinando estas otras:

$$\begin{cases} E_{ac} = \bar{P}_{ac} t_{ac} & [\text{Ec. IV. 42}] \\ \bar{P}_{ac} = \frac{\bar{P}_m + \bar{P}_{gx} + \bar{P}_{av} (-\bar{P}_{tob})}{\eta_{EDS|LIM}} & [\text{Ec. IV. 43}] \\ \bar{P}_m = m_{tot} a_1 \frac{v}{2} & [\text{Ec. IV. 44}] \\ \bar{P}_{gx} = mg \text{sen} \alpha \frac{v}{2} & [\text{Ec. IV. 45}] \end{cases}$$

Donde P_{ac} es la potencia requerida para acelerar el vehículo y P_m es la potencia requerida para acelerar la masa total [W].

La [8.108] es análoga a la [8.107], pero en este caso la componente en x de la fuerza gravitatoria se resta porque no aporta energía al LIM trabajando como generador si el tren está en ascenso. La resistencia al avance disipa parte de la energía cinética, por lo

que de ella tampoco se podrá extraer energía para el generador y la tobera sí aporta energía al vehículo durante la frenada (porque parte del flujo másico ha de salir por la tobera, no se puede desviar) que se puede llevar al generador para aprovecharla. Además, se considera que el rendimiento del EDS o LIM es el mismo cuando trabaja como motor que como generador. Otro tema que debe considerarse es que es energía generada en vez de consumida, de ahí el signo negativo al principio de la expresión.

La [8.109] responde a la hipótesis de que la potencia de la tobera disminuye mucho a bajas velocidades porque el flujo másico de la tobera se desvía hacia los cojinetes.

La [8.110] es la potencia media asociada a la resistencia al avance. El primer término se calcula con la siguiente integral:

$$\bar{P}_D = \frac{1}{v} \int_0^v C v^3 dv = \frac{C v^4}{4v} = \frac{C v^3}{4} \quad [\text{Ec. IV. 46}]$$

Donde el término C [Ns^2/m^2] engloba los términos constantes de F_D (término que aparece en la fórmula de Davis empleada en el anexo [III]).

Respecto al segundo término, este se desarrollará a continuación. El tercer término responde a la hipótesis de que el arrastre del EDS crece inicialmente y después disminuye, por lo que este promedio de potencia será mayor que el promedio de la potencia disipada aerodinámicamente (tendrá un denominador mayor). Véanse las gráficas de la referencia [8] para más información.

La [8.111] se calcula integrando así la potencia disipada por las fuerzas viscosas:

$$\bar{P}_v = \frac{1}{v} \int_0^v \left[\mu_a \frac{v^2}{h_1 - h_2} \ln \left(\frac{h_1}{h_2} \right) + \frac{|\Delta p_L| v}{4L} (h_1 + h_2) S \right] dv \quad [\text{Ec. IV. 47}]$$

La [8.112] es la energía demandada de la red por el tren una vez ha alcanzado su velocidad terminal. Es la suma de la potencia de resistencia al avance y la potencia gravitatoria. Además, en el segundo modelo se considera la tobera, que como contribuye energéticamente al vehículo, no es necesario consumir tanta energía de la red.

La [8.113] es otra versión de la [8.112]. Cuando el numerador de la [8.112] sale negativo porque el tren está descendiendo una gran pendiente, entonces se aplica la [8.113], que tiene en cuenta que se está generando energía.

La [8.114] es la energía consumida para recargar las baterías, teniendo en cuenta que existen pérdidas energéticas en su carga a través del rendimiento η_{bat} . Para el primer modelo se emplea el término m_{Li^+} , mientras que para el segundo es $m_{bat_{tot}}$ el aplicado. Aparte de multiplicar por la densidad másica de energía se multiplica por la relación t_{tot}/t_{des} , ya que las baterías están sobredimensionadas para que duren t_{des} en vez de t_{tot} por si hubiere una emergencia, mas lo que realmente se gasta y que habrá de recargarse en la estación sucede en el tiempo t_{des} .

La [8.115] es la suma de las energías anteriormente descritas y su división por la longitud del tubo, que es igual a la longitud de la ruta. Así se obtiene la energía requerida de la red por unidad de longitud.

La [8.116] es la energía por unidad de longitud y masa, por lo que se calcula como la [8.115] partida por la masa transportada, masa utilizada en la fórmula [8.93] para el primer modelo o definida en la [8.98] para el segundo modelo.

Finalmente, la [8.117] se corresponde con el índice energético, es decir, energía empleada para el transporte (la suma de las energías parciales adicionadas también en la [8.115]) partida por la masa útil de las ecuaciones [8.96] u [8.98].

IV.15. Efecto de la curvatura del tubo

Primero de todo, la expresión [8.118] relaciona la aceleración centrípeta con la velocidad del vehículo y con el radio de curvatura.

Continuando con la [8.119], esta permite calcular la carga que se llevan los cojinetes del lado interno a la curva.

Respecto a la [8.120], permite hallar la carga que soportan los cojinetes sitios en el lado externo de la curva. Se añade la componente vertical en el cojinete de la aceleración centrífuga que sufre el vehículo.

En cuanto a las que van de la [8.121] a la [8.129] son las ecuaciones [8.42]-[8.55] aplicadas a los cojinetes del interior de la curva (subíndice 1) y a los cojinetes del exterior de la curva (subíndice 2). A ellas se ha añadido alguna ecuación adicional con sumatorios.

Finalmente, las que abarcan de la [8.130] a la [8.134] son las ecuaciones [8.18]-[8.22], exceptuando la [8.20], que corresponde al primer intercambiador de calor. Además, se ha añadido alguna ecuación adicional con sumatorios.

Anexo V. Cálculos de las bombas de vacío para el vaciado del tubo

Lo primero que cabe plantear es si se puede efectuar una compresión adiabática (idealmente sería una compresión isoentrópica). Para ello se recurre a la ecuación [II.20], al dato $\gamma = 1,40$ (anexo [II]) y se toma como dato inicial $T_1 = 293,15 \text{ K}$ y $p_1 = 100 \text{ Pa}$ (la presión del tubo tras su vaciado en el segundo modelo, como se explicita en el apartado [12.1]):

$$T_2 = T_1 \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} = 293,15 \left(\frac{101.325}{100} \right)^{\frac{1,40-1}{1,40}} = 2.117,71 \text{ K}$$

Esta será la temperatura ideal en las últimas etapas de la bomba al final del vaciado. Considerando un $\eta = 0,70$ y recurriendo a la ecuación [8.17] u [8.19] (cambiando los subíndices) se puede calcular la temperatura de salida real.

$$T_2 = T_1 \left(\frac{1}{\eta} \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} + \frac{\eta-1}{\eta} \right) = 293,15 \left(\frac{1}{0,70} \left(\frac{101.325}{100} \right)^{\frac{1,40-1}{1,40}} + \frac{0,70-1}{0,70} \right) = 2.899,66 \text{ K}$$

Esta temperatura es inadmisibles porque las últimas etapas de la bomba no la soportarían. Por tanto, se plantean dos alternativas a esta compresión adiabática continua: Compresión isoterma o compresión adiabática discontinua, es decir, con refrigeración intermedia como la que se aprecia en la figura [7.3].

V.1. Compresión isoterma

V.1.1. Demostración de las fórmulas

Primero de todo se va a hallar el trabajo específico de compresión w [J/kg] mediante el desarrollo de la ecuación [V.1], relacionada con la expresión [II.1]. Las variables utilizadas en el desarrollo son las mismas definidas en el anexo [II].

$$w = \int_{p_1}^{p_2} \frac{dp}{\rho} \quad [\text{Ec. V. 1}]$$

Además, como ya se explicó en el anexo [II], se tiene lo siguiente:

$$\frac{1}{\rho} = \frac{RT}{p} \quad [\text{Ec. V. 2}]$$

Combinando ambas ecuaciones se llega a la siguiente:

$$w = \int_{p_1}^{p_2} RT \frac{dp}{p} \quad [\text{Ec. V. 3}]$$

Dado que el proceso se considera isoterma, $T = \text{cte.}$ e integrar esta última ecuación es inmediato:

$$w = RT \ln\left(\frac{p_2}{p_1}\right) \quad [\text{Ec. V. 4}]$$

Este es el trabajo requerido para elevar la presión de 1 kg de un gas de constante R desde p_1 hasta p_2 . Justo al inicio del vaciado, p_1 será igual a p_2 , es decir, la presión atmosférica. A medida que el tubo se vaya vaciando, p_1 irá disminuyendo hasta alcanzar su valor final, momento en el cual se dejará de bombear aire hacia el exterior. Por tanto, se hace preciso hallar el trabajo específico promedio para el vaciado del tubo, ya que $w = f(p_1)$ y p_1 va variando. Para hallar el promedio se procede tal que así:

$$\bar{w} = \frac{1}{p_{1,i} - p_{1,f}} \int_{p_{1,f}}^{p_{1,i}} RT \ln\left(\frac{p_2}{p_1}\right) dp_1 \quad [\text{Ec. V. 5}]$$

Donde $p_{1,i}$ es la presión del tubo inicial y $p_{1,f}$ es la final, ambas expresadas en [Pa].

El primer paso de la integración es:

$$\bar{w} = \frac{RT}{p_{1,i} - p_{1,f}} \left(\ln(p_2) - \int_{p_{1,f}}^{p_{1,i}} \ln(p_1) dp_1 \right) \quad [\text{Ec. V. 6}]$$

Donde la integral que queda se resuelve mediante integración por partes, tomando las partes de esta manera:

$$\left\{ \begin{array}{l} \int u dv = uv - \int v du \\ 1 = dv \rightarrow v = \int 1 dp_1 = p_1 \\ \ln(p_1) = u \rightarrow du = \frac{dp_1}{p_1} \end{array} \right.$$

Teniendo esto en cuenta e introduciendo los límites de integración se llega a este resultado:

$$\bar{w} = \frac{RT}{p_{1,i} - p_{1,f}} \left(\ln(p_2) - (p_{1,i} - p_{1,f}) \left(\ln\left(\frac{p_{1,i}}{p_{1,f}}\right) - 1 \right) \right)$$

O lo que es lo mismo:

$$\bar{w} = RT \left(1 + \frac{\ln(p_2)}{(p_{1,i} - p_{1,f})} - \ln\left(\frac{p_{1,i}}{p_{1,f}}\right) \right) \quad [\text{Ec. V. 7}]$$

Este \bar{w} es el que se daría en un caso ideal, pero en la realidad habrá pérdidas, por lo que debe tenerse en cuenta el rendimiento del compresor a la hora de calcular \bar{w}_{real} :

$$\bar{w}_{\text{real}} = \frac{\bar{w}}{\eta} \quad [\text{Ec. V. 8}]$$

Lo próximo que se puede hallar es el trabajo medio de compresión real \bar{W}_{real} [J]. Para ello se aplica la siguiente relación:

$$\bar{W}_{\text{real}} = \bar{w}_{\text{real}} \Delta m \quad [\text{Ec. V. 9}]$$

Donde Δm es la masa extraída del tubo durante el vaciado, que se obtiene de la siguiente manera:

$$\Delta m = |\Delta m| = |m_f - m_i| = m_i - m_f$$

$$\Delta m = (\rho_i - \rho_f)V$$

Donde V [m³] es el volumen que se evacuará. Tras aplicar la ley de los gases ideales:

$$\Delta m = (p_i - p_f) \frac{V}{RT} \quad [\text{Ec. V. 10}]$$

En esta ecuación el término $(p_i - p_f)$ es equivalente a $(p_{1,i} - p_{1,f})$.

Respecto al tiempo de evacuación t_{ev} [s], para su cálculo ha de aplicarse la siguiente fórmula, procedente de la referencia [21]:

$$t_{ev} = \frac{V \ln\left(\frac{p_{1,i}}{p_{1,f}}\right)}{\sum_0^i n_{b_i} Q_i} \quad [\text{Ec. V. 11}]$$

Donde n_b [ϕ] es el número de bombas empleadas para evacuar el volumen V y Q [m³/s] es la máxima capacidad de bombeo (o caudal máximo trasegable) de una bomba.

Por otro lado, la potencia de bombeo de la bomba i será:

$$P_i = \frac{|\bar{W}_{\text{real}}|}{t_{ev_i}} \quad [\text{Ec. V. 12}]$$

Donde t_{ev_i} es el tiempo de evacuación de la bomba i , que evacuará el volumen V_i :

$$t_{ev_i} = \frac{V_i \ln\left(\frac{p_{1,i}}{p_{1,f}}\right)}{Q_i} \quad [\text{Ec. V. 13}]$$

V.1.2. Resultados numéricos

A partir de las fórmulas recién demostradas y definidas es posible obtener los resultados numéricos partiendo de los valores definitivos de ambos modelos.

En el primer modelo dichos valores son: $p_{1,f} = 250 \text{ Pa}$ ($= p_t$), $T = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ ($= T_t$), $D_t = 9,37 \text{ m}$. Para las bombas puede tomarse $\eta = 0,65$ (bomba de desplazamiento positivo) y $Q = 3,78 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$ [18, p. 24]. También se toma $p_2 = p_{1,i} = 1101.325 \text{ Pa}$, valor utilizado en este anexo de antemano y $R=287 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$, valor explicitado el anexo [II]. Se van a aplicar las ecuaciones [V.7]-[V.13], a causa de que son las más interesantes:

$$\begin{aligned} \bar{w} &= 287 \cdot (20 + 273,15) \left(1 + \frac{\ln(101.325)}{(101.325 - 250)} - \ln\left(\frac{101.325}{250}\right) \right) = \\ &= -421.049,98 \frac{\text{J}}{\text{kg}} \cong -421,05 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \end{aligned}$$

$$\bar{w}_{real} = \frac{-421,05}{0,65} = -647,77 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = -0,18 \frac{\text{kWh}}{\text{kg}}$$

$$\Delta m = (101.325 - 250) \frac{\frac{\pi}{4} 9,37^2 1000}{287 \cdot 293,15} = 82.840,18 \text{ kg}$$

Para el cálculo de V se ha usado una longitud del tubo de 1.000 m, por lo que de ahora en adelante se hablará de 82.840,18 kg/km.

$$\bar{W}_{real} = -0,18 \cdot 82.840,18 = -14.905,94 \frac{\text{kWh}}{\text{km}}$$

$$t_{ev} = \frac{\frac{\pi}{4} 9,37^2 1000}{1 \cdot 3,78} \ln\left(\frac{101.325}{250}\right) = 109.537,63 \text{ s} = 30,43 \text{ h}$$

Donde se ha supuesto que hay una única bomba en ese kilómetro de tubo. Por ello, en la ecuación [V.12] no será necesario distinguir con subíndices entre varias bombas:

$$P = \frac{14.905,94}{30,43} = 489,84 \text{ kW}$$

Finalmente, considerando que el motor eléctrico que alimentará el compresor contará con una eficiencia de en torno al 90 %, los valores de \bar{w}_{real} , \bar{W}_{real} y P en la red

eléctrica (\bar{w}_{red} , \bar{W}_{red} y P_{red} , respectivamente) serán: -0,20 kWh/kg, 16.562,16 kWh/km y 544,27 kW.

Por otro lado, en el segundo modelo los valores de partida son estos: $p_{1,f} = 100$ Pa, $T = 20$ °C y $D_t = 2,94$ m. Todos los demás valores se toman igual que en el caso anterior y el procedimiento se ejecuta de la misma forma:

$$\bar{w} = 287 \cdot 293,15 \left(1 + \frac{\ln(101.325)}{(101.325 - 100)} - \ln\left(\frac{101.325}{100}\right) \right) = -498.141,25 \frac{J}{kg} \cong$$

$$\cong -498,14 \frac{kJ}{kg}$$

$$\bar{w}_{real} = \frac{-498,14}{0,65} = -766,37 \frac{kJ}{kg} = -0,21 \frac{kWh}{kg}$$

$$\Delta m = (101.325 - 100) \frac{\frac{\pi}{4} 2,94^2 1000}{287 \cdot 293,15} = 8.167,71 \text{ kg}$$

$$\bar{W}_{real} = -0,21 \cdot 8.167,71 = -1.738,75 \frac{kWh}{km}$$

$$t_{ev} = \frac{\frac{\pi}{4} 2,94^2 1000}{1 \cdot 3,78} \ln\left(\frac{101.325}{100}\right) = 12.429,58 \text{ s} = 3,45 \text{ h}$$

$$P = \frac{1.738,75}{3,45} = 503,60 \text{ kW}$$

Los valores de \bar{w}_{red} , \bar{W}_{red} y P_{red} serán: -0,23 kWh/kg, -1.931,94 kWh/km y 559,56 kW.

V.2. Compresión adiabática con refrigeración intermedia

En este caso también se utiliza la fórmula [8.17] con otros subíndices para el cálculo de las temperaturas finales de compresión. Los subíndices que se usarán son 1 y 2 para el primer compresor (o las etapas de la primera parte) y 3 y 4 para el segundo (o las etapas de la segunda parte), colocado tras el intercambiador de calor.

Si se supone que el aire se puede refrigerar hasta 300 K, entonces $T_3 = 300$ K. Se va a ajustar p_2 (igual a p_3 si se considera que en el intercambiador no existe ninguna pérdida carga) para que ni T_2 ni T_4 adquieran valores superiores a 1.000 K. Para estos cálculos se emplea $T_1 = 293,15$ K, $p_1 = 100$ Pa, $\eta_1 = \eta_2 = 0,70$ y $\gamma_1 = \gamma_2 = 1,40$:

$$T_2 = T_1 \left(\frac{1}{\eta_1} \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\gamma_1-1}{\gamma_1}} + \frac{\eta_1 - 1}{\eta_1} \right) \rightarrow$$

$$\rightarrow 1.000 = 293,15 \left(\frac{1}{0,70} \left(\frac{p_2}{100} \right)^{\frac{1,40-1}{1,40}} + \frac{0,70 - 1}{0,70} \right) \leftrightarrow p_2 = 3.183,62 \text{ Pa}$$

$$T_4 = T_3 \left(\frac{1}{\eta_2} \left(\frac{p_4}{p_3} \right)^{\frac{\gamma_2-1}{\gamma_2}} + \frac{\eta_2 - 1}{\eta_2} \right) \rightarrow$$

$$\rightarrow 1.000 = 300 \left(\frac{1}{0,70} \left(\frac{101.325}{p_3} \right)^{\frac{1,40-1}{1,40}} + \frac{0,70 - 1}{0,70} \right) \leftrightarrow p_3 = 3.419,37 \text{ Pa}$$

Se aprecia que ambas presiones son muy parejas. Dado que debe elegirse un único valor de acuerdo a la hipótesis de pérdida de presión nula en el intercambiador, se escogerá el promedio entre ambas, es decir, 3.301,50 o 3.300 Pa de manera aproximada.

V.2.1. Demostración de las fórmulas

En este caso, para hallar el trabajo específico se va a modificar la ecuación [8.16], de momento sin subíndices (excepto p_1 y p_2 para poder discernirlas y T_1 para indicar que es la de entrada). Para su modificación se va a recurrir a la relación [V.x]:

$$\left\{ \begin{array}{l} P = \frac{\dot{m} \bar{c}_p T}{\eta} \left(\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right) \quad [\text{Ec. 8.16}] \\ w = \frac{P}{\dot{m}} \quad [\text{Ec. V. 14}] \end{array} \right. \rightarrow w = \frac{\bar{c}_p T_1}{\eta} \left(\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right) \quad [\text{Ec. V. 15}]$$

Para hallar el \bar{w} de la parte 1 del compresor debe tenerse en cuenta que varía la presión de entrada al compresor (baja de 101.325 a 100 Pa) y la presión de salida (disminuye de 101.325 hasta 3.300 Pa). Por tanto, esto debe tenerse en cuenta a la hora de integrar de la siguiente manera:

$$\bar{w}_1 = \frac{1}{(p_{1,i} - p_{1,f})(p_{2,i} - p_{2,f})} \int_{p_{1,f}}^{p_{1,i}} \int_{p_{2,f}}^{p_{2,i}} \frac{\bar{c}_p T_1}{\eta_1} \left(\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\gamma_1-1}{\gamma_1}} - 1 \right) dp_2 dp_1$$

$$\bar{w}_1 = \frac{\bar{c}_p T_1}{\eta_1 (p_{1,i} - p_{1,f})(p_{2,i} - p_{2,f})} \left[\int_{p_{1,f}}^{p_{1,i}} \int_{p_{2,f}}^{p_{2,i}} \left(p_2^{\frac{\gamma_1-1}{\gamma_1}} dp_2 \right) p_1^{-\frac{\gamma_1-1}{\gamma_1}} dp_1 - \int_{p_{1,f}}^{p_{1,i}} \int_{p_{2,f}}^{p_{2,i}} dp_2 dp_1 \right]$$

$$\bar{w}_1 = \frac{\bar{c}_{p_1} T_1}{\eta_1 (p_{1,i} - p_{1,f})(p_{2,i} - p_{2,f})} \int_{p_{1,f}}^{p_{1,i}} \left(\frac{p_{2,i}^{\frac{2\gamma_1-1}{\gamma_1}} - p_{2,f}^{\frac{2\gamma_1-1}{\gamma_1}}}{\frac{2\gamma_1-1}{\gamma_1}} \right) p_1^{-\frac{\gamma_1-1}{\gamma_1}} dp_1 - \frac{\bar{c}_{p_1} T_1}{\eta_1}$$

$$\bar{w}_1 = \frac{\bar{c}_{p_1} T_1}{\eta_1 (p_{1,i} - p_{1,f})(p_{2,i} - p_{2,f})} \left(\frac{p_{2,i}^{\frac{2\gamma_1-1}{\gamma_1}} - p_{2,f}^{\frac{2\gamma_1-1}{\gamma_1}}}{\frac{2\gamma_1-1}{\gamma_1}} \right) \left(\frac{p_{1,i}^{\frac{1}{\gamma_1}} - p_{1,f}^{\frac{1}{\gamma_1}}}{\frac{1}{\gamma_1}} \right) - \frac{\bar{c}_{p_1} T_1}{\eta_1}$$

$$\bar{w}_1 = \frac{\bar{c}_{p_1} T_1 \gamma_1^2}{\eta_1 (p_{1,i} - p_{1,f})(p_{2,i} - p_{2,f})} \left(\frac{p_{2,i}^{\frac{2\gamma_1-1}{\gamma_1}} - p_{2,f}^{\frac{2\gamma_1-1}{\gamma_1}}}{2\gamma_1-1} \right) \left(p_{1,i}^{\frac{1}{\gamma_1}} - p_{1,f}^{\frac{1}{\gamma_1}} \right) - \frac{\bar{c}_{p_1} T_1}{\eta_1} \quad [\text{Ec. V. 16}]$$

Nota: En realidad, $\bar{c}_{p_1} = f(T_1, T_2) = f(p_1, p_2)$, pero en la integral se considerado constante con p_1 y p_2 porque más eficiente y efectivo realizar un promedio entre el amplio rango de temperaturas que se dará durante el vaciado.

Mientras que es más sencillo hallar el \bar{w} de la parte 2 del compresor, ya que en este caso p_4 es fija (es la presión atmosférica):

$$\bar{w}_2 = \frac{1}{(p_{3,i} - p_{3,f})} \int_{p_{1,f}}^{p_{1,i}} \frac{\bar{c}_{p_2} T_3}{\eta_2} \left(\left(\frac{p_4}{p_3} \right)^{\frac{\gamma_2-1}{\gamma_2}} - 1 \right) dp_1$$

$$\bar{w}_2 = \frac{\bar{c}_{p_2} T_3}{\eta_2 (p_{3,i} - p_{3,f})} \int_{p_{1,f}}^{p_{1,i}} \left(\left(\frac{p_4}{p_3} \right)^{\frac{\gamma_2-1}{\gamma_2}} - 1 \right) dp_1$$

$$\bar{w}_2 = \frac{\bar{c}_{p_2} T_3}{\eta_2 (p_{3,i} - p_{3,f})} \left(p_4^{\frac{\gamma_2-1}{\gamma_2}} \int_{p_{1,i}}^{p_{1,i}} \left(\frac{1}{p_4} \right)^{\frac{\gamma_2-1}{\gamma_2}} dp_1 - \int_{p_{1,i}}^{p_{1,i}} dp_1 \right)$$

$$\bar{w}_2 = \frac{\bar{c}_{p_2} T_3}{\eta_2} \left(\frac{\gamma_2-1}{\gamma_2} \frac{p_4^{\frac{1}{\gamma_2}}}{p_4} \frac{p_{3,i}^{\frac{1}{\gamma_2}} - p_{3,f}^{\frac{1}{\gamma_2}}}{p_{3,i} - p_{3,f}} - 1 \right) \quad [\text{Ec. V. 17}]$$

Nota: Respecto a \bar{c}_{p_2} se puede decir lo mismo que respecto a su homólogo de la parte 1 del compresor.

Sumando \bar{w}_1 con \bar{w}_2 se llega a \bar{w}_{real} :

$$\bar{w}_{real} = \bar{w}_1 + \bar{w}_2 \quad [\text{Ec. V. 18}]$$

Para el cálculo de \bar{W}_{real} y Δm se aplicarán las fórmulas [V.9] y [V.10], respectivamente. Las expresiones [V.11], [V.12] y [V.13] no sirven para la compresión adiabática porque la expresión [V.11] proviene de considerar la compresión isoterma y las otras dos derivan de ella.

V.2.2. Resultados numéricos

Para la obtención de resultados se va a usar en todos los casos $\eta_1 = \eta_2 = 0,70$ (compresores adiabáticos) y 1 bomba/km para poder comparar estos resultados con los de la compresión isoterma. Para la obtención de \bar{c}_{p1} y \bar{c}_{p2} se realizarán promedios entre los amplio rangos de temperaturas que se dará durante el vaciado en cada parte del compresor. Adicionalmente, se usan estos dos valores ya empleados en los cálculos previos: $T_3 = 300$ K, $p_4 = 101.325$ Pa, $R=287$ J/kg·K.

En el primer modelo los valores de partida son: $p_{1,f} = 250$ Pa (= p_t), $T = 20$ °C (= T_t), $D_t = 9,37$ m. A continuación se aplicarán las ecuaciones [V.16], [V.17] y [V.18], la [II.16] para el hallazgo de \bar{c}_{p1} y \bar{c}_{p2} y la [II.16] para γ_1 y γ_2 .

En la primera parte del compresor se producirá un salto máximo entre 250 Pa y p_2 . Anteriormente se dedujo que para $p_{1,f} = 100$ Pa, $p_{2,f}$ debería ser 3.300 Pa. Dado que ahora $p_{1,f}$ es 2,50 veces superior, se va a utilizar $p_{2,f} = 2,50 \cdot 3.300 = 8.250$ Pa con el fin de mantener la carga térmica en esta primera parte del compresor y aminorarla en la segunda. Por tanto, a continuación la T_2 inicial, que es la mínima y la final, que es la máxima, para la primera parte:

$$T_{2,i} = 293,15 \left(\frac{1}{0,70} \left(\frac{101.325}{101.325} \right)^{\frac{1,40-1}{1,40}} + \frac{0,70 - 1}{0,70} \right) = 293,15 \text{ K}$$

$$T_{2,f} = 293,15 \left(\frac{1}{0,70} \left(\frac{8.250}{250} \right)^{\frac{1,40-1}{1,40}} + \frac{0,70 - 1}{0,70} \right) = 1.011,61 \text{ K}$$

En función de estas temperaturas se halla \bar{c}_{p1} , γ_1 y \bar{w}_1 :

$$\bar{c}_{p1}: 6,71 + \frac{1,15 \cdot 10^{-6}}{3} 293,15^2 + (293,15 + 1.011,61) \left(\frac{4,70 \cdot 10^{-4}}{2} + \frac{1,15 \cdot 10^{-6}}{3} 1.011,61 + \left(\frac{-4,70 \cdot 10^{-10}}{4} \right) (293,15^2 + 1.011,61^2) \right) \cong 7,39 \frac{\text{kcal}}{\text{kmol} \cdot \text{K}} \cong 1,07 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

$$\gamma_1 = \frac{1,07}{1,07 - 0,29} = 1,37$$

$$\bar{w}_1 = \frac{1,07 \cdot 293,15 \cdot 1,37^2}{0,70(101.325 - 250)(101.325 - 8.250)} \left(\frac{101.325^{\frac{2 \cdot 1,37 - 1}{1,37}} - 8.250^{\frac{2 \cdot 1,37 - 1}{1,37}}}{2 \cdot 1,37 - 1} \right) \left(\frac{101.325^{\frac{1}{1,37}} - 250^{\frac{1}{1,37}}}{1,37} \right) - \frac{1,07 \cdot 293,15}{0,70} = 51,27 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

En cambio, para la segunda parte del compresor se tendrán las siguientes $T_{4,i}$, $T_{4,f}$, \bar{c}_{p2} y \bar{w}_2 :

$$T_{4,i} = 300 \left(\frac{1}{0,70} \left(\frac{101.325}{101.325} \right)^{\frac{1,40-1}{1,40}} + \frac{0,70-1}{0,70} \right) = 300 \text{ K}$$

$$T_{4,f} = 300 \left(\frac{1}{0,70} \left(\frac{101.325}{8.250} \right)^{\frac{1,40-1}{1,40}} + \frac{0,70-1}{0,70} \right) = 748,92 \text{ K}$$

$$\bar{c}_{p2}: 6,71 + \frac{1,15 \cdot 10^{-6}}{3} 293,15^2 + (293,15 + 748,92) \left(\frac{4,70 \cdot 10^{-4}}{2} + \frac{1,15 \cdot 10^{-6}}{3} 748,92 + \left(\frac{-4,70 \cdot 10^{-10}}{4} \right) (293,15^2 + 748,92^2) \right) \cong 7,21 \frac{\text{kcal}}{\text{kmol} \cdot \text{K}} \cong 1,05 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

$$\gamma_2 = \frac{1,05}{1,05 - 0,29} = 1,38$$

$$\bar{w}_2 = \frac{1,05 \cdot 300}{0,70} \left(1,38 \cdot 101.325^{\frac{1,38-1}{1,38}} \frac{101.325^{\frac{1}{1,38}} - 8.250^{\frac{1}{1,38}}}{101.325 - 8.250} - 1 \right) = 116,23 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

Sumando \bar{w}_1 y \bar{w}_2 :

$$\bar{w}_{real} = 51,27 + 116,23 = 167,50 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 4,65 \cdot 10^{-2} \frac{\text{kWh}}{\text{kg}}$$

Dado que el tubo y las condiciones no han variado, Δm seguirá valiendo 82.840,18 kg en cada km (82.840,18 kg/km), por lo que \bar{W}_{real} por cada km será:

$$\bar{W}_{real} = 4,65 \cdot 10^{-2} \cdot 82.840,18 = 3.837,62 \frac{\text{kWh}}{\text{km}}$$

Finalmente, considerando que el motor eléctrico que alimentará el compresor contará con una eficiencia de en torno al 90 %, los valores de \bar{w}_{red} y \bar{W}_{red} serán: $5,17 \cdot 10^{-2}$ kWh/kg y 4.264,02 kWh/km.

En cambio, en el segundo modelo los valores de partida son estos: $p_{1,f} = 100 \text{ Pa}$, $T = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ y $D_t = 2,94 \text{ m}$. Como ahora $p_{1,f} = 100 \text{ Pa}$, se toma $p_{2,f} = 3.300 \text{ Pa}$, en seguimiento de todos los cálculos y razonamientos previos. Todos los demás valores se toman igual que en el caso anterior y el procedimiento se ejecuta de la misma forma:

$$T_{2,i} = 293,15 \left(\frac{1}{0,70} \left(\frac{101.325}{101.325} \right)^{\frac{1,40-1}{1,40}} + \frac{0,70 - 1}{0,70} \right) = 293,15 \text{ K}$$

$$T_{2,f} = 293,15 \left(\frac{1}{0,70} \left(\frac{3.300}{100} \right)^{\frac{1,40-1}{1,40}} + \frac{0,70 - 1}{0,70} \right) = 1.011,61 \text{ K}$$

$$\bar{c}_{p1}: 6,71 + \frac{1,15 \cdot 10^{-6}}{3} 293,15^2 + (293,15 + 1.011,61) \left(\frac{4,70 \cdot 10^{-4}}{2} + \frac{1,15 \cdot 10^{-6}}{3} 1.011,61 + \left(\frac{-4,70 \cdot 10^{-10}}{4} \right) (293,15^2 + 1.011,61^2) \right) \cong 7,39 \frac{\text{kcal}}{\text{kmol} \cdot \text{K}} \cong 1,07 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

$$\gamma_1 = \frac{1,07}{1,07 - 0,29} = 1,37$$

$$\bar{w}_1 = \frac{1,07 \cdot 293,15 \cdot 1,37^2}{0,70(101.325 - 100)(101.325 - 3.300)} \frac{\left(101.325^{\frac{2 \cdot 1,37 - 1}{1,37}} - 3.300^{\frac{2 \cdot 1,37 - 1}{1,37}} \right) \left(101.325^{\frac{1}{1,37}} - 100^{\frac{1}{1,37}} \right)}{2 \cdot 1,37 - 1} - \frac{1,07 \cdot 293,15}{0,70} = 42,40 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

En cambio, para la segunda parte del compresor se tendrán las siguientes $T_{4,i}$, $T_{4,f}$, \bar{c}_{p2} y \bar{w}_2 :

$$T_{4,i} = 300 \left(\frac{1}{0,70} \left(\frac{101.325}{101.325} \right)^{\frac{1,40-1}{1,40}} + \frac{0,70 - 1}{0,70} \right) = 300 \text{ K}$$

$$T_{4,f} = 300 \left(\frac{1}{0,70} \left(\frac{101.325}{3.300} \right)^{\frac{1,40-1}{1,40}} + \frac{0,70 - 1}{0,70} \right) = 1.011,52 \text{ K}$$

$$\bar{c}_{p2}: 6,71 + \frac{1,15 \cdot 10^{-6}}{3} 293,15^2 + (293,15 + 1.011,52) \left(\frac{4,70 \cdot 10^{-4}}{2} + \frac{1,15 \cdot 10^{-6}}{3} 1.011,52 + \left(\frac{-4,70 \cdot 10^{-10}}{4} \right) (293,15^2 + 1.011,52^2) \right) \cong 7,39 \frac{\text{kcal}}{\text{kmol} \cdot \text{K}} \cong 1,07 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

$$\gamma_2 = \frac{1,07}{1,07 - 0,29} = 1,37$$

$$\bar{w}_2 = \frac{1,07 \cdot 300}{0,70} \left(1,38 \cdot 101.325^{\frac{1,38-1}{1,38}} \frac{101.325^{\frac{1}{1,38}} - 3.300^{\frac{1}{1,38}}}{101.325 - 3.300} - 1 \right)$$

$$= 140,86 \frac{kJ}{kg}$$

Sumando \bar{w}_1 y \bar{w}_2 :

$$\bar{w}_{real} = 42,40 + 140,86 = 183,26 \frac{kJ}{kg} = 5,10 \cdot 10^{-2} \frac{kWh}{kg}$$

$$\Delta m = 8.167,71 \text{ kg}$$

$$\bar{W}_{real} = 5,10 \cdot 10^{-2} \cdot 8.167,71 = 415,79 \frac{kWh}{km}$$

Para finalizar, los valores de \bar{w}_{red} y \bar{W}_{red} serán: $5,67 \cdot 10^{-2} \text{ kWh/kg}$ y $461,99 \text{ kWh/km}$.