



Escola Politècnica Superior
d'Enginyeria de Vilanova i la Geltrú

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

TRABAJO FINAL DE GRADO

TÍTULO: Interacción pantógrafo-catenaria, problemas de desgaste en la línea R2 de Rodalies (EGDC)

AUTOR: Edgar Gabriel del Carpio Chávez

TITULACIÓN: Grado en Ingeniería de Diseño Industrial y Desarrollo de Producto

PONENTE: José Ignacio Perat Benavides

DEPARTAMENTO: Departamento de Ingeniería Eléctrica (EE)

FECHA: Julio - 2014.

Este proyecto tiene en cuenta aspectos medioambientales: SÍ NO

TRABAJO FINAL DE GRADO

RESUMEN

El siguiente trabajo trata de analizar la situación actual y proponer soluciones a la problemática de desgaste excesivo que existe entre la catenaria y el pantógrafo de la línea R2 de *Rodalies* de Barcelona, hecho que provoca, un daño prematuro de las instalaciones y una pérdida de eficiencia del servicio, al ser más corto el periodo de tiempo entre las labores de mantenimiento.

Para ello se ha formado un grupo de trabajo multidisciplinario, donde participarán estudiantes de diferentes titulaciones, profesores y empresas.

Para realizar el proyecto, la metodología que se seguirá será la denominada SCRUM, esta metodología va destinada a proyectos que requieren rapidez y flexibilidad, que se realizan en pequeños grupos de trabajo, donde hay presentes diferentes perfiles multidisciplinarios y exige una colaboración constante cliente - equipo.

El trabajo está dividido en tres grandes bloques:

- El primer bloque alberga la información referente al problema. Análisis de los antecedentes de catenarias y pantógrafos. Además, de plantear cual es la tendencia que se prevé. En resumen, un estudio de la situación actual.
- El segundo bloque analiza el problema de desgaste de la línea R2 de *Rodalies* de Barcelona. Incluyendo ensayos sobre los materiales que conforman los diferentes elementos que interactúan entre ellos. Planteando diferentes causas que provocan el mismo problema.
- El último bloque plantea las diferentes soluciones encontradas teniendo en cuenta los aspectos técnicos (estudio del material, aerodinámica del pantógrafo, corrientes que circulan...), económicos, administrativos (normativa) y medioambientales.

En referencia al aspecto medioambiental, el objetivo es presentar una propuesta menos dañina para el medioambiente, menos contaminante.

El gran objetivo del proyecto es la obtención de una propuesta que solucione el problema de desgaste. Satisfaciendo la petición del cliente.

ABSTRACT

In the next project, we will focus in analyze the current situation and suggest solutions to the problematic of excessive wear between the overhead catenary line and the pantograph of the R2 line *Rodalies* Barcelona, this fact causes, a premature damage of the installations and a loss of efficiency of the service, to be shorter the period of time between maintenance.

For that has formed a multidisciplinary working group where students of the different degrees will work together with professors and companies.

To implement the project, the methodology will be the SCRUM, this methodology it is addressed for projects that require speed and flexibility, carried out in small working groups, where different multidisciplinary profiles are present and requires constant customer collaboration - team.

The project will be split in three parts:

- In the first part, will be found all information related with the problem. Analysis of the different overhead catenary lines and pantograph that we can found currently or that were used in the past. Furthermore, we will present which is the trend that we expected. In summary, a study of the current situation.
- In the second part, will be analyzed the problem of the wear of the R2 line *Rodalies* Barcelona. Including tests about materials that comprise the different elements which interact between them. Present different causes of the same problem.
- In the last part, will be present different solutions that we found taking into consideration technical aspects (study of materials, aerodynamic aspects of the pantograph, electrical aspects), economic and administrative aspects (legislation) and environmental aspects.

Referring of the last aspect, the objective is to present a proposal less harmful to the environment, less contaminating

The main objective of the project is the development of a proposal to solve the problem of attrition and satisfying customer's request.

Palabras clave: (castellano)

CATENARIA	RENFE	MANTENIMIENTO	INTERACCIÓN
PANTÓGRAFO	ADIF	TEMPERATURA	SCRUM
DESGASTE	MATERIAL		

Palabras clave: (ingles)

CATENARY	RENFE	MAINTENANCE	INTERACTION
PANTOGRAPH	ADIF	TEMPERATURE	SCRUM
WEAR	MATERIAL		



Problems cannot be solved by the level of awareness that created them.

Albert Einstein [1]

*Nada más peligroso que resolver problemas transitorios
con soluciones permanentes.*

Nicolás Gómez Dávila



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA
BARCELONATECH

Escola Politècnica Superior d'Enginyeria
de Vilanova i la Geltrú



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA
BARCELONATECH

Escola Politècnica Superior d'Enginyeria
de Vilanova i la Geltrú



TABLA DE CONTENIDO

1. PRÓLOGO	29
1.1. Origen del proyecto	29
1.2. Motivación	29
1.3. Requerimientos previos	29
1.4. Participación.....	29
2. INTRODUCCIÓN	33
2.0.1. <i>Objetivos</i>	33
2.1. Situación geográfica	34
2.2. Historia de la R2 de Rodalies	35
2.3. Características técnicas	37
2.4. Circulación	40
2.5. Viajeros	40
2.6. Competencias del servicio	41
2.7. Empresas implicadas	43
2.7.1. <i>Gestora de la infraestructura</i>	43
2.7.2. <i>Operadora de la red</i>	43
2.7.3. <i>Suministrador</i>	44
2.8. Interacción pantógrafo catenaria	45
2.9. Descripción del problema	47
2.10. Dificultades del proyecto.....	48
3. ANTECEDENTES	50
3.1. Contexto inicial del proyecto	51
3.2. Operadora de la red	52
3.3. Gestora de la infraestructura	54
3.4. Empresas suministradoras	56
3.5. Experimentación con kasperowski.....	57
3.6. Análisis en tiempo real de la interacción.....	58
4. SITUACIÓN ACTUAL	60
4.1. Climatología	61
4.2. Descripción de la catenaria	62
4.2.1. <i>Definiciones</i>	62
4.3. Características de la catenaria tipo CA-160.....	65



4.3.1. Características funcionales	65
4.3.2. Características de diseño	66
4.3.3. Componentes del sistema	73
4.3.4. Alimentación y retorno	76
4.3.5. Protecciones	77
4.3.6. Catenaria rígida	78
4.4. Descripción del pantógrafo	84
4.4.1. Definiciones	85
4.5. Características del pantógrafo	87
4.5.1. SCHUNK WBL 8512-L	87
4.5.2. FAIVELEY AM32AV U	88
4.5.3. Comparación entre modelos de pantógrafo	89
4.5.3.1. Conclusiones	97
4.6. Mantenimiento de la catenaria	98
4.6.1. Objeto	98
4.6.2. Recursos materiales	98
4.6.3. Secuencia de operación a realizar	99
4.6.4. Riesgos laborales de las operaciones y medidas preventivas genéricas asociadas	100
4.6.5. Criterios de aceptación y rechazo	100
4.6.6. Acciones a tomar ante desviaciones	100
4.6.7. Tratamiento de la información	101
4.7. Mantenimiento del pantógrafo	102
4.7.1. Cajas de bornes de interconexión	105
4.7.2. Pantógrafo	105
4.7.3. Mesilla	106
4.7.4. Trencillas de corriente	110
4.7.5. Mecanismos de elevación	110
4.7.6. Medición MK11	115
4.8. Material rodante	117
4.8.1. Serie 447	117
4.8.1.1. Caja	118
4.8.1.2. Sistemas de tracción y auxiliar	118
4.8.1.3. Bogíes y freno	118
4.8.2. Serie 450-451	119



4.8.2.1. Caja.....	119
4.8.2.2. Sistemas de tracción y auxiliar.....	119
4.8.2.3. Bogíes y frenos.....	120
4.8.3. CIVIA (Serie 463-464-465).....	120
4.8.3.1. Caja.....	121
4.8.3.2. Sistemas de tracción y auxiliar.....	121
4.8.3.3. Bogíes, suspensión y frenos.....	121
4.8.4. Serie R-448.....	121
4.8.4.1. Caja.....	122
4.8.4.2. Sistemas de tracción y auxiliar.....	122
4.8.4.3. Bogíes, frenos y suspensión.....	122
4.8.5. Serie R-449.....	123
4.8.5.1. Caja.....	123
4.8.5.2. Sistemas de tracción y auxiliar.....	124
4.8.5.3. Bogíes y frenos.....	124
4.8.6. Serie R-470.....	124
4.8.6.1. Caja.....	125
4.8.6.2. Sistemas de tracción y auxiliar.....	125
4.8.6.3. Bogíes y frenos.....	125
4.8.7. Serie S-252.....	125
4.8.7.1. Caja.....	126
4.8.7.2. Sistemas de tracción, bogíes y frenos.....	126
4.8.8. ALVIA Serie S-130.....	126
4.8.8.1. Caja.....	127
4.8.8.2. Sistemas de tracción y auxiliar.....	127
4.8.8.3. Bogíes, frenos y suspensión.....	127
4.8.9. Comparación de las características de los trenes.....	128
4.8.10. Comparación de las dimensiones y peso.....	131
5. ANÁLISIS.....	133
5.1. Análisis de desgaste del hilo de contacto.....	134
5.2. Análisis de desgaste de las pletinas.....	135
5.2.1. Gráficas de la vida útil.....	136
5.2.2. Gráficas de desgaste.....	138
5.2.3. Evolución histórica del desgaste según pletina.....	140
5.2.4. Conclusiones.....	142



5.3. Observación de una pletina	143
5.3.1. Evolución del desgaste	143
5.3.1.1. Estudio del desgaste – Plano XZ	145
5.3.1.2. Estudio del desgaste – Plano XY	147
5.3.2. Conclusiones	149
5.4. Estudio de correlación (económico).....	151
5.4.1. Empresa de Infraestructura.....	151
5.4.2. Empresa Operadora	153
5.4.3. Conclusiones	155
5.5. Estudio de los materiales.....	156
5.5.1. Hilo de contacto	158
5.5.2. Frotador o pletina.....	159
5.6. Ensayos de los materiales.....	161
5.6.1. Ensayos de dureza	162
5.6.1.1. Maquinaria.....	163
5.6.1.2. Preparación de las muestras	163
5.6.1.3. Resultados	164
5.6.1.4. Conclusión.....	167
5.6.2. Ensayo metalografía	169
5.6.2.1. Preparación de las muestras	169
5.6.2.2. Preparación de las probetas	170
5.6.2.3. Primera observación de las probetas.....	173
5.6.2.4. Segunda observación de las probetas.....	174
5.6.2.5. Resultados	175
5.6.2.6. Conclusiones.....	176
5.6.3. Ensayos de tracción.....	179
5.6.3.1. Maquinaria.....	179
5.6.3.2. Probetas.....	180
5.6.3.2.1. Hilo de contacto Cu-ETP, nuevo	180
5.6.3.2.2. Hilo de contacto CuAg0,1, nuevo	183
5.6.3.2.3. Hilo de contacto Cu-ETP, usado	185
5.6.3.2.4. Hilo de contacto CuAg0,1, usado	190
5.6.3.3. Conclusiones.....	191
5.6.3.3.1. Fuerza de tensado admisible	193
5.6.3.3.2. Cálculo de sección crítica del H.C.....	194



5.7. Proceso de fabricación del hilo de contacto.....	196
5.7.1. Materiales de fabricación y características.....	196
5.7.2. Características geométricas y diseño.....	199
5.7.3. Proceso de colada continua.....	200
5.8. Proceso de fabricación de los frotadores.....	202
5.8.1. Colada continua.....	202
5.8.2. Extrusión.....	204
5.8.3. Mecanizado.....	207
5.8.4. Pletinas de carbón mixto con cobre.....	207
5.9. Inspección visual.....	208
5.9.1. Inspección visual de tramo.....	209
5.9.2. Inspección visual de pantógrafo.....	211
5.10. Estudio de correlación (desgaste).....	212
5.10.1. Alturas de catenaria.....	212
5.10.2. Seguimiento de trayectos de un tren.....	213
5.10.3. Conclusiones.....	215
6. ESTUDIO ECONÓMICO.....	217
6.1. Evolución costes de pletinas.....	218
6.1.1. Descripción de la situación actual.....	218
6.1.2. Análisis económico.....	219
6.1.2.1. Situación sin actuaciones previas.....	221
6.1.2.2. Situación con actuaciones previas.....	223
6.1.2.3. Costes fijos.....	226
6.2. Coste cambio hilo de contacto.....	227
6.3. Coste de avería técnica en catenaria.....	229
6.3.1. Zona: Barcelona Sants – Paseo Gracia.....	229
6.3.2. Zona: Sitges – Vilanova i la Geltrú.....	230
7. HIPÓTESIS.....	231
7.1. Realizada por Edgar Gabriel Del Carpio.....	232
7.1.1. Conclusiones de la hipótesis de Gabriel.....	234
7.2. Realizada por Andrés Fuertes.....	236
7.2.1. Conclusiones de la hipótesis de Andrés.....	240
7.3. Realizada por Lehel Kiraly.....	242
7.3.1. Conclusiones de la hipótesis de Lehel.....	244
7.4. Realizada por Miguel Beltran.....	246



7.5. Realizada por Jordi Chacón	252
8. RECOMENDACIONES DE ACTUACIÓN	254
8.1. Propuesta 1 – Plan preventivo sobre hilo de contacto	255
8.1.1. Características de la propuesta a tener en cuenta	255
8.1.2. Características de la catenaria a tener en cuenta	257
8.1.3. Referente	259
8.1.3.1. Sistema rueda - carril	259
8.1.3.2. Procesos de esmerilado y re-perfilado	260
8.1.4. Descripción de la propuesta 1	262
8.1.4.1. Maquinaria necesaria	263
8.1.4.2. Zona de implementación	264
8.1.4.3. Descripción de los componentes que forman el sistema	265
8.1.4.4. Conclusiones	267
8.1.4.5. Limitaciones a estudiar	268
8.2. Propuesta 2 – Mejorar diseño frotador	269
8.2.1. Características de la propuesta a tener en cuenta	269
8.2.2. Características del frotador	271
8.2.3. Referente	271
8.2.4. Descripción de la propuesta 2	272
8.3. Mejora de la maquinaria de ensayo de interacción	275
8.3.1. Sistema de simulación actual	275
8.3.2. Mejoras y adaptaciones del sistema	277
8.4. Acciones para el futuro	280
9. CONCLUSIONES	281
10. PRESUPUESTOS	284
11. AGRADECIMIENTOS	289
12. BIBLIOGRAFIA	291
12.1. Libros	291
12.2. Catálogo	291
12.3. Manual	291
12.4. Revista	292
12.5. Páginas webs	292
12.6. Prensa	293



<u>ANEXO A: RESUMEN DE REUNIONES</u>	294
A.1. Reunión en talleres de mantenimiento RENFE <i>Vilanova i la Geltrú</i>	295
A.2. Reunión con ADIF	298
A.3. Reunión con SCHUNK.....	300
A.4. Reunión maquinista	301
A.5. Reunión con Josep Perlasia.....	302
A.6. Reunión con Santiago Soriano.....	303
A.7. Visita a SCHUNK, en Madrid	304
<u>ANEXO B: SCRUM</u>	309
B.1. Acciones, tareas o similares.....	310
B.2. Memoria.....	313
<u>ANEXO C: CATENARIA – DEFINICIONES Y PARTES</u>	314
C.1. Fotografías.....	315
C.2. Definiciones	317
C.3. Normativa	323
<u>ANEXO D: REPORTAJE FOTOGRÁFICO DE LOS PANTÓGRAFOS</u>	324
D.1. FAIVELEY	325
D.2. SCHUNK	327
D.3. Planos.....	329
<u>ANEXO E: PLETINAS / FROTADORES – CONJUNTOS DE PLANOS</u>	332
E.1. Otros.....	333
E.2. COBRE, CROMO, CIRCONIO	334
E.3. KASPEROWSKI (SK789).....	335
E.4. FASE 1 / FASE 2 / FASE 3	336
<u>ANEXO F: ESTUDIO DE CORRELACIÓN (DESGASTE)</u>	337
F.1. SEGUIMIENTO 1	338
F.2. SEGUIMIENTO 2	342
<u>ANEXO G: OBSERVACIÓN PROBETAS</u>	352
G.1. Probeta A PART_1-A.....	354
G.2. Probeta A PART_2-B.....	355
<u>ANEXO H: MK11</u>	364
<u>ANEXO I: ARTÍCULOS</u>	365



ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 0.1: TABLA DE PARTICIPACIÓN DE EDGAR GABRIEL DEL CARPIO CHÁVEZ.....	32
TABLA 1: CARACTERÍSTICAS SEGÚN TRAMO, TABLA 1.....	37
TABLA 2: CARACTERÍSTICAS SEGÚN TRAMO, TABLA 2.....	38
TABLA 3: CARACTERÍSTICAS SEGÚN TRAMO, TABLA 3.....	38
TABLA 4: ESPECIFICACIONES TÉCNICAS SEGÚN ADIF.....	39
TABLA 5: FRECUENCIA DE PASO EN RELACIÓN AL TRAMO.....	40
TABLA 6: EVOLUCIÓN HISTÓRICA DE VIAJEROS EN LA LÍNEA R2 (EN MILLONES).....	40
TABLA 7: COMPARACIONES DE LAS COMPETENCIAS DESDE VNG HASTA BARCELONA SANTS.....	42
TABLA 8: COMPARACIONES DE LAS COMPETENCIAS DESDE SANT VICENÇ HASTA VNG.....	42
TABLA 9: TASA DE DESGASTE SEGÚN EL MATERIAL, RENFE.....	47
TABLA 10: CRONOLOGÍA DE LOS ANTECEDENTES DE LAS PARTES IMPLICADAS EN EL PROBLEMA DE DESGASTE DESCONTROLADO EN LA LÍNEA DE CERCANÍAS R2 SUD DE BARCELONA.....	59
TABLA 11: RANGO DE TENSIÓN DE LA CATENARIA CA-160.....	65
TABLA 12: TEMPERATURA AMBIENTAL.....	65
TABLA 13: TEMPERATURA MÁXIMA DE LOS CONDUCTORES.....	66
TABLA 14: CONDICIONES DE HELADA.....	66
TABLA 15: ALTURAS DEL HILO DE CONTACTO.....	66
TABLA 16: PENDIENTES.....	67
TABLA 17: ALTURA NOMINAL DE LA CATENARIA.....	67
TABLA 18: DESCENTRAMIENTO.....	67
TABLA 19: ALTURA DE CATENARIA.....	67
TABLA 20: VALOR DEL VANO SEGÚN EL RADIO DE LA CURVA.....	68
TABLA 21: DIFERENCIA LONGITUD ENTRE VANOS CONSECUTIVOS.....	68
TABLA 22: LONGITUD DEL CANTÓN.....	68
TABLA 23: ESPECIFICACIÓN DEL CANTÓN.....	69
TABLA 24: VALOR DE FLECHA.....	69
TABLA 25: GÁLIBO DE POSTES.....	69
TABLA 26: OTROS DATOS SOBRE POSTES.....	69
TABLA 27: OBSERVACIONES DE GÁLIBO.....	70
TABLA 28: CONTRAFLECHAS EN LOS POSTES.....	70
TABLA 29: Nº DE VANOS DE LOS SECCIONAMIENTOS.....	70



TABLA 30: CRITERIO SOBRE LAS AGUJAS.	70
TABLA 31: EQUIPO DE COMPENSACIÓN.	71
TABLA 32: TIPOLOGÍA DE COMPENSACIÓN.	71
TABLA 33: TENSIÓN MECÁNICA PARA EL SUSTENTADOR.	71
TABLA 34: TENSIÓN MECÁNICA PARA EL H.C.....	71
TABLA 35: DISTANCIA DE AISLADORES.....	72
TABLA 36: MATERIAL EN VÍAS GENERALES.	73
TABLA 37: MATERIALES EN VÍAS SECUNDARIAS.	73
TABLA 38: ALTURAS DE POSTES.	73
TABLA 39: CONDICIONES DE UTILIZACIÓN.....	74
TABLA 40: CONDICIONES PARA POSTES DE ANCLAJE.	74
TABLA 41: CONDICIONES PARA MÉNSULAS.....	75
TABLA 42: CONDICIONES PARA MÉNSULAS EN PÓRTICOS RÍGIDOS.....	75
TABLA 43: CONDICIONES PARA MÉNSULAS ESPECIALES.	75
TABLA 44: VALORES ELECTROMECAÑICOS.	79
TABLA 45: CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS, PANTÓGRAFO SCHUNK.	87
TABLA 46: CARACTERÍSTICAS DEL FUELLE, PANTÓGRAFO SCHUNK.	88
TABLA 47: CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS, PANTÓGRAFO FAIVELEY.....	88
TABLA 48: TIEMPO DE ACCIONAMIENTO, PANTÓGRAFO FAIVELEY.....	89
TABLA 49: COMPARACIÓN, DIMENSIONES.....	90
TABLA 50: COMPARACIÓN, PESOS.....	92
TABLA 51: COMPARACIÓN, DIMENSIONES DE LA MESILLA.....	96
TABLA 52: CICLOS DE MANTENIMIENTO.....	102
TABLA 53: PLAN DE MANTENIMIENTO, PARTE 1.	103
TABLA 54: PLAN DE MANTENIMIENTO, PARTE 2.	104
TABLA 55: PAR DE APRIETE PARA LAS UNIONES ATORNILLADAS.	105
TABLA 56: SUSTITUCIÓN DE PLETINAS, TEÓRICO.....	106
TABLA 57: COMPARACIÓN DE CARACTERÍSTICAS DE LOS DIFERENTES TRENES.....	129
TABLA 58: COMPARACIÓN DE DIMENSIONES Y PESOS DE LOS DIFERENTES TRENES	132
TABLA 59: CARACTERÍSTICAS BÁSICAS, PLETINAS.....	135
TABLA 60: OBSERVACIONES PLETINA PLANO XZ.....	146
TABLA 61: OBSERVACIONES PLETINA PLANO XY.....	148
TABLA 62: MOVIMIENTO DEL FROTADOR SOBRE LA CATENARIA.....	150



TABLA 63: CONTEO CIVIA 463.	153
TABLA 64: CONTEO CIVIA 465.	154
TABLA 65: COSTE CAMBIO PLETINAS POR PAN.....	154
TABLA 66: COSTES ANUALES.	154
TABLA 67: COBRE, VENTAJAS Y DESVENTAJAS.....	156
TABLA 68: COMPOSICIÓN.	158
TABLA 69: PROPIEDADES FÍSICAS.....	158
TABLA 70: CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DE LOS HILOS.....	159
TABLA 71: DUREZAS SEGÚN EL GESTOR DE LA RED.....	159
TABLA 72: CARACTERÍSTICAS DEL GRAFITO DE CALIDAD SK85CU.....	159
TABLA 73: PROPIEDADES PLETINA SEGÚN MATERIAL.....	160
TABLA 74: MATERIALES A ENSAYAR EN FUNCIÓN DE LA RELACIÓN F/D^2	164
TABLA 75: VALORES DE CARGAS Y DIÁMETROS DE ESFERAS EN EL ENSAYO DE DUREZA BRINELL.....	164
TABLA 76: RESULTADO DUREZAS DEL HILO DE CONTACTO NUEVO DE ALEACIÓN DE COBRE.....	165
TABLA 77: RESULTADO DUREZAS DEL HILO DE CONTACTO USADO DE ALEACIÓN DE COBRE.....	165
TABLA 78: RESULTADO DUREZAS DEL HILO DE CONTACTO NUEVO DE ALEACIÓN DE COBRE.....	165
TABLA 79: RESULTADO DUREZAS DEL HILO DE CONTACTO USADO DE ALEACIÓN DE COBRE.....	165
TABLA 80: RESULTADO DUREZAS DEL FROTADOR USADO DE ALEACIÓN DE COBRE.....	166
TABLA 81: VALORES SEGÚN LA CLASE DE RUGOSIDAD.....	168
TABLA 82: PRIMER PULIDO DE LAS PROBETAS.....	172
TABLA 83: SEGUNDO PULIDO DE LAS PROBETAS.....	172
TABLA 84: TERCERO PULIDO DE LAS PROBETAS.....	172
TABLA 85: CUARTO PULIDO DE LAS PROBETAS.....	172
TABLA 86: QUINTO PULIDO DE LAS PROBETAS.....	172
TABLA 87: PULIDO FINAL PARA QUITAR LAS RALLADURAS DE LAS PROBETAS.....	173
TABLA 88: PROCESO DE ATAQUE DESTINADO AL COBRE.....	173
TABLA 89: RESULTADO DEL ENSAYO H.C. CU-ETP NUEVO.....	182
TABLA 90: RESULTADO DEL ENSAYO H.C. CUAG0,1 NUEVO.....	183
TABLA 91: RESULTADO DEL ENSAYO CU-ETP USADO (1).....	185
TABLA 92: RESULTADO DEL ENSAYO CU-ETP USADO (2).....	187
TABLA 93: RESULTADO DEL ENSAYO CU-ETP USADO (3).....	188
TABLA 94: RESULTADO DEL ENSAYO CUAG0,1 USADO.....	190
TABLA 95: TENSE PARA EL HILO DE CONTACTO DE COMPUESTOS CU ETP Y CUAG0,1.....	193



TABLA 96: COMPOSICIÓN DE LAS ALEACIONES DEL COBRE.	197
TABLA 97: DIMENSIONES Y TOLERANCIAS DE HILO DE CONTACTO DE SECCIÓN CIRCULAR.	199
TABLA 98: INSPECCIÓN VISUAL DE TRAMO, PARTE 1.	209
TABLA 99: INSPECCIÓN VISUAL DE TRAMO, PARTE 2.	210
TABLA 100: SEGUIMIENTO 1 DESGASTE, PANTÓGRAFO 1.....	215
TABLA 101: SEGUIMIENTO 1 DESGASTE, PANTÓGRAFO 2.....	215
TABLA 102: SEGUIMIENTO 2 DESGASTE, PANTÓGRAFO 1.....	215
TABLA 103: SEGUIMIENTO 2 DESGASTE, PANTÓGRAFO 2.....	215
TABLA 104: COMBINACIÓN DE KILÓMETROS, SENTIDO NORTE.....	216
TABLA 105: COMBINACIÓN DE KILÓMETROS, SENTIDO SUD.	216
TABLA 106: COSTES Y CANTIDADES POR PLETINAS.	218
TABLA 107: CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS SEGÚN MATERIAL.....	219
TABLA 108: CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DE LA PLETINA DE GRAFITO.	220
TABLA 109: PRECIO DEL FROTADOR SEGÚN DISTANCIA, MÍNIMA DESEADA.	220
TABLA 110: EVOLUCIÓN DEL GASTO SEGÚN MATERIAL, IRREAL 1.....	221
TABLA 111: PRECIO DEL FROTADOR SEGÚN DISTANCIA, IRREAL 1.....	222
TABLA 112: EVOLUCIÓN DEL GASTO SEGÚN MATERIAL, IRREAL 2.....	223
TABLA 113: PRECIO DEL FROTADOR SEGÚN DISTANCIA, IRREAL 2.....	224
TABLA 114: COSTES ENSAYO SEPTIEMBRE.....	226
TABLA 115: COSTE DEL CAMBIO DEL HILO DE CONTACTO SEGÚN MATERIAL Y MANO DE OBRA.	228
TABLA 116: DUREZAS DEL HILO DE CONTACTO.	232
TABLA 117: DUREZAS DEL FROTADOR.	233
TABLA 118: CONFIGURACIONES BÁSICAS DE DISTINTAS LÍNEAS FÉRREAS.....	240
TABLA 119: CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DE LA PLETINA DE GRAFITO.	254
TABLA 120: SCRUM, PARTE 1.	310
TABLA 121: SCRUM, PARTE 2.	311
TABLA 122: SCRUM, PARTE 3.	312
TABLA 123: SCRUM, PARTE 4.	313
TABLA 124: DESGLOSE TRAYECTOS SEGUIMIENTO 1, PANTOGRAFO 1, PARTE 1.....	338
TABLA 125: DESGLOSE TRAYECTOS SEGUIMIENTO 1, PANTOGRAFO 1, PARTE 2.....	339
TABLA 126: DESGLOSE TRAYECTOS SEGUIMIENTO 1, PANTOGRAFO 1, TOTALES.....	340
TABLA 127: DESGLOSE TRAYECTOS SEGUIMIENTO 1, PANTOGRAFO 2, PARTE 1.....	340
TABLA 128: DESGLOSE TRAYECTOS SEGUIMIENTO 1, PANTOGRAFO 2, PARTE 2.....	341



TABLA 129: DESGLOSE TRAYECTOS SEGUIMIENTO 1, PANTOGRAFO 2, TOTALES.....	341
TABLA 130: DESGLOSE TRAYECTOS SEGUIMIENTO 2, PANTOGRAFO 1, PARTE 1.....	342
TABLA 131: DESGLOSE TRAYECTOS SEGUIMIENTO 2, PANTOGRAFO 1, PARTE 2.....	343
TABLA 132: DESGLOSE TRAYECTOS SEGUIMIENTO 2, PANTOGRAFO 1, PARTE 3.....	344
TABLA 133: DESGLOSE TRAYECTOS SEGUIMIENTO 2, PANTOGRAFO 1, PARTE 4.....	345
TABLA 134: DESGLOSE TRAYECTOS SEGUIMIENTO 2, PANTOGRAFO 1, PARTE 5.....	346
TABLA 135: DESGLOSE TRAYECTOS SEGUIMIENTO 2, PANTOGRAFO 1, TOTALES.....	346
TABLA 136: DESGLOSE TRAYECTOS SEGUIMIENTO 2, PANTOGRAFO 2, PARTE 1.....	347
TABLA 137: DESGLOSE TRAYECTOS SEGUIMIENTO 2, PANTOGRAFO 2, PARTE 2.....	348
TABLA 138: DESGLOSE TRAYECTOS SEGUIMIENTO 2, PANTOGRAFO 2, PARTE 3.....	349
TABLA 139: DESGLOSE TRAYECTOS SEGUIMIENTO 2, PANTOGRAFO 2, PARTE 4.....	350
TABLA 140: DESGLOSE TRAYECTOS SEGUIMIENTO 2, PANTOGRAFO 2, PARTE 5.....	351
TABLA 141: DESGLOSE TRAYECTOS SEGUIMIENTO 2, PANTOGRAFO 2, TOTALES.....	351

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1: VISTA DEL TRAMO Y UBICACIÓN DE LA LÍNEA.	34
FIGURA 2: PLANO ESQUEMÁTICO DE LA LÍNEA R2 DE RODALIES.	34
FIGURA 3: ESTACIÓN DE VNG, FUE DE LOS MEJORES EDIFICIOS FERROVIARIOS DE LA ÉPOCA.	35
FIGURA 4: ESTACIÓN DE VNG DEL AÑO 1950.	36
FIGURA 5: DESCENTRAMIENTO DEL HILO DE CONTACTO.....	46
FIGURA 6: ALERÓN 3-08990013, PRUEBA AERODINÁMICA.....	53
FIGURA 7: ALERÓN 3-W.08.9105, EN SERVICIO.	53
FIGURA 8: PLETINA KASPEROWSKI DESGASTADA, ALZADO.....	57
FIGURA 9: PLETINA KASPEROWSKI DESGASTADA, PERFIL.	57
FIGURA 10: PARTES DE LA CATENARIA.....	63
FIGURA 11: CATENARIA RÍGIDA.	78
FIGURA 12: ÁMBITO DE INSTALACIÓN DE CATENARIA RÍGIDA.....	83
FIGURA 13: ESQUEMA DE FUNCIONAMIENTO.....	84
FIGURA 14: PARTES DE UN PANTÓGRAFO, CORRESPONDE AL MODELO WBL-8512-L.....	85
FIGURA 15: COMPARACIÓN, PLANO, PLANTA.	92
FIGURA 16: PANTÓGRAFO SCHUNK, MODIFICADO.	95
FIGURA 17: AJUSTE DEL CAMPO DE LA MESILLA.	109
FIGURA 18: AJUSTE DEL PARALELISMO DE LOS FROTADORES.....	109
FIGURA 19: AJUSTE BARRA DE TRACCIÓN, ACOPLAMIENTO Y POSICIÓN DE REPOSO.....	111
FIGURA 20: AJUSTE DEL MECANISMO DE ELEVACIÓN.....	111
FIGURA 21: AJUSTE DE LA FUERZA DE PRESIÓN.....	113
FIGURA 22: AJUSTE DEL TIEMPO DE ELEVACIÓN Y DESCENSO.	114
FIGURA 23: MECANISMO DE ELEVACIÓN.....	115
FIGURA 24: CURVA DE PRESIÓN.....	116
FIGURA 25: TREN DE LA SERIE 446 / 447.....	118
FIGURA 26: TREN DE LA SERIE 450 / 451.....	119
FIGURA 27: TREN DEL TIPO CIVIA DE RODALIES.....	120
FIGURA 28: TREN DE LA SERIE R-448.....	122
FIGURA 29: TREN DE LA SERIE R-449.....	123
FIGURA 30: TREN DE LA SERIE R-470.....	124
FIGURA 31: TREN DE LA SERIE S-252.....	125

FIGURA 32: TREN ALVIA DE LA SERIE S-130.	126
FIGURA 33: ESQUEMA DEL MOTOR ASÍNCRONO TRIFÁSICO DE DOBLE COLECTOR.	130
FIGURA 34: GRÁFICA DEL FUNCIONAMIENTO DE UN MOTOR TRIFÁSICO DE DOBLE COLECTOR.	130
FIGURA 35: FROTADOR DESGASTADO EN 3D.	143
FIGURA 36: FROTADOR DESGASTADO - VISTA DE PERFIL.	143
FIGURA 37: FROTADOR DESGASTADO - VISTA DE ALZADO.	144
FIGURA 38: CONJUNTOS SUB-FIGURAS PLETINA, PLANO XZ.	145
FIGURA 39: CONJUNTOS SUB-FIGURAS PLETINA, PLANO XY.	147
FIGURA 40: MUESTRAS DE HILO DE CONTACTO.	162
FIGURA 41: PLETINA DE CU-CR-ZR.	162
FIGURA 42: PLETINA DE GRAFITO (CARBONO).	162
FIGURA 43: DURÓMETRO, HUELLA EN MUESTRA DE COBRE.	163
FIGURA 44: TABLA DE CONVERSIÓN DEL DURÓMETRO.	163
FIGURA 45: CU-ETP PROCEDENTE DE PLETINA.	167
FIGURA 46: TRONZADORA STRUERS.	169
FIGURA 47: PRENSA, MARCA STRUERS.	170
FIGURA 48: CUELLO DE LA PRENSA DONDE SE MEZCLA LA RESINA CON LAS MUESTRAS.	170
FIGURA 49: PULIDORA AUTOMÁTICA DE TRES PROBETAS.	171
FIGURA 50: PULIDORA MANUAL.	171
FIGURA 51: INSTANTÁNEA DURANTE EL PROCESO.	171
FIGURA 52: PROBETAS DEL HILO DE CONTACTO.	171
FIGURA 53: CONJUNTO DE PROBETAS PARA OBSERVACIÓN, PULIDAS.	172
FIGURA 54: MICROSCOPIO ÓPTICO LEICA MEF4AM.	173
FIGURA 55: MICROSCOPIO ELECTRÓNICO JOEL JSM-5600.	174
FIGURA 56: COLOCACIÓN DE PROBETA.	175
FIGURA 57: PROCESO DE OBSERVACIÓN.	175
FIGURA 58: PROBETA, PART_1.	176
FIGURA 59: PROBETA, PART_2.	176
FIGURA 60: RUGOSIDAD PRESENTE EN LA ZONA DE CONTACTO DE LA PROBETA C1.	177
FIGURA 61: RUGOSIDAD PRESENTE EN LA ZONA DE CONTACTO DE LA PROBETA C2.	177
FIGURA 62: RUGOSIDAD EN UNA ZONA DE CONTACTO, PROBETA C2.	178
FIGURA 63: RUGOSIDAD EN UNA ZONA DE NO CONTACTO, PROBETA C3.	178
FIGURA 64: PARTES DE LA MÁQUINA.	180



FIGURA 65: CORTE DE LOS MANGUITOS.....	181
FIGURA 66: AVELLANADO DE LOS MANGUITOS.	181
FIGURA 67: RANURA EN LOS MANGUITOS.	181
FIGURA 68: PROBETA FALLIDA.	181
FIGURA 69: PROBETA A TRACCIÓN, 1.	182
FIGURA 70: LÁPIZ NEUMÁTICO.	183
FIGURA 71: MUESTRAS H.C. DESGASTADOS.	185
FIGURA 72: ENSAYO DE TRACCIÓN CUAGO,1.....	190
FIGURA 73: RESULTADOS DE LOS ENSAYOS A TRACCIÓN.....	192
FIGURA 74: REPRESENTACIÓN GRAFICA DEL RECOCIDO DEL HILO DE CONTACTO.....	197
FIGURA 75: PLANO DEL HILO DE CONTACTO DE SECCIÓN CIRCULAR.....	199
FIGURA 76: PLANO DEL HILO DE CONTACTO RANURADO CON LAS DIMENSIONES.....	199
FIGURA 77: PLANO DE LOS HILOS DE CONTACTO CON ESTRÍAS LONGITUDINALES.....	199
FIGURA 78: PROCESO DE FABRICACIÓN DE COLADA CONTINUA.....	200
FIGURA 79: BOBINA DE HILO DE CONTACTO.....	201
FIGURA 80: PROCESO DE FABRICACIÓN POR COLADA CONTINUA.....	203
FIGURA 81: PROCESO DE FABRICACIÓN POR EXTRUSIÓN DIRECTA.....	204
FIGURA 82: DIFERENCIAS DE FLUJO ENTRE EXTRUSIÓN DIRECTA E INDIRECTA.....	205
FIGURA 83: DIFERENCIA DE PRESIÓN ENTRE EXTRUSIÓN DIRECTA E INDIRECTA.....	205
FIGURA 84: PASO INFERIOR.....	212
FIGURA 85: TÚNEL.....	212
FIGURA 86: CATENARIA RÍGIDA.....	213
FIGURA 87: CONJUNTO DE IMÁGENES DE LA TOMA DE MEDIDAS.....	214
FIGURA 88: PARTES DE UN CARRIL.....	259
FIGURA 89: ESMERILADORA.....	261
FIGURA 90: AMOLADORA.....	261
FIGURA 91: ESMERILADORA.....	261
FIGURA 92: AMOLADORA.....	261
FIGURA 93: ESMERILADORA.....	261
FIGURA 94: TREN RE-PERFILADO, FRONTAL.....	261
FIGURA 95: TREN RE-PERFILADO, INTERIOR.....	261
FIGURA 96: SISTEMA PREVENTIVO DE LUBRICACIÓN SOBRE DIC - 40, FOTO 1.....	263
FIGURA 97: SISTEMA PREVENTIVO DE LUBRICACIÓN SOBRE DIC - 40, FOTO 2.....	263



FIGURA 98: DRESINA INSPECCIÓN DE CATENARIA DIC-40.....	264
FIGURA 99: PANTÓGRAFO WB 85-3.....	264
FIGURA 100: PIEZA 1, COMPONENTE BASE.....	265
FIGURA 101: PIEZA 2, COMPONENTE MÓVIL.....	265
FIGURA 102: PIEZA 3, PORTA-PULIDORES.....	266
FIGURA 103: PIEZA 4, PULIDORES.	266
FIGURA 104: PIEZA 5, COMPONENTE DE FIN DE RECORRIDO.....	266
FIGURA 105: CONJUNTO DE LA PROPUESTA 1.....	267
FIGURA 106: SECCIÓN PLETINA KASPEROWSKI.	272
FIGURA 107: PERFIL DE LAS FASES.	273
FIGURA 108: PERFIL DE LAS FASES, MODIFICADO 1.	273
FIGURA 109: EVOLUCIÓN DE LA PROPUESTA 2.....	274
FIGURA 110: ESQUEMA DE LA CONFIGURACIÓN EXPERIMENTAL DEL SISTEMA SE SIMULACIÓN ENTRE PANTÓGRAFO Y CATENARIA.....	276
FIGURA 111: FROTADOR DEL PANTÓGRAFO DE "X" MM DE AMPLITUD.....	277
FIGURA 112: ESQUEMA DE CONTACTO ENTRE RUEDA Y FROTADOR.....	277
FIGURA 113: TRIANGULO ISÓSCELES.	278
FIGURA 114: REUNIÓN TALLERES DE MANTENIMIENTO RENFE VILANOVA I LA GELTRÚ	297
FIGURA 115: REUNIÓN DENTRO DE LOS TALLERES DE MANTENIMIENTO RENFE DE VILANOVA I LA GELTRÚ.	297
FIGURA 116: TREN DE MANTENIMIENTO ADIF.....	299
FIGURA 117: CABINA TREN ADIF.....	299
FIGURA 118: REUNIÓN CON LUIS (MAQUINISTA DE RENFE).	301
FIGURA 119: REUNIÓN CON JOSEP PERLASIA.	302
FIGURA 120: REUNIÓN CON SANTIAGO SORIANO FGC.	303
FIGURA 121: VISITA DENTRO DE LA CABINA DEL MAQUINISTA.	304
FIGURA 122: VISITA DENTRO DE LA CABINA DEL MAQUINISTA.	305
FIGURA 123: SECTOR DE TRABAJO DE GRAFITO.	307
FIGURA 124: SECTOR DE SOLDADURA DE LAS DIFERENTES PARTES QUE COMPONE UN PANTÓGRAFO.	307
FIGURA 125: SISTEMA DE OBTENCIÓN DE LA CURVA DE PRESIÓN REALIZADA POR EL PANTÓGRAFO. .	307
FIGURA 126: PARTES DE LA CATENARIA.....	315
FIGURA 127: TIPOS DE MÉNSULA.....	315

FIGURA 128: CONJUNTO DE PÓRTICOS.....	315
FIGURA 129: OTRAS PARTES DE LA CATENARIA.....	316
FIGURA 130: PARTES SIMPLES DE UNA CATENARIA.	316
FIGURA 131: ROTURA DEL HILO DE CONTACTO.....	316
FIGURA 132: SISTEMA DE PENDOLADO.	317
FIGURA 133: FAIVELEY, CONJUNTO.	325
FIGURA 134: FAIVELEY, POSICIÓN REPOSO.....	325
FIGURA 135: FAIVELEY, MESILLA.....	325
FIGURA 136: FAIVELEY, VISTA FRONTAL.	326
FIGURA 137: FAIVELEY, SUSPENSIÓN MESILLA 1.	326
FIGURA 138: FAIVELEY, SUSPENSIÓN MESILLA 2.	326
FIGURA 139: FAIVELEY, ENGRASADO.....	326
FIGURA 140: SCHUNK, POSICIÓN DE TRABAJO.	327
FIGURA 141: SCHUNK, CAJA DE VÁLVULAS.....	327
FIGURA 142: SCHUNK, MODIFICADO Y SIN MODIFICAR.	327
FIGURA 143: SCHUNK, MODIFICADO.	327
FIGURA 144: SCHUNK, MESILLA 1.	327
FIGURA 145: SCHUNK, MESILLA 2.	328
FIGURA 146: SCHUNK, FLEJES MESILLA.....	328
FIGURA 147: PLANO PANTÓGRAFO, SCHUNK WBL 8512-L.....	330
FIGURA 148: PLANO PANTÓGRAFO UNIPALETA CONVENCIONAL, FAIVELEY AM32AV UM-C2.	331
FIGURA 149: SECCIÓN PLETINAS 1.	333
FIGURA 150: SECCIÓN PLETINAS 2.	333
FIGURA 151: FROTADOR CORTO DE 10 MM DE ESPESOR.	334
FIGURA 152: FROTADOR LARGO DE 10 MM DE ESPESOR.....	334
FIGURA 153: MODELO KASPEROWSKI O MIXTO.....	335
FIGURA 154: FROTADOR, DIMENSIONES IGUAL EN TODAS LAS FASES.	336



ÍNDICE DE GRÁFICAS

GRÁFICO 1: VIDA ÚTIL - PANTÓGRAFO 1.	137
GRÁFICO 2: VIDA ÚTIL - PANTÓGRAFO 2.	137
GRÁFICO 3: DESGASTE - PANTÓGRAFO 1.....	139
GRÁFICO 4: DESGASTE - PANTÓGRAFO 2.....	139
GRÁFICO 5: KG DE HILO DE CONTACTO SUSTITUIDOS.....	140
GRÁFICO 6: EVOLUCIÓN HISTÓRICA DEL DESGASTE EN LA UNIDAD 465215.	141
GRÁFICO 7: KILÓMETRO DE H.C. CU-ETP SUSTITUIDOS.....	151
GRÁFICO 8: COSTE ECONÓMICO, H.C.	152
GRÁFICO 9: TRACCIÓN CU-ETP, NUEVO.....	182
GRÁFICO 10: FUERZA/ALARGAMIENTO CU-ETP, NUEVO.....	183
GRÁFICO 11: TRACCIÓN CUAG0,1, NUEVO.	184
GRÁFICO 12: FUERZA/ALARGAMIENTO CUAG0,1, NUEVO.	184
GRÁFICO 13: TRACCIÓN CU-ETP, USADO (1).....	186
GRÁFICO 14: FUERZA/ALARGAMIENTO CU-ETP, USADO (1).....	186
GRÁFICO 15: TRACCIÓN CU-ETP, USADO (2).....	187
GRÁFICO 16: FUERZA/ALARGAMIENTO CU-ETP, USADO (2).....	188
GRÁFICO 17: TRACCIÓN CU-ETP, USADO (3).....	189
GRÁFICO 18: FUERZA/ALARGAMIENTO CU-ETP, USADO (3).....	189
GRÁFICO 19: TRACCIÓN CUAG0,1, USADO.	190
GRÁFICO 20: FUERZA/ALARGAMIENTO CUAG0,1, USADO.	191
GRÁFICO 21: ENSAYOS A TRACCIÓN DE HILO DE CONTACTO.....	191
GRÁFICO 22: COMPARATIVA FUERZA/ALARGAMIENTO DE LAS DIFERENTES PROBETAS.	192
GRÁFICO 23: PROPIEDADES MECÁNICAS Y ELÉCTRICAS DEL HILO DE CONTACTO.	198
GRÁFICO 24: COSTE DE PLETINAS SEGÚN MATERIAL.	219
GRÁFICO 25: GASTO DEL PERSONAL SEGÚN TAREA, IRREAL 1.	222
GRÁFICO 26: GASTO DEL PERSONAL SEGÚN TAREA, IRREAL 2.	224
GRÁFICO 27: PORCENTAJE DE GASTO SEGÚN MATERIAL, IRREAL 2.....	225
GRÁFICO 28: EVOLUCIÓN HISTÓRICA DE VIAJEROS.....	237



GLOSARIO Y ACRÓNIMOS

ADIF: Administrador de Infraestructuras Ferroviarias.

RENFE: Red Nacional de los Ferrocarriles Españoles.

FGC: *Ferrocarrils de la Generalitat de Catalunya.*

EPSEVG: *Escola Politècnica Superior d'Enginyeria de Vilanova i la Geltrú.*

CTVG: *Centre Tecnològic de Vilanova i la Geltrú.*

H.C.: Hilo de contacto.

HH.CC.: Hilos de contactos.

Pan.: Pantógrafo.

BCN: Barcelona.

VNG: *Vilanova i la Geltrú.*

ETP: Electrolítico.

LAC: Línea Aérea de Contacto.

DB: *Deutsche Bahn.* Es la empresa alemana de trenes.

SNCF: *Société Nationale des Chemins de Fer Français.*

OHMS: *OverHead Maintenance Services.* Sistema para monitorizar.

TRENITALIA: principal operador ferroviario dentro de Italia. Propiedad de *Ferrovie dello Stato.*

R.A.T: Reglamento de alta tensión.

NPM: Nivel de prioridad del Mantenimiento.

CTC: Control de Tráfico Centralizado.

UTM: Sistema de coordenadas *Universal Transverse Mercator.*

UIC: ancho internacional.



IPM: Módulos de Potencia Inteligente.

BABctc: Bloqueo Automático Banalizado Control de Tráfico Centralizado.

BAUctc: Bloqueo Automático en vía Única Control de Tráfico Centralizado.

BADctc: Bloqueo Automático en vía Doble Control de Tráfico Centralizado.

BLAUctc: Bloqueo de Liberación Automático en vía Única Control de Tráfico Centralizado.

BLADctc: Bloqueo de Liberación Automático en vía Doble Control de Tráfico Centralizado.

ASFA: Anuncio de Señales y Frenado Automático.

ATP-EBICAB: *Automatic Train Control*, baliza modelo EBICAB.

ERTMS: *European Rail Traffic Management System*.

1. PRÓLOGO

1.1. ORIGEN DEL PROYECTO

Este trabajo fue propuesto por Ignasi Perat durante las presentaciones de los proyectos para la metodología de trabajo SCRUM. Una vez que se tenía constancia del tema, los miembros del equipo se auto-organizaron para optar a la candidatura.

El propósito de un trabajo de esta naturaleza es realizar un proyecto de análisis y desarrollo de una solución que permita la demostración de los conocimientos adquiridos durante el proceso del Trabajo Final de Grado / Carrera y los estudios de grado / ciclo.

1.2. MOTIVACIÓN

Personalmente la motivación principal a la hora de desarrollar un proyecto de este alcance y estas características no reside en una sola razón si no en la suma de diversos factores que hicieron de este proyecto, un oportunidad única de acabar la carrera de la mejor manera posible.

En primer lugar, el interés del conocer un sector totalmente desconocido durante la carrera pero a la vez tan ligado a la escuela, presentando la oportunidad de adquirir una serie de conocimientos y aptitudes totalmente nuevas hasta la fecha.

En segundo lugar, como usuario de la línea de estudio ,personalmente despertó curiosidad de entender, el por qué de tantas incidencias y empeoramiento del servicio en los últimos años.

En tercer lugar, la oportunidad que ofrecía este proyecto era única, debido a que el proyecto se centraba en el análisis de un problema real y actual, hecho que nos permitía conocer los diversos puntos de vista, acciones empleadas por cada empresa involucrada y su forma de trabajar, en definitiva dar el salto del mundo estrictamente educativo al profesional y laboral.

Y por último lugar, el hecho de conocer y trabajar dentro de una metodología de trabajo en grupo, donde los miembros que la forman pertenecen a diferentes titulaciones, permitiendo así conocer nuevos puntos de vista y adquirir nuevos conocimiento en el trabajo diario.

En definitiva, la motivación principal a nivel personal, a la hora de desarrollar un proyecto de estas características reside, en la necesidad de realizar un proyecto totalmente diferente hasta lo ahora realizado, y así adquirir nuevos conocimientos y aptitudes que con un proyecto estrictamente enfocado a mi titulación, hubiesen sido imposible de adquirir.

1.3. REQUERIMIENTOS PREVIOS

El principal requerimiento previo ha sido la recopilación y estudio de la información acerca de las catenarias y los pantógrafos utilizados en el área de estudio. Además de la búsqueda de artículos a nivel internacional que traten el problema que se pretende solucionar para RENFE y ADIF. Por otro lado, las personas entrevistadas han apartado sus conocimientos como su experiencia.

1.4. PARTICIPACIÓN

Al tratarse de un proyecto multidisciplinar donde intervienen alumnos de diversas especialidades, con el fin de aportar cada uno los conocimientos adquiridos durante la carrera y su metodología de trabajo, la participación de cada uno suele ser diferente dependiendo del campo que abarca el proyecto, dividiendo las tareas según las aptitudes de cada uno de los miembros.

En cambio, el proyecto que se expone en este documento es totalmente diferente en este aspecto debido a que cada uno de los miembros del grupo parte desde cero en el conocimiento del sector ferroviario y por lo tanto las tareas a desarrollar, pudiendo llevarse a cabo de manera indiferente de la especialidad por cada miembro del grupo.

En la fase inicial del proyecto, cada miembro, se enfocó en adquirir una serie de conocimientos relacionados con el sector, con el objetivo de preparar las diferentes reuniones con las partes implicadas en el problema: definiciones de diversos elementos y componentes, conocimiento del problema y alcance, entre otros.

En la fase la fase intermedia y final del proyecto, las diversas a tareas a desarrollar por cada miembro se dividía según el grado de motivación de cada miembro, esto no quiere decir que el resto del grupo no haya participado en ellas, al ser un proyecto multidisciplinar cada miembro estaba al corriente de cada una de las tareas y participaba en cada una de las reuniones, donde se debatía la manera de abordar y enfocar cada apartado del proyecto.

Personalmente, a lo que se refiere a un estudiante en Ingeniería en diseño industrial y desarrollo del producto, el estudio de un problema en busca del origen o posible solución, no defiere demasiado a los diversos proyectos realizados a lo largo de la carrera, ya que en el problema a analizar, consta de diversos usuarios, en este caso por un lado tendríamos en primer plano Renfe y Adif, y en segundo plano Schunk Iberica S.A ,con diversos problemas enfocados en un producto, que en este caso vendría a ser el formado por el conjunto pantógrafo-catenaria.



En todo momento se intentó enfocar y aplicar en cada uno de los apartados, entrevistas y reuniones todos los conocimientos y metodología de trabajo, desarrollados a lo largo de la carrera, aportando el punto de vista diferenciador de un estudiante en Ingeniería en diseño industrial y desarrollo del producto.

Por lo tanto, en mi opinión la participación no se limitó en ningún momento, por los estudios realizados, y por lo tanto cada miembro del grupo, aportó su punto de vista en cada apartado a desarrollar, debido a la metodología de trabajo que se estableció, que tenía como objetivo conseguir una organización, timing y seguimiento de las tareas pendientes, en desarrollo y a desarrollar por cada miembro del grupo, donde se fomentó en todo momento la participación en cada uno de los apartados a desarrollar.

Los siguientes apartados correspondientes a la memoria, muestra los apartados realizados y donde se ha tenido una mayor incidencia.

Cabe destacar que es una información orientativa, debido a que como se ha mencionado con anterioridad, todo el trabajo realizado de estudio, recogida de información y análisis, se ha sido desarrollado por todos los integrantes del grupo.

APARTADOS REALIZADOS POR E. GABRIEL DEL CARPIO	COMENTARIO
2.8 INTERACCIÓN PANTÓGRAFO - CATENARIA	Escrito íntegramente
5. ANÁLISIS	
5.3 Observación de una pletina	Escrito íntegramente
5.4 Estudios de correlación	Miguel Beltrán se encargo de realizar el apartado referente a Renfe
5.6. Ensayos de los materiales	
5.6.2. <i>Ensayos de metalografía</i>	Realizado con ayuda de Lehel Kiraly
5.8 Proceso de fabricación hilo de contacto	Escrito íntegramente
7. HIPÓTESIS	
7.1 <i>Realizado por Edgar Gabriel</i>	Escrito íntegramente
8. RECOMENDACIONES DE ACTUACIÓN	
8.1 <i>Propuesta 1- Plan preventivo sobre el hilo de contacto</i>	Escrito íntegramente
ANEXO A: Resumen de reuniones	Escrito íntegramente
A.1. Reunión en talleres de mantenimiento RENFE Vilanova i la Geltrú.	Escrito íntegramente
A.2 <i>Reunión con ADIF</i>	Escrito íntegramente
A.3 <i>Reunión con SCHUNK</i>	Escrito íntegramente
A.4 <i>Reunión con Maquinista</i>	Escrito íntegramente
A.5 <i>Reunión con Josep Perlasia</i>	Escrito íntegramente
A.6 <i>Reunión con Santiago Soriano</i>	Escrito íntegramente
A.7 <i>Visita a SCHUNK, Madrid</i>	Escrito íntegramente
ANEXO G: Observación probetas	Escrito íntegramente

Tabla 0.1: Tabla de participación de Edgar Gabriel del Carpio Chávez.

2. INTRODUCCIÓN

El uso de transporte público en el área de Barcelona se encuentra en pleno auge de pasajeros. Ya que los barceloneses se distribuyen a través de largos corredores, basando una de sus principales conexiones de transporte público en el ferrocarril de cercanías, también conocido como *Rodalies*.

2.0.1. *Objetivos*

El objetivo de este proyecto es encontrar un posible origen / causa del problema de excesivo desgaste que existe entre los elementos que interactúan en la interacción catenaria – pantógrafo. Proponiendo diferentes soluciones acorde con la realidad del servicio, viable técnicamente, a la vez que asegure unas buenas condiciones de servicio y seguridad.

Hasta el momento la mayor parte de las investigaciones y soluciones en este caso se han realizado mediante procesos de ensayo – error y acciones de contra medida (ej.: subir las durezas de los materiales afectados). Esto supone un problema debido a la gran falta de comprensión sobre el resultado final de estas medidas y al poco margen de error que permite el servicio de transporte ferroviario.

Frente las ensayos previstos por RENFE para el mes de Septiembre. Si los resultados son satisfactorios, las prestaciones de este material superarían a las de otros materiales compuestos o aleados utilizados hoy en día en la industria ferroviaria.

2.1. SITUACIÓN GEOGRÁFICA

La línea ferroviaria afectada y analizada en el presente trabajo a estudio se encuentra localizada al Noreste de la Península Ibérica. Para precisar más, en la comunidad autónoma de Cataluña, entre las ciudades de Barcelona y San Vicente.

En la figura 1, se puede observar la situación exacta del recorrido de la línea R2 Sud, además de la localización de cada estación indicado con un punto.



Figura 1: vista del tramo y ubicación de la línea.

El nombre de la línea es R2 Sud, la cual un tramo pertenece a la R2 Norte y a la R2. Por este motivo se analiza la R2 completa. El plano esquemático de la línea R2 de *Rodalies de Catalunya* operada por Renfe Operadora es el siguiente.

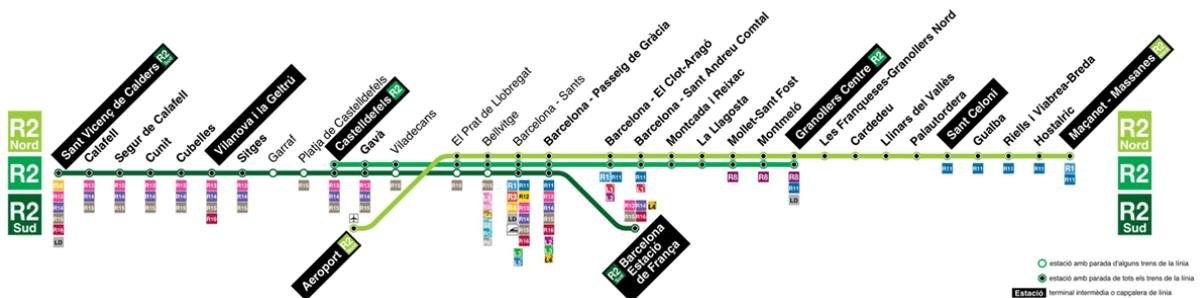


Figura 2: plano esquemático de la línea R2 de Rodalies.

A continuación se detalla las especificaciones de la línea R2.

2.2. HISTORIA DE LA R2 DE RODALIES

Francesc Gumà i Ferran nacido el 27 de marzo del 1833 a *Vilanova i la Geltrú*. Pertenece a una familia rica ya que su padre, *Sebastià Gumà* fue el fundador de una de las primeras industrias textiles de Cataluña.

Francesc con quince años deja los estudios y entra en la fábrica a trabajar con su padre. Dos años más tarde decide realizar el proyecto de sus sueños. Viaja a Cuba, concretamente a Matanzas, donde con veinticinco años se casa siendo un gran empresario de un puerto que hacía transportes entre España y Cuba. También es fundador de un gran Banco, el "*Banc de Vilanova*".

Después de tener varias desgracias en la familia decide regresar a *Vilanova i la Geltrú* el 21 de julio de 1871, habiendo acumulado una fortuna considerable.

El 7 de diciembre de 1871 *Francesc Gumà i Ferran* presenta con el ingeniero *Cels Xaudaró* un estudio para el establecimiento de un ferrocarril económico de vía estrecha de *Vilanova* a Barcelona pero Madrid no le acepta este proyecto.

Sabiendo que *Vilanova* era una ciudad bastante grande y desarrollada pero sin ferrocarril no progresaría. El 27 de noviembre de 1876 se va personalmente a Madrid y finalmente el Senado y diputados aprueban las obras pero sin subvención.

10 de julio de 1878 se iniciaron las obras y dos años más tarde la línea llevaba un ritmo frenético. Más de cinco mil trabajadores se repartían en toda la línea y brigadas de mil cuatrocientos hombres trabajaban día y noche para perforar los quince túneles del *Garraf*.



Figura 3: Estación de VNG, fue de los mejores edificios ferroviarios de la época.

La inauguración del tramo llega en el 29 de diciembre de 1881. El tren sale de Barcelona a las nueve de la mañana y con una velocidad moderada para que los viajeros puedan admirar la magnitud de las obras. A la una y cuarto del mediodía, el tren inaugural hacia la entrada triunfal a *Vilanova i la Geltrú*.



Figura 4: Estación de VNG del año 1950.

Finalmente a lo largo del tiempo la línea ha sido modernizada con actuaciones como la electrificación y la construcción de doble vía a partir de los años 1950.

2.3. CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS

La línea R2, R2 Sud y R2 norte tiene una longitud de 130,7 km de catenaria combinada de rígida o aérea, de placa o balasto. Con un total de 34 estaciones que algunas conectan con la red de cercanías de Barcelona R1, R3 y R4.

Como se ha indicado anteriormente, el estudio presentado en esta memoria, está centrado en el trayecto de la línea R2 Sud. La cual comparte 7 de sus 17 estaciones con la línea R2 y R2 Norte.

Este va desde Estación de Francia hasta San Vicente. Este recorrido consiste en 67 km, tanto de catenaria rígida como de flexible y/o vía en balasto como en placa.

En concreto, está compuesta por 18 km de túnel, y el resto de kilómetros hasta llegar a los 67 km en cielo abierto. Unos 9 km de catenaria rígida y 58 km de catenaria flexible. Respecto la vía, la línea R2 está compuesta por 61 km de balasto y 6 km de placa.

A continuación se muestra otros detalles significativos de las líneas R2 Sud, la R2 Norte y la R2 de *Rodalies* de Barcelona.

Se han dividido los tiempos del viaje a velocidad convencional, por cada tramo, igual que la longitud de los mismos y la velocidad en cada uno de ellos.

	TRAMO									
	SVCalders-Calafell	Calafell-SegurCal	SegurCal-Cunit	Cunit-Cubelles	Cubelles-VilanovaG	VilanovaG-Sitges	Sitges-Garraf	Garraf-PatjaCas	PlatjaCas-Castellde	Castellde-Gavà
LONGITUD /metros	3.733	2.317	1.768	4.593	5.587	6.813	8.674	4.624	2.360	3.833
TIEMPO /min.	5	3	3	3	5	6	6	4	4	4
VELOCIDAD /km·h ⁻¹	45	46	35	92	67	68	87	69	57	57

Tabla 1: Características según tramo, tabla 1.

	TRAMO									
	Gavà-Viladecans	Viladecans-PratLlo	PratLlob-Belvitge	Belvitge-Sants	Sants-PgGracia	PgGracia-Clot	Clot-SAndresCom	SAndresCom-Mont	Mont-Llagosta	Llagosta-MollsFost
LONGITUD /metros	1.558	5.789	3.998	3.664	2.525	2.749	3.107	5.641	3.175	3.033
TIEMPO /min.	2	5	4	6	5	5	3	5	3	4
VELOCIDAD /km·h ⁻¹	47	69	60	37	37	30	55	68	64	45

Tabla 2: Características según tramo, tabla 2.

	TRAMO									
	MollsFost-Montme	Montme-GranoCen	GranoCen-Cardede	Cardede-Llinars	Llinars-Palautord	Palautord-StCeloni	StCeloni-Gualba	Gualba-BredaRiel	BredaRiel-Hostalric	Hostalric-MasanM
LONGITUD /metros	2.557	7.728	7.786	4.703	5.548	3.812	5.549	2.296	8.038	5.286
TIEMPO /min.	3	8	8	4	5	4	4	3	5	5
VELOCIDAD /km·h ⁻¹	51	66	58	71	67	57	83	46	96	63

Tabla 3: Características según tramo, tabla 3.

Tramos de línea R2	San Vicente / Barcelona	Barcelona / Arenys del Mar	Arenys del Mar / Maçanet - Massanes
Áreas territoriales operativas de ADIF	Noreste	Noreste	Noreste
Tipo de vía (ancho) /mm	Línea convencional (1668)	Línea convencional (1668)	Línea convencional (1668)
Distancias kilométricas /km	60	44	37
	27	9	2
Rampas características (milésimas)	27	11	12
	160	140	135
Velocidades máximas / km·h ⁻¹	Doble a 3 (compensada)	Doble a 3 (compensada)	Única a 3 (compensada)
Tipología de la electrificación - vías electrificadas /KV	350	350	350
Longitud máxima de los trenes de viajeros /m	450	500	500
	550	575	575
Longitud máxima de los trenes de mercancías	Vía doble BABctc	Vía doble BABctc	Vía única BLAUctc
	Tren tierra y ASFA ATP-EBICAB	Tren tierra y ASFA	Tren tierra y ASFA
Bloqueos de vía			
Sistemas de seguridad			

Tabla 4: especificaciones técnicas según Adif.

2.4. CIRCULACIÓN

La frecuencia va variando según la franja horaria en relación al número de pasajeros y el recorrido de la línea. Esta es una primera aproximación del número de trenes en circulación.

TRAMOS DE CIRCULACIÓN	FRECUENCIA DE PASO
<i>Castelldefels - Granollers Centre</i>	Un tren cada 10 minutos en hora punta y cada 30 minutos en hora valle.
<i>Sant Vicenç de Calders - Estació de França</i>	Un tren cada 15 minutos en hora punta y uno cada 30 minutos en hora valle.
<i>Vilanova i la Geltrú - Estació de França</i>	Un tren cada 10 minutos en hora punta y uno cada 15 minutos en hora valle.
<i>Aeroport - Sant Celoni / Maçanet Massanes</i>	Un tren cada 30 minutos.

Tabla 5: frecuencia de paso en relación al tramo.

En la línea R2 Sud circulan un total de 261 trenes todos los días laborables de la serie 447, de las series 450 / 451 y del tipo CIVIA (series 463 / 464 / 465).

2.5. VIAJEROS

A continuación se muestra la evolución histórica de viajeros en la línea de estudio por año. No obstante, se podría focalizar el estudio en la evolución de los mismos según el tramo, incluso la dirección o la franja horaria.

Aunque en esta memoria no se focaliza tal y como se explicita en el párrafo anterior, no se hizo por falta de información. Ya que se trata de información muy precisa que no se puede obtener dentro del plazo del transcurso del análisis.

Esto mismo que sucedió con la información de viajeros ocurrió respecto a circulación y pasó de trenes, por lo que algunos apartados de la memoria carecen de información por este motivo, inclusive algunos de ellos no se pudieron desarrollar.

1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999
23,35	25,16	24,94	25,85	26,40	26,23	27,51	29,01	29,77
2000	2001	2002	-	2007	2008	2009	2010	2011
31,16	34,34	37,70	-	31,92	39,53	31,15	36,08	34,71

Tabla 6: Evolución histórica de viajeros en la línea R2 (en millones).

2.6. COMPETENCIAS DEL SERVICIO

El transporte ferroviario de la línea R2 de *Rodalies* tiene como competencia de servicios diferentes medios de transporte.

La competencia más directa es el transporte por carretera. Ya que la carretera y el medio ferroviario son los dos medios de transporte con los instrumentos suficientes que permiten el traslado de personas, cosas u objetos, de un sitio a otro con mayor competencia.

Existen otras alternativas de transporte como el medio acuático o el aéreo, no obstante no están al alcance de la mayoría de la sociedad, como medio de transporte diario.

En el transporte por carretera, con el cual compite el transporte ferroviario, se pueden incluir las motocicletas, automóviles, autobuses y camionetas.

Una de las ventajas que tiene el transporte por carretera es que puede llegar a cualquier sitio determinado, en cambio, con el tren solo permite acceder a sitios donde hay vías o carriles para locomotoras. Otra ventaja es la comodidad de horarios ya que viajar a través de un coche propio permite mayor flexibilidad de horarios, llevar más equipaje y a la vez nos permite trasladarnos y llegar al destino más rápidamente. Aún así, existen otros factores de competencia entre los dos medios de transporte.

La eficiencia energética es uno de los factores importantes que se pueden comparar. Esta eficiencia valora los gastos por pasajero y, a la vez, cuánto se contamina. Se puede decir que los autobuses y camiones contaminan mucho más que un coche o bien una motocicleta. Además hay que tener en cuenta que el tren tiene unos porcentajes de contaminación elevados ya que se mueve con electricidad y puede recibir energía de fuentes fósiles, renovables y nucleares.

Otro factor a tener en cuenta, sería la masa de los pasajeros o mercancías ya que los trenes o bien los autobuses tienen una capacidad de ocupación, de personas o bien mercancías, superior a los automóviles.

Por estas razones, entre otras, se concluye que el transporte ferroviario es mucho menos contaminante que el transporte de carretera.

Todos estos hechos están reflejados en las tablas siguientes donde se calculan con aproximación varias trayectorias.

DESDE VILANOVA I LA GELTRÚ HASTA BARCELONA SANT'S Y/O VICEVERSA.

MEDIO DE TRANSPORTE	TIEMPO EN LLEGAR /min	KILÓMETROS RECORRIDOS /km	EMISIONES POR PASAJERO /kg·CO ₂	COSTE ECONÓMICO /€
Tren	45	42	1,2	4,10
Autobús	70	52	1,3	5,10
Turismo gasoil	40	44	4,5	10
Turismo gasolina	40	44	4,1	12
Motocicleta	40	44	3,2	8,50

Tabla 7: Comparaciones de las competencias desde VNG hasta Barcelona Sants.

DESDE SANT VICENÇ DE CALDERS HASTA VILANOVA I LA GELTRÚ Y/O VICEVERSA.

MEDIO DE TRANSPORTE	TIEMPO EN LLEGAR /min	KILÓMETROS RECORRIDOS /km	EMISIONES POR PASAJERO /kg·CO ₂	COSTE ECONÓMICO /€
Tren	18	20	0,57	3,4
Autobús	30	24	0,6	4,7
Turismo gasoil	23	21	2,15	5
Turismo gasolina	23	21	1,95	5,5
Motocicleta	23	21	1,5	3,8

Tabla 8: Comparaciones de las competencias desde Sant Vicenç hasta VNG.

Los cálculos hechos a las tablas 7 y 8 están realizados por un pasajero en los cinco medios de transporte. También se puede añadir que se calcula un consumo bajo de 5 litros cada 100 km en caso de los turismos y 3,5 litros cada 100 km en caso de los motocicletas.

Comparando estos resultados se puede observar que tal y como se ha dicho anteriormente el tren es un medio de transporte bastante rápido, poco contaminante y barato.

2.7. EMPRESAS IMPLICADAS

Para el correcto desarrollo del trabajo y debido que se trata de un problema real, se cuenta con la colaboración directa de las empresas afectadas con el objetivo de encontrar una solución o una explicación lógica al origen del problema.

Las empresas que han estado abiertas a la colaboración han sido del ámbito de la gestión, supervisión y mantenimiento de la infraestructura; la encargada de explotar u operar la red, ofreciendo el servicio a los usuarios; y la encargada de suministrar parte del material que interviene en el problema de interacción pantógrafo-catenaria. Más directamente quien lo vive.

No obstante, se ha contado con la colaboración de FGC (*Ferrocarrils de la Generalitat de Catalunya*) ofreciendo su punto de vista al problema e información confidencial.

Desglosadas por partes.

2.7.1. Gestor de la infraestructura

La empresa encargada de la gestión de la infraestructura de la línea R2 de *Rodalies* de Barcelona, y la mayoría de toda la red ferroviaria de España es ADIF (*Administrador de Infraestructuras Ferroviarias*).

Ella a su vez, cuenta con la colaboración de otras empresas que le ayudan por ejemplo, al mantenimiento de la línea o suministrando el hilo de contacto y los diferentes materiales que conforman la infraestructura. Debido a que no es un fabricante de sus propios suministros.

No obstante, ADIF garantiza el correcto estado del material suministrado y la buena labor de las empresas que le ayudan a realizar las tareas de mantenimiento.

En resumen, ADIF es la encargada de garantizar el correcto estado y funcionamiento de la infraestructura, entre otros servicios, que no afectan al problema del estudio de la memoria.

2.7.2. Operador de la red

La empresa encargada de la explotación de la red ferroviaria proporcionado por la anterior empresa es RENFE (*Red Nacional de los Ferrocarriles Españoles*). Opera en todas las líneas de Cercanías, *Rodalies* y/o *Aldirikoak*. Además de la media distancia y la alta velocidad.

Para ello tiene a disposición un seguido de locomotoras, personal, instalaciones, entre otros elementos que le permiten garantizar el servicio del transporte público urbano e interurbano de las distintas ciudades de la geografía española.

Igual que en el caso anterior, no es un fabricante de sus propios suministros



2.7.3. *Suministrador*

En el caso de las empresas suministradoras existen varias. Según el elemento en cuestión se dispone de una o varias empresas para la misma pieza.

Para el hilo de contacto de la catenaria se dispone de varias empresas a nivel nacional, sin embargo toda la comunidad de Cataluña es suministrado por la misma empresa. El nombre de la empresa seleccionada para esta labor es LAFARGA. Es un grupo de *holding* familiar.

En el apartado de pantógrafos se dispone de dos marcas.

La empresa FAIVELEY, donde se estudia la estructura de su pantógrafo en algunos apartados de la memoria.

Por otra lado, la empresa SCHUNK, encargada de suministrar el material consumible por el pantógrafo, además de suministrar un modelo de pantógrafo y elementos asociados a este para su correcto funcionamiento. Por ejemplo, los muelles de suspensión.

2.8. INTERACCIÓN PANTÓGRAFO CATENARIA

La corriente eléctrica que circula por la catenaria, necesita ser dirigida hacia los motores de las locomotoras de tracción eléctrica para que realicen su función. Por este motivo, es obligatoria la existencia de aparatos de toma de corriente en los techos de las unidades motrices.

Los aparatos de toma de corriente son equipos que toman la corriente proveniente de uno o más hilos de contacto, ya sea de catenaria rígida o flexible. Los aparatos de toma de corriente empleado es el conocido como pantógrafos, definidos por la normativa europea.

La interacción entre el pantógrafo - catenaria es un fenómeno fundamental para el correcto funcionamiento del servicio.

El ideal de funcionamiento de esta interacción es suministrar esta energía de manera continua, causando un mínimo desgaste del hilo de contacto y de la pletina de contacto del pantógrafo, minimizando así el coste derivado de las labores de mantenimiento y sustitución de estos elementos.

En este fenómeno intervienen diversas variables que condicionan el correcto funcionamiento entre elementos, en este apartado se presentarán esta diversas variables con el objetivo de entender la complejidad del funcionamiento del sistema y conocer las condiciones de servicio tanto de pantógrafo como de la catenaria.

- **Fuerza:** Una de las variables más importante, debido a que tiene una incidencia importante en la transmisión de energía hacia el material rodante y en el desgaste de ambos elementos involucrados en la interacción es la fuerza que ejerce el pantógrafo sobre el hilo de contacto.
- **Distancia entre pantógrafo y catenaria:** A lo largo de todo el recorrido se intenta garantizar que la distancia entre estos dos elementos sea la mínima posible, garantizando el contacto entre elementos. Debido a la discontinuidad del terreno, la altura del hilo de contacto va oscilando.
- **Descentramiento:** El desgaste mecánico existente entre el pantógrafo y la catenaria, se encuentra mayormente focalizado en la zona central de las pletinas de contacto, por este motivo a lo largo de estos últimos años el sistema se ha configurado con el objetivo de descentralizar este desgaste y aumentar el área de trabajo de la pletina.

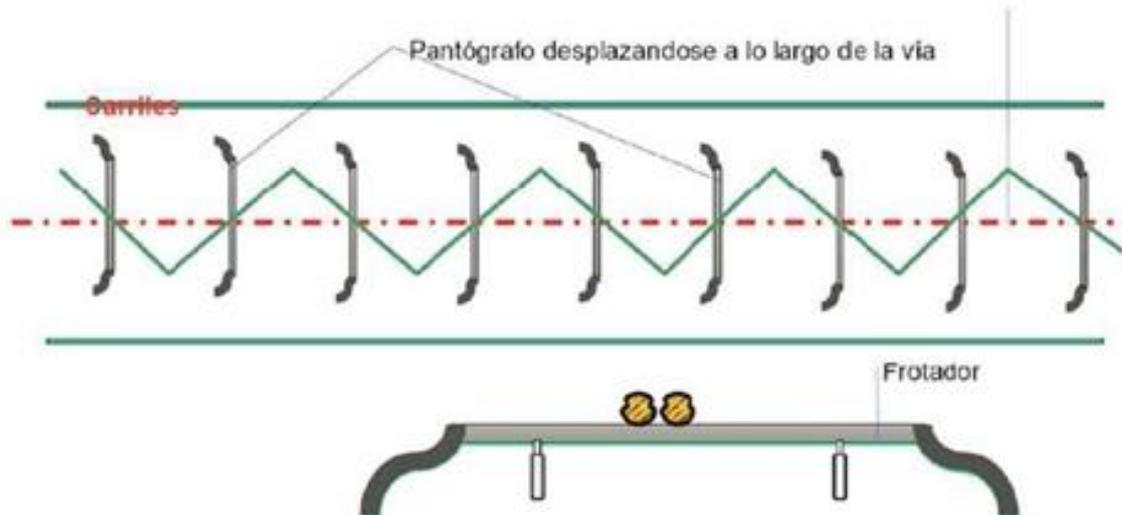


Figura 5: Descentramiento del hilo de contacto.

- **Tipo de catenaria:** La catenaria más común es la flexible, que proporciona una mayor amortiguación en el contacto entre el pantógrafo y el hilo de contacto. La catenaria rígida no presenta los mismos valores de amortiguación.
- **Tipo de frotador:** Existen varios tipos de frotadores, tanto en diseño como en material.
- **Intensidad de corriente:** Desgaste eléctrico, la tensión de trabajo es de 3 KV en continua aplicable a toda la red de cercanías, el factor que varía dependiendo del material rodante o acción que desarrolla (parada o arranque) es la intensidad.

2.9. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

La interacción del hilo de contacto con la mesilla del pantógrafo genera un desgaste entre los materiales de contacto. El comportamiento normal de este desgaste se encuentra acotado dentro de un parámetro de distancia asumible por ambas empresas.

Sin embargo, el desgaste producido en la R2 de *Rodalies* está fuera de control, debido a que se desgasta más rápido de lo establecido. Las primeras impresiones por parte de RENFE son del año 2010. Estas indican que los CIVIA y los S/450 con pletinas de cobre electrolítico presentan desgastes asimétricos, tanto sentido lateral como longitudinal.

El origen del problema es desconocido, pero actualmente se puede decir que están sufriendo un desgaste mecánico combinado con otro eléctrico. No se sabe con exactitud cuál de los dos fue el primero, no obstante la combinación de los tipos de desgaste ha provocado que el mal estado del hilo de contacto se haya extendido por toda la R2 Sud de *Rodalies* de Barcelona. Siendo cada vez más difícil encontrar una solución válida a la vez que económica.

Los kilómetros de cada una de las pletinas en condiciones normales, frente los producidos en la R2 de *Rodalies* de Barcelona se muestra en la tabla siguiente.

MATERIAL	CARACTERÍSTICAS /mm	TASA DE DESGASTE
Cu ETP	Espesor inicial: 7	Antes: 2,5 mm / 10.000 km
	Sustitución: 3	R2 BCN: 9 mm / 10.000 km
Cu-Cr-Zr	Espesor inicial: 10	1.6 mm / 10.000 km
	Sustitución: 3	
Cobre-grafito	Espesor inicial: 22	R2 BCN: 17 mm / 10.000 km
	Sustitución: 5	Otras: 2 mm / 10.000 km

Tabla 9: tasa de desgaste según el material, RENFE.

Los datos mostrados en la tabla 9 son ofrecidos por RENFE en la presentación del problema, por lo que no se ajustan exactamente con los datos ofrecidos más adelante.

A lo largo del documento se han detallando los resultados mostrados en la tabla 9, además de los periodos en los que se realizo cada acción.

2.10. DIFICULTADES DEL PROYECTO

A lo largo del proyecto se han ido encontrando algunas dificultades de las cuales algunas se han podido resolver y otras que no.

En el momento que se presenta al grupo esta problemática de desgaste excesivo en la interacción pantógrafo-catenaria, el equipo que forma el proyecto desconocía totalmente el funcionamiento y tecnologías que se emplean en estas instalaciones.

Por tanto, la primera dificultad a resolver fue aprender que partes forman esta interacción y cuál es el funcionamiento de cada uno de los elementos que intervienen. Además de los materiales que se utilizan y conocer tanto las características mecánicas como eléctricas.

La segunda dificultad que se encontró fue tratar con las diferentes partes afectadas. La Empresa Operadora del servicio, la empresa encargada de la gestión de la Infraestructura y las empresas dedicadas al suministro de material.

Esto implica localizar y poder hacer reuniones para tratar el problema desde los diferentes puntos de vista, como han vivido este problema, que medidas han tomado a lo largo de los diferentes años y sus opiniones al respecto.

También se contó con la colaboración de personas entendidas en esta materia que pudieron dar un enfoque de trabajo al equipo.

Otra dificultad a mencionar fue la obtención de información acerca del problema, información muy específica. Dado la particularidad del problema, cierta información se consiguió mediante la colaboración con dichas empresas mencionadas anteriormente y otras por los canales habituales accesible a todos los ciudadanos.

No obstante, es necesario decir que la colaboración con algunas de las empresas, se encontró dificultades. Por ejemplo, alguna información que se considera importante para analizar algunas situaciones de la interacción, no se han podido completar ya que no se facilitó al completo, no obstante otra fue ambigua o incluso errónea.

En resumen, para la mayoría de aspectos se necesita de la colaboración de las empresas implicadas ya que para hacer un estudio económico por ejemplo, solo ellos pueden facilitar los costes de material y personal.

Otro aspecto a destacar, es el trabajo en equipo. Por un lado es positivo dada la sinergia del grupo que se ha formado. Esta sinergia implica que el resultado del trabajo conjunto de las partes es mayor que si se suman los resultados por separados de las partes trabajando aisladas. Es decir, que se ha realizado un trabajo bastante compacto y en equipo.

Sin embargo a su misma vez se convierte en una dificultad, debido a que el grupo debe ser partícipe de todas las decisiones que se toman y la información deben conocerla todos los miembros del equipo. Esto es complejo ya que el equipo se encuentra en diferentes situaciones laborales y académicas. Además, cada miembro del equipo, como persona tiene sus carácter, opinión y personalidad, por lo que se ha de llegar a un consenso en cada decisión.

El grupo de trabajo ha tenido ideas que le hubiesen gustado desarrollar, porque cree interesantes para dar respuesta a alguna de las incógnitas que presenta este problema.

Aunque hay que decir que no se nos ha dejado desarrollar, ya que el tiempo de proyecto es acotado y/o se ha considerado que no sería relevante para el análisis.

Algunas de las ideas propuestas más relevantes y no realizadas son por ejemplo, prueba de fuerza del pantógrafo en las alturas más críticas; simulador mediante elementos finitos con NX8 (requería demasiado tiempo y probablemente ya exista alguno); algunos ensayos de materiales (debido a complicaciones externas); coste económico de una avería en diferentes zonas; entre otros.

En cambio, otros apartados no se realizaron debido a falta de información, la cual había sido solicitada y no obstante, no se facilito. Algunos canales de comunicación no llegaron a responder y otros daban largas o información a medias.

3. ANTECEDENTES

A continuación se analiza las acciones realizadas por cada uno de los implicados en el problema. Para ello se parte desde la configuración inicial de las instalaciones y las características del material rodante. Con el objetivo de tener una ruta de las acciones realizadas a lo largo del tiempo, situando cada hecho en una línea de tiempo.

Añadir, la información y detalles que aparecen a lo largo de todos los apartados y sub-apartados del punto 3, antecedentes, son facilitados por los distintos representantes entrevistados de las empresas implicadas y abiertas a solucionar el problema.

Por este motivo, los datos pueden ser que no coincidan con la realidad o los obtenidos mediante los ensayos u otras técnicas desarrolladas a lo largo del Trabajo Final de Grado / Carrera.

3.1. CONTEXTO INICIAL DEL PROYECTO

La línea de cercanías R2 Sud de Barcelona (San Vicente – Estación de Francia) ha sufrido una serie de modificaciones, tanto en su trazado y configuración de las infraestructuras, como en el material rodante.

La configuración inicial de la catenaria estaba compuesta por cable de cobre electrolítico, la sección es de 107 mm^2 . Con un tiempo de vida útil estimado en unos 6 años como máximo. Con el tiempo, se calzo la catenaria con unos contrapesos de 1000 kg para compensar el pre-hundimiento del H.C. debido al calor o el frío en el mismo.

Respecto al material rodante, las pletinas de los pantógrafos eran inicialmente de cobre electrolítico, el grosor es de 7 mm. Tarados a 10 kg. La vida útil estimada del desgaste en relación la distancia era de 45.000 km. Lo equivalente a utilización, 2 meses o 3 meses.

Para entender mejor cuales han sido las acciones de cada parte involucrada, se analizaran los antecedentes por separado. Empezando justo en el momento antes de detectar el problema, las acciones llevadas realizadas para intentar solucionar el problema y las acciones futuras que se desarrollaran en los próximos meses.

3.2. OPERADORA DE LA RED

El material rodante más antiguo que circula en cercanías R2 Sud de Barcelona data del año 1993. Periodo en el que empezó a circular la 447, la 450 y la 451. En el año 2005, comenzó un proceso para la modernización y ampliación de la vida útil de la 446.

El material rodante más moderno que circula en cercanías R2 Sud de Barcelona y que presenta mayor problemas de desgaste en las pletinas de los pantógrafos, datadas desde septiembre del año 2008. Momento en el que comenzó a funcionar 5 unidades de la serie CIVIA fabricadas por ALSTOM. Compuestas por la 463, la 464 y la 465.

En el año de 2010, la vida útil de las pletinas en la serie CIVIA no dura ni 15 días. Lo equivalente a menos de 7.000 km. Fechas en las que coincide con la instalación de la catenaria rígida. Esta tiene un descentramiento inicial de ± 15 cm. Se convierte en la primera sospechosa de la causante del problema por parte del operador de la red.

Debido a las obras de ampliación del túnel de *Sants* dirección *Gavà*, la circulación de la línea R2 Sud queda cerrada en el tramo de *Bellvitge* – San Vicente. Significa, que el material rodante solo circula por catenaria aérea. Sin embargo, el desgaste se agrava todavía más. Las pletinas se desgastan en un espacio inferior a 7 días, solo por la parte central de estas (incluso llegan sin tornillos), ya que por los extremos llegan nuevas. El periodo de esta situación anormal estaba comprendido desde el 04 al 27 de Agosto de 2011.

Anécdota, el 18 de Octubre de 2011 llegó la unidad 465209 a revisión con un pantógrafo menos desgaste que el otro. Este dato indicó que en un sentido se desgasta más.

Como medida adoptada para solucionar el problema, se decidió utilizar pletinas de aleación de Cu-Cr-Zr, con un grosor superior, 10 mm. Además, los componentes de la aleación otorgan una dureza de 110 HB al material. Tarados a 9 kg en los CIVIA y a 9,5 kg en los trenes 447. El resultado de esta medida otorga una duración de 5 meses. Los precios de las pletinas cortas es de 36,78 € y las largas de 51,89 €. La fecha de estos actos tuvo lugar el 27 de Octubre de 2011.

El 22 de Noviembre de 2011, Madrid ordenó tarar a 10 kg las pletinas de Cu-Cr-Zr. Se supone que esta decisión estuvo basada en un estudio donde demuestra que los golpes y despegues son mucho menores.

Para encontrar una solución más idónea para todas las partes, se realizaron el 13 de Febrero de 2012 las pruebas con las pletinas *Kasperowski* taradas a 9,5 kg en 6 unidades CIVIA. Monitorizadas por ALSTOM en el tramo de San Vicente a Estación de Francia.

Estas pletinas tienen un coste de 700 € la unidad. Las pruebas terminaron el 02 de abril de 2012. El desgaste era de 17 mm cada 10.000 km. En otros puntos de la red, el desgaste es de 2 mm cada 10.000 km.

Otras pruebas que se realizaron sin resultados satisfactorios fueron la introducción de los alerones 3-08990013 (vida útil de la pletina duraron 2 revisiones). Los alerones anteriores eran los 3-w.08.9105 (vida útil de la pletina duran 4 revisiones). Estos últimos son los que todavía están en uso. El objetivo de esta prueba era eliminar los desgastes asimétricos en los frotadores.

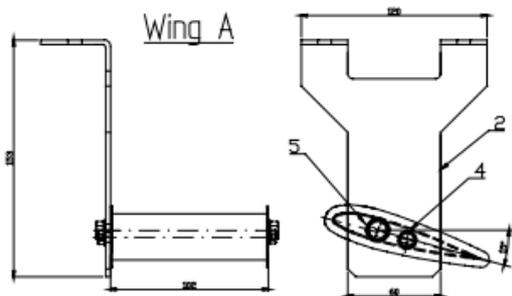


Figura 6: alerón 3-08990013, prueba aerodinámica.

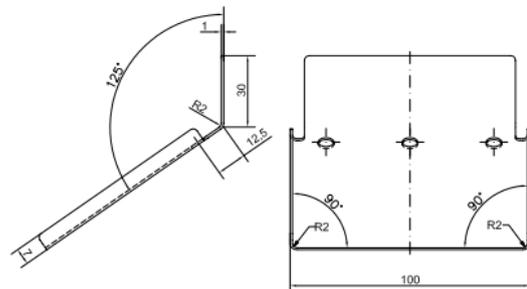


Figura 7: alerón 3-w.08.9105, en servicio.

Se desconoce si colocaron los dos modelos de alerones al mismo tiempo o si por el contrario los utilizaron independientemente. Por otro lado, los alerones modelo 3-w.08.9105 presentan bastantes problemas de flexibilidad, por lo que pierden su función. Por este motivo el fabricante pasó de un grosor de chapa de 1 mm a 2 mm, para evitar deformaciones.

También se realizó otra prueba para determinar la presión adecuada con la intención de minimizar el desgaste mecánico. Esta prueba consistía en configurar la presión de los pantógrafos a un peso determinado. En una composición circulando en doble se taraban 2 pantógrafos a 90 N, 1 a 95 N y 1 a 100 N, de forma que nunca circulaban simultáneamente dos pantógrafos a 90 N, manteniendo las siguientes combinaciones: 90 N – 95 N o 90 N – 100 N.

El ensayo que está programado para los próximos meses, fecha teórica de inicio estipulada para Septiembre de 2014, pretende montar pletinas de grafito en tres fases. Cada fase corresponde a una dureza del grafito diferente, siendo la más dura la primera y la más blanda la última. La intención de esta es primero, limpiar la catenaria de los defectos en la banda de contacto, dejando la menor rugosidad posible. Coste de 0,5 M€ pagados a medias por el operador y el gestor de la red ferroviaria.

3.3. GESTORA DE LA INFRAESTRUCTURA

Los primeros síntomas de desgaste prematuro se detectaron el año 1992. Cuando se localizo partículas de cobre procedente de los pantógrafos y los HH.CC. en el balasto, alrededores de los andenes y los techos de los trenes. Además, las más acusadas eran las vías pares (entrada a Barcelona).

En el año 2002 se realizó un estudio de temperaturas en el H.C. entre la vía 1 y 2. No se llegó a ninguna conclusión por parte de los encargados de tal estudio, aunque se observa muchas oscilaciones de temperaturas. Además de una temperatura media de los HH.CC. diferente entre ellos.

El 01 de Enero de 2005, el gestor de la red asume las competencias del ente público GIF (Gestor de Infraestructuras Ferroviarias, creada en 1996). El H.C. había sido de Cu-ETP hasta 2007 – 2008, periodo en el que se comenzó a instalar la aleación CuAg0,1. La dureza de esta es superior, 60 HB. Durante el transcurso de tiempo del año 2009, se consumió 55.000 kg de cobre. Equivale a 594.000 €. Sin contar con los gastos de mano de obra, maquinaria, etc.

La instalación de la catenaria rígida tuvo lugar entre los años 2008 – 2009. La colocación de esta es únicamente en los túneles, debido a la necesidad de sus puntos de anclaje, demasiado cercanos para colocarlos en tramos descubiertos. La sección del H.C., 150mm². Las ventajas de esta catenaria son la posibilidad de seguir funcionando con micro roturas o desgaste superior al indicado en la norma. El descentramiento de este empezó con ± 15 cm, aunque se fue descentrando de manera intencionada cada vez más.

Respecto la catenaria aérea o flexible, también se realizaron modificaciones en su configuración. Se decidió aumentar la sección, de 107 mm² a 120 mm². Sin embargo, los resultados no fueron satisfactorios, ya que se desgasta igual de rápido las dos secciones. Estos actos suceden entre los años 2009 y 2010.

El día 31 de enero de 2009, debido a las obras del tren de alta velocidad, la línea se modificó y unió con la extinta línea R10 a la vez de dividir su recorrido en 3 sublíneas. Estas líneas pasaron a denominarse R2, R2 Sud y R2 Nord.

Durante el transcurso de tiempo del año 2010, se consumió 100.000 kg de cobre. Equivale a 1,08 M€. Sin contar con los gastos de mano de obra, maquinaria y otros.

Otros detalles menores, pero que pueden ser igual de importantes fueron la forma de engrasar. Antes se realizaba de forma manual, donde un operario procedió a aplicar el engrase con un pincel, pudiendo aplicar más las partes consideradas críticas, como es el caso de los seccionadores.

Desde el año 2011 hasta la fecha de hoy, 03 de Abril de 2014, se aplica con un pantógrafo formado por dos rodillos que aplican el engrase de manera automática, sin control de las situaciones críticas.

Ese mismo año, 2011. La situación se hace insostenible. Debido al gasto de material que se dispara y el problema no parece tener solución tangible. Además comienzan a visionar arcos eléctricos de manera constantes durante largos periodos del trayecto. Además el ruido característico por mala fricción se acentúa. Durante el transcurso de ese mismo año 2011, se consumió 220.000 kg de cobre. Equivale a 2.376.000 €. Sin contar con los gastos de mano de obra, maquinaria y otros.

Los tiempos para cambiar el H.C. son de 2 años de vida, antes duraban incluso 6 años. Además, están dejando que se gaste mucho más de lo que indica la norma debido a la falta de material para poder remplazar los HH.CC. desgastados. En algunas zonas, no aguantan ni 15 meses. Siendo los peores tramos donde para el tren.

El periodo del 04 al 27 de Agosto de 2011, se realizan las obras en el túnel de *Sants*. Debido a este inconveniente, la circulación se queda cerrada en el tramo de San Vicente a *Bellvitge*. Durante este mismo año, y en los siguientes se engrasa la catenaria 2 veces anualmente. Incluso en los túneles de Barcelona se engrasan 1 vez cada 3 meses.

El descentramiento en catenaria rígida que empezó con ± 15 cm, se fue descentrando cada vez más hasta alcanzar los ± 30 cm. Durante el año 2012. Durante el transcurso de tiempo del año 2012, se consumió 250.000 kg de cobre. Equivale a 2,7 M€. Sin contar con los gastos de mano de obra, maquinaria y otros.

En el año 2013, se produjo el primer incidente grave debido al problema de desgaste excesivo en el H.C. Se produjo en *Cornella* en forma de rotura.

Durante el transcurso de tiempo del año 2013, se consumió 120.000 kg de cobre. Equivale a 1.296.000 €. Sin contar con los gastos de mano de obra, maquinaria y otros. Se produjo un descenso el gasto debido a los recortes económicos. En el mismo año de 2013, debido a la falta de material para sustituir el H.C. desgastado, se descalza para evitar la rotura por tensión mecánica.

En el año 2014, se decide volver a instalar H.C. de sección 107 mm^2 debido a que es más barato y ofrece los mismos tiempos de vida útil. El 02 de Abril de 2014, se produjo el segundo incidente grave debido al problema de desgaste excesivo en el H.C. Se produjo en San Vicente en forma de rotura.

3.4. EMPRESAS SUMINISTRADORAS

La empresa encargada de comercializar los pantógrafos y sus recambios, SCHUNK, considera que las pruebas que se realizaran en los próximos meses de verano de 2014, son las más idóneas frente al problema. Esta opinión la fortalecen basándose en las características del grafito. Estas son las siguientes:

- Mayor duración.
- Mantenimiento reducido.
- Reducción del desgaste del hilo de contacto.
- Auto lubricación sin necesidad de utilizar grasa adicional.
- Gastos de montaje reducidos.
- Reducción de los tiempos de parada.
- Baja emisión de ruidos en el tráfico.
- Optimización del reparto de corriente.

Además, refuerzan la teoría con lo que se está llevando a la práctica en el resto de Europa y otros servicios de características similares como es el caso del metro. Ya que la tendencia en todos estos lugares es utilizar los frotadores o pletinas de carbón.

Como caso cercano, utilizan el metro de Barcelona, donde la vida útil de los pantógrafos de grafito se sitúa en unos 7 años. Lo equivalente a 700.000 km.

El fabricante de pantógrafos alemán, proporciono información acerca del mismo problema en las cercanías de Madrid, donde el origen se focalizo en la colocación de catenaria rígida. Debido a que colocaban un soporte cada 25 metros, los cuales tuvieron que cambiar la colocación cada 6 metros, debido que la viga de aluminio tenía una flecha mayor de lo esperado.

Por otro lado, la empresa encargada de suministrar el HH.CC. a la infraestructura mantenida por el gestor de la red y utilizara por el operador de la red ferroviaria, corresponde a LAFARGA. Empresa fundada en 1808 por la familia LACAMBRA y vendida en 1985 a las familias los *Guixà* y los *Fisas*.

Los nuevos propietarios decidieron obtener el cobre de la chatarra, reciclando mediante distintos procesos, en lugar de obtener el cobre de las minas. Sin embargo, aseguran que producen cobre electrolítico o de las características que se les pida en cada momento.

3.5. EXPERIMENTACIÓN CON KASPEROWSKI

Las ilustraciones, opiniones, conclusiones y planteamiento de una posible solución planteados dentro de este apartado, pertenecen al equipo de investigación que analizo el problema el año 2012.



Figura 8: pletina Kasperowski desgastada, alzado.



Figura 9: pletina Kasperowski desgastada, perfil.

En las figuras 8 y 9 se observa que el desgaste producido en la mesilla de grafito en apenas 6 semanas (aproximadamente 25.000 km). El desgaste aceptado en este tipo de frotador para mantener los niveles de seguridad para el viajero y la infraestructura, han sido de 1 mes aproximadamente de duración. Siendo su coste de 380 € por pantógrafo cambiado.

El desgaste que se observa tiene forma de "w" con una anchura aproximada de 20 cm en la parte central. Esto es debido a que el pantógrafo, al paso por la catenaria rígida, no se desliza adecuadamente y "salta" literalmente de un lado a otro de la mesilla.

El objetivo es el siguiente: encontrar un método de regulación de presión electrónico, accionado a distancia y a voluntad, para conseguir una menor presión del contacto pantógrafo catenaria rígida y por lo tanto, un menor desgaste.

El método: instalarlo en una circulación y simular el recorrido de una de ellas, comparando el desgaste con un CIVIA no remodelado, y comprobar su eficacia.

Conclusión fuera del informe: después del corte de circulación por los túneles de *Sants* en el año 2011, previo a este estudio, se concluyo que el error no podía estar en la catenaria rígida.

3.6. ANÁLISIS EN TIEMPO REAL DE LA INTERACCIÓN

Para el análisis en tiempo real se desarrollo un pantógrafo instrumentado que consiste en unos acelerómetros instalados en la suspensión de la mesilla, para medir la aceleración vertical de la mesilla. Además de galgas extensiométricas situadas bajo los extremos de los frotadores, para medir la fuerza de contacto entre el pantógrafo y la catenaria. A más de medir el descentramiento del hilo de contacto.

No obstante existían algunos condicionantes. Complejidad técnica del sistema, alto coste de mantener la prueba siempre en funcionamiento y un diseño no homologable para el servicio comercial de los pantógrafos sobre las locomotoras.

Otro sistema con el mismo fin. OMHS, sistema capaz de monitorizar el funcionamiento del pantógrafo y la catenaria. Se trato de un sistema no intrusivo, ya que utiliza un sistema de medida óptica, por lo que no necesita de contacto con los elementos. Este sistema tiene la ventaja de no necesitar modificar la estructura del pantógrafo (homologación).

En los orígenes, el 100% de la catenaria está formada por configuración flexible. Por este motivo el esfuerzo estático es de $100\text{ N} \pm 10\%$.

En la actualidad, la red ferroviaria de cercanías en España está compuesta por configuración flexible y rígida. Catenaria rígida en la R2 corresponde entre un 15% y un 20%. El esfuerzo estático recomendado para este caso es de entre 60 N y 70 N.

Esta prueba se realizo con un esfuerzo menor, 90 N. Frente los 100 N.

Los análisis de esta prueba reflejan que se producen la mitad de despegues y golpes del pantógrafo contra la catenaria con un esfuerzo estático de 90 N. Además, la vida de las bandas de contacto (frotadores) pasó de 2 semanas a más de 2 meses. (Datos según el estudio mostrado al equipo de esta memoria).

Por otro lado, respecto la velocidad de las locomotoras. La velocidad media aumento de 43,6 km/h (con $F_s = 100\text{ N}$) a 50,6 km/h (con $F_s = 90\text{ N}$).

No obstante, el flash por despegue es más intenso con un esfuerzo estático de 90 N.

La conclusión del equipo de esta memoria, determino que con el tiempo es contraproducente tener flashes más intensos. Debido que esto significa que la deformación por fundición es mayor, generando una rugosidad más pronunciada e intensa. Dicha rugosidad generará más despegues en el resto de pantógrafos. Siendo un problema que se auto-realimenta.

LAFARGA , obtiene el cobre de la chatarra	1985	
Entran en servicio la 447 , la 450 y la 451	1993	1992 ADIF, detecta los primeros desgastes
Nuevo material en el H.C.: CuAg0,1	2007	01-01-2005 ADIF asume las competencias de GIF
Catenaria rígida . Desc.: ±15 cm. S: 150mm ²	2008 / 09	2008 Entran en servicio la 463 , 464 y 465 de ALSTOM
Nuevo recorrido de la R2 Sud de BCN	31-01-2009	2009 Cambian 55.000 kg de Cu en HH.CC.
Pletinas de la 463/4/5 no superan los 15 días	2010	2009 / 10 Catenaria aérea. Sección 107mm ² → 120mm ²
Aplicación automática del engrase en HHCC	2011	2010 Cambian 100.000 kg de Cu en HH.CC.
Momento auge del problema. Arcos eléctricos	2011	08-2011 Circulación cerrada . Desgaste en 7 días
Unidad 465209 . 1 pan. menos desgastado	18-10-2011	09-2011 Engrase del H.C.: 2 veces/año. Túnel: 4 veces
Pletinas Cu-Cr-Zr (10 mm). Tara: 10 kg	22-11-2011	27-10-2011 Pletinas Cu-Cr-Zr (10 mm). Tara: 9 kg
Cambian 220.000 kg de Cu en HH.CC.	2011	2011 Vida útil H.C.: 2 años . Otros sitios: 15 meses
Prueba , pletinas Kasperowski . Tara: 9,5 kg	13-02-2012	2012 Catenaria rígida . Desc.: ±30 cm
Cambian 250.000 kg de Cu en HH.CC.	2012	20-04-2012 Fin de las pruebas Kasperowski . Fracaso
Rotura de HH.CC. en Cornella	2013	2013 Prueba , alerones en pantógrafos. Fracaso
Cambian 120.000 kg de Cu en HHCC. Crisis .	2013	2013 Descalzan las catenarias por falta de material
Rotura de HH.CC. en San Vicente	02-07-2014	2014 Catenaria aérea. Sección 120mm ² → 107mm ²
		09-2014 Prueba , pletinas de grafito . Coste: 0,5 M€

Tabla 10: cronología de los antecedentes de las partes implicadas en el problema de desgaste descontrolado en la línea de cercanías R2 Sud de Barcelona.



4. SITUACIÓN ACTUAL

A continuación se analiza las partes más interesantes involucradas en el supuesto problema, denominadas como situación actual.

4.1. CLIMATOLOGÍA

El siguiente apartado tenía como objetivo inicial estudiar y comparar todos los aspectos medioambientales de la línea R2 Sud de *Rodalies* con otras líneas de la empresa operadora de la red ferroviaria.

Para ello se selecciono la aérea metropolitana de Valencia y Madrid, además de Barcelona. Debido a las características de las líneas férreas y el volumen de pasajero que desplaza a lo largo del año.

No obstante, se dejó abandonada esta línea de análisis debido a la falta de información tanto de las líneas sanas a estudiar, como de la propia línea R2 Sud de *Rodalies*.

Además, los datos climatológicos a los que se tuvo acceso pertenecen a las estaciones meteorológicas repartidas a lo largo del territorio. Por ello, datos climáticos como por ejemplo el viento, no se pueden dar como válidos. Debido que para medir el viento, se debería instalar el sensor en la misma línea férrea, a la misma altura de la catenaria.

Siguiendo con el movimiento en masa del aire, el viento, se planteo la posibilidad de un mal trabajo de los pozos de ventilación de los túneles, en el caso de Barcelona. Ya que como comento los responsables de la infraestructura y se observo en el seguimiento de la locomotora, las vías de entrada son las que más sufren el problema del desgaste de los materiales que interactúan.

Es decir, es posible que debido a la extensión de los túneles y las modificaciones en alguna de las estaciones, los pozos de ventilación hayan quedado ineficaces, ya sea por las dimensiones del volumen de aire a desplazar o por la obstrucción de algún elemento arquitectónico.

Por lo tanto, la compensación de las diferencias de presión entre dos puntos ha podido cambiar, tanto en distancia, como en cantidad.

No obstante, esta última idea solo son suposiciones de lo que podría estar ocurriendo, por lo que podría ser una línea de investigación interesante.

4.2. DESCRIPCIÓN DE LA CATENARIA

La infraestructura ferroviaria es el conjunto de todos aquellos elementos comprendidos en la vía, electrificación, señalización y comunicaciones, que permiten la circulación fiable y segura de trenes.

En el sistema ferroviario se denomina catenaria al tendido de cables situados de forma longitudinal sobre la vía y soportado por postes, que permite alimentar con energía eléctrica a las locomotoras y a las unidades de tren equipadas con motores eléctricos, ya sean éstos de corriente continua o corriente alterna. Mediante la catenaria se consigue la electrificación de las líneas férreas.

También se puede utilizar el término "Línea Aérea de Contacto" o abreviadamente L.A.C., que incluiría en este proyecto la catenaria flexible y la catenaria rígida.

El nombre de catenaria proviene de la forma geométrica característica de la curva que forma un hilo flexible sometido a su propio peso, que es la que tiene el cable del que cuelga la verdadera línea de alimentación, que debe quedar casi perfectamente paralela al plano de los carriles. En este caso hablaríamos de catenaria flexible.

La catenaria rígida constaría un hilo de contacto parecido, aguantado por una viga de aluminio sujeta en techos. Normalmente de túneles y estaciones cubiertas.

En la red ferroviaria de ancho convencional (1668 mm) de la península ibérica existen dos tipos de catenaria. La tipo CA-160 que correspondería al concepto de catenaria para velocidad máxima de 160 km/h. Y la tipo CA-220 que correspondería la catenaria para velocidad máxima de 220 km/h. Como este proyecto estudia la línea R2 Sud de cercanías de Barcelona, y en este ámbito solo están instaladas las catenarias CA-160, nos limitaremos a continuación a explicar exclusivamente este tipo de catenaria.

4.2.1. Definiciones

A continuación se detalla las definiciones de los elementos más importantes de una catenaria. Aunque esto no significa que el resto de elementos sean prescindibles, por ello en el "Anexo C" se detalla un informe completo sobre las definiciones de la catenaria.

- **Aislamiento:** Capacidad dieléctrica de algunos elementos que evitan el paso de corriente. En la catenaria los aislamientos más utilizados suelen ser el aire atmosférico y materiales sólidos.
- **Atirantado:** Conjunto de elementos con los que se consigue el descentramiento de la catenaria.

- **Cable de retorno:** Conductor aislado que cierra el circuito eléctrico con la subestación.
- **Catenaria:** Conjunto de conductores aéreos formado por el sustentador, el hilo, las péndolas y sus alimentaciones.

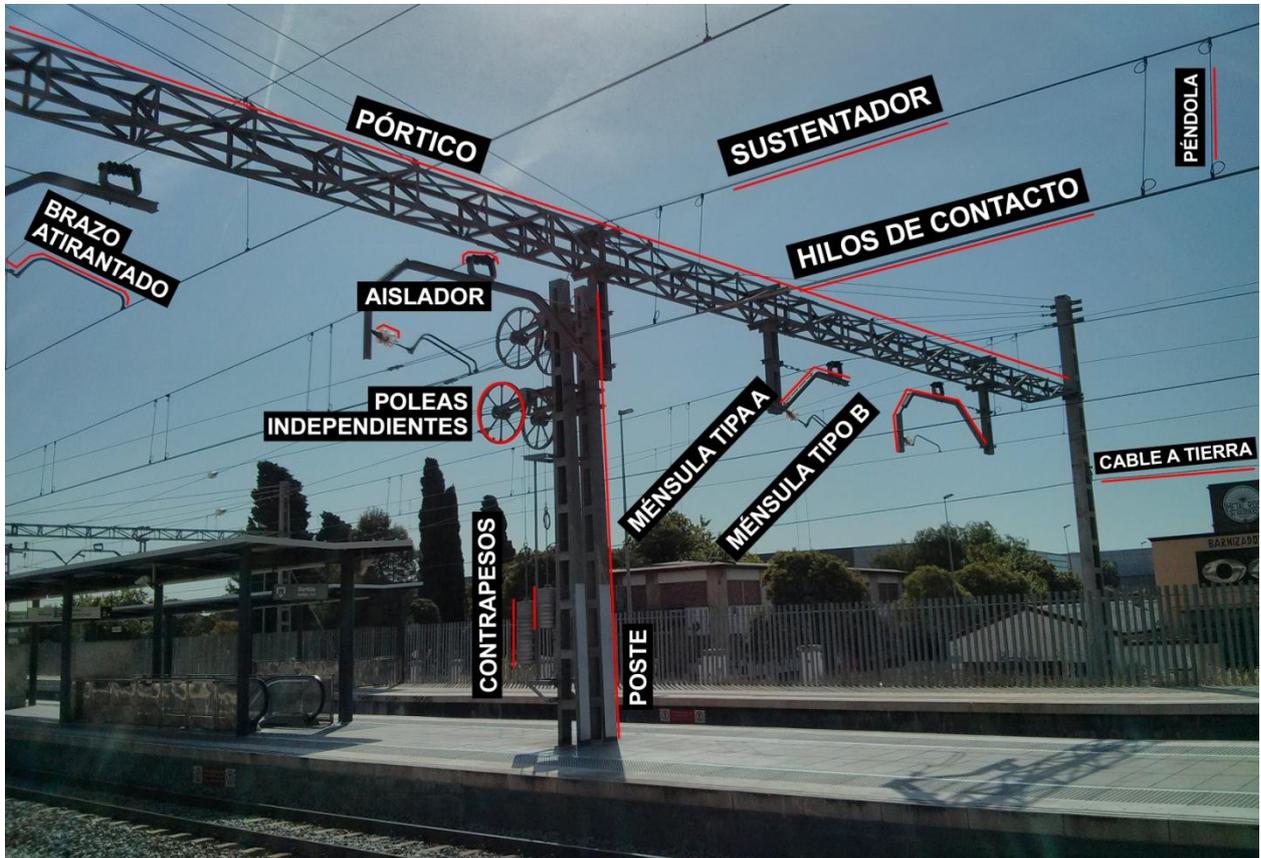


Figura 10: Partes de la catenaria.

- **Descentramiento:** Separación en el plano horizontal, entre el eje del pantógrafo y el eje de los hilos de contacto de la catenaria, con objeto de evitar el desgaste puntual del pantógrafo.
- **Equipo de compensación mecánica:** Mecanismos que absorben las contracciones y dilataciones, que se utiliza para mantener constante la tensión mecánica de la catenaria.
- **Feeder de alimentación:** Conductor aéreo montado en la misma estructura que la Línea Aérea de Contacto, que se utiliza para alimentar diferentes secciones de la línea.
- **Feeder de refuerzo:** Conductor aéreo montado al lado de la Línea Aérea de Contacto y que se conecta a ella a intervalos frecuentes para aumentar su sección.
- **Flecha de los hilos de contacto:** Diferencia entre las alturas en el extremo y en el centro del vano de los hilos de contacto.
- **Hilo de contacto:** Conductor eléctrico de una catenaria que frota con el pantógrafo.

- **Línea aérea de contacto:** Sistema para el suministro de energía eléctrica a los vehículos de tracción ferroviarios mediante el pantógrafo.
- **Ménsula:** Estructura metálica utilizada para suspender y atirantar la catenaria. Puede estar colocada sobre postes o bien sobre pórticos rígidos, y pueden ser rectas, acodadas o de estructura triangular tubular.
- **Péndola:** Componente utilizado para suspender el hilo de contacto del sustentador.
- **Poste:** Estructura metálica fijada al terreno que sirve de apoyo, tensando y atirantado de la línea aérea de contacto.
- **Seccionador:** Dispositivo interruptor utilizado en instalaciones eléctricas que sirve para abrir o cerrar un circuito eléctrico. Está compuesto por un bastidor metálico sobre el que van los aisladores de apoyo de los contactos y la cuchilla o elemento móvil accionando por la correspondiente timonearía.
- **Sustentador:** Cable conductor de una catenaria que soporta el hilo de contacto mediante péndolas. Esta apoyado en las ménsulas de los postes.
- **Vano:** Distancia entre dos soportes o perfiles consecutivos de la línea aérea de contacto.
- **Zona Neutra:** Parte de una línea de contacto seccionada por los extremos para impedir la entrada de corriente eléctrica y poder realizar trabajos con seguridad.
- **Cantón de compensación mecánica:** Tramo independiente en el que se divide la catenaria para mantener una tensión mecánica constante ante las variaciones térmicas.

4.3. CARACTERÍSTICAS DE LA CATENARIA TIPO CA-160

A partir del año 1956, en que fue aprobado por el Ministerio de Obras Públicas el “Proyecto de Línea Aérea de Contacto tipo RENFE” (Actualmente ADIF), se fueron electrificando paulatinamente las líneas de ancho Ibérico. La ejecución se realizó de forma estandarizada y siguiendo las especificaciones técnicas que a continuación se explican. Actualmente siguen vigentes con alguna modificación y modernización.

4.3.1. Características funcionales

TIPO DE CORRIENTE Y TENSIÓN ELÉCTRICA DE ALIMENTACIÓN.

La catenaria está diseñada para ser alimentada en corriente continua donde se admiten las siguientes variaciones.

TENSIÓN	VOLTAJE /V
Nominal	3.000
Máxima	3.600
Mínima	2.000
No permanente máxima	3.900

Tabla 11: rango de tensión de la catenaria CA-160.

Los valores de tensión de la tabla 11 son los definidos en la norma UNE-EN 50163.

CONDICIONES AMBIENTALES.

- I. Temperatura ambiental:** La limitación de las temperaturas ambientales máximas y mínimas tiene por objeto establecer la longitud máxima del cantón de compensación mecánica de la catenaria.

TEMPERATURA AMBIENTAL	/°C
Mínima	-15
Máxima	+45

Tabla 12: temperatura ambiental.

- II. Temperatura máxima de los conductores:** Al aumentar la temperatura, se reduce la tensión límite de fluencia de los conductores. Para evitar que dicha tensión descienda por debajo de un mínimo, entrando los conductores en régimen plástico, se limita la temperatura máxima que puede alcanzar éstos a los siguientes valores.

TEMPERATURA MÁXIMA EN CONDUCTORES	/°C
Sustentados	80
Hilos de contacto de Cobre	80
Hilos de contacto de Cu-Ag	100

Tabla 13: temperatura máxima de los conductores.

III. **Viento:** La limitación en la velocidad del viento tiene por objeto establecer el vano máximo de la catenaria. En este caso se toman los siguientes valores.

CONDICIONES DE HELADA	VELOCIDAD MÁXIMA / km·h ⁻¹
Sin manguito de hielo	120
Con manguito de hielo de 9 mm espesor	72

Tabla 14: condiciones de helada.

La velocidad del viento influye en la deformación transversal de la catenaria, y en particular, en su flecha máxima horizontal. Si ésta es elevada, puede provocar problemas en la toma de corriente, al salirse el hilo del área de contacto con el pantógrafo.

En condiciones normales, se establece una limitación de las velocidades del viento compatibles con la longitud máxima del vano. Para velocidades superiores será necesario reducir dicho vano en función de los cálculos correspondientes.

4.3.2. Características de diseño

CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS Y MECÁNICAS.

I. Altura de hilo de contacto.

SITUACIÓN	ALTURA DE LOS HILOS DE CONTACTO /m
Trayectos y estaciones	5,30
Pasos superiores y túneles con gálibo reducido	4,90
Pasos a nivel	6,00
Altura mínima de diseño	4,60

Tabla 15: alturas del hilo de contacto.

La altura de los hilos de contacto deberá ser lo más constante posible a lo largo de la línea con el fin de mantener una buena toma de corriente a través del pantógrafo. No obstante, en caso de existencia de túneles, pasos superiores o pasos a nivel, la transición de altura en los hilos de contacto se realizará con pendientes referidas al plano de la vía no superiores a las siguientes.

ZONA DE TRANSICIÓN	PENDIENTE MÁXIMA HILOS DE CONTACTO /‰
En el vano de comienzo y en el final	1
En el resto	2

Tabla 16: pendientes.

En el caso de que existan varios pasos superiores con gálibos reducidos y próximos entre sí, se mantendrá entre ellos la misma altura de los hilos, haciendo las transiciones solamente antes del primero y después del último.

II. Altura de la catenaria.

SITUACIÓN	ALTURA NOMINAL DE CATENARIA /m
Trayectos y estaciones	1,400
Zonas de gálibo estricto (Túneles, pasos superiores, etc.)	0,853 - 0,462 - 0,263

Tabla 17: altura nominal de la catenaria.

III. Descentramiento.

Situación	Lugar de medida	Descentramiento /cm
Recta	En los apoyos	+ 20 (Alternativamente a cada lado del eje de la vía)
Curva	En los apoyos	20 (Hacia el exterior de la curva)
	En el centro del vano	< 10 (Hacia el interior de la curva)

Tabla 18: descentramiento.

IV. Vano: Los valores máximos de vanos a utilizar en función de la altura de catenaria.

ALTURA DE CATENARIA /m	VANO MÁXIMO /m
1,400	60
0,853	45
0,462	30
0,263	20

Tabla 19: altura de catenaria.

Esta limitación es debida al condicionante de la longitud mínima de la péndola en el centro del vano, donde deberá comprobarse la configuración de los elementos que la componen verificando que su montaje pueda realizarse.

El valor máximo de los vanos en curva dependerá del radio y la flecha (0,30 m) de ésta según el siguiente cuadro.

SITUACIÓN	RADIO CURVA /m	VANO MÁXIMO /m
Recta	-	60
Curva: Flecha de la vía 0,30 m.	$R > 1500$	60
	$1500 > R > 1260$	55
	$1260 > R > 1042$	50
	$1042 > R > 844$	45
	$844 > R > 667$	40
	$667 > R > 510$	35
	$510 > R > 375$	30
	$375 > R > 260$	25
	$260 > R > 167$	20

Tabla 20: valor del vano según el radio de la curva.

Esta limitación es debida a la necesidad de mantener los valores del descentramiento dentro de los márgenes indicados en el apartado anterior.

V. Diferencia longitud entre vanos consecutivos: Esta limitación tiene por objeto limitar el desequilibrio entre las tensiones mecánicas del sustentador e hilos de contacto a ambos lados del apoyo.

DIFERENCIA DE LONGITUD	VALOR /m
Máxima	10
Agujas	5

Tabla 21: diferencia longitud entre vanos consecutivos.

VI. Cantón de compensación mecánica: La longitud máxima del cantón serán los siguientes según la situación.

SITUACIÓN	LONGITUD MÁXIMA /m
Recta	1.200
Tramo con curvas	900

Tabla 22: Longitud del cantón.

El tipo de anclaje y la ubicación de los puntos fijos a utilizar en función de la longitud del cantón de compensación mecánica, son los siguientes.

LONGITUD DEL CANTÓN /m	TIPO DE ANCLAJES A CADA LADO	UBICACIÓN PUNTO FIJO
$600 < C < 1200$	2 Compensados	$\frac{1}{2}$ Cantón
$C < 600$	1 Compensado + 1 No compensado	-

Tabla 23: Especificación del cantón.

Se montarán latiguillos entre sustentador e hilos de contacto en el punto fijo cuando la diferencia de las tensiones mecánicas a ambos lados de dicho punto sea $>$ del 5%.

VII. Flecha de los hilos de contacto: La flecha máxima que deberán adoptar los hilos de contacto en el centro del vano será la siguiente. Siendo L = Longitud del vano (m).

FLECHA	VALOR /m
Máxima	$0,6xL/1000$

Tabla 24: Valor de flecha.

VIII. Gálibo de postes: En vía general el gálibo de los postes, tomando como referencia la distancia mínima entre las caras enfrentadas del poste y del carril más próximo a él, se ajustará a los siguientes valores.

SITUACIÓN DEL POSTE	VALOR NOMINAL /m
En recta o en exterior de curva	1,90
En interior de curva de $R > 300$ m	1,90
En interior de curva de $R < 300$ m	2,10

Tabla 25: Gálibo de postes.

En estaciones, con perfil sencillo, el tipo de poste a colocar en entrevías se seleccionará de acuerdo con la tabla 26.

DISTANCIA ENTRE EJES DE VÍAS /m	TIPO DE POSTES
$D > 6,00$	Cualquiera
$6,00 > D > 5,70$	X y H
$5,70 > D > 5,20$	Sólo H

Tabla 26: Otros datos sobre postes.

En estaciones con pórticos rígidos con dintel tipo C, solo se utilizarán postes tipo L y R.

La colocación de postes en andenes se realizará respetando el gálibo siguiente.

GÁLIBO DE POSTE MÍNIMO /m	OBSERVACIONES
5	Siempre y cuando el andén supere dicha dimensión

Tabla 27: Observaciones de gálibo.

En puntos singulares la colocación de los postes se realizará de acuerdo a lo dispuesto en la correspondiente Instrucción Técnica de Gálibos editada y actualizada.

IX. Contraflechas en los postes.

POSTE	VALOR
Poste X en recta	0.05 m \pm 1cm
Poste X en curva exterior	0.08 m \pm 1cm
Poste X en curva interior	0.00 m
Poste L o R en pórtico rígido	0.00 m
Poste Z en pórtico funicular	0.08 m

Tabla 28: Contraflechas en los postes.

X. Nº de vanos de los seccionamientos: En el cuadro siguiente se indica el nº de vanos de los seccionamientos en función de su longitud.

LONGITUD DE LOS VANOS /m	Nº DE VANOS DEL SECCIONAMIENTO
≥ 50	3
< 50	4

Tabla 29: Nº de vanos de los seccionamientos.

Cuando los vanos son menores de 50 m se realizan los seccionamientos en 4 vanos, con el fin de conseguir suficiente longitud de solape de las catenarias.

XI. Agujas aéreas: Como criterio general los tipos de agujas aéreas a utilizar serán los siguientes.

SITUACIÓN	TIPO DE AGUJA AÉREA	POSICIÓN EQUIPO DE AGUJA
Vía general + vía desviada	Tangencial/cruzada	P-90/P-50
Vía general + vía de escape	Tangencial/cruzada	P-90/P-50
Vía general + vía secundaria de circulación	Tangencial/cruzada	P-90/P-50
Vía secundaria + vía secundaria	Cruzada	P-50

Tabla 30: Criterio sobre las agujas.

XII. Equipos de compensación mecánica: La tipología de equipos a utilizar para la compensación mecánica será la siguiente.

SITUACIÓN	TIPO DE EQUIPO
Cielo abierto y zonas con gálibo suficiente	Poleas y contrapesos
Zonas con gálibo reducido/Andenes de estación	Polipastos o tipo muelle

Tabla 31: Equipo de compensación.

La forma de realizar la compensación de las catenarias será la siguiente.

TIPO DE CATENARIA	TIPO DE COMPENSACIÓN
De vía general	Independiente para el sustentador y para los hilos de contacto
De escapes	
De vía secundaria de circulación	
De vía secundaria	Solo para el hilo de contacto

Tabla 32: Tipología de compensación.

XIII. Tensiones de regulación mecánica: Las tensiones mecánicas a utilizar serán las siguientes.

Para el sustentador:

	Cu 150
Tense de montaje /N	13974,48
Razón de regulación	1:5
Tense real /N	(Peso total de las rodela) + (Peso de las piezas auxiliares que influyen en la compensación) x (la relación de transformación de las poleas)
Número de rodela	9 RT19 + 1 RT20

Tabla 33: Tensión mecánica para el sustentador.

Para el hilo de contacto:

	HC 107	HC 120
Tense de montaje /N	2 x 10296,98	2 x 11767,98
Razón de regulación	1:5	1:5
Tense real /N	*	*
Número de rodela	14 RT19	16 RT19

Tabla 34: Tensión mecánica para el h.c.

* Tense real = (Peso total de las rodela) + (Peso de las piezas auxiliares que influyen en la compensación) x (la relación de transformación de las poleas)

XIV. Distancia entre catenarias en seccionamientos: El valor nominal de la distancia entre catenarias en seccionamientos de lámina de aire será de 400 mm.

El valor nominal de la distancia entre catenarias en seccionamientos de cantón será de 250 mm.

CRITERIOS DE AISLAMIENTO.

I. Distancia de aislamiento entre partes en tensión de la línea aérea de contacto y tierra o material rodante: Para evitar la formación de arco eléctrico, los valores normales sin polución necesarios son 150 mm (ESTÁTICA), 50 mm (DINÁMICA).

La distancia de aislamiento estática es la que debe considerarse suponiendo la catenaria en reposo y el vehículo parado. La distancia de aislamiento dinámica es la que debe considerarse suponiendo la catenaria en movimiento (por paso del pantógrafo o viento) y el vehículo también en movimiento.

II. Distancia de aislamiento entre catenarias: Para evitar la formación de arco eléctrico los valores mínimos necesarios según la ubicación de las catenarias son los siguientes.

SITUACIÓN	DISTANCIA DE AISLAMIENTO /mm
Entre catenarias de un seccionamiento de lámina de aire	400
Entre colas de anclaje o cruce de catenarias	300

Tabla 35: Distancia de aisladores.

III. Aisladores: Todos los aisladores de la catenaria deberán cumplir las siguientes condiciones:

- Línea de fuga mínima de 300 mm.
- Niveles de aislamiento de los aisladores: 90 kV en tensión soportada a impulsos tipo rayo en seco, 35 kV en tensión soportada a frecuencia industrial bajo lluvia.

4.3.3. Componentes del sistema

COMPOSICIÓN DE LA CATENARIA.

La composición de la catenaria dependerá del tipo de vía y de la circulación que soporta. A continuación se indican los distintos casos.

I. En vías generales, en escapes entre vías generales y en vías secundarias con andén y circulación importante:

COMPOSICIÓN	CANTIDAD	MATERIAL	SECCIÓN /mm ²
Cable sustentador	1	Cu	150
Hilo de contacto	2	Cu	2x107
Péndolas equipotenciales	Variable	Cu	25

Tabla 36: Material en vías generales.

II. En vías secundarias:

COMPOSICIÓN	CANTIDAD	MATERIAL	SECCIÓN /mm ²
Cable sustentador	1	Acero	72
Hilo de contacto	1	Cu	107
Péndolas	Variable	Cu varilla	19,6

Tabla 37: Materiales en vías secundarias.

En las vías secundarias de circulación de alta densidad de circulación podrán utilizarse dos hilos de contacto.

POSTES.

I. Postes de vía general.

TIPO	CONDICIONES DE UTILIZACIÓN	
	Nº DE MÉNSULAS	ALTURA DEL PLANO MEDIO DE RODADURA SOBRE EL TERRENO /m
X2B	1	< 0,85
X2B-ALG	1	> = 0,85
X3B	2	< 0,85
X3B-ALG.	2	> = 0,85

Tabla 38: Alturas de postes.

II. Postes de estación.

TIPO	CONDICIONES DE UTILIZACIÓN	
Z1	Anclaje de catenaria vía general Equipo de ménsula doble (para 2 vías)	Compensación independiente Con altura de catenaria < 1,40 m
Z2	Equipo de ménsula doble	Con altura de catenaria < 1,40 m
Z2A	Equipo de ménsula doble	Con altura de catenaria 1,40 m
Z3	Equipo con tres ménsulas	En agujas aéreas
L y R	Equipo de pórtico rígido	Pórticos tipo B y C

Tabla 39: Condiciones de utilización.

III. Postes de anclaje.

TIPO	CONDICIONES DE UTILIZACIÓN
XF	Para anclajes sin compensar de dos catenarias en doble vía
XGa	Para anclajes sin compensar de una catenaria

Tabla 40: Condiciones para postes de anclaje.

IV. Postes especiales: Cuando no exista gálibo suficiente para utilizar postes X, Z, L ó R se utilizarán los postes tipo PG1 o PG2 tanto en vía general como en estaciones.

V. Postes para pórticos rígidos: Cuando sea necesaria la instalación de pórticos rígidos se utilizarán postes tipo L ó R especialmente diseñados para este fin.

MACIZOS.

Se denomina así a la figura geométrica prismática realizada de hormigón en masa, que soporta las estructuras que forman la Línea Aérea de Contacto.

La definición más clásica de macizo indica que es un prisma realizado de hormigón que se utiliza para fijar un poste al terreno.

Los macizos se pueden clasificar en:

- según el terreno (**Desmonte**, cuando la plataforma de la vía está en terreno llano o en trinchera o *Terraplén*, cuando la plataforma está en terraplén).
- según la función (de *fundación*, como caso general y de *anclaje* como contrapeso de los anclajes de catenaria y de punto fijo).
- según su forma (*Paralelepípedo*, *Trapezoidal*).

MÉNSULAS.

I. En vía general.

TIPO DE CONJUNTO DE MÉNSULA	CONDICIONES DE UTILIZACIÓN
Ca1RTTG	En recta o en exterior de curva, con atirantado dentro
Ca10RTTG	En recta o en interior de curva, con atirantado fuera o cola de anclaje
Ca11RTTG	En recta o en interior de curva, con atirantado fuera o cola de anclaje con tirante a compresión

Tabla 41: Condiciones para ménsulas.

II. En pórticos rígidos.

TIPO DE CONJUNTO DE MÉNSULA	CONDICIONES DE UTILIZACIÓN
Ca1RTE-PRB Ca1RTE-PRC 1/2/3	En recta o en exterior de curva, con atirantado dentro
Ca10RTE-PRB Ca10RTE-PRC 1/2/3	En recta o en interior de curva, con atirantado fuera o cola de anclaje

Tabla 42: Condiciones para ménsulas en pórticos rígidos.

III. Especiales de ménsulas doble.

TIPO DE CONJUNTO DE MÉNSULA DOBLE	CONDICIONES DE UTILIZACIÓN
Cn6	Para postes Z1 a Z4 /fija)
Cn6-1	Para postes Z5 a Z6 bis (fija)
Cn6-2	Para postes PG1 - 240/260/280 (fija)
Cn6a	Para postes Z1 a Z3 (giratoria)
Cn6a-1	Para postes PG1 - 240/260/280 (giratoria)

Tabla 43: Condiciones para ménsulas especiales.

4.3.4. Alimentación y retorno

ALIMENTACIÓN.

- I. **En estaciones con subestación:** Desde el pórtico de salida de la subestación se instalará un *feeder*, formado, como mínimo, por dos cables de Cu de 240 mm², para cada vía general de estación y se conectará a cada catenaria a través de un seccionador. Para las catenarias de vía general de ambos trayectos se instalarán *feederes* formados bien por dos cables desnudos de Cu de 240 mm² o por dos cables de Cu de 300 mm², en función de las necesidades de energía precisas y se conectarán a las catenarias en los seccionamientos de lámina de aire de entrada y salida, a través de seccionadores. El resto de catenarias de vías secundarias se alimentarán de las catenarias de vía general a través de seccionadores. En zonas de vías secundarias donde se produce carga y descarga de material la alimentación se realizará a través de seccionadores de puesta a tierra.
- II. **En estaciones sin subestación:** Las catenarias de vía general de los trayectos a ambos lados de la estación son las que alimentarán las catenarias de la estación a través de seccionadores en los seccionamientos de lámina de aire. El resto de catenarias de vías secundarias se alimentarán de las catenarias de vía general más próximas a través de seccionadores. En zonas de vías secundarias donde se produce carga y descarga de material la alimentación se realizará a través de seccionadores con puesta a tierra.
- III. **En trayectos:** La alimentación de las catenarias de los trayectos se realizará a través de los *feederes* de las subestaciones.

CONEXIÓN DE ALIMENTACIÓN.

- I. **Feeder de acompañamiento:** Cuando sea necesario *feeder* de acompañamiento se instalarán conexiones desde este al cable sustentador aproximadamente cada 300 m mediante conjuntos diseñados en el presente libro. Si la característica de explotación de la catenaria así lo aconseja, se realizará los cálculos de consumo de potencia para establecer la óptima distancia entre las conexiones.
- II. **En seccionamientos de compensación:** Se instalarán dos conexiones entre los sustentadores mediante conjuntos de conexión en la proximidad de los semiejes. También se instalarán conexiones entre el sustentador de la catenaria a anclar y los hilos de contacto que se elevan mediante conjuntos de alimentación en la proximidad de los semiejes.

RETORNO.

El retorno de la corriente de tracción se realizará a través de los carriles conectando al negativo de la subestación mediante la instalación de varios cables, de secciones normalizadas, 150 mm², 185 mm², 240 mm², 300 mm² siendo preferibles los más bajos por su mayor densidad de corriente, fácil manejo y conexionado.

4.3.5. Protecciones

- I. **Cable de tierra:** Se utilizará cable de tierra tipo La-110 o bien L-110 para unir todos los postes de electrificación. Cada 3 km aproximadamente se realizará una bajada para toma de tierra.
- II. **Toma de tierra:** Se realizará el correspondiente estudio geológico necesario para determinar la cantidad de picas necesarias incluso la necesidad de utilizar electrodos profundos, siendo el mínimo recomendado de 6 picas según se indica en el libro L.A.C. CA-160.
- III. **Protecciones en pasos o estructuras superiores:** Se instalarán viseras o vallas de protección en las estructuras situadas por encima de la catenaria y próximas a ella (pasos superiores, puentes, etc.) según recomienda la norma UNE-EN 50122-1.
- IV. **Descargadores de antenas (pararrayos):** Se instalarán en la proximidad de los puntos fijos conectados por un lado a la catenaria y por el otro al cable de tierra y a tierra mediante las grapas de conexión indicadas en el libro L.A.C. CA-160.
- V. **Señales:** En caso necesario se utilizarán las siguientes señales indicadoras y de peligro.
- VI. **Protecciones de seguridad en postes "x", "z", "l", "r":** Se instalarán protecciones de seguridad antiescalada así como las señales de advertencia de peligro necesarias en los postes situados en las estaciones y en zonas frecuentadas por personas o en aquellos postes que se evidencie un elevado riesgo de electrocución.
- VII. **Cantones de protección:** Se instalarán cantones de protección a la entrada y salida de las estaciones con dos seccionamientos de lámina de aire, para el establecimiento de las correspondientes zonas neutras, debiendo llevar dichos seccionamientos los seccionadores telemandados.

4.3.6. Catenaria rígida

Aunque para la catenaria rígida no existe una normativa específica, tiene que cumplir las medidas y tolerancias anteriormente descritas en los apartados sobre catenaria flexible.

La catenaria rígida se distingue de las otras en que el elemento que transmite la corriente eléctrica no es un cable, sino un carril rígido. Lógicamente para mantener este carril rígido paralelo a la vía, ya que su peso es muy grande, no basta tensarlo o suspenderlo de otro cable con más flecha, sino que es necesario aumentar el número de apoyos en los que hay que suspenderlo, para disminuir la distancia entre ellos.

Para suspender una catenaria rígida se usan soportes que producen vanos (distancia entre apoyos) de 10 m a 14 m, mientras que el vano para catenarias flexibles está en torno a los 50 m ó 60 m. Dicha limitación restringe su uso a los túneles, estructuras o sitios de muy escaso gálibo, donde otros sistemas se muestran ineficaces.

El carril empleado actualmente consiste en una barra de aluminio que lleva encastrado en su parte inferior un hilo de contacto de cobre. La transmisión de energía se realiza por el aluminio y el cobre, pero sólo el cobre debe entrar en contacto con el pantógrafo. Esta gran sección transversal del perfil permite prescindir del *feeder* de acompañamiento



Figura 11: Catenaria rígida.

Cada perfil va provisto en su parte plana de orificios, de modo que la formación de agua de condensación dentro del perfil, que siempre contiene gases disueltos o elementos agresivos, pueda ser evacuada o evitada por medio de la aireación.

Cada tramo tendido está separado uno del otro por un solape de catenaria rígida que permite dilataciones y la perfecta circulación del pantógrafo. Estos solapes se pueden utilizar también como separación eléctrica en el caso que se necesite.

El perfil de aluminio se tiende en secciones de una longitud máxima de 500 m, estableciendo un punto fijo en la parte central de cada uno de estos tramos. Se logrará de tal manera que cada tramo de 500 m se dilate por sus extremos.

La sujeción de este sistema de catenaria rígida sobre las vías se formaliza mediante un herraje de perfil laminado, que soporta un aislador cilíndrico y que a su vez soporta el carril de aluminio. Al conjunto de herraje y aislador se le llama soporte unificado.

Cada uno de estos herrajes se sujeta a la bóveda o techo del túnel por medio de fijaciones roscadas, que permiten una regulación exacta de la altura respecto de las vías. Se disponen de forma transversal al eje de la vía y centrados respecto a este de forma tal que permitan que el aislador de sujeción pueda fijarse en cualquier punto de su longitud con objeto de lograr los descentramientos que se deseen de la catenaria rígida respecto al eje de la vía.

Los herrajes se colocan a una distancia a determinada previamente mediante replanteo, estimada en alrededor de 12 m.

Las agujas aéreas se constituyen solapando un tramo de catenaria rígida a la catenaria de la vía a la que se da continuidad.

CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES, EQUIPOS Y MONTAJES.

- **Gálibo:** La altura necesaria entre la cota mínima de pantógrafos y la obra civil que se necesitamos para implantar la catenaria rígida es de 250 mm.
- **Solapes:** La longitud de los solapes en catenaria rígida son del orden de 5 m ó 6 m, tanto en seccionamientos como en agujas.
- **Sección conductora:** La sección conductora en aluminio para el perfil bajo análisis es de 2214 mm², lo que representa una equivalencia en cobre por igualdad de resistencia óhmica en sección de 1408 mm². Con un hilo de contacto de sección de 150 mm², la sección total sería de 1558 mm².
- **Valores electromecánicos:**

ÁREA DE LA SECCIÓN DE CARRIL DE ALUMINIO /mm ²	2214
PESO POR METRO LINEAL /kg	5,8
MOMENTO DE INERCIAL J _x (VERTICAL) /cm ⁴	339
MOMENTO DE INERCIAL J _y (HORIZONTAL) /cm ⁴	113
MOMENTO RESISTENTE W _x (VERTICAL) /cm ³	67,3
MOMENTO RESISTENTE W _y (HORIZONTAL) /cm ³	26,6
MODULO DE ELASTICIDAD / kg·mm ⁻²	7033
COEFICIENTE DE DILATACIÓN	0,0000238
RESISTENCIA DEL ALUMINIO / ohmios·mm ² ·m ⁻¹	0,0285

Tabla 44: Valores electromecánicos.

- **Altura sobre el carril:** La altura mínima de la catenaria sobre el carril debe ser de 4,60 m.

- **Soportes:** Como ya se ha indicado anteriormente se normaliza un soporte rígido formado por un herraje que se sujeta a la bóveda del túnel, un aislador y unos espárragos roscados que tienen como misión la regulación en fino de la altura del carril de catenaria rígida.

Este soporte unificado deberá permitir unos descentramientos de 250 mm hacia cualquiera de los lados del eje de la vía y tendrá siempre las mismas dimensiones. Estos descentramientos se lograrán fijando la pinza en la posición deseada.

Cuando se deba soportar la catenaria rígida en túneles distintos de los tubulares y de mayor altura, se colocarán ménsulas o pórticos rígidos construidos mediante perfiles laminados, especialmente de angular de 60 y en estos pórticos o ménsulas se fijarán las barras unificadas sobre cada eje de plano de rodamiento. La catenaria rígida generalmente deberá resbalar longitudinalmente por las mordazas de los aisladores.

- **Seccionamientos:** Las barras de catenaria rígida se suministrarán en longitudes previamente determinadas, y en primera aproximación del orden de 12 m. Cada barra se sujetará por un solo soporte. Este soporte se situará a una distancia de 3,5 m de uno de los extremos de cada barra (tolerancia de $\pm 0,3$ m). Se preferirá acercar el soporte al extremo de la barra que deja el tren en su sentido de marcha habitual aunque esta condición no es imprescindible.

Cada tramo de catenaria rígida tendrá una longitud máxima de alrededor de 41 barra embridadas entre sí, equivalente a 492 m aproximadamente. A cada tramo continuo de barra entre sí, lo llamaremos seccionamiento. Cada seccionamiento comportará un “punto fijo” en el punto medio de su longitud y podrá dilatarse por sus extremos. La continuidad entre un seccionamiento y el siguiente se logrará mediante el solape de sus barras extremas, para que el conjunto pueda dilatarse libremente. Descontando estos solapes cuyo valor será determinado durante el replanteo de la instalación, y que será de un valor aproximado de 6 m, la longitud útil de un seccionamiento queda reducida a 486 m aproximadamente.

En los puntos donde se efectúa dicho solape, la disposición de los soportes se verá alterada. Las dos barras que se solapan tendrán un extremo doblado para formar una rampa que evite golpes en el pantógrafo. Estas barras serán suministradas con la curvatura adecuada. En ningún caso ésta se hará en obra.

La separación entre barras en los solapes será de 170 mm entre ejes si debe de haber separación eléctrica y de 110 mm si van puenteadas. Su forma de sujeción permite una fácil variación de esas cotas si las circunstancias aconsejan variarlas.

- **Descentramientos:** Todos los soportes se colocarán de forma que el perfil laminado queda centrado con el eje del plano de rodamiento. Así se permitirá un deslizamiento hacia ambos lados de la catenaria rígida, la única excepción de esta regla será la de los soportes que no permitan descentramientos.

El descentramiento normal máximo se establece en 200 mm aunque los soportes permitan descentramientos de hasta 250 mm para poder corregir posibles errores de montaje. El procedimiento para dar un valor a la onda de zigzagueo de la catenaria será el siguiente: Cuando se conozca la longitud total de un seccionamiento (distancia entre ejes de solapes) se dividirá por 5 si está comprendida entre 400 m y 486 m, por 4 si está entre 300 m y 400 m, por 3 si está entre 200 m y 300 m, por 2 si está entre 50 m y 200 m. El número resultante dará la distancia en metros entre los puntos de mayor descentramiento hacia uno y otro lado del eje de la vía. En los soportes más próximos a esos puntos se establecerán descentramientos máximos de 200 mm promediando el resto de los soportes. En las curvas se procederá como si de una recta se tratase. En los seccionamientos de longitud menor de 60 m se dispondrán los descentramientos en la forma que aconseje la posición de los soportes intermedios, procurando si es posible uno hacia cada lado, y en los tramos muy cortos uno hacia un solo lado o sin descentramientos.

- **Agujas aéreas:** En las agujas aéreas, una barra de catenaria rígida pasará de largo y otra barra tendrá su origen en la aguja. Normalmente pasará de largo el perfil de aluminio que sigue la vía recta, mientras que tendrá su origen en la aguja, el perfil correspondiente a la vía desviada.

El replanteo de la posición de los soportes sobre una aguja se realizará de acuerdo al procedimiento a establecer en Obra, y teniendo en cuenta los condicionantes específicos de cada situación. Las agujas siempre se colocarán puenteadas, no se utilizará nunca como seccionamiento eléctrico. La barra que tiene su origen en la aguja llevará rampa en su extremo.

- **Puntos fijos:** Como ya se ha analizado en apartado anteriores, cada seccionamiento deberá estar fijado en su parte media central a la obra civil, mediante un dispositivo que frene sus desplazamientos longitudinales para que a partir de estos puntos dilate hacia sus extremos.
- **Hilo de contacto:** El hilo de contacto a utilizar será normalizado de 107 mm², 120 mm² ó 150 mm², siendo preferible que su sección sea ovalada.
- **Aislamiento:** Como ya se ha indicado en capítulos anteriores, los perfiles de catenaria rígida pueden cubrirse en toda su longitud por una funda dieléctrica de material plástico diseñada para adaptarse perfectamente al perfil. Dicha funda deberá colocarse en las siguientes situaciones: Siempre que entre la barra rígida y la obra civil, o cualquier accesorio de la instalación no sometido a tensión haya un aislamiento de aire inferior a 150 mm. Siempre que se pase bajo una zona con humedades o goteras. Cuando se monten soportes que den como resultado la ubicación de la barra unificada muy próxima al carril de la catenaria.
- **Vigas soporte:** Se instala a la entrada y salida de los túneles para amortiguar las oscilaciones de la catenaria.
- **Toma de tierra:** Para llevar a cabo los trabajos de mantenimiento en la catenaria rígida y poder dar tierra a la instalación, se usan unos estribos de toma de tierra fijados en cada armazón de sustentación para suspender la barra de toma de tierra.

Las principales ventajas de la catenaria rígida son:

- Elevada fiabilidad.
- Mantenimiento reducido.
- Bajas exigencias de gálibo.
- Gran capacidad de transporte de corriente.
- Elevada seguridad para las circulaciones.

En la figura siguiente se muestra las estaciones y trayectos donde está instalada la catenaria rígida en la zona de Barcelona.

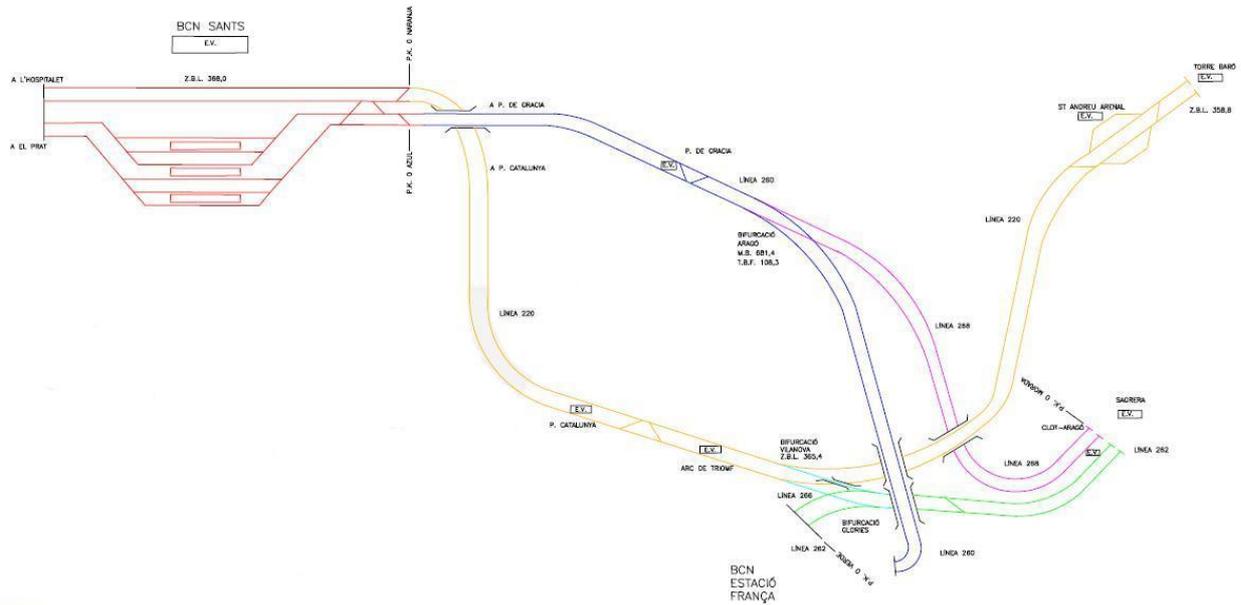


Figura 12: Àmbit de instal·lació de catenaria rígida.

4.4. DESCRIPCIÓN DEL PANTÓGRAFO

La corriente eléctrica pasa del hilo de contacto de la catenaria a los motor/es del coche motor mediante el pantógrafo. En el caso de todos estos trenes, se trata de pantógrafos asimétricos. También se conocen con el nombre de medios pantógrafos o pantógrafos Z. La característica principal de este consiste en la buena captación de corriente, sobre todo a velocidades altas de circulación.

El nombre de pantógrafo proviene de un instrumento formado por cuatro listones que forman un paralelogramo. Este dispositivo articulado permite el desplazamiento vertical de la cabeza del pantógrafo. Este está sometido a un conjunto de esfuerzos mecánicos, dinámicos y eléctricos. Para ello, está compuesto por otras partes que refuerzan al paralelogramo.

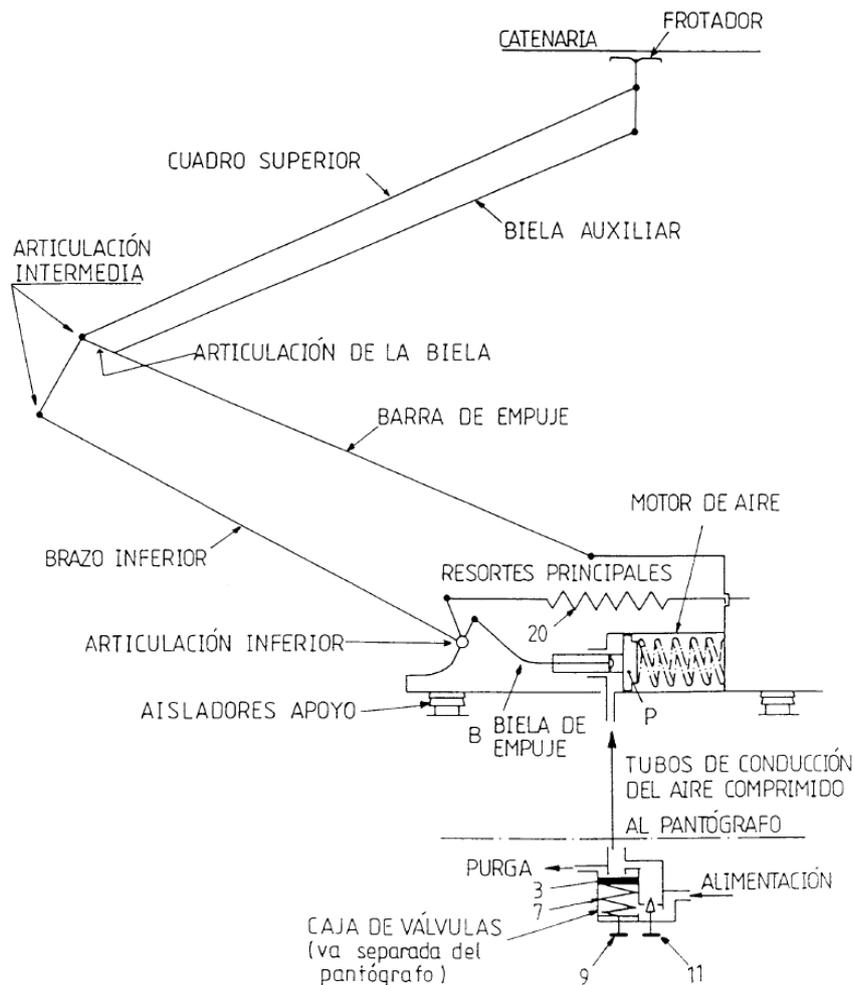


Figura 13: esquema de funcionamiento.

Resumiendo, el pantógrafo es la parte que está en contacto con la catenaria y sirve de nexo de unión para la transmisión de energía del hilo de contacto hacia los motores de la locomotora.

Se pueden clasificar en dos variedades. Los pantógrafos neumáticos, la suspensión funciona con aire y su principal característica es la ligereza. Los pantógrafos eléctricos, la suspensión funciona con un muelle estático.

Para entender mejor la función de cada elemento, se han añadido un seguido de definiciones de las partes señaladas.

4.4.1. Definiciones

Un pantógrafo está formado por un conjunto de partes iguales y/o similares en todos los modelos, ya que la función a desempeñar es la misma para todos.

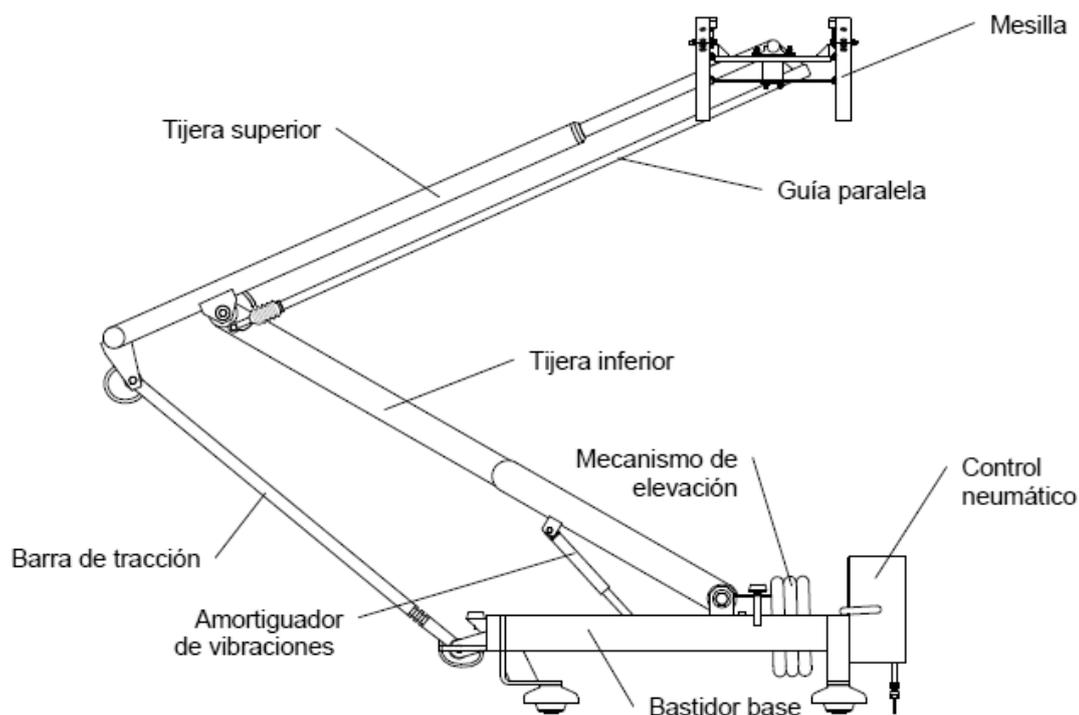


Figura 14: partes de un pantógrafo, corresponde al modelo WBL-8512-L.

- **Bastidor base:** armazón metálico formado por perfiles huecos rectangulares soldados entre ellos. Sirve para fijar y relacionar entre si los distintos elementos (tijera inferior, fuelle neumático, barra de tracción, amortiguadores de vibraciones, aisladores, conexión de alta tensión, caja de control neumático y apoyos de los frotadores).

- **Trencillas de corriente:** se utilizan para puentear, evitar el paso de corriente a través de los cojinetes.
- **Tijera inferior:** transmite la presión de la valona a la tijera superior. Están montados los componentes de curvas de levas con dispositivos de fijación para los cables del accionamiento del fuelle neumático, amortiguadores de vibraciones, barra guía paralela y trencillas de corriente.
- **Tijera superior:** Monta la mesilla, los soportes de palieres para el apoyo de la articulación de rótula, la barra de tracción, la tijera inferior y las trencillas de corriente.
- **Barra de tracción:** pieza fundamental del pantógrafo. Sin este punto de apoyo el pantógrafo no podría levantarse. La barra de tracción y un sistema de levas permite que la curva de presión a cualquier altura tenga la misma presión aerostática. Ya que la altura de la catenaria varia debido a los distintos gálibos.
- **Mesilla:** son las piezas que captan en primera instancia la corriente de la catenaria. Apoyada sobre la tijera superior, contiene suspensores, frotadores, alerones, pletinas de soporte, entre otros.
- **Frotador:** también mencionado durante la memoria como pletina. Forma parte de un conjunto mayor llamado mesilla. Este elemento está directamente en contacto con el hilo de contacto. Existen varios materiales para este mismo elemento. Cobre, acero, aluminio, grafito y grafito con impregnaciones metálicas.
- **Barra guía-paralela:** permite que la mesilla tenga el movimiento natural de esta, sin embargo limita el ángulo de giro de la misma, ya que si no giraría un círculo completo sobre si misma. Este sistema consigue un desgaste uniforme en ambos frotadores. Esta barra dispone de un amortiguador que evita los giros bruscos durante la marcha.
- **Mecanismo de elevación:** eleva el pantógrafo. Ubicado entre el bastidor base y la tijera inferior. Compuesto por una fuente neumática conectado al control neumático, seguido de una válvula solenoidal hacia el compresor.
- **Control neumático:** regula la fuerza de presión. Compuesto por un filtro, una válvula reguladora (mantiene la presión constante entre 0,1 MPa a 0,7 MPa), una válvula de seguridad y un regulador de presión.
- **Amortiguación del pantógrafo:** dos amortiguadores de vibraciones son los encargados de esta función. Evita despegues y golpes contra la catenaria.

4.5. CARACTERÍSTICAS DEL PANTÓGRAFO

A continuación se va explicar las características de los pantógrafos de SCHUNK y FAIVELEY, debido a la frecuencia de paso de estos modelos por la línea R2 Sud de *Rodalies*.

4.5.1. SCHUNK WBL 8512-L

Los trenes modulares tipo CIVIA llevan montados dos pantógrafos en el coche C3 [12].

Altura mínima con aisladores /mm	505±10
Distancia de aislamiento /mm	125
Altura mínima de trabajo sobre la posición de reposo /mm	150
Altura máxima de trabajo sobre la posición de reposo /mm	2300
Máxima altura posible sobre la posición de reposo /mm	2450
Ancho de la mesilla /mm	1.860±10
Altura de la mesilla /mm	290±1
Largo total en posición de reposo /mm	2.455±20
Peso total sin aisladores /kg	126±5
Largo de los frotadores /mm	918±1 y 1021±1
Distancia entre frotadores /mm	371±5
Material del frotador	4 un. tiras de cobre electrolítico, 7 x 25 mm
Aisladores de apoyo	3 un., 6 KV
Altura /mm	125
Peso	3 x 1,50 kg.
Voltaje de régimen /Vdc	3.000
Corriente de régimen /A	1.000
Corriente máxima /A	3.000
Corriente máx. con tren parado /A	250
Temperatura ambiente /°C	-25 / +70
Desplazamiento lateral a la altura máxima de trabajo y a una fuerza lateral de 300 N, según DIN EN 50206-2 /mm	30
Masa estática reducida en el tubo superior /kg	33.5
Fuerza estática de origen /N	100±10
Fuerza estática posible /N	Desde 40 a 150
Mesilla	Frotadores suspendidos individualmente, en paralelo.
Constante del muelle /Nm	20.480 (±10%)
Velocidad máxima bajo buenas condiciones de la catenaria / km./h	160

Tabla 45: características técnicas, pantógrafo SCHUNK.

SISTEMA DE ACCIONAMIENTO POR FUELLE NEUMÁTICO	
Aire comprimido	mín. 5.5 bar
Tiempo de elevación hasta la altura máxima de trabajo	(6 ó 10) segundos
Tiempo de bajada desde la altura máxima de trabajo	(6 ó 10) segundos

Tabla 46: características del fuelle, pantógrafo SCHUNK.

4.5.2. FAIVELEY AM32AV U

Este modelo de pantógrafo está instalado en las locomotoras de los trenes 447 y 451.

PARÁMETROS	VALORES
Tensión de catenaria Nominal /V	3.000
Tensión de catenaria Máxima /V	3.600
Tensión de catenaria Mínima /V	2.000
Intensidad de captación en amperios, Arranque /A	1.900
Intensidad de captación en amperios, Permanente /A	1.550
Velocidad máxima de captación / km/h	160
Esfuerzo estático sobre el hilo de contacto /kg	10
Peso /kg	270
Longitud bandas de contacto, Exteriores /mm	1.021
Longitud bandas de contacto, Interiores /mm	918
Longitud bandas de contacto, Extrema desarrollada /mm	238
Paleta de contacto (frotador), Longitud total /mm	1.950
Paleta de contacto (frotador), Parte recta /mm	1.100
Alturas de funcionamiento de pantógrafo sobre el nivel superior del aislador, Altura de plegado /mm	371
Alturas de funcionamiento de pantógrafo sobre el nivel superior del aislador, Mínima altura de trabajo /mm	471
Alturas de funcionamiento de pantógrafo sobre el nivel superior del aislador, Máxima altura de trabajo /mm	2.751
Alturas de funcionamiento de pantógrafo sobre el nivel superior del aislador, Altura máxima /mm	2.851
Alturas de funcionamiento de pantógrafo sobre el nivel superior del aislador, Desarrollo máximo /mm	2.480
Alturas de funcionamiento de pantógrafo sobre el nivel superior del aislador, Altura del aislador sobre el techo del vehículo motor /mm	144
Tipo de mando, Presión máxima /kg·cm ⁻²	10
Tipo de mando, Presión mínima /kg·cm ⁻²	5
Tipo de mando, Consumo aproximado	2,6 litros aire/maniobra
Tipo de mando	Neumático

Tabla 47: características técnicas, pantógrafo FAIVELEY.

TIEMPO DE ACCIONAMIENTO	
Subida hasta (1.500 ±50) mm	(7 ±1) segundos
Descenso desde 1.500 mm	(6 ±1) segundos
Punto de inflexión antes de 1.500 mm	(3 ±1) segundos

Tabla 48: tiempo de accionamiento, pantógrafo FAIVELEY.

4.5.3. Comparación entre modelos de pantógrafo

De los diferentes trenes analizados, se observan dos marcas de pantógrafos. Los pantógrafos de la marca SCHUNK, con el modelo semitijera WBL-8512-L. Por el otro lado, interviene la empresa FAIVELEY, con el modelo unipaleta AM32AV U, el modelo más antiguo.

En el "Anexo D" se puede observar los planos de conjunto de cada uno de los modelos analizados en el estudio comparativo.

Las diferencias entre los pantógrafos de ambas marcas son las siguientes.

BASTIDOR BASE.

El bastidor tiene la función de soportar a todos los elementos que conforman el pantógrafo, además de dotar de estabilidad en fuerzas laterales. Aunque hay elementos destinados a absorber esa torsión.

I. En el caso del SCHUNK: Tiene tres puntos de apoyo, con sus respectivos aisladores. Los tres puntos de apoyo le permiten que nunca cojee el pantógrafo, por lo que hay que vigilar más sus los ángulos de inclinación.

Las dimensiones genéricas son, ancho 950 mm y largo 800 mm. Más estrecho y corto que su competidor. Teniendo en cuenta que tiene menos puntos de apoyo, a priori presenta menos estabilidad.

II. En el caso del FAIVELEY: Dispone de cuatro puntos de apoyos sobre la locomotora con sus respectivos aisladores. Además, el conector de aire comprimido cuenta con su propio aislador eléctrico.

Las dimensiones genéricas son, ancho 1460 mm y largo 1000 mm. Más puntos de apoyo y más distanciados entre ellos, presenta mayor estabilidad.

Estas dos diferencias en el bastidor, incapacita la colocación de los pantógrafos fuera de las locomotoras para las cuales han sido diseñados. No obstante, si se podría hacer las modificaciones que fueran necesarias para poder colocarlos fuera de su planteamiento inicial.

DIMENSIONES.

Los dos pantógrafos presentan diseños distintos, esto incluye las dimensiones de trabajo y reposo de los mismos sean también diferentes, a pesar de que la catenaria es la misma.

Para la realización de la tabla 49 se han utilizado los datos técnicos ofrecidos en páginas anteriores y los planos del "Anexo D". Obteniendo una variación entre ambas fuentes. Los datos en negrita son obtenidos a través de los planos y/o mediciones sobre el objeto real.

DATOS TÉCNICOS	SHUNK /mm	FAIVELEY /mm
Altura mínima sobre el tren	545 ±10	515
Altura mínima de trabajo sobre la posición del tren	695 ±10	615
Altura máxima de trabajo sobre la posición del tren	2.845	2.875
Máxima altura posible sobre la posición del tren	3.045	2.995
Largo total en posición de reposo	2455 +20	2645

Tabla 49: Comparación, dimensiones.

- I. **En el caso del SCHUNK:** Tiene un menor altura de trabajo útil sobre la catenaria, con una diferencia de 30 mm. Tal diferencia se puede considerar menospreciable, ya que tiene margen suficiente sobre la altura máxima de la catenaria. Además, la altura final del pantógrafo depende del techo de la unidad móvil sobre la que está montada. Pasa el caso contrario en la altura mínima.
- II. **En el caso del FAIVELEY:** Dispone de un rango de trabajo mayor que el pantógrafo de la competencia. No obstante, es 190 mm más largo y no puede llegar a una altura posible sobre la posición del tren tan alta como el otro.

Las diferencias vistas sobre las dimensiones de los pantógrafos no implican que la interacción entre la catenaria y el pantógrafo sea mala. Ya que hay que considerar factores como la altura de la locomotora en la que van montados o la amplitud de la suspensión de las mismas.

ESTRUCTURA.

Tal y como se puede observar en el “Anexo D”, reportaje fotográfico de los pantógrafos, las estructuras entre ambos son diferentes. Sobre todo la tijera superior y la tijera inferior.

- I. **En el caso del SCHUNK:** La tijera superior como la inferior, está formada por tubos soldados y lacados. El diámetro de los tubos que forman estas tijeras son bastante más grandes que en el caso de FAIVELEY.

La tijera superior necesita de dos tirantes para reforzar la estructura, con tal de evitar que se abra la estructura.

- II. **En el caso del FAIVELEY:** La tijera superior está formada por barras macizas soldadas. La tijera inferior es un tubo recto.

La forma de realizar las estructuras es diferente, por lo que la aerodinámica entre ellos actúa y se comporta de manera distinta.

AERODINÁMICA.

La aerodinámica de una estructura es tan importante como el resto de piezas que la componen, ya que el comportamiento de dicha estructura de distintas velocidades no es la misma, siendo las altas velocidades las más influyentes en este campo.

- I. **En el caso del SCHUNK:** Dispone de cuatro alerones para realizar esta función. Además, tal y como se indica en los antecedentes (apartado 3) de esta memoria, se realizó pruebas con otra variación de alerones, los cuales generaban un desgaste el doble de rápido debido al incremento de la presión sobre el hilo de contacto.

El objetivo de los alerones es estabilizar la mesilla en el plano horizontal, para conseguir un desgaste igualitario en las dos bandas de frotadores. Aunque actualmente no se consigue tal efecto.

- II. **En el caso del FAIVELEY:** No dispone de elementos específicos para esta función. Aunque la forma de la estructura de este, se prevé que ofrezca una menor resistencia al viento. Debido que el grosor de la estructura y el número de tubos de grandes dimensiones es menor.

A pesar de que la aerodinámica entre ambos pantógrafos es diferente, los pantógrafos han funcionado bien en tiempos pasados y están funcionando bien en otras zonas de la geografía española. Lo cual no es un motivo único que afecte al problema.

MATERIALES.

La aleación de de las diferentes piezas se desconoce. No obstante, se conoce que los pesos entre los dos pantógrafos son diferentes.

DATOS TÉCNICOS	SHUNK	FAIVELEY
Peso total con aisladores /kg	130,5 ±5	270
Peso aisladores /kg	3 un. x 1,5	-

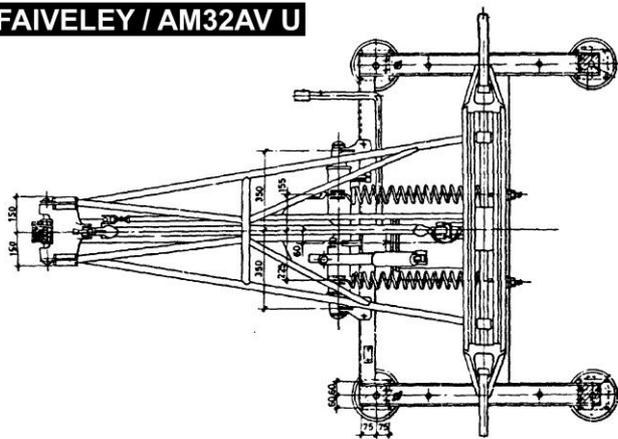
Tabla 50: Comparación, pesos.

- I. **En el caso del SCHUNK:** Utiliza tubos y estructuras huecas para aligerar el peso. Fabricados en aluminio. Aunque también utiliza algunos elementos de fijación y/o soportes fabricados en acero.
- II. **En el caso del FAIVELEY:** Se desconoce el material de la estructura, aunque se predice que es de aluminio o alguna aleación de aluminio. Se conoce que utiliza un mayor número de elementos de fijación y otros, fabricados en acero.

Dicho incremento de elementos fabricados en acero y la utilización de piezas macizas (barras en la tijera superior) conlleva a un incremento del peso considerable del conjunto.

La densidad del acero ronda los 7,8 g/cm² y la densidad el aluminio ronda los 2,7 g/cm².

FAIVELEY / AM32AV U



SCHUNK / WBL 8512-L

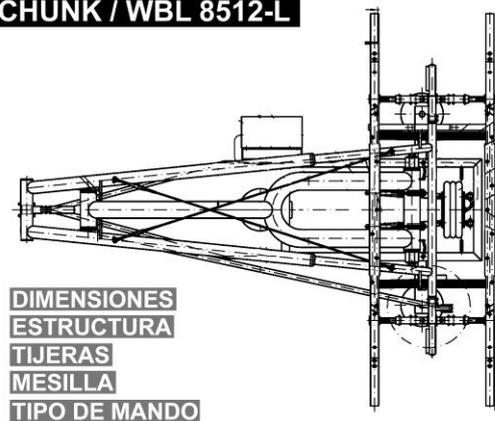


Figura 15: Comparación, plano, planta.

TIPO DE MANDO.

Independientemente de los tiempos que requiere cada sistema para elevar o descender la mesilla del pantógrafo, es más importante los tipos de mandos que utiliza. Cada sistema tiene sus ventajas y desventajas.

Antes, hay que hablar de la suspensión en términos genéricos.

Las variables de la amplitud y frecuencias dependen del camino y la velocidad del vehículo, influyendo las oscilaciones. Los sistemas de suspensión se diseñan para amortiguar las oscilaciones más altas (perjudiciales) y minimizar los efectos de las otras oscilaciones más bajas.

El objeto suspendido adquiere movimiento si sobre él se realiza una fuerza. En el caso del mundo ferroviario se encuentran dos objetos suspendidos, la mesilla del pantógrafo y el hilo de la catenaria.

Si el pantógrafo se encuentra una protuberancia en el recorrido de la catenaria (flechas, puntos duros, rugosidad del hilo, etc.) el apoyo de poca inercia reacciona con facilidad y se mueve en dirección vertical copiando el perfil de la protuberancia. Sin embargo, no pasa lo mismo con el cuerpo pesado, ya que ofrece más resistencia.

- I. **En el caso del SCHUNK:** Utiliza un fuelle neumático (o valona) hecho de neopreno para garantizar el funcionamiento del pantógrafo. El sistema requiere de un conjunto de válvulas que regulan el aire comprimido, de tal modo que la mesilla realiza una presión entre 40 N a 150 N, con una sensibilidad de 0,5 kg. Además, el amortiguador de vibraciones garantiza el punto de apoyo necesario para que todo el sistema suba.

Por lo tanto, este sistema consiste en un amortiguador para las vibraciones y un fuelle neumático, que realiza la función de levantar el conjunto y de un muelle (resorte) cuando el tren está en marcha. El inconveniente del fuelle [17] es el tiempo de respuesta que tiene frente a un despegue o un golpe de la mesilla del pantógrafo contra la catenaria.

Nunca conseguirá actuar con suficiente rapidez y precisión para controlar el golpe o el despegue. Debido que recuperar la posición de equilibrio nunca es instantáneo.

Una desventaja importante es la presión de inflado, ya que repercute directamente en la capacidad de la valona en evitar la transmisión de ondulaciones en el conjunto. Una presión excesiva endurece la valona y esta rigidez dificulta la absorción y empeora la suspensión.

II. En el caso del FAIVELEY: También utiliza aire a presión para la suspensión del conjunto. Debido que el amortiguador necesita de aire a presión para funcionar, de tal manera que pueda subir o bajar el pantógrafo cuando se requiera. Además, este amortiguador controla los golpes y los despegues. No obstante, dos muelles le ayudan a garantizar esta función.

De tal manera, la mecánica de este sistema funciona igual que en un automóvil. La suspensión está formada por un amortiguador que recupera la posición de equilibrio del conjunto en caso de golpe o despegue lo más rápido posible y dos muelles que se encargan de absorber parte de la energía de estas perturbaciones, además de ayudarlo a levantar al conjunto.

El inconveniente de los muelles (resorte de acero en espiral) es la pérdida de la constante del mismo, ya que con el tiempo y el uso los materiales se envejecen y pierden sus propiedades.

Otro inconveniente (a priori) en este caso es debido a las diferentes alturas de la catenaria y la variedad entre catenaria rígida y catenaria flexible. Porque se fabrican de acuerdo al peso de la carga (en este caso, la fuerza negativa que realiza la catenaria).

Se sabe que la catenaria realiza una fuerza cero en su vertical gracias a los contrapesos y diseño de la catenaria flexible. No obstante, esta última catenaria puede absorber parte de la fuerza vertical ascendente del pantógrafo. No se puede decir lo mismo de la catenaria rígida. Por lo tanto, este pantógrafo realiza una fuerza superior en catenaria rígida, lo que se traduce en mayor rozamiento y un descontrol mayor de las oscilaciones. Resultado, más posibilidades de realizar flashes en catenaria rígida.

MESILLA.

La parte que más diferencias acumula los dos pantógrafos es la mesilla.

Para la realización de la tabla 51 se han utilizado los datos técnicos ofrecidos en páginas anteriores y los planos del "Anexo D". Obteniendo una variación entre ambas fuentes. Los datos en negrita son obtenidos a través de los planos y/o mediciones sobre el objeto real.

I. Estructura: En el caso del FAIVELEY se dispone de una mesilla unipaleta, que balancea en un eje central, el cual el giro está limitado por la barra guía paralela. Esto supone que las dos bandas de frotadores (ya sea formado por dos frotadores a cada lado o uno, como es el caso de los frotadores de grafito) trabajan de manera conjunta, por lo que el movimiento y las perturbaciones de una banda afectan a la otra.

En el caso del SCHUNK se dispone de dos bandas de frotadores independientes, las cuales permiten que mientras una esta rebotando, la otra no se ve afectada por el mal funcionamiento de la anterior.

En el caso del SCHUNK, no tienen bandeja central para engrasar la catenaria a su paso. No obstante, el taller de mantenimiento de Madrid realizo una modificación en uno de sus pantógrafos, en la cual le incorporaron dos bandejas parciales para realizar pruebas de funcionamiento. No se conocen los resultados de dicha prueba.

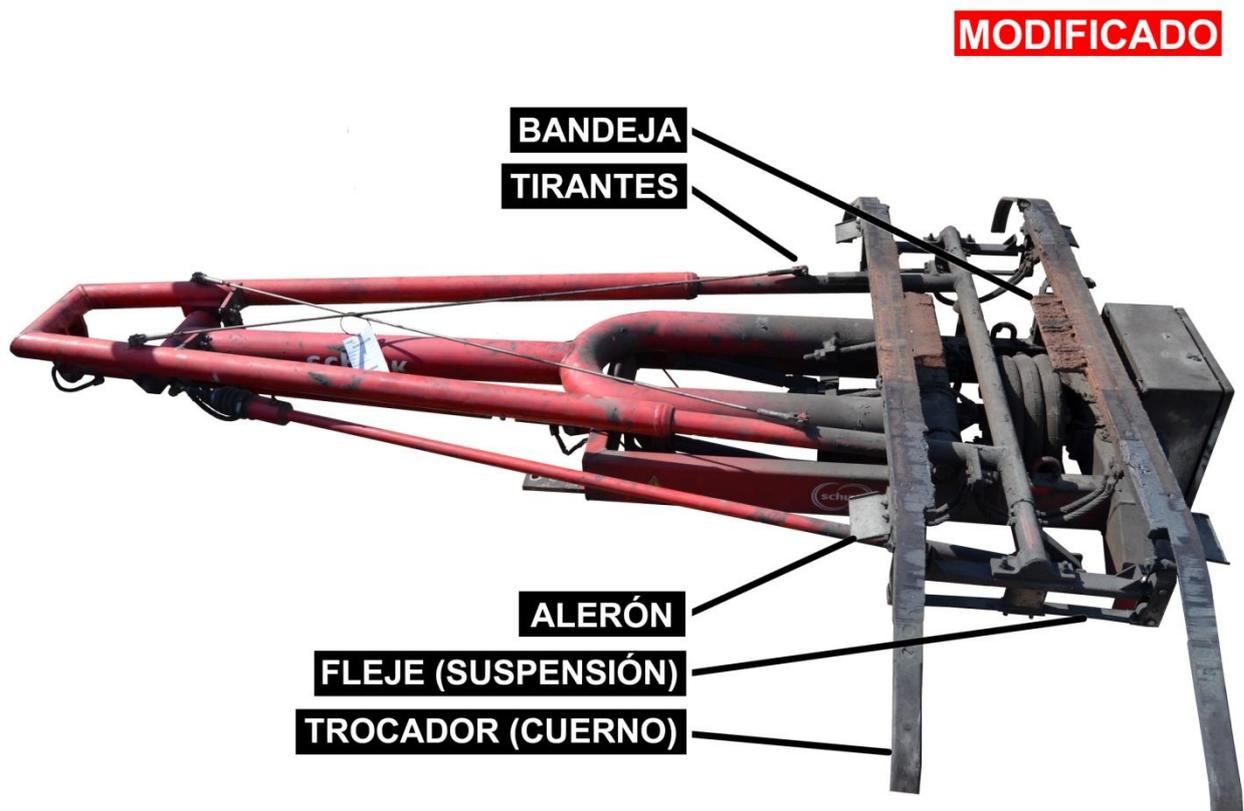


Figura 16: Pantógrafo SCHUNK, modificado.

II. Dimensiones: La única diferencia importante que hay en este apartado es la distancia entre los frotadores. Sin mencionar absolutamente nada de la vibración armónica del cable entre estos dos elementos. Es muy importante por la diferencia de tiempo que hay entre los dos modelos.

En el caso del FAIVELEY hay una distancia de separación de 258 mm, aproximadamente la mitad que en el caso del SCHUNK, lo que implica que el SCHUNK tarda el doble en pasar su segunda línea de frotadores por el mismo punto.

Esta diferencia de tiempo permite que el cable este unas decimas más frío. Aunque, en los estudios de desgaste, se ha comprobado que los frotadores que están en la primera línea de la mesilla, se desgastan más.

DATOS TÉCNICOS	SHUNK	FAIVELEY
Ancho de la mesilla /mm	1950±5	1.950
Altura de la mesilla /mm	290±10	300
Largo de los frotadores /mm	918±1 y 1021±1	918±1 y 1021±1
Distancia entre frotadores /mm	570±10	258

Tabla 51: Comparación, dimensiones de la mesilla.

III. Suspensión: La suspensión de los dos casos es distinto tanto, en amplitud del resorte, como en la tecnología que utilizan.

El caso del FAIVELEY consiste en dos muelles colocados en la vertical en la línea del eje del balancín. Toda la mesilla se suspende sobre estos dos muelles, con una amplitud de 3 cm.

En el caso del SCHUNK, consiste en dos flejes a cada lado, los cuales permiten que cada línea de frotadores se suspenda de manera independiente. No obstante, sufren más roturas debido a la fragilidad del fleje. La amplitud del movimiento es de 5 cm.

Además, el viento influye en el comportamiento de los flejes, aunque el fabricante considera que a velocidades bajas (las que circula) no es perjudicial.

IV. Peso: Debido a los materiales que la forman y el diseño de la propia estructura, el FAIVELEY la mesilla pesa mucho más que el SCHUNK. Esta última marca tiene una mesilla más perfilada, menos uso de materiales.

Lo mejor es tener la mesilla lo más ligera posible, de esta manera se consigue que las vibraciones sea de menor frecuencia, por lo que tendrá menos despegues y menos golpes. En caso de que se produzcan, al pesar menos, recuperaría antes la posición de equilibrio.

V. Materiales: SCHUNK utiliza diferentes polímeros para la mayoría de las piezas que forman el pantógrafo. Estos elementos en el caso de la mesilla son los flejes y trocadores. No obstante, estas mismas piezas tienen más roturas (flejes y cuernos).

En el caso de los alerones, son de aluminio. Estos son muy ligeros, pero se deforman con mucha facilidad, incluso por el propio viento se sabe que los deforma la inclinación de los mismos unos milímetros.

VI. Interacció con catenaria: Según el fabricante SCHUNK, sus pantógrafos interactúan mejor con la catenaria debido a la independencia de cada línea de frotadores.

En las observaciones (se explica a fondo más adelante), se puede afirmar que los pantógrafos SCHUNK producen más ruido a su paso. No obstante son los FAIVELEY quienes se han visto que realiza más flashes.

4.5.3.1. Conclusiones

La opinión algunos expertos en el sector sugiere que los pantógrafos FAIVELEY trabajan mejor porque producen un desgaste de la pletina más lento. En comparación directa al pantógrafo de la marca SCHUNK. Sin embargo, es solo una opinión.

No obstante, hay que matizar que esta comparación en base a datos numéricos de evolución de desgaste no se ha podido realizar por falta de datos por parte del pantógrafo de la marca FAIVELEY.

Además, el operador de la red ha realizado una inversión fuerte por el modelo de la marca SCHUNK, por lo que a largo plazo serán los que se impondrán.

Conclusión, tal y como se comenta en el apartado 3.6 de los antecedentes, es posible que sea recomendable utilizar esfuerzos estáticos distintos entre los diferentes modelos de pantógrafos, debido que los diseños de las mesillas y los sistemas de suspensión son diferentes. Ya que como se observo en la inspección visual de tramo, detallado en el apartado 5.9.1, no se vio que todos los pantógrafos realizaran flashes. Igual que no todos realizaban la misma intensidad de ruido.

En resumen, los pantógrafos FAIVELEY aparentemente presentan un desgaste eléctrico mayor. Por otro lado, los SCHUNK realizan más ruido, por lo que sufren más en desgaste mecánico. No obstante, este desgaste mecánico puede confundirse con el estado actual del hilo de contacto, ya que actúa como una lija a causa de las virutas incrustadas en la superficie del hilo de contacto.

Por otro lado, la variación de los diferentes materiales de las bandas del frotador, comportan pesos diferentes, por lo que es posible que se necesite cambios en algunos elementos de la mesilla, como podría ser los flejes de la suspensión. Incluso un rediseño completo de la mesilla, para mejorar la interacción con la catenaria rípiada (ya que es el pantógrafo quien absorbe casi todo el esfuerzo) y al mismo tiempo un buen comportamiento con la catenaria flexible.

4.6. MANTENIMIENTO DE LA CATENARIA

El mantenimiento de la catenaria consiste en ejecutar las actuaciones pertinentes para conseguir seguridad y fiabilidad en las instalaciones existentes. Así pues un plan de mantenimiento será diferente al plan de una instalación nueva. Se quiere conseguir seguridad para que las circulaciones de los trenes se realicen sin percances, asegurando la alimentación eléctrica de las maquinas sin peligro para las personas. También se busca fiabilidad para reducir la probabilidad de averías hasta un rango permisible. Teniendo en cuenta que la probabilidad de cero averías es imposible.

En términos generales podemos diferenciar dos clasificaciones diferentes, mantenimiento preventivo y mantenimiento correctivo. El mantenimiento preventivo consiste en conservar las instalaciones o equipos mediante revisiones para garantizar fiabilidad y su buen funcionamiento. El principal objetivo del mantenimiento preventivo es el de evitar o mitigar las consecuencias de los fallos del sistema, logrando prevenir las incidencias antes de que estas ocurran. El mantenimiento correctivo consiste en solucionar y reparar la instalación en caso de avería, o corregir los defectos localizados.

Para el mantenimiento se utiliza los datos recogidos por las inspecciones realizadas por el tren auscultado. Los avisos de los maquinistas, que normalmente son los primeros que ven las incidencias. Y también la inspección visual por parte del personal técnico de infraestructura.

La inspección visual tiene un procedimiento que a continuación se expone.

4.6.1. Objeto

Describir la sistemática de trabajo para las Inspecciones Visuales de la Línea Aérea de Contacto (L.A.C.) Red Convencional.

4.6.2. Recursos materiales

Para realizar los trabajos descritos en el presente procedimiento se emplearán aquellos útiles, herramientas y maquinaria que sean específicos para trabajos de L.A.C.

Serán de aplicación los equipos de protección individual específicos para trabajos de L.A.C. Asimismo será preciso disponer de aquellos elementos de seguridad que puedan ser determinados en consignas u otros procedimientos en vigor atendiendo a las actividades que se llevan pudieran llevar a cabo.

4.6.3. **Secuencia de operación a realizar**

I. Programación y planificación: Las inspecciones se programarán en el acta semanal de trabajos, manteniéndose el contacto telefónico con el CTC siempre que sea necesario por motivos de seguridad.

Previa a la inspección se procederá a la planificación del tramo a inspeccionar. Para ello los inspectores contarán con la siguiente información:

- Características de la electrificación.
- Características del trazado.
- Coordenadas UTM de los postes obtenidos por el coche de auscultación geométrica de catenaria.
- Gráfico de trenes.
- Datos del Inventario
- Tipo de línea.

II. Inspección visual: La inspección sin corte de tensión, siendo el objetivo de la misma el detectar indicios que puedan desembocar en un fallo de las instalaciones.

La inspección visual se llevará a cabo a pie salvo en los siguientes casos:

- Túneles.
- Viaductos.
- Trincheras en las que no exista la mínima distancia de seguridad.

En estos casos la inspección se realizará en vagoneta.

III. Consistencia de las inspecciones visuales: Las categorías de defecto del trayecto están basadas en el Nivel de Prioridad del Mantenimiento (NPM). Este índice es específico de cada defecto, siendo función de la gravedad de la avería, de la “detectabilidad” y de la tasa de fallos observada, obtenidos por análisis de históricos de averías en toda la Red Convencional.

Se clasifican los defectos en cuatro niveles, siendo el nivel 4 el de máxima prioridad para su reparación, y el nivel 1 el de mínima prioridad.

Se inspeccionaran todos los elementos tanto del cantón, postes y cimentaciones, perfil de catenaria, pórticos, zona de agujas, y seccionamientos.

4.6.4. Riesgos laborales de las operaciones y medidas preventivas genéricas asociadas

La descripción de los riesgos laborales encontrados en la realización de las actividades descritas en el presente procedimiento, así como las medidas preventivas destinadas a eliminarlos o minimizarlos hasta niveles asumibles, se encuentran expuestos en las evaluaciones Generales de Riesgos de la Especialidad de Línea Aérea de Contacto, por lo que todos los agentes implicados en la realización de los trabajos descritos han de ser conocedores de los mismos previamente al inicio de los trabajos.

De la misma manera, además de los peligros identificados a cada operación, se tendrán en cuenta aquellos derivados de la ubicación geográfica (túneles, terrenos abruptos, etc.), características singulares de la instalación, desplazamientos, peligros generados por otros trabajos relacionados (trabajos de soldadura, trabajos de taller, etc.), establecidos tanto en el Manual de Prevención de Riesgos Laborales de la D.E. como en la evaluación de riesgos específica de los centros de trabajo.

4.6.5. Criterios de aceptación y rechazo

Además de lo establecido en las consistencias de las inspecciones visuales, se considerará defecto o desviación a todo estado que, hallado fuera de los parámetros establecidos por los Procedimientos Específicos o Normativa que les corresponda, presenten las instalaciones inspeccionadas.

4.6.6. Acciones a tomar ante desviaciones

Los defectos detectados mediante la inspección visual se catalogan en 4 niveles de gravedad:

- **Defectos Nivel 1:** Son considerados defectos de nivel 1 a efectos del presente procedimiento aquellos aspectos de la línea aérea de contacto susceptibles de provocar una avería en el largo plazo. Estos defectos serán objeto de un mantenimiento programado para su corrección. Es potestad del que realiza la inspección promocionar estos defectos a un nivel mayor de gravedad si a su criterio el grado de deterioro del elemento lo hace necesario.
- **Defectos Nivel 2:** Son considerados defectos de nivel 2 a efectos del presente procedimiento aquellos aspectos de la línea aérea de contacto susceptibles de provocar una avería en el medio-largo plazo. Estos defectos serán objeto de un mantenimiento programado para su corrección.

Es potestad del que realiza la inspección promocionar estos defectos a un nivel mayor de gravedad si a su criterio el grado de deterioro del elemento lo hace necesario.

- **Defectos Nivel 3:** Son considerados defectos de nivel 3 a efectos del presente procedimiento aquellos aspectos de la línea aérea de contacto susceptibles de provocar una avería en el corto plazo. Estos defectos serán objeto de un mantenimiento programado para su corrección a la mayor brevedad posible. Es potestad del que realiza la inspección promocionar estos defectos a un nivel mayor de gravedad si a su criterio el grado de deterioro del elemento lo hace necesario.
- **Defectos Nivel 4:** Son considerados defectos de nivel 4 a efectos del presente procedimiento aquellos aspectos de la línea aérea de contacto susceptibles de provocar una avería de forma inminente. Estos defectos serán corregidos de forma urgente.

4.6.7. Tratamiento de la información

Una vez cumplimentadas las Hojas de Control por el personal que haya realizado los trabajos y firmadas por el Encargado se trasladarán al Supervisor de LAC para su revisión y posterior entrega al Encargado para su archivo.

Las Hojas de Control una vez cumplimentadas y supervisadas serán archivadas en su formato original en la base de mantenimiento del equipo de reparaciones y en formato electrónico en un directorio común de la Gerencia/Jefatura de Mantenimiento.

Las Hojas de Control se archivarán un mínimo de 3 años.

4.7. MANTENIMIENTO DEL PANTÓGRAFO

El plan de mantenimiento completo de las locomotoras del tipo CIVIA 463 / 464 / 465 es muy extenso. Por este motivo, esta memoria se centra en las acciones de mantenimiento que se realizan frente las directrices indicadas por el manual, en las partes que puedan afectar en la interacción catenaria-pantógrafo. Ya que es en este punto dónde se localiza el problema. De esta manera se obtiene una visión de los fallos que pueden haber sucedido realmente en los talleres de mantenimiento de los pantógrafos.

Por parte de la Empresa Operadora, el pantógrafo es el elemento dónde se debe hacer hincapié.

Como se puede observar en la tabla 52 facilitada por el operador de la red existen una clasificación del mantenimiento en función de la periodicidad y kilómetros de la locomotora.

OPERACIÓN								
CICLOS	IS	IB	IM1	IM2	IM3	IM4	R1	R2
MÍNIMO	10 D	23 D	30.000 Km	155.000 Km	320.000 Km	660.000 km	1.260.000 km	2.520.000 km
MEDIO	15 D	30 D	40.000 km	175.000 km	350.000 km	700.000 km	1.400.000 km	2.800.000 km
MÁXIMO	20 D	37 D	50.000 km	195.000 km	380.000 km	740.000 km	1.540.000 km	3.080.000 km
TIEMPO LÍMITE							8 años *	16 años *

Tabla 52: ciclos de mantenimiento.

Las intervenciones pueden ser: inspecciones de seguridad, inspecciones básicas, inspecciones media, reparaciones generales. En el plan de mantenimiento tablas 53 y 54 se detalla cada una de las operaciones que se realiza en cada caso, así como los periodos de intervención.

Para más información, se indican las referencias de localización de estas tablas en los manuales del operador de la red ferroviaria.

RENFE	PLAN DE MANTENIMIENTO	PM. 4652.30	Nº EDICIÓN 0 30-05-08	Nº REVISIÓN 16-01-12	PAG. 72
--------------	------------------------------	--------------------	---------------------------------	--------------------------------	--------------------------

CÓDIGO MANUAL	PARTES A VISITAR	DESCRIPCIÓN DE LAS OPERACIONES	INTERVENCIÓN								UBC. DOC.
			IS	IB	IM1	IM2	IM3	IM4	R1	R2	
40-02-00	CAJA DE BORNAS DE INTERCONEXIÓN	Comprobar el apriete de los tornillos de conexión					x	x	x	x	1
40-10-00	PANTÓGRAFO	Control de funcionamiento	x	x	x	x	x	x	x	x	2
40-10-01	MESILLA	Inspección de bandas de contacto, sustituir si fuese necesario.	x	x	x	x	x	x	x	x	2.1.1
		Inspección del cuerno, sustituir si fuese necesario.	x	x	x	x	x	x	x	x	2.1.2
		Engrase de bandas de contacto.		x	x	x	x	x	x	x	2.1.3
		Inspección de bandas de contacto.				x	x	x	x	x	2.1.4
		Inspección suavidad de los cojinetes.				x	x	x	x	x	2.1.5
		Inspección de muelles de la mesilla. Ajustar en caso necesario.				x	x	x	x	x	2.1.6
		Ajustar paralelismo de frotadores.				x	x	x	x	x	2.1.7
		Engrasar de la rótula y de la guía de deslizamiento de la guía paralela.				x	x	x	x	x	2.1.8
40-10-02	TRENCILLAS DE CORRIENTE	Inspección visual. Sustituir en caso de necesidad			x	x	x	x	x	x	2.2.1
		Sustitución						x	x	x	2.2.2

Tabla 53: Plan de mantenimiento, parte 1.

RENFE	PLAN DE MANTENIMIENTO	PM. 4652.30	Nº EDICIÓN 0 30-05-08	Nº REVISIÓN 16-01-12	PAG. 72
--------------	------------------------------	--------------------	----------------------------------	---------------------------------	--------------------

CÓDIGO MANUAL	PARTES A VISITAR	DESCRIPCIÓN DE LAS OPERACIONES	INTERVENCIÓN								UBC. DOC.
			IS	IB	IM1	IM2	IM3	IM4	R1	R2	
40-10-03	MECANISMO DE ELEVACIÓN	Verificación de la barra de tracción y acoplamiento y la posición de reposo, ajustar si es necesario				x	x	x	x	x	2.3.1
		Verificación del mecanismo de elevación, ajustar si es necesario.				x	x	x	x	x	2.3.2
		Inspección de la fuerza de presión estática, ajustar si es necesario				x	x	x	x	x	2.3.3
		Verificación del tiempo de elevación y descenso, ajustar si es necesario				x	x	x	x	x	2.3.4
		Inspección visual del centrado del fuelle y de los cables del mecanismo de elevación, engrasar si es necesario.				x	x	x	x	x	2.3.5
		Inspección de los amortiguadores				x	x	x	x	x	2.3.6
40-10-04	AISLADORES Y MANGUERAS	Limpieza				x	x	x	x	x	2.4
40-10-05	CONJUNTO PANTÓGRAFO	Revisión total y sustitución sistemática de piezas							x	x	2.5

Tabla 54: Plan de mantenimiento, parte 2.

A continuación se redactan las acciones de mantenimiento que se realizan a los elementos del plan de mantenimiento.

Para facilitar la lectura, se sigue el orden indicado en las tablas 53 y 54. Empezando por las partes a visitar y desglosando cada una de ellas siguiendo la descripción de las operaciones.

4.7.1. Cajas de bornes de interconexión

Comprobar el apriete de los tornillos de conexión con una llave dinamométrica se comprueba el apriete de los tornillos según marque el fabricante en la tabla 55.

Esta tabla indica el par de apriete para las uniones atornilladas. Válido para uniones atornilladas de acero inoxidable (resistencia A2-70), utilizando el lubricante.

Utilizar pasta *Ceramo* de la firma Metallit GmbH o Autol Top 2000 de la firma AGIP Schmiertechnik. Según la norma DIN 25 202.

ROSCA /mm	PAR DE APRIETE /Nm
M3	1
M4	1,8
M5	3,5
M6	6
M8	15
M10	30
M12	50
M14	80
M16	120
M20	250

Tabla 55: par de apriete para las uniones atornilladas.

4.7.2. Pantógrafo

INSPECCIÓN VISUAL.

Comprobación del estado de los frotadores, también denominados bandas de contacto o pletinas. Sustituirlos en caso necesario según el apartado de la tabla 53, numerado 2.1.1 (Inspección de bandas de contacto, sustituir si fuese necesario). Comprobar el estado de los cuernos, sustituir en caso necesario. Inspección visual de los cables del mecanismo de elevación y del centrado del muelle, engrasarlos si es necesario según el apartado de la tabla 54 (Mecanismo de elevación).

CONTROL DE FUNCIONAMIENTO.

Comprobar que el alimentado del pantógrafo con aire a la presión de 5,5 bar, éste sube la velocidad normal y que al anular el aire baje también a velocidad normal. Si el pantógrafo presentase un comportamiento anómalo a la hora de realizar la subida y/o bajada, se deberá regular el pantógrafo. Ver apartado de la tabla 54, numerado 2.3.4 (Verificación del tiempo de elevación y descenso) y el número 2.3.3 (Inspección de la fuerza de presión estática).

4.7.3. Mesilla

INSPECCIÓN DE BANDAS DE CONTACTO.

Hay que comprobar los frotadores en cada inspección visual respecto a daños y desgaste. Recordar que el par de apriete de los tornillos es de 5 Nm.

Como directriz para determinar los intervalos entre inspecciones visuales, el manual indica que consideren:

- La duración de vida útil estimada, así como la duración en servicio.
- Condiciones climatológicas extremas (hielo, nieve, lluvia, etc.).

El desgaste de los frotadores debe ser uniforme (tabla 53, punto 2.1.7 llamado Ajustar paralelismo de frotadores, en la tabla plan de mantenimiento). Ajuste del paralelismo de los frotadores.

Los frotadores deben cambiarse lo más tarde posible, con una altura restante según el modelo de pletina que lleve en cada momento el pantógrafo. Para ello se han recopilado todos en la tabla 56. Esta indica el espesor inicial y final, además de la locomotora que los lleva. Estos están ordenados cronológicamente, junto la fecha, para complementar los antecedentes redactados anteriormente.

FECHA	MATERIAL	ESPESOR INICIAL /mm	ESPESOR SUSTITUCIÓN /mm	TREN
ANTES 2011	Cu ETP	7	3	TODOS
2011-14	Cr-Cu-Zr	10	3	TODOS
2012	<i>Kasperowsky (SK789)</i>	22	5	CIVIA
07/2014	SK1261	28	9	CIVIA FAVELEY
07/2014	SK1673	28	9	
07/2014	SK1755	28	9	
07/2014	SK1748	28	9	LOC. 252 R-449
07/2014	SK1754	28	9	
07/2014	SK1760	28	9	

Tabla 56: sustitución de pletinas, teórico.

Antes de proceder al montaje de un nuevo frotador, hay que limpiar y engrasar con grasa de contacto del tipo Molykote-7439 o similar, la superficie de contacto entre el frotador y el soporte. Estas grasas similares son del tipo Molydural Contactin CU y/o Loctite-8008.

En el momento que se tenga que cambiar una pletina o frotador, siempre se deberá cambiar los 2 frotadores a la vez. Los mecánicos del operador de la red han observado que los frotadores que van delante en la dirección de la marcha del tren, son los que sufren un desgaste prematuro, tiendo que cambiar todas las pletinas de un mismo pantógrafo aunque no se haya llegado al desgaste indicado.

Sin embargo, en el historial de desgastes de pletinas de las locomotoras 463 / 464 / 465 del tipo CIVIA, se ha podido observar que no están realizando esta acción, dejando pletinas en un mismo pantógrafo con distintos desgaste.

Después de la instalación, la posición de los frotadores se debe comprobar y ajustar si es necesario, (tabla 53, punto 2.1.7 llamado Ajustar paralelismo de frotadores, en la tabla plan de mantenimiento), Ajuste del paralelismo de los frotadores.

Debe engrasarse la superficie de contacto de los frotadores según se indica en la tabla 53, punto 2.1.7 llamado Ajustar paralelismo de frotadores, en la tabla plan de mantenimiento.

INSPECCIÓN DEL CUERNO, SUSTITUIR SI FUESE NECESARIO.

Se observa que no esté dañado: que no tenga ningún golpe o este deteriorado. En caso contrario se deberá sustituir por uno nuevo. Recordar que el par de apriete de los tornillos es de 6 Nm.

No es una pieza conflictiva, ya que no suele dar problemas de rotura o similares que conlleven a una baja de servicio del propio pantógrafo.

ENGRASE DE BANDAS DE CONTACTO.

Engrasar la superficie superior de los frotadores con grasa cálcica grafitada KRAFFT tipo GCG3, empleando una espátula de madera. Ha de quedar impregnada de grasa la totalidad de la superficie de contacto. El grosor de la capa de grasa será de no más de 1 mm.

Engrasar la rótula y la guía de deslizamiento de la guía paralela con grasa Autol TOP 2000 de la firma Agip Schmiertechnik.

El modelo de pantógrafo FAIVELEY AM 32 AV incorpora una bandeja de engrase entre las dos bandas de pletinas. Tiene la función de engrasar el H.C. Se rellena con esta grasa.

INSPECCIÓN SUAVIDAD DE LOS COJINETES.

- I. Cojinetes *ranurados* de bolas:** Los cojinetes *ranurados* de bolas deben limpiarse y engrasarse en cada revisión general, así como comprobar su paso y juego. En caso de cojinetes *ranurados* de bolas con mal paso, hay que determinar la causa (*por ejemplo: error de alineación, pieza constructiva doblada, tensión bloqueada, etc.*), sustituir los cojinetes *ranurados* de bola dañados. Para evitar la formación de condensaciones, rellenar totalmente el espacio intermedio del cojinete con grasa TOP 2000 de la firma AGIP Schmiertechnik.
- II. Cojinetes deslizantes:** Todos los cojinetes deslizantes del pantógrafo SCHUNK, modelo WBL 85-12 están libres de mantenimiento. Los cojinetes deslizantes son los siguientes.
- Casquillos de bronce con recubrimiento de teflón.
 - Casquillos de plástico.

En caso de que los cojinetes deslizantes tengan mal paso, hay que averiguar la causa y eliminarla. Sustituir los cojinetes deslizantes defectuosos. Deben limpiarse aquellos que estén sucios. Se recomienda engrasar los cojinetes con grasa TOP 2000 de la firma AGIP Schmiertechnik.

Sustituir por otros nuevos en cada revisión general.

- III. Uniones atornilladas:** Hay que comprobar que no haya ningún tornillo de fijación dañado y que tengan un asiento fijo, especialmente las siguientes.
- La fijación de los frotadores.
 - Las uniones de la mesilla.

INSPECCIÓN DE LOS MUELLES DE LA MESILLA.

Para realizar esta acción se ha de quitar el soporte de frotador. Se continúa quitando los muelles de suspensión, los apoyos de los muelles y las cajas de muelle. Ahora ya se podrá comprobar el estado de las piezas con las pruebas que sean necesarias y cambiar las defectuosas.

INSPECCIÓN CAMPO DE GIRO DE LAS MESILLAS.

La mesilla debe permitir juego de giro a lo largo de todo el campo de las alturas de trabajo en ambas direcciones desde la posición horizontal. En la altura de trabajo media, el campo de giro de la mesilla debe ser igual en ambas direcciones de giro.

El ajuste se hace en la barra de guía-parallel. Indicada en la figura 14 mostrada anteriormente en este documento en el apartado 4.4.1 (Definiciones). Para realizar esta inspección hay que seguir el siguiente modo de de proceder. Indicado en la figura 17.

- I. Desmontar la barra de guía-parallel de la mesilla y tijera inferior.
- II. Soltar las contratuercas (2).
- III. La regulación se realiza mediante el atornillado y desatornillado del cabezal de la articulación (1) de la barra de guía-parallel.
- IV. Tras la regulación, afianzar contratuerca (2) y comprobar otra vez el ajuste.

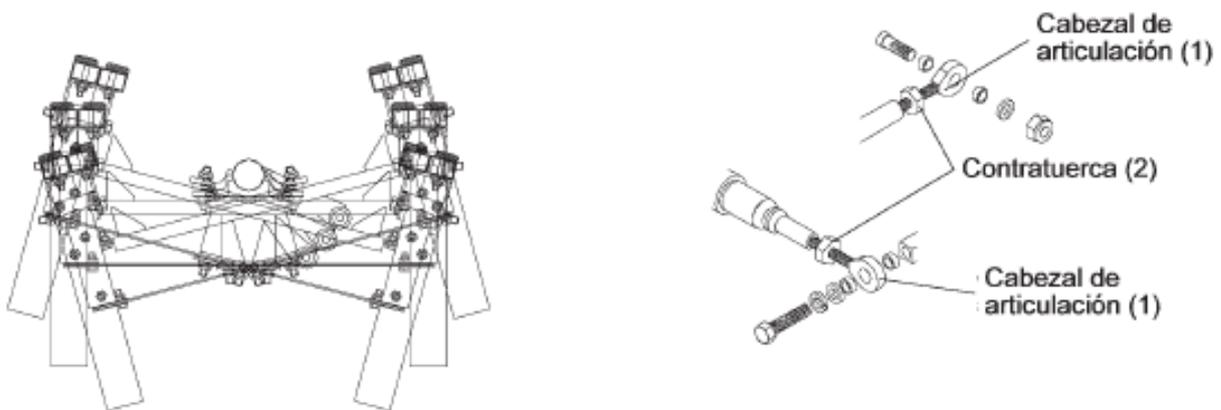


Figura 17: ajuste del campo de la mesilla.

AJUSTE PARALELISMO DE FROTADORES.

Para conseguir un desgaste uniforme de los frotadores es imprescindible que se asegure un contacto constantemente perfecto de los frotadores con el hilo de contacto de la catenaria, por todo lo ancho de la superficie de contacto.

Para realizar esta inspección hay que controlar la horizontalidad con una regla (1).

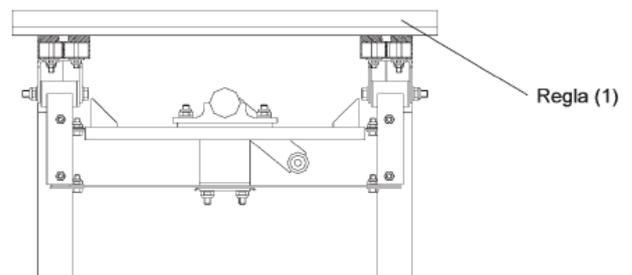


Figura 18: ajuste del paralelismo de los frotadores.

ENGRASE DE LA RÓTULA Y DE LA GUÍA DE DESLIZAMIENTO DE LA GUÍA PARALELA.

Engrasar la superficie superior de los frotadores con grasa cálcica grafitada KRAFFT tipo GCG3, empleando una espátula de madera. Ha de quedar impregnada de grasa la totalidad de la superficie de contacto. El grosor de la capa de grasa será de no más de 1 mm.

Engrasar la rótula y la guía de deslizamiento de la guía paralela con grasa Autol Top 2000 de la firma AGIP Schmiertechnik.

4.7.4. Trencillas de corriente

INSPECCIÓN VISUAL. SUSTITUIR EN CASO DE NECESIDAD.

Cuando se haga la inspección visual de los tornillos y las trencillas de corriente, éstas se deben sustituir cuando tengan más del 5% de los cables rotos. Se requiere atención para colocar las trencillas de corriente, ya que debe asegurarse que no rocen con cualquier otra pieza del pantógrafo. Cuidado, la colocación de las trencillas de corriente en el catálogo de repuestos es sólo esquemática y no se puede utilizar para el montaje del pantógrafo.

Antes del montaje, hay que limpiar y engrasar con grasa contacto Molykote-7439 o similar, la superficie de contacto entre la trencilla y la conexión de corriente para el montaje del pantógrafo.

Por otra parte de la trencilla de corriente y antes del montaje, hay que limpiar y engrasar con grasa contacto de cobre Cramolin 100 HS o similar, la superficie de contacto entre la trencilla y la conexión de corriente.

SUSTITUCIÓN.

Independientemente del estado de está, se sustituirá sistemáticamente cada 5 años.

4.7.5. Mecanismos de elevación

La figura 19 muestra detalladamente cada parte y el nombre de está.

VERIFICACIÓN DE LA BARRA DE TRACCIÓN Y ACOPLAMIENTO Y LA POSICIÓN DE REPOSO, AJUSTAR SI ES NECESARIO.

Con la barra de tracción se ajusta la posición de reposo del pantógrafo. Para realizar esta inspección hay que seguir las siguientes instrucciones.

- I. El ajuste se realiza girando el elemento de regulación (6) de la barra de tracción (1).
- II. Una vez finalizado el ajuste, aprieten las contratuercas (5).

NOTA: bajar el pantógrafo. La tijera inferior (2) y la tijera superior (3) tienen que reposar sobre los topes de apoyo (4).

ATENCIÓN: con el cambio de longitud de la barra de tracción y acoplamiento (1), se ha modificado la geometría del pantógrafo, por tanto, controlar el recorrido de la fuerza de presión y regular en caso necesario.

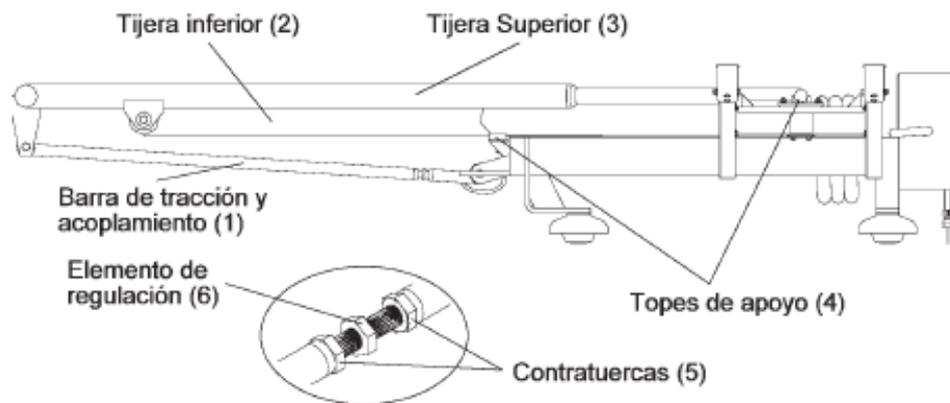


Figura 19: ajuste barra de tracción, acoplamiento y posición de reposo.

VERIFICACIÓN DEL MECANISMO DE ELEVACIÓN, AJUSTAR SI ES NECESARIO.

Subir y bajar el pantógrafo son las funciones que se revisa en este paso. El paralelismo de la tapa de conexión (1) respecto al eje base (2) de la tijera inferior, tiene que estar garantizado durante el proceso de subida y bajada.

Los números de esta operación hacen referencia a la figura 20.

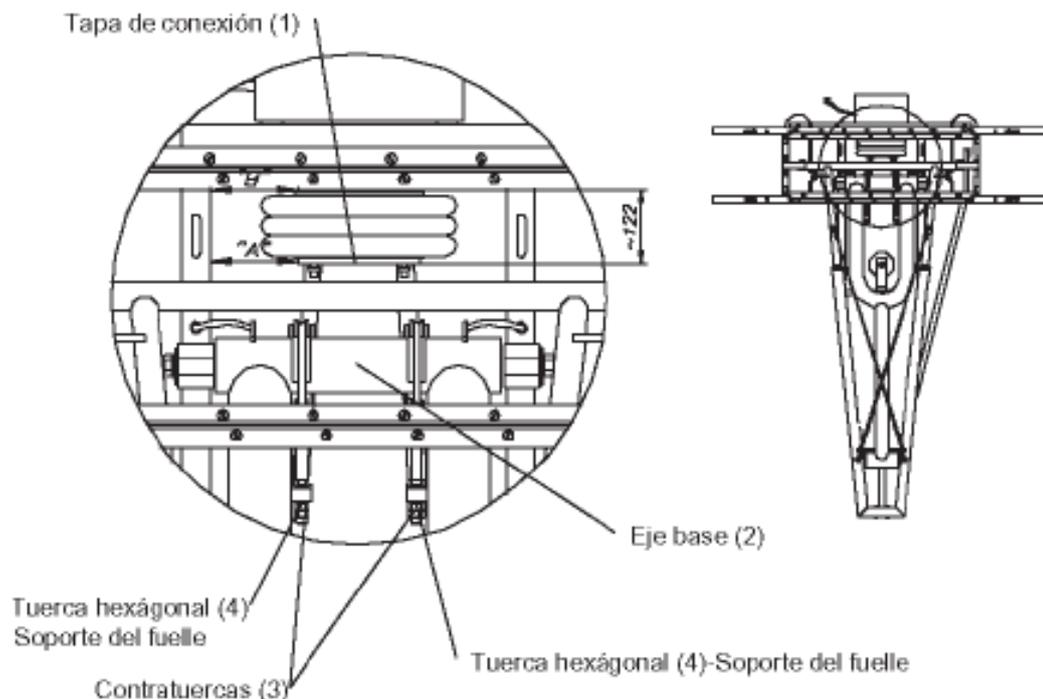


Figura 20: ajuste del mecanismo de elevación.

En caso de ser necesario un ajuste preciso, hay que realizar los siguientes pasos.

- I. Bajar el pantógrafo, el fuelle neumático tiene que estar libre de presión.
- II. Soltar la contratuerca (3) en ambos cables de accionamiento.
- III. Ajustar la longitud de los cables tensores con tuercas hexagonales (4) hasta conseguir el paralelismo entre la tapa de conexión (1) y el eje base (2).
- IV. Control mediante elevación y bajada del pantógrafo.
- V. Asegurar de nuevo con contratuercas (3).
- VI. Nuevo control de ajuste de precisión mediante elevación y descenso del pantógrafo.
- VII. Tras este ajuste y en cada revisión, se deberá comprobar el centrado del fuelle neumático, procediendo a reajustarlo si es preciso. El seguimiento se dará por finalizado tras un mes completo sin necesidad de reajustes.
- VIII. La diferencia de medida entre las cotas "A" y "B" de las tapas de conexión, debe ser inferior a 10 mm. (Medir con pantógrafo levantado). Lógicamente cuanto menor sea esta diferencia mejor.

INSPECCIÓN DE LA FUERZA DE PRESIÓN ESTÁTICA, AJUSTAR SI ES NECESARIO.

La fuerza de presión debe ser según datos técnicos. Además, tras cada cambio de frotadores, hay que comprobar la fuerza de presión. Esté puede comprobarse mediante la balanza de resorte o con el aparato de medición SCHUNK KM 11 ó KM 13.

Cálculo de la fuerza de presión mediante balanza de resorte.

- **VALOR #1:** Medición de la fuerza de presión desde la posición de trabajo más alta hasta la posición de reposo con movimientos lentos de descenso.
- **VALOR #2:** Medición de la fuerza de presión desde la posición de reposo hasta la posición de trabajo más alta con movimientos lentos de elevación.
- **RESULTADOS:** $(\text{Valor \#1} + \text{Valor \#2}) / 2 = \text{Valor medio} = \text{Fuerza de presión}$.
- **FRICCIÓN:** Diferencia de la fuerza de presión entre el valor #1 y el valor #2 (valor ideal menor de 20 N).

Si la diferencia de la fuerza de presión es mayor que 40 N, hay que determinar las causas (pieza defectuosa, suciedad en los cojinetes, etc.) y subsanarlas.

El ajuste se realiza con el tornillo de regulación (2) en el regulador de presión (1) del control neumático. La figura 21 muestra cada parte y de esta sección.

Ajustar de la siguiente manera.

- Giro en el sentido de las agujas del reloj = aumenta la fuerza de presión.
- Giro en sentido contrario a las agujas del reloj = reduce la fuerza de presión.

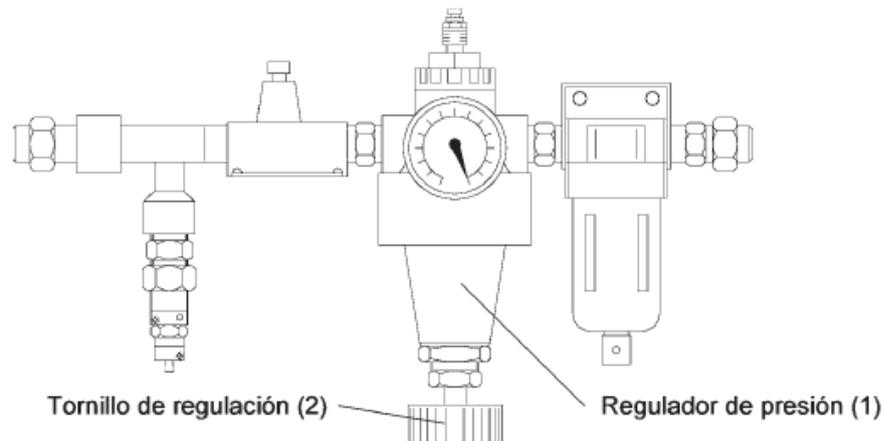


Figura 21: ajuste de la fuerza de presión.

VERIFICACIÓN DEL TIEMPO DE ELEVACIÓN Y DESCENTRO, AJUSTAR SI ES NECESARIO.

La figura 22 muestra cada parte y de esta sección.

La velocidad de subida del pantógrafo se regula con el tornillo de regulación (2) de la válvula reguladora (1).

Para modificar la velocidad de bajada del pantógrafo, se regula con el tornillo de regulación (4) de la válvula reguladora (3).

Pasos a seguir para realizar el ajuste necesario según la operación.

- Para aumentar el tiempo de subida, girar el tornillo de regulación (2) en el sentido de las agujas del reloj.
- Para reducir el tiempo de subida, girar el tornillo de regulación (2) en el sentido contrario a las agujas del reloj.
- Para aumentar el tiempo de bajada, girar el tornillo de regulación (4) en el sentido de las agujas del reloj.
- Para reducir el tiempo de bajada, girar el tornillo de regulación (4) en el sentido contrario de las agujas del reloj.

NOTA: Los tiempos máximos de subida y bajada del pantógrafo deben tomarse de los datos técnicos.

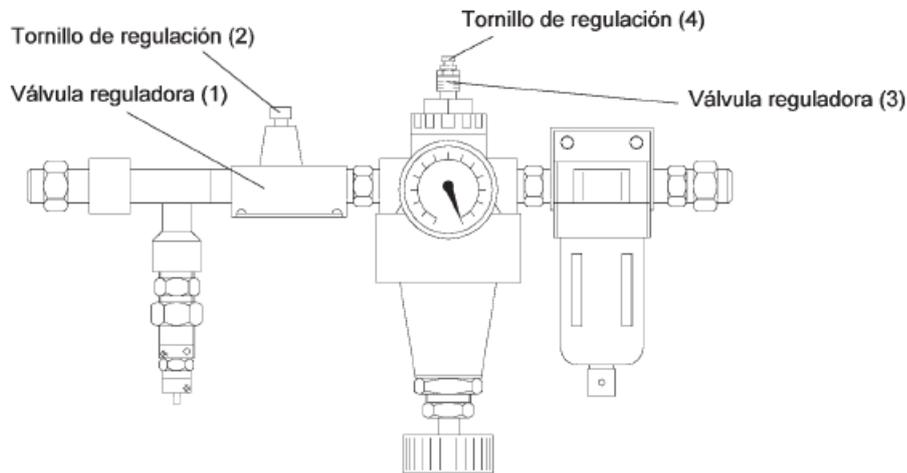


Figura 22: ajuste del tiempo de elevación y descenso.

INSPECCIÓN VISUAL DEL CENTRADO DEL FUELLE Y DE LOS CABLES DEL MECANISMO DE ELEVACIÓN, ENGRASE SI ES NECESARIO.

El mecanismo de elevación está libre de mantenimiento. Aunque hay que comprobar la función del fuelle neumático en cada revisión principal, mediante elevación y bajada del mismo, teniendo en cuenta las indicaciones del punto 2.3.2 de la tabla 54 (Verificación del mecanismo de elevación, ajustar si es necesario). Si es necesario sustituir las piezas dañadas, según se explica a continuación.

I. Mecanismo de elevación: Desmontar el accionamiento del fuelle neumático, comprobar las piezas y cambiar las defectuosas. Para cuando se monte el fuelle neumático en el pantógrafo se debe tener en cuenta la articulación del eje interior para evitar que se doble el fuelle.

Además, el fuelle neumático no debe comprimirse con una tensión demasiado fuerte de los cables. De hecho, se debe tensar ambos cables con la misma fuerza y longitud y regular el fuelle.

Para el engrase entre la leva y el cable, utilizar grasa Autol TOP 2000 de la firma Agip Schmiertechnik.

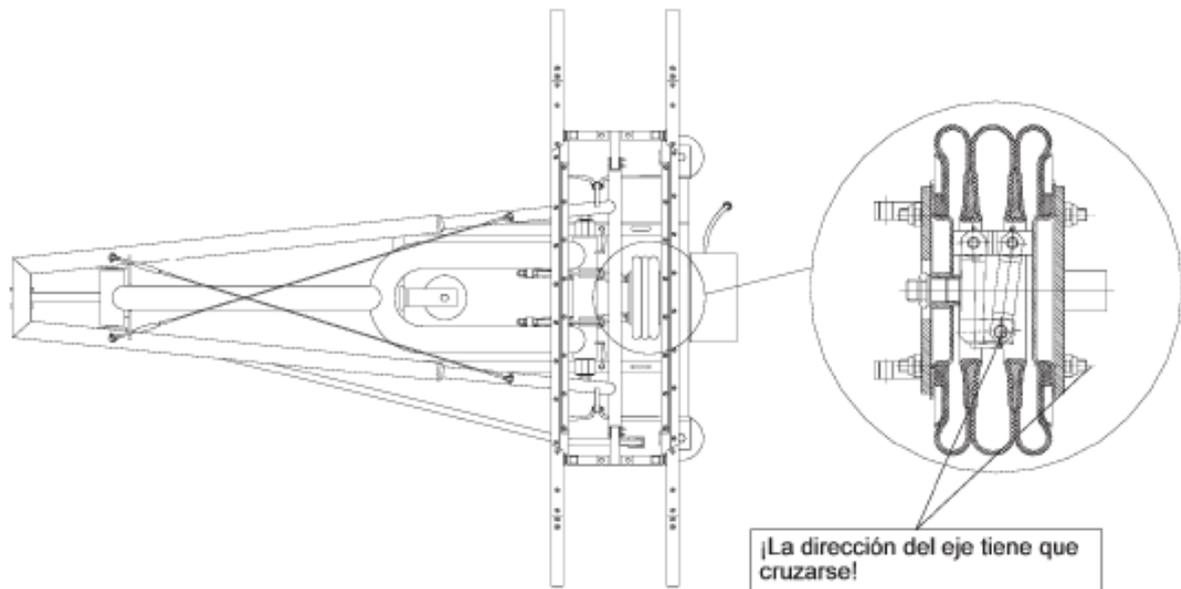


Figura 23: mecanismo de elevación.

INSPECCIÓN DE LOS AMORTIGUADORES

Hay que desmontar el amortiguador de vibraciones para comprobar su funcionamiento. No puede haber ningún juego entre la fase de tracción y la de compresión.

4.7.6. Medición MK11

En esta sección, se habla sobre la máquina de medición Mk11. Sirve para comprobar la presión que ejerce el pantógrafo cuando sube y baja a lo largo de todo el recorrido del mismo.

En el “anexo H” se puede encontrar el manual a cerca de las partes del medidor, su funcionamiento, así como el mantenimiento y características técnicas de la máquina.

En la visita que se hizo la empresa de pantógrafos SCHUNK IBÉRICA. Se pudo ver como realizaban la gráfica de la figura 24.

En el eje de las abscisas se sitúa la fuerza en Kg-f que ejerce el pantógrafo. En el eje de las ordenadas la posición del pantógrafo en milímetros.

En está gráfica se puede observar la presión que ejerce el pantógrafo a lo largo del recorrido tanto al subir como al bajar. Una presión que es prácticamente constante a lo largo de este recorrido.

Hay una diferencia entre la subida y la bajada debido al rozamiento que existe entre las partes móviles del pantógrafo.

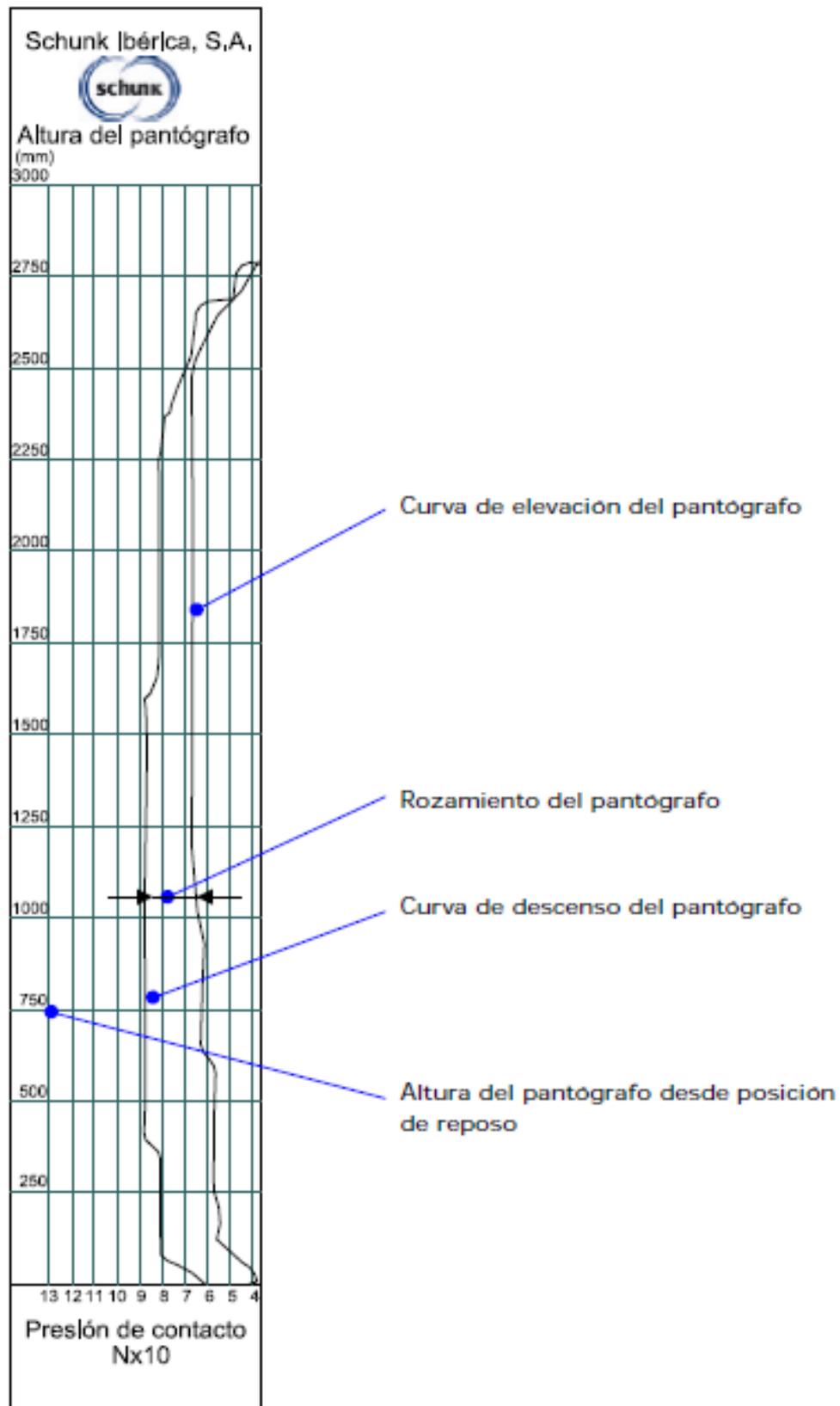


Figura 24: Curva de presión.

4.8. MATERIAL RODANTE

El objeto de estudio de esta memoria es el desgaste de los frotadores de los trenes tipo CIVIA. Sin embargo, para tener referencias de otros desgastes hay que analizar todos los protagonistas que intervienen en esta historia, es decir, todos los trenes que comparten la zona de trabajo con los trenes que sufren el desgaste descontrolado.

Actualmente en la línea R2 Sud circulan un total de 261 trenes todos los días laborables, en los fines de semana y días festivos esta cifra se disminuye más de la mitad. La mayoría de tipos de trenes electrificados (con tracción eléctrica) que pasan por la línea R2 Sud son:

- Cercanías: Serie 447, serie 450 / 451 y del tipo CIVIA (series 463 / 464 / 465).
- Media distancia: R-448, R-449, R-470 y S-252.
- ALVIA: Serie S-130.
- Mercancías: S-252.

Además de estos trenes citados anteriormente, también circula por estas vías el tren de la serie S-202 (sub-serie 319.2) de mercancías que no se explicara en este apartado ya que esta serie tiene tracción diesel y no usa pantógrafo.

A continuación hay una breve explicación de los ocho tipos de trenes electrificados y finalmente se comparan las características y propiedades de estos en una tabla comparativa.

4.8.1. Serie 447

El tren de la serie 447, también llamado S-446 (sucesora de la serie 446) está concebido en tecnología de corriente trifásica, que la incorporaron por primera vez en España, presentando como principales ventajas.

- Una mayor aceleración.
- Un incremento de la velocidad máxima, de 100 km/h pasa a situarse en 120 km/h.
- Una reducción del consumo energético por encima del 5 %.
- Una reducción significativa del peso de la parte eléctrica.
- Un menor peso de los bogíes, por la utilización de motores asíncronos trifásicos en lugar de motores de corriente continua.
- La reducción de los costes de mantenimiento.
- Un mayor confort de marcha y un mejor desgaste de la vía, por tener los accionamientos totalmente suspendidos.

4.8.1.1. Caja

El esqueleto de la caja es autoportante en acero al cobre soldado. Los testeros finales situados en los coches motores son de poliéster y envuelven estructura anticolidión. Una gran luna blindada anti-impacto proporciona al maquinista una alta visibilidad y protección.



Figura 25: tren de la serie 446 / 447.

Exteriormente las unidades 446 y 447 son idénticas, diferenciándose por unas rejillas y por la numeración de los coches, en la parte superior frontal y lateral aparece la letra "M" o "R" de coche motor o remolque rotulada en blanco en el caso de las unidades 446 y en amarillo en las 447.

4.8.1.2. Sistemas de tracción y auxiliar

El equipo de potencia y control está formado por dos circuitos de tracción y freno eléctrico instalados cada uno de ellos en el coche motor, excepto las partes comunes que se sitúan en el coche remolque. El equipo de captación de corriente, común para los dos equipos de potencia, está constituido por dos pantógrafos; un disyuntor general; dos pararrayos y dos juegos de seccionadores.

Cada coche motor lleva cuatro motores. Estos motores atacan cada uno de los ejes del coche motor por un acoplamiento elástico de doble engranaje.

4.8.1.3. Bogíes y freno

Cada coche cuenta con dos bogíes, de dos ejes, ruedas enterizas templadas superficialmente, cajas de grasa con rodamientos y guiado elástico por bielas.

El bastidor del bogie es de acero soldado. La suspensión primaria es por muelles helicoidales, siendo neumática la secundaria. Ambas poseen amortiguadores verticales y, también, horizontales la secundaria.

El freno de servicio es combinado, eléctrico y/o neumático y recupera energía en la medida en que la catenaria lo admita. La acción de frenado está controlada por un microprocesador. Esta unidad tiene la posibilidad de conducción por velocidad prefijada.

4.8.2. Serie 450-451

Para resolver el transporte de viajeros en líneas de Cercanías de larga longitud, con tiempos de recorrido superiores a 30 minutos, el Operador decide incorporar coches de trenes de dos pisos. Este hecho cubre las demandas exigidas de una elevada capacidad de plazas sentadas.



Figura 26: tren de la serie 450 / 451.

En 1994 se incorporaron los trenes de la serie 450: dos coches motores y cuatro remolques intermedios; y un coche motor, un coche remolque y un coche remolque con cabina de conducción para la serie 451. Ambas series tienen idénticas características técnicas y prestaciones, pudiendo circular acopladas en mando múltiple.

4.8.2.1. Caja

El esqueleto autoportante, construido con acero al cobre soldado, está diseñado utilizando el sistema de elementos finitos. Para su fabricación se emplearon perfiles laminados o plegados en frío de grandes dimensiones y espesores pequeños que consiguen reducir el peso. En los coches motrices los testeros finales de estructura anticolidión son de poliéster.

Tras la cabina se encuentra un compartimento técnico en donde se ubica el bloque motor extremo 1. Le siguen las dos plataformas entre las que se sitúan los dos departamentos centrales y al final el bloque motor del extremo 2. Asimismo en su techo se sitúan las resistencias de frenado y el pantógrafo con el pararrayos y el disyuntor.

4.8.2.2. Sistemas de tracción y auxiliar

El equipo eléctrico de potencia permite asegurar la tracción, el freno eléctrico por recuperación y/o reostático y la alimentación de los circuitos auxiliares bajo las líneas electrificadas a 3.000 V. Estos trenes incorporan motores trifásicos asíncronos.

Dispone de dos bloques motores fabricados cada uno de ellos por una inductancia de alisado, un chopper que reduce la tensión en tracción y la eleva en frenado; y dos onduladores de corriente autoconmutados montados en serie. Cada ondulador alimenta a un motor de tracción, siendo pilotado por un microprocesador de control.

4.8.2.3. Bogíes y frenos

Cada coche cuenta con dos bogíes, de dos ejes; y disponen de amortiguadores verticales, transversales de antilazo y un sistema de barras de torsión, lo que les confiere una gran estabilidad dinámica.

Cada motriz dispone de dos bogíes bimotores con motores de tracción asíncronos totalmente suspendidos fijados a la traviesa central del bastidor del bogie y de un reductor de reducción simple y acoplamiento elástico.

El freno de servicio es combinado, eléctrico y/o neumático y se realiza a través de discos calados en los cuerpos de los ejes y es accionado por bloques de freno, recuperando energía en la medida en que la catenaria lo admita.

4.8.3. CIVIA (Serie 463-464-465)

Los trenes CIVIA diseñados para satisfacer las necesidades de transporte en las grandes urbes, debido a sus características de modularidad, eficiencia, disminución de costos energéticos y de explotación. Son unidades de tren eléctricas para el transporte rápido y masivo, con distancias cortas entre estaciones y paradas frecuentes.



Figura 27: tren del tipo CIVIA de Rodalies.

La modularidad es la principal características de los trenes CIVIA. Pueden formarse composiciones variables por dos, tres, cuatro o cinco coches en función de la demanda.

No obstante, sea cual sea su número de coches, tendrán los mismos sistemas de potencia, control y prestaciones de tracción y freno; diferenciándose únicamente en su capacidad de transporte.

En la línea R2 Sud hay las siguientes combinaciones de coches:

- 463 dos coches con cabina y un remolque de piso bajo.
- 464 (dos coches con cabina, un remolque de piso bajo y otro de piso alto).
- 465 dos coches con cabina, un remolque de piso bajo y dos de piso alto.

4.8.3.1. Caja

Los esqueletos están contruidos con perfiles de aluminio de grandes dimensiones soldados entre sí y con chapas del mismo material, que ha permitido reducir notablemente el peso.

El piso está formado por paneles de madera ligeros forrados de aluminio y sujetos a la estructura del tren mediante apoyos elásticos.

Los testeros finales son de fibra de poliéster reforzado con vidrio para que tenga mejor absorción de energía cinética en caso de choque.

4.8.3.2. Sistemas de tracción y auxiliar

Los CIVIA están equipados con un innovador sistema de potencia constituida por dos equipos idénticos y de funcionamiento independiente de 6.500 V. Estos equipos están interconectados para que el funcionamiento sea simultáneo y sus prestaciones de tracción o de freno eléctrico se sumen.

El motor de tracción es trifásico asíncrono de seis polos, autoventilado y encapsulado, con rotor en cortocircuito. Está diseñado para funcionar conectado a onduladores y genera una potencia de 320 kW, con un peso de 1.150 kg. Este motor presenta como principal innovación tecnológica que el sistema de refrigeración utiliza el aire como media de refrigeración.

4.8.3.3. Bogíes, suspensión y frenos

Todos los bogíes de los coches de CIVIA son de dos ejes con ruedas enterizas templadas superficialmente que cuentan con aros insonorizados con los que se consigue la disminución de la emisión sonora provocados por las ruedas, especialmente en las curvas.

Los CIVIA están dotados con dos sistemas de freno:

- El eléctrico mixto, de recuperación de energía y reostático, con preferencia del primero sobre el segundo.
- El neumático de disco por aire comprimido, automático, de tipo analógico directo.

4.8.4. Serie R-448

Los automotores eléctricos de la serie R-448 (subserie 444.500) han mejorado en muchos aspectos respecto a la serie sucesora R-432 y R-444. Uno de estos aspectos es poder circular a 160 km/h y otro importante es poder permitir extender un nuevo producto de servicio diurno de larga distancia.



Figura 28: tren de la serie R-448.

A partir del año 1999 se produce un cambio y es cuando esta serie pasa a ser de los recorridos de larga a los de media distancia.

La serie 448 contaba en mayo de 2007 con 27 unidades especializadas en tráficos de Media Distancia y los cuatro trenes restantes realizan recorridos de Larga Distancia.

4.8.4.1. Caja

Los esqueletos de la serie R-448 son de acero soldado. Los testeros finales son de poliéster y tras ello se encuentra la cabina de conducción. La luna frontal del testero es anti-choque y anti-vaho.

La composición repetida de esta serie es un coche motor (Mc), un remolque intermedio (Ri) y un remolque con cabina (Rc). En composición múltiple pueden circular hasta nueve coches.

4.8.4.2. Sistemas de tracción y auxiliar

La propulsión se realiza a través de cuatro motores eléctricos de corriente continuo; y de arrollamiento en serie, con 4 polos principales, polos de conmutación, con bastidor cilíndrico de acero laminado y autoventilado.

La potencia de estos motores es de 290.000 W cada uno. El arranque automático se realiza a través del control de la intensidad de todos los motores.

4.8.4.3. Bogíes, frenos y suspensión

Cada uno de los coches va apoyado en dos bogíes, con el bastidor y la traviesa oscilante de acero soldado. Cada uno de los bogíes motor lleva dos motores de tracción, suspendidos, con sus acoplamientos elásticos y reductores.

La suspensión principal está compuesta por muelles helicoidales y amortiguadores guía, mientras que la suspensión secundaria se efectúa a través de dos muelles neumáticos y un amortiguador hidráulico horizontal.

Está dotado de freno neumático (de aire comprimido), combinado con el reostático, y electromagnético con patín al carril. Todos los ejes incorporan sistema antibloqueo.

4.8.5. Serie R-449

En 2006 construyeron 107 unidades destinadas a prestar servicios de media distancia. 50 son automotores diesel y formarán la serie 559. Las 57 restantes, son automotores eléctricos, e integrarán la serie 449. De esta última serie 23 trenes podrán correr en ancho ibérico (1.668 mm) y 34 vehículos estarán preparados para correr por vías de ancho UIC (1.435 mm).



Figura 29: tren de la serie R-449.

En consecuencia de que la vía de ancho ibérico abunda más que la vía UIC, el lote de 34 trenes también tienen prevista una utilización por ancho ibérico, por lo que incorporarán los elementos necesarios para instalar los equipos de seguridad y los bogíes "Brava" que son adaptables a los dos tipos de vía. Estos bogíes gestionan el cambio de ancho de forma automática, con el tren en movimiento y sin preparaciones previas ni paradas, realizándose el cambio a unos 30 km/h.

El tren está diseñado para circular en vías de ancho ibérico, pudiendo alcanzar una velocidad máxima de 160 km/h, o de 200 km/h si se trata de vehículos modificados para circular por vías de ancho UIC (alimentado a 25.000 V).

4.8.5.1. Caja

El esqueleto está construido en aleación ligera de aluminio, fabricado a base de perfiles extruidos de aluminio de grandes dimensiones y formando una estructura autoportante. Se ha optimizado el diseño con dispositivos anti-cabalgamiento y estructuras deformables que minimizan las consecuencias de un impacto frontal a la vez que responden a los requisitos de seguridad.

Los testeros finales, de forma aerodinámica, están fabricados en poliéster reforzado con fibra de vidrio.

4.8.5.2. *Sistemas de tracción y auxiliar*

La serie R-449 compuesta de 6 motores eléctricos, repartidos entre los coches A1 y A2, uno cada uno y dos en cada uno de los coches intermedios A4 y A5, con una potencia total de 2.400 kW. Los motores son de tipo asíncrono con rotor en jaula de ardilla.

4.8.5.3. *Bogíes y frenos*

Tal y como esta explicado anteriormente, la serie R-449 lleva dos tipos de bogíes para que se pueda adaptar a dos tipos de vías: ancho ibérico y UIC.

Los dos inversores de tracción son de alimentación directa con IPM's (Módulos Inteligentes de Potencia) de 6.500 V.

Cada inversor está conectado a dos bloques de resistencias de freno montadas sobre el techo para aplicar freno reostático cuando el freno regenerativo no esté disponible.

4.8.6. *Serie R-470*

La serie 470 es la rediseño de las unidades 440, permitiendo la fabricación de una nueva generación de vehículos muy distinta y mejorada respecto a la anterior.



Figura 30: tren de la serie R-470.

El cambio más significativo en esta evolución fue la implantación del aire acondicionado y un nuevo interior, eliminando los tabiques de las plataformas y creando así un único salón por coche.

4.8.6.1. Caja

La estructura de esta serie es autoportante y está hecha de acero soldado sobre un bastidor de acero.

La composición simple está formada por tres coches, uno motor con cabina de conducción, otro remolque intermedio y un tercer remolque con cabina de conducción. En composición múltiple pueden funcionar hasta cuatro unidades, o doce coches.

Se colocaron dos lunas térmicas, de vidrio templado y laminado en polivinilo. Además, se ha instalado un acristalamiento en todo el lateral a lo largo de todo el vehículo.

4.8.6.2. Sistemas de tracción y auxiliar

La propulsión se comete por medio de cuatro motores eléctricos de corriente continua. Cada motor de 290.000 W de potencia es de arrollamiento en serie, con cuatro polos principales y polos de conmutación, bastidor cilíndrico de acero laminado y autoventilado.

4.8.6.3. Bogíes y frenos

El sistema de frenado automático es de tipo KNORR, con producción de aire por un compresor tipo W 160/200-1, accionado por un motor eléctrico de 8.500 W a 1.800 rpm, además de un equipo de secado.

La unidad tiene freno neumático, dinámico (reostático), electromagnético de patines y de estacionamiento (hidromecánico accionable por husillo).

Todos los bogíes llevan incorporados cuatro discos de freno, que van montados sobre las ruedas en los bogíes motores y sobre los ejes en los remolques.

4.8.7. Serie S-252

Las 75 locomotoras eléctricas de la serie S-252 son universales de gran potencia, en parte bitensión (se puede alimentar de 25.000 V o de 3.000 V). Fueron solicitados, en 1989, para que la empresa que opera la red ferroviaria tuviera el material apto para alcanzar los 220 km/h en las líneas de alta velocidad.



Figura 31: tren de la serie S-252.

4.8.7.1. Caja

La estructura de la serie S-252 es soldada autoportante. Las cabinas están unidas por un pasillo central de ancho 600 mm a cuyos lados se encuentran los equipos eléctricos y neumáticos. Tiene 4 puertas de acceso: 2 en cada cabina.

Cada locomotora equipa dos pantógrafos, aptos para 3.000 V en las de ancho ibérico y para 25.000 V las de ancho estándar.

4.8.7.2. Sistemas de tracción, bogíes y frenos

Estos tipos de coches motrices tienen dos bogíes, cada uno de dos ejes. Cada eje dispone de tracción independiente. Accionados por un motor trifásico asíncrono de 1.400 kW que transmite el esfuerzo a las ruedas por un accionamiento reductor y un árbol hueco.

Cada motor se puede regular de manera individual para lograr la máxima adherencia.

Con tal de obtener la máxima fiabilidad, el equipo eléctrico de potencia está formado por dos bloques independientes. Cada bloque corresponde a los ejes de un bogie y está compuesto por un convertidor de entrada. El circuito interno de entrada de corriente continúa de 2.800 V y dos onduladores que se alimentan individualmente de los dos motores de tracción del bogie.

El freno de servicio principal es el eléctrico y desarrolla una potencia de servicio continuo de 5.600 kW, incluyendo la regeneración de energía.

4.8.8. ALVIA Serie S-130

Los trenes de la serie S-130, también conocidos como Talgo 250 o "Patitos", son vehículos variables que pueden circular por las dos tipos de vías (ancho ibérico y ancho internacional), utilizando los intercambiadores de ejes. Estos están conferidos con bitensión: alimentadas a los 25.000 V de las líneas de alta velocidad y a 3.000 V de las líneas convencionales.



Figura 32: tren ALVIA de la serie S-130.

La velocidad que pueden llegar a correr estas unidades es de 250 km/h en líneas de alta velocidad y de 200 km/h en las convencionales.

4.8.8.1. Caja

Todos los coches de este tren está construido en una aleación ligera de aluminio que permite que sea más ligero, al tiempo que facilita el ahorro de energía. Las estructuras tienen doble pared estanca resistente hasta una variación de presión de 6.000 Pa que podría producirse en los túneles y en los cruces con otros trenes de alta velocidad.

El frontal de la cabeza tractora es aerodinámico y está optimizado para ondas de presión y viento lateral. Incorpora un enganche automático y un sistema de absorción de energía.

Todos los equipos eléctricos de tracción, freno, seguridad, refrigeración, etc. se montan en los laterales de la sala de máquinas, a ambos lados del pasillo central. Bajo el bastidor está instalado el transformador, la caja de baterías y las antenas de los equipos de seguridad.

4.8.8.2. Sistemas de tracción y auxiliar

Esta serie cuenta con dos cabezas motrices una en la cabeza y otro en la cola, y entre estas cabezas pueden incorporar hasta 11 coches. Cada cabeza tiene dos bogíes, con dos motores de tracción trifásicos asíncronos por cada uno. En total hay 8 motores que generan en conjunto 4.800 kW con tensión de 25.000 V en corriente alterna y 4.000 kW con tensión de 3.000 V en corriente continua.

Cada cabeza motriz incorpora dos pantógrafos, uno para corriente continua y otro para corriente alterna, conectados entre sí por la línea de techo, de 680 A a 25.000 V en corriente alterna y 2.000 A a 3.000 V en corriente continua.

4.8.8.3. Bogíes, frenos y suspensión

En los bogíes motores con cambio de ancho, los ejes y los motores van acoplados sobre una pieza rectangular que consecutivamente se acopla al bastidor del bogie.

Los bogíes se acoplan invertidos respecto a su posición normal y subsiguientemente se colocan girados bajo la motriz.

El cambio de ancho se realiza al paso del tren a una velocidad de 15 km/h por una instalación especial montada entre las vías de distinto ancho. Cada rueda está equipada con detectores de cajas calientes, con acción automática sobre el freno de emergencia en caso de sobrepasar la temperatura máxima permitida.

4.8.9. Comparación de las características de los trenes

En la tabla 57 se pueden ver las diferentes características que tienen todos los modelos de trenes que pasan por la línea R2 Sud de *Rodalies* de Barcelona citados y explicados anteriormente. Con esta tabla de resumen se pretende hacer una comparación entre las 8 series de locomotoras, observar que son los puntos más destacados de estas e intentar sacar alguna conclusión.

Primeramente se puede resaltar que el tren de la serie CIVIA es el que pasa con más frecuencia por la línea R2 Sud. En segundo lugar está la serie 450 / 451 que solo circula por la R2 Sud y la serie 447 respectivamente.

Observando la tabla 57 se puede ver que la composición de las locomotoras de los 8 tipos de trenes es muy similar. Todos se componen de dos coches motoras situados en cada extremo, a partir de los cuales se pueden adjuntar vario coches.

Respecto el tipo de pantógrafo, se puede decir que de las ocho series de trenes cuatro llevan pantógrafo del tipo FAIVELEY y cuatro llevan pantógrafo SCHUNK. Sabiendo que las trenes tipo CIVIA son los que pasan con más frecuencia no obstante los series 450-451 y 447 también circulan con gran frecuencia se podría concluir que los pantógrafos FAIVELEY y SCHUNK circulan con una orden muy similar. Estos datos son aproximados ya que es muy difícil saber con exactitud que series pasan más o menos.

También se puede añadir que en todas las series de trenes, menos en la serie 447, hay dos pantógrafos en cada coche motor. El funcionamiento de estos depende del sentido de circulación del tren ya que se alzan en cuestión de la dirección del tren. De esta manera, dos pantógrafos siempre están en interacción con el hilo de contacto.

La serie 447 consta de un coche remolque en la parte central, en el cual se sitúan dos pantógrafos, uno por cada sentido de la marcha. Este hecho genera, a diferencia de los demás, que esta serie reciba corriente a través de 1 pantógrafo.

Las series S-252 y S-130 pueden alimentar a 3.000 V o bien a 25.000 V cuando se trata de líneas de alta velocidad. El resto de trenes eléctricos que circulan por la línea R2 Sud solo se pueden alimentar de 3.000 V.

La potencia en régimen continuo de estos trenes oscila entre 1.160 kW y 2.960 kW. En la tabla se puede ver que la mayoría de los trenes nuevos trabajan con una potencia más baja.

CARACTERÍSTICAS	TIPOS DE TRENES							
	447	450-451	CIVIA	R-448	R-449	R-470	S-252	S-130
Composició	M-R-M	M-R-R-R-M / M-R-Rc	depende de la serie	M-Ri-Rc	A1-A4-A3-A5-A2	M -Ri - Rc	-	M - 11 R - M
Tipo de pantógrafo	FAIVELEY	FAIVELEY	SCHUNK	FAIVELEY	SCHUNK	FAIVELEY	SCHUNK	SCHUNK
Pantógrafos por tren	2 en coche remolque	2 pantógrafos	2 pantógrafos	2 pantógrafos	2 pantógrafos	2 pantógrafos	2 pantógrafos	2 pantógrafos
Ancho de vía /mm	1668	1668	1668	1668	(1668 / 1435)	1688	(1668 / 1435)	(1668 / 1435)
Tensión de alimentación /Vcc	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000 Vcc / 25 kV	3000 Vcc / 25 kV
Potencia en régimen continuo /kW	2400	2960 / 1480	1270 - 2200	2900	2400	1160	1428	1000 / 1200
Motores	8 motores	8 / 4 motores	De 4 / 8 motores	4 motores	6 motores	4 motores	4 motores	8 motores
Tipo de motor	Asíncrono trifásico	Asíncrono trifásico	Asíncrono trifásico	Asíncrono trifásico	Asíncrono trifásico	Asíncrono trifásico	Asíncrono trifásico	Asíncrono trifásico
Esfuerzo tractor máx. en el arranque /kN	230	320	170	290	170	170	300	220
Esfuerzo tractor a la velocidad máx. /kn	58	-	76	76	-	90	90	70
Velocidad máxima / km/h	120	140	120	160	160	140	200	220
Aceleración en arranque / m/s ²	1	0,62	0,59	0,80	0,85	0,62	1,5	1,5
Deceleración normal / m/s ²	1	1	1,1	0,9	1	1	-	-
Deceleración con sólo freno eléctrico / m/s ²	1	0,9	1,2	1	1	0,9	-	-
Deceleración máxima de urgencia / m/s ²	1,2	0,9	1,3	1	1	0,9	-	-
Alimentación de auxiliares	2 convertidores	1 cada coche	2 convertidores	1 convertidor	2 convertidores	1 convertidor	1 convertidor	2 convertidores
Tipo de batería	níquel-cadmio (Ni-Cd)	níquel-cadmio (Ni-Cd)	níquel-cadmio (Ni-Cd)	níquel-cadmio (Ni-Cd)	níquel-cadmio (Ni-Cd)	níquel-cadmio (Ni-Cd)	níquel-cadmio (Ni-Cd)	níquel-cadmio (Ni-Cd)
Entrada energía al convertidor /Vcc	3000 Vcc	3000 Vcc	2400 Vcc	2400 Vcc	3000 Vcc	3000 Vcc	3000 Vcc	3000 Vcc
Salida energía a auxiliares	380 Vca / 72 Vcc	380 Vca / 72 Vcc	380 Vca / 72 Vcc	72 Vcc	72 Vcc	380 /220 V	380 Vca / 72 Vcc	380 V
Freno dinámico	Regenerativo y Reostático	Reostático	Regenerativo y Reostático	Reostático	Regenerativo y Reostático	Reostático	Regenerativo y Reostático	Regenerativo y Reostático
Control de freno neumático	Eléctrico + neumático	Eléctrico + neumático	Eléctrico + neumático	Neumático	Eléctrico + neumático	Aire comprimido	Aire comprimido	Eléctrico + neumático
Freno de estacionamiento	Manual de husillo	Cilindros independientes	Muelle acumulador	Frenos de disco	Trifásicos convertidores	Manual de husillo	Acumulador 4 ejes	Muelle acumulador
Conducción con velocidad prefijada	Sí	Sí	Sí	No	Sí	No	Sí	Sí
Total plazas sentadas	270	1008 / 498	169 - 277	238	260	234	-	299
Total plazas de pie	468	836 / 410	438 - 720	110	288	114	-	0
Unidades construidas	183	24 / 12	237	31	57	57	75	45
Año de recepción	1993 - 2001	1994	2002 - 2007	1992	2008 - 2011	1993 - 2003	1991 - 1996	2002 - 2009

Tabla 57: Comparación de características de los diferentes trenes.

La tabla 57 también muestra cuantos motores y tipos de motores que tienen los trenes estudiados en este apartado. Siete de los ocho trenes tienen cuatro o bien ocho motores, la única serie que se diferencia de estos es la R-449 que tiene 6 motores. Todos estos trenes tienen motores asíncronos trifásicos de doble colector.

- **Motor asíncronos trifásicos de doble colector:** Este tipo de motores están formados por un rotor y un estator en el que se encuentran las bobinadas inductoras.

El rotor en estos motores está constituido por dos colectores (jaulas), una externa, de menor sección y material de alta resistividad, y otra interna de sección mayor y material de baja resistividad.

Ambas jaulas están separadas entre sí en cada ranura por medio de una delgada rendija que aumenta el flujo de dispersión en la jaula inferior.

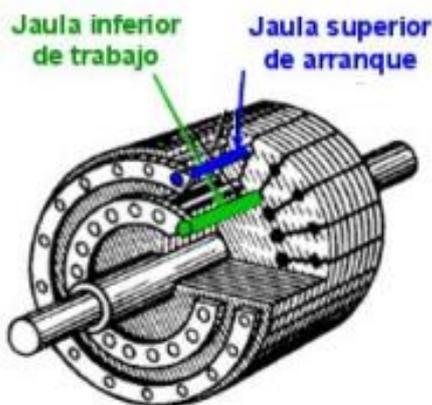


Figura 33: Esquema del motor asíncrono trifásico de doble colector.

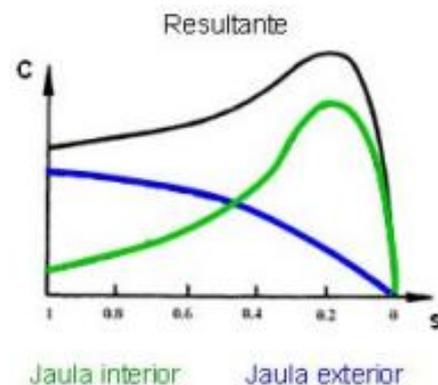


Figura 34: Gráfica del funcionamiento de un motor trifásico de doble colector.

De este modo se consigue que en el arranque la resistencia sea alta, lo que implica alto par de arranque y baja intensidad, y a la velocidad nominal, como la resistencia es baja, se tiene buen rendimiento.

El esfuerzo tractor máximo de arranque de las locomotoras que circulan por la R2 Sud de *Rodalies* va entre 170 kN y 300 kN. Este esfuerzo a velocidad máxima puede bajar a 58 kN y 90 kN.

La velocidad máxima que pueden alcanzar los trenes va entre 120 km/h y 220 km/h, pero en la línea R2 la velocidad máxima permitida para los trenes de cercanías es de 120 km/h.

Las aceleraciones y desaceleraciones no varan mucho y oscilan entre $0,59 \text{ m/s}^2$ y $1,5 \text{ m/s}^2$ en caso de aceleración. En desaceleración o frenado esta cifra va entre $0,9 \text{ m/s}^2$ y $1,2 \text{ m/s}^2$.

La última cosa que se podría destacar de la tabla 57 respecto a las características, es la alimentación de auxiliares, como pueden ser las luces interiores, aire acondicionado, alumbrado de emergencia, etc. y el tipo de batería. La salida de energía a auxiliares puede ser de 380 V en corriente altera o 72 V en corriente continua. Todas las baterías son del tipo níquel-cadmio (Ni-Cd) que tienen un ciclo de vida muy larga pero también tiene una desventaja que el cadmio es muy contaminante.

4.8.10. Comparación de las dimensiones y peso

En la tabla 58 se pueden ver las dimensiones y peso (tara) de los diferentes tipos y series de trenes que recorren la línea R2 Sud de *Rodalies* (Cercanías) de Barcelona. En la tabla hay una separación de las dimensiones y peso del coche motor y coche remolque.

La mayoría de pantógrafos se sitúan en el techo del coche motor, menos el del tren de la serie 447 que sus pantógrafos se encuentran al techo del coche remolque. Es importante saber esto para la comparación de las alturas de los trenes y ver la altura total del tren con el pantógrafo y poder comparar el intervalo de trabajo del pantógrafo.

Lo más importante de la tabla 58 es la altura máxima, ancho exterior y el peso de los trenes.

Las alturas máximas de las locomotoras que circulan por la línea R2 Sud van entre 4.030 mm y 4.310 mm. La series más altas son la S-252 con 4.310 mm y la 450-451, la R-449 con 4.300 mm. Mirando las alturas del coche motor y remolque del 447 se observa que son iguales de 4.185 mm.

El ancho exterior de los trenes varía unos 100 mm en el coche motor y unos 50 mm en el coche remolque. Estos valores de amplitud oscilan entre 2.900 mm y 3.000 mm. Es importante saber estos datos para saber la fricción del aire con las locomotoras, pero no influye mucho por la poca variación de las medidas.

Finalmente comparando los pesos totales de las locomotoras se puede deducir que los coches motores pesan más que los coches remolques ya que es donde está, como su nombre indica, el motor, baterías, cabina de conducción, pupitre de mando y todo tipo de controles de seguridad y comunicación.

Los coches motores tienen una tara entre 40 y 86 toneladas. En cambio el peso de los coches remolques oscilan entre las 12,2 y 52,6 toneladas. Estos datos están calculados sin pasajeros. Las cifras subirían si se añadieran el peso de los pasajeros.

DIMENSIONES Y PESO	TIPOS DE TRENES							
	447	450-451	CIVIA	R-448	R-449	R-470	S-252	S-130
Longitud entre enganches /mm	25479	26900	22400	25945	22700	26205	20380	20749
Ancho exterior (mm)	2900	2926	2940	2950	2940	2900	3000	2960
Altura máxima sobre el carril /mm	4185	4300	4260	4196	4300	4260	4310	4030
Distancia entre bogíes /mm	17400	-	-	18350	17400	-	10500	-
Empate de bogí /mm	2500	2650	2700	2600	2700	2600	3000	2800
Diámetro de rueda nueva /mm	890	840	890	1000	890	1000	1250	1010
Altura del piso sobre el carril /mm	1150	1010	1150	1380	1270	1028	-	760
Peso total /mm	58,5	70,2	40	64	42,8	66	86	72
Longitud entre enganches /mm	25035	26400	17750	26200	17750	26160	-	13140
Ancho exterior /mm	2900	2926	2940	2950	2940	2900	-	2942
Altura máxima sobre el carril /mm	4185	4300	4260	4180	4300	3682	-	3365
Distancia entre bogíes /mm	17775	-	-	18790	17750	-	-	-
Empate de bogí /mm	2500	2400	2500	2500	2500	2500	-	2800
Diámetro de rueda nueva /mm	890	840	890	940	890	940	-	880
Altura del piso sobre el carril /mm	1150	1010	1150	1380	1270	1028	-	760
Peso total /Tn	45,5	52,6	25,8	44	28,6	45	-	12,2 - 28,8
	COCHE MOTOR				COCHE REMOLQUE			

Tabla 58: comparación de dimensiones y pesos de los diferentes trenes

5. ANÁLISIS

Los siguientes apartados tienen como objetivo intentar aglutinar toda la información pertinente al caso, para ayudar a realizar una posible hipótesis del origen del problema.

Para ello se efectúan ensayos en los laboratorios de materiales, un seguimiento exhaustivo del recorrido de unas de las locomotoras que realiza las labores de mantenimiento en los talleres de la Empresa Operadora – *Vilanova i la Geltrú*, analizar la evolución de desgaste de los diferentes elementos y estudiar el comportamiento del desgaste en una pletina de frotador.

Para completar el análisis se estudia los procesos de fabricación de los mismos, el comportamiento y las propiedades de cada elemento, tanto por separado como aleados.

También, se relaciona el desgaste presentado en los diferentes elementos a lo largo de los años con el gasto económico que ha supuesto. El objetivo de este sub-apartado trata de presentar una visión global del impacto económico que ha supuesto semejante problema.

5.1. ANÁLISIS DE DESGASTE DEL HILO DE CONTACTO

Tal y como se explica en análisis de desgaste de pletinas, donde se sacó una serie de datos a cerca de la velocidad de desgaste del material rodante, análisis de desgaste de los diferentes materiales que se montaron a lo largo de estos últimos 5 años y así como la evolución del desgaste de las diferentes pletinas. Para analizar el hilo de contacto, apenas se dispone de información.

No obstante, se obtuvo algunos datos explicados en profundidad, en los antecedentes, apartado 3.3 (Gestor de la Infraestructura). Donde se detalla cronológicamente, como ha sufrido el desgaste, el hilo de contacto la empresa de la infraestructura. Así como las actuaciones que se han realizado. Pero esta información, es muy genérica. No detalla aquellos puntos donde el desgaste se acusa en el hilo de contacto. Tampoco cómo se comportan las diferentes aleaciones.

Se considera interesante, que se tuviese un control del hilo de contacto más exhaustivo sobre ciertos puntos, que se consideran problemáticos. Estas son las siguientes:

- **En las estaciones**, donde los trenes realizan la maniobra de parada y arranque. El consumo de la arrancada y la entrega de corriente en la frenada. Produce una alta circulación de corriente por el hilo de contacto. Hecho que provoca aumento de temperatura en el mismo y flashes visible.
- **En las zonas donde hay instalada catenaria rígida**. Al ser una zona donde se varía la tensión del hilo de contacto, con respecto al resto de tramos. Además, este es un tramo sospechoso por parte de la empresa encargada de la gestión de la infraestructura. Ya que coincide como se explica en los antecedentes, el desgaste excesivo en los frotadores con la instalación de catenaria rígida. Por tanto se considera un punto crítico, donde hacer un control más exhaustivo.
- **Las zonas donde las alturas del hilo de contacto sean elevadas o bajas**. Ya que el pantógrafo tiene un rango de trabajo. Donde la presión ejercida sobre el hilo de contacto es prácticamente constante. Pero si trabaja fuera de este rango, puede haber problemas y acelerar el desgaste. Si ejerce mucha presión, provoca un desgaste mecánico prematuro. Si por el contrario es insuficiente, provoca flashes y el material tanto de las pletinas como hilo de contacto llega a fundir.

5.2. ANÁLISIS DE DESGASTE DE LAS PLETINAS

Se ha realizado un análisis de desgaste de las diferentes pletinas que se han ido montando desde abril del 2011 hasta marzo del 2014. Período a partir del cual empieza a acusar un desgaste excesivo en las pletinas de los pantógrafos. A lo largo de este período se observa cómo el operador de red ha ido cambiando de materiales en sus pletinas para intentar frenar este desgaste tan excesivo.

Gracias a la colaboración del personal del operador de red en talleres de *Vilanova*, ya que ha facilitado los registros donde se anotan el desgaste de dichas pletinas. Se ha podido realizar el análisis que se explica a continuación.

En los registros que del operador de red ha facilitado, viene anotado la medida en milímetros del espesor de la pletina más desgastada, ya que cada pantógrafo dispone de dos pletinas (solo en el caso del cobre electrolítico o cobre-cromo-circonio). Estos datos existen para ambos pantógrafos de cada unidad (tren). Cuando entra a taller y la medida a la que sale a dar servicio.

Para asegurar que las pletinas van a poder dar servicio, hasta la siguiente revisión. Se guardan unos márgenes de seguridad, dependiendo del tipo de pletina. Es decir, unos milímetros de espesor de material, el cual una vez llegado a este límite. Deben sustituirse ambas pletinas del pantógrafo.

Los espesores mínimos que permite que la pletina siga dando servicio para cada material son los siguientes:

MATERIAL	ESPEJOR INICIAL /mm	ESPEJOR MÍNIMA DE SERVICIO /mm
Cu-ETP	7	4
Cu-Cr-Zr	10	4
<i>Kasperowski</i>	22	4

Tabla 59: Características básicas, pletinas.

Con los datos que nos facilitan el operador de red, no se pudo sacar ninguna conclusión inicial. Ya que están todas las unidades mezcladas cronológicamente así como los diferentes materiales.

Con la ayuda del Excel se ha realizado el análisis de algunas de las 76 unidades CIVIA que hay en circulación afectada por este problema de desgaste. De las cuales se estudio la unidad 465215 con detalle ya que es una de las unidades donde se dispone de todos los registros.

Además si se compara con otras unidades dónde también se tienen todos los datos se observa que el comportamiento es muy parecido con respecto las otras unidades.

No se pudo hacer el mismo análisis para las otras unidades. Estas montan otro tipo de pantógrafo. Según dice el operador de red no está teniendo tantos problemas de desgaste. Hubiese sido interesante comparar las gráficas con un tipo de pantógrafo y otro. Pero a pesar de pedir la documentación no se nos ha facilitado.

5.2.1. Gráficas de la vida útil

En la primera gráfica se ve la vida en kilómetros de cada pletina, en función del material. Así como los milímetros de desgaste que sufre. Esta gráfica 1 se ha analizado para ambos pantógrafos para ver si en alguno de ellos acusa un desgaste notablemente mayor.

Como se puede observar, las pletinas del cobre electrolítico apenas llega a los 10.000 km y ya tienen que cambiarlas por unas nuevas debido a esta situación de desgaste descontrolado. Según nos comenta el personal del operador de la red ferroviaria, en condiciones normales estas pletinas duran hasta 3 veces más.

Debido a este desgaste, el operador de red decide montar pletinas de Cobre-Cromo-Zirconio. Que corresponde a la línea roja de las gráficas 1, 2, 3 y 4. Estas pletinas son notablemente más duras que las de cobre electrolítico y además tienen de espesor 10 mm. Por tanto como se observa en la gráfica 1 y 2 su vida útil es mucho mayor y se comporta mucho mejor al desgaste. Los pantógrafos que llevan estas pletinas pueden hacer casi 60.000 km sin cambiarse, una mejora considerable. Aunque a lo largo del proyecto se observa cómo han afectado negativamente estas pletinas al hilo de contacto.

La tercera línea, corresponde a las pletinas *kasperowski*. Estas son unas pletinas mixtas de cobre y carbono. Como se puede observar el desgaste es mucho más alarmante que con las pletinas de cobre electrolítico. A pesar de hacer 20.000 km en servicio, se ve como desgasta en espesor de material 18 mm.

Si se compara el desgaste entre ambos pantógrafos no se aprecia un comportamiento de desgaste muy diferente. El pantógrafo 1 desgasta 1 mm más con las pletinas de cobre-cromo-zirconio que el pantógrafo 2. Pero como no sabemos el itinerario que ha recorrido cada pantógrafo de esta unidad, no se puede sacar conclusiones respecto a esta diferencia de desgaste para esta unidad.

En el apartado 5.10 (Estudio de correlación (Desgaste)) se estudia el seguimiento de otra unidad.

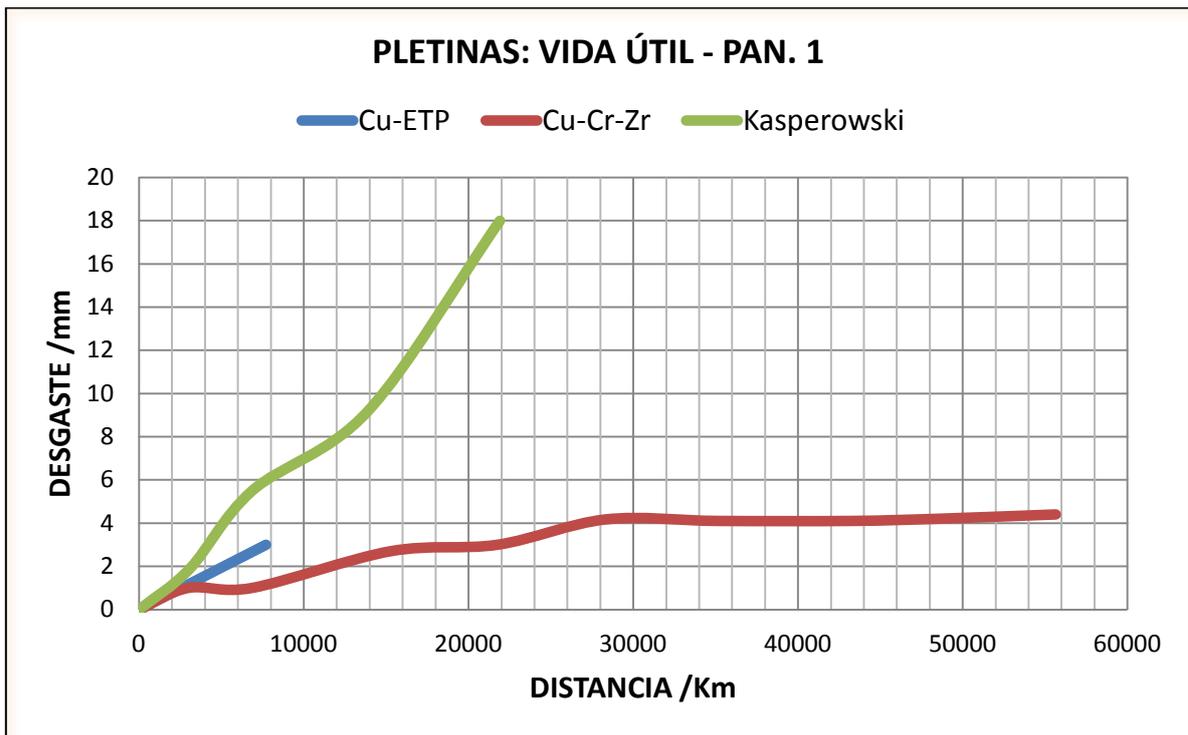


Gráfico 1: Vida útil - pantógrafo 1.

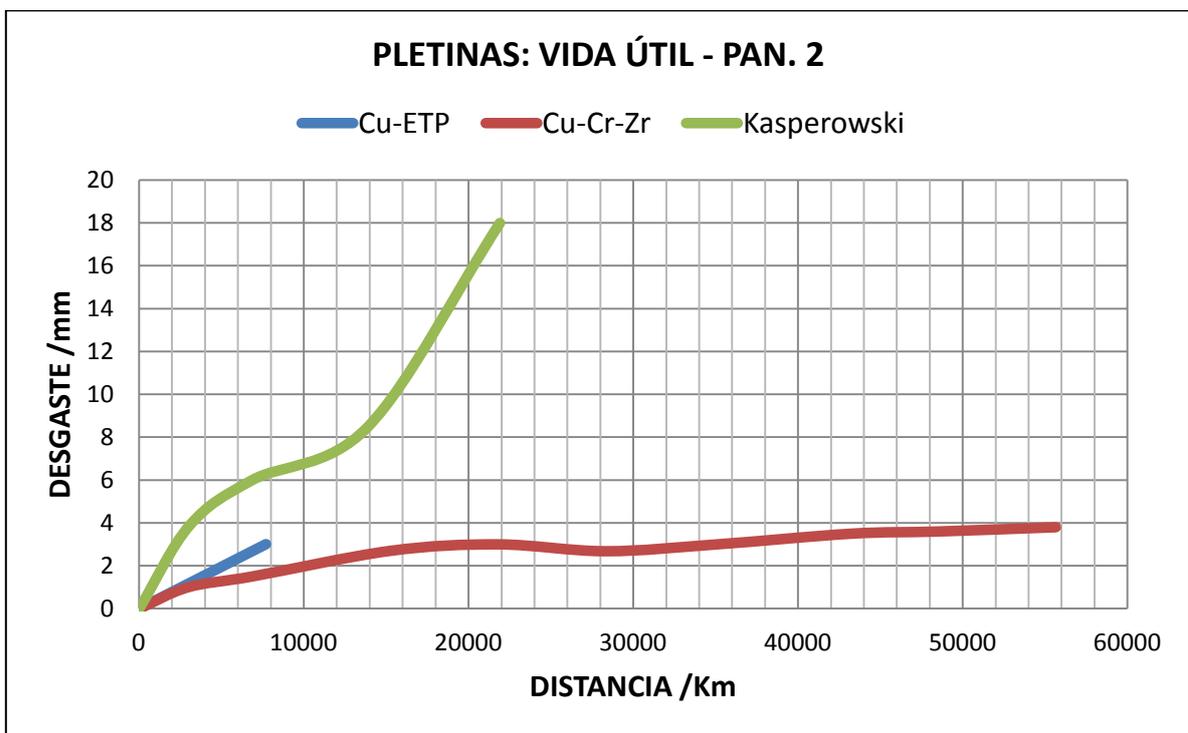


Gráfico 2: Vida útil - pantógrafo 2.

5.2.2. Gráficas de desgaste

En las siguientes gráficas se observa una comparativa entre las tres clases de pletinas que se han montado a lo largo de estos últimos cuatro años.

Corresponde al desgaste en milímetros de espesor que han sufrido las pletinas en servicio durante 10.000 km.

En primer lugar las pletinas de cobre electrolítico que como se observa en la gráfica 3 ha desgastado 4 mm en los 10.000 km, durante el servicio. También se puede ver que la curva de desgaste es prácticamente una línea constante. Esto es debido a que desde que montaban la pletina a la siguiente revisión, ya había que cambiarla. Por tanto no se pueden tomar más puntos de referencia.

Las pletinas de Cobre-Cromo-Zirconio desgastan 2 mm en los 10.000 km, durante el servicio, la mitad que las de cobre electrolítico.

En cuanto a las pletinas mixtas *kasperowski*, el desgaste es el más elevado de las tres, 7 mm. Esto es debido a que el grafito, pese a tener muy buenas condiciones de conductividad y ser un material lubricante. Es también a la misma vez mucho más blando que el cobre y la aleación de Cobre-Cromo-Zirconio.

Si se compara los pantógrafos se observa que la evolución del desgaste es algo diferente. El pantógrafo 1, inicialmente sufre un desgaste menos acusado que el pantógrafo 2. Pero a lo largo de su vida útil llegan a los mismos valores de desgaste.

Al igual que en la gráfica 1 tampoco se puede extraer ninguna conclusión puesto que se desconoce el itinerario de ambos pantógrafos.

Hubiese sido interesante conocerlo puesto que pudiera ser que un pantógrafo y otro circularan en diferentes tramos (variables de la vía) o diferentes situaciones de servicio (hora de mayor afluencia de pasajeros).

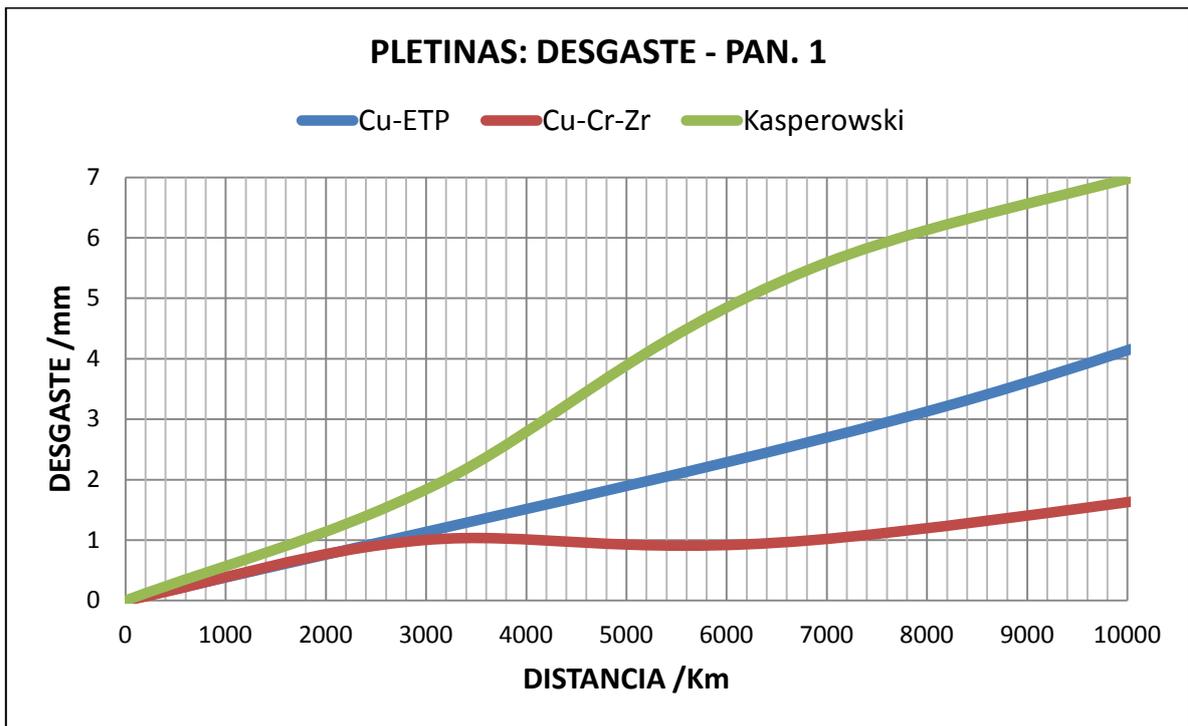


Gráfico 3: Desgaste - pantógrafo 1.

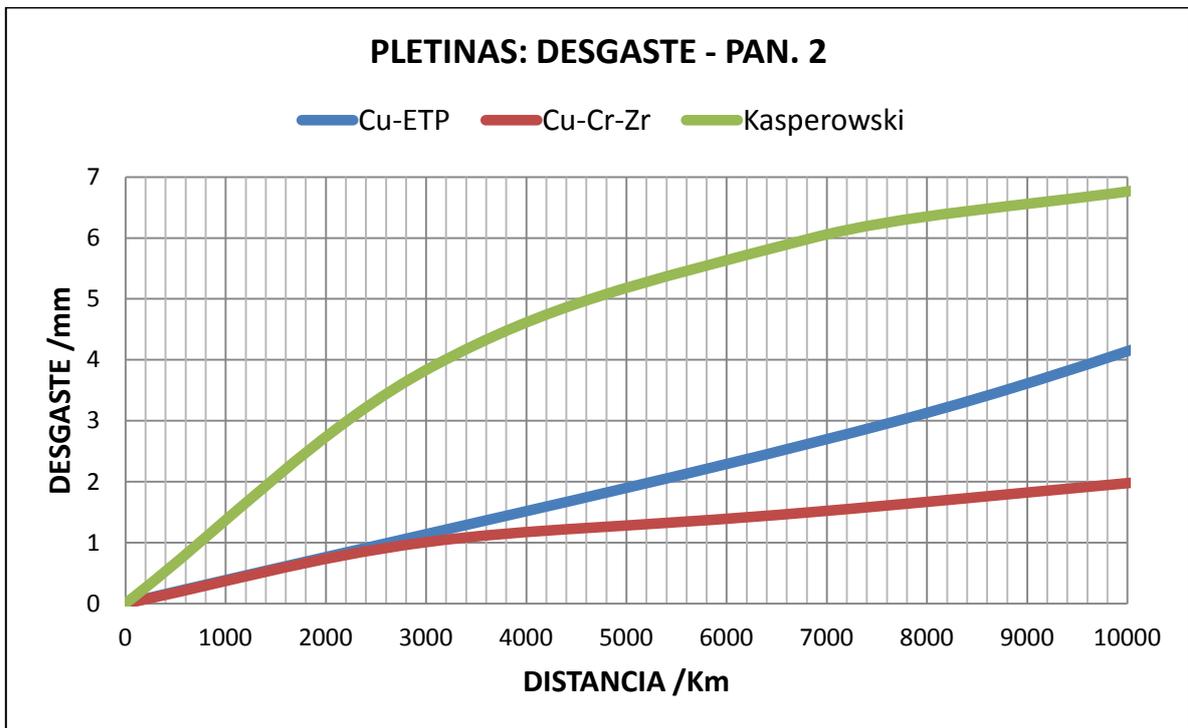


Gráfico 4: Desgaste - pantógrafo 2.

5.2.3. Evolución histórica del desgaste según pletina

En la gráfica 5 se observa los kilogramos de hilo de contacto de la catenaria que han sustituido a lo largo de los años. Como se puede observar, cada año ha incrementado de manera casi exponencial. No obstante, el año 2013 no refleja el consumo real de los kilos que la empresa de la infraestructura, tuvo que sustituir.

En la gráfica 6 se observa una evolución del desgaste de las tres clases de pletinas que se han montado a lo largo de estos últimos cuatro años.

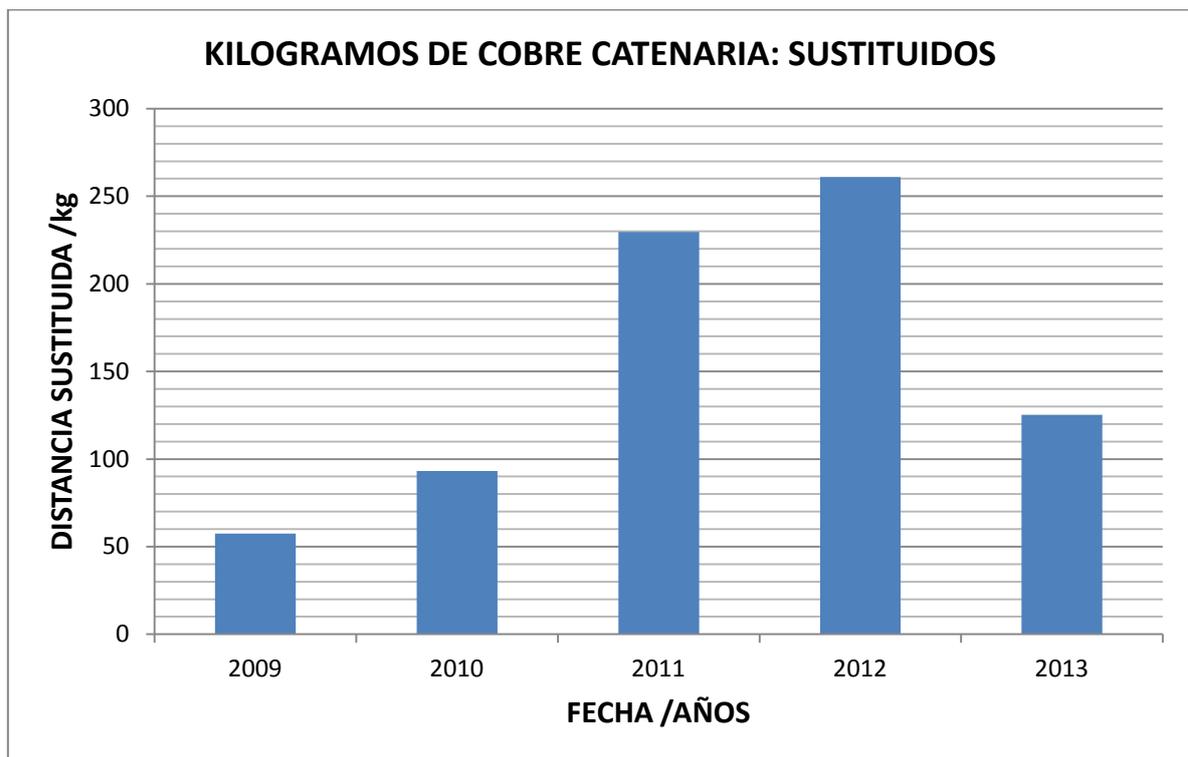


Gráfico 5: Kg de hilo de contacto sustituidos.

Se puede observar, que en el año 2011, el operador de la red ya tenía problemas de desgaste y al mismo tiempo, el gestor de la red también.

El cambio de material en la pletina a finales del año 2011 por parte del operador, no influyo en la sustitución del hilo de contacto. Ya que el desgaste en el hilo ya estaba extendido. Además, el cambio de pletinas por parte de operador, según los gráficos 5 y 6, no es tan drástico, ya que no generan el incremento de la sustitución. Aunque al final del año 2013 se observa en la grafica 6 que el desgaste de las pletinas se está acelerando.

No obstante, el grafico 5, no refleja a la velocidad que se consume el hilo de contacto, por lo que no se puede justificar que no esté sufriendo un desgaste mayor o menor a partir de estos datos. Aunque si desgaste menos para el operador, con pletinas Cu-Cr-Zr.

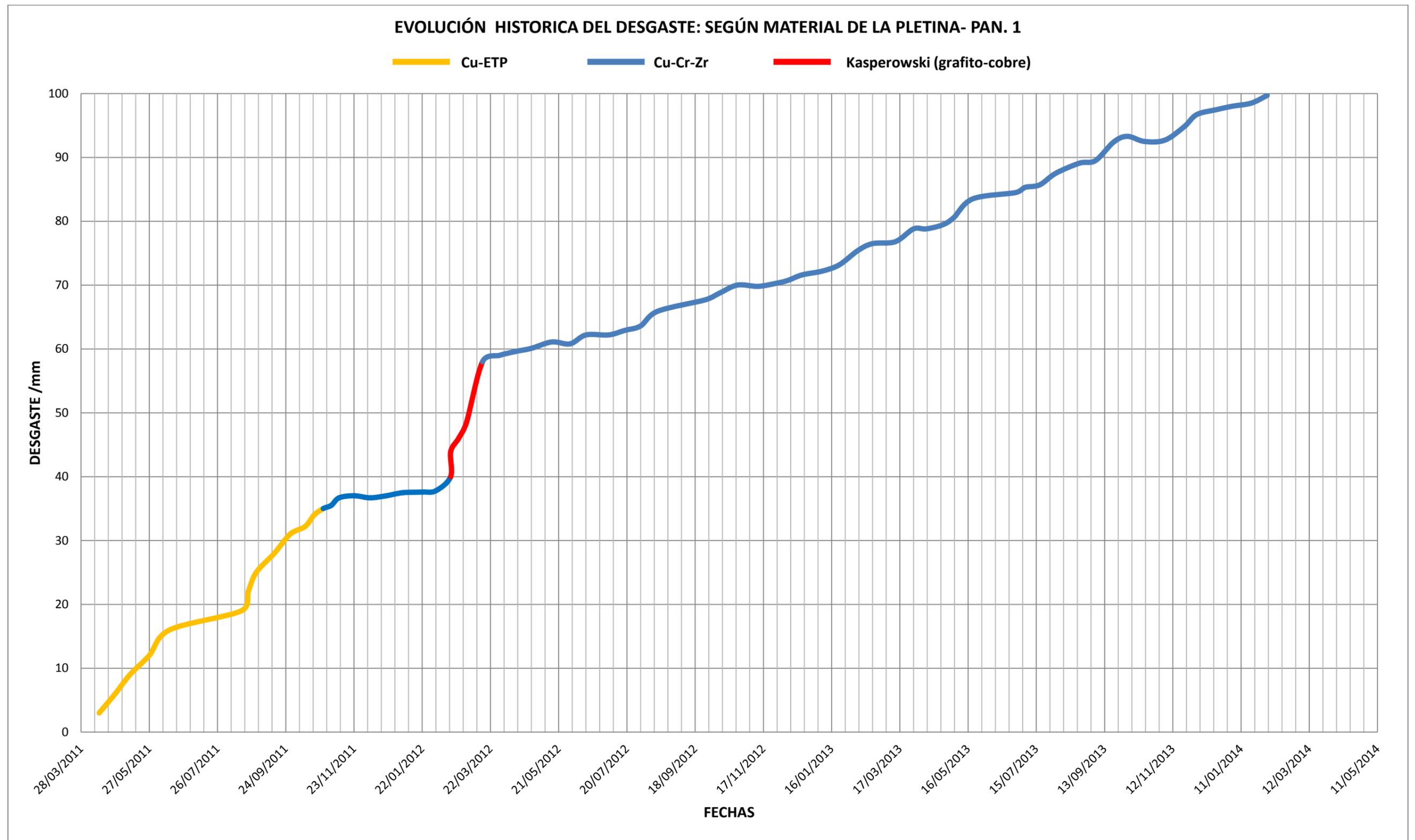


Gráfico 6: Evolución histórica del desgaste en la unidad 465215.

5.2.4. Conclusiones

Una vez ordenado todos los datos y realizado el análisis, se ha obtenido unas gráficas donde se observa la vida útil en kilómetros de cada pletina.

También se aprecia el desgaste que sufren unas pletinas y otras con el mismo número de kilómetros. Esto ofrece una idea de la dureza de los tres tipos de pletinas. La que más desgasta que son las *kasperowski*, son las más blandas. Las más duras son las de cromo-cobre-circonio, ya que su desgaste es muy pequeño.

Este análisis no aporta nada acerca de cuál ha podido ser el motivo que ha provocado este desgaste excesivo en las pletinas.

Sin embargo, va a ayudar a cuantificar el coste económico que supone el uso de un tipo de pletinas u otras. Puesto que se conoce los kilómetros que pueden trabajar antes de su sustitución. Este es un aspecto importante para garantizar que el operador de red puede dar el servicio de una revisión a otra.

Estas revisiones son cada diez o veinte días máximos, como se explica anteriormente en el manual de mantenimiento del pantógrafo (apartado Mesilla, punto 4.7.3).

Las pletinas *kasperowski* son unas pletinas muy parecidas a las que en un futuro se van a montar para intentar frenar el desgaste del hilo de contacto. Se ha observado que pueden aguantar 20.000 km. Una cifra muy baja si lo comparamos con lo que están durando las pletinas de grafito en otras instalaciones, pero a pesar de esto podría dar el servicio de una revisión a otra.

El próximo análisis de desgaste será teniendo en cuenta el itinerario para observar si las diferentes variable (túneles, catenaria rígida o flexible, zona de balasto o placa, los kilómetros que circulan por la R2 Sud) de que manera afectan a un pantógrafo y otro. De esta manera tratar de sacar nuevas conclusiones para acotar las zonas dónde se acusa el desgaste de pletinas.

5.3. OBSERVACIÓN DE UNA PLETINA

Antes de proceder a la realización de los diferentes ensayos sobre el frotador de Cu-Cr-Zr desgastado proporcionado por el taller de mantenimiento de la empresa operadora de la red de *Vilanova i la Geltrú*, se realizó un estudio previo, con el objetivo de obtener una serie de conjeturas previas, que pueda ayudar a comprender el comportamiento del frotador respecto al desgaste y los diferentes defectos superficiales que podrían indicar problemas en la interacción entre el pantógrafo y la catenaria.

5.3.1. Evolución del desgaste

La primera acción fue analizar la evolución del desgaste y como afecta este factor a la geometría del frotador. Para ello se dividió el frotador en 102 partes de 10 mm en la cual se tomó las dimensiones en los planos donde la afectación del desgaste era más evidente.

Los planos a analizar fueron los X-Z y X-Y, ya que después de una primera inspección visual se observó una mayor presencia de imperfecciones e irregularidades en estos planos como consecuencia del desgaste progresivo en la superficie de contacto.



Figura 35: Frotador desgastado en 3D.



Figura 36: Frotador desgastado - vista de perfil.



Figura 37: Frotador desgastado - vista de alzado.

La segunda acción realizada paralelamente a la anterior fue la realización de una inspección visual a lo largo del frotador, con el fin de detectar y analizar las partes más afectadas superficialmente debido a una mala interacción entre el pantógrafo y la catenaria.

El procedimiento fue similar, cada 10 mm se apuntaba los diferentes defectos detectados, del cual se apuntaba el plano en el cual se ubicaba y sus dimensiones.

5.3.1.1. Estudio del desgaste – Plano XZ

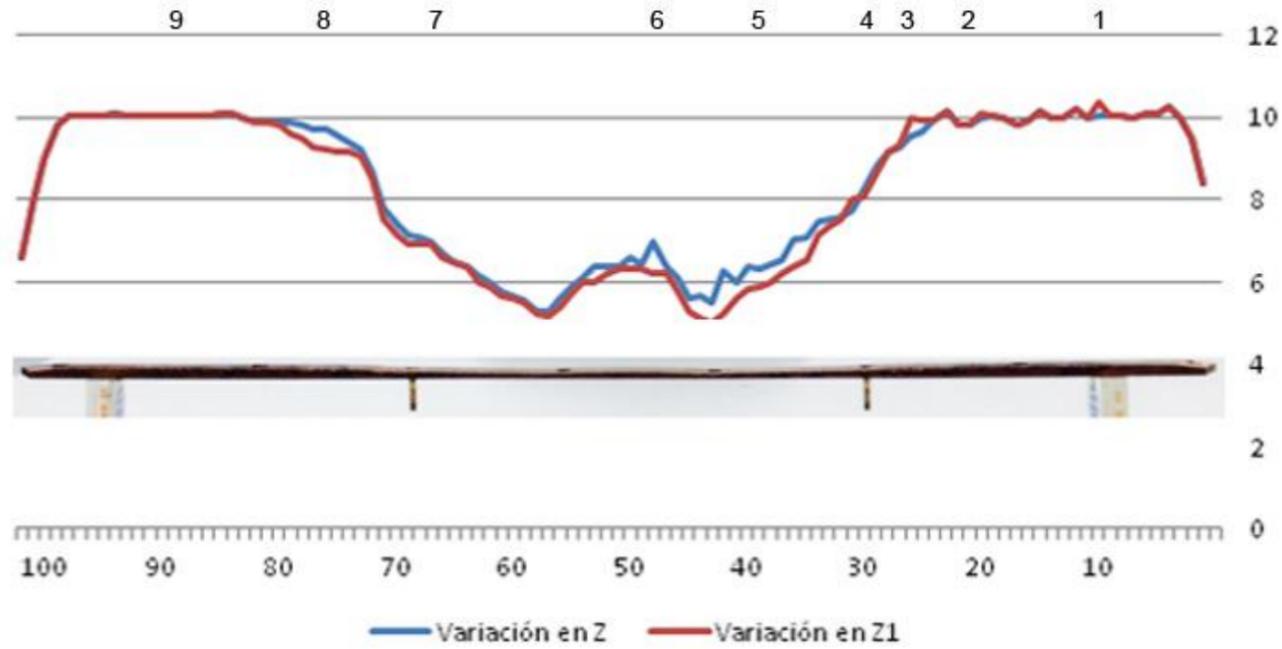


Figura 1



Figura 2



Figura 3



Figura 4

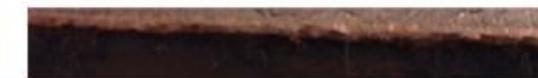


Figura 5



Figura 6



Figura 7



Figura 8



Figura 9

Figura 38: Conjuntos sub-figuras pletina, plano XZ.

SUB - FIGURA (núm.)	RANGO EN X (cm)	DEFECTO	TIPO	CAUSA
1	10-11	Rebaba	Superficial	Punto caliente presente debido al continuo paso de corriente eléctrica y desgaste mecánico.
2	20-23	Enganchón	Superficial	Excesivo desgaste de la banda de contacto o hilo de contacto por falta de mantenimiento.
3	26-28	Perlero	Superficial	Arco eléctrico a causa de un excesivo margen existente entre el pantógrafo y catenaria.
4	30-31	Perlero	Superficial	Arco eléctrico a causa de un excesivo margen existente entre el pantógrafo y catenaria.
5	31-47	Desfase entre Z-Z1	Desgaste irregular	Se debe a la dirección en la que actúa el hilo de contacto respecto al frotador, al actuar en un solo sentido, los diferentes restos de material tienen a incrustarse en una zona concreta del frotador.
6	47-49	Pico positivo	Desgaste irregular	Restos de material incrustados por el arranque de material debido a la diferencia de durezas entre elementos.
7	66-68	Rebaba	Superficial	Punto caliente presente debido al continuo paso de corriente eléctrica y desgaste mecánico.
8	78-80	Rebaba	Superficial	Punto caliente presente debido al continuo paso de corriente eléctrica y desgaste mecánico.
9	89-90	Perlero	Superficial	Arco eléctrico a causa de un excesivo margen existente entre el pantógrafo y catenaria

Tabla 60: Observaciones pletina plano XZ.

5.3.1.2. Estudio del desgaste – Plano XY

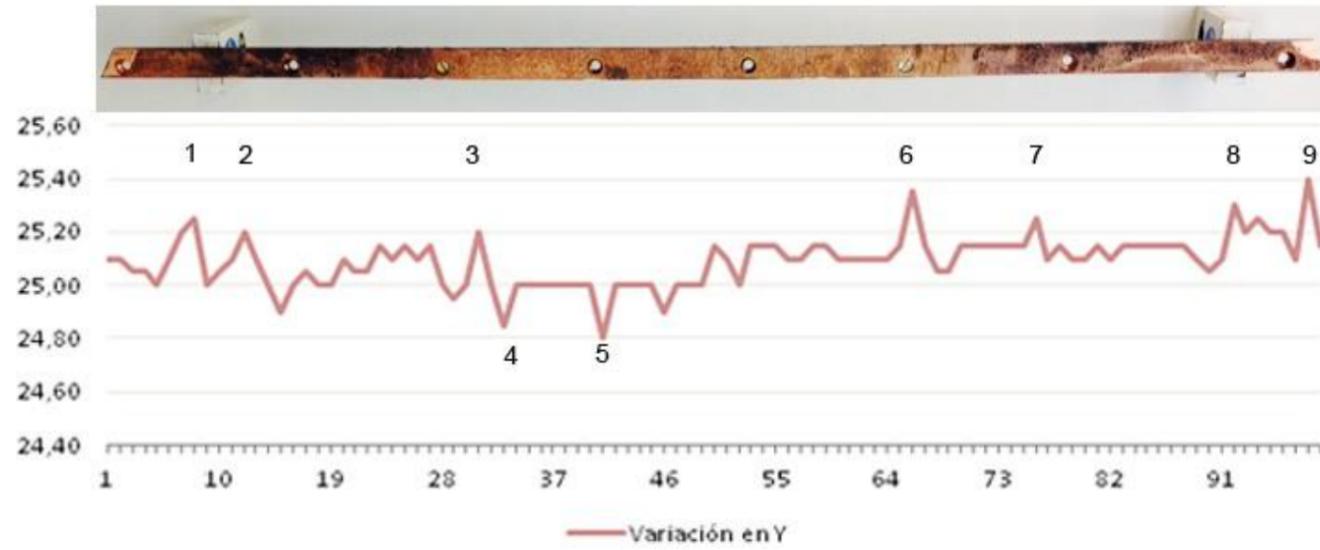


Figura 1



Figura 2



Figura 3



Figura 4



Figura 5



Figura 6



Figura 7



Figura 8



Figura 9

Figura 39: Conjuntos sub-figuras pletina, plano XY.

SUB – FIGURA (núm.)	RANGO EN X (mm)	DEFECTO	TIPO	CAUSA
1	70-80	Pico positivo	Desgaste irregular	Restos de material incrustados por el arranque de material debido a la diferencia de durezas entre elementos.
2	110-140	Rebaba	Superficial	Punto caliente presente debido al continuo paso de corriente eléctrica y desgaste mecánico.
3	300-320	Pico positivo	Desgaste irregular	Restos de material incrustados por el arranque de material debido a la diferencia de durezas entre elementos.
4	330-340	Pico negativo	Desgaste irregular	Arranque de material debido a un contacto brusco entre el pantógrafo y catenaria
5	400-420	Perlero	Superficial	Arco eléctrico a causa de un excesivo margen existente entre el pantógrafo y catenaria
6	650-670	Rebaba	Superficial	Punto caliente presente debido al continuo paso de corriente eléctrica y desgaste mecánico.
7	750-770	Pico positivo	Desgaste irregular	Restos de material incrustados por el arranque de material debido a la diferencia de durezas entre elementos.
8	910-930	Pico positivo	Desgaste irregular	Restos de material incrustados por el arranque de material debido a la diferencia de durezas entre elementos.
9	980-990	Pico positivo	Desgaste irregular	Restos de material incrustados por el arranque de material debido a la diferencia de durezas entre elementos.

Tabla 61: Observaciones pletina plano XY.

5.3.2. Conclusiones

Una vez finalizado el estudio, analizando los datos obtenidos y visualizando las diferentes gráficas, se extrajeron las siguientes conclusiones:

SUPERFICIE DE CONTACTO IRREGULAR.

A causa del desgaste irregular a lo largo del frotador, la superficie de contacto adquiere una serie imperfecciones que hacen que su interacción con el hilo de contacto sea perjudicial en mayor medida para el hilo de contacto al ser el material más blando, pronunciando así su desgaste.

Esta circunstancia se ve perfectamente reflejada en la grafica del plano X-Y donde el valor de 25 mm inicial del frotador no es regular a lo largo de la pieza, a causa de las diferentes incrustaciones y arranques de material ocasionados por la interacción entre ambas partes.

Otro factor negativo a causa de este defecto serían las altas probabilidades de algún tipo de incidencias que podrían causar problemas de servicio y seguridad respecto a las instalaciones y los usuarios.

EFFECTO NEGATIVO DE LOS TORNILLOS.

Las presencia de la mayoría de defectos superficiales cerca de las zonas donde se ubican los elementos de sujeción y la manera en la que se encuentran los tornillos, en algunos llegando a arrancar la cabeza del tornillo debido al excesivo desgaste, indica que la presencia de este elemento es muy negativo para el frotador tanto a nivel de interacción como de homogeneidad eléctrica de la pieza.

Una vez finalizado el estudio cabe destacar que las diversas conclusiones presentadas y hipótesis de la posible causa del desgaste no son definitivas y solo son fruto del estudio de desgaste y de la inspección realizada.

DESGASTE CENTRALIZADO.

El desgaste a lo largo del frotador se representa de forma más pronunciada en la parte central del frotador (aprox. 250 mm a 770 mm), hecho que provoca diversos defectos, como los anteriormente vistos, en las zonas ubicadas en los extremos a causa de la diferencias de altura en el cambio de una superficie de contacto a otra.

El motivo de este desgaste:

- Podría ser la diferencia de descentramiento entre los dos tipos de catenaria (flexible y rígida) donde los valores oscilan entre los ± 15 cm y ± 30 cm, aunque la empresa gestora de la infraestructura asegura que los descentramientos en la catenaria rígida han sido aumentados a lo largo de estos años hasta llegar a los valores establecidos en catenaria flexible.

La presencia de tramos donde el descentramiento no cumple estos rangos podría ser un factor a considerar debido a los valores de desgaste obtenidos del frotador desgastado.

- Podría ser la rigidez que experimenta la catenaria en los extremos a causa de la colocación de los del sistema de atirantado, provocando un contacto más agresivo con el hilo de contacto. (Ver figura 62)
- Podría ser el tiempo de trabajo en las zonas ubicadas en los extremos (1-3), que es más prolongado que en la zona central (2), dejando un margen menor a la refrigeración de la zona, derivando a la creación de puntos calientes más propensos a sufrir imperfecciones. (Ver figura 62).

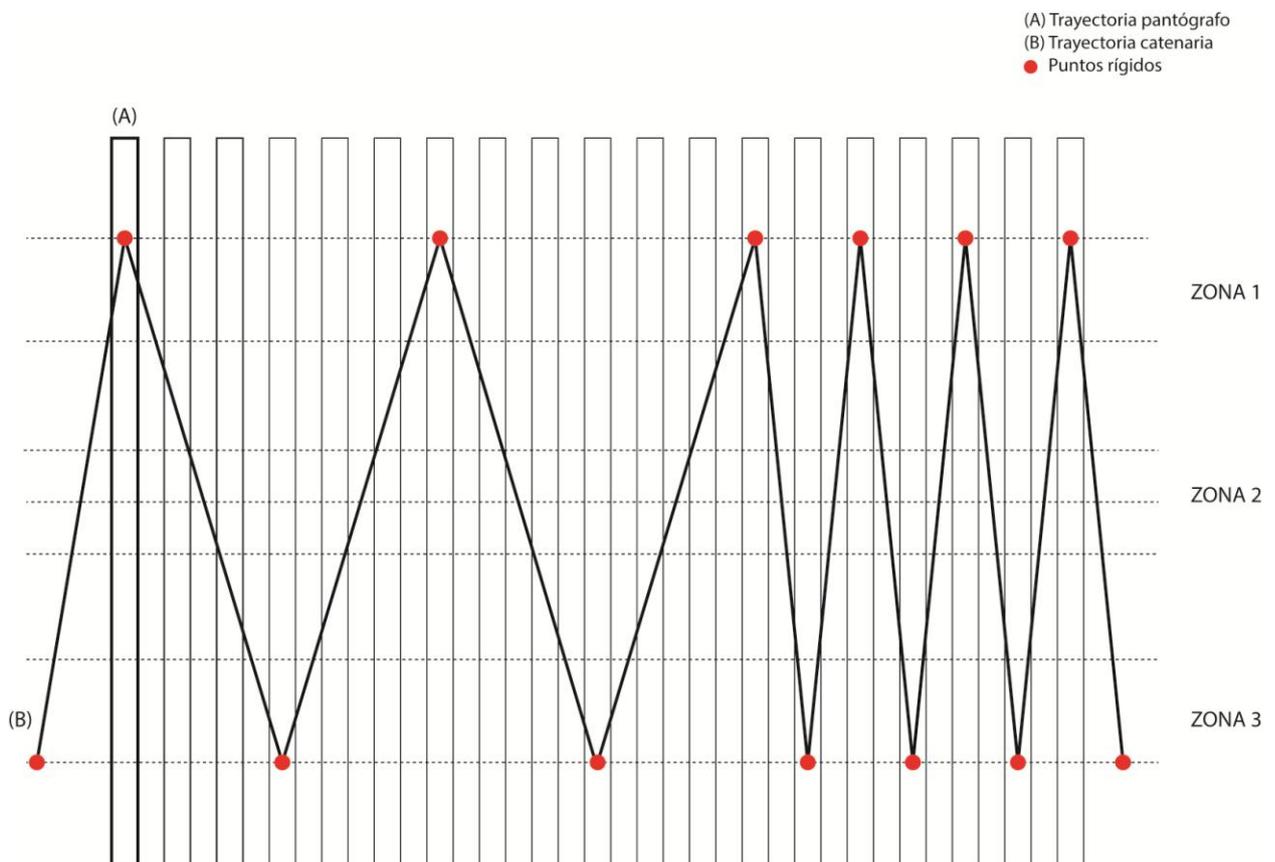


Tabla 62: Movimiento del frotador sobre la catenaria.

5.4. ESTUDIO DE CORRELACIÓN (ECONÓMICO)

El problema estudiado a lo largo de este proyecto, afecta a dos elementos importantes en la interacción pantógrafo - catenaria como son el frotador y el hilo de contacto, siendo responsabilidad de dos empresas independientes, como Empresa Operadora y Empresa de Infraestructura.

Debido a la necesidad de establecer un valor comparativo, con el cual poder comparar la evolución del desgaste tanto por parte de Empresa de Infraestructura, como por parte de Empresa Operadora, se realiza el siguiente estudio de correlación.

Este estudio consiste en estudiar desde el año 2009-2014 el consumo de material de ambas partes implicadas, relacionándole directamente con el gasto destinado al cambio de hilo de contacto o frotadores, el objetivo principal es conocer qué empresa se ha visto más perjudicada en la aparición del problema y la evolución del problema a lo largo de los años después de las diversas acciones llevadas a cabo por una cada de las empresas, cabe señalar que los únicos datos que se refleja en este estudio son a nivel de sustitución de material según los datos proporcionados por las empresas, dejando a un lado el gasto que supone las labores de mantenimiento.

5.4.1. Empresa de Infraestructura

Según los datos proporcionados por Empresa de Infraestructura del consumo de Cu-ETP entre los años 2009-2013, se extraen las siguientes gráficas.

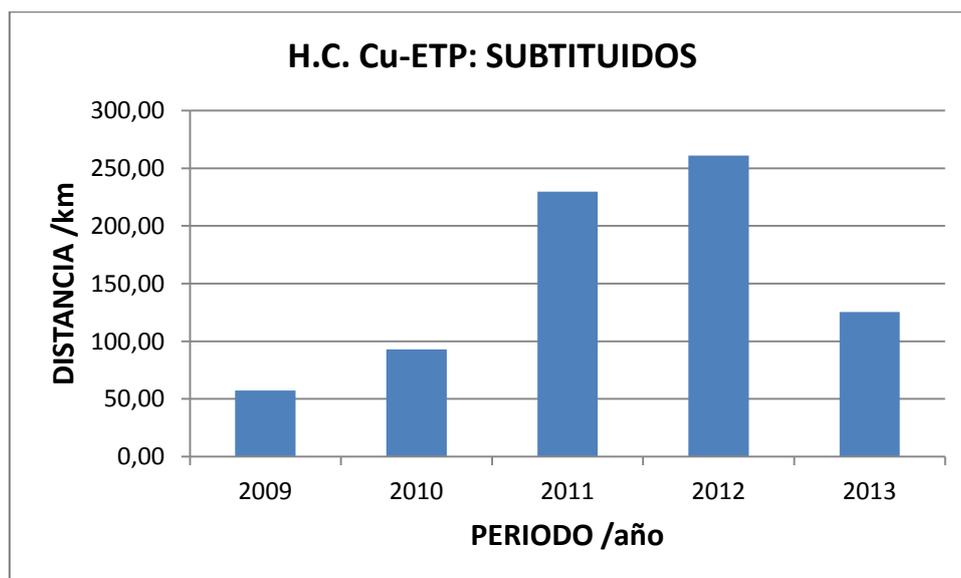


Gráfico 7: Kilómetro de H.C. Cu-ETP substituidos.

La gráfica 7, se obtiene a partir de la relación peso - longitud, obtenidos a partir de las características marcadas por el material y por el hilo de contacto, densidad y superficie.

Como se puede observar, durante los años 2009-2010, los kilómetros substituidos de Cu no superaban los 100 Km, donde la diferencia de consumo entre estos dos años viene marcada por el cambio de sección del hilo de contacto, como medida ante el excesivo desgaste.

En cambio los años 2011-2012, el consumo y por consecuencia el número de kilómetros substituidos se incrementa considerablemente marcando valores superiores a los 250 km, datos que coinciden con el montaje por parte de Empresa Operadora de las pletinas de la aleación Cu-Cr-Zr. Cabe señalar, que el cambio de sección del hilo de contacto a 120 mm², solo transcurre durante el año 2010, debido a que los valores de desgaste que presentaba eran similares a los presentados en las secciones de 107 mm².

En cambio durante el año 2013, el número de kilómetros de hilo de contacto substituidos se reduce de manera considerable, marcando valores próximos a los 125 km, esta reducción del consumo se debe por un lado, a la restricción de consumo de cobre por temas medioambientales y por otro, debido a la ampliación del margen de desgaste del hilo de contacto, especialmente en catenaria rígida.

Otro dato a tener en cuenta en relación, al consumo de cobre es el coste económico que supone este consumo.

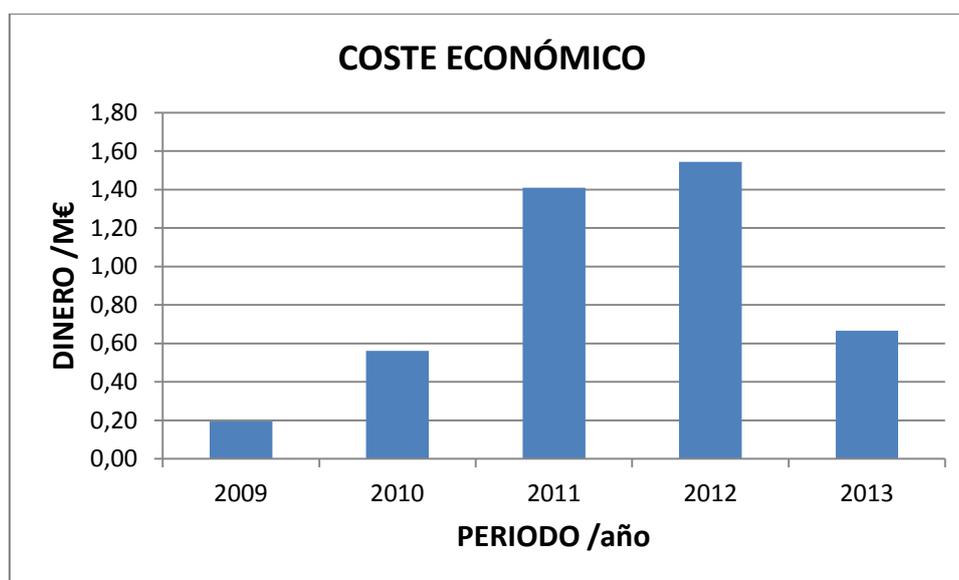


Gráfico 8: Coste económico, H.C.

Como se puede observar en la gráfica 8, el coste destinado a la compra de cobre electrolítico, durante los años 2009 - 2010 marca valores máximos de 600.000 €, donde el incremento entre estos dos años se debe al cambio de sección del hilo de contacto de 107 mm² a 120 mm². En cambio durante los años 2011-2012, el coste destinado a la compra de Cu-ETP, marca valores cercanos al 1,6 millones de euros. Debido al fuerte incremento presentado durante los dos años anteriores, en el año 2013, se reduce considerablemente el coste destinado a la compra de Cu-ETP, por los motivos expuestos anteriormente, debido a la insostenibilidad de la situación, debido al marco económico actual.

5.4.2. Empresa Operadora

Para realizar el estudio económico del cambio de pletinas desde 2011 a 2014, es básica la información por parte de las empresas que llevan el mantenimiento de dichas pletinas.

Actualmente circulan un total de 261 unidades por la línea R2 Sud de *Rodalies*. De estas unidades únicamente se ha podido hacer el estudio económico de 59 unidades. Ya que, sólo se ha tenido acceso a los documentos de los CIVIA.

Los CIVIA son las unidades más modernas que dan el servicio de *Rodalies*. El mantenimiento se lleva desde los talleres de VNG. Gracias a ellos, se ha podido obtener toda esta información.

El mantenimiento de las locomotoras, las cuales no se tiene acceso es porque las llevan otras empresas y no se ha podido obtener esta información.

Para realizar los cálculos hay que tener en cuenta que cada pantógrafo tiene dos pletinas. Una larga y otra más corta que va detrás según el sentido de la marcha.

Mediante los documentos del control de pletinas de los CIVIA se han podido obtener los siguientes resultados.

Nº de pletinas sustituidas en modelo CIVIA 463, de 22 unidades.

		04/12-2011	2012	2013	01/03-2014
Pletinas Cu-Cr-Zr /ud.	Pletinas cortas	11	44	39	7
	Pletinas largas	11	44	39	7
Pletinas Cu-ETP /ud.	Pletinas cortas	202	0	0	0
	Pletinas largas	202	0	0	0

Tabla 63: Conteo CIVIA 463.

Nº de pletinas sustituidas en modelo CIVIA 465, de 37 unidades.

		04/12-2011	2012	2013	01/03-2014
Pletinas Cu-Cr-Zr /ud.	Pletinas cortas	22	37	43	5
	Pletinas largas	22	37	43	5
Pletinas Cu-ETP /ud.	Pletinas cortas	416	0	0	0
	Pletinas largas	416	0	0	0

Tabla 64: Conteo CIVIA 465.

COSTE CAMBIO DE PLETINAS				
Tipo de pletina	Coste material /€		Coste operario / €/h	Coste total por Pantógrafo /€
	Pletinas cortas	Pletinas largas		
Cu ETP	15,54	16,73	52,89 * 2	138,05
Cu-Cr-Zr	36,78	51,89	52,89 * 2	194,34

Tabla 65: Coste cambio pletinas por pan.

COSTE ANUAL TOTAL CAMBIO DE PLETINAS					
CONCEPTO	Coste /€	04/03-2011	2012	2013	2014
POR PANT. (PLETINAS Cu-ETP)	138,05	-	-	-	-
POR PANT. (PLETINAS Cr-Cu-Zr)	194,34	-	-	-	-
Nº PANTÓGRAFOS SUSTITUIDOS (Cu-ETP)	-	618	-	-	-
Nº PANTÓGRAFOS SUSTITUIDOS (Cr-Cu-Zr)	-	33	81	82	12
	COSTE TOTAL /€	91.728,12	15.741,54	15.935,88	2.332,08

Tabla 66: Costes anuales.

Como se puede observar los costes que suponía el cambio de pletinas de Cu-ETP en el año 2011 era muy elevado si se compara con los años sucesores. Unos costes casi 10 veces superior, si se contase los costes de todo el año 2011.

Esto tiene que ver con el cambio de material (tipo) de pletina. Se pasa de cobre electrolítico a cromo-cobre-circonio. Estas últimas son más duras y por tanto más duraderas.

Como se ha dicho anteriormente, en este estudio faltarían los costes de las locomotoras, las cuales no se dispone información ni se sabe el número exactamente de las que restan.

5.4.3. Conclusiones

Debido a la dificultad de encontrar una serie de datos importantes por parte de Empresa Operadora, ya que solo se disponía de los datos de recambio de pletinas entre los años 2011-2014, en las series CIVIA, abarcando únicamente 59 unidades de 261 en total, fue complicado establecer una comparativa entre el consumo y costes de cada empresa y cumplir los objetivos marcados para este sub-apartado (5.4).

Aunque debido a la amplia diferencia de coste destinado por parte de Empresa de Infraestructura y teniendo en cuenta, que los costes derivados del mantenimiento, que por temas de número de elementos, personal y maquinaria para el correcto estado del hilo de contacto, no han sido contemplados, siendo un coste importante dentro de la ecuación, llegamos a la conclusión de que la empresa que sale más perjudicada a nivel económico.

En cambio en temas de sustitución de material, sería importante analizar el coste que supondría el cambio hacia otro material menos agresivo respecto al hilo de contacto, que todo parece indicar que será el grafito, por parte de Empresa Operadora, ya que el coste de sustitución hacia la aleación de Cu-Cr-Zr es elevado y teniendo en cuenta la diferencia de precio entre las pletinas, sería un coste a tener importante a tener en cuenta.

Por lo tanto la solución estaría en buscar un reparto justo respecto a la inversión inicial que supondría el cambio de pletinas, tanto por parte de Empresa Operadora y Empresa de Infraestructura, debido al ahorro a niveles de mantenimiento y sustitución, donde Empresa de Infraestructura saldría beneficiada.

5.5. ESTUDIO DE LOS MATERIALES

A continuación se comentan algunos detalles básicos sobre los materiales de los que están hechas las probetas. Probetas realizadas a partir de las muestras proporcionadas por las empresas que participan en el estudio.

COBRE ELECTROLÍTICO (CU-ETP).

Cobre, elemento representado en la tabla periódica por el símbolo Cu. Localizado dentro de los metales de transición.

Se caracteriza por su color rojizo pálido y brillo metálico. Además de su buena conductividad eléctrica (solo la plata por delante).

En resumen se trata de un material dúctil, maleable, deformable a temperatura ambiente, buen conductor de la temperatura y alta conductividad eléctrica. También tiene una gran resistencia a la tracción.

Resiste muy bien la corrosión, la corrosión atmosférica, la marina y la química. La estructura cristalina del cobre es cubica centrada en las caras (CCC). No obstante, casi todas sus aleaciones disminuyen la conductividad, especialmente el fósforo (P).

Respecto la resistencia, casi todas las aleaciones le ayudan a incrementarla, sobretudo el cadmio (Cd), el estaño (Sn) y el aluminio (Al). Aunque la resistencia mecánica específica es especialmente inferior a las aleaciones de aluminio (Al) y magnesio (Mg). En general, sus aleaciones mejoran la resistencia a la fatiga, a la *termofluencia* y al desgaste.

Una característica contraproducente para la función que desempeña en los frotadores y muy importante, ya que sucede a menudo, parte del origen del problema es que se trata de un material que es fácilmente *soldable*.

Además se puede reciclar ilimitadas veces sin que pierda sus propiedades mecánicas.

VENTAJAS	DESVENTAJAS
Buena resistencia a la corrosión	Susceptible a fragilizar por hidrogeno y fractura por corrosión bajo tensión
Excelente conductividad térmica y eléctrica	Relativa baja relación resistencia/peso (frente aluminios y aceros)
Variación de color en función de la aleación	Propiedades sujetas a cambios dramáticos cuando varia el contenido de la aleación
Fácil conformado por elevada tenacidad	-

Tabla 67: Cobre, ventajas y desventajas.

COBRE-CROMO-CIRCONIO (CCC o Cu-Cr-Zr).

Cromo, elemento representado en la tabla periódica por el símbolo Cr. Localizado dentro de los metales de transición.

La principal característica del cromo es su resistencia a la corrosión. Además es duro, frágil, con un color gris acerado y brillante.

Por otro lado es un metal muy tóxico para el ser humano, aunque en esta aplicación no está directamente relacionado con la ingesta para el ser humano, hay que seguir una serie de precauciones en el momento del reciclaje, ya que existen casos de contaminación de acuíferos.

Circonio o zirconio, elemento representado en la tabla periódica por el símbolo Zr. Localizado dentro de los metales de transición.

La característica más llamativa es su mala conductividad eléctrica, aunque buen conductor térmico. Además es dúctil y maleable, lo que facilita la forja y la laminación. No obstante, impurezas de hidrógeno, carbono o nitrógeno lo vuelven frágil y difícil de trabajar.

Los dos elementos aleados al cobre, resultan una excelente aleación de cobre con aumento de la dureza, ductilidad y alta conductividad eléctrica. Además de una moderación de la fuerza.

Por otro lado ofrece una excelente resistencia al ablandamiento a temperaturas elevadas. La adición del 0.1 % zirconio (Zr) y 1.0 % cromo (Cr) dan como resultado una aleación de cobre tratable térmicamente.

Descrito con precisión, la temperatura de ablandamiento con calor es de 500 °C. En comparación con un cobre sin alea, es decir, un cobre electrolítico se ablanda en 200 °C. El cobre aleado con plata se ablanda a 350 °C.

CARBONO.

Carbono, elemento representado en la tabla periódica por el símbolo C. Localizado dentro del grupo de los no metales.

En la naturaleza se encuentra de diferentes maneras, formas alotrópicas, carbono amorfo (grafito) o cristalino (diamante). Según el estado en el que se encuentra será duro (diamante) o blando (grafito).

Para este estudio interesa su forma amorfa, el grafito. Se trata de un material blando, el cual resulta un buen lubricante sólido. Además se puede combinar con aluminio, cobre, aceros inoxidables, aceros, entre muchos otros.

En resumen, el grafito se está formado por capas de átomos unidos por enlaces covalentes (enlaces muy fuertes) creando una red o estructura hexagonal. Estas capas (finas capas de átomos en un mismo plano) se une con otras capas mediante enlaces de *Van der Waals* (fuerzas o uniones flojas). Por lo que se podría decir que el grafito está formado por varias capas de grafeno, apiladas una encima de otra. Este tipo de uniones hace que el material tenga un comportamiento anisótropo.

Le caracteriza su color negro con brillo metálico, refractario y a 3.000 °C sublima. Si el grafito con impregnación de otros materiales metálicos alcanza estas temperaturas, los gases que se producen no son tan problemáticos como una aleación metálica, ya que no mantienen durante tanto tiempo la temperatura, en este caso del hilo de contacto.

Un dato negativo para la función a desempeñar, en las uniones de *Van der Waals*, el incremento de la temperatura baja la conductividad eléctrica, llegándose a comportar como un semiconductor. Sin embargo, en las uniones covalentes, se comporta a la inversa, aumenta la conductividad eléctrica, propio de un conductor semimetálico.

5.5.1. Hilo de contacto

Los catálogos [9] proporcionados por el gestor de la red indican que para el hilo de contacto, tanto de Cu-ETP y CuAg0,1 la composición, las propiedades físicas y las características físicas según la sección son las siguientes (tabla 68, 69 y 70).

DESIGNACIÓN		COMPOSICIÓN /% en masa						
Simbólica	Numérica		Cu	Bi	O	Pb	Ag	otros
Cu-ETP ⁽¹⁾	CW004A	mín.	99,90	0,0005	0,04	0,005		0,03
		máx.	---					
CuAg0,1	CW013A	mín.	Resto	0,0005	0,04		0,08	0,03
		máx.					0,12	

Tabla 68: Composición.

⁽¹⁾ Estas aleaciones están de acuerdo con las Normas UNE-EN 1977 y UNE-EN 50149.

PROPIEDADES	Cu-ETP	CuAg0,1
Densidad a 20°C (kg/m ³)	8.890	8.890
Resistividad máxima a 20 °C (10 ⁻⁸ Ohmios ·m)	1,777	1,777
Coficiencia de temperatura de la resistividad (K ⁻¹)	3,81·10 ⁻³	3,81·10 ⁻³

Tabla 69: Propiedades físicas

SECCIÓN /mm ²	MATERIAL	Capacidad mecánica mín. /kN	Alargamiento a la rotura mín. /%	Alargamiento a la rotura máx. /%	Número mín. de plegados alternados	Resistencia máx a 20 °C /Ohm·km ⁻¹
107	Cu-ETP	38,5	3	8	6	0,171
107	CuAg0,1	38,5	3	10	6	0,171
120	Cu-ETP	43,2	3	8	6	0,153
120	CuAg0,1	43,2	3	10	6	0,153
150	Cu-ETP	54,0	3	8	6	0,122
150	CuAg0,1	54,0	3	10	6	0,122

Tabla 70: Características físicas de los hilos.

El límite elástico convencional correspondiente al 0,2 % de deformación permanente se debe alcanzar con el 85 % de la capacidad mecánica.

Además, los datos proporcionados por los expertos y responsables del gestor de la red sobre la dureza de las diferentes piezas que intervienen en la interacción de pantógrafo-catenaria son (tabla 71):

PIEZA	MATERIAL	DUREZA /HB
Hilo de contacto	Cu-ETP	x < 60
Hilo de contacto	CuAg0,1	60
Frotador	Cu-ETP	110
Frotador	Cu-Cr-Zr	125 - 155

Tabla 71: Durezas según el gestor de la red.

5.5.2. Frotador o pletina

Los catálogos proporcionados por SCHUNK indican que para el frotador de grafito, tienes las siguientes características a temperatura ambiente (tabla 72).

CARACTERÍSTICAS FÍSICAS	NORMA	VALORES
Resistencia eléctrica específica /μΩm	(DIN IEC 60413)	5
Densidad aparente /g·cm ⁻³	(DIN IEC 60413)	2,20
Resistencia a la flexión	(DIN IEC 60413)	50
Dureza Rockwell 5/150 /MPa	(DIN IEC 60413)	110 - 120
CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS		VALORES
Carbono /%		80
Cobre /%		20

Tabla 72: Características del grafito de calidad SK85Cu.

Material está conforme con la normativa EU-D 2000/53/CE ("ELV") y UE-D 2002/95/CE ("RoHS") de acuerdo con los WEEE (*Waste of Electrical and Electronic Equipment*), en castellano, Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos (EU-D 2002/96/CE).

En resumen, las propiedades básicas de las pletinas según el material.

PROPIEDADES MATERIALES	COBRE	Cu-Cr-Zr	CARBÓN (GRAFITO)
Peso específico /g·cm ⁻³	8,93	8,93	2,09 - 2,23
Temperatura de fusión/sublimación /°C	1.083	1.083	3.300 - 3.550
Conductividad eléctrica /% IACS	100 - 101	80 - 85	-
Resistencia tracción /MPa	220 - 350	520	-
Límite elástico /MPa	70 - 300	466	-
Alargamiento /%	5 - 40	20	-
Dureza	42-115 HB	70-83 HRB 152 HB	110-120 HR 5/150
Módulo de elasticidad /GPa	120	120	-

Tabla 73: Propiedades pletina según material.

5.6. ENSAYOS DE LOS MATERIALES

Para completar el estudio que se está realizando, a cerca de la problemática existente de la línea R2 Sud de cercanías de Barcelona entre el pantógrafo y la catenaria, se ha realizado un seguido de ensayos.

Estos son ensayos de dureza sobre los hilos de contacto y los frotadores; ensayos de tracción sobre los hilos de catenaria; y ensayos de micro estructura, para determinar el origen de las virutas de cobre encontradas en los techos de las locomotoras y los alrededores de la vía.

Estos ensayos no se han podido realizar con paso de corriente ni con condiciones climatológicas, para acercarse al modo de trabajo de los elementos en la realidad.

El objetivo de estos ensayos es verificar la información proporcionada por las empresas afectadas y relacionadas al tema. Además, de intentar buscar una relación de desgaste presentada por los materiales ya utilizados frente los que van a utilizar. Pudiendo aprovechar estos datos para investigar la propuesta de nuevos materiales para el diseño de las piezas.

En resumen, el objetivo de estos ensayos no se basa en encontrar el origen del problema que ha provocado esta situación de desgaste excesivo y flashes en la interacción pantógrafo - catenaria. Sin embargo este análisis puede ofrecer información de alguna de las causas que está provocando este desgaste excesivo actualmente. También se podrá descartar o afirmar que algunos de las modificaciones de materiales que se han montado puedan tener algo que ver con este problema.

Además de las conclusiones que se puedan aportar al proyecto, es importante no perder de vista que estos ensayos a nivel formativo son muy interesantes para completar los estudios realizados. Trabajar en un caso real y ver la utilidad de algunas de las materias estudiada a lo largo de la carrera.

5.6.1. Ensayos de dureza

La dureza es una propiedad mecánica relacionada con la resistencia que un material, cuando se presiona puede ser penetrado por otro material o por penetradores normalizados, conlleva la formación de una imprenta o marca permanente.

La dureza depende directamente de las fuerzas de enlace entre átomos, iones o moléculas y del estado del material (proceso de fabricación, tratamiento térmico, etc.).

Para este ensayo se selecciono seis muestras.

- I. Hilo de contacto de Cu-ETP, nuevo.
- II. Hilo de contacto de Cu-ETP, usado.
- III. Hilo de contacto de CuAg0,1, nuevo.
- IV. Hilo de contacto de CuAg0,1, usado.
- V. Pletina del pantógrafo de Cu-Cr-Zr, usado.
- VI. Pletina del pantógrafo de Grafito, corresponde a la fase 3 (SK85Cu), usado.



Figura 40: Muestras de hilo de contacto.



Figura 41: Pletina de Cu-Cr-Zr.



Figura 42: Pletina de grafito (carbono).

Aunque para encontrar una relación más precisa, haría falta realizar un ensayo de dureza sobre la pletina del pantógrafo de Cu-ETP, usado. De esta manera se podría realizar una hipótesis de la evolución de desgaste según el material, con el objetivo de anticipar una respuesta, sobre la previsión de desgaste que presentarán las pletinas de grafito.

Este ensayo se ha realizado de acuerdo con la norma europea EN ISO 6506-1 (Materiales metálicos: ensayo de dureza *Brinell*, método de la prueba) o la norma americana ASTM E10 (*Standard method for Brinell hardness of metallic materials*). Esta norma contempla los metales de dureza blanda a media.

5.6.1.1. Maquinaria

Para la realización de este ensayo se utilizo la maquinaria presentada en la figura 43.



Figura 43: Durómetro, huella en muestra de cobre.

TESTMETHODE		CONV	HB 20	HB 10	HB 5	HB 2.5	HRC	HV	N/mm ²	Kp/mm	µm	HB 15
CODE		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
HV 1	1	•										
HV 2	2	•										
HV 3	3	•										
HV 5	4	•										
HV 10	5	•										
HV 20	6	•										
HV 30	7	•										
HV 50	8	•										
HV 100	9	•										
HR 15N	10	•										
HR 30N	11	•										
HR 45N	12	•										
HR 15T	13	•										
HR 30T	14	•										
HR 45T	15	•										
HR 15	16	•										
HR 30	17	•										
HR C	18	•										
HR D	19	•										
HR E	20	•										
HR F	21	•										
HR G	22	•										
HR H	23	•										
HR K	24	•										
HR L	25	•										
HB 1/2.5	26	•										
HB 1/5	27	•										
HB 1/10	28	•										
HB 1/20	29	•										
HB 2.5/12.5	30	•										
HB 2.5/31.2	31	•										
HB 2.5/62.5	32	•										
HB 2.5/125	33	•										
HB 5/25	34	•										
HB 5/50	35	•										
HB 5/100	36	•										
HB 5/250	37	•										
HB 5/500	38	•										
HB 10/1000	39	•										
HB 10/1500	40	•										
HR 10/2000	41	•										
49.03 N	42	•										
132.9 N	43	•										
267.8 N	44	•										
961.0 N	45	•										
MONSTEIN	46	•										
HK 0.5	47	•										
HK 1	48	•										
HK 0.3	49	•										
HK 0.2	50	•										
HK 0.5	51	•										
HV 0.3	52	•										
HV 0.2	53	•										
HSL	54	•										
HSM	55	•										
HRF	56	•										
HR 2/10	57	•										
HR 2/20	58	•										
HR 2/40	59	•										
HR 2/120	60	•										
HRP	61	•										
HRS	62	•										
HVV	63	•										

Figura 44: Tabla de conversión del durómetro.

Durómetro de la marca EMCO, modelo M4U-025 (Figura 43), localizado en el laboratorio del CTVG (*Centre Tecnològic de Vilanova i la Geltrú*). El rango de cargas va desde 1 kg hasta los 3.000 kg. Este durómetro se utilizo para realizar todos los ensayos de dureza de las distintas muestras.

5.6.1.2. Preparación de las muestras

Las muestras se pulieron para extraer el oxido o conseguir una superficie plana de ataque, según el caso. Todo según la norma.

5.6.1.3. Resultados

La nomenclatura de los resultados es [19]: Dureza; Tipo de ensayo; Diámetro de la bola; Fuerza aplicada; Tiempo del ensayo. Ejemplo: 132 HB 10/125/30. Donde las unidades son: kp/mm^2 HB mm kp seg.

En las tablas 74 y 75 se muestra las relaciones Fuerza/Diámetro² usadas mayoritariamente y los tipos de material más adecuado para cada relación. Las casillas remarcadas indican la configuración de las pruebas.

$0,102 F/D^2$	MATERIALES
30	Aceros y fosas férricas
10	Aleaciones de aluminio y bronce
5	Aluminio puro y latón
2,5	Ligas blandas de plomo, estaño y antimonio

Tabla 74: Materiales a ensayar en función de la relación F/D^2 .

La relación obtenida en la tabla 75 se obtiene el resto de la configuración en la tabla 74.

DIÁMETRO DE LA ESFERA D /mm	$0,102 F/D^2= 30$ / N (kp)	$0,102 F/D^2= 10$ / N (kp)	$0,102 F/D^2= 5$ / N (kp)	$0,102 F/D^2= 2,5$ / N (kp)
10	29.420 (3000)	9.807 (1000)	4.903 (500)	2.452 (250)
5	7.355 (750)	2.452 (250)	1.226 (125)	612,9 (62,5)
2,5	1.839 (187,5)	612,9 (62,5)	306,5 (31,25)	153,2 (15,62)

Tabla 75: Valores de cargas y diámetros de esferas en el ensayo de dureza Brinell.

El ensayo usa un penetrador de acero, porque la dureza *Brinell* teórica es menor a 350. Si los metales que se fueran analizar tuvieran una dureza *Brinell* inferior a 650, entonces se utilizarían penetradores de wolframio. La nomenclatura para un penetrador que tuviera la bola de acero se denomina HBS (*Hardness Brinell Steel*) y HBW si es de wolframio. El tiempo de la aplicación es de 30 segundos. Por lo tanto, el método de la prueba es HBS 2,5/62,5.

Las tablas 76, 77, 78, 79 y 80 muestran los resultados de las muestras analizadas. Indicando la pieza de la que se trata, el material que lo forma, si ha estado en servicio o si se trata de una pieza nueva e incluso los valores proporcionados por las empresas implicadas.

I. Hilo de contacto de Cu-ETP, nuevo

EMPRESA SUMINISTRADORA	PIEZA	MATERIAL	ESTADO	DUREZA TEÓRICA /HB	DUREZA EXPERIMENTAL /HB
ADIF	Hilo de contacto	Cu ETP	Nuevo	¿? < 60	104
					98,5
					99,9
VALOR MEDIO:					100,8 HBS 2,5/62,5

Tabla 76: Resultado durezas del hilo de contacto nuevo de aleación de cobre.

II. Hilo de contacto de Cu-ETP, usado

EMPRESA SUMINISTRADORA	PIEZA	MATERIAL	ESTADO	DUREZA TEÓRICA /HB	DUREZA EXPERIMENTAL /HB
ADIF	Hilo de contacto	Cu ETP	Usado	¿? < 60	94,9
					96,7
					103
					102
VALOR MEDIO:					99,15 HBS 2,5/62,5

Tabla 77: Resultado durezas del hilo de contacto usado de aleación de cobre.

III. Hilo de contacto de CuAg0,1, nuevo

EMPRESA SUMINISTRADORA	PIEZA	MATERIAL	ESTADO	DUREZA TEÓRICA /HB	DUREZA EXPERIMENTAL /HB
ADIF	Hilo de contacto	CuAg0,1	Nuevo	60	98,2
					99,1
					103,0
VALOR MEDIO:					100,1 HBS 2,5/62,5

Tabla 78: Resultado durezas del hilo de contacto nuevo de aleación de cobre.

IV. Hilo de contacto de CuAg0,1, usado

EMPRESA SUMINISTRADORA	PIEZA	MATERIAL	ESTADO	DUREZA TEÓRICA /HB	DUREZA EXPERIMENTAL /HB
ADIF	Hilo de contacto	CuAg0,1	Usado	60	105
					106
					104
VALOR MEDIO:					105 HBS 2,5/62,5

Tabla 79: Resultado durezas del hilo de contacto usado de aleación de cobre.

V. Pletina del pantógrafo de Cu-Cr-Zr, usado

EMPRESA SUMINISTRADORA	PIEZA	MATERIAL	ESTADO	DUREZA TEÓRICA /HB	DUREZA EXPERIMENTAL /HB
RENFE	Frotador	Cu-Cr-Zr	Usado	125 - 155	126
					132
					134
					136
VALOR MEDIO:					134 HBS 2,5/62,5

Tabla 80: Resultado durezas del frotador usado de aleación de cobre.

Al final de los ensayos de durezas, se paso el patrón para verificar que el calibrado de la máquina fuese el correcto, para dotar de mayor veracidad las pruebas.

VI. Pletina del pantógrafo de Grafito, corresponde a la fase 3 (SK85Cu), usado

La probeta de grafito no se pudo ensayar debido a que la maquina no tenía el método de test para realizar la dureza *Rockwell* que proporcionaba el *datasheet* del material proporcionado por la empresa SCHUNK.

Por este motivo, se recurrió a las tablas de reconversión para obtener una idea relativa de las equivalencias de dureza. No obstante, no se consiguió relacionar los datos de dureza, debido que son materiales distintos y el ensayo de dureza *Rockwell* utilizada no es muy común.

Por este motivo se recurrió a otra técnica para determinar la dureza, la escala de *Friedrich Mohs*. Se trata de un procedimiento poco científico, pero sencillo de aplicar.

Aunque este sistema no aporte un valor absoluto para determinar la dureza precisa y poder relacionar con precisión el desgaste previsto para las tres fases del mes de Septiembre, sirve para confirmar y situar la dureza de cada uno de los elementos.

El grafito corresponde a una dureza entre 1 Mohs y 2 Mohs, ya que con la uña de la mano se puede rayar su superficie.

En cambio el cobre presenta una dureza de 3 Mohs, el circonio de 5 Mohs y el cromo de 8,5 Mohs.

En este caso, la dureza de la catenaria siempre será más duro que el frotador de carbono (grafito). Por este motivo, cualquier imperfección en la superficie del hilo de contacto de la catenaria destrozará la banda de contacto del frotador.

5.6.1.4. Conclusión

Las pletinas de Cu-Cr-Zr son entorno a un 30 % más duras que los hilos de contacto tanto de Cu-ETP como de CuAg0,1.

Debido que la diferencia de durezas entre los hilos de contacto de los dos diferentes materiales analizados no es tan grande como se pensaba. Eso depende cual sea el punto de referencia, ya que 5 puntos más de dureza podrían ser suficientes para marcar la diferencia. Si se tiene en cuenta que la dureza de las pletinas de Cu-ETP es de 110 HB según la Empresa de Infraestructura. Y las durezas obtenidas de los hilos de contacto son entre 100 HB y 105 HB. Sería el motivo suficiente para explicar el resultado de la figura 45, Cu-ETP que corresponde al frotador.



Figura 45: Cu-ETP procedente de pletina.

No obstante, las pletinas de Cu-Cr-Zr son demasiado duras para el hilo. Debido a ello, es normal que el hilo presente un desgaste acelerado.

Ya que los hilos de contacto se comportan como una mantequilla frente la dureza de las pletinas, que actuaría como un cuchillo.

En este caso, se estaría hablando de un desgaste mecánico, por el cual los elementos no se estaban comportando como deberían.

Debido a la diferencia de durezas que se plantea con el nuevo material que van a utilizar en el frotador, es importante analizar la rugosidad de los elementos. Ya que la dureza de los elementos solo es importante a tener en cuenta para cuando se producen impactos o rallas.

En este caso, el más importante a mantener y cuidar por diferentes motivos es la rugosidad en el hilo de contacto de la catenaria, debido a sus costes de recambio del cobre, el número de horas y operarios para realizar un cambio de cable aéreo durante 1,2 km.

Actualmente, la rugosidad media del hilo es de la clase N10, por lo que se podría considerar una lija. En este estado, las pletinas (frotadores) de grafito no durarán muchos kilómetros. Por lo que sería recomendable realizar un tratamiento al hilo de contacto para conseguir una rugosidad inicial menor, para la incorporación de las pletinas de carbono.

VISTA DE LA RUGOSIDAD Ra		
Micrómetros /m	Micro pulgadas /in	Clases de rugosidad
50	2.000	N12
25	1.000	N11
12,5	500	N10
6,3	250	N9
0,8	32	N6
0,4	16	N5
0,2	8	N4
0,1	4	N3

Tabla 81: Valores según la clase de rugosidad.

Por esta diferencia de durezas, no es necesario muchos kilómetros de hilo de contacto de la catenaria en mal estado (N10) para destrozar las pletinas de grafito.

Aunque las propiedades del grafito, ayudan a mejorar y mantener el buen estado del hilo de contacto de la catenaria. Debido que el grafito es un material abrasivo, por lo que ayuda a pulir la superficie.

Además, el grafito es un material lubricante, impregna la catenaria con finas capas de carbono, que ayuda a deslizar mejor la pletina cuando vuelva a transcurrir por la superficie manchada. El mayor beneficiado es la catenaria, ya que alarga su vida útil y disminuye el ruido.

Si se producen flashes, el material sublima, por lo que no se fundirá con la catenaria. Además al no tratarse de una aleación metálica, no contiene tantos gases metálicos que retienen el calor durante unos segundos, por lo que la catenaria no tendrá tanta temperatura.

5.6.2. Ensayo de metalografía

La metalografía estudia las características estructurales o de constitución de los metales y aleaciones, para así relacionar las propiedades físicas, mecánicas y químicas de los mismos.

Para este ensayo se selecciono 4 muestras:

- I. **Partículas de cobre recogidas en la parte superior de un CIVIA.**
- II. **Hilo de contacto de Cu-ETP correspondiente a vía 1, usado.**
- III. **Hilo de contacto de Cu-ETP correspondiente a vía 2, usado.**
- IV. **Hilo de contacto de Cu-Ag, usado.**

El objetivo de estos ensayos es determinar:

- Historial del tratamiento mecánico sufridos por las muestras.
- Historial del tratamiento térmico sufridos por las muestras.
- Tamaño del grano.
- Fases que componen una aleación.
- Presencia de inclusiones no metálicas.
- Presencia de grano de circonio en las partículas de cobre recogidas de la parte superior de un CIVIA.

5.6.2.1. Preparación de las muestras

Para este tipo de ensayos primero se corto unas muestras, aproximadamente 5 mm, de los hilos de contacto a estudiar mediante la maquinaria siguiente.

Tronzadora de la marca STRUERS, modelo LABOTOM 3 (figura 45). Se utilizo para cortar las muestras a las medidas adecuadas.



Figura 46: Tronzadora STRUERS.

5.6.2.2. Preparación de las probetas

Una vez cortadas las muestras, se hace servir la máquina de embutición, para la obtención de las diferentes probetas a estudiar.

Prensa de montaje de probetas de la marca STRUERS, modelo PRONTOPRESS 3 (figura 46).



Figura 47: Prensa, marca STRUERS.



Figura 48: Cuello de la prensa donde se mezcla la resina con las muestras.

Para la realización de las probetas, se utiliza la resina POLYFAST en las siguientes condiciones:

- **Temperatura de calentamiento:** 150 °C
- **Tiempo de calentamiento:** 6 minutos
- **Tiempo de enfriamiento:** 3 minutos
- **Fuerza:** 20 KN

Una vez obtenidas las probetas de la máquina de embutición, se procede al pulido de la superficie a observar, consiguiendo un acabado óptimo de las probetas.

Pulidora automática de la marca STRUERS, modelo ROTOPOL 11 (figura 48).

Pulidora manual de la marca STRUERS, modelo LABOPOL 5 (figura 49).



Figura 49: Pulidora automática de tres probetas.



Figura 50: Pulidora manual.

Para llevar a cabo el pulido de las probetas se utilizó papel de lija de óxido de aluminio. Se aumentaba el número de grano de C-180 hasta C-4000 para que al final se obtenga un acabado muy fino.



Figura 51: Instantánea durante el proceso.



Figura 52: Probetas del hilo de contacto.

Configuración de cada pulido:

PROBETA	Nº DE GRANO	FUERZA /N	VELOCIDAD /rpm	TIEMPO /minutos	LUBRICANTE	PULIDO
Partículas	C-180	-	350	10	Agua	Manual
HH.CC	C-180	25	300	10	Agua	Auto

Tabla 82: Primer pulido de las probetas.

PROBETA	Nº DE GRANO	FUERZA /N	VELOCIDAD /rpm	TIEMPO /minutos	LUBRICANTE	PULIDO
Partículas	C-400	-	350	10	Agua	Manual
HH.CC	C-500	20	300	12	Agua	Auto

Tabla 83: Segundo pulido de las probetas.

PROBETA	Nº DE GRANO	FUERZA /N	VELOCIDAD /rpm	TIEMPO /minutos	LUBRICANTE	PULIDO
Partículas	C-800	-	350	10	Agua	Manual
HH.CC	C-800	20	300	10	Agua	Auto

Tabla 84: Tercero pulido de las probetas.

PROBETA	Nº DE GRANO	FUERZA /N	VELOCIDAD /rpm	TIEMPO /minutos	LUBRICANTE	PULIDO
Partículas	C-1200	-	300	10	Agua	Manual
HH.CC	C-1200	20	300	10	Agua	Auto

Tabla 85: Cuarto pulido de las probetas.

PROBETA	Nº DE GRANO	FUERZA /N	VELOCIDAD /rpm	TIEMPO /minutos	LUBRICANTE	PULIDO
Partículas	C-4000	-	300	10	Agua	Manual
HH.CC	C-4000	20	300	10	Agua	Auto

Tabla 86: Quinto pulido de las probetas.

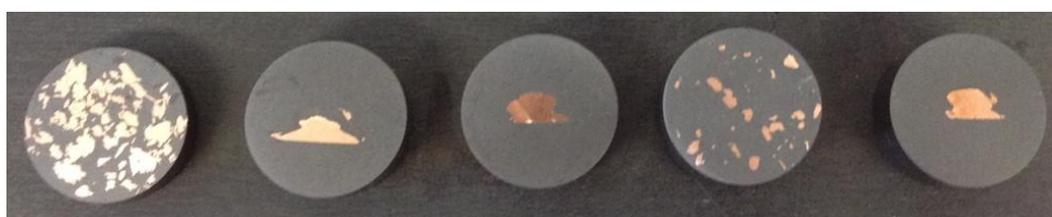


Figura 53: Conjunto de probetas para observación, pulidas.

Después de realizar los cinco pulidos explicados anteriormente, las probetas quedaron bastante homogéneas solo habían algunas ralladuras. Ya que las probetas se tendrán que observar con el microscopio, la superficie de estas tiene que quedar plana y libre de ralladuras.

Para que estas ralladuras, que habían quedado en la probeta, desaparezcán se ejerció un pulido final con la cual se intenta ocultar estos rasgos, ver la tabla 87.

PROBETA	Nº DE GRANO	FUERZA /N	VELOCIDAD /rpm	TIEMPO /minutos	LUBRICANTE / μm	PULIDO
Partículas	Terciopelo	15	250	5	Al_2O_3 de 0,2	Auto
HH.CC	Terciopelo	15	250	5	Al_2O_3 de 0,2	Auto

Tabla 87: Pulido final para quitar las ralladuras de las probetas.

Una vez finalizado los procesos anteriormente descritos se limpiaron las piezas con agua y se secaron con el secador ubicado en el laboratorio, obteniendo un correcto acabado de las piezas, pudiendo pasar al siguiente paso, la observación de las muestras.

5.6.2.3. Primera observación de las probetas

Una vez finalizados los procesos anteriormente descritos, se procedió a la observación de las diferentes muestras con el microscopio óptico LEICA MEF4AM, en el cuál observaríamos las diferentes piezas con el objetivo de cumplir, los objetivos marcados al principio del apartado.



Figura 54: Microscopio óptico LEICA MEF4AM.

Microscopio óptico de la marca LEICA, modelo MEF4AM (figura 53).

En el momento de observar cada una de las piezas, se observó que no estaban del todo bien pulidas, ya que cada una de las probetas presentaban una serie de imperfecciones que hacían imposible su observación de los detalles necesarios para cumplir los objetivos marcados, por lo tanto se decidió repetir los pasos presentes en las tablas 86 y 87.

Y a continuación se aplicó el siguiente proceso, para una mejor calidad de visualización de las probetas.

ÁCIDO	COMPOSICIÓN	PROPORCIÓN	TIEMPO /minutos
Klemen's	$\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ $\text{N}_4\text{S}_2\text{O}_3$ H_2O	25 g 0,5 g 50 ml	2

Tabla 88: Proceso de ataque destinado al cobre.

Una vez finalizado este proceso, se limpió las diferentes muestras con etanol y se secó en el secador ubicado en el laboratorio durante unos 2 minutos aproximadamente.

5.6.2.4. Segunda observación de las probetas

Después del primer intento fallido, se volvió al laboratorio una vez aplicados los procesos explicados en el apartado anterior. Aunque los resultados fueron mejores, los niveles de nitidez y acabado de las piezas, no hacían posible su correcta observación con este tipo de microscopios ópticos, así que decidió utilizar otro método de observación, que nos permitiera mejores resultados y nos presentara la posibilidad de cumplir los objetivos marcados.

La segunda observación de las probetas se realizó mediante el microscopio electrónico, de la marca JEOL, modelo JSM-5600.



Figura 55: Microscopio electrónico JOEL JSM-5600.

Para un correcto seguimiento de las diferentes probetas, se marcaron cada una con una serie de iniciales, que se muestran a continuación:

- PART1: Primera probeta de la partículas recogidas del CIVIA.
- PART2: Segunda probeta de las partículas recogidas del CIVIA.
- C1: Hilo de contacto desgastado, aleación cobre electrolítico, vía 1.
- C2: Hilo de contacto desgastado, aleación cobre electrolítico, vía 2.
- C3: Hilo de contacto desgastado, aleación CuAg0,1.

PROCESO DE OBSERVACIÓN.

El proceso que se siguió para el análisis de las diversas probetas enumeradas anteriormente fue el siguiente:

- Observación de la probeta en general en busca de los sectores con mayor nitidez y calidad.
- Definición de los diversos sectores a observar.
- Observación de los diversos sectores de las probetas.
- Determinación de su composición en busca de partículas de circonio y otro material diferente al cobre.
- Determinación del tamaño de grano y sus características.



Figura 56: Colocación de probeta.



Figura 57: Proceso de observación.

5.6.2.5. Resultados

En el "Anexo G" se recoge un conjunto de informes generados a partir de la observación de las diferentes probetas analizadas en el microscopio electrónico. Estos informes son los siguientes:

- | | |
|-----------------------------|-----------------------|
| • PROBETA A PART_1-A | • PROBETA C2-A |
| • PROBETA A PART_2-A | • PROBETA C2-B |
| • PROBETA A PART_2-B | • PROBETA C3-A |
| • PROBETA C1-A | • PROBETA C3-B |
| • PROBETA C1-B | • PROBETA C3-C |

5.6.2.6. Conclusiones

Para una mayor orden y compresión este apartado se dividirá en dos sub-apartados, donde se expondrá en cada uno de ellos las conclusiones finales, después de haber realizado las observaciones por un lado de las dos probetas realizadas con las diferentes partículas recogidas de la parte superior del CIVIA y por otro lado de las tres probetas realizadas de las diferentes configuraciones de los diferentes trozos de hilo de contacto proporcionados por la empresa de la infraestructura.

PROBETAS PART_1 Y PART_2.

En las dos probetas realizadas con las partículas recogidas del CIVIA, no se observa en ninguno de los sectores analizados, presencia alguna de cromo o circonio, derivado de las pletinas de los pantógrafos.

Por lo tanto, aquellas muestras de cobre recogidas son partículas desprendidas del hilo de contacto al entrar en contacto con la pletina. Un hecho lógico, si nos basamos en el proporción de material entre un elemento y otro, donde la presencia del cobre procedente del hilo de contacto a lo largo de los 67 Km de la línea, hacía pensar antes de la realización de este tipo de ensayos, de que las partículas encontradas procedían del hilo de contacto, al ser el material más blanco en comparación con el ubicado en las pletinas de los pantógrafos.



Figura 58: Probeta, PART_1.



Figura 59: Probeta, PART_2.

PROBETAS C1, C2, C3.

Después de realizar todos los procesos de pulido y acabado de las diferentes probetas, realizadas de las muestras de hilo de contacto, el nivel de nitidez no fue el adecuado para la correcta visualización.

Por este motivo, por un lado no se pudo observar la diferencia de características del grano, ubicado en la zona de contacto con el frotador, al ubicado en la zona de no-contacto. Y por otro, tampoco se pudo observar la afectación del constante cambio de temperatura de trabajo, en la micro-estructura del material.

Por lo tanto, solamente nos ceñimos a la observación de diversas zonas, con el objetivo de detectar pequeñas incrustaciones de materiales ajenos al cobre o plata, en la aleación CuAg y las diferencias de rugosidad presentes en la zona de contacto con el frotador.

En las diversas zonas observadas de las probetas C1, C2, C3, no se observa ninguna presencia de un material ajeno al cobre, ni de plata, en los sectores pertenecientes a la probeta realizada del hilo de contacto de la aleación CuAg.

Hecho lógico al encontrarse aleado en un bajo porcentaje con el cobre un 0,2 % y por lo tanto, debido al número de zonas examinadas, las probabilidades de encontrar este elemento son escasas.

Los únicos elementos presentes en un porcentaje casi despreciable, son el dióxido de silicio y el carbonato de calcio, el primero un elemento presente en zonas con presencia de zonas arenosas, por lo tanto se puede deber a la suciedad del entorno de trabajo y el segundo es un elemento bastante común en la naturaleza, por lo tanto se puede deber al entorno de trabajo del hilo de contacto, al tratarse al aire libre.

Otro factor que se observo con bastante claridad, fue la diferencia de rugosidad y estado entre las zonas de contacto y no contacto con el frotador.

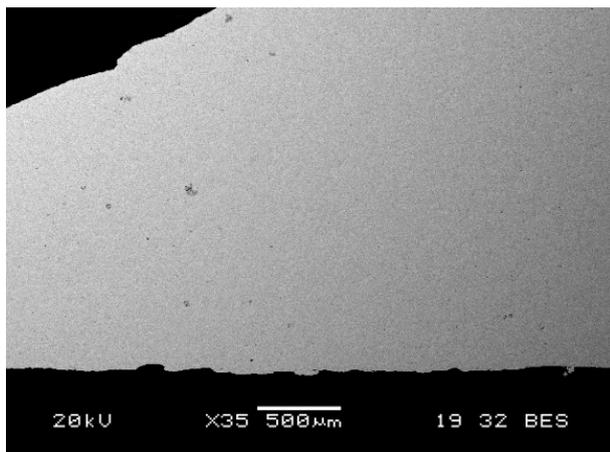


Figura 60: Rugosidad presente en la zona de contacto de la probeta C1.

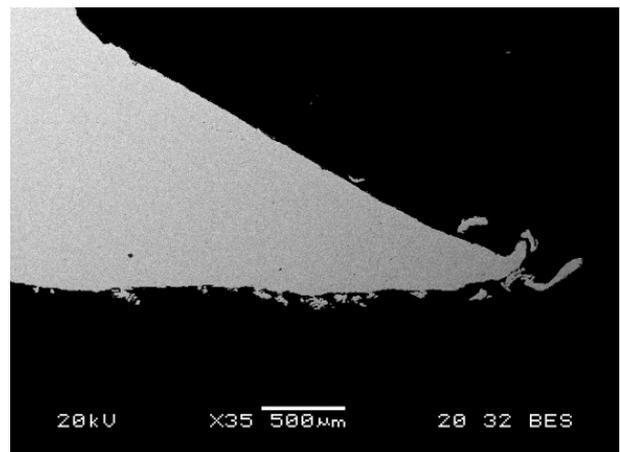


Figura 61: Rugosidad presente en la zona de contacto de la probeta C2.

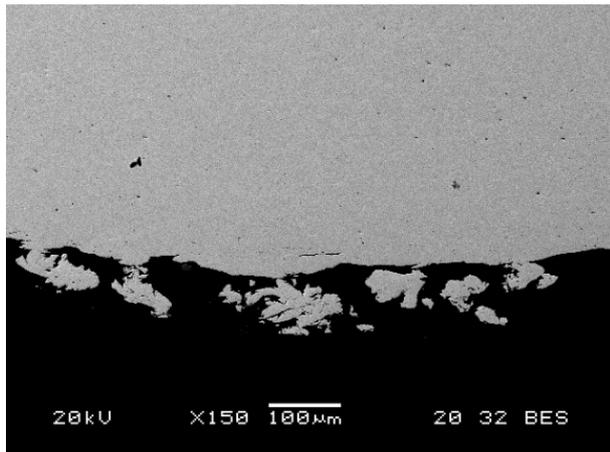


Figura 62: Rugosidad en una zona de contacto, probeta C2.

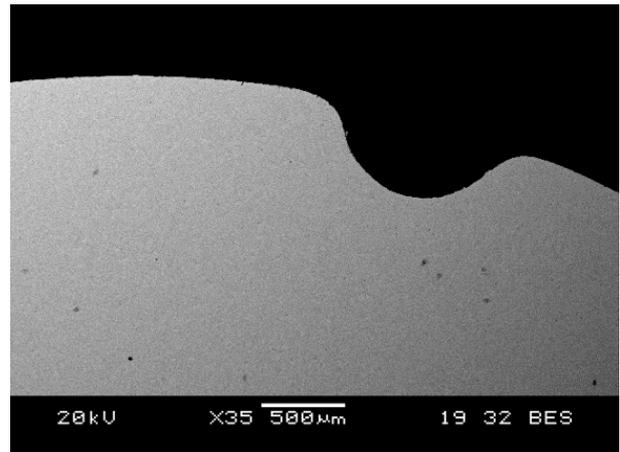


Figura 63: Rugosidad en una zona de no contacto, probeta C3.

Como se puede observar en las figuras 61 - 62, la diferencia de presencia de material sobrante e irregularidades entre las zonas de contacto y zonas de no contacto es bastante notoria. La presencia de estas irregularidades y material sobrante, afecta a la buena conservación de ambos elementos, tanto por parte del hilo de contacto como por parte del frotador.

En un caso futuro, donde la implementación de los frotadores de grafito sea un hecho, estas imperfecciones e irregularidades, afectarían a un correcto desgaste el frotador, haciendo inviable el trabajo.

Por lo tanto es importante substituir aquellos tramos donde las imperfecciones y presencia de irregularidades sea mayor, y encontrar un sistema de mantenimiento preventivo en aquellas zonas donde el estado del hilo de contacto no sea tan perjudicial para el frotador, que al tratarse de un sistema donde operan ambos elementos, la correcta interacción entre ambos siempre es favorable en ambos.

5.6.3. Ensayos de tracción

Este ensayo consiste en someter una muestra del hilo de contacto de la catenaria, de sección uniforme y conocida, a una fuerza de tracción que va aumentando progresivamente. De forma simultánea se van midiendo los correspondientes alargamientos de la probeta. Con los resultados de la elongación de la probeta, se obtiene una gráfica, donde se observa una curva de carga contra alargamiento, que generalmente se registran como valores de esfuerzo y deformación unitarios. Son independientes de la geometría de la probeta.

El motivo por el cual se van a realizar estos ensayos de tracción, es debido a que se considera conveniente conocer la resistencia a tracción y alargamiento que admiten las diferentes muestras. De esta manera se puede adelantar y evitar que se produzca una rotura a tracción en servicio de la electrificación. Sobre todo es interesante en las muestras desgastadas en exceso, ya que están trabajando por debajo de los límites establecidos. Según comentó la empresa de la infraestructura en la presentación que hizo al grupo multidisciplinar. Aunque no saben exactamente, la sección mínima a la que puede trabajar el hilo de contacto.

Otro de los objetivos es conocer cómo se comportan a tracción los dos tipos de aleaciones que se han montado en la línea R2 Sud de *Rodalies*.

Para el tipo de probetas que se van a analizar, aplica la siguiente la normativa UNE-EN ISO 6892-1:2010. Materiales Metálicos. Ensayo de tracción. Parte 1: Método de Ensayo una a temperatura ambiente. (ISO 6892-1:2009)

5.6.3.1. Maquinaria

La máquina de tracción ZWICK Z100 consta de un equipo electromecánico universal (Figura 64), que permiten la realización de ensayos estáticos convencionales de compresión, tracción, flexión y cualquier combinación de los anteriores utilizando los elementos de acoplamiento y útiles necesarios. Dispone de un software propio de gestión de ensayos y adquisición de datos que permiten hacer estudios cuantitativos de las probetas analizadas.

- **Fuerza máxima de tracción/compresión:** 100 kN.
- **Rango de temperaturas:** el rango de temperaturas de la cámara climática va desde -50 °C hasta 250 °C.
- **Velocidades de deformación:** La velocidad mínima de la cruceta es de 0,001 mm/min. hasta un máximo de 500 mm/min. con una precisión del 1 %.

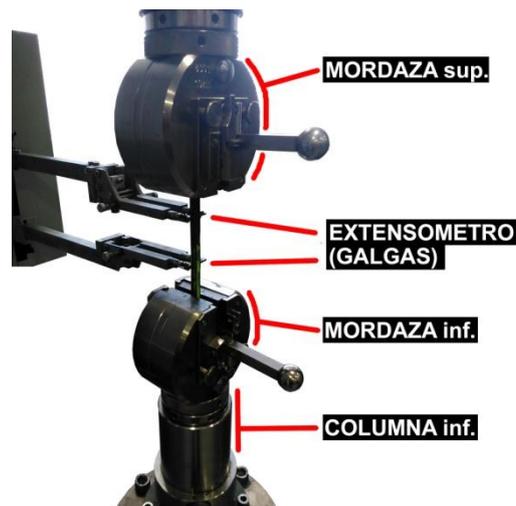


Figura 64: Partes de la máquina.

5.6.3.2. Probetas

Muestras del hilo de contacto de la catenaria de las diferentes aleaciones que se montan en la línea R2 Sud de *Rodalies*. También según el estado del hilo de contacto, nuevo y desgastado por el uso en la misma línea.

Para este ensayo se selecciono seis muestras.

- I. Hilo de contacto de Cu-ETP, nuevo.
- II. Hilo de contacto de CuAg0,1, nuevo.
- III. Hilo de contacto de Cu-ETP, usado.
- IV. Hilo de contacto de CuAg0,1, usado.

5.6.3.2.1. Hilo de contacto de Cu-ETP, nuevo

Para realizar este primer ensayo, existe un problema. Ya que el diámetro de la probeta es de 12,15 mm y no es compatible con las mordazas de la máquina de tracción. La máquina es compatible para diámetros comprendidos entre 8 mm a 12 mm y 14 mm a 22 mm.

Para poder adaptar la probeta se mecanizan unos manguitos. De esta manera se aumenta dicho diámetro, de 12 mm a 16 mm.

En primer lugar se busca una barra de acero de 16 mm de diámetro y se taladra con una broca y mediante el torno de interior 12 mm. Seguidamente utilizando la herramienta de ranura, se cortan los manguitos de longitud 25 mm. Una vez cortados todos los manguitos. Se les hace un pequeño avellanado, con la broca de avellanar. Para facilitar la entrada de la probeta. La siguiente operación, se trata de mecanizar una ranura para que cuando aprieten las mordazas de la máquina de tracción, el manguito se cierre y este haga fuerza sobre la probeta.



Figura 65: Corte de los manguitos.



Figura 66: Avellanado de los manguitos.



Figura 67: Ranura en los manguitos.

Por último, una vez están todos los manguitos mecanizados, se montan en las probetas.

En experimentación fallida. Se monta una probeta en la máquina de tracción y se observa que el manguito se escapa de la probeta. Esto es debido a que la mordaza no aprieta como un tornillo de banco, sino que al ser cónica lo que hace es que bloquee únicamente el manguito.

La solución que se plantea es mecanizar unos pasadores para asegurar la fijación del manguito y la probeta. Pero esta alternativa tiene su riesgo, ya que cabe la posibilidad que se rompa el pasador.

Efectivamente (figura 68) probeta fallida. El pasador rompe antes que la probeta, por tanto se plantea otra alternativa para poder realizar el ensayo con hilo de contacto nuevo.



Figura 68: Probeta fallida.

La siguiente opción que se plantea es roscar los manguitos a métrico 12 y realizarle una ranura en mitad de la probeta, para debilitarla y asegurar que rompa por este punto. De esta manera se conocerán las propiedades mecánicas del hilo de contacto nuevo.

Se realiza el ensayo con éxito y finalmente rompe.

Finalmente se realiza el ensayo con éxito y se obtienen los siguientes resultados:



SIMULACRO	1
SECCIÓN /mm²	28,27
DIÁMETRO /mm	6
SPECIMEN WIDTH B0 /mm	-
FORCE AT PROOF STRESS 0.2% /MPa	739,94
FMAX. /MPa	740
STRAIN AT BREAK (X-CORRECTION) /%	0,967

Tabla 89: Resultado del ensayo
H.C. Cu-ETP nuevo.

Figura 69: Probeta a tracción, 1.

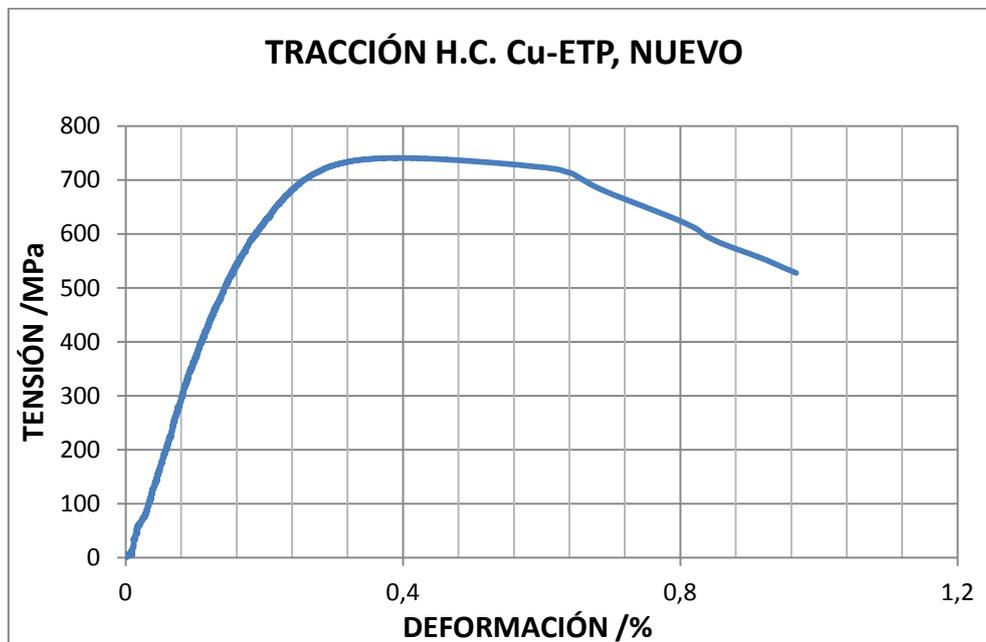


Gráfico 9: Tracción Cu-ETP, nuevo.

En este caso la tensión máxima que ha aguantado la probeta ha sido de 740 MPa, para la sección mecanizada. Esta tensión al igual que para la fuerza máxima a rotura hay que extrapolarlas a la sección total del hilo de contacto.

La deformación unitaria se calcula igual para todas las probetas. $e = (Lo/L) * 100$

Donde, $Lo =$ es el alargamiento de la probeta y $L =$ es longitud calibrada de la probeta.

En este caso la deformación ha sido pequeña por lo que se puede decir que se trata de un material poco dúctil.

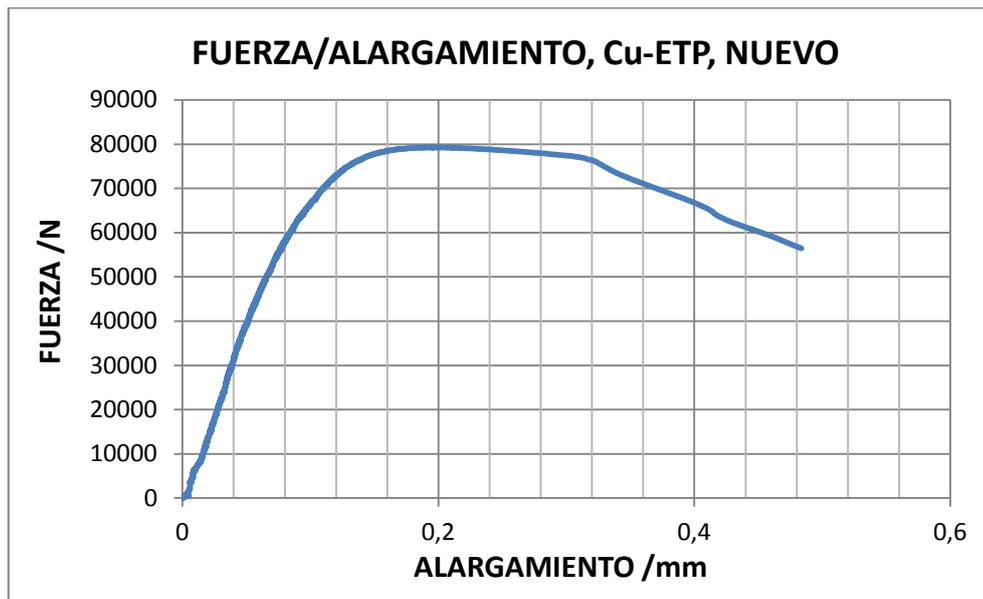


Gráfico 10: Fuerza/alargamiento Cu-ETP, nuevo.

La probeta de H.C. nuevo de Cu-ETP aguanta una fuerza a tracción de 80.000 N. Si se tiene en cuenta que el tensado máximo de la electrificación es de 15.616 N para esta aleación hay bastante margen de desgaste del mismo. Considerando el margen del coeficiente de seguridad, de un 5,12.

- $C_s = \text{Frotura} / F_{adm}$
- $C_s = 5,12$
- Frotura = 80.000 N
- $F_{adm} = 15.616 \text{ N}$

5.6.3.2.2. Hilo de contacto de CuAg0,1, nuevo

Para realizar este ensayo el proceso de preparación de las probetas es el mismo que en el primer ensayo. Se mecanizan los manguitos y montan en las probetas. En este caso son de 13 mm de diámetro. Es por este motivo que se marcan todos los manguitos, mediante un lápiz neumático. Los diámetros son de 12 mm y 13 mm para que no se confundan entre ellos.



Figura 70: Lápiz neumático.

Del ensayo se obtienen los siguientes resultados:

SIMULACRO	1
SECCIÓN /mm²	28,27
DIÁMETRO /mm	6
SPECIMEN WIDTH B0 /mm	-
FORCE AT PROOF STRESS 0.2% /MPa	-
FMAX. /MPa	651,145
STRAIN AT BREAK (X-CORRECTION) /%	1,35834

Tabla 90: Resultado del ensayo H.C. CuAg0,1 nuevo.

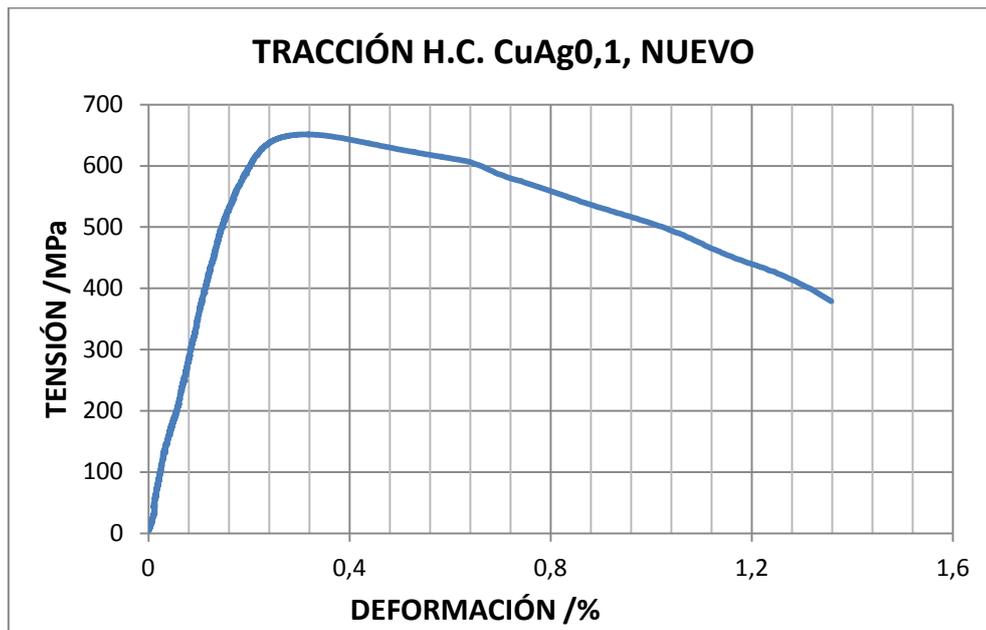


Gráfico 11: Tracción CuAg0,1, nuevo.

Este tipo de aleación se comporta de manera más dúctil que la probeta de Cu-ETP. El alargamiento es mayor, pero su tensión máxima a rotura es menor.

Por tanto se puede decir que permite mayor deformación que Cu-ETP, pero el hilo de contacto rompe antes.

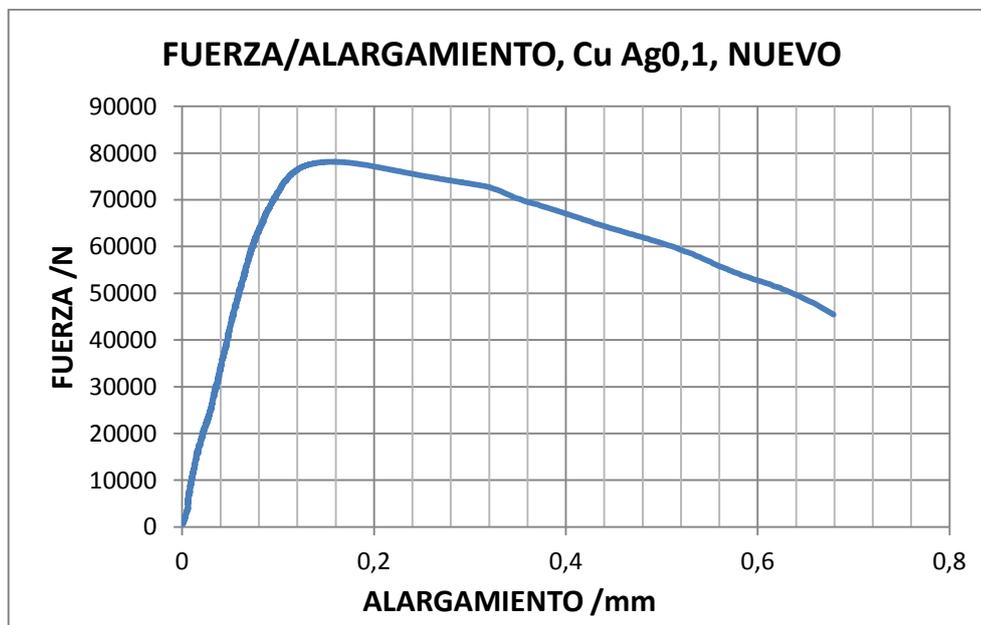


Gráfico 12: Fuerza/alargamiento CuAg0,1, nuevo.

La fuerza de tensado máxima para este tipo de aleación es de 1.753 N debido a que la sección en ese hilo de contacto es mayor.

5.6.3.2.3. Hilo de contacto de Cu-ETP, usado

En este ensayo como se ha comentado anteriormente la finalidad es conocer que tensión máxima puede soportar el hilo de contacto en las condiciones de desgaste en las que se encuentra actualmente línea R2 Sud de *Rodalies*. Estas muestras corresponden a H.C que ha estado dando servicio a la línea R2 Sud de *Rodalies*.



Figura 71: Muestras H.C. desgastados.

Para realizar este ensayo se cortan 200 mm de hilo de contacto para obtener una probeta. A diferencia de los ensayos anteriores, donde la probeta era totalmente cilíndrica. Formada por una cara plana, provocada por el desgaste. Por este motivo se cambian las mordazas de la máquina para superficies planas.

Para todos los ensayos de tracción el alargamiento se calcula en base 50 mm de probeta, debido a que el extensómetro coge esta distancia de referencia.

PRIMER ENSAYO.

Una vez realizado el ensayo tal y como se explica anteriormente, la máquina da una serie de datos, los cuales se analizan.

SIMULACRO	1
SECCIÓN /mm ²	22,79
DIÁMETRO /mm	5,3
SPECIMEN WIDTH B0 /mm	4,3
FORCE AT PROOF STRESS 0.2% /MPa	597,099
FMAX. /MPa	622,876
STRAIN AT BREAK (X-CORRECTION) /%	0,936793

Tabla 91: Resultado del ensayo Cu-ETP usado (1).

La probeta rompe ha tensió màxima de rotura 622 MPa con una fuerza a tracció aplicada de 14.000 N aproximadamente. Esta probeta es el hilo de contacto más desgastado que se ha ensayado. Sin embargo, es el que más tensión ha aguantado antes de romper.

Esta probeta tiene una deformación dúctil, debido a que deforma elástica y plásticamente antes de romper. Aunque su valor de deformación no es muy elevado, tan solo 0,5 mm de alargamiento.

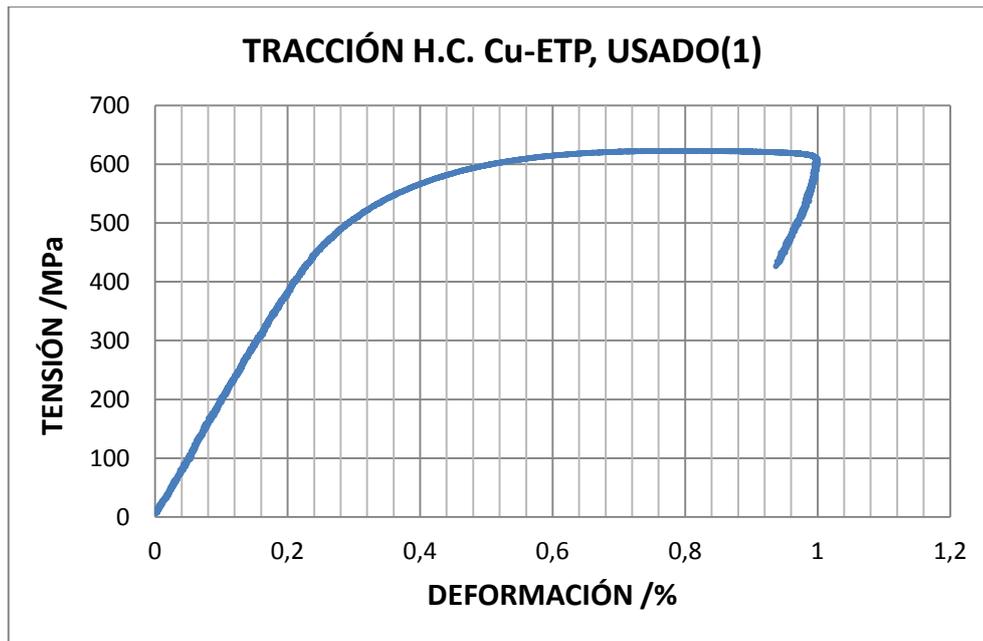


Gráfico 13: Tracción Cu-ETP, usado (1).

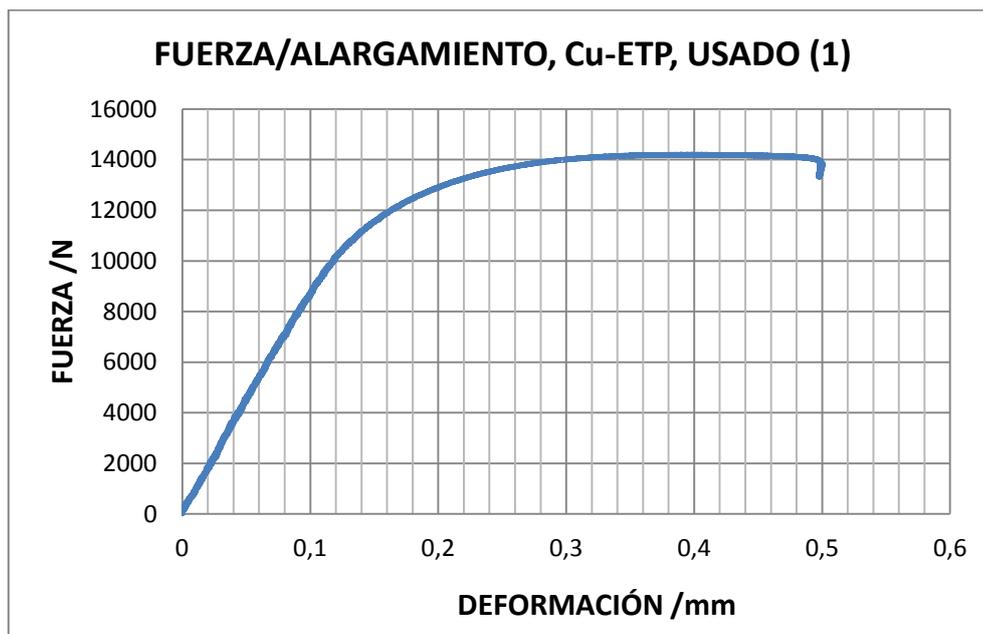


Gráfico 14: Fuerza/alargamiento Cu-ETP, usado (1).

Según los datos facilitados por la empresa de la infraestructura, la fuerza máxima a la que se tensa el hilo de contacto de sección 107 mm^2 es de 15.616 N , cifra que se encuentra muy cerca de los valores a los que ha roto la primera probeta 14.000 N . No se ha podido encontrar información acerca del coeficiente de seguridad. Se ha estimado un coeficiente de seguridad de 3 basado en el artículo 27 del R.A.T donde exige este coeficiente de seguridad para algunos puntos, para unas condiciones de temperatura y sobrecarga. Es decir 46.848 N .

Por tanto las instalaciones en algunas zonas, están funcionando en condiciones de riesgo de posible rotura. Hecho que puede provocar un enganchón del tren con el hilo de contacto y paralizar toda la circulación durante varias horas, dependiendo del accidente.

SEGUNDO ENSAYO.

Datos obtenidos:

SIMULACRO	1
SECCIÓN / mm^2	44
DIÁMETRO /mm	8
SPECIMEN WIDTH B0 /mm	5,5
FORCE AT PROOF STRESS 0.2% /MPa	408,088
FMAX. /MPa	582,267
STRAIN AT BREAK (X-CORRECTION) /%	0,418584

Tabla 92: Resultado del ensayo Cu-ETP usado (2).

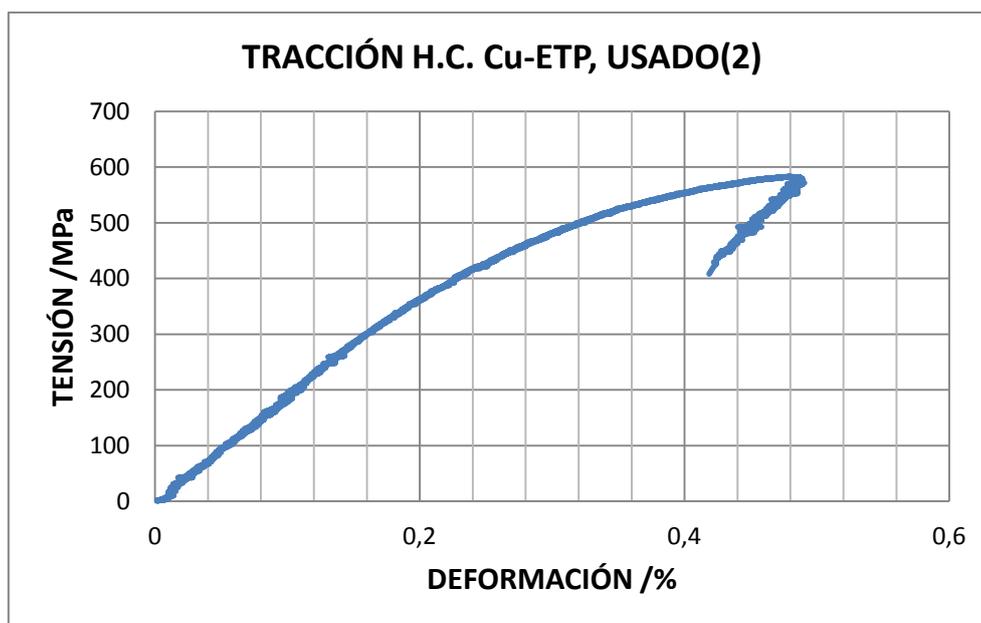


Gráfico 15: Tracción Cu-ETP, usado (2).

La siguiente probeta, todo y ser el mismo material que el primer ensayo, es mucho más dura. Esto se observa relacionando la tensión que aguanta la probeta antes de romper, con la deformación. Este último parámetro es muy bajo.

Por tanto representa un material más duro, pero más frágil a la misma vez.

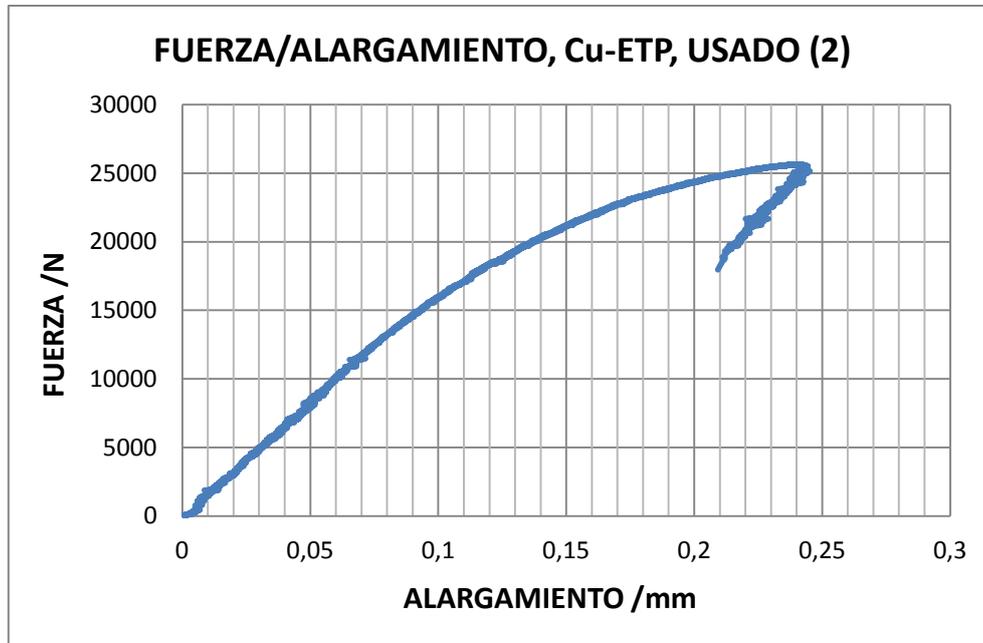


Gráfico 16: Fuerza/alargamiento Cu-ETP, usado (2).

Como se ha dicho anteriormente esta probeta es más dura, ya que alcanza 25.000 N.

TERCER ENSAYO.

Datos obtenidos:

SIMULACRO	
SECCIÓN /mm²	42,75
DIÁMETRO /mm	5,7
SPECIMEN WIDTH B0 /mm	7,5
FORCE AT PROOF STRESS 0.2% /MPa	562,568
FMAX. /MPa	563,156
STRAIN AT BREAK (X-CORRECTION) /%	0,536609

Tabla 93: Resultado del ensayo Cu-ETP usado (3).

La tercera probeta, se comporta prácticamente igual que el segundo ensayo. Fuerza de rotura prácticamente igual, así como su deformación.

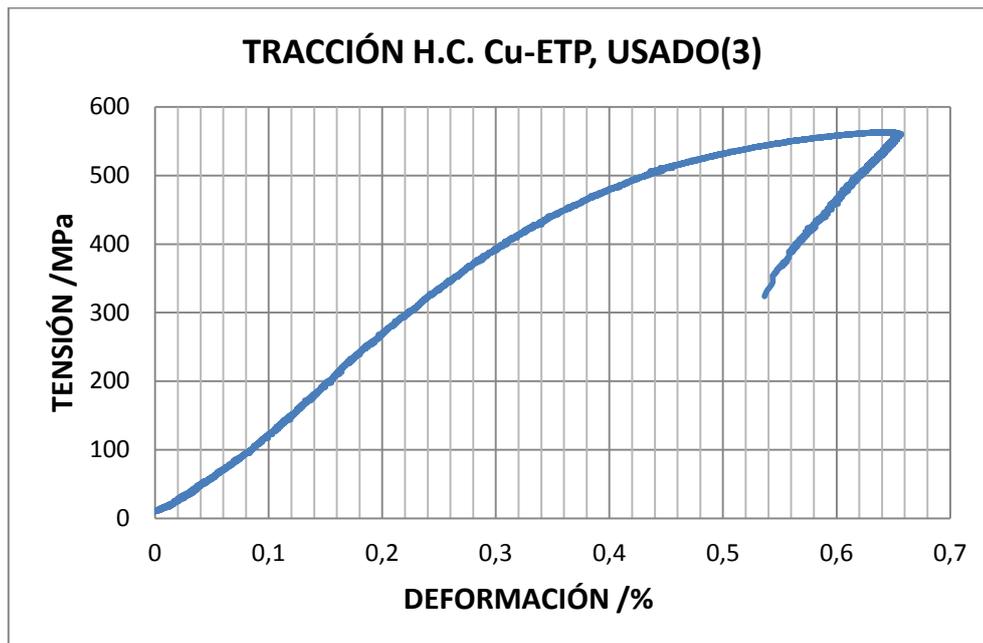


Gráfico 17: Tracción Cu-ETP, usado (3).

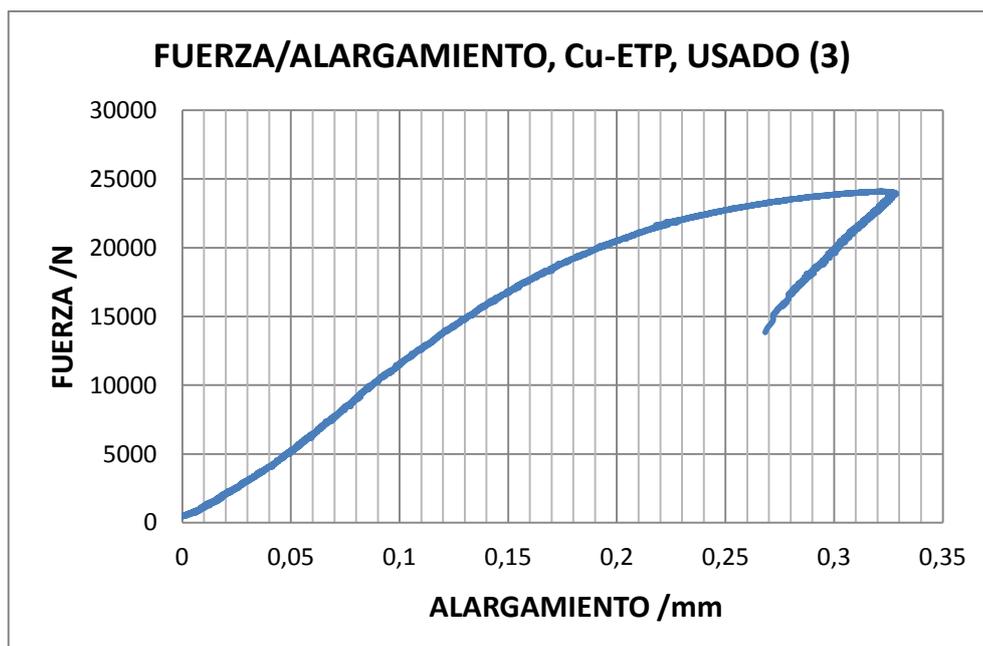


Gráfico 18: Fuerza/alargamiento Cu-ETP, usado (3).

5.6.3.2.4. Hilo de contacto de CuAg0,1, usado

Datos obtenidos:

SIMULACRO	1
SECCIÓ /mm ²	53,94
DIÀMETRO /mm	5,8
SPECIMEN WIDTH B0 /mm	9,3
FORCE AT PROOF STRESS 0.2% /MPa	230
FMAX. /MPa	249,548
STRAIN AT BREAK (X-CORRECTION) /%	9,06247

Tabla 94: Resultado del ensayo CuAg0,1 usado.

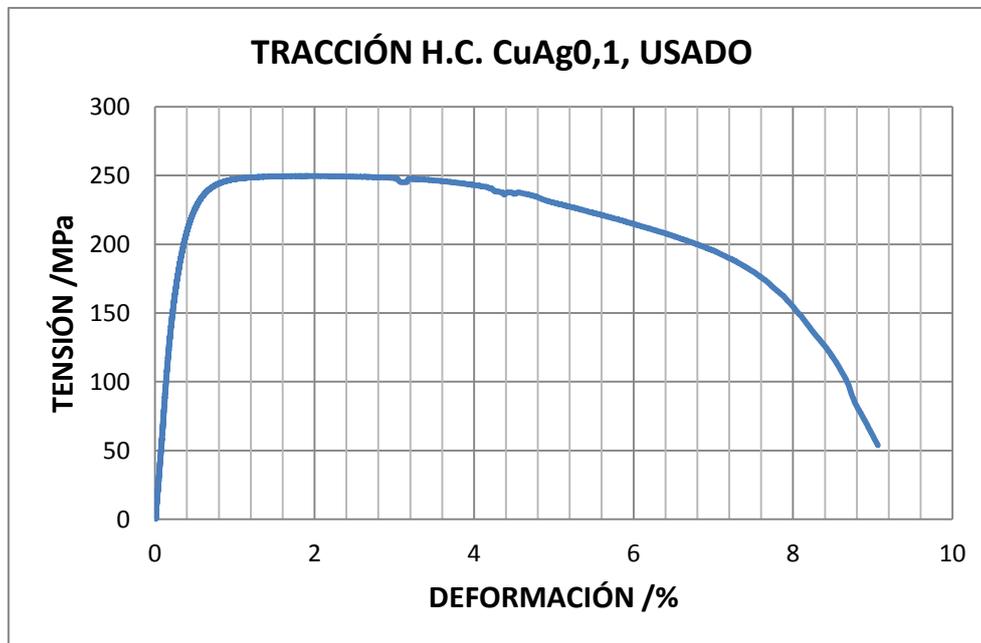


Gráfico 19: Tracción CuAg0,1, usado.



Figura 72: Ensayo de tracción CuAg0,1.

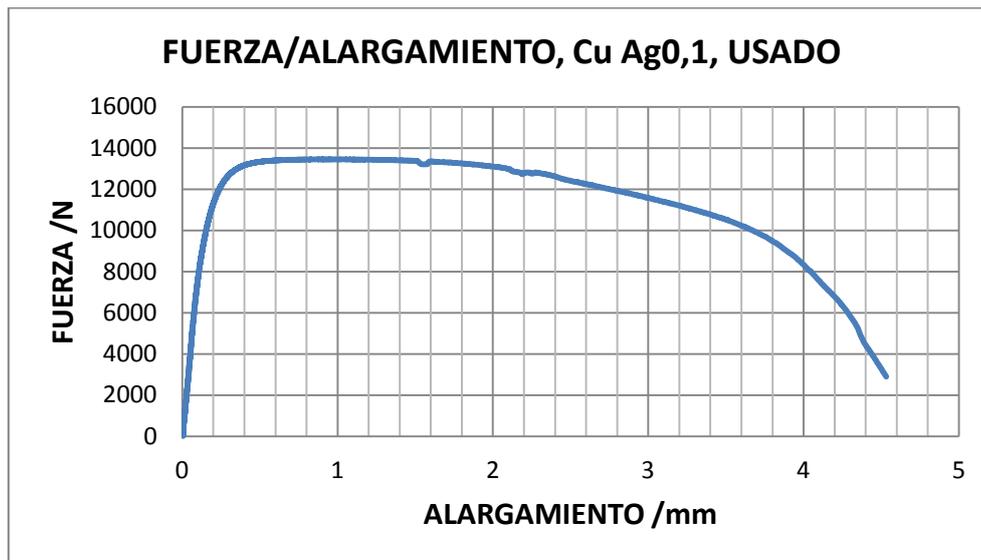


Gráfico 20: Fuerza/alargamiento CuAg0,1, usado.

El siguiente ensayo se ha realizado para otra aleación de CuAg0,1, siguiendo la misma metodología que en el ensayo anterior.

Esta muestra presenta en el ensayo, que la deformación con respecto a la aleación de cobre electrolítico es mucho mayor.

Esta última probeta tiene un comportamiento dúctil, ya que se deforma notablemente antes de romper. Casi 5 mm.

5.6.3.3. Conclusiones

COMPARATIVA TRACCIÓN, Cu-ETP y CuAg0,1, NUEVO.

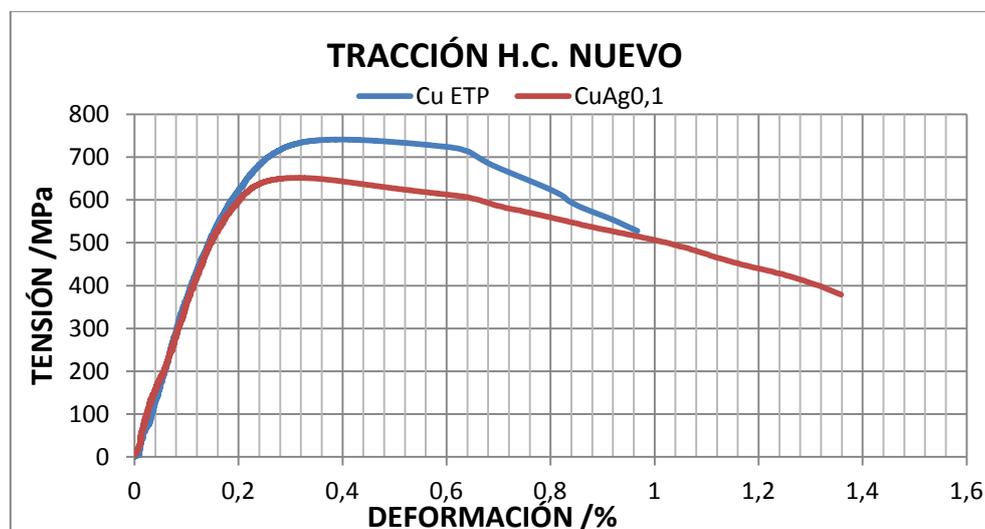


Gráfico 21: Ensayos a tracción de hilo de contacto.

Si se compara el comportamiento de ambos materiales. Se observa como el cobre electrolítico es bastante más rígido que el cobre-plata. Sin embargo permite menos deformación por lo que se puede asegurar que cobre plata es más maleable y dúctil.

Es interesante que el hilo de contacto tenga cierta rigidez, pero a su misma vez conviene que sea maleable. Sobre todo en catenaria aérea.

COMPARATIVA TRACCIÓN, Cu-ETP y CuAg0,1, USADO.

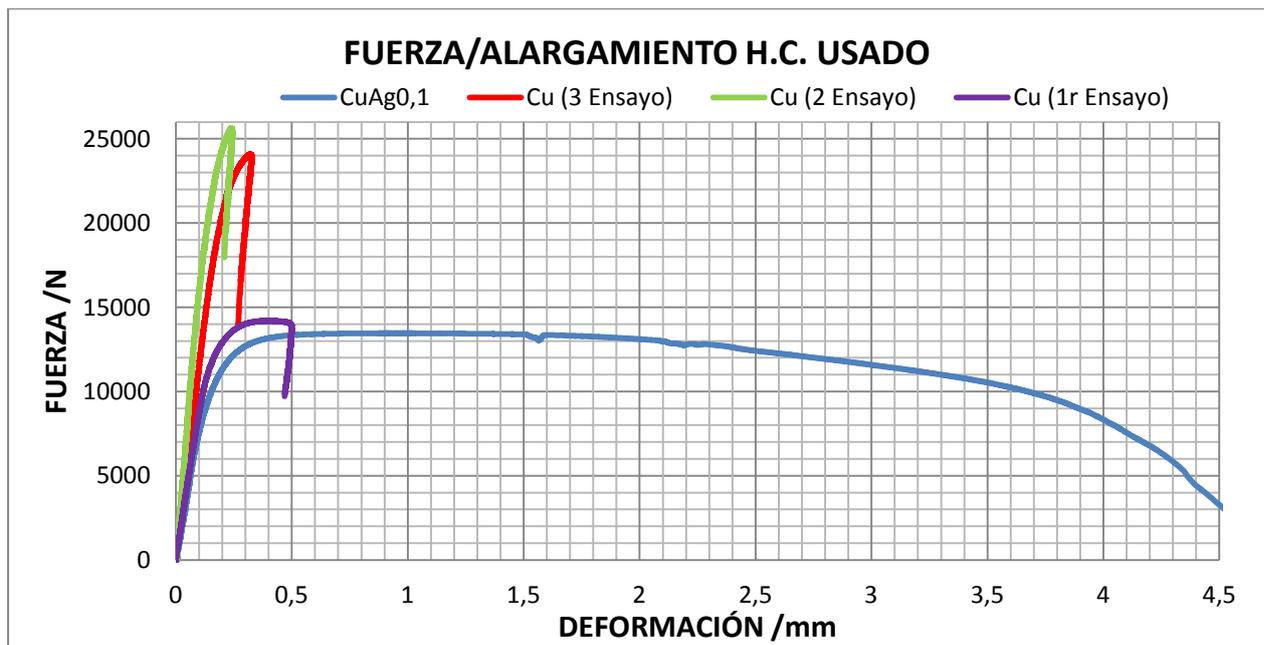


Gráfico 22: Comparativa fuerza/alargamiento de las diferentes probetas.

	1º ENSAYO CU ETP	2º ENSAYO CU ETP	3º ENSAYO CU ETP	1º ENSAYO CU AG 0,1
SIMULACRO	1	1	1	1
AREA /mm ²	22,79	44	42,75	53,94
SPECIMEN THICKNESS A0 /mm	5,3	8	5,7	5,8
SPECIMEN WIDTH B0/ mm	4,3	5,5	7,5	9,3
FORCE AT PROOF STRESS 0.2% /MPa	597	408	562	230
FMAX. /MPa	622	582	563	249
STRAIN AT BREAK (X-CORRECTION) /%	0,9367	0,4185	0,5366	9,0624
FUERZA TRACCIÓN MAX PROBETA /N	14.028	25.200	24.900	13.500

Figura 73: Resultados de los ensayos a tracción.

Teniendo en cuenta que la fuerza a la que tensa el cable es de 15.616 N para H.C. 107 y de 17.532 N, para H.C. 120.

La fuerza que ha aguantado la probeta 1 y la probeta 4 están por debajo. Esto quiere decir que estos dos hilos de contacto podrían romper en cualquier momento.

Las otras dos probetas de Cu-ETP, se han comportado de forma similar. Son probetas más duras pero a la misma vez son frágiles ya que prácticamente no permiten deformación. Una vez llegan a su tensión máxima se rompen.

La deformación de las probetas, no es parámetro realmente fiable. Debido a que solamente la última probeta, ha roto dentro de la zona del extensómetro.

El extensómetro es quien mide esta deformación.

No obstante el objetivo principal de estos ensayos es analizar si las muestras están trabajando en límite de rotura, en zona elástica o zona plástica. Para poder adelantarse a un posible accidente.

5.6.3.3.1. Fuerza de tensado admisible

Para realizar los cálculos de la fuerza de tensado admisible, se utiliza la tabla 95.

	H.C. 107		H.C. 120		H.C. 150
TENSE NOMINAL /kg	1.000	1.200	1.200	1.500	1.875
RAZÓN DE REGULACIÓN	1:5	1:5	1:5	1:5	1:5
TENSE REAL /kg	1.010,3	1.197,7	1.197,7	1.497,7	1.872,7
NÚMERO DE RODELAS	13 RT19	15 RT19 +1 RT20	15 RT19 +1 RT20	19 RT19 +1 RT20	24 RT19 +1 RT20
SOBRETENSE /%	49,05	30,38	46,37	17,05	16,9
SOBRETENSE máx. /kg	513,9	363,85	555,45	255,5	316,8
TENSE máx. /kg	1.561,6	1.561,6	1.753,2	1.753,2	2.189,6

Tabla 95: tense para el hilo de contacto de compuestos Cu ETP y CuAg0,1.

1º ENSAYO DE H.C. 107, USADO.

- Tensión Límite elástico = 597 MPa.
- Sección = 22,79 mm².
- $T = F / A$
- $F = 13.605 \text{ N}$

Conclusión. $F < 15.616 \text{ N}$, por lo tanto hay peligro de rotura del cable ya que la fuerza que aguanta la probeta es menor que la fuerza de tensado admisible.

2º ENSAYO DE H.C. 107, USADO.

- Tensión Límite elástico = 408 MPa.
- Sección = 44 mm².
- $T = F / A$
- $F = 17.952 \text{ N}$

Conclusión. $F < 15.616$. En este caso la probeta aguanta la fuerza de tensado máximo admisible. No obstante hay zonas de la electrificación donde el coeficiente de seguridad es hasta 3. Lo que quiere decir que la fuerza mínima permitida que debe aguantar el hilo de contacto sería de 46.848 N.

- $C_s = F_s / F_{adm}$
- $C_s = 3$
- $F_{adm} = 15.615 \text{ N}$
- $F_s = 46.848 \text{ N}$

Conclusión. $F < F_s$, por lo tanto no estaría en un valor permitido.

3º ENSAYO DE H.C. 107, USADO.

- Tensión Límite elástico = 562 MPa.
- Sección = 42,75 mm².
- $T = F / A$
- $F = 24.025 \text{ N}$

Conclusión. $F < 15.616$. En este caso la probeta aguanta la fuerza de tensado máximo admisible. No obstante hay zonas de la electrificación donde el coeficiente de seguridad es hasta 3. Lo que quiere decir que la fuerza mínima permitida sería de 46.848 N.

- $C_s = F_s / F_{adm}$
- $C_s = 3$
- $F_{adm} = 15.615 \text{ N}$
- $F_s = 46.848 \text{ N}$

Conclusión. $F < F_s$, por lo tanto no estaría en un valor permitido.

4º ENSAYO DE H.C. 120, USADO.

- Tensión Límite elástico = 230 MPa.
- Sección = 53,94 mm².
- $T = F / A$
- $F = 12.406 \text{ N}$

Conclusión. $F < 17.532 \text{ N}$, por lo tanto hay peligro de rotura del cable ya que la fuerza que aguanta la probeta es menor que la fuerza de tensado admisible.

5.6.3.3.2. Cálculo de sección crítica del H.C

El coeficiente de seguridad de la probeta nueva es de 5,12. Según marca el artículo 27 del R.A.T hay zonas de la electrificación donde se aplica un coeficiente de seguridad de 3. Por ello aplicamos este coeficiente para calcular las secciones críticas.

- $F_{max.adm} = C_s \cdot F_{adm}$
- $F_{max.adm} = 46.848 \text{ N}$, para Cu ETP
- $F_{max.adm} = 52.596 \text{ N}$, para CuAg0,1
- $F_{adm} = 15.616 \text{ N}$, para Cu ETP
- $F_{adm} = 17.532 \text{ N}$, para CuAg0,1
- $C_s=3$

H.C. Cu-ETP, NUEVO.

- Límite elástico = 739,94 MPa
- $F_{\max.adm} = 46.848 \text{ N}$
- $A = F_{\max.adm} / \text{Límite elástico}$
- $A = 63,31 \text{ mm}^2$

H.C. CuAg0,1, NUEVO.

- Límite elástico = 651,14 MPa
- $F_{\max.adm} = 46.848 \text{ N}$
- $A = F_{\max.adm} / \text{Límite elástico}$
- $A = 71,94 \text{ mm}^2$

1º ENSAYO DE H.C. Cu-ETP, USADO.

- Límite elástico = 597 MPa
- $F_{\max.adm} = 46.848 \text{ N}$
- $A = F_{\max.adm} / \text{Límite elástico}$
- $A = 78,47 \text{ mm}^2$

2º ENSAYO DE H.C. Cu-ETP, USADO.

- Límite elástico = 408 MPa
- $F_{\max.adm} = 46.848 \text{ N}$
- $A = F_{\max.adm} / \text{Límite elástico}$
- $A = 114,4 \text{ mm}^2$

Este resultado no es muy coherente ya que la sección crítica ha dado más que la sección inicial. Esto pueda ser debido a que el coeficiente de seguridad sea muy grande. Otra posible causa sea debido al ensayo. Donde el resultado de la tensión del límite elástico no sea correcto.

3º ENSAYO DE H.C. Cu-ETP, USADO.

- Límite elástico = 562,56 MPa
- $F_{\max.adm} = 46.848 \text{ N}$
- $A = F_{\max.adm} / \text{Límite elástico}$
- $A = 83 \text{ mm}^2$

1º ENSAYO DE H.C. CuAg0,1, USADO.

- Límite elástico = 230 MPa
- $F_{\max.adm} = 52.596 \text{ N}$
- $A = F_{\max.adm} / \text{Límite elástico}$
- $A = 228 \text{ mm}^2$

Este resultado tampoco es coherente al igual que en el 2º ensayo de Cu-ETP por los mismos motivos.

5.7. PROCESO DE FABRICACIÓN DEL HILO DE CONTACTO

El hilo de contacto es un elemento que juega un papel muy importante en la catenaria para garantizar una buena conductividad eléctrica a la locomotora eléctrica a través del pantógrafo.

Tiene que estar fabricado de tal manera que además de ser un buen conductor eléctrico tiene que soportar algunas solicitudes que recibirá en condiciones de trabajo.

Las principales solicitudes a las cuales está expuesto son:

- Solicitudes térmicas: altas temperaturas
- Solicitudes mecánicas: tracción, compresión.
- Solicitudes de desgaste: interacción entre dos materiales.
- Solicitudes medioambientales: corrosión, calor, frío, salinidad, etc.

El hilo de contacto se tiene que fabricar de tal manera que responda a estas solicitudes anteriores y cumpla con la propiedad de buen conductor.

5.7.1. *Materiales de fabricación y características*

Para la fabricación del hilo *ranurado* para líneas aéreas de contacto se utiliza el cobre como material principal y aleaciones de esta.

Hay cuatro tipos de hilo de contacto que son las siguientes:

- Cobre Electrolítico - Cu-ETP
- Cobre Plata - CuAg
- Cobre Estaño - CuSn
- Cobre Magnesio - CuMg

En la tabla 96 se puede observar todos los tipos de aleaciones de cobre y el porcentaje del material añadido de acuerdo con las normas UNE-EN 1977 y UNE-EN 50149.

DESIGNACIÓN		COMPOCICIÓN /% en masa									
Simbólica	Numérica		Cu	Bi	O	P	Pb	Ag	Mg	Sn	otros
Cu-ETP	CW004A	Min.	99,9								
		Max.	---	0,0005	0,04		0,005				0,03
CuAg0,1	CW013A	Min.	99,8					0,08			
		Max.		0,0005	0,04			0,12			0,03
CuMg0,2	CW127C	Min.	99,6						0,1		
		Max.				0,01			0,3		0,1
CuMg0,5	CW128C	Min.	99,2						0,4		
		Max.				0,01			0,7		0,1
CuSn0,2	CW129C	Min.	99,6							0,1	
		Max.								0,3	0,1

Tabla 96: Composición de las aleaciones del cobre.

La plata se utiliza como elemento de aleación para incrementar la resistencia al recocido del material base, lo cual permite lograr, sin sacrificar características mecánicas ni eléctricas, una mejor estabilidad térmica de los productos que integran la catenaria y, en consecuencia mejorar, su durabilidad.

Cuando la conductividad eléctrica no es el factor determinante en el diseño de la catenaria y, por el contrario, priman las características mecánicas, se escogen aleaciones con elementos que permiten mejorar la resistencia mecánica de los materiales convencionales como el estaño y magnesio.

Los materiales elaborados con aleaciones de Cobre Estaño y Cobre Magnesio presentan una resistencia mecánica muy elevada que permite aplicar unas tensiones de tendido suficientes para proporcionar unas mayores velocidades de propagación de onda en la catenaria de onda superiores en la catenaria.

Para la línea R2 Sud de *Rodalies* el hilo de contacto *ranurado* solo se fabrica de Cobre electrolítico (Cu-ETP) y Cobre Plata (CuAg) por las características necesarias para estas vías.

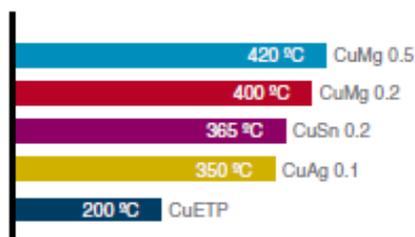


Figura 74: Representación gráfica del recocido del hilo de contacto.

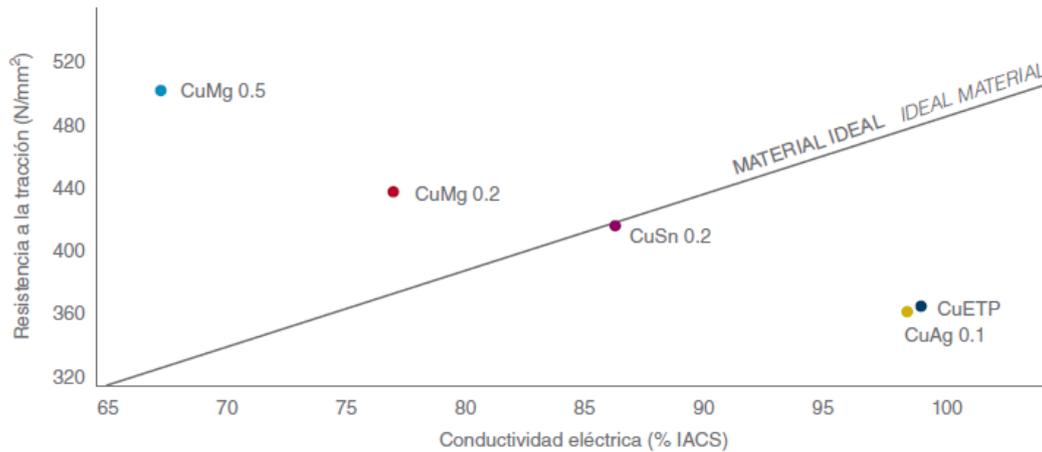


Gráfico 23: Propiedades mecánicas y eléctricas del hilo de contacto.

Si se observa el gráfico 23 se puede concluir que el cobre con un 0,5 % de magnesio es el material que más resiste a la tracción tiene la temperatura del recocido elevado pero no es buen conductor eléctrico.

También se ve que el cobre electrolítico y el cobre con un valor de plata de 0,1 %, casi tienen las mismas propiedades mecánicas y eléctricas pero en cambio el Cu-ETP tiene la temperatura de recocido mucho más bajo que el CuAg 0,1. Estos dos materiales son muy buenos conductores eléctricos pero las propiedades mecánicas son muy malas.

El cobre con un 0,2 % de magnesio es un aleado que tiene la conductividad eléctrica al 77 %, resistencia a tracción está alrededor de los 440 MPa y una temperatura de recocido de 400 °C.

Finalmente el cobre con un 2 % de estaño sería el material ideal para la fabricación del hilo de contacto si se miran las propiedades mecánicas y eléctricas. Respecto a la temperatura de recocido de este cobre aleado está alrededor de los 365 °C.

5.7.2. Características geométricas y diseño

La forma de los hilos de contacto de sección circular deberá ajustarse a la figura 75 y sus dimensiones y tolerancias están indicadas a la tabla 97. Las ranuras sujetadoras deberán ser en todo caso del tipo B con las dimensiones en milímetros que aparecen en la figura 76.

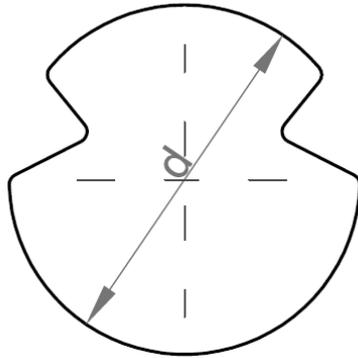


Figura 75: Plano del hilo de contacto de sección circular.

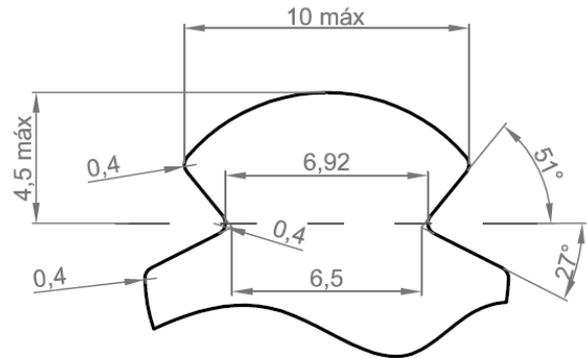


Figura 76: Plano del hilo de contacto ranurado con las dimensiones.

SECCIÓN /mm ²	CIRCULAR
	d /mm
107	12,24±0,16
120	12,85±0,16
150	14,50±0,20

Tabla 97: Dimensiones y tolerancias de hilo de contacto de sección circular.

Para distinguir los hilos de contacto *ranurados* de cobre electrolítico de los fabricados con otras aleaciones se les hacen diferentes números de estrías longitudinales, de radio 0,5 mm y radio de los acuerdos de 0,25 mm, en la parte superior del hilo, según se indica en la figura siguiente:

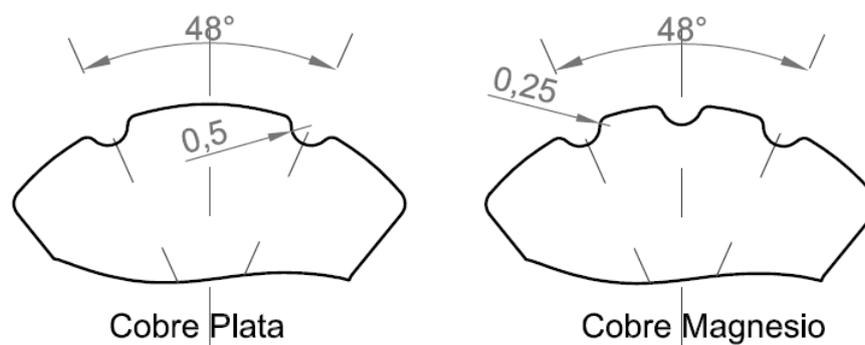


Figura 77: Plano de los hilos de contacto con estrías longitudinales.

5.7.3. *Proceso de colada continua*

En el proceso de fabricación de hilos de contacto *ranurados* de la catenaria hacen servir la colada continua. Este proceso consiste en fundir chatarra de cobre y separarla de las impurezas que pueda llevar. Las impurezas se separan por decantación a dentro del mismo horno.

Las fosas actuales están formadas por:

- 2CuFeS_2 ; y mediante una reacción de calor pasa a: $\text{Cu}_2\text{S} + 2\text{FeSiO}_3 + 2\text{SiO}_2$
- $\text{Cu}_2\text{S} + \text{O}_2$ (aire); y mediante una reacción de calor pasa a: $2\text{Cu} + \text{SO}_2$ (blíster Cu)

El blíster Cu tiene una pureza de entre el 98% y el 99,5% de Cu. Esta se refina por electrolisis para obtener un Cu del 99,99%.

A continuación disponen de un sistema de solidificación y trabajos en frío sucesivos de manera continua. Consiste en verter el cobre líquido del horno a través de una tubería que hay en su exterior sobre una rueda *solidificadora* tal y como se muestra a la figura 78.



Figura 78: *Proceso de fabricación de colada continua.*

La rueda *solidificadora* tiene una ranura en su exterior donde se acopla una cinta metálica que tapa la ranura formando así un molde con forma de sección cuadrada. El cobre líquido queda atrapado entre la rueda *solidificadora* y la cinta metálica y se solidifica mientras gira. Cuando llega al punto donde se vuelven a separar la cinta de la rueda el cobre ya se ha solidificado y es sólido.

A continuació hay un procés de enfriament amb aigua i uns processos de treball en fred successius fins a obtenir el perfil de fil de coure deseadat. El procés de treball en fred és el procés d'extrusió.

El procés d'extrusions és un procés de fabricació per deformació plàstica a on, aplicant una pressió mitjana a un pistó, es flueix un lingot de coure per una matriu obtenint un perfil de secció constant i un acabat excel·lent.

Per a la catenaria es fa el procés d'extrusió en calent on el lingot de coure està calentat a una temperatura entre la re-cristal·lització i la de fusió passa per la matriu que conforma la secció i forma de perfil deseadat. La temperatura entre la re-cristal·lització i fusió del coure oscil·la de 650 °C a 975 °C.

Finalment els fils de contacte finalitzats es enrollen en unes bobines com es mostra a la figura 79, hant de tenir en compte les longituds necessàries per a que no existin empalmes en els diferents cantons. En ningú cas es admeten soldadures en aquestes bobines.



Figura 79: Bobina de fil de contacte.

5.8. PROCÉS DE FABRICACIÓ DE LOS FROTADORES

Pletines de coure. Un dels aspectes a tenir en compte per a comprendre la estructura, propietats i comportament d'un element és el seu procés de fabricació.

En el procés d'obtenció de les pletines de coure intervien diferents processos que es explicaran a continuació, cal destacar que els processos per a obtenir la forma deseadat de les pletines de coure, són variats per lo tant nos centrarem en explicar el més comú i efectiu.

El objetivo principal de conocer el proceso de obtención de esta pieza, es intentar identificar aquellos defectos procedentes de sus diferentes procesos y así poder entender su comportamiento en servicio.

5.8.1. Colada continua

La colada continua es un proceso que consiste en producir barras que avanzan y se solidifican a medida que se va vertiendo el metal líquido en una lingotera sin fondo que se alimenta indefinidamente, a diferencia de la colada convencional.

En el proceso de colada convencional, se da forma a un objeto al entrar material líquido en una cavidad formada en un bloque de arena aglomerada o molde, dejando que se solidifique en su interior.

Con el proceso de colada continua, se puede formar directamente del cobre líquido a secciones semi-acabadas sin tener que pasar por la fase de lingote y las etapas de recalentamiento y laminación de desbaste.

El proceso consiste en los siguientes pasos.

1. Material en estado líquido (Aleación de cobre) ubicados en las diferentes ollas.
2. Se dirige en primer lugar a un distribuidor, que posteriormente irá canalizando el flujo del material hacia unos moldes sin fondo, donde adoptará la forma deseada.
3. Una vez adoptada la forma, una serie de rodillos van desplazando el material, mediante unos rodillos de soporte.
4. Una vez finalizado el ciclo, se cortan las piezas a la medida deseada mediante un soplete de corte ubicado al final de la cadena de fabricación.

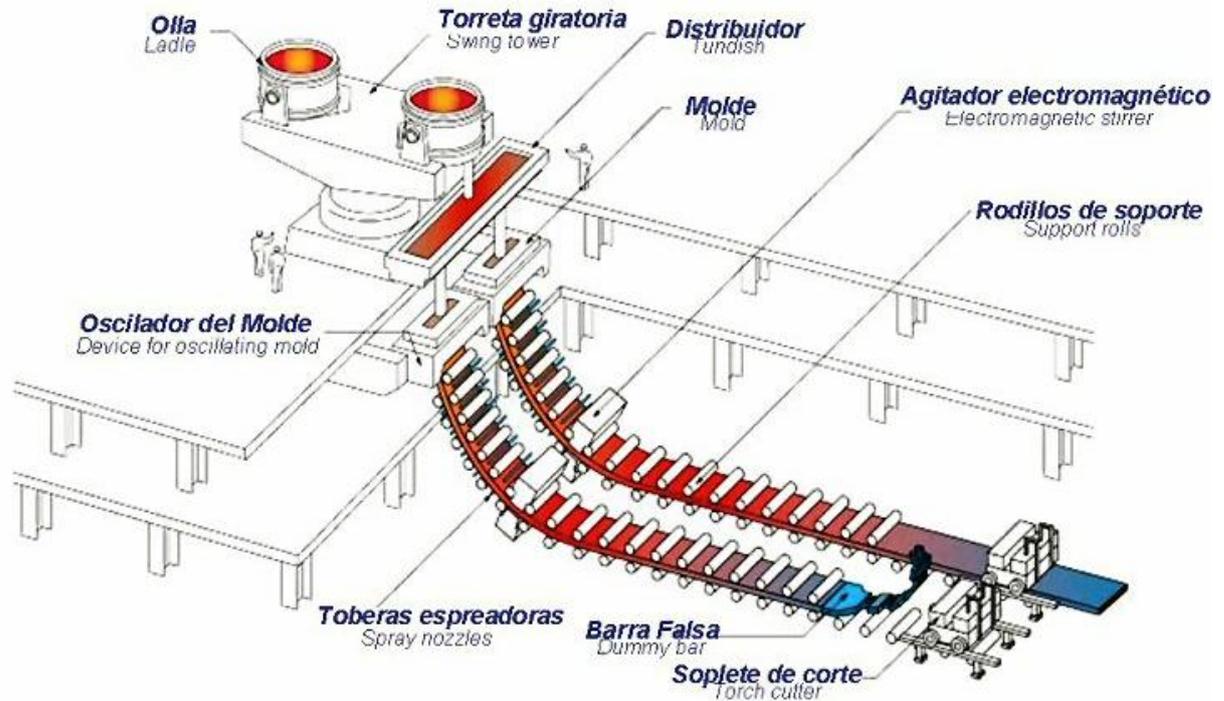


Figura 80: Proceso de fabricación por colada continua.

Las ventajas de la colada continua, en comparación de la colada convencional, la colada continua es más sencilla, rápida y económica gracias a la supresión de elementos como, los hornos destinados al precalentamiento de los lingotes y los trenes desbastadores.

Se evita defectos presentes en la colada convencional, como:

- Rechupes
 - Debido al llenado continuo de material, no deja lugar a la creación de zonas huecas.
- Uso de mazarotas y pérdidas de material
- Segregaciones
 - Al obtener secciones relativamente más pequeñas no existen diferencias de composición dentro de la pieza.

5.8.2. Extrusión

El segundo paso una vez extraído la aleación del proceso de colada continua, es aplicarlo un proceso de extrusión directa y en caliente para así obtener el perfil deseado.

A continuación en este apartado se explicará con más profundidad este proceso y las diferentes variables que intervienen, juntamente con los defectos más comunes presentes en las piezas obtenidas mediante este proceso.

El proceso de extrusión consiste en la obtención de perfiles de la forma deseada mediante la acción de compresión ejercida a un material en estado plástico, hecho que le obliga a fluir mediante un dado o boquilla con la forma requerida.

A nivel de productividad es sensiblemente que en el proceso de laminación, proceso también utilizado para la obtención de pletinas de cobre, aunque presenta una serie de ventajas que hacen preferible este proceso, como son:

- Gran variedad de formas posibles de producir
- Tolerancia más cerradas y mejor acabado
- Coste bajo relativo que favorece las producciones de series pequeñas, inviable en el proceso de laminación

Al ser un proceso donde el material es sometido a grandes fuerzas de deformación y elevadas cargas resultantes, este proceso se realiza normalmente en caliente. De acuerdo a la forma de realizar el proceso, se puede clasificar en:

- **Extrusión directa:** En este tipo de proceso el material fluye en la misma dirección del pistón, haciendo que el lingote se desplace respecto a la cámara de compresión durante el proceso, dando como resultado que la presión resultante sea en función a la longitud del lingote.

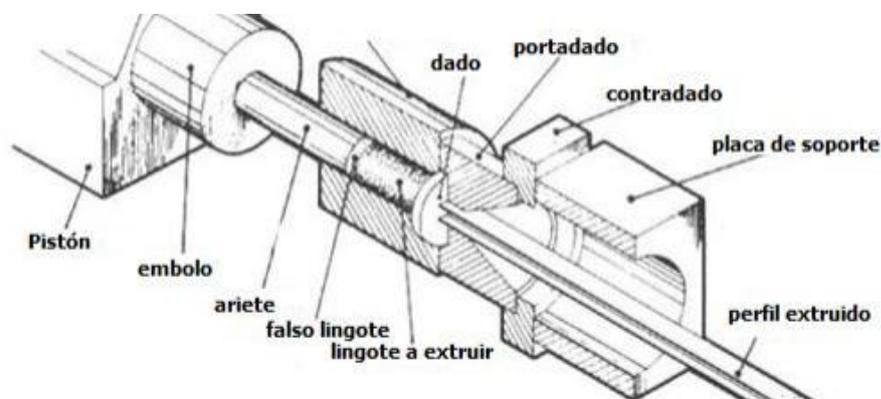


Figura 81: Proceso de fabricación por extrusión directa.

- **Extrusión indirecta o invertida:** En este tipo de proceso el material fluye en dirección opuesta al pistón, por lo que la ubicación del dado se encuentra en el ariete hueco.

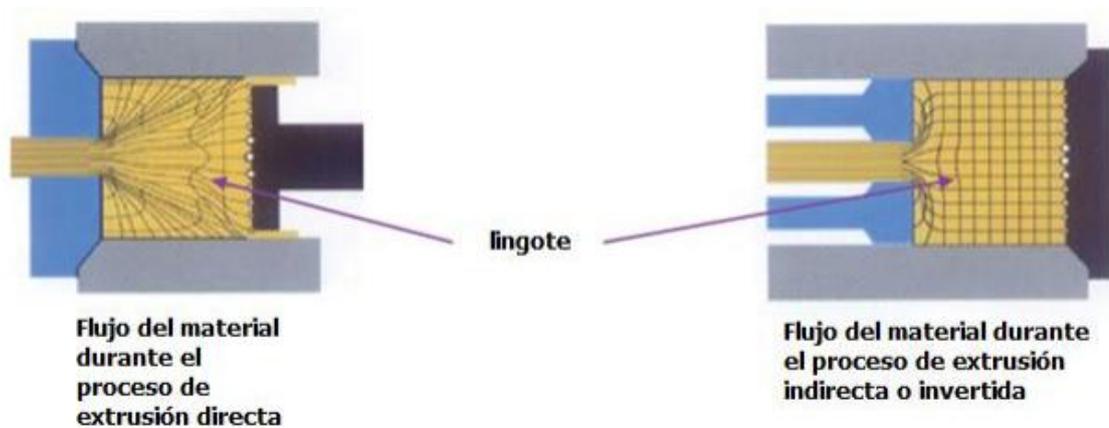


Figura 82: Diferencias de flujo entre extrusión directa e indirecta.

Al no existir movimiento relativo entre pared del contenedor y el tocho, la carga que se ejerce no viene condicionada por la longitud del lingote, siendo sensiblemente menor que en el proceso de extrusión directa.

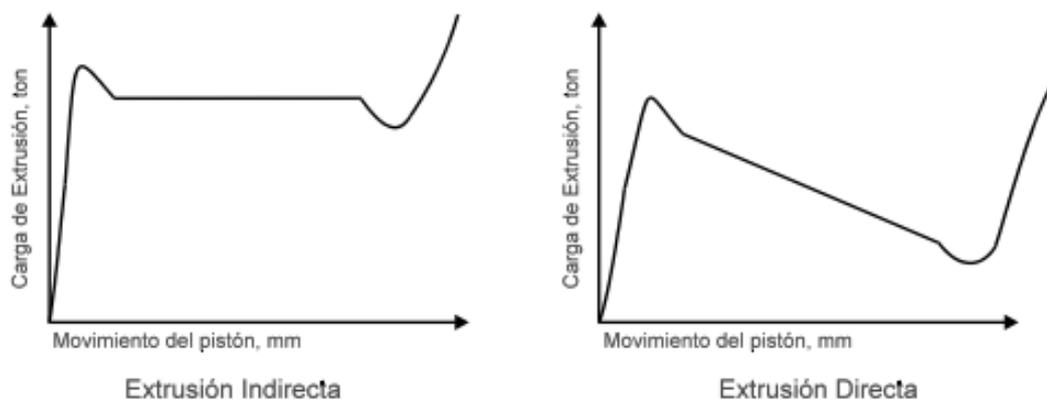


Figura 83: Diferencia de presión entre extrusión directa e indirecta.

Aunque el proceso de extrusión indirecta aporte un factor tan positivo como es la menor carga que sufre la pieza, un factor a tener cuenta es el instrumental complicado lo cual restringe su campo de aplicación y limitando su utilización, haciendo más común la práctica del proceso de extrusión directa.

También se puede clasificar según la temperatura aplicada en el proceso:

- **Extrusión en caliente (T: 660 - 1100 °C):** El proceso de extrusión en caliente, se aplica a los tipos de extrusión directa o indirecta, en condiciones de temperaturas y velocidades, para evitar la presencia de un endurecimiento a raíz de la deformación sufrida por el material.
- **Extrusión en frío (T: ambiente):** Este tipo de proceso se aplica a piezas pequeñas donde se requiere un control geométrico muy controlado y una alta resistencia del producto. Ej. Pernos o válvulas de admisión.

Como todo proceso de producción tiene sus ventajas y desventajas.

- **Efecto de extrusión:** Es el defecto más conocido del proceso de fabricación y se caracteriza por la presencia de discontinuidades internas provenientes de las zonas superficiales del lingote. Este fenómeno se presenta una vez extruido 2/3 partes del lingote, formando su superficie la zona interior del perfil, para evitar este defecto se tendría que descartar aproximadamente el 30% de la pieza, haciéndolo totalmente antieconómico o emplear un falso lingote de diámetro inferior a la cámara, esta última acción es la más utilizada para paliar este defecto predeterminado del proceso.
- **Heterogeneidad:** Este defecto se debe a las diversas condiciones que presenta el lingote durante el proceso, el origen de este problema se debe al diseño del dado y la velocidad de extrusión.
- **Grietas:** Este defecto se presenta en la sección transversal y fundamentalmente en la extrusión directa debido a las temperaturas elevadas, velocidades excesivas y los altos coeficientes de fricción existentes en la operación, este tipo de defecto suelen manifestarse ya en servicio o en tratamientos posteriores.
- **Rayas:** Este tipo de defecto se debe al mal estado de los dados, a una lubricación inadecuada o a una excesiva velocidad del proceso, se caracterizan por ser paralelas a la dirección de la extrusión.
- **Ampollas:** Este tipo de defecto se presenta en pequeñas sopladuras que aparecen en el perfil, como consecuencia de los gases adquiridos por el metal en su proceso de fusión o de las grasas residuales presentes en el contenedor o lingote. Este tipo de defectos suelen presentarse en forma de depresiones ligera y estrechas, perpendiculares al eje de extrusión.

5.8.3. Mecanizado

Una vez obtenido el perfil deseado se aplica a la pieza un mecanizado para obtener el acabado deseado y los diferentes agujeros donde irán ubicados los diferentes puntos de sujeción.

El proceso de mecanizado comprende una serie de operaciones de conformado de una pieza mediante el arranque de material, ya sea por arranque de viruta o abrasión.

Mecanizado por abrasión. Este tipo de mecanizado se realiza mediante la acción de un muela abrasiva unidas por un aglutinante que desbasta la pieza en pequeñas cantidades. La precisión de este tipo de proceso y el acabado superficial final de la pieza son muy buenos, pero en cambio los tiempos productivos son muy prolongados.

Mecanizado por arranque de viruta. En este tipo de mecanizado el material es arrancado o cortado con una herramienta dando lugar a un desperdicio o viruta. El tipo de herramientas utilizadas en este tipo de procesos consta generalmente de uno o varios filos que separan el material de la viruta en cada pasada. Este tipo de mecanizado se utiliza en operaciones de desbaste o acabado, donde se precisa un buen acabado superficial de la pieza o la generación de agujeros.

5.8.4. Pletinas de carbón mixto con cobre

El frotador o pletina de carbón mixto, también conocida en esta memoria por el nombre de *kasperowski*, *kasperowsky* o cobre-grafito.

El proceso de fabricación consiste en una vaina de carbón embutida mediante un sistema de cola de milano a un perfil de chapa de cobre.

El proceso de fabricación es el mismo para los modelos correspondientes a las tres fases, pletinas de carbón.

5.9. INSPECCIÓN VISUAL

La rama de la ingeniería tiene como objeto todo lo que afecta a los diferentes métodos de detección y evaluación de defectos. Los procedimientos de ensayo no han de producir efectos negativos en el material o estructura analizada.

Por este motivo, todo problema, accidente, fractura de material o estado incorrecto del mismo es causa de análisis. Para ello se dispone de una lista de ensayos no destructivos, la cual está formada por líquidos penetrantes, partículas magnéticas, corrientes inducidas, ultrasonidos, radiología, termografía, ruido *Barkhausen*, y el más importante de todos, inspección visual. Muchas veces olvidado.

En apartados anteriores, ya se ha comentado la inspección visual sobre una pletina desgastada de Cu-Cr-Zr afectada por el problema de desgaste descontrolado de la línea R2 Sud de *Rodalies* de Barcelona.

No obstante, se pretendió analizar el comportamiento del mismo, de la interacción pantógrafo-catenaria. Para ello se propusieron dos métodos de observación.

- I. **Inspección visual de tramo:** el objetivo de analizar un tramo, sería detectar la situación geográfica en la que se produce o se inicia el problema de flashes producidos por la interacción de los elementos en contacto.

Además, ya sea mediante personal encargado de vigilar o cámaras desplegadas a lo largo de la línea ferroviaria, podría realizar la segunda tarea relacionada con la seguridad. En este caso, controlar el robo de cable de cobre u otros elementos de la infraestructura.

Con este método pueden enviar una vagoneta de mantenimiento para analizar el estado del cable con más detalle, detectando el problema, pudiendo aplicar la medida correspondiente para subsanar el defecto.

- II. **Inspección visual de pantógrafo:** se planteo situar una herramienta para la inspección visual del pantógrafo, lo más lógico en este caso sería una cámara. Quizás lo más sensato sería que registraría imagen normal de lo que ocurre y otro sensor que capte imagen termográfica. Además, de que tuviera registro de la posición geográfica de cada imagen captada por los sensores, junto a la telemetría del tren.

El objetivo sería detectar los despegues y los golpes del pantógrafo contra catenaria, si producen flashes a causa de estas perturbaciones del funcionamiento y la forma en la que se comporta los mismos.

Este método indica, de qué manera trabaja cada pantógrafo de cada locomotora.

Para evitar un sobrecoste del estudio malgastando tiempo revisando toda la filmación, ya sea el método que se emplee, sería necesario de un software especial que detectase las variaciones de luminosidad en la imagen captadas por los diferentes sensores, con el objetivo de señalar los flashes. Ya se encargaría el personal cualificado de analizar los resultados.

Los dos métodos descritos necesitan de la autorización de las dos empresas afectadas, es decir, la gestora de la infraestructura para el método de inspección visual de tramo y la encargada de explotar la instalación para la inspección visual de pantógrafo.

Los dos métodos por separado pueden arrojar buenos resultados, no obstante, la combinación de ambos métodos, cruzando los resultados, proporcionaría unas conclusiones más fiables sobre lo que ocurre.

Ambos métodos, se pueden utilizar para encontrar el tramo afectado u origen del problema de flashes, la maquinaria afectada, las condiciones de trabajo de la locomotora y la frecuencia o evolución del problema.

5.9.1. Inspección visual de tramo

A lo largo del transcurso del Trabajo Final de Grado, se realizó varias observaciones a diferentes tramos de la línea R2 Sud de *Rodalies* de Barcelona y cercanas, en diferentes horarios, días de la semana y situaciones climatológicas.

Para ello se controló las locomotoras afectadas, la función que realizaba en cada momento (acelerando, en punto muerto, frenando o arrancando), entre otros datos mostrados en la tabla 98 y 99.

		RESULTADO DE OBSERVACIÓN				
		CASO 1	CASO 2	CASO 3	CASO 4	CASO 5
PARÁMETROS	FECHA	29/03/2014	29/03/2014	29/03/2014	29/03/2014	29/03/2014
	HORA	19:20	19:25	19:30	19:55	20:00
	LUGAR	Playa Castefa	Playa Castefa	Playa Castefa	Playa Castefa	Playa Castefa
	CATENARIA	Flexible	Flexible	Flexible	Flexible	Flexible
	LÍNEA	R2	R2	R2	R2	R2
	DIRECCIÓN	Sants BCN	S. Vicente	Sants BCN	S. Vicente	Sants BCN
	LOCOMOTORA	S-252	447	451	465	451
	FUNCIÓN	Acelerando	-	-	-	-
	TIPO DE FLASHES	Puntuales	Ninguno	Ninguno	Ninguno	Ninguno
	CLIMATOLOGÍA	Lluvioso	Lluvioso	Lluvioso	Lluvioso	Lluvioso

Tabla 98: Inspección visual de tramo, parte 1.

		RESULTADO DE OBSERVACIÓN				
		CASO 6	CASO 7	CASO 8	CASO 9	CASO 10
PARÁMETROS	FECHA	19/04/2014	30/04/2014	30/04/2014	20/05/2014	20/05/2014
	HORA	23:55	14:35	14:45	17:15	19:05
	LUGAR	Sants BCN	Gavà	Gavà	Andreu Arena	Andreu Arena
	CATENARIA	Rígida	Flexible	Flexible	Rígida	Rígida
	LÍNEA	R2	R2	R2	R4	R4
	DIRECCIÓN	Est. Francia	Sants BCN	Sants BCN	Manresa	S. Vicente
	LOCOMOTORA	447	451	451	465	447
	FUNCIÓN	-	Arrancando	Acelerando	-	Frenando
	TIPO DE FLASHES	Ninguno	Puntuales	Puntuales	Ninguno	Ráfagas cortas
	CLIMATOLOGÍA	Soleado	Soleado	Soleado	Lluvioso	Lluvioso

Tabla 99: Inspección visual de tramo, pate 2.

Debido a la falta de recursos disponibles (cámaras de video que poder situar y/o personal situado en los diferentes tramos de la línea ferroviaria) se abandono esta línea de análisis, a pesar de haber empezado la inspección visual de tramo.

Además, como el problema de desgaste ya se encuentra en una fase muy avanzada, no era lógico continuar la observación, si el objetivo era encontrar el origen de este.

No obstante, se puede extraer algunas conclusiones.

El caso numero 10 fue realmente escandaloso por la forma que tenían los flashes, ráfagas de flashes cortas pero continuas, con puntos más intensos que otros, durante la operación de frenado en la estación. Correspondía a una locomotora serie 447, con la peculiaridad de que tenía el interior con una distribución anormal, nueva. Se indica por si ayuda a focalizar la atención sobre estas locomotoras. La catenaria era del tipo rígida, se desconoce la altura de esta en esa situación por falta de datos. Carga de pasajeros, media.

Otros casos que también llama la atención son los casos 7 y 8, ya que la forma de los flashes era totalmente distinta, concretos y muy intensos (visible a plena luz del día). La peculiaridad de estos dos casos que no se indican en la tabla, es que se produjeron el día después a una tormenta con arena del sajjara. Por lo que se podría concluir que la catenaria tenía más suciedad de lo normal. A diferencia del último caso anotado, los caso 7 y 8 se produjeron en el momento de la arrancada, con unos metros ya de la marcha. Carga alta.

Resumiendo, sería interesante estudiar el comportamiento de la altura en la catenaria rígida y la suciedad en la catenaria flexible con cielo abierto. También se puede matizar que los pantógrafos SCHUNK son los que producen un mayor ruido debido a fricción a su paso. Aunque son los pantógrafos de la empresa FAIVELEY los que se ha observado que producen un mayor momentos de flashes, en cualquier fase de funcionamiento (frenado, arranque y aceleración).

5.9.2. Inspección visual de pantógrafo

Realizar esta inspección no depende únicamente del equipo que ha realizado el Trabajo Final de Grado sobre la interacción pantógrafo catenaria, problemas de desgaste línea R2 Sud de *Rodalies*. Si no, depende exclusivamente de la empresa propietaria del material rodante.

Al presentar la idea de situar una cámara encima de la locomotora para tal objetivo al técnico encargado del taller de mantenimiento del material rodante, este comunico que ya se realizo dicho estudio por parte de las empresas suministradoras por horarios nocturnos.

La diferencia con la idea propuesta fue, que ellos no utilizaron imagen termográfica. Aunque, ellos colocaron unos sensores en la mesilla para asegurar que la cámara de video enfocase siempre a los frotadores del pantógrafo. Idea que puede implementarse en el método propuesto para controlar el comportamiento del problema de desgaste.

El estudio realizado por parte de las empresas suministradoras no se pudo obtener.

5.10. ESTUDIO DE CORRELACIÓN (DESGASTE)

En este apartado se estudia la hipótesis de que existe una relación estrecha entre la altura de la catenaria y el desgaste de las pletinas del pantógrafo. La hipótesis consiste en que cuanto más baja sea la altura de la catenaria, más presión hace el pantógrafo sobre el hilo de contacto. Por lo tanto más fuerza de rozamiento se produce y más desgaste ocasiona.

Cuando hablamos de altura de catenaria nos referimos concretamente a la altura del hilo de contacto. Esta altura es la distancia, medida perpendicularmente, entre el plano medio de rodadura en el eje de la vía y la cara inferior de los hilos de contacto.

Como en apartados anteriores se ha explicado ampliamente todo el desgaste irregular que se origina en las pletinas, en este apartado no se entra al detalle sobre este tema. Aunque para hacer este estudio se tomaron las medidas de todo el relieve que resulta del desgaste en las pletinas y poder así extraer conclusiones más certeras, se ha cogido como referencia la medida más pequeña de todo el desgaste irregular.

5.10.1. Alturas de catenaria

Gracias a los datos facilitados por la Empresa de Infraestructura se pudo observar los puntos críticos que existen en el recorrido de la catenaria. Cuando se habla de puntos críticos se hace referencia a aquellos puntos donde la altura de la catenaria es más baja. También se ha de puntualizar que aunque hablemos de críticos, todos los puntos observados quedan dentro de los límites de tolerancia de las características de la catenaria explicadas con anterioridad.

Los puntos críticos suelen coincidir con tramos de pasos inferiores y túneles de catenaria flexible.



Figura 84: Paso inferior.



Figura 85: Túnel.

Aunque no dispongamos de datos, este proyecto también incluye en los puntos críticos los tramos de catenaria rígida que hay instalada en algunos túneles y estaciones soterradas de la zona de Barcelona. Se ha optado por incluirlos puesto que se ha observado en campo y corroborado por los maquinistas, que los pantógrafos están muy bajos cuando los trenes circulan por esta área. También cabe resaltar que la catenaria rígida no tiene la misma torcedura que adquiere la catenaria flexible al paso del pantógrafo. Así al no ceder el hilo de contacto, existe más presión y por lo tanto más desgaste sobre el frotador. Por todo esto se considera como un factor importante a tener en cuenta en el proyecto.



Figura 86: Catenaria rígida.

5.10.2. Seguimiento de trayectos de un tren

Para realizar el estudio de correlación (para el desgaste) entre la altura de la catenaria y el desgaste del pantógrafo se hicieron medidas de las pletinas de los pantógrafos de un tren determinado dentro de los talleres de la Empresa Operadora, antes de que saliera para hacer su recorrido. Y cuando la unidad regresó para hacer la revisión periódica se volvieron a efectuar las mismas medidas.

Al principio salieron las unidades con las pletinas nuevas y después se consiguió dos seguimientos de la misma unidad al paso por talleres de dos revisiones.



Figura 87: Conjunto de imágenes de la toma de medidas.

Por cortesía de la Empresa Operadora se ha podido acceder a los trayectos recorridos por esta unidad los cuales se han desglosado por los tramos donde la catenaria suele estar más baja.

Los resultados obtenidos son los que se exponen a continuación y en el “Anexo F”, donde el pantógrafo 1 es el que trabaja cuando la unidad circula en sentido norte, y el pantógrafo 2 es el que trabaja cuando la unidad circula en sentido sur. Esto ocurre hasta el día 17/05/2014 cuando el tren pasa por la Estación de Francia y cambia el sentido de su marcha. Pasando el pantógrafo 1 a circula en sentido sur, y el pantógrafo 2 a sentido norte. Esto se ha indicado en la parte un poco más sombreada de las tablas, color azul.

En el desglose no se ha tenido en cuenta los puntos críticos de los pasos inferiores porque la distancias son muy cortas en comparación al total de kilómetros recorridos.

Al principio, antes de salir en servicio la unidad, en los pantógrafos lleva instaladas pletinas nuevas que miden 10 mm.

En el “anexo F” se recoge un conjunto de tablas de los diferentes seguimientos del pantógrafo 1 y pantógrafo 2, además de los desgastes sufridos. También reflejados en las conclusiones.

5.10.3. Conclusiones

Una vez desglosados todos los trayectos por los puntos críticos de altura de catenarias, sumando los kilómetros recorridos por estos itinerarios. Y obtenidas las medidas de desgaste mínimo de las pletinas. Se llega a la conclusión siguiente.

SEGUIMIENTO 1.

Medida mínima: 7,6 mm (banda de contacto 1) y 9 mm (banda de contacto 2). Medición del desgaste en las bandas de frotadores del pantógrafo 1.

PANTÓGRAFO 1 /km			
CATENARIA FLEXIBEL	CATENARIA RIGIDA	TUNEL	DISTANCIA TOTAL
1877	414	457	2291

Tabla 100: Seguimiento 1 desgaste, pantógrafo 1.

Medida mínima: 8,6 mm (banda de contacto 2) y 9 mm (banda de contacto 1). Medición del desgaste en las bandas de frotadores del pantógrafo 2.

PANTÓGRAFO 2 /km			
CATENARIA FLEXIBEL	CATENARIA RIGIDA	TUNEL	DISTANCIA TOTAL
1859	414	436	2273

Tabla 101: Seguimiento 1 desgaste, pantógrafo 2.

SEGUIMIENTO 2.

Medida mínima: 6,1 mm (banda de contacto 2) y 8,1 mm (banda de contacto 1). Medición del desgaste en las bandas de frotadores del pantógrafo 1.

PANTÓGRAFO 1 /km			
CATENARIA FLEXIBEL	CATENARIA RIGIDA	TUNEL	DISTANCIA TOTAL
4841	1110	1201	5951

Tabla 102: Seguimiento 2 desgaste, pantógrafo 1.

Medida mínima: 6,4 mm (banda de contacto 1) y 8,5 mm (banda de contacto 2). Medición del desgaste en las bandas de frotadores del pantógrafo 2.

PANTÓGRAFO 2 /km			
CATENARIA FLEXIBEL	CATENARIA RIGIDA	TUNEL	DISTANCIA TOTAL
5040	1158	1263	6198

Tabla 103: Seguimiento 2 desgaste, pantógrafo 2.

PANTÓGRAFO 1 Y 2	CATENARIA FLEXIBEL	CATENARIA RIGIDA	TUNEL	DISTANCIA TOTAL
TOTAL SENTIDO NORTE /km	4924,2	1134,6	1227,6	6058,8

Tabla 104: Combinación de kilómetros, sentido norte.

PANTÓGRAFO 1 Y 2	CATENARIA FLEXIBEL	CATENARIA RIGIDA	TUNEL	DISTANCIA TOTAL
TOTAL SENTIDO SUR /km	4957,3	1134,1	1236,4	6091,4

Tabla 105: Combinación de kilómetros, sentido sud.

En este seguimiento no podemos distinguir si la catenaria rígida que se había considerado como punto críticos de altura, efectúa un mayor desgaste sobre las pletinas puesto que los kilómetros recorridos en estos tramos son prácticamente iguales tanto en el pantógrafo 1 como en el pantógrafo 2. Y lo mismo pasaría en los puntos críticos de túneles.

Pero lo que si podemos extraer de este proceso es que el pantógrafo 1 acusa más desgaste que el pantógrafo 2, durante el seguimiento 1. Y que este desgaste del pantógrafo 1 al pantógrafo 2, pasa a ser prácticamente igual en el seguimiento 2. Esto podría ocurrir porque al hacer un cambio de sentido el tren en la Estación de Francia los pantógrafos cambian de posición sobre la marcha. El pantógrafo 1 pasa de circular por la vía II a la vía I y el pantógrafo 2 pasa de circular de la vía I a la vía II. Así aunque el tren haya acumulado la misma distancia tanto en catenaria rígida, túneles, vía I o vía II. Vemos que las pletinas desgastan más cuando circulan por vía II, e igualan el desgaste cuando cambia de sentido de la marcha el tren.

Esto coincide perfectamente con los datos proporcionados por las Empresa de Infraestructura donde la hilo de contacto de la vía II de la catenaria sufre normalmente más desgaste que el de la vía I.

6. ESTUDIO ECONÓMICO

El estudio económico de esta memoria plantea analizar diferentes aspectos. El primero de ellos consiste en especificar los costes que ha tenido, tiene y tendrá el operador de la red respecto los frotadores que utilice, ya que no todos se comportan de la misma manera.

Para ello se analizará los costes del material desechable (frotadores o pletinas), la mano de obra que necesitan para realizar la sustitución de las piezas desgastadas o dañadas y los tiempos que necesitan para sustituir o reparar un pantógrafo.

Por otro lado, se evaluará el percance económico que sufriría la empresa operadora y la que gestiona la superestructura, si se produjese una avería en algunos de los tramos que componen la R2 Sud de *Rodalies* de Cataluña.

Para ello se realizaran el estudio de dos averías al azar, teniendo en cuenta el horario, la cantidad de viajeros, el número de trenes afectados, entre otras variables.

6.1. EVOLUCIÓN COSTES DE PLETINAS

Desde la aparición del desgaste acelerado en los frotadores de los pantógrafos, el operador de la red realizó una serie de acciones para intentar solventar el problema. Parte de estas acciones se concentró en la utilización de otros materiales.

A pesar de que el operador de la red minimizó parte del problema para sus pantógrafos, el gestor de la infraestructura vio incrementado su desgaste en el hilo de contacto hasta llegar al punto en el que es insostenible tal situación para dicha empresa. Por este motivo todavía se está experimentando con la utilización de nuevos materiales en los frotadores (grafito).

El siguiente apartado se centra en el estudio económico del precio de estos frotadores, relacionado directamente con la vida útil de estos.

6.1.1. Descripción de la situación actual

El parque del operador de la red de Cataluña gestiona 512 pantógrafos, de los cuales 436 pertenecen a los modelos de la marca FAIVELEY más los de la marca SCHUNK utilizados en las locomotoras tipo CIVIA. Los otros 76 restantes van montados en las locomotoras S-449 y S-252. Se matiza esta diferencia porque los frotadores que se van a colocar en los ensayos de Septiembre de las fases 1, 2 y 3 tienen precios distintos.

Además, el sueldo de un operario es de 52,89 € por hora. Un pantógrafo necesita de dos operarios durante una hora. Por lo que reducir el número de veces que necesita cambiar frotadores a lo largo del año, supone gastar menos dinero en operarios realizando esta tarea.

La tabla 106 resume el precio de los frotadores, la cantidad de estos por pantógrafo, la cantidad de pantógrafo y la fase en la que se utiliza.

-	MATERIAL	CANTIDAD PAN.	PRECIO FROTADORES		Nº DE FROTADORES POR PAN.	
			CORTOS (€)	LARGOS (€)	CORTOS	LARGOS
-	Cu ETP	512	15,54	16,73	2	2
-	Cu-Cr-Zr	512	36,78	51,89	2	2
FASE 1	SK1673	436	NO APLICA	180	NO APLICA	2
	SK1748	76	NO APLICA	185	NO APLICA	2
FASE 2	SK1755	436	NO APLICA	175	NO APLICA	2
	SK1754	76	NO APLICA	190	NO APLICA	2
FASE 3	SK1261	436	NO APLICA	179	NO APLICA	2
	SK1760	76	NO APLICA	195	NO APLICA	2

Tabla 106: Costes y cantidades por pletinas.

El resto de componentes que forman la mesilla no se contabilizan por dos motivos. El primer motivo es debido a que solo se sustituyen en caso de rotura, por lo que no siempre genera un gasto continuo. El segundo motivo es el precio de estas piezas, muy inferior al coste de los frotadores.

La tabla 107 resume la problemática según los datos de desgaste. Donde se observa que el desgaste siempre es mayor de lo previsto, exceptuando los frotadores de Cu-Cr-Zr que han dado un resultado mejor de lo esperado para el operador de la red.

MATERIAL	CARACTERÍSTICAS /mm	DISTANCIA SANA /km	DESGASTE REAL SANO	DISTANCIA PROBLEMA /km	DESGASTE PROBLEMA
Cu ETP	Espesor inicial: 7 Sustitución: 3	16.000	2,5 mm / 10.000 km	7.711,3	5,18 mm / 10.000 km
Cu-Cr-Zr	Espesor inicial: 10 Sustitución: 3	43.750	1,6 mm / 10.000 km	55.654,4	1,25 mm / 10.000 km
Cu-Grafito (Kasperowski)	Espesor inicial: 20 Sustitución: 5	75.000	2 mm / 10.000 km	21.895,2	2 mm / 10.000 km

Tabla 107: Características técnicas según material.

6.1.2. Análisis económico

El cambio del mes de Septiembre va representar un incremento considerable inicial del gasto, tanto en material como en mano de obra.

En la grafica 24 representa el coste de los frotadores de cambiar una vez todo el parque del operador de la red en Cataluña según el material del frotador.

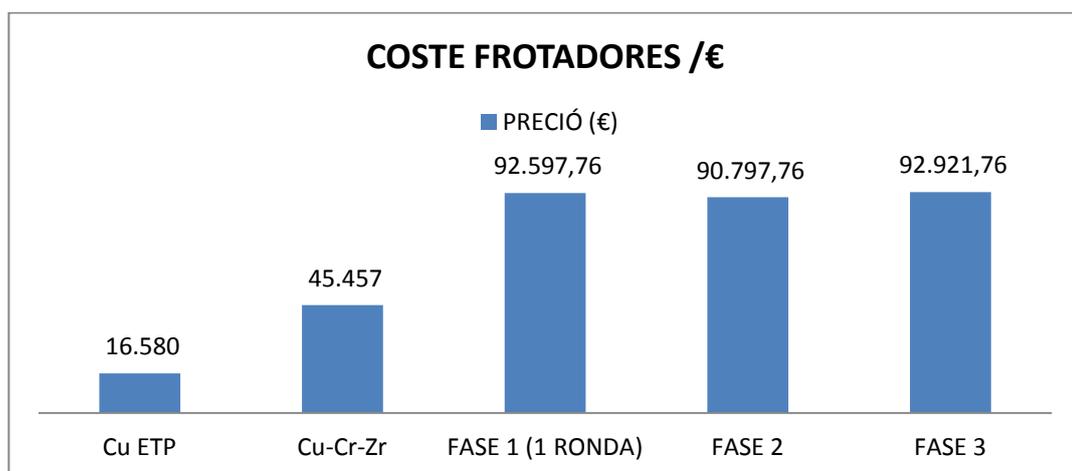


Gráfico 24: Coste de pletinas según material.

Los frotadores de grafito utilizados en las fase 1 (SK1673 y SK1748), fase 2 (SK1755 y SK1754) y fase 3 (SK1261 y SK1760) han de realizar un mínimo de 80.000 km para no incrementar el gasto del operador de la red respecto los frotadores de Cu-Cr-Zr.

Aunque en condiciones normales del hilo de contacto, están realizando 200.000 km en otras zonas de la península, incluso algunos lugares realizan entre 380.000 km y 420.000 km.

MATERIAL	CARACTERÍSTICAS /mm	DISTANCIA TEÓRICA /km	DESGASTE PREVISTO	DISTANCIA MÍNIMA /km	DESGASTE MÁXIMO
Grafito (Fase 3)	Espesor inicial: 28 Sustitución: 9	200.000 km	0,95 mm / 10.000 km	80.000 km	2,4 mm / 10.000 km

Tabla 108: Características técnicas de la pletina de grafito.

No obstante, el ensayo realizado el año 2012 con frotadores *Kasperowski* resulto negativo, ya que tendrían que recorrer 85.000 km y en realidad no llegaban a 21.000 km. Por este motivo no existe confianza en el éxito de estas tres fases.

Sin embargo, en un periodo de tiempo el desgaste de los frotadores se tendría que estabilizar dentro de unos parámetros que permitirían ahorrar dinero. Para acelerar esta previsión, se ha planteado la propuesta de mantenimiento a los HH.CC, apartado 8.1

La tabla 109 analiza el precio de unas de las bandas de frotador (en el caso del Cu ETP y Cu-Cr-Zr la suma de precios de una pletina larga y otra corta) por kilómetros recorridos en situación optima (sin presentar problemas de desgaste prematuro).

Se observa que las fases han de realizar entorno 90.000 km para evitar incrementar el coste de este elemento, frente al coste presentado por las Cu-Cr-Zr.

MATERIAL	PRECIO FROTADOR /€	DISTANCIA OPTIMA /km	PRECIO/DISTANCIA /€·km ⁻¹
Cu ETP	32,27	16000	2,01688E-03
Cu-Cr-Zr	88,67	44000	2,01523E-03
SK1673	180	89319,95	2,01523E-03
SK1748	185	91801,06	2,01523E-03
SK1755	175	86838,84	2,01523E-03
SK1754	190	94282,16	2,01523E-03
SK1261	179	88823,72	2,01523E-03
SK1760	195	96763,27	2,01523E-03

Tabla 109: Precio del frotador según distancia, mínima deseada.

Aunque, como se indica en el plan de mantenimiento del operador de la red, las locomotoras están previstos que hagan revisiones periódicas en función al número de kilómetros recorridos, por lo que siempre van a tener un gasto de personal fijo en el mantenimiento de cada locomotora, ya que está previsto que entren cada 15 días.

A continuación se plantean dos posibles situaciones hipotéticas con diferentes estados del hilo de contacto de la catenaria.

6.1.2.1. Situación sin actuaciones previas

Los datos de desgaste son irreales, ya que se desconocen cómo se comportaran en la realidad, a pesar de que se tenga una idea aproximada. Todo depende del estado de la rugosidad en el hilo. En este caso, el hilo de contacto presenta una rugosidad de clase N10, estado actual, con perlas, rebabas, granos producidos por los flashes entre los contactos.

Esto implica que el frotador de grafito sufrirá un desgaste acelerado, ya que se trata de un material blando. No obstante, los tiempos de desgaste se alargaran, realizando más kilómetros por unidad, ya que el grafito es abrasivo y dejará el estado del hilo pulido.

Para la realización de las graficas de este punto (6.1.2.1) se ha utilizado la tabla 110. Representa la sustitución de las pletinas de todo el parque del operador de la red en Cataluña, una vez cada unidad de pantógrafos.

EVOLUCIÓN DEL GASTO				
Tipo de pletina	Coste material /€	Coste operario /€	Coste total /€	Recorrido /km
Cu ETP	16.580	54.159,36	70.739,36	16.000
Cu-Cr-Zr	45.457	54.159,36	99.616,16	55.000
FASE 1 (1 ronda)	92.597,76	54.159,36	146.757,12	18.000
FASE 2	90.797,76	54.159,36	144.957,12	40.000
FASE 3	92.921,76	54.159,36	147.081,12	95.000

Tabla 110: Evolución del gasto según material, irreal 1.

Hay que tener en cuenta que los datos de desgaste en los frotadores que corresponden en las tres fases no son reales, ya que no se tienen referencias. Aunque se espera que la línea de desgaste tenga una evolución cuadrática al principio y luego lineal para alcanzar los 400.000 km aproximadamente.

La grafica 25 muestra la relación del gasto del personal según las tareas. "Operario" hace referencia al gasto que dedican los mecánicos en sustituir los frotadores de los pantógrafos.

En cambio, "otros" hace referencia al tiempo que destina el operario a tareas de revisión del pantógrafo (analizar el nivel de desgaste y engrasar) y limpieza de la locomotora.

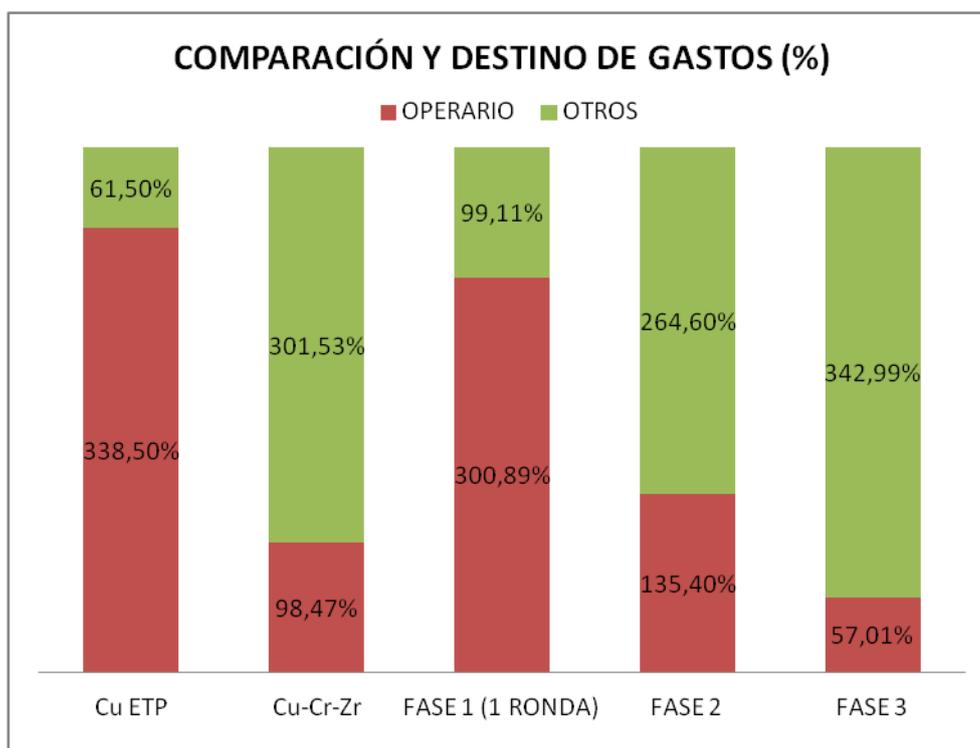


Gráfico 25: Gasto del personal según tarea, irreal 1.

Por lo tanto, si al principio las bandas de frotadores duran menos kilómetros, se necesitará recuperar el ritmo de trabajo en los talleres de mantenimiento que se tenían con los frotadores de Cu-ETP. No obstante, la carga de trabajo sobre el pantógrafo irá disminuyendo a medida que el desgaste se modere.

MATERIAL	PRECIO FROTADOR /€	DISTANCIA OPTIMA /km	PRECIO/DISTANCIA /€·km ⁻¹
Cu ETP	32,27	16000	2,01688E-03
Cu-Cr-Zr	88,67	44000	2,01523E-03
SK1673	180	17000	1,05882E-02
SK1748	185	18000	1,02778E-02
SK1755	175	38000	4,60526E-03
SK1754	190	42000	4,52381E-03
SK1261	179	93000	1,92473E-03
SK1760	195	97000	2,01031E-03

Tabla 111: Precio del frotador según distancia, irreal 1.

En los últimos modelos, el coste del frotador por kilometro se equipará a los actuales.

6.1.2.2. Situación con actuaciones previas

En este caso, el hilo de contacto presenta una rugosidad de clase N8, estado hipotético, con un tratamiento para suavizar la superficie y disminuir el número de perlas y granos.

Esto implica que el frotador de grafito sufrirá un desgaste acelerado, aunque menor que en el caso anterior. No obstante, los tiempos de desgaste se alargaran igual que ocurría en el caso anterior, realizando más kilómetros por unidad.

Para la realización de las graficas de este punto (6.1.2.2) se ha utilizado la tabla 112. Representa la sustitución de las pletinas de todo el parque del operador de la red en Cataluña, una vez cada unidad de pantógrafos.

EVOLUCIÓN DEL GASTO				
Tipo de pletina	Coste material /€	Coste operario /€	Coste total /€	Recorrido /km
Cu ETP	16.580	54.159,36	70.739,36	16.000
Cu-Cr-Zr	45.457	54.159,36	99.616,16	55.000
FASE 1 (1 ronda)	92.597,76	54.159,36	146.757,12	60.000
FASE 2	90.797,76	54.159,36	144.957,12	100.000
FASE 3	92.921,76	54.159,36	147.081,12	200.000

Tabla 112: Evolución del gasto según material, irreal 2.

Hay que tener en cuenta que los datos de desgaste en los frotadores que corresponden en las tres fases no son reales, ya que no se tienen referencias. Aunque se espera que la línea de desgaste tenga una evolución cuadrática al principio y luego lineal para alcanzar los 400.000 km aproximadamente.

Hay que tener en cuenta que las locomotoras entran cada 15 días para realizar la revisión periódica, ya que el manual exige un mantenimiento preventivo. Pero lo que sí se puede variar son los tiempos necesarios por cada revisión, ya que si un cambio de pantógrafo necesita una hora y dos operarios, una revisión se podría realizar en menos tiempo y con menos personal. Esto significa una reducción del coste de mantenimiento.

La grafica 26 muestra la relación del gasto del personal según las tareas. "Operario" hace referencia al gasto que dedican los mecánicos en sustituir los frotadores de los pantógrafos. En cambio, "otros" hace referencia al tiempo que destina el operario a tareas de revisión del pantógrafo (analizar el nivel de desgaste y engrasar) y limpieza de la locomotora.

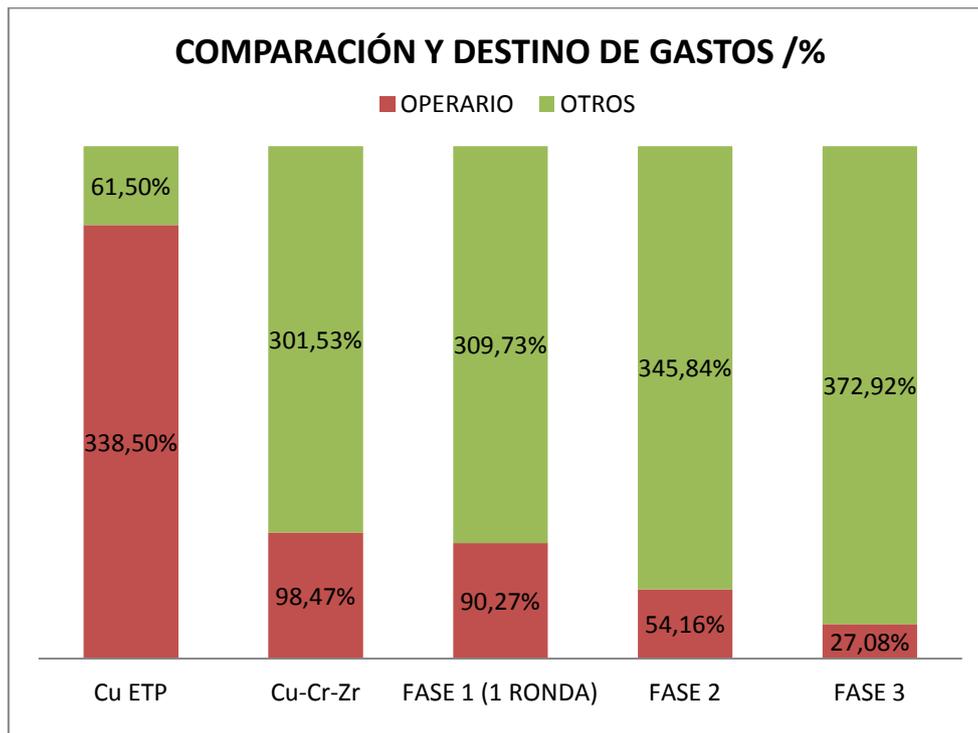


Gráfico 26: Gasto del personal según tarea, irreal 2.

Por lo tanto, si las bandas de frotadores duran más kilómetros, además de necesitar menos mantenimiento debido a no necesitar ser engrasado, sería podría realizar algunas de las siguientes propuestas con el objetivo de reducir los gastos de personal.

- Alargar los días de servicio antes de realizar la visita al taller por tareas preventivas.
- Reducir el número de visitas de la locomotora al taller.
- Reducir los tiempos de cada locomotora en taller.

En la segunda fase, el coste del frotador por kilometro se reduce frente a los actuales.

MATERIAL	PRECIO FROTADOR /€	DISTANCIA OPTIMA /km	PRECIO/DISTANCIA /€·km ⁻¹
Cu ETP	32,27	16000	2,01688E-03
Cu-Cr-Zr	88,67	44000	2,01523E-03
SK1673	180	59000	3,05085E-03
SK1748	185	61000	3,03279E-03
SK1755	175	95000	1,84211E-03
SK1754	190	105000	1,80952E-03
SK1261	179	200000	8,95000E-04
SK1760	195	200000	9,75000E-04

Tabla 113: Precio del frotador según distancia, irreal 2.

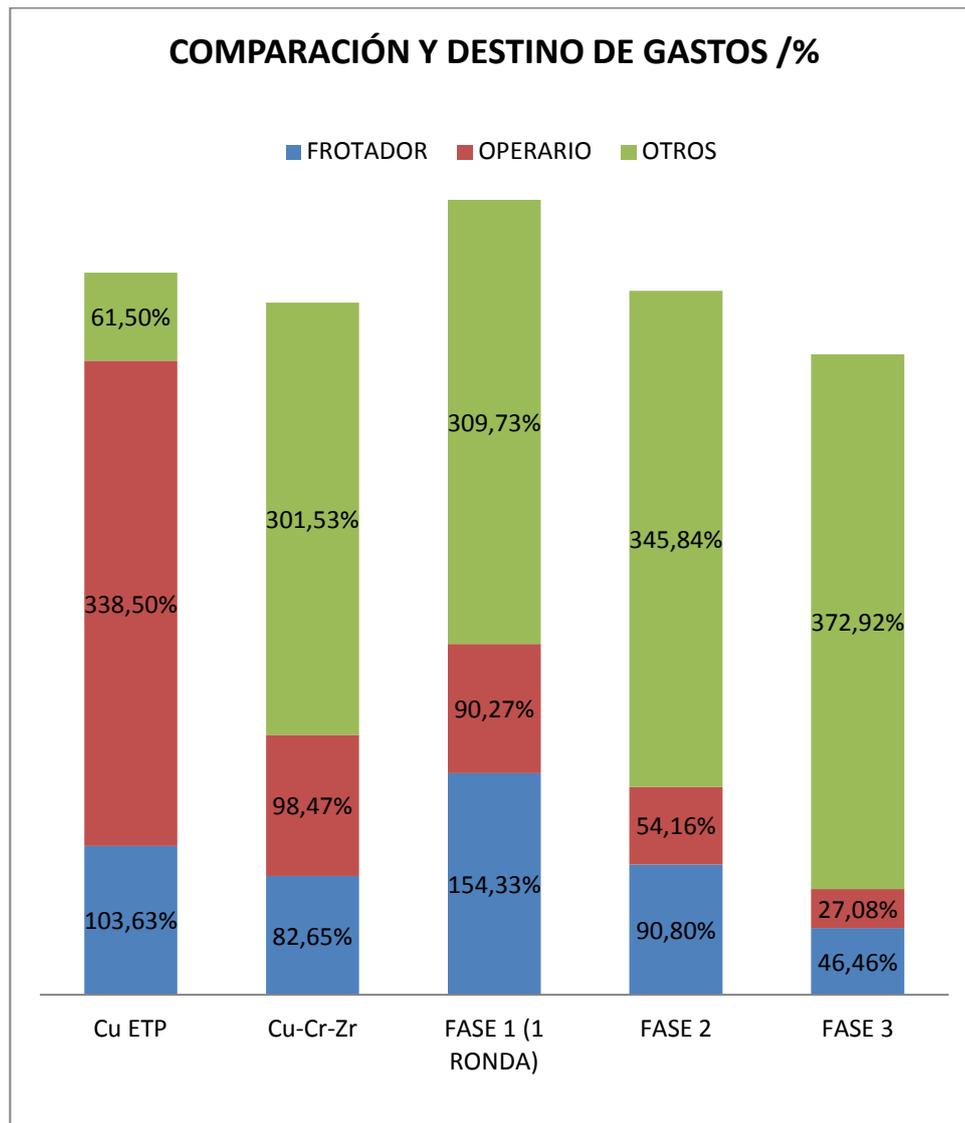


Gráfico 27: Porcentaje de gasto según material, irreal 2.

Si se relacionan los costes económicos del material (frotadores), mantenimiento general y coste del mantenimiento en tareas del cambio de pletinas se obtiene la grafica 27.

Aunque la gráfica 27 (no sea correcto realizar una combinación de este tipo) se observa como el gasto en materiales ha ido descendiendo (las dos primeras sobre datos reales, las tres fases sobre datos teóricos idóneos), igual que el gasto en “operario” realizando cambios de frotadores.

Los “otros” gastos representa la parte económico que se destina al operario realizando otras funciones, estipuladas en el plan de mantenimiento del operador de la red ferroviaria.

A la larga, los costes se reducirán, solo varia la velocidad de esta transición. Importante para saber la cantidad económica que se gastará en los primeros meses o incluso años.

6.1.2.3. Costes fijos

Respecto el gasto que supondrá el ensayo de Septiembre con los frotadores de grafito, presentados en la tabla 114, hay que matizar que se han obviado los gastos fijos que supone cada revisión según marca el manual de mantenimiento del operador de la red para cada locomotora. Por lo que se ha centrado en el gasto de material desechable y los costes de operario para cambiar pletinas.

COSTE ENSAYO JULIO			
Tipo de pletina	Coste material /€	Coste operario /€	Coste total /€
FASE 1 (2 RONDAS)	185.195,52	108.318,72	293.514,24
FASE 2 (1 RONDA)	90.797,76	54.159,36	144.957,12
FASE 3 (1 RONDA)	92.921,76	54.159,36	147.081,12
TOTAL	368.915,04 €	216.637,44 €	585.552,48 €

Tabla 114: Costes ensayo Septiembre.

El coste de esta propuesta siempre costara lo mismo, ya que se realizaran dos rondas en la fase 1 y una ronda las fases 2 y 3. No obstante, el tiempo de la propuesta interesa que sea lo más larga posible, es decir, que duré el máximo de tiempo. Esto significa que las pletinas estarán realizando muchos más kilómetros, significa que estarán cumpliendo los objetivos.

Independientemente de que se las pletinas sean más baratas por kilometro recorrido, lo cual significaría que el desgaste en los frotadores estaría solucionado, habría que analizar el desgaste del hilo de contacto de la catenaria para confirmar el éxito de la propuesta.

Según la velocidad del desgaste en el hilo, habría que calcular los costes económicos del cambio del material, más el precio del material en ese momento.

Si los costes de las nuevas pletinas y los costes de sustitución del hilo de contacto no superan los actuales, la propuesta habrá sido un éxito en su conjunto.

Añadir que según el fabricante de las pletinas de grafito, es posible que se sigan produciendo flashes, por lo que el material seguirá fundiendo, pero como el grafito sublima, la catenaria sufriría una deformación menor, por lo que la superficie de la misma no quedará tan rugosa como sucede con las pletinas de Cu-Cr-Zr.

6.2. COSTE CAMBIO HILO DE CONTACTO

Como se ha explicado en apartados anteriores tanto los frotadores del pantógrafo como el hilo de contacto de la catenaria sufren un desgaste excesivo. De igual manera la Empresa Operadora y Empresa de Infraestructura han intentado solucionar el problema con un cambio de materiales.

En este apartado se evaluará de forma aproximada el coste que supone el cambio de un kilómetro de hilo de contacto, en catenaria flexible de un solo hilo.

Se ha estimado que un kilometro de hilo de contacto se tarda en sustituir 3,5 jornadas de trabajo en horario nocturno. El equipo que se encarga normalmente de este trabajo está compuesto por un vehículo de mantenimiento, como puede ser una vagoneta de electrificación. Dos operarios de la Empresa de Infraestructura, que serian el maquinista del vehículo y el Encargado de los trabajo. Y un grupo de 4 obreros que suele pertenecer a una empresa subcontratada.

La Empresa de Infraestructura utiliza diferentes tipos de hilos de contacto. Los materiales pueden ser Cobre electrolítico o aleación de Cobre-plata0,1. Y las secciones normalizadas para este tipo de catenaria son de 107 mm² o 120 mm². Como actualmente se está instalando Cobre-plata0,1 de 107 mm², el estudio se ha realizado para estas características.

En el presupuesto se incluyen las péndolas puesto que también pueden ser cambiadas. Pero en ocasiones se pueden reutilizar las ya instaladas, con lo que se reduciría la cantidad total de este concepto.

El coste de cambio de hilo de contacto se expresa de forma desglosada en la tabla 115.

COSTE CAMBIO HILO DE CONTACTO /Km			
Concepto			Coste total /€
Péndolas	€/unidad	Cantidad / unidad/km	
<i>Cobre6 (material)</i>	14,02	285,00	3.995,70
<i>Cobre6 (mano obra)</i>	14,70	285,00	4.189,50
Subtotal 1.1			8.185,20
Hilo de contacto	€/m	Cantidad /km	
<i>Cobre-plata 0,1 (107)</i>	9,06	1.000	9.060,00
<i>Cobre-plata 0,1 (120)</i>	10,19	-	-
Subtotal 1.2			9.060,00
Personal	€/jornada	Cantidad /jornada	
<i>Vehículo electrificación y 4 obreros</i>	2.700,00	3,5	9.450,00
<i>Maquinista</i>	160,00	3,5	560,00
<i>Encargado Trabajos</i>	160,00	3,5	560,00
Subtotal 1.3			10.570,00
Subtotal 1			27.815,20
Amortización	10%		2.781,52
Subtotal 2			30.596,72
	21% IVA		6.425,31
TOTAL			37.022,03 €

Tabla 115: Coste del cambio del Hilo de Contacto según material y mano de obra.

En este caso se deduce que el importe total para cambiar un kilómetro de hilo de contacto ascendería a 37.022,03 €. Como el objeto de este proyecto es la Linera R2 Sud que tiene una longitud de 60 km, costaría 22.213.221,80 € su sustitución, en un solo sentido. Y se tardaría unas 210 jornadas para ejecutar el trabajo.

6.3. COSTE DE AVERÍA TÉCNICA EN CATENARIA

Debido a la problemática presentada en la catenaria y los pantógrafos, si no se vigilan y se corrigen a su debido momento esta problemática puede derivar en problemas mayores. Básicamente se resume en dos, retrasos o cortes del servicio en la línea.

El objetivo de este apartado es calcular cual sería el impacto económico del corte de la línea en algunos de sus tramos, escogidos al azar.

Ya que según fuentes de EUROPAC, en el año 2004 SNCF, DB y TRENITALIA sufrió 915 enganchones. Esto supuso 443.000 minutos de retrasos, con un coste medio por retraso de 1.000 €/minuto, se gasto 443 M€ solo en sufragar los retrasos.

Estos tramos son “*Barcelona Santas a Paseo Gracia*” y “*Sitges a Vilanova i la Geltrú*”. Los cuales se exponen las alternativas de transporte a esos destinos. Respecto el resto de los tramos quedarían separados, por lo que dependerá del número de trenes atrapados en cada lado en ese momento la frecuencia de paso. El servicio de media y larga distancia desplazaría sus estaciones de origen y llegada a las más cercanas a la original.

No obstante, no se ha podido realizar este apartado a causa de la falta de información sobre la cantidad de viajeros y los tiempos de reacción ante un problema de tal envergadura, tanto solucionando el problema, como actuando frente al mismo.

6.3.1. Zona: *Barcelona Sants – Paseo Gracia*

Según el horario y el día en que suceda el imprevisto, el número de usuarios afectados variara. Por este motivo y el número de alternativas disponibles en la zona, es posible que sean suficientes para absorber la demanda del servicio. O en tal caso, aumentando la oferta del servicio de los mismos sin necesidad de implementar una alternativa nueva.

No obstante, este tramo está compuesto por catenaria rígida. Esto significa que es más difícil que se produzca una incidencia en el servicio, ya que la catenaria rígida (debido a su diseño) admite más incidencias en el hilo de contacto, ya que el hilo de contacto está sujeto por una viga que actúa como pinza, además de garantizar la corriente eléctrica en todo el hilo.



6.3.2. Zona: Sitges – Vilanova i la Geltrú

El siguiente tramo está compuesto por catenaria flexible, a lo contrario del caso anterior, esta es más vulnerable a averías en la línea.

Además, las alternativas de transporte en comparación el otro tramo son menores. Siendo únicamente autobús, taxi y vehículo privado. Por este motivo, es necesario reforzar la oferta de servicio público, siendo el más viable el incremento de la oferta de autobuses.

La cantidad y la duración de esta oferta de servicio especial dependerán en mayor medida de la hora en que se produzca la incidencia y la duración de la misma, igual que antes.

7. HIPÓTESIS

Después de analizar, estudiar, recolectar, escudriñar, averiguar, pedir, indagar y verificar se procede a dar una serie de hipótesis sobre la causa u origen del problema de desgaste descontrolado en la línea R2 Sud de *Rodalies* de Cataluña.

En otras palabras, este apartado se centrará en exponer las conclusiones sobre la posible causa del problema, una vez ha sido analizada toda la información facilitada, haber escuchado todo los puntos de vista en las diversas reuniones realizadas y haber realizado los diferentes estudios.

La hipótesis sobre la posible causa del problema se desarrollará desde el punto de vista de cada miembro del grupo, según los conocimientos adquiridos durante la carrera, la percepción y el conocimiento del problema.

Con objetivo de identificar los puntos comunes y los diferenciadores de cada una de las hipótesis y sacar una serie de conclusiones generales a partir de conocer la opinión de cada miembro del grupo multidisciplinar.

7.1. REALIZADA POR EDGAR GABRIEL DEL CARPIO

La situación de excesivo desgaste actual, no se debe a un hecho o una acción llevado a cabo puntualmente, si no, a la suma de diversas acciones que se han ido desarrollando a lo largo de estos últimos años.

En este apartado se enumerará una serie de las posibles acciones llevadas a cabo a lo largo de los últimos, que se creen que han sido el desencadenante del empeoramiento en la acción de la interacción pantógrafo - catenaria, ocasionando entre otras cosas el problema estudiado en este proyecto.

PRIMERA CAUSA.

En el año 2007 - 2008, el gestor de la red al detectar diversas partículas de cobre en diversos andenes y zonas de balastro, decide cambiar la composición del hilo de contacto a la aleación de CuAg, con una mayor dureza respecto a la anterior composición de cobre electrolítico, prolongando así su vida útil.

MATERIAL	DUREZA TEÓRICA /HB	DUREZA EXPERIMENTAL /HB
Cobre electrolítico	X<60	99,15
CuAg	60	105

Tabla 116: Durezas del hilo de contacto.

Este cambio según el gestor de la red no provoca un cambio importante, pero una vez realizado los diferentes ensayos de dureza a las probetas desgastadas facilitadas en una de la reuniones con dicha empresa, observamos por un lado que la dureza teórica y experimental en ambos materiales dista bastante y por otro que el cambio hacia la aleación de CuAg, comporto un cambio leve de dureza en el hilo de contacto ocasionando un desgaste más pronunciado en los frotadores que en ese momento eran de cobre electrolítico.

SEGUNDA CAUSA.

La segunda causa fue la instalación de catenaria rígida en el tramo de entrada a Barcelona, comportando una serie de factores negativos en la interacción pantógrafo - catenaria.

- I. Posibilidad de trabajo fuera de los rangos de altura marcados, para el correcto funcionamiento del pantógrafo.

*Este factor no ha podido estudiarse debido a la falta de información de los rangos de altura de catenaria rígida del tramo de entrada a Barcelona, ya que según el gestor de la red no dispone de los datos ya que el tren auscultador no circula por este tramo.

- II. Mayor rigidez por lo tanto mayor fuerza de contacto entre el frotador y el hilo de contacto.
- III. Posibilidad de dejar un mayor margen de desgaste debido a una mayor superficie conductora y posibilidad de trabajo con presencia de imperfecciones, como posibles micro roturas internas, al no estar sometido a fuerzas de tracción a diferencia de la catenaria flexible.
- IV. Descentramiento menor frente al existente en catenaria flexible.

El gestor de la red asegura que progresivamente el descentramiento en las zonas de catenaria rígida ha sido aumentado hasta alcanzar valores cercanos a los presentes en catenaria flexible ± 30 cm. Pero no ha tenido en cuenta es que hasta que este cambio de configuración se ha plasmado (2012), ha perjudicado en gran medida al desgaste presente en los frotadores.

TERCERA CAUSA.

Debido al excesivo desgaste que sufren las pletinas de cobre electrolítico a causa de los diferentes cambios de configuración de la línea, en el octubre de 2011 se decide cambiar las pletinas de cobre electrolítico por las pletinas de cobre, cromo y circonio, causando una situación insostenible por parte del gestor de la red, debido a la diferencia de durezas entre los dos elementos.

MATERIAL	DUREZA TEÓRICA /HB	DUREZA EXPERIMENTAL /HB
Cu ETP	110	-
Cu-Cr-Zr	125 - 155	134

Tabla 117: Durezas del frotador.

Al encontrar una gran diferencia entre los valores teóricos y experimentales en las probetas del hilo de contacto, se decide realizar el mismo ensayo a las pletinas para comprobar el valor real de trabajo.

Como se puede observar la diferencia de valores no es tan grande como los presentes en el hilo de contacto, pero la diferencia de dureza entre una aleación a otra si lo es, este cambio comporta por un lado un incremento de la vida útil de los frotadores pero disminuye considerablemente la vida del hilo de contacto.

CUARTA CAUSA.

Como ya se ha mencionado anteriormente, la fuerza de contacto entre el frotador y el hilo de contacto en catenaria rígida es más elevada debido a la menor amortiguación y altura en este tipo de configuración, hecho que ocasiona un mayor desgaste mecánico.

Ante la instalación de este tipo de catenaria por parte del gestor de la red, el operador de la red decidió cambiar el taraje de los pantógrafos de 10 N, cabe recordar que el taraje inicial era de 10 N pero ante el cambio de aleación de las pletinas se decidió tarar los pantógrafos a 9,5 N.

Los pantógrafos de TMB y FGC, son tarados a una menor fuerza, debido a que especialmente en TMB los recorridos del diverso material rodante se hace por catenaria rígida, esto nos indica que los pantógrafos del operador de la red debería encontrar una configuración que permita una buena adaptabilidad hacia el tipo de catenaria rígida, que permita conseguir una fuerza de contacto y desgaste constante, eliminando así uno de los factores más negativos de la configuración de catenaria rígida.

QUINTA CAUSA.

Un factor que no se ha de pasar por alto, es la deficiente situación económica de estos últimos años, que ha podido haber causado la realización de serie de acciones para intentar minimizar el impacto económico que este problema implicaba.

- I. Mayor margen de desgaste, por debajo del recomendado para ocasionar un menor consumo de material.
- II. Calidad del cobre electrolítico debido al cambio de materia prima utilizada para su obtención por parte de la empresa suministradora del hilo de contacto. Ver antecedentes.
- III. Menor frecuencia en las labores de mantenimiento de las instalaciones.

7.1.1. Conclusiones de la hipótesis de Gabriel

Como se puede observar, la principal causa del problema viene dado en primer lugar, por la falta de comunicación entre las dos empresas, al ser responsables de cada elemento presente en la interacción, es importante que ambas partes estén en perfectas condiciones y tener siempre una constante comunicación para poder solventar los posibles problemas de la manera más beneficiosa para ambas partes.

Esta situación en la realidad ha sido totalmente diferente, cada empresa al encontrarse con el problema, el excesivo desgaste del elemento del que es responsable, ha actuado sin tener en cuenta la otra parte implicada causando cada vez que trataba de solucionar el problema, directamente perjudicaba a la otra parte implicada en la interacción.

Y en segundo lugar por las diferentes acciones llevadas a cabo anteriormente explicadas, que han ido deteriorando tanto el hilo de contacto como el frotador.

Cabe destacar que actualmente el elemento que sufre en mayor medida este desgaste es el hilo de contacto debido a la diferencia de durezas entre los dos elementos, en contra de lo que marcaría el sentido común.

Los frotadores al ser un elemento de mayor facilidad de recambio, mantenimiento y menor inversión económica, debería ser el elemento que presente un mayor desgaste.

Partiendo de esta base, el futuro cambio de los frotadores actuales a los de grafito cumple esta regla a la vez que se ve prolongada su vida útil, debido a que es un material más blando y con propiedades auto lubricantes, que proporciona un contacto menos agresivo entre ambos elementos, ayudando a una buena conservación del hilo de contacto.

En contra, el actual estado del hilo de contacto debido a la diferencia de dureza con el frotador de la aleación de CuCrZr, no permitiría cumplir los rangos de vida útil marcados del frotador, haciendo inviable su aplicación debido a su alto coste por unidad comparado con los anteriores materiales utilizados.

Para concluir, el cambio de configuración de los frotadores será un solución válida, siempre y cuando el estado del hilo de contacto permita conseguir los rangos de vida útil marcados, por lo tanto para cumplir este objetivo, se tendrán que tomar una serie de acciones sobre el hilo de contacto o frotador, las acciones recomendadas o nuevos planes de mantenimiento, se mostrará más adelante con el fin de hacer posible el cumplimiento de este objetivo.

7.2. REALIZADA POR ANDRÉS FUERTES

La investigación de estos últimos meses ha reducido la búsqueda al origen del problema a dos posibles situaciones. Origen por desgaste eléctrico y/o origen por desgaste mecánico. No obstante, todavía es difícil apuntar a un solo culpable. Probablemente sea la combinación de diferentes causas.

Para determinar quien tiene un grado teórico de culpabilidad mayor o principal causante, se describen una serie de causas y un breve resumen de las configuraciones utilizadas en otros servicios.

La línea R2 Sud de *Rodalies* de Barcelona, no sufría este problema los años previos a 2008-2009. No obstante, en el año 2008 se produjeron dos cambios importantes.

PRIMERA CAUSA.

Por parte de la empresa operadora de la red, introdujo al servicio comercial las locomotoras CIVIA fabricadas por ALSTOM. Este hecho implicó la incorporación del nuevo modelo de pantógrafo, SCHUNK WBL-8512-L.

La utilización de diferentes modelos de pantógrafos no debería ser a priori el origen del problema, ya que realizan la misma función y su construcción está basada en la misma teoría. Aunque ambos tienen matices que los diferencian. Quizás estos matices puedan derivar en la utilización de fuerzas estáticas de distintos valores para minimizar despegues o golpes entre ambos modelos de pantógrafos.

El pantógrafo SCHUNK dispone de elementos aerodinámicos que le ayudan a mejorar horizontalidad para intentar mantener un desgaste parecido o igual en las dos bandas de frotadores. Además, la suspensión descubierta, influenciada por el viento. Y las bandas de frotadores se desplazan independientemente. Pero cabe la posibilidad de que tenga un trabajo aerodinámico erróneo.

Sin embargo la mesilla del FAIVELEY no dispone de ningún dispositivo para mantener la horizontal y la mesilla está unida en una sola paleta. Otorgando con menos grados de libertad las bandas de frotadores.

Por este motivo, un pantógrafo puede generar un desgaste mecánico o eléctrico mayor que el otro, tal y como se observa en la inspección visual, apartado 5.9.

SEGUNDA CAUSA.

En el otro lado, la empresa encargada del mantenimiento de la infraestructura instaló la catenaria rígida en los túneles de Barcelona. Según los expertos, con su peor configuración, ya que solo ofrecía un descentramiento de ± 15 cm, aleación CuAg0,1 y sección de 150 mm^2 en el hilo de contacto. Los motivos principales de esta elección, solicita menos tiempo de mantenimiento para realizar el cambio del H.C. y permite utilizar un galibo del túnel menor que con catenaria flexible.

Consta desde las cercanías de Madrid el mal funcionamiento de la catenaria rígida, dado que ellos sufrieron el mismo problema a raíz de la instalación de este elemento en unos pocos kilómetros. Madrid solucionó el problema, sustituyendo las sujeciones de la viga de aluminio de cada 12 m a 6 m. Debido que la viga tenía más flecha de lo que se pensaba en un principio, generando un desgaste mecánico mayor.

Además, el diseño de la catenaria rígida absorbe menos movimiento vertical que la catenaria flexible. Por resultado, todo el movimiento que no absorbe la catenaria, la absorbe el pantógrafo, traduciéndose en un mayor desgaste en ambos.

En cambio, a su favor tiene la experiencia de las cercanías de Sevilla, ofreciendo unos 200.000 km de vida útil en pletinas. La singularidad del lugar fue que entro en funcionamiento en una línea nueva, con pletinas de grafito y catenaria nueva, tanto de flexible como de rígida.

TERCERA CAUSA.

La tendencia de usuarios que utilizan la R2 Sud de *Rodalies* para desplazarse en las dos últimas décadas ha ido en aumento. Aunque se desconoce los datos de algunos años y el periodo de 2007 al 2011 coincide con una crisis económica.



Gráfico 28: Evolución histórica de viajeros.

Esta demanda exige más plazas, esto implica un aumento del número de trenes en servicio. Por lo tanto, el número de locomotoras en circulación es mayor, lo que implica más tráfico, más frecuencia de paso de trenes, una exigencia mayor a la catenaria.

En otras palabras, más trenes reducen los tiempos para refrigerar el hilo de contacto, dando lugar a más temperatura en el H.C. Por supuesto, el material trabaja más veces por día, lo que implica que la carga de trabajo que tiene ahora no es la misma hace 10 años. Por este motivo, no se puede comparar de manera directa el tiempo que duraba antes los H.C. y lo que duran actualmente.

Más usuarios, incrementa el tiempo de parada por estación. En este caso suelen ser las líneas pares (entrada a Barcelona) porque es el destino con más viajeros mueve en horas punta. Por este motivo, los trenes en las líneas pares aceleran y frenan más veces que en las vías impares. (Esta información no está contrastada).

En resumen, el desgaste eléctrico es mayor hoy día, ya que hay más trenes pidiendo y devolviendo corriente. En consecuencia, más trenes en circulación implican más temperatura en el H.C. por el efecto Joule.

CUARTA CAUSA.

Alteración en el recorrido de la línea R2 de *Rodalies* de Barcelona, con la ampliación del túnel de entrada a la estación de Sants-Barcelona y la estación del Prat de Llobregat.

La modificación de los túneles deriva en un cambio del comportamiento aerodinámico del mismo. Por este motivo se cree conveniente, tal y como se comenta en el apartado 4.1 analizar las posiciones y las aéreas de trabajo de cada elemento o pozo de ventilación. Para evitar vencer la mayor masa de aire posible.

QUINTA CAUSA.

La empresa gestora de la infraestructura en el año 2007 paso a utilizar aleación CuAg0,1 para el hilo de contacto, un material más duro. El año 2008 utilizo una sección mayor (150 mm^2) en el hilo de contacto de la catenaria rígida, desde el momento de su instalación de la misma. Posteriormente, paso a utilizar 120 mm^2 de sección en catenaria flexible, en lugar de 107 mm^2 que habían utilizado hasta el año 2009.

Por falta de liquidez en la empresa y mostrar unos desgastes similares, se decide volver a utilizar sección de 107 mm^2 de sección en el hilo de contacto.

SEXTA CAUSA.

El operador de red ferroviaria, realizo varios cambios, tanto de material en los frotadores como la fuerza estática que ejercen estos. Sustituyo el Cu-ETP al Cu-Cr-Zr, lo que supuso un incremento de la dureza, con el objetivo de paliar lo que habían hecho desde la otra empresa.

Las nuevas durezas, tanto de una como de otra empresa, han generado un nuevo estado de confusión sobre la vida útil de los elementos.

Resultado de esta acción, incrementar el desgaste mecánico a medida que van aumentando las durezas. Ya que las dos parten de Cu-ETP (durezas muy similares), al utilizar otras aleaciones, los valores cambian.

SÉPTIMA CAUSA.

Algunos de los expertos, apuntaban hacia el trazado de la línea. Ya sea el número de rampas, peraltes o curvas. No obstante, esta línea siempre ha funcionado con el mismo trazado, a excepción de la estación del Prat de Llobregat, la cual se remodelo. Por tal motivo, no es lógico en pensar en esta causa como origen al problema.

OCTAVA CAUSA.

Tal y como comenta los antecedentes (apartado 3.3), el suministrador de hilo de contacto para catenaria cambio de dueños, y con ello la forma de proceder. Ya que pasaron de utilizar cobre extraído de la mina, ha utilizar cobre reciclado. A priori, esto no debería ser ningún inconveniente, pero si los procedimientos para reciclar el cobre no se cumplen, la pureza del cobre puede quedar mermada.

Esto implica que puede quedar trazas de hidrogeno dentro de la micro-estructura, tal cosa significa que con la temperatura en servicio, el material pueda derivar en grietas, pieles u otros problemas de producción.

No obstante, el ensayo de metalografía ha demostrado no contener trazas de material externo a la aleación, por lo que se están cumpliendo los cánones marcados para este tipo de productos según el comprador, en este caso la empresa de la infraestructura.

CONFIGURACIONES DE OTRAS EMPRESAS.

La existencia del desgaste es un hecho contrastado. Ya que constan líneas férreas trabajando en la misma y otras en diferentes configuraciones, las cuales no padecen los mismos niveles de desgaste.

EMPRESA	TIPO DE CATENARIA	NÚM. PAN. EN SERVICIO	ELECTRIFICACIÓN	FUERZA ESTÁTICA PAN. /N	MATERIAL FROTADOR
FCG	Flexible	2	Intensidad / 2	70-80	Grafito
TMB	Rígida	4	Intensidad / 4	60-70	Grafito
RENFE	Rígida + Flexible	1	3.000 Vcc	90-100	Cu-Cr-Zr

Tabla 118: Configuraciones básicas de distintas líneas férreas.

Observaciones respecto la tabla x.

- **FGC:** reparte la carga eléctrica entre dos pantógrafos y circula a velocidades menores. El H.C. de la catenaria les dura unos 30 años.
- **TMB (metro):** circula con cuatro pantógrafos tarados a menor fuerza. Además reparte la carga eléctrica entre los cuatro. La vida útil de las pletinas les dura unos 700.000 km.
- **RENFE:** actualmente, en la línea R2 de Barcelona, cambian pletinas cada 58.000 km y H.C. de la catenaria cada 1,2 años, aproximadamente.

7.2.1. Conclusiones de la hipótesis de Andrés

Los cambios realizados por una de las dos empresas sobre alguno de los elementos, con el objetivo de conseguir mejores resultados para su empresa, ha provocado que la otra parte tuviera que realizar cambios debido que se estaba encontrando con problemas que antes no tenían.

Al intentar solventar estos problemas, no han sido conscientes de que trasladaban el problema que intentaban solventar a la otra parte. Este hecho creó que entrasen en un bucle de acciones, donde cada vez que actuaban se enrolaban en el nuevo problema, con dimensiones mayores. Derivando el problema inicial de desgaste a otros mayores, como es el caso de rotura de hilo o crispación en la comunicación entre ambas empresas.

Los primeros años, aparecían virutas según informan ambas partes. Este hecho puede ser causa de un desgaste eléctrico. La generación de arcos eléctricos, llamados flashes causa defectos en ambos materiales. Ya que funde el material, creando huecos en la pletina.

Por otra parte, un desgaste mecánico. Los restos de cobre encontrados reflejaban que alguno de los elementos actuaba como una garlopa (cepillo de ebanistería), ya que aparecieron hilos de cobre, debido que alguno de los elementos actuaba como mecanizado del otro.

El aumento de la rugosidad en la superficie de contactos de ambos elementos, consecuencia de la fricción que se produce, generando chispas. Estas chispas derivan también en virutas encima de las locomotoras, alrededores de los raíles y adheridas tanto en las superficies de la pletina como del hilo de contacto. Así, la rugosidad aumentada todavía más.

Tener una catenaria en mal estado, a pesar de que las pletinas sean del material adecuado, se ven afectadas. Debido que una superficie rugosa actúa de muela (lija).

Además, contener defectos en la superficie puede generar despegues del pantógrafo, generando arcos eléctricos, volviendo a empezar el problema. Siendo un problema atrapado en un ciclo, el cual se autoalimenta, ya que cuando se produce un despegue, le sigue un golpe, generando desgaste eléctrico y mecánico posteriormente.

Por lo tanto, es muy importante tratar la superficie del hilo de contacto, ya sea sustituyendo todo o realizando alguna actuación sobre el mismo. Por otro lado, se podría proteger las pletinas para evitar ser afectadas por la rugosidad del contacto.

En resumen, los arcos eléctricos generan cráter en los materiales, las perturbaciones y la poca flexibilidad de la misma genera despegues. Esto implica más arcos eléctricos, fusiona los materiales, por lo tanto se va perlado la catenaria. Por lo tanto es un fenómeno que se realimenta el mismo. El hilo de contacto de la catenaria no es lisa, generando más despegues que crearían pequeñas perlas de fusión. Al final, el hilo de contacto de la catenaria se comportaría como una lija y se iría comiendo el frotador, sea del material que sea.

7.3. REALIZADA POR LEHEL KIRALY

Al iniciar el proyecto se planteó y se pensó como primera idea que la causa del desgaste entre el hilo de contacto y el frotador del pantógrafo de la línea R2 Sud de *Rodalies* de Barcelona era la falta de alianza y cohesión entre dos materiales en contacto.

A medida que se estudió con más profundidad el problema, a partir de asistir a reuniones con expertos, ampliar la búsqueda de información y a raíz de la experiencia adquirida sobre el tema, se contempló que existían muchos factores que intervenían en el desgaste de la línea. Estos factores pueden ser las siguientes.

PRIMERA CAUSA.

Instalación de la catenaria rígida en los túneles y en el tramo de entrada de Barcelona.

Con la catenaria flexible hay más acomodación y tolerancia. En cambio la catenaria rígida suele ser más sólida y resistente lo cual provoca una mayor fuerza de contacto entre el hilo de contacto y frotador de pantógrafo, causando así un mayor desgaste.

En catenaria rígida hay menos descentramiento que en catenaria flexible y esto provocaría un mayor calentamiento y desgaste en el centro del frotador.

Normalmente la catenaria rígida está situada a una altura más baja en comparación con la catenaria flexible. Podría darse el hecho que la altura de la catenaria en los túneles está más baja de lo permitido. Sí es así, el pantógrafo estaría trabajando fuera de los rangos de altura y, por lo tanto, haría más presión sobre la catenaria, lo cual provocaría un desgaste excesivo.

SEGUNDA CAUSA.

Competencia entre las empresas.

Hay una disputa entre las empresas de administración de infraestructura ferroviaria y la empresa de operación de redes. La catenaria pertenece a la empresa de infraestructura y en cambio, la empresa operadora dirige el mantenimiento y arreglo del pantógrafo. La falta de comunicación entre estas dos empresas hace que no haya una buena gestión y mantenimiento de la línea.

Las dos empresas han hecho cambios sin consultar y conversar el uno con el otro. La empresa operadora de redes sustituyó los frotadores del Cu-ETP por Cu-Cr-Zr los cuales son más duros y a la vez aguantan más temperatura. La empresa de infraestructura ferroviaria aumentó la sección del hilo de contacto y cambió el material de Cu-ETP a Cu-Ag.

Los cambios de este tipo son muy arriesgados ya que pueden añadir un desgaste excesivo tanto al frotador como al hilo de contacto sobre todo, si no hay un acuerdo sobre estos cambios.

TERCERA CAUSA.

Posibles impurezas en el proceso de fabricación del hilo de contacto y frotador del pantógrafo.

Sabiendo que a la fabricación del hilo de contacto y frotador de pantógrafo no se realiza de materiales primas sino de chatarra se obtiene que este cobre puede tener aproximadamente un 1% de impurezas, como ahora Pb, Bi, Sb, As, Ni, Fe. Pero es muy seguro que el cobre de chatarra contenga oxígeno (O). De las impurezas citadas anteriormente se puede limpiar el cobre con electrolización pero quitar el oxígeno del cobre es un proceso muy difícil. El proceso de sacar el oxígeno del cobre es complicado ya que se forma oxido de cobre Cu_2O . El cobre (Cu) y Cu_2O se disuelven en estado líquido, en estado sólido no se disuelven de ninguna forma y a 3,45% de Cu_2O se forma un punto eutéctico. El fenómeno de oxido de cobre es la enfermedad más grande que tiene el Cu sobre todo si también hay hidrogeno (H) en el cobre: $Cu_2O+H_2 = 2Cu+H_2O$. Según la ecuación se forma agua y esta agua a temperaturas elevadas se transforma en vapor de agua. El vapor de agua puede causar grandes daños en la micro-estructura del material como por ejemplo grietas.

CUARTA CAUSA.

Existencia de dos tipos de pantógrafos.

Los problemas en la línea salieron justo cuando por la línea empezaron a circular trenes del tipo CIVIA que llevan pantógrafos SCHUNK. Entre los dos pantógrafos SCHUNK y FAIVELEY hay diferencias notables que pueden implicar al desgaste.

Las diferencias de diseño consiguen que un tipo de pantógrafo tenga un desgaste mecánico mayor que el otro.

El mecanismo del pantógrafo FAIVELEY es mecánico el cual se regula a través de dos muelles. La mesilla del FAIVELEY es bastante estrecha y se compone de una sola paleta la cual tiene amortiguación y un alto grado de giro.

Sin embargo, a diferencia del FAIVELEY, el pantógrafo SCHUNK se regula neumáticamente y tiene aletas aerodinámicas para ayudar y mantener los frotadores en posición perpendicular con el hilo de contacto. Su mesilla es mucho más ancha y se compone de dos paletas con amortiguación propia. Además su grado de giro es inferior.

QUINTA CAUSA.

La evolución y aumento de los pasajeros.

Des de los años 90 el número de usuarios de la línea R2 Sud ha tenido un incremento muy grosero. Sobre todo en el año 2000 el incremento de pasajeros es destacable lo que implica que pasen muchos más trenes y con más frecuencia.

No obstante, con este incremento, tanto el hilo de contacto como el frotador del pantógrafo intensifican el trabajo y por lo tanto están más tiempo en contacto.

El incremento de la frecuencia de los trenes implica más revisiones y mantenimiento de los materiales en contacto. Según los estudios y análisis el hecho del incremento de trenes no ha aumentado el mantenimiento.

7.3.1. Conclusiones de la hipótesis de Lehel

El problema principal se inicia en la comunicación y disputa entre la empresa operadora de redes y la de administración de la infraestructura. Las dos empresas han querido obtener mejores resultados y así obtener más beneficios, aunque no han valorado los perjuicios que se pueden provocar la una a la otra.

Hay que destacar que el hilo de contacto tiene un desgaste excesivo por la diferencia de durezas y también hay que tener en cuenta que el frotador actúa sobre el hilo de contacto como un cuchillo ya que se han encontrado limaduras y virutas sobre los techos de los trenes.

Para resolver el problema, primero de todo, las dos empresas se tendrían que poner de acuerdo y solucionar el dilema en conjunto, como por ejemplo buscar un material idóneo para los dos. Parece que el cambio de material está en marcha y se estima que en septiembre se introducirán los frotadores de grafito.

El grafito parece un material que cumplirá con las demandas de las empresas, aunque el precio suba considerablemente. Este nuevo material prolongará la vida útil de hilo de contacto ya que al ser un material mucho más blando que el Cu-Cr-Zr, actuará como lubricante en el propio hilo. El frotador de grafito proporcionará una interacción mucho menos agresiva, lo que conllevará, una mejor conservación del hilo de contacto. Por lo que, si el hilo tiene un buen estado, el frotador se desgastará menos.

Por lo tanto, después de estos datos, se puede afirmar que con este material nuevo el desgaste será mucho menor.



Finalmente se podría añadir que actualmente el estado del hilo de contacto es desastroso y esto implicaría un gran desgaste del frotador del gafito. En este caso se tendría que cambiar el hilo de contacto de toda la línea o bien tomar una serie de prevenciones o mantenimiento para dejar el hilo sin defectos ni impurezas.

7.4. REALIZADA POR MIGUEL BELTRAN

La situación a la que se ha llegado actualmente, en la cual existe desgaste eléctrico y/o mecánico entre las pletinas y el hilo de contacto. Es producto de una serie de actuaciones que a lo largo de estos últimos 5 años, tanto por la parte de la empresa gestora de la infraestructura y la empresa operadora de la red han realizado. Una serie de intervenciones que se han materializado en muchas ocasiones sin consultarse entre ambas, donde lejos de solventar un problema inicial se ha ido agravando.

En el estado tan deteriorado el que se encuentran el hilo de contacto en la actualidad, es muy difícil determinar si el desgaste mecánico produce el desgaste eléctrico o viceversa. También es posible que sea una combinación de los dos fenómenos.

Hay que diferenciar entre cual pudo ser el motivo que inicio el desgaste excesivo entre el pantógrafo e hilo de contacto y por otro lado como se ha llegado a la situación actual.

Descubrir que inició el desgaste excesivo es una tarea muy complicada debido a que nos remontamos al año 1992. Cuando se localizaron partículas de cobre procedente de los pantógrafos y los HH.CC. en el balasto, alrededores de los andenes y los techos de los trenes. Donde las vías pares eran las más acusadas (entrada a Barcelona).

Esta fecha será un punto de inflexión ya que a partir de este momento se realizarán una serie de modificaciones significativas por ambas partes, las cuales empeorarán la situación. De las modificaciones mencionadas anteriormente, si se han podido justificar en nuestro análisis que algunas de ellas, han afectado negativamente al desgaste.

Por este motivo se van a enumerar las variables que hubiesen podido provocar el inicio de este desgaste y por otro lado las variables que han podido empeorar la situación. Cómo han afectar negativamente al desgaste eléctrico y mecánico en la interacción pantógrafo- catenaria.

VARIABLES QUE PUDIERAN PROVOCAR EL DESGASTE INICIAL (1992-2005).

Situación económica:

Alguna de las empresas implicadas pudo pasar por una mala situación de liquidez dada la situación de aquellos años.

En el caso de ser afirmativo, es posible que algunos de los factores que se van a enumerar a continuación pudieran provocar el inicio de desgaste prematuro y daños en la instalación.

- Decadencia en labores de mantenimiento por alguna de las partes y aumento de vida útil de los materiales. Hilo de contacto y Frotadores
- Materiales suministrados con calidad deficiente.

Aumento de pasajeros:

En los últimos años de este periodo hay un aumento significativo de pasajeros, lo cual implica un crecimiento del número de trenes. En consecuencia la electrificación padece un aumento de temperatura debido al consumo de corriente de las locomotoras.

Este hecho podría dar explicación al problema que denunció la empresa gestora de la electrificación, de aumento de temperatura en el hilo de contacto. Donde se acusaba en mayor grado en las vía 2 (entrada a Barcelona). Provocada por el incremento considerable en horas punta.

La mayor circulación de corriente entre el pantógrafo e hilo de contacto se acusa sobre todo en la arrancada y frenada de las locomotora. En la arrancada, la demanda de corriente es mayor para poder iniciar la marcha de una masa totalmente en reposo. En la frenada sin embargo, hay una entrega de corriente de la locomotora a la electrificación.

Esta entrega y consumo de corriente se hace mediante el pantógrafo que va en servicio. Cabe la posibilidad que la superficie de contacto no se suficiente como para hacer esta circulación de corriente sin que se produzca aumento dañino de temperatura y salto de arco eléctrico. Ya que en otras instalaciones se ha observado que se utilizan dos pantógrafos para repartir la intensidad de corriente.

VARIABLES QUE HAN PODIDO EMPEORAR LA SITUACIÓN INICIAL. (2005-2014).

ADIF asume competencias (2005):

A priori este hecho no debería, tener ninguna relación con el inicio de un desgaste prematuro ya que se trata de una empresa totalmente avalada y competente. Sin embargo, este cambio de gestión es un hecho constatado que no hay que pasar por alto.

Un cambio de praxis en el mantenimiento y gestión de la electrificación pudo dar lugar a una nueva situación.

Año 2008:

Esta fecha es un punto de inflexión para encontrar el motivo el cual ha provocado el desgaste excesivo por ambas partes. A partir de este año se hicieron variaciones significativas que coinciden con el agravio del problema.

Entrada de los CIVIA (2008):

La entrada de las locomotoras CIVIA, fabricadas por ALSTOM, entran en servicio en la línea R2 de cercanías en el año 2008. Estas locomotoras instalan unos nuevos pantógrafos fabricados por la empresa SCHUNK, modelo WBL-8512-L. Este tipo de pantógrafos a priori presentan mejoras significativas con respecto los ya existentes FAIVELEY para asegurar un mejor contacto entre el hilo de contacto y las pletinas de los mismos.

En la mesilla, donde van montados las dos bandas de los frotadores, son independientes. Es decir que su amortiguación longitudinal no depende entre sí. Esto favorece el contacto para absorber los cambios de alturas del hilo de contacto. Sin embargo también se observa que la mesilla es más rígida y tiene menor grado de movimiento que los pantógrafos FAIVELEY que hasta el momento daban y siguen dando servicio.

Cambio de hilo de contacto (2007-2008):

Para intentar reducir el desgaste en el hilo contacto, la empresa gestora de la infraestructura decide cambiar la composición del mismo. Empieza a instalar CuAg0,1. Una aleación más dura que el anterior hilo de contacto.

En la página 164, están las tablas 76 y 78, las cuales hablan sobre las durezas en el hilo de contacto según el material.

En el laboratorio se han analizado muestras de hilo de contacto usado de ambas aleaciones para verificar este aumento de dureza. Este incremento corresponde a un valor muy pequeño, incluso hay muestras en las que los valores han dado los mismos parámetros de dureza. Así que este cambio no se considera una gran culpable del problema.

Instalación de catenaria rígida (2008-2009):

La siguiente causa que pudo ayudar o provocar una situación desfavorable fue la instalación de catenaria rígida en la entrada a Barcelona.

La catenaria rígida tiene una serie de ventajas con respecto a la flexible pero también otras desfavorables.

Ventajas

- Al instalarse soportada mediante un perfil rígido de aluminio, el hilo de contacto garantiza una longitud rectilínea a lo largo de todo el recorrido. Sin variar la flecha del hilo de contacto, al ser una estructura rígida.
- En el caso de producirse micro rotura en el material, no existe peligro de rotura a tracción al contrario que la catenaria flexible.

Desventajas

- Esta rigidez mencionada anteriormente puede ser negativa a la misma vez, ya que el pantógrafo que está regulado a una presión estudiada para que trabaja en catenaria flexible. Al pasar por catenaria rígida el desgaste puede verse afectado notablemente.
- Cabe la posibilidad que la instalación de este tramo, esté fuera de los rangos de trabajo permitidos por el pantógrafo. Este hecho no se ha podido constatar por falta de información.
- El descentramiento es menor que en catenaria rígida ± 15 cm aunque se fue descentrando de manera intencionada cada vez más hasta ± 30 cm en 2012. Este descentramiento daría explicación al desgaste centralizado que sufrían las pletinas de los pantógrafos por aquellas fechas.

Instalación de pletinas de cobre-cromo-circonio (2011):

En octubre del 2011 después de una situación insostenible para la empresa operadora de la red, dónde las pletinas de Cobre electrolítico hasta el momento, llegaban totalmente desgastadas a la primera revisión. Deciden montar pletinas de cobre-cromo-circonio, hecho que solventará su problema particular, pero que provocara daños graves en el hilo de contacto.

En la página 165 está la tabla 80, la cual habla sobre las durezas en la pletina.

Estas pletinas son de mayor dureza que el hilo de contacto 105 HB frente a 134 HB, por tanto provocará un desgaste prematuro y disminución de la vida útil del hilo de contacto.

Esta última actuación por parte de la empresa operadora, ha dado lugar a una situación de alerta y de peligro por colapso. Ya que según las muestra de hilo de contacto analizadas están trabajando por debajo de los límites permitidos, debido al desgaste.

PANTÓGRAFO.

El pantógrafo que es el elemento encargado de transmitir corriente a los motores de la locomotora, mediante el contacto con la catenaria. Está diseñado para trabajar a una presión fija. En el caso de la línea 2 de cercanías convive catenaria rígida y catenaria flexible. La fuerza ideal para cada tramo es diferente puesto que la catenaria rígida como se ha analizado en instalaciones donde toda la electrificación transcurre por catenaria rígida. La fuerza sobre el hilo de contacto es menor. Por este motivo el pantógrafo en ese sentido es poco versátil y pueda ser mejorado. Dependiendo del tramo, ejerza una presión diferente sobre el hilo de contacto.

FUTURO INCIERTO.

Para encontrar una solución a este problema, se plantea montar unos frotadores de grafito.

El grafito es un material que tiene unas propiedades muy buenas para esta aplicación, principalmente por su poder lubricante sobre la superficie la cual se encuentra en contacto con él.

También por ser un material que sublima. Es decir, que pasa de un estado sólido a gas, sin pasar por estado líquido. Esta última propiedad evitaría que se fundiesen dichas pletinas y se queden gotas de material pegadas en el hilo de contacto como sucede actualmente.

Además eliminaríamos las pletinas de cobre-cromo-circonio, ya que como se ha estudiado anteriormente, es un material mucho más duro que el del hilo de contacto. Esto no interesa puesto que el cambio de hilo de contacto es mucho más costoso que el cambio de frotadores.

Una vez se monten los frotadores de grafito, va a pasar mucho tiempo que el desgaste siga siendo alto, debido a que la catenaria seguirá en proceso de rehabilitación. Este proceso debe ser lo más corto posible para evitar un gasto excesivo de los frotadores de grafito de los pantógrafos ya que dichas pletinas son mucho más caras que las de cobre electrolítico o cromo-cobre-circonio.

Una vez todo el hilo de contacto de la catenaria este en buen estado y los frotadores de carbono en servicio, será un momento crucial.

HIPOTESIS 1.

El desgaste baje radicalmente al haber sustituido el hilo de contacto el cual eran chuchillas por los agujeros e irregularidad que tenían. Y sustituido el material de cromo-cobre circonio por el carbono. Este último material, como hemos dicho anteriormente apenas daña el hilo de contacto.

En el caso de que el desgaste se estabilizase, se podría volver a montar cobre electrolítico en los frotadores, aunque no se recomienda. Ya que esto indicara que alguna de las variables mencionadas anteriormente, no esté presentes.

HIPOTESIS 2.

Si el desgaste sigue siendo excesivo habrá que estudiar las variables una por una e ir haciendo las modificaciones pertinentes. Es muy importante que ambas partes implicadas estén totalmente coordinadas.

En el caso de que el desgaste siga siendo excesivo, las empresas implicadas deberán analizar las variables mencionadas anteriormente, así como repasar los antecedentes que se han recogido y comprobar que las condiciones de la vía y pantógrafos están dentro de norma.

7.5. REALIZADA POR JORDI CHACÓN

Una vez observados los antecedentes y después de estudiar toda la información recopilada durante el proyecto, gracias a los datos facilitados por las empresas implicadas y a las reuniones establecidas con dichas empresas y varios profesionales del sector. Las hipótesis sobre la causa u origen del problema del elevado desgaste en la línea R2 Sud de cercanías de Barcelona podrían ser las siguientes:

PRIMERA CAUSA.

Tanto la Empresa Operadora como la Empresa de Infraestructura así como la Empresa suministradora de pantógrafos, coinciden en señalar que el problema surgió a raíz de la instalación de catenaria rígida en la zona de túneles y estaciones soterradas de Barcelona. Algo parecido ocurrió en las cercanías de Madrid pero el desgaste no es tan severo.

El desgaste se detecta más rápidamente en los frotadores de los pantógrafos, con lo cual la Empresa Operadora opta por reemplazar el material de las pletinas por una aleación más dura.

El cambio provoca un desgaste más pronunciado en el hilo de contacto. Así la Empresa de Infraestructura selecciona otro material también más resistente que el hasta ahora utilizado.

De esta manera se produce una escalada de modificaciones para conseguir combatir el desgaste y prologar la vida útil de los materiales y alargar los tiempos entre mantenimientos. Así mismo ambas empresas que estaban trabajando con materiales compatible que no daban problemas y que habían estado coexistiendo durante décadas, pasan a materiales incompatibles que con su mayor deterioro, al final provocan un aumento de los costes de mantenimiento. Estos costes están referidos a que las nuevas aleaciones son más caras y los tiempos de sustitución de elementos desgastados son más cortos.

La causa más probable de que la catenaria rígida desgaste más los frotadores podría explicarse porque los pantógrafos están diseñados para circular por catenaria flexible. Probablemente las diferentes características de la catenaria rígida frente a la catenaria flexible, como la menos flexión del hilo de contacto al paso de los trenes, requeriría un nuevo modelo de pantógrafo acorde con el nuevo tipo de catenaria. Este nuevo diseño se podría establecer con los antiguos elementos de Cobre Electrolítico y podría volverse a utilizar los materiales más baratos.



SEGUNDA CAUSA.

En los últimos años y coincidiendo con este excesivo desgaste estudiado por este proyecto, ha aumentado de forma considerable la utilización del transporte público. En este caso se tienen las mismas instalaciones que antaño. Y seguramente estas instalaciones estén preparadas para un determinado flujo de pasajeros que con mucha probabilidad esté anticuado. Entonces sería lógico pensar que al aumentar el uso, sea inevitable también el aumento del desgaste de dichas instalaciones.

8. RECOMENDACIONES DE ACTUACIÓN

A continuación se detalla una serie de acciones que podrían servir para mejorar algunos aspectos que se han estudiado a lo largo del proyecto, por ejemplo la máquina de interacción de catenaria-pantógrafo escudriñada en los artículos revisados o un plan de acción para integrar el grafito del frotador con el menor impacto económico posible.

Durante el mes de Julio, está previsto realizar el cambio de material de los frotadores de todo el parque de locomotoras de Cataluña pertenecientes a la Empresa Operadora, un total de 512 pantógrafos.

Los frotadores de grafito utilizados en la fase 1 (SK1673 y SK1748), fase 2 (SK1755 y SK1754) y fase 3 (SK1261 y SK1760) han de realizar un mínimo de 80.000 km para no incrementar el gasto de la Empresa Operadora. Aunque en condiciones normales del hilo de contacto, están realizando 200.000 km en otras zonas de la península.

MATERIAL	CARACTERÍSTICAS /mm	DISTANCIA TEÓRICA /km	DESGASTE PREVISTO	DISTANCIA MÍNIMA /km	DESGASTE MÁXIMO
Grafito	Esesor inicial: 28 Sustitución: 9	200.000	0,95 mm / 10.000 km	80.000	2,4 mm / 10.000 km

Tabla 119: Características técnicas de la pletina de grafito.

No obstante, el ensayo realizado el año 2012 con frotadores *Kasperowski* resulto negativo, ya que tendrían que recorrer 85.000 km y en realidad no llegaban a 21.000 km. Por este motivo no existe confianza en el éxito de estas tres fases.

Sin embargo, en un periodo de tiempo el desgaste de los frotadores se tendría que estabilizar dentro de unos parámetros que permitirían ahorrar dinero. Para acelerar esta previsión, se plantea la siguiente propuesta de mantenimiento a los HH.CC. y rediseño del frotador.

8.1. PROPUESTA 1 – PLAN PREVENTIVO SOBRE HILO DE CONTACTO

Analizando el estado actual en el que se encuentra el hilo de contacto y las diferentes pruebas realizadas el año 2012 con los frotadores *Kasperowski*, se llega a la conclusión de que el montaje de las diferentes fases para limpiar el hilo de contacto resultará ineficaz para la vida útil de los frotadores. Llegando a peligrar la transición de cobre a grafito.

A la hora de determinar la viabilidad de la implementación de los frotadores de grafito hay que tener en cuenta dos márgenes de tiempo.

A corto plazo, el desgaste de los frotadores de grafito tiene aguantar un mínimo de kilómetros que equiparé el gasto a los presentados por la aleación de Cu-Cr-Zr, para no acarrear un gasto extra de material desechable.

En cambio, a largo plazo la vida útil del frotador ha de aproximarse a los 200.000 km, valores conseguidos en Sevilla como consecuencia de la puesta en marcha a la vez de nuevos frotadores (grafito) e hilo de contacto.

Ajustando estos periodos lo que se busca es no generar gastos extras derivados del mantenimiento y recambio de los frotadores, amortizando a largo plazo la inversión inicial ampliando la vida útil del frotador consiguiendo una menor frecuencia entre las diferentes fases de mantenimiento y finalmente recambio.

Además, el grafito tiene un comportamiento más respetuoso con el hilo de contacto, por lo que desgastará menos sección de H.C. permitiendo ahorrar también en las cuentas de Empresa de Infraestructura, tanto en material, como en mantenimiento.

Para cumplir estos objetivos es importante marcar una serie de pautas y acciones destinadas hacia el hilo contacto, para conseguir una superficie de contacto menos agresiva y menor presencia de impurezas a diferencia a la existente actualmente.

Por lo tanto el propósito de este apartado es plantear un sistema de mantenimiento preventivo que minimice el desgaste de transición y el impacto económico en ambas partes.

8.1.1. Características de la propuesta a tener en cuenta

Antes de plantear un nuevo sistema de mantenimiento preventivo hay que marcar unas máximas que ha de marcar y definir de principio a fin la propuesta.

- **Tiempo de acción/ tramo < recambio de HH.CC./tramo**

Actualmente el recambio de un tramo de HH.CC. (Aprox.1200m) se realiza en 4 noches por lo tanto el sistema de prevención deberá ser más eficaz.

- **Precio del sistema < coste de la substitución del tramo**

Los materiales para adecuar el hilo, la mano de obra necesaria y los costes extras añadidos, no podrán superar el coste al cambio del hilo del mismo tramo.

- **Nº operarios para poner en marcha el sistema < Nº necesarios para cambiar un tramo**

Ya sea a través del número de operarios o al número de horas que se destina, no podrá superar los costes económicos del método tradicional.

- **Adaptabilidad a la maquinaria existente**

Imprescindible para evitar un encarecimiento del sistema y utilizar los recursos existentes. Ya sea material rodante de Empresa Operadora o de Empresa de Infraestructura, mejor realizar modificaciones que no comprar nueva maquinaria que no se puede reutilizar en un futuro.

- **Reconocimiento del estado del HH.CC.**

El hilo de contacto no tiende a tener un desgaste uniforme, hecho que provoca tramos o zonas donde el desgaste es más pronunciado, el sistema o el operario deberá detectar esta uniformidad para así poder saber que acción aplicar a la zona de trabajo.

- **Variedad de acciones dependiendo del estado los HH.CC.**

El sistema se encontrará diversas condiciones de trabajo y deberá tener una variedad de acciones a emplear dependiendo del estado del HH.CC. Ya que puede que en zonas sea recomendable cambiar el hilo de contacto.

- **Fácil transporte**

Al ser un sistema adaptable a una maquinaria específica su transporte no debe acarrear una extrema dificultad por parte de los operarios, por lo que su peso y número de piezas ha de ser mínimas.

- **Fácil montaje y desmontaje**

El tiempo es una variable muy importante a tener en cuenta dentro de las labores de mantenimiento, por lo que su montaje y desmontaje deberá ser sencillo y sistemático.

- **Mínima instrucción al operario**

Todo nueva instrumentación, sistema o producto, necesita un mínimo conocimiento previo por parte del operario, mientras más complicado sea el sistema más horas de instrucción se necesitarán por lo que sistema ha de ser semiautomático o automático para minimizar la presencia de operario cualificado.

8.1.2. Características de la catenaria a tener en cuenta

El diseño y configuración de la catenaria CA-160 también es un elemento a considerar para el diseño de la propuesta para el mantenimiento de los HH.CC.

- **Sección del hilo de contacto**

Actualmente la configuración de la catenaria alberga distintas secciones de cable, tanto en catenaria flexible como en rígida. Las secciones son 107 mm², 120 mm² y 150 mm².

- **Los materiales**

Igual que se encuentran distintas secciones, se encuentran distintos materiales. Se están utilizando Cu ETP y CuAg0,1.

- **Las grifas**

El cable está sustentado mediante las grifas, las cuales se agarran a la sección de amarre. El mecanismo propuesto las a detener en consideración.

- **Número y tipos de péndolas**

El número de péndolas indica la cantidad de grifas que se va encontrar el mecanismo. Además ha de considerar si son fijas, rígidas, articuladas o flexibles, ya que el comportamiento del hilo de contacto no será el mismo, sobre todo si el mecanismo aplica una fuerza ascendente.

- **Aisladores de tensión**

La catenaria está compuesta por aisladores de tensión, los cuales tendrá que esquivar la propuesta porque no se va aplicar sobre ellos el mismo mantenimiento que se realizará sobre el hilo de contacto.

- **Pre-hundimiento de los HH.CC.**

Conseguir el paralelismo del hilo de contacto sobre la vía es complicado y no siempre se consigue, por ello se produce una flecha descendiente, por lo que el mecanismo habrá de poder trabajar sobre material curvado.

- **Número de hilos de contacto**

La mayoría de los tramos de la línea R2 Sud de cercanías de Barcelona está compuesta por doble hilo de contacto, separados mediante los brazos de atirantado.

- **Peraltes y rampas**

La vía intenta ser lo más plana posible, sin embargo no siempre se consigue, por lo que son necesario el uso de rampas y peraltes. Los peraltes pueden generar un descentramiento mayor entre la catenaria y el pantógrafo.

- **Servicio eléctrico**

Durante las horas de servicio, la catenaria necesita de corriente eléctrica para funcionar, no obstante por la noche se puede desconectar. Según la propuesta necesitará de unas condiciones u otras de la catenaria.

- **Seguridad, garantizar el funcionamiento**

La propuesta tiene como objetivo no generar una parada del servicio de la línea, por lo que tendrá que garantizar el buen funcionamiento del cable. No se puede contemplar roturas de hilos a causa de la propuesta.

- **Medio ambiente, no generar incendios en los alrededores**

Según la técnica o el material que se utilice, puede generar chispas, que si no se controlan pueden acabar generando un incendio en la vegetación de los alrededores.

- **Longitud del cantón**

En cada cambio de cantón, se cambian los hilos, por lo que el sistema ha de saber reengancharse a los hilos o buscar la posición del nuevo cantón.

- **Curvas**

La existencia de las curvas modifica la posición natural del hilo de contacto, por lo que no se comporta exactamente igual que una recta.

- **Meteorología (lluvia, viento, calor, etc.)**

La propuesta ha de trabajar en cualquier situación meteorológica o decir en cuales puede trabajar. Incluso debería definir justo cual es el momento más idóneo. *Por ejemplo: por la noche, justo después de un día largo de tormenta. Para aprovechar que la lluvia limpia la catenaria y la desengrasa lo máximo posible, además de las bajas temperaturas que provoca la lluvia y la noche. Aunque quizás la humedad puede jugar en contra.*

- **Movimiento zigzag de los HH.CC.**

El hilo de contacto no sigue una trayectoria recta para garantizar una buena interacción con el frotador, por lo que va realizando zigzags. La propuesta ha de adaptarse a este movimiento.

- **Engrase de los HH.CC.**

Actualmente la interacción de los frotadores de Cu-Cr-Zr con la catenaria, necesita de grasa o lubricantes para tener una buena condición de servicio. No obstante, esta grasa o lubricante queda impregnada a lo largo de la catenaria, junto con la que ya tiene la catenaria, por lo que la propuesta ha de tener algún mecanismo para retirar esta previamente y no embotar el sistema.

8.1.3. Referente

El estudio de los referentes existentes en el sector, toma importancia debido a que genera una investigación previa, estudio, evaluación, modelo y una sustentación teórica, que hace que no se empiece desde cero nuestra propuesta, ayudando a orientar una posible hipótesis, determinando métodos o técnicas a utilizar, minimizando la probabilidad error.

8.1.3.1. Sistema rueda - carril

El desgaste por fricción no solo está presente en la interacción pantógrafo-catenaria, sino también está presente en el sistema rueda-carril, como consecuencia de la circulación normal del material rodante existente.

Años atrás, cuando el desgaste llegaba a valores determinados, donde la integridad de los sistemas, material rodante o confort de los pasajeros no se podía garantizar, los tramos de vía que presentaban dichas imperfecciones se renovaban.

Actualmente los carriles se someten a diversas labores de mantenimiento, destinadas a eliminar aquellas imperfecciones derivadas de la acción del desgaste, prolongando su vida útil y disminuyendo el coste de material que suponía el recambio de los diferentes tramos de vía en mal estado.

Estas acciones tienen una zona de ataque específica por lo que es importante presentar y definir las zonas presentes en un carril.

Un carril de acero tiene tres partes, fácilmente diferenciadas mediante un corte transversal. Las partes que pueden apreciarse son:

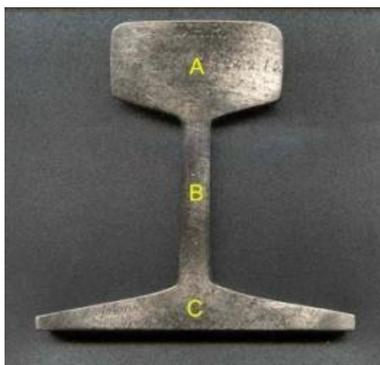


Figura 88: Partes de un carril.

- A. **Cabeza.** Es la parte superior Es la parte superior y con la que entra en contacto, tanto la superficie plana de la rueda, como la pestaña de la misma.
- B. **Alma.** Es la parte más estrecha del carril y la que transmite las fuerzas de la cabeza a la base.
- C. **Patín.** Es la parte inferior del carril que entra en contacto con la traviesa.

8.1.3.2. **Procesos de esmerilado y re-perfilado**

Dos de las principales acciones que se desarrollan para garantizar el correcto estado superficial de la vía son el esmerilado y el re-perfilado.

El esmerilado consiste en la obtención de una superficie con una baja rugosidad, eliminando material mediante la utilización de partículas abrasivas fijas, contenidas en una rueda aglutinada que opera a velocidades elevadas. El número de componentes para desarrollar dicha función se reduce a la rueda aglutinada y a la definición de los siguientes parámetros:

- Material aglutinante.
- Tamaño del grano.
- Velocidad de remoción de material.

El abanico de maquinarias existentes para el desarrollo de este tipo de función es muy amplio dentro del sector, así que se estrechará el rango de búsqueda aplicando las características de ligereza; fácil transporte; fácil montaje y desmontaje; mínima instrucción del operario; y núm. de operarios necesarios mínimo.

Aplicando esta serie de características el número de máquinas se reduce a las siguientes:

- **Máquina esmeriladora de alma de carril** (Figura 89).
Destinada a la eliminación del óxido ubicada en el alma del carril.
- **Máquina amoladora de cabeza de carril** (Figura 90).
Destinada para el tratamiento lineal y moldeado de juntas soldadas, así como caras superiores de carril de rodadura recargadas con soldadura.
- **Máquina esmeriladora del contorno de la cabeza del carril** (Figura 91).
Destinada para esmerilar el contorno de la cabeza del carril con una alta precisión.
- **Máquina amoladora angular** (Figura 92).
Destinada para cualquier zona del carril y sin necesidad de una fuente de alimentación externa.
- **Máquina para eliminar rebabas en carriles y esmeriladora de cambios** (Figura 93).
Destinadas para el esmerilado de soldaduras de recargue en las agujas de los cambios, en los corazones de cambios, en el área de contra aguja y en el área de los contracarriles.



Figura 89: Esmeriladora.



Figura 90: Amoladora.



Figura 91: Esmeriladora.



Figura 92: Amoladora.



Figura 93: Esmeriladora.

El re-perfilado es un proceso de mecanizado de una pieza metálica, en este caso la vía, con el objetivo de recuperar su geometría original. La maquinaria destinada al re-perfilado se encuentra en trenes de grandes dimensiones, debido a las necesidades y requerimientos de este tipo de mantenimiento:

- Metros de vía a re-perfilar
- Gestión y transporte del material sobrante mecanizado
- Refrigeración
- Variedad de herramientas de mecanizado



Figura 94: Tren re-perfilado, frontal.



Figura 95: Tren re-perfilado, interior.

Al estudiar la evolución del mantenimiento aplicado a la vía y las diferentes acciones que se desarrollan para garantizar su correcto funcionamiento, a la vez que se alarga su vida útil, se marca como objetivo trasladar este modelo al hilo de contacto debido a los rasgos comunes que presenta:

- Sector de trabajo.
- Interacción con otro elemento.
- Presencia de defectos superficiales a causa de la interacción.
- Defectos que ocasionan.
 - Excesivo desgaste de material.
 - Costes derivados a la sustitución de material dañado.
 - Interacción deficiente entre componentes.
 - Comprometen el estado de las instalaciones.
 - Comprometen el confort de los viajeros.

Al presentar rasgos comunes, se plantea adaptar las dos acciones de mantenimiento enfocada al carril (esmerilado y re-perfilado) al hilo de contacto, ya que como ocurría con anterioridad con el carril, actualmente sobre el hilo de contacto, no existe ningún tipo de mantenimiento preventivo que alargue la vida útil del cable y indirectamente de los frotadores.

A continuación se explicará la propuesta planteada para hacer frente este problema.

8.1.4. Descripción de la propuesta 1

Siguiendo las especificaciones marcadas en apartado anteriores se ha desarrollado la siguiente propuesta.

Cabe señalar que se trata de una propuesta en fase conceptual, en la cual se marcan una serie de pautas:

- Maquinaria necesaria para su utilización.
- Zona de implementación.
- Número de componentes necesarios.
- Geometría y cotas funcionales de los diferentes componentes.

La idea es marcar el camino, para un posterior desarrollo de la propuesta, que debido al *timing* del proyecto no ha sido posible realizar.

8.1.4.1. *Maquinaria necesaria*

Unos de los requisitos que se marcaron fue la adaptabilidad de la propuesta a la maquinaria existente. Por ello, es aconsejable que nuestra propuesta se emplee en la **Dresina Inspección de Catenaria DIC-40**.

Este tipo de maquinaria, actualmente se encarga de las diversas tareas de instalación relativas a la catenaria y su mantenimiento, debido su funcionamiento dual, motor diesel y pantógrafo. Entre sus características destaca:

- **Autonomía:**
 - Capacidad para traicionar vagones, hormigoneras, trenes de tendido y otros vehículos ferroviarios.
 - Depósito de 1.000 litros.
 - Velocidad máxima de 90 km/h.
- **Área de trabajo:**
 - Plataforma elevadora con 200 grados de radio de giro y capacidad de trabajo hasta 8 grados de peralte en curva.
 - Cesta de trabajo con 360 grados de giro.
- **Equipamiento:**
 - Grúa PALFINGER con radio control y cesta.
 - Generador autónomo.
 - Pantógrafo sobre soporte aislado y monitorización de datos de descentramiento.
- **Cabina:**
 - Aislante térmico y acústico.
 - Uno o dos puestos de conducción.
 - Sistema de Hombre Muerto.



Figura 96: Sistema preventivo de lubricación sobre DIC - 40, foto 1.



Figura 97: Sistema preventivo de lubricación sobre DIC - 40, foto 2.

Nuestra propuesta, se instalará en la zona de trabajo del pantógrafo de forma similar al sistema de preventivo de lubricación que actualmente también se opera desde esta maquinaria.



Figura 98: Dresina Inspección de Catenaria D1C-40.

8.1.4.2. Zona de implementación

El sistema diseñado para disminuir las imperfecciones del hilo de contacto utilizará el pantógrafo WB 85-3 como soporte del sistema, ubicado en la zona superior de la D1C-40, ocupando el espacio liberado por el frotador, por lo que el vehículo deberá utilizar el motor diesel para circular a lo largo de la vía.

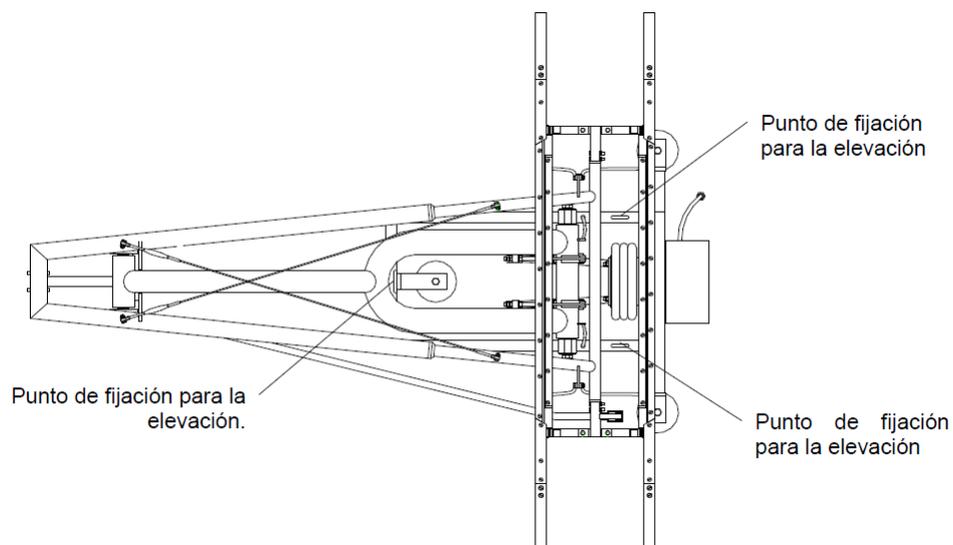


Figura 99: Pantógrafo WB 85-3.

El sistema al ocupar el espacio liberado por los frotadores facilita el acceso de hilo de contacto, por lo tanto las dimensiones del sistema estará condicionado por las siguientes especificaciones técnicas derivadas de la zona de trabajo:

- Ancho de la mesilla: (1.800 ± 10) mm
- Longitud de los frotadores: (1.019 ± 1) mm
- Distancia entre frotadores: (300 ± 5) mm
- Altura: 60 mm
- Peso: 4 x 0,45 Kg
- Puntos de fijación

Una vez especificados la maquinaria necesaria y la zona de trabajo, el siguiente paso es definir los elementos necesarios que compondrán el sistema.

8.1.4.3. Descripción de los componentes que forman el sistema

(1) COMPONENTE BASE.

Componente encargado de proporcionar estabilidad al sistema, proporcionar una base sólida, a la vez que permite el deslizamiento del componente móvil, ubicado cada uno en la zona de trabajo del frotador.

Para un correcto funcionamiento se marcará a continuación la geometría y dimensiones a cumplir.

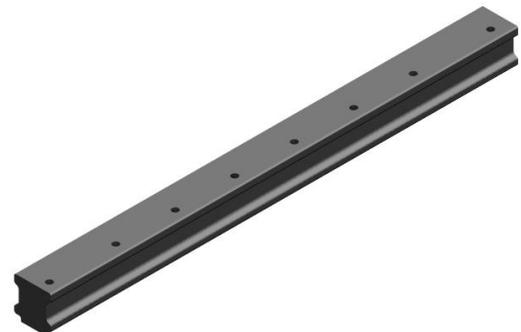


Figura 100: Pieza 1, componente base.

(2) COMPONENTE MÓVIL.

Componente encargado, de proporcionar un movimiento lineal a lo largo del componente base, que permita seguir la trayectoria en zig-zag del hilo de contacto debido al descentramiento. Se ubicarán uno en cada extremo, en la zona superior del componente base.

Para un correcto funcionamiento se marcará a continuación la geometría y las dimensiones a cumplir.

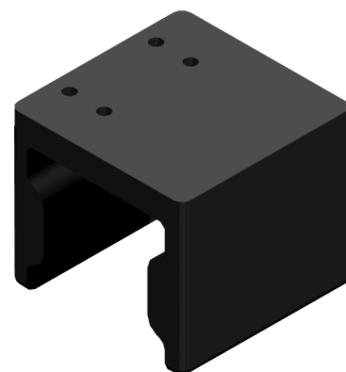


Figura 101: Pieza 2, componente móvil.

(3) PORTA-PULIDORES.

Componente encargado como su nombre indica, portar los diferentes pulidores, a lo largo de la distancia existente entre las zonas destinadas hacia los frotadores.

Para su correcto funcionamiento se marcará a continuación la geometría y las dimensiones a cumplir.

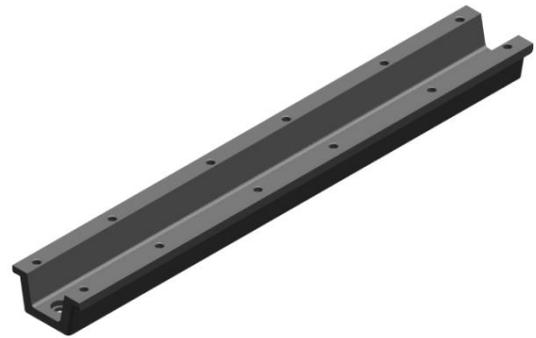


Figura 102: Pieza 3, porta-pulidores.

(4) PULIDORES.

Componentes encargados de dar el acabado deseado a la zona de contacto del hilo de contacto, el número de pulidores a utilizar, se marcará dependiendo de estado inicial del hilo de contacto y el final deseado.

Para su correcto funcionamiento se marcará a continuación la geometría y las dimensiones a cumplir.

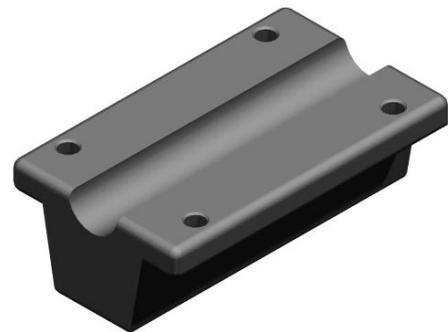


Figura 103: Pieza 4, pulidores.

(5) COMPONENTE DE FIN DE RECORRIDO.

Componente encargado de establecer una barrera física, al recorrido realizado por el componente móvil. La posición del componente de fin de recorrido se encontrará fuera de los rangos de trabajo del sistema y de los valores de descentramiento del hilo de contacto, por lo tanto su ubicación, se rige por razones de seguridad.

Para su correcto funcionamiento se marcará a continuación la geometría y las dimensiones a cumplir.

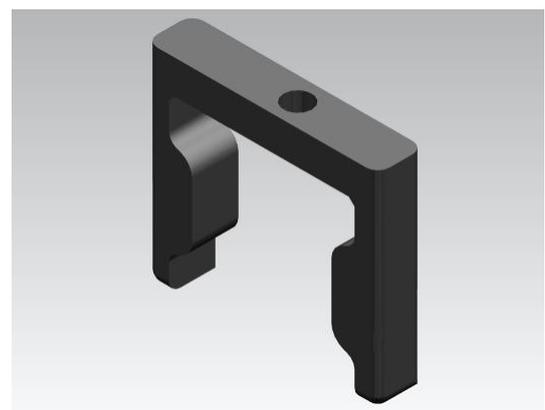


Figura 104: Pieza 5, componente de fin de recorrido.

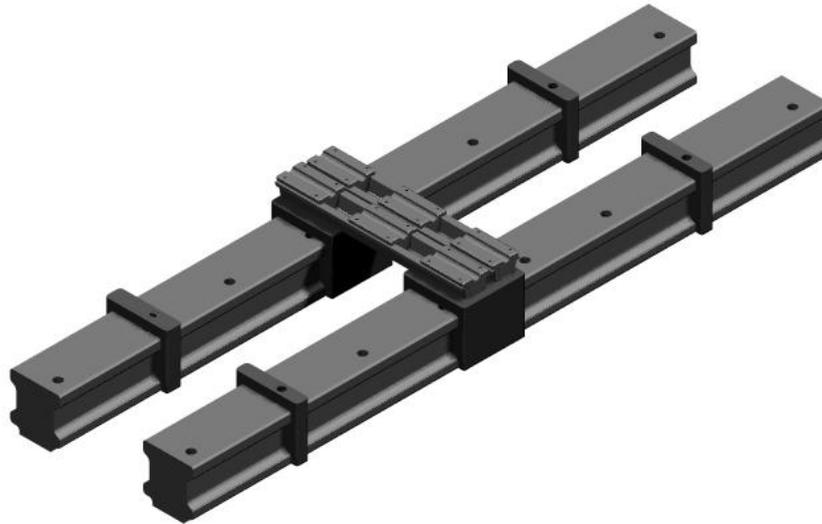


Figura 105: Conjunto de la propuesta 1.

8.1.4.4. Conclusiones

La idea principal antes de desarrollar esta propuesta era la de adaptar una serie de procesos aplicables al sistema rueda - carril, con el cual se conseguía alargar la vida útil de los componentes, a la vez que se mejoraba la calidad del servicio, al presentar menores imperfecciones y ocasionar menos vibraciones al paso del diferente material rodante.

La necesidad de un sistema, como el presente en este apartado, es elevada debido al cambio hacia las pletinas de grafito. Actualmente en diversas zonas del tramo de la línea R2 Sud de cercanías, el hilo de contacto no se encuentra en las condiciones óptimas de trabajo a causa de la deficiente interacción que provocan las pletinas de la aleación Cu-Cr-Zr. Este cambio sin un perfecto estado del hilo de contacto, no conseguiría los rangos de desgaste necesarios para ser económicamente sostenible, debido al alto coste de estas pletinas en comparación a las anteriormente montadas.

La propuesta expuesta, otorga la opción de alargar la vida útil del hilo de contacto y retrasar su recambio, a la vez que otorgaría los valores de desgaste necesarios para la viabilidad del cambio hacia el grafito.

Al ser una propuesta en fase conceptual, el objetivo era mostrar la idea principal, la serie de componentes necesarios, mostrando en cada uno su función, geometría y dimensiones, marcadas por el lugar de implementación la propuesta.

Como toda propuesta en su fase inicial, presenta factores a mejorar y limitaciones a estudiar, como parte del proceso de estudio a realizar en posteriores fases de desarrollo de la propuesta.

8.1.4.5. *Limitaciones a estudiar*

Los factores a estudiar una vez finalizada la fase conceptual son los siguientes:

- **Elementos de unión:**

Los elementos de unión entre los componentes guía y porta pulidores, deberán permitir la adaptación del sistema al zig zag y cambio de trayectoria que presente el hilo de contacto.

- **Materiales:**

Una de las características importantes a la hora de definir la propuesta, fue la ligereza del sistema, por lo tanto a la hora de definir el material de cada uno de los componentes, se ha de conseguir el mínimo peso posible, para la correcta adaptación del sistema al pantógrafo.

- **Definir material de pulido:**

Un factor importante dentro del sistema es la zona de pulido del pulidor, por lo tanto la definición del material abrasivo utilizado en cada uno de los pulidores ubicados en el porta pulidor, para el pulido del hilo de contacto para conseguir el acabado deseado y progresivo.

- **Solución zona crítica de fricción:**

Entre los componentes base y guía, existe una zona crítica de fricción y de desgaste, que deberá ser solucionada para obtener los rangos de vida útil necesarios para la viabilidad del sistema.

8.2. PROPUESTA 2 – MEJORAR DISEÑO FROTADOR

Independientemente del éxito de la propuesta 1, el estado del resto de catenaria del territorio gestionado por el gestor de la red no puede esperar a un cambio del hilo de contacto o a un plan preventivo para mejorar el estado de la superficie de contacto, llamado huella.

No obstante, se plantea otra propuesta para mejorar la vida útil del frotador, intentando minimizar el desgaste debido por las imperfecciones del hilo de contacto, como es el caso de las virutas, los granos, las rebabas, entre otros defectos.

Los objetivos a cumplir son los mismos expuestos en la introducción del apartado para mejorar la implementación de los frotadores de grafito y los mencionados en la propuesta 1 (apartado 8 y 8.1). Para ello es importante marcar una serie de pautas y acciones destinadas al frotador, con tal de conseguir un menor desgaste del frotador y al mismo tiempo una superficie de contacto menos agresiva y menor presencia de impurezas.

Por lo tanto el propósito de este apartado es plantear un rediseño del frotador que minimice el desgaste de transición en el cambio de Cu-Cr-Zr a grafito y el impacto económico en ambas empresas, la encargada de gestionar la infraestructura y la delegada a operarla.

Si la propuesta soluciona la rugosidad del hilo de contacto, puliendo la superficie de la huella y mantiene el desgaste de la banda del la pletina en mínimos, consiguiendo recorrer el mayor número de kilómetros, habrá conseguido cumplir todas las expectativas.

8.2.1. Características de la propuesta a tener en cuenta

La propuesta ha de tener en consideración todas las características de la catenaria planteadas en la propuesta 1 (apartado 8.1.2), además de las propias derivadas de las pletinas.

- **Tiempo destinado al rediseño < Tiempo destinado al mantenimiento**

El rediseño del frotador genera un tiempo destinado para observar el estado de este, sin embargo no puede generar un incremento del tiempo que ya se destina para el pantógrafo. Por lo que tendría que ser una inspección visual rápida. Tiempo que se puede conseguir a lo que corresponde engrasar las mesillas con los frotadores de Cu, ya que los de grafito no necesitan ser engrasados.

- **Precio del rediseño < Coste del frotador**

Los materiales para implementar la mejora no deben superar el precio del frotador. Por lo que tendría que estar en consonancia con los beneficios que aporte. Por ejemplo, si mejora la durabilidad de los frotadores en un 10%, el coste de este rediseño no puede superar el 10% del precio del frotador.

- **Nº operarios para realizar las modificaciones \leq Nº necesarios para cambiar un pantógrafo**

Actualmente, el operador de la red prepara los frotadores de Cu-Cr-Zr en los esquís antes de que las locomotoras entren a taller, por lo que las modificaciones al frotador las han de realizar con el mismo procedimiento.
- **Adaptabilidad de los frotadores existentes**

Imprescindible para evitar un encarecimiento del sistema y utilizar los recursos existentes. Mejor realizar modificaciones que no comprar nueva maquinaria que no se puede reutilizar en un futuro. Los frotadores no podrán sufrir modificaciones para no modificar sus características. Cumpliendo la normativa pertinente.
- **Reconocimiento de la dirección del pantógrafo**

Dependiendo de la locomotora, puede tener un pantógrafo para ambas direcciones o tener un pantógrafo para cada dirección. Para no gastar más recursos de los necesarios, las locomotoras que tienen un pantógrafo para cada dirección solo necesitarán modificar un lado del frotador. El resto de locomotoras modificará ambos lados del frotador.
- **Fácil de fabricar**

Al ser un rediseño específico, las piezas que forman propuesta 2 han de ser fáciles de fabricar para no incrementar los costes, ya sea en los talleres de Empresa Operadora en VNG o algún taller contratado.
- **Fácil montaje**

El tiempo es una variable muy importante a tener en cuenta dentro de las labores de mantenimiento, por lo que su montaje deberá ser sencillo y sistemático.
- **Mínima instrucción al operario**

Todo nueva instrumentación, sistema o producto, necesita un mínimo conocimiento previo por parte del operario, mientras más complicado sea la propuesta más horas de instrucción se necesitarán por lo que ha de ser sencilla.
- **Condiciones de trabajo del tren**

El rediseño ha de ser capaz de soportar las mismas condiciones de trabajo que soporta actualmente. (Velocidad del tren, electrificación, temperatura del cable, roce con el H.C., golpes contra la catenaria y meteorología).

8.2.2. Características del frotador

Antes de plantear un nuevo rediseño de pletina hay que marcar unas máximas.

- **El peso de la mesilla**

La pletina modificada ha de variar el mínimo peso posible respecto las existentes, debido que el comportamiento de la mesilla es distinto. Perjudica un incremento de peso y beneficia lo opuesta, ya que en caso de despegues recupera antes la posición de equilibrio del sistema.

- **Aerodinámica**

Aspecto muy importante a tener en cuenta a velocidades altas (superior a 200 km/h). Aunque en la R2 Sud de *Rodalies* no se da el caso de estas velocidades, también afecta a menor escala. Por este motivo, no ha de crear más turbulencias o resistencia al paso del viento.

- **Suspensión**

En relación al peso, evitar variar este, ya que cuantas más diferencias plantee la propuesta, más cambios solicitará la mesilla o el pantógrafo.

- **Materiales**

Relacionado con el peso. Además, importante que no sea capaz de absorber los impactos horizontales y verticales producidos por los defectos en el hilo de la catenaria.

- **Dimensiones**

Proporcionales a las pletinas actuales.

- **Función**

La pletina ha de seguir desarrollando su función principal, conector del tren con la red eléctrica.

8.2.3. Referente

La propuesta de rediseño de un pletina, toma como origen un elemento existente, a la cual se estudia la posibilidad de adaptar una serie de funciones extras. En este caso, consiste en sanear el hilo de contacto, además de alargar la vida útil de las pletinas.

Para ello se realiza un análisis previo, para analizar cuál es el mejor modelo de pletina (frotador) para mejorar.

No obstante, se analiza el comportamiento de las pletinas *kasperowski* y se concluye que teóricamente realiza la misma función que se pretende conseguir con la propuesta 2. Sin embargo, la construcción de la misma y los materiales empleados consigue el efecto contrario.

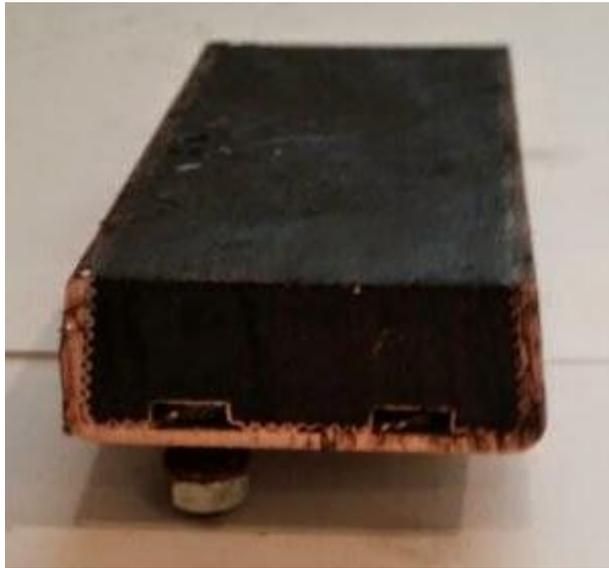


Figura 106: Sección pletina kasperowski.

Tal y como se observa, consiste en una banda de contacto hecha de grafito (carbono) embutido en un perfil de cobre con forma de U, el cual llega hasta arriba del lateral. Con lo que se consigue que el perfil de cobre este en contacto directo con el hilo de contacto.

El estudio concluye que el cobre en los laterales de la pletina no realiza una función satisfactoria, ya que genera más problemas que beneficios. El objetivo es que actué como una cuchilla y limpie la superficie de la huella del hilo de contacto para cuando pase el grafito no encontrar tanta rugosidad.

Sin embargo, cuando se produce un flash, este cobre funde y es el grafito quien sufre todos los percances de este.

Además, este cobre tiene más posibilidades de generar un arco eléctrico que una pletina de cobre normal, ya que cuando el mismo cobre se desgasta (debido al motivo que sea) y el grafito todavía tiene margen, se genera un micro espacio propicio para generar arco eléctrico y agravar los problemas.

Las perlas que puedan surgir pueden quedar atrapadas entre el perfil y el grafito, arrastrando un elemento que raya al hilo de contacto, agravando todavía más el problema.

En el "Anexo E" se recoge un conjunto de planos de los diferentes modelos de pletinas existentes, las cuales se han analizado.

8.2.4. Descripción de la propuesta 2

Tal y como se ha comentado anteriormente, se toma como pletina a mejorar las correspondientes a la colocación en las tres fases que se tendrá acabo en el mes de Septiembre.

Se tomaría esta dedicación para no incrementar los costes todavía más y poder utilizar el material que tendrán.

Como se puede observar en la figura 106, están formadas por un soporte de cobre. Este acata como una pinza para agarrar la pletina de grafito. El espacio de trabajo del frotador no interviene el cobre, ya que no realiza contacto directo con el hilo de contacto.

Uno de los motivos por el cual se producen los flashes son los despegues del frotador respecto la catenaria. Por este motivo, sería importante analizar a partir de que distancia se produce arco eléctrico.

Ya que, cuando el grafito haya desgastado, aunque no gaste lo suficiente como para que el cobre que actúa de pinza realice contacto, sí en la pletina *kasperowski* cabe la posibilidad de que produzca arco eléctrico por la cercanía de los dos cobres, lo mismo podría ocurrir en los modelos de las pletinas de las tres fases.

Para evitar este fenómeno, se tendría que marcar el desgaste de la pletina conforme la distancia mínima entre los dos cobres sin producir arco eléctrico.

Otra opción, sería realizar los frotadores sin cobre, únicamente fabricados de grafito.

Para evitar que el grafito se consuma antes de tiempo, debido a la superficie rugosa del hilo de contacto, se plantea colocar una pantalla delante, de la misma manera que actuaría el perfil U de cobre de las *kasperowski*.

La diferencia se situaría en el material. Este debería ser no conductor, lo suficiente duro para no desgastarse con la rugosidad pero al mismo tiempo ha de garantizar el contacto del grafito con el cobre de la catenaria. Es decir, debe tener propiedades de desgaste compatibles con el grafito.

Al no ser conductor, no generaría la problemática que tiene las *kasperowski*.

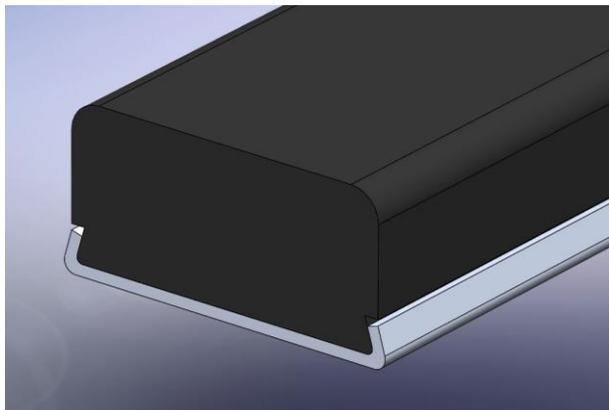


Figura 107: Perfil de las fases.

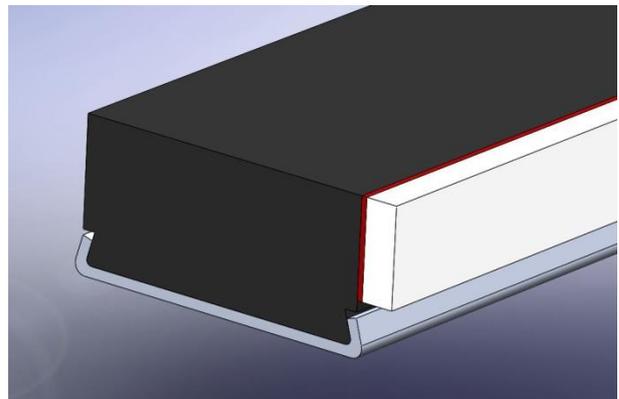


Figura 108: Perfil de las fases, modificado 1.

Además, debe ser capaz de soportar el calor y la radiación emitida por chispas eléctricas (flashes) y sin deterioro; debe ser resistente a cualquier condición climática, incluyendo específicamente, el hielo y las temperaturas bajo cero, y no debe descomponer a altas temperaturas (como ocurre durante, el calentamiento de un tren parado).

También, debe ser suficiente para soportar los choques contra imperfecciones del cobre, pero lo suficientemente suave para deformarse y absorber la energía; y debe ser capaz de ser fijada permanentemente al grafito.

La pantalla protectora tendría que ser una almohadilla elástica absorbente de impactos, enganchada al grafito mediante un adhesivo de caucho de silicona vulcanizado, para que este conserve su elasticidad en frío y en caliente. No se especifica los materiales por falta de profundización en la propuesta, por lo tanto, podría proponerse cualquier otro material.

FROTADORES



Figura 109: Evolución de la propuesta 2.

Como los pantógrafos pueden circular en las dos direcciones y también para equilibrar la mesilla, sería conveniente colocar las pantallas protectoras a ambos lados.

8.3. MEJORA DE LA MAQUINARIA DE ENSAYO DE INTERACCIÓN

En este apartado del proyecto se trata de proponer unas mejoras a un sistema de maquinaria de un laboratorio de Suiza que simula la interacción entre el pantógrafo y la catenaria de una estructura ferroviaria.

Los principales requisitos del sistema de simulación son:

- La velocidad relativa entre el pantógrafo y el hilo de contacto debe ser controlable.
- El movimiento en zigzag debe ser controlable.

Es muy importante exponer que lo que pretendían con el simulador en el laboratorio de Suiza era estudiar y observar los arcos producidos durante la interacción sobre todo con la existencia de capas de hielo en el hilo de contacto. En cambio en la línea R2 Sud hay problemas de desgaste en el hilo de contacto y también en el frotador del pantógrafo. En este caso se tendría que cambiar y mejorar pequeñas propiedades de la máquina simuladora para que se adapte a las condiciones de trabajo que suceden en la línea R2 Sud.

A la continuación se podrá observar y estudiar este sistema tal y como está en la actualidad y después se verán las mejoras propuestas para que el procedimiento sea más real.

8.3.1. Sistema de simulación actual

A la figura 110 muestra los detalles esquemáticos del sistema de simulación construido en Suiza donde se estaba estudiando los arcos eléctricos formados entre el frotador del pantógrafo y el hilo de contacto.

La rueda grande hace la función del hilo de contacto que está fijado a través de una ranura alrededor del borde exterior de la rueda. Esta rueda está impulsada por un motor de velocidad variable que puede variar la velocidad de 0 km/h hasta 160 km/h. El eje principal de la rueda está aislado de manera que la corriente del motor no se extienda en otras partes de la instalación.

El frotador del pantógrafo está instalado en un carro el cual está impulsado por otro motor que mueve linealmente hacia a los dos lados perpendiculares de la rueda grande imitando así el movimiento de zigzag que se produce en la interacción entre hilo de contacto y pantógrafo.

Para simular el suministro de la corriente de alta tensión que pasa por la catenaria se hizo una gran maquinaria eléctrica rotativa, que entrega energía eléctrica entre la escobilla de tierra y el frotador del pantógrafo (suministro HV).

Se puede proporcionar un voltaje casi constante para cada prueba de una duración de aproximadamente 10 segundos. El suministro de alta tensión varía entre 2 kV y 5 kV en corriente continua (DC) y también el corriente alterna (AC). En el “Anexo I” se puede ver con más detalles el funcionamiento de este suministro.

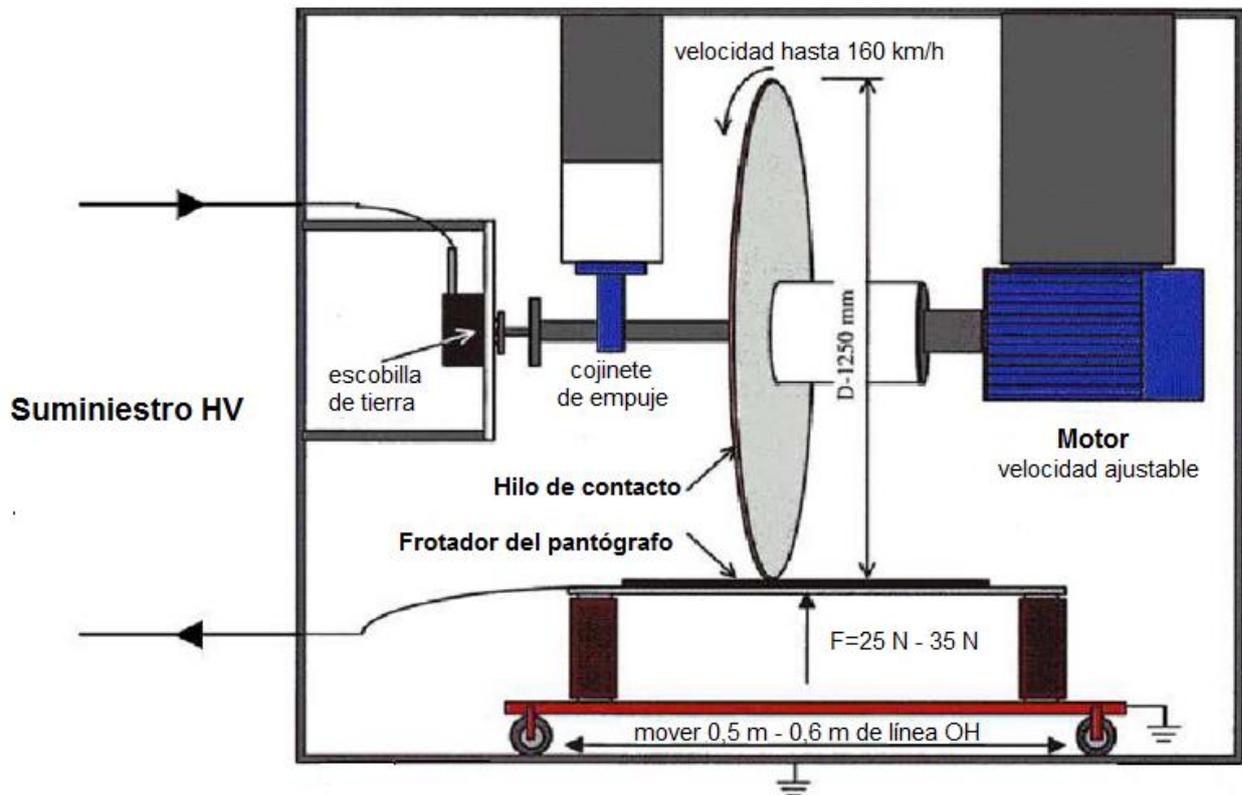


Figura 110: Esquema de la configuración experimental del sistema de simulación entre pantógrafo y catenaria.

Se han hecho muchas pruebas con este experimento sobre todo con frotadores de pantógrafo de grafito y así se podían obtener graficas y conclusiones relacionados con el arco que se produce entre el pantógrafo y la catenaria. Todos los resultados de estos experimentos se pueden encontrar con más detalle en los artículos del “Anexo I”.

8.3.2. Mejoras y adaptaciones del sistema

Como se puede ver en el apartado anterior los experimentos hechos en Suiza se realizaron para observar y estudiar el fenómeno de los arcos eléctricos. En cambio este proyecto se basa en el desgaste que hay entre pantógrafo e hilo de contacto. Por estos motivos se han de realizar unas mejoras y adaptaciones para que los experimentos giren en torno del desgaste.

Analizando el esquema del simulador se puede observar que la rueda grande que simula la catenaria tiene un diámetro de 1250 mm. Con un diámetro de 1250 mm se tiene suficiente si se quiere simular un frotador del pantógrafo de 25 mm de amplitud, así la superficie de contacto de ambos fragmentos se tocaran constantemente. Explicándolo mejor, es que la rueda tiene que ser suficientemente grande porque se quiere simular como si el hilo de contacto fuera totalmente horizontal al frotador tal y como se ve en los cálculos y esquemas siguientes:

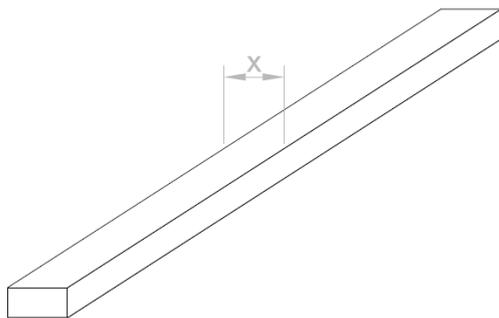


Figura 111: Frotador del pantógrafo de "x" mm de amplitud.

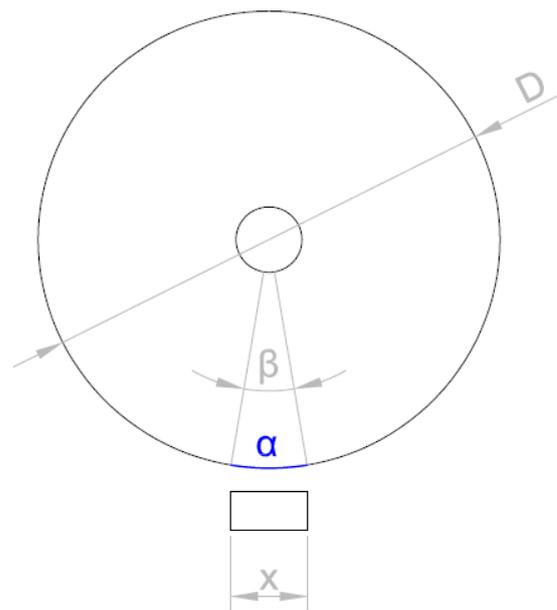


Figura 112: Esquema de contacto entre rueda y frotador.

Para que la simulación se acerque al máximo posible a la realidad y la rueda pueda representar un hilo de contacto soberano se tendría que cumplir que $\alpha \approx x$. Por lo tanto el arco " α " tendría que tener la misma medida que el plano " x ", pero si $\alpha > x$ es mejor ya que como más grande sea el arco " α " respecto al plano " x " el simulador será más real.

Como calcular el diámetro de la rueda grande sabiendo las medidas de la superficie de contacto y que existen diferentes amplitudes de frotadores como por ejemplo: frotadores de Cu-Cr-Zr y de Cu-ETP son de 25 mm y frotadores de grafito de 52 mm de amplitud.

Para realizar los cálculos se hizo un programa con el "Microsoft Office Excel" donde se calculaba el mínimo diámetro "D" que debería tener la rueda grande dependiendo del superficie de contacto o mejor dicho el plano "x".

Demostración de los cálculos para el diámetro "D" mínimo de la rueda basando en las figuras 112 y 113.

Inicialmente se sabe que:

$$\left. \begin{array}{l} \alpha \approx x \rightarrow \alpha = x \text{ donde } x \text{ es conocido} \\ R = \frac{D}{2} \text{ o bé } D = 2 \cdot R \\ \text{La longitud de un arco: } \alpha = \beta \cdot R \end{array} \right\} \rightarrow 2\alpha = \beta \cdot D \quad [EQ1]$$

Con el teorema de coseno del triangulo isósceles se puede encontrar el ángulo β .

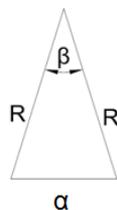


Figura 113: Triangulo isósceles.

$$\begin{aligned} \alpha^2 &= R^2 + R^2 - 2 \cdot R \cdot R \cdot \cos\beta \rightarrow \\ &\rightarrow \alpha^2 = 2R^2 - 2R^2 \cdot \cos\beta \rightarrow \\ &\rightarrow \cos\beta = \frac{2R^2 - \alpha^2}{2R^2} \rightarrow \\ \beta &= \cos^{-1} \left(\frac{D^2 - \alpha^2}{D^2} \right) \quad [EQ2] \end{aligned}$$

Cuando se obtiene la EQ2, gracias al programa "Microsoft Office Excel" se asignan valores al diámetro "D" hasta que la diferencia entre el plano y el arco no superen el 0,001 mm.

$$x - \alpha \leq 0,001$$

Lo ideal sería $x=\alpha$ y entonces la diferencia entre ambos daría cero. Se ha cogido la diferencia de 0,001 mm porque con tan poca diferencia ya se acerca bastante a la realidad. Sí la diferencia tendría que ser cero, el diámetro de la rueda grande se dispararía mucho. Por tener una idea con el frotador del pantógrafo de grafito de 52 mm de amplitud el diámetro de la rueda tendría que ser mínimo de 3.954 mm con la diferencia de "x" y "α" de 0,001 mm. En cambio con diferencia de cero el diámetro se dispara y tendría que ser de 6.848 mm.

Como último se puede añadir que la rueda en este caso no sería totalmente cilíndrica para intentar simular las flechas y desperfecciones del hilo de contacto real sobre las vías.



Otro aspecto a tener en cuenta a la hora de mejorar y adaptar para el desgaste este sistema de simulación de interacción sería la refrigeración del hilo de contacto. Funcionaría de tal manera que pasaría un circuito de refrigeración basado a los principios de termodinámica y mecánica de fluidos diseñado para transferir energía térmica. El sistema sería termodinámicamente cerrado y pasaría desde el eje de la rueda por los radios hasta llegar al borde de la rueda donde se encuentra el hilo de contacto.

Finalmente se podría adaptar el sistema para que pueda simular catenaria rígida y catenaria flexible. Se ha pensado que para la simulación de catenaria flexible poner unos muelles en el carro donde está el frotador del pantógrafo para que el sistema tenga más margen de balanceo. En cambio sería desactivar estos muelles y hacer que la estructura sea más rígida cuando se requiere simular catenaria rígida.

8.4. ACCIONES PARA EL FUTURO

Las acciones a corto plazo más probables y factibles, son las presentadas hasta ahora. Un rediseño del frotador, un tratamiento al hilo de contacto, sustituir el cobre-cromo-zirconio de los frotadores por grafito y/o realizar un estudio en profundidad de la fuerza estática que deberían llevar los pantógrafos.

A largo plazo, quizás habría que buscar la utilización de nuevos materiales que incrementen los beneficios que incorporan el grafito actualmente. Como por ejemplo, la utilización del grafeno o algún compuesto a base de este.

Otro, más importante dada la situación, sería un rediseño por completo de la mesilla, debido a la incorporación de la catenaria rígida. Con el objetivo de que el pantógrafo presente un buen comportamiento en los dos tipos de catenaria.

Una opción, la cual todavía estaría por ver si es factible, sería la utilización de trenes con carga inalámbrica. Los cuales no necesitan el uso de catenaria para funcionar, por lo tanto no tendrían problemas de desgaste entre pantógrafo y catenaria (debido a la inexistencia de los mismos). No obstante, sería la opción más cara. Ya que significaría una nueva infraestructura y de nuevas locomotoras.

Volviendo a un futuro más cercano, si la opción del grafito resulta gratificante, se podría aprovechar ese periodo de relativa calma para una reorganización del taller. Acondicionar nuevas aéreas de trabajo o implementar nuevas herramientas. Como por ejemplo un lugar para tarar los pantógrafos con técnicas más sofisticadas.

9. CONCLUSIONES

El análisis llevado en curso ha contribuido de manera muy importante para focalizar algunas de las potenciales causas al origen del problema de excesivo desgaste de los elementos encargados de realizar la interacción entre pantógrafo – catenaria.

A su vez, el proyecto deja algunas líneas para investigar y reforzar todavía más las causas propuestas. Otras líneas planteadas sirven para proponer posibles soluciones a este problema o semejantes.

La resolución del problema no se puede considerar un éxito ni un fracaso, debido a que no se han llevado a realización las posibles mejoras planteadas ni tampoco se han modificado o analizado al completo las causas.

Las causas que consideramos tienen más importancia dentro del problema de esta naturaleza están redactadas en hipótesis según resuelve cada uno de los miembros del equipo del estudio.

Las causas en las que se coincide en la mayoría de las opiniones son el uso de diferentes materiales tanto en hilo de contacto como en frotador, el uso de catenaria rígida y el incremento del servicio de la línea.

El uso de diferentes materiales como medida para intentar solucionar el problema en unas de las partes a supuesto que el problema del desgaste inicial se trasladase a toda la línea R2 Sud y parte de otras líneas de *Rodalies*, al mismo tiempo que se trasladaban a las pletinas. El comportamiento de este problema hizo que fuese aumentando su gravedad de manera independiente y periódica.

El uso de la catenaria rígida cambio las reglas del juego, ya que las características ofrecidas por esta catenaria no se asemejan a las características de la catenaria flexible CA-160. El objetivo de la utilización de la catenaria rígida era mejorar las cuentas económicas de una de las dos empresas, sin embargo tuvo el efecto contrario y afecto a las dos empresas de manera opuesta al objetivo.

El incremento de la línea no se trato como se debía, ya que aumentaron el servicio sin procurar no sobrepasar la carga de trabajo del hilo de contacto.

Entonces, se necesita mejorar o rediseñar la catenaria y el pantógrafo para hacer frente a la situación actual del servicio tanto en demanda de usuarios como en disposición de infraestructura.

Como se menciona a lo largo de esta memoria, una de las soluciones planteadas consiste en la implementación de un nuevo material en los frotadores, grafito con impregnación de cobre.

Para que sea exitosa esta propuesta de solución, sería conveniente realizar alguna implementación más, a pesar de que se desconozca el resultado real de la misma sin variación. Además, debido al coste de la misma, no estaría de más intentar asegurar el éxito de la misma realizando algunas de las siguientes propuestas.

La primera de ellas, realizar un tratamiento de mantenimiento al hilo de contacto. Como primera sospechosa. Este consistiría en reducir la rugosidad, tal y como se detalla en este documento.

La segunda propuesta consistiría en modificar las pletinas para tratar de proteger el material sometido al desgaste de posibles impactos.

Otro punto que se considera clave para realizar un análisis de esta índole, sea cual sea la situación de desgaste. Consiste en seguir el itinerario de cada pantógrafo en relación al desgaste que sufre con la ayuda de imagen enfocado al pantógrafo. El objetivo sería prevenir posibles problemas de desgaste en un futuro, entender mejor el comportamiento del mismo, situar posibles imperfecciones en la línea, corregir posibles desgastes en el hilo, entre otras acciones no menos importantes.

Conforme se fue cursando este análisis nos fuimos percatando de muchas cosas que al principio no se consideraban si eran necesarias y otras que si se consideraban no eran necesarias.

Se observó la importancia de la opinión de todos los usuarios del servicio, como era el caso del maquinista, el cual vive con el problema a diario. Otro sin embargo, que todavía no sea preguntado, es al pasajero, el cual podría ser fuente de información que todavía no se haya planteado.

Por lo tanto, algunas veces, obtener un informe con ciertas características lleva su tiempo.

En consecuencia, la cantidad de fuentes de información varían según las características de la misma, la calidad y la velocidad a la que se genera. Por lo que cierta información solo depende de las empresas que tratan la situación. En la mayoría de posibles causas, solo se ha podido, se puede y se podrá analizar con la colaboración de las empresas implicadas.

Luego, resolver el problema no depende de una sola causa, ni de un solo organismo o persona. Como en la vida real, todo el conjunto participa tanto en la problemática como en la solución. Por ello, utilizar varias soluciones podrá ser la clave del éxito.

Por ende, una vez resuelta la problemática, surgirán nuevas, a las cuales habrá que actuar de ante mano para adelantarse a la consecuencia del posible problema.

En resume a la memoria, las posibles causas propuestas y las soluciones planteadas cumplen con el objetivo para el que fue formado este equipo de investigación, el cual consistía en captar, ordenar y analizar toda la información posible que ayudase a formar una teoría sobre el origen, además si se disponía del tiempo suficiente, proponer posibles soluciones. De tal forma, solo consistía en abrir camino de investigación para futuros equipos que trabajen en el tema de desgaste excesivo en la interacción entre catenaria – pantógrafo.

Recordar, en la pagina 231 se localiza el inicio de las “Hipótesis”, apartado 7, el cual explica las posibles causas que opina cada uno de los miembros del equipo encargados del estudio de desgaste en la interacción pantógrafo – catenaria.

10. PRESUPUESTOS

En el siguiente apartado se detalla el coste económico que ha tenido realizar el estudio de este problema. Incluye los gastos de los ensayos de materiales, los viajes realizados a distintas instalaciones y los gastos derivados para la realización de la memoria.

REDACCIÓN DEL TRABAJO FINAL DE GRADO / CARRERA			
Concepto	Coste ud /€	Tiempo total /h	Coste total /€
Ingeniero de diseño industrial			
<i>Horas de formación (15%)</i>	6	126	756
<i>Horas de experimentación</i>	50	714	35.700
Ingeniero de diseño industrial			
<i>Horas de formación (15%)</i>	6	126	756
<i>Horas de experimentación</i>	50	714	35.700
Ingeniero de mecánica			
<i>Horas de formación (15%)</i>	6	126	756
<i>Horas de experimentación</i>	50	714	35.700
Ingeniero de mecánica			
<i>Horas de formación (15%)</i>	6	126	756
<i>Horas de experimentación</i>	50	714	35.700
Ingeniero de automática			
<i>Horas de formación (15%)</i>	6	126	756
<i>Horas de experimentación</i>	50	714	35.700
		Subtotal	182.280
Amortización	10%		18.228
		Subtotal 2	200.508
	21% IVA		42.106,68
		TOTAL	242.614,68 €

MATERIAL PARA ENSAYOS			
Concepto			Coste total /€
Hilo de contacto (consumible)	€/kg	Cantidad /kg	
<i>Cobre-plata 0,1 (nuevo) 107</i>	9,06	0,35840	3,25
<i>Cobre electrolítico (nuevo) 107</i>	7,80	1,43360	11,19
<i>Cobre electrolítico (nuevo) 120</i>	8,2	0,71680	5,88
<i>Cobre-plata 0,1 (usado) 107</i>	9,06	0,71680	6,49
<i>Cobre electrolítico (usado) 107</i>	7,80	2,86720	22,36
<i>Cobre-plata 0,1 (usado) 120</i>	10,19	0,35840	3,65
<i>Partículas</i>	5,56	0,1	0,56
Subtotal 1.1			53,37
Pletinas (muestras)	€/ud	Cantidad /ud	
<i>Cromo-cobre-circonio</i>	51,89	1	51,89
<i>SK85Cu</i>	179,00	1	179,00
<i>Kasperowski</i>	800,00	1	800,00
Subtotal 1.2			1.030,89
Grasas, polvos, etc.	€/kg	Cantidad /kg	
<i>Grasa para catenaria</i>	-	-	-
<i>Polvos para las probetas</i>	3.000,00	0,025	75,00
Subtotal 1.3			75,00
Otros	€/ud	Cantidad /ud	
<i>Grifas</i>	24,00	2	48,00
Subtotal 1.4			48,00
Subtotal 1			1.207,59
Amortización	10%		120,75
Subtotal 2			1.328,34
	21% IVA		278,95
TOTAL			1.607,29 €



PERSONAL EN LOS ENSAYOS			
Concepto	Coste ud/€	Tiempo total /h	Coste total /€
Operarios cualificados			
<i>Técnico superior</i>	90	15	1.350,00
<i>Técnico especialista</i>	42	16	420,00
Subtotal 1.1			1.770,00
Operarios sin cualificar			
<i>Alumno 1</i>	9	20	180,00
<i>Alumno 2</i>	9	20	180,00
<i>Alumno 3</i>	9	17,5	157,50
<i>Alumno 4</i>	9	17,5	157,50
<i>Alumno 5</i>	9	5	45,00
Subtotal 1.2			720,00
Subtotal 1			2.490,00
Amortización	10%		249,00
Subtotal 2			2.739,00
	21% IVA		575,19
TOTAL			3.314,19 €



ANÁLISIS DE LAS MUESTRAS			
Concepto			Coste total /€
	Coste ud/€	Cantidad /ud	
SERVO-hidráulica METRO-COM	85,30	6	514,80
Durómetro EMCO M4U-025	57,67	6	346,00
Probetas metalografías	20,00	5	100,00
Subtotal 1.1			960,80
	Coste ud/€	Tiempo total /h	
Microscopio óptico	125	1	125,00
Microscopio electrónico	215	2	430,00
Subtotal 1.2			555,00
Subtotal 1			1.515,80
Amortización	10%		152,00
Subtotal 2			1.667,38
	21% IVA		350,15
TOTAL			2.057,53 €

VIAJE A MADRID (SCHUNK) - 19/06/2014			
Concepto	Coste ud /€	Núm. Viajeros	Coste total /€
Coste del billete de ida (Salida 8:00 h)			
<i>AVE (3 h, 10 min) turista</i>	89,60	8	716,80
Coste del billete de vuelta (Salida 18:00 h)			
<i>AVE (2 h, 30 min) turista</i>	125,90	8	1.007,20
TOTAL			1.724,00 €



PERSONAL EXTRA			
Concepto	Coste ud/€	Tiempo total /h	Coste total /€
Relaciones públicas	25	30	750,00
Subtotal 1			750,00
Amortización	10%		75,00
Subtotal 2			825,00
	21% IVA		173,25
TOTAL			998,25 €

SUMA DE TODAS LOS CONCEPTOS	
Concepto	Coste total
Redacción de la memoria del Trabajo Final de Grado / Carrera	242.614,68 €
Material para ensayos	1.607,29 €
Personal en los ensayos	3.314,19 €
Análisis de las muestras	2.057,53 €
Viaje a Madrid (SCHUNK)	1.724,00 €
Personal extra	998,25 €
TOTAL	252.315,94 €

11. AGRADECIMIENTOS

Podría ser un apartado banal, pero ésta es una de las partes más delicadas del informe, ya que resulta muy complicado ser agradecido sin resultar pedante o caer en tópicos que lejos de ser sinceros, provocan el efecto contrario del deseado, quedando como un trámite más dentro de una burocracia hueca y vacía.

El presente proyecto es un esfuerzo en el cual directa o indirectamente, participaron varias personas. Corrigiendo, opinando, aportando conocimientos, teniendo paciencia, dando ánimos, acompañando en los momentos de crisis y de felicidad.

Por todo ello y más, se ha querido agradecer con la más profunda y cordial sinceridad al Sr. Ignasi Perat, nuestro tutor, por haber confiado en el grupo que se formó a principios del año 2014. Por la paciencia y la dirección de este trabajo. Gracias por darnos la oportunidad de vivir un proyecto de esta magnitud, donde hemos experimentado y aprendido mucho. Agradecerle las gestiones que ha realizado porque sin él todos coincidimos en que este proyecto no hubiera sido posible.

Gracias a todo el equipo SCRUM por el empeño, la preocupación y los ánimos que siempre hemos sentido de su parte.

Así mismo también queremos agradecer al personal del Museo del Ferrocarril de *Vilanova i la Geltrú*. Pilar García (Directora) y al personal que allí trabaja por ayudarnos en la búsqueda de información y abrirnos las puertas del museo para lo que se ha necesitado.

Por otro lado, nos gustaría mencionar a las partes implicadas en el problema que se ha analizado, ya que sin ellos habría resultado imposible de realizar el presente análisis.

Por un lado al personal de ADIF. Carlos Sarabia (Jefe del Área de Mantenimiento Barcelona) y Estefanía Jorge (Técnico de Electrificación), agradecerles su tiempo y colaboración, aunque un trato más cercano hubiese resultado más efectivo para resolver algunas cuestiones.

Por parte de RENFE, destacar la ayuda de Luis Miguel De La Pinta Maldonado (Jefe Técnico de Taller) y Pilar Ibarz Padrosa (Jefe de Servicios de Ingeniería). Darles las gracias por toda la información facilitada, por la colaboración en lo que se ha necesitado en todo momento y el interés constante por el avance del estudio, llegando a ofrecer para resolver las dudas que nos pudieran surgir, ofreciendo de su propio tiempo personal. Agradecimientos para el personal de mantenimiento por su colaboración.



Reconocer a Francesc Castaño (Comercial de la Empresa SCHUNK), por su dedicación y atención. Dar las gracias a los empleados de SCHUNK IBERICA, S.A. por el trato exquisito que tuvimos en la visita a la empresa de pantógrafos en Pinto, Madrid. En especial atención para Jesús Durango (Dirección Técnica), Homero Romero (Responsable de Pantógrafos), Joaquín Ruiz (Calidad), Tomás García (Desarrollo y Planificación) y Enrique Muñoz (Gerencia).

A Josep Perlesía Giol (Doctor Ingeniero Industrial) por aportar valiosas observaciones que en todo momento guiaron el presente estudio. Por reforzar los ánimos en los momentos precisos y su vista general del análisis.

Nos gustaría mencionar al maquinista de cercanías Luis y al encargado de dirección de FGC, Santiago Soriano. Por darnos su punto de vista a cerca del problema, así como sus propias experiencias y conocimientos acerca del grafito, además de todos los otros temas relacionados con el mundo del ferrocarril.

Corresponder al departamento de Ciencia e Ingeniería de Materiales de la Escuela Politécnica Superior de Ingeniería de *Vilanova i la Geltrú*. Sergi Menargues, Enric Martin y Josep A.Picas, porque sin su ayuda no hubiese sido posible realizar los ensayos de materiales. Gracias por vuestro tiempo y atención.

Por último agradecer a la Escuela Politécnica Superior de Ingeniería de *Vilanova i la Geltrú*. Por haber sido nuestra casa todos estos años y habernos dado la formación necesaria para enfrentarnos al mundo real.

12. BIBLIOGRAFÍA

Hay que tener en consideración, que mucha de la información que se encuentra a lo largo del informe se extrajo de conversaciones, reuniones, visitas y entrevistas efectuadas a lo largo del periodo del mismo trabajo con las empresas implicadas o relevantes al caso.

- [1] «WIKIQUOTE,» [En línea] Available: http://en.wikiquote.org/wiki/Talk:Albert_Einstein.
[Consultado: 30 de Mayo de 2014]

12.1. LIBROS

- [2] Dr. Zorkócky Béla. *Metalografía és anyagvizsgálat*. Budapest: Tankönyvkiadó, 1980.
ISBN: 9631752577
- [3] E. Paul DeGarmo, J. Temple Black, Ronald A. Kohser. *Materiales y procesos de fabricación*. Sevilla: Editorial Reverté, 1994. ISBN: 84-291-4822-1
- [4] Lluís Miquel Tuells Moreno; Institut d'Estudis Vallencs. *El Ferrocarril a Valls: 125 anys del trajecte Valls-Vilanova-Barcelona*. 5ª Edición; Barcelona: Institut d'estudis Vallencs, 2009. ISBN: 9788486083656
- [5] Miquel Altadill i Giner. *Francesc Gumà i Ferran: El somni del ferrocarril fet realitat*. Barcelona: l'autor, 2003
- [6] Manuel Romero García. *Resistencia de Materiales* Castellón: Publicaciones de la Universidad Jaume I, D.L., 2002. ISBN: 84-8021-384-1
- [7] Edicions de la Universitat Politècnica de Catalunya, SL. *Mecánica de estructuras: Resistencia de materiales*. Barcelona: Ediciones UPC, 2001.
ISBN: 84-8301-622-2
- [8] Antonio Arellano Pulido. *Dimensionamiento del sistema de sustentación de catenarias ferroviarias*. Madrid: Universidad politècnica ICAI, 2011

12.2. CATÁLOGO

- [9] Catalog No. ET 03.364.158.0, Conductor de Cobre Desnudo, ADIF, Madrid, España
- [10] Catalog No. ET 03.364.159.8, Cable Cobre Débil Aleados, ADIF, Madrid, España
- [11] Catalog No. ET 03.364.291.9, Hilo Ranurado, ADIF, Madrid, España

12.3. MANUAL

- [12] Manual No. 4-5528-6, Pantógrafo de Semitijero Modelo: WBL 85-12 de 3 kV,
SCHUNK IBÉRICA, S.A., Pinto, Madrid, España

12.4. REVISTAS

- [13] «La Farga Lacambra,». *Railway products Advanced Materials*. Barcelona, 2009
- [14] *Diari de Vilanova*, Vilanova i la Geltrú, 1998
- [15] «La Farga Group,». *Informe de sostenibilidad*. Barcelona, 2007
- [16] Gustavo Riera. «El sistema de refrigeración,» 2008

12.5. PÁGINAS WEBS

COMPARACIÓN PANTÓGRAFOS

- [17] «SABELOTODO,» Automóvil, Suspensión. [En línea]
Available: <http://www.sabelotodo.org/automovil/suspension.html>.
[Consultado: 30 de Marzo de 2014].
- [18] «RENFE,» Nuestros trenes [En línea] Available:
http://www.renfe.com/viajeros/nuestros_trenes/md592_ficha.html. Nuestros trenes
[Consultado: 12 de Abril de 2014].

ENSAYOS DE LOS MATERIALES

- [19] «FEUP,» Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto; Ensayos mecánicos, ensayo de dureza [en línea] Available: <http://paginas.fe.up.pt/~jcouti/8-05%20dureza.pdf>
[Consultado: 14 de Mayo de 2014].

PROCESOS DE FABRICACIÓN

- [20] «CONMETALL,» Contenidos, Productos barras [en línea]
Available: http://www.conmetalltda.cl/contenidos/productos_barras1.html
[Consultado: 16 de Mayo de 2014].
- [21] «ECURED,» Deformación metales [en línea]
Available: http://www.ecured.cu/index.php/Deformaci%C3%B3n_de_metales
[Consultado: 24 de Mayo de 2014].
- [22] «Traidvillarroya,» Colada continua [En línea] Available:
<http://www.traidvillarroya.com/colada-continua.htm>. [Consultado: 25 de Mayo de 2014].

ENLACES WEB PROPUESTA 1 Y 2

- [23] «ROBEL,» Productos, Maquinaria Pequeña [en línea] Available:
<http://www.robelt.info/es/products/index.asp?kat=Maquinaria+Peque%C3%B1a%3A>
[Consultado: 07 de Mayo de 2014].

- [24] «ROBEL,» Productos, Maquinaria Pequeña, Esmerilar [En línea] Available: <http://www.robel.info/es/products/index.asp?kat=Maquinaria+Peque%C3%B1a%3A+Esmerilar&einsatz=Maquinaria+Peque%C3%B1a%3A&stichwort=&cfilter=#indexfilter> [Consultado: 07 de Mayo de 2014].
- [25] «RAILAREA,» Maquinaria para mantenimiento de infraestructuras, Vehículo amolador de carril Tren esmerilador [en línea] Available: <http://www.railarea.com/site/?act=cms&cid=12&id=41> [Consultado: 14 de Mayo de 2014].
- [26] «RAILTECH,» Maquinaria auxiliar, Maquinaria motor a gasolina para la aplicación de soldadura y el mantenimiento de la vía [en línea] Available: <http://www.railtech.com.mx/maquinariaauxiliar.htm> [Consultado: 14 de Mayo de 2014].
- [27] «PLASSER&THEURER,» Maquinas-sistemas, Tratamientos móvil de carriles SBM250 [en línea] Available: <http://www.plassertheurer.com/es/maquinas-sistemas/tratamiento-movil-carriles-sbm-250.html> [Consultado: 14 de Mayo de 2014].
- [28] «VOSSLOH,» Product services, High speed grinding [en línea] Available: http://www.vossloh-rail-services.com/tr/products_services/high_speed_grinding/high_speed_grinding.html [Consultado: 14 de Mayo de 2014].
- [29] « Curso ferroviario,» Partes de un carril o riel [en línea] Available: <http://cursoferroviario-trenastur.blogspot.com.es/2009/11/partes-de-un-rail-o-carril.html> [Consultado: 14 de Mayo de 2014].

12.6. PRENSA

- [30] Anon, 2013. Un frotador de carbón para líneas de 3 kVDC sustituye a los tradicionales frotadores de cobre. 06/11/2013. Available at: <http://www.interempresas.net/MetalMecanica/Articulos/115641-frotador-de-carbon-para-lineas-de-3-kVDC-sustituye-a-tradicionales-frotadores-de-cobre.html> [Consultado: 8 de Mayo 2014].