



MÁSTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

TRABAJO FIN DE MÁSTER

DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA PARA ANÁLISIS LA GEOMETRÍA DE LA CATENARIA EN LA ZONA DE AGUJAS (FERROCARRIL)

Autor: Lara López Otero

Director: Joaquín Ramos Rodríguez

Madrid

Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título
Desarrollo de una herramienta para análisis la geometría de la catenaria en la
zona de agujas (ferrocarril)

en la ETS de Ingeniería - ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el

curso académico 2019/20 es de mi autoría, original e inédito y

no ha sido presentado con anterioridad a otros efectos.

El Proyecto no es plagio de otro, ni total ni parcialmente y la información que ha
sido

tomada de otros documentos está debidamente referenciada.

Fdo.: Lara López Otero

Fecha: 29/ 06/ 2020



Autorizada la entrega del proyecto

EL DIRECTOR DEL PROYECTO



Fdo.: Joaquín Ramos Rodríguez

Fecha: 29/ 06/ 2020



MÁSTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

TRABAJO FIN DE MÁSTER

DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA PARA ANÁLISIS LA GEOMETRÍA DE LA CATENARIA EN LA ZONA DE AGUJAS (FERROCARRIL)

Autor: Lara López Otero

Director: Joaquín Ramos Rodríguez

Madrid

Agradecimientos

Este trabajo da por terminado una etapa de mi vida y tengo la obligación de dar las gracias a mucha gente que ha hecho posible que esté hoy aquí.

A mi director de trabajo de fin de Máster, Joaquín, por todo su apoyo y dedicación, gracias por introducirme en el mundo ferroviario.

A mis profesores por su paciencia y constancia, en especial dar las gracias a Félix por su eterna pasión y dedicación a su trabajo y sus alumnos.

A mis compañeros, en especial a mi amiga Ana porque ha sido una persona fundamental para mí estos seis años.

A mi familia, que siempre está ahí para ayudarme, sin ellos no habría sido posible lograrlo.

Me gustaría dedicarle este trabajo a mi abuelo, que ha estado ahí para mí siempre, en todos los momentos buenos y malos, acompañándome hasta ICAI en los exámenes para animarme. Es imposible ser más trabajador y mejor persona que tú, abuelito. Llegar a ser como tú es mi gran aspiración en la vida, aunque me conformo con parecerme solo un poco.

DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA PARA ANÁLISIS LA GEOMETRÍA DE LA CATENARIA EN LA ZONA DE AGUJAS (FERROCARRIL)

Autor: López Otero, Lara.

Director: Ramos Rodríguez, Joaquín.

Entidad Colaboradora: AECOM

RESUMEN DEL PROYECTO

El proyecto consiste en el desarrollo de una herramienta de cálculo y de representación gráfica que permita analizar el correcto diseño geométrico del sistema de catenaria en las cercanías de los desvíos, al ser estas zonas especialmente sensibles.

Palabras clave: Ferrocarril, Catenaria, Desvío

1. Introducción

Un desvío ferroviario permite el desdoblamiento de una vía en dos. La vía que sigue la trayectoria recta se denomina vía directa, y las que cambia de dirección es la vía desviada. Tiene tres partes principales: el cambio, una zona intermedia y el cruzamiento.

Una aguja aérea es un montaje requerido en la catenaria cuando un tren pasa de una vía a otra a través de un desvío, también llamado cambio o aguja. En un tren de tracción eléctrica el pantógrafo tiene que estar conectado a la catenaria en todo momento, por eso se requiere de este montaje para que cambie a la catenaria de la nueva vía.

El diseño de la catenaria en zonas de agujas es complicado porque depende de varios factores.

2. Definición del proyecto

El proyecto trata de desarrollar una herramienta gráfica y de cálculo que tenga en cuenta las particularidades de la zona de agujas para diseñar la línea aérea de contacto adecuadamente.

La herramienta dibujará la zona libre de obstáculos para saber en qué puntos no puede estar la catenaria, ya que en esta zona el pantógrafo podría chocar con algún elemento y esto provocaría que no estuviera en contacto con la catenaria y se produjera un accidente catastrófico.

3. Descripción de la herramienta

La herramienta realizada en Matlab analiza todos los distintos tipos de agujas de la norma inglesa, el Track Design Handbook: NR/L3/TRK/2049/mod03. Seleccionando el tipo de aguja, la longitud de vano y los descentramientos de la vía directa y de la desviada, se muestra la zona libre de obstáculos que aparece en gris claro, para diseñar la catenaria adecuadamente en cada caso.

4. Resultados

Se han dibujado todos los tipos de desvíos que aparecen en el Track Design Handbook. Los resultados se han corroborado con la geometría real.

La catenaria de la vía directa se representa en azul, la de la desviada está en rojo. Se puede ver un ejemplo en la figura que se muestra a continuación, la aguja CEN56E1, AV con ángulo de cruce en 6 (ángulo Xing).

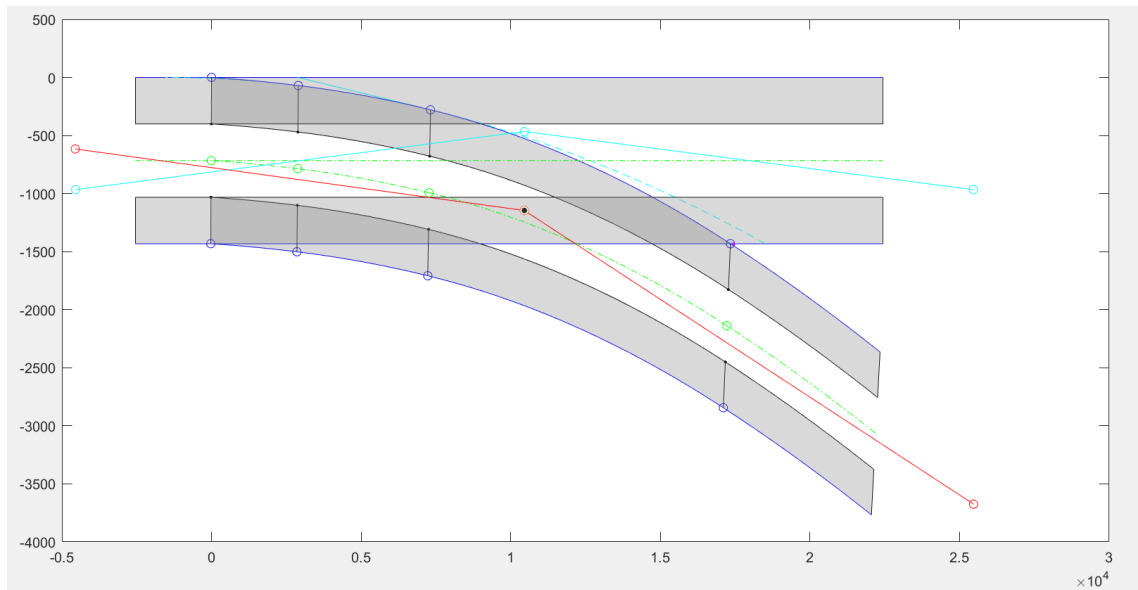


Figura 1 CEN56E1 Vertical S&C, Standard Circular Curve Turnouts, AV Crossing in ~ 6. MATLAB switchtype=1.

5. Conclusiones

Se cumple el objetivo del trabajo, consiguiendo desarrollar una herramienta desde cero con Matlab para ayudar en el diseño de la línea aérea de contacto en la zona de las agujas ferroviarias.

El programa desarrollado permite que se diseñe la catenaria en las agujas ferroviarias, donde anteriormente los softwares existentes no lo permitían.

La herramienta permite diseñar la línea aérea de contacto introduciendo en el programa el tipo de desvío, la distancia del vano y el descentramiento de la vía directa y en la desviada.

DEVELOPMENT OF A TOOL FOR THE ANALYSIS OF THE GEOMETRY OF THE CATENARY IN THE AREA OF RAILROAD SWITCH (RAILWAY)

Author: López Otero, Lara.

Supervisor: Ramos Rodríguez, Joaquín.

Collaborating Entity: AECOM

ABSTRACT

The project consists in the development of a graphic and calculation tool that analyzes the correct geometric design of the catenary system in the proximity of the switches, where its design is extremely sensitive.

Keywords: Train, Catenary, Switch

1. Introduction

A railway switch divides the main track into two. The straight path is called the direct track, and the diverging track is the one that changes its direction. The switch is divided into three different parts: change, intermediate and crossing zone.

The overhead contact line required in crossovers or switches requires that the contact wire of the direct track changes to the diverging one.

The design of the overhead contact line in the crossovers or switches is complicated because it depends on many different factors that need to be taken into consideration.

2. Definition of the project

This project aims to create a graphic and calculation tool that considers the particularities of the overhead contact line in the switches, it helps designing it correctly.

The tool will show the area that needs to keep free from obstacles so that the designer know which points cannot be used to place the wiring points, this requires an special since there are large contact forces between the pantograph and the contact wire and if they are not in contact there would be an accident.

3. Description on the tool

The Matlab tool analyzes all the possible kind of switches from the Track Design Handbook: NR/L3/TRK/2049/mod03. Selecting the kind of switch, the length of the span and the offset from the direct and diverging track, the program shows the free obstacles area in grey, this helps designing the catenary properly for each different case.

4. Results

The tool has been able to draw all the different types of switches that appear in the Track Design Handbook. The results have been corroborated with the actual geometry of the switches.

In the following figure, the overhead contact line of the direct track is shown in blue, whereas the one of the diverging track is in red. The figure below shows the CEN56E1 AV switch with a crossing angle of 6 (Xing angle).

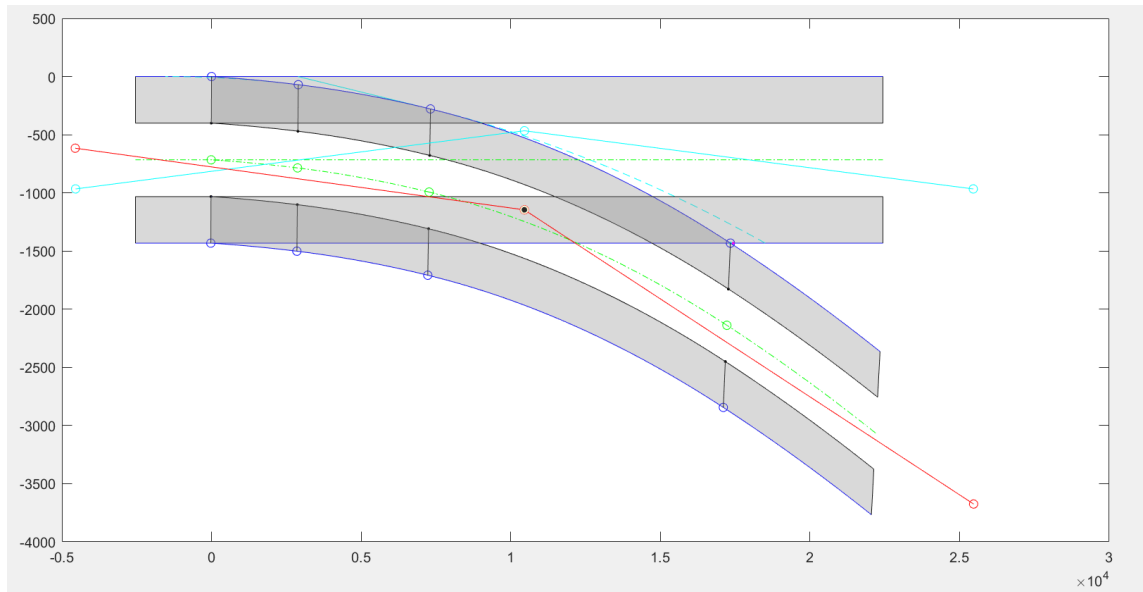


Figure 1 CEN56E1 Vertical S&C, Standard Circular Curve Turnouts, AV Crossing in ~ 6 . MATLAB switchtype=1.

5. Conclusions

The objectives this project is to develop a tool with Matlab from scratch that helps designing the overhead contact line in crossovers or switches.

The program that has been developed allows the design of the overhead contact line in switches, zones where the current existing software does not allow it.

This tool helps designing the overhead contact line of a switch by introducing the type of crossing, the span length and the offset of the direct and diverging track.

Índice de la memoria

1	Introducción	14
1.1	Historia del ferrocarril	14
1.1.1	El sistema ferroviario	14
1.1.2	Historia del ferrocarril de finales del siglo XVIII hasta el siglo XX.....	14
1.2	Tipos de locomotoras	20
1.2.1	Locomotoras de vapor	20
1.2.2	Locomotoras Diesel.....	22
1.2.3	Locomotoras eléctricas	24
1.3	Estado del arte	26
1.4	Motivación del Proyecto	27
1.5	Objetivos	29
1.6	Estructura del Trabajo de fin de Máster	29
2	Electrificación.....	31
2.1	Línea aérea de contacto (LAC).....	31
2.1.1	Introducción de las líneas aéreas de contacto	31
2.1.2	Ventajas e inconvenientes de las líneas aéreas de contacto.....	31
2.2	Desarrollo de las líneas aéreas de contacto	32
2.2.1	Comienzos eléctricos	32
2.2.2	Corriente continua.....	33
2.2.3	Corriente alterna	34
2.2.4	Líneas de alta velocidad.....	36
2.3	Tipos de líneas aéreas de contacto.....	36
2.3.1	Tipos de líneas aéreas de contacto.....	36
2.3.2	Tercer carril conductor	42
2.3.3	Catenaria rígida	43
2.4	Diseño de las líneas aéreas de contacto	44
3	Elementos de la catenaria	46
3.1	Introducción de los elementos de la catenaria	46
3.1.1	Hilo de contacto	46
3.1.2	Sustentador	47

3.1.3	Feeder de acompañamiento	49
3.1.4	Péndolas	49
3.1.5	Cables de acero	50
3.1.6	Postes.....	50
3.1.7	Macizos de fundación de postes y anclajes	51
3.1.8	Aisladores.....	51
3.1.9	Ménsulas.....	51
3.1.10	Pórticos	52
3.2	Características mecánicas de la catenaria.....	52
3.2.1	Vano.....	53
3.2.2	Tensiones mecánicas de los cables.....	53
3.2.3	Esfuerzos en los brazos de atirantado.....	56
3.2.4	Momento de vuelco producido por una catenaria.....	58
3.3	Compensación mecánica de la catenaria	59
3.3.1	Cantón	59
3.3.2	Cantón sin compensación automática.....	60
3.3.3	Cantón compensado	60
3.3.4	Seccionamiento.....	61
3.4	Pendolado	61
3.4.1	Funciones del pendolado.....	62
3.4.2	Pesos soportados por las péndolas	63
3.4.3	Péndolas equipotenciales	64
3.4.4	Homogeneidad elástica de las péndolas	64
3.5	Aisladores de sección	65
3.5.1	Aisladores de sección simétricos.....	66
3.5.2	Aisladores de sección asimétricos.....	66
4	Elementos de la vía.....	68
4.1	Vía	68
4.1.1	El carril	68
4.1.2	Las traviesas.....	69
4.1.3	El balasto.....	69
4.1.4	Los tirafondos y las placas de asiento.....	69
4.2	Aparatos de la vía	69

4.2.1	Los desvíos	70
4.2.2	Combinación de aparatos de vía.....	78
4.3	Cambio de aguja.....	79
4.3.1	Contraagujas.....	79
4.3.2	Espadines o agujas.....	80
4.3.3	Accionamiento.....	81
4.4	Curva de transición.....	82
4.4.1	Clotoide	82
4.4.2	Parábola hiperbólica.....	86
5	Interacción vía catenaria	88
5.1	Agujas aéreas.....	88
5.1.1	Designación y esquema de las agujas	90
5.1.2	Montaje de agujas cruzadas.....	94
5.1.3	Montaje de agujas tangenciales	101
6	Análisis de Resultados.....	106
6.1	Agujas tipo CEN56E1	107
6.2	Agujas tipo NR60.....	120
6.3	Validación de resultados	126
7	Conclusiones y Trabajos Futuros.....	137
7.1	Conclusiones	137
7.1.1	Análisis económico.....	138
7.2	Futuros desarrollos.....	139
8	Bibliografía.....	141
	ANEXO I Código en Matlab	143
	ANEXO II Representación de agujas	178
	ANEXO III ODS.....	227

Índice de figuras

Figura 1 CEN56E1 Vertical S&C, Standard Circular Curve Turnouts, AV Crossing in ~ 6. MATLAB switchtype=1.....	8
Figura 2 Locomotora de Trevithick [GONZ10]	15
Figura 3 Tipos de tracción de las locomotoras [GONZ10]	20
Figura 4 Máquina de vapor [GONZ10]	21
Figura 5 Transmisión mecánica. Tracción diésel. [GONZ10]	23
Figura 6 Locomotora diésel eléctrica [GONZ10].....	23
Figura 7 Transmisión hidráulica. Locomotora RENFE diésel hidráulica. [GONZ10]	24
Figura 8 Tracción reostática. Intercalar resistencias en serie con los motores de tracción. [GONZ10]	24
Figura 9 Esquema básico de tracción monofásica [GONZ10]	25
Figura 10 Locomotora trifásica [GONZ10]	26
Figura 11 Linear Draft - Design Automation	27
Figura 12 Desplazamiento máximo total [KEEN18]	28
Figura 13 Ruta de Sheffield - Manchester con 1500 V CC LAC. [KEEN18]	34
Figura 14 Línea de Gidea Park 1500 V CC, se convierte a 6.25 kV CA y posteriormente a 25 kV. [KEEN18]	35
Figura 15 Trolebús en Lucerne, Suiza. [KEEN18]	38
Figura 16 Suspensión sencilla [KIES08].....	38
Figura 17 Sistema de suspensión de una línea aérea de contacto para trolebuses [KIES08]	39
Figura 18 Suspensión tipo Delta [KIES08]	39
Figura 19 Apoyo articulado [KIES08]	39
Figura 20 Línea de contacto con péndolas en los apoyos [KIES08]	40
Figura 21 Línea de contacto sin péndolas en los apoyos [KIES08]	40
Figura 22 Línea aérea de contacto Rc 200 con diferentes longitudes de péndolas en "Y" .	41

Figura 23 Línea de contacto con suspensión inclinada [KIES08].....	41
Figura 24 Línea de contacto con sustentador auxiliar [KIES08].....	42
Figura 25 Sistema tercer carril, Metro de Berlín. [KIES08]	43
Figura 26 Catenaria rígida. Túnel de Sittenberg, Austria. [KIES08]	44
Figura 27 Líneas aéreas de contacto sobre apoyos individuales, utilizando postes de hormigón. [KIES08]	45
Figura 28 Dos tipos de secciones de un hilo de contacto [MONT02].....	47
Figura 29 Catenaria apoyada [VADE__]	48
Figura 30 Catenaria suspendida [VADE__].....	48
Figura 31 Grifas de péndola de hilo de contacto [KIES08]	50
Figura 32 Descentramiento de la catenaria en línea recta [MONT02].....	57
Figura 33 Descentramiento de la catenaria en curva [MONT02]	58
Figura 34 a) Péndola normal, b) Péndola equipotencial, c) Péndola para dos hilos [KIES08]	63
Figura 35 Perfil de un carril ferroviario [ADIF08].....	68
Figura 36 Partes de las agujas [ADIF08].....	69
Figura 37 Desvío mixto [ADIF08]	70
Figura 38 Partes de un desvío ferroviario [AGIC17]	71
Figura 39 Desvío – El cambio [AGIC17].....	71
Figura 40 Desvío – El cruzamiento [AGIC17].....	72
Figura 41 Desvío – Partes del cruzamiento [AGIC17].....	72
Figura 42 Cálculo del ángulo de cruzamiento. [OGRA11]	74
Figura 43 Travesía [ADIF08]	74
Figura 44 Travesía sin unión [JTCU15]	75
Figura 45 Travesía de unión sencilla [WIKI13]	76
Figura 46 Travesía de unión sencilla [JTCU15].....	76
Figura 47 Travesía de unión doble [WIKI13]	77
Figura 48 Travesía de unión doble [JTCU15]	77
Figura 49 Combinación de desvíos y travesías [ADIF08]	78
Figura 50 Bretelle [JTCU15].....	79

Figura 51 Partes de la aguja [OGRA11].....	80
Figura 52 Clotoide [BLAN13]	82
Figura 53 Variación del radio de curvatura en una clotoide [BLAN13]	83
Figura 54 Cálculos de la clotoide [BLAN13].....	84
Figura 55 Clotoide [MATH16]	85
Figura 56 Parábola cúbica [BLAN13].....	86
Figura 57 Parábola hiperbólica [MATH16]	87
Figura 58 Plano en planta de una aguja [KIES08]	90
Figura 59 Esquema de una aguja [KIES08]	90
Figura 60 Nomenclatura de agujas con curvatura constante, UIC 711 [KIES08].....	91
Figura 61 Nomenclatura de agujas con curvatura en forma de clotoide, UIC 711 [KIES08]	91
Figura 62 Tipos de desvíos; a) desvío simple, b) desvío divergente y c) desvío convergente. [KIES08].....	92
Figura 63 Determinación del radio de la desviada R [KIES08]	94
Figura 64 Esquema del recorrido del pantógrafo en la aguja P50. [ADIF01].....	95
Figura 65 Pantógrafo en el punto de aguja 0. Aguja cruzada. [ADIF01].....	96
Figura 66 Pantógrafo en los puntos de aguja 5 y 25. Aguja cruzada. [ADIF01]	96
Figura 67 Pantógrafo en el punto de aguja 50. Aguja cruzada. [ADIF01].....	97
Figura 68 Pantógrafo en el punto de aguja 62. Aguja cruzada. [ADIF01].....	97
Figura 69 Pantógrafo en el punto de aguja 100. Aguja cruzada. [ADIF01].....	97
Figura 70 Zona libre de obstáculos para el pantógrafo de 1950 mm y para el pantógrafo de 1600 mm. [KIES08]	98
Figura 71 Requisitos para los hilos de contacto en la zona de agujas [KIES08]	99
Figura 72 Puntos de referencia en el plano de las agujas [KIES08]	100
Figura 73 Agujas tangenciales. Valores característicos para distintos puntos de poste de aguja. [ADIF01]	101
Figura 74 Esquema del recorrido del pantógrafo al pasar por una aguja en el punto 90. [ADIF01]	102
Figura 75 Pantógrafo en el punto de aguja 0. Aguja tangencial. [ADIF01].....	103

Figura 76 Pantógrafo en el punto de aguja 5. Aguja tangencial. [ADIF01].....	103
Figura 77 Pantógrafo en el punto de aguja 25. Aguja tangencial. [ADIF01].....	103
Figura 78 Pantógrafo en el punto de aguja 45. Aguja tangencial. [ADIF01].....	104
Figura 79 Pantógrafo en los puntos de aguja 55 y 65. Aguja tangencial. [ADIF01]	104
Figura 80 Pantógrafo en el punto de aguja 80. Aguja tangencial. [ADIF01].....	104
Figura 81 Pantógrafo en los puntos de aguja 90, 100 y 120. Aguja tangencial. [ADIF01]	105
Figura 82 CEN56E1 Vertical S&C, Standard Circular Curve Turnouts, AV Crossing in ~ 6. MATLAB switchtype=1.....	106
Figura 83 CEN56E1 Vertical S&C, Standard Circular Curve Turnouts, AV Crossing in ~ 6. MATLAB switchtype=1. Vista proporcional.....	107
Figura 84 Aguja CEN56E1 AVT, switchtype = 0.....	109
Figura 85 Aguja CEN56E1 HV, switchtype = 43	110
Figura 86 Switchtype = 1, CEN56E1 AV, crossing 1 in 6.....	113
Figura 87 Switchtype = 16, CEN56E1 CV STR 10	114
Figura 88 Switchtype = 23, CEN56E1 CV STR 13	114
Figura 89 Aguja CEN56E1 HV, switchtype = 42	115
Figura 90 Swing Nose Geometry [ASSE16].....	117
Figura 91 Switchtype = 60, CEN56E1 HV, crossing 1 in 45,75.....	117
Figura 92 Switchtype = 58, CEN56E1 GV 24/28	118
Figura 93 Switchtype = 49, CEN56E1 CV, crossing 1 in 13.....	119
Figura 94 Switchtype = 51, CEN56E1 DV, crossing 1 in 15.....	119
Figura 95 Switchtype = 53, CEN56E1 EV, crossing 1 in 21	120
Figura 96 Switchtype = 61, NR60C, crossing 1 in 9,5.....	124
Figura 97 Switchtype = 83, NR60G, crossing 1 in 31,25.....	125
Figura 98 CEN56E1 CVS 9,25 Circular curve turnout	126
Figura 99 Switchtype = 14, CEN56E1 CV, crossing 1 in 9,25	127
Figura 100 CEN56E1 CVS 9,25 Circular curve turnout. Planing radius 287251 mm.....	127
Figura 101 CEN56E1 CVS 9,25 Circular curve turnout. Switch radius 245767 mm.....	128
Figura 102 CEN56E1 CVS 9,25 Circular curve turnout. Turnout radius 245767 mm.	128

Figura 103 Switchtype = 49, CEN56E1 CV, crossing 1 in 13	129
Figura 104 CEN56E1 CVS 13 Transition Turnout. Planing radius 287251 mm.	130
Figura 105 CEN56E1 CVS 13 Transition Turnout. Switch radius 245767 mm.	130
Figura 106 CEN56E1 CVS 13 Transition Turnout. Transition length 13000 mm.	130
Figura 107 CEN56E1 CVS 13 Transition Turnout. Straight length 3271 mm.	131
Figura 108 Switchtype = 21, CEN56E1 DV, crossing 1 in 10,75.....	132
Figura 109 CEN56E1 DVS 10,75 Circular curve turnout. Planing radius 367038 mm. ..	132
Figura 110 CEN56E1 DVS 10,75 Circular curve turnout. Switch radius 331687 mm....	133
Figura 111 CEN56E1 DVS 10,75 Circular curve turnout. Turnout radius 331687 mm...	133
Figura 112 Switchtype = 53, CEN56E1 EV, crossing 1 in 21	134
Figura 113 CEN56E1 EVS 21 Transitioned Crossover. Planing radius 739696 mm.	134
Figura 114 CEN56E1 EVS 21 Transitioned Crossover. Switch radius 645116 mm.	135
Figura 115 CEN56E1 EVS 21 Transitioned Crossover. Length of transition 24555 mm.	135
Figura 116 CEN56E1 EVS 21 Transitioned Crossover. Length of straight 3605 mm.	136
Figura 117 Switchtype = 8, CEN56E1 BV, crossing 1 in 7,5	138
Figura 119 Precios Matlab licencia estudiante	139
Figura 120 Switchtype = 0, CEN56E1 AVT.....	179
Figura 121 Switchtype = 1, CEN56E1 AV, crossing 1 in 6.....	181
Figura 122 Switchtype = 2, CEN56E1 AV, crossing 1 in 6,5.....	181
Figura 123 Switchtype = 3, CEN56E1 AV, crossing 1 in 7.....	182
Figura 124 Switchtype = 4, CEN56E1 AV, crossing 1 in 7,5.....	182
Figura 125 Switchtype = 5, CEN56E1 AV, crossing 1 in 8.....	183
Figura 126 Switchtype = 6, CEN56E1 AV, crossing 1 in 9,25.....	183
Figura 127 Switchtype = 7, CEN56E1 BV, crossing 1 in 7	184
Figura 128 Switchtype = 8, CEN56E1 BV, crossing 1 in 7,5.....	184
Figura 129 Switchtype = 9, CEN56E1 BV, crossing 1 in 8.....	185
Figura 130 Switchtype = 10, CEN56E1 BV, crossing 1 in 9,25.....	185
Figura 131 Switchtype = 11, CEN56E1 BV, crossing 1 in 10	186
Figura 132 Switchtype = 12, CEN56E1 BV, crossing 1 in 10,75.....	186
Figura 133 Switchtype = 13, CEN56E1 CV, crossing 1 in 8	187

Figura 134 Switchtype = 14, CEN56E1 CV, crossing 1 in 9,25	187
Figura 135 Switchtype = 15, CEN56E1 CV, crossing 1 in 10	188
Figura 136 Switchtype = 16, CEN56E1 CV, crossing 1 in 10	188
Figura 137 Switchtype = 17, CEN56E1 CV, crossing 1 in 10,75	189
Figura 138 Switchtype = 18, CEN56E1 CV, crossing 1 in 13	189
Figura 139 Switchtype = 19, CEN56E1 DV, crossing 1 in 9,25	190
Figura 140 Switchtype = 20, CEN56E1 DV, crossing 1 in 10	190
Figura 141 Switchtype = 21, CEN56E1 DV, crossing 1 in 10,75	191
Figura 142 Switchtype = 22, CEN56E1 DV, crossing 1 in 13	191
Figura 143 Switchtype = 23, CEN56E1 DV, crossing 1 in 13	192
Figura 144 Switchtype = 24, CEN56E1 DV, crossing 1 in 15	192
Figura 145 Switchtype = 25, CEN56E1 EV, crossing 1 in 13	193
Figura 146 Switchtype = 26, CEN56E1 EV, crossing 1 in 15	193
Figura 147 Switchtype = 27, CEN56E1 EV, crossing 1 in 16	194
Figura 148 Switchtype = 28, CEN56E1 EV, crossing 1 in 18,5	194
Figura 149 Switchtype = 29, CEN56E1 EV, crossing 1 in 21	195
Figura 150 Switchtype = 30, CEN56E1 FV, crossing 1 in 16	195
Figura 151 Switchtype = 31, CEN56E1 FV, crossing 1 in 18,5	196
Figura 152 Switchtype = 32, CEN56E1 FV, crossing 1 in 21	196
Figura 153 Switchtype = 33, CEN56E1 FV, crossing 1 in 24	197
Figura 154 Switchtype = 34, CEN56E1 SGV, crossing 1 in 18,5	197
Figura 155 Switchtype = 35, CEN56E1 SGV, crossing 1 in 21	198
Figura 156 Switchtype = 36, CEN56E1 SGV, crossing 1 in 24	198
Figura 157 Switchtype = 37, CEN56E1 SGV, crossing 1 in 28	199
Figura 158 Switchtype = 38, CEN56E1 GV, crossing 1 in 21	199
Figura 159 Switchtype = 39, CEN56E1 GV, crossing 1 in 24	200
Figura 160 Switchtype = 40, CEN56E1 GV, crossing 1 in 28	200
Figura 161 Switchtype = 41, CEN56E1 GV, crossing 1 in 32,365	201
Figura 162 Switchtype = 42, CEN56E1 HV, crossing 1 in 28	201
Figura 163 Switchtype = 43, CEN56E1 HV, crossing 1 in 32,365	202

Figura 164 Switchtype = 44, CEN56E1 AV, crossing 1 in 9,25.....	203
Figura 165 Switchtype = 45, CEN56E1 BV, crossing 1 in 9,25.....	204
Figura 166 Switchtype = 46, CEN56E1 BV, crossing 1 in 10.....	204
Figura 167 Switchtype = 47, CEN56E1 BV, crossing 1 in 10,75.....	205
Figura 168 Switchtype = 48, CEN56E1 CV, crossing 1 in 10,75.....	205
Figura 169 Switchtype = 49, CEN56E1 CV, crossing 1 in 13.....	206
Figura 170 Switchtype = 50, CEN56E1 DV, crossing 1 in 13.....	206
Figura 171 Switchtype = 51, CEN56E1 DV, crossing 1 in 15.....	207
Figura 172 Switchtype = 52, CEN56E1 EV, crossing 1 in 18,5.....	207
Figura 173 Switchtype = 53, CEN56E1 EV, crossing 1 in 21.....	208
Figura 174 Switchtype = 54, CEN56E1 FV, crossing 1 in 24.....	208
Figura 175 Switchtype = 55, CEN56E1 FV, crossing 1 in 28.....	209
Figura 176 Switchtype = 56, CEN56E1 SGV, crossing 1 in 28.....	209
Figura 177 Switchtype = 57, CEN56E1 GV, crossing 1 in 28.....	210
Figura 178 Switchtype = 58, CEN56E1 GV, crossing 1 in 28.....	210
Figura 179 Switchtype = 59, CEN56E1 GV, crossing 1 in 32,365.....	211
Figura 180 Switchtype = 60, CEN56E1 HV, crossing 1 in 45,75.....	211
Figura 181 Switchtype = 61, NR60C, crossing 1 in 9,5.....	213
Figura 182 Switchtype = 62, NR60D, crossing 1 in 8,25.....	214
Figura 183 Switchtype = 63, NR60D, crossing 1 in 11.....	214
Figura 184 Switchtype = 64, NR60D, crossing 1 in 12,5.....	215
Figura 185 Switchtype = 65, NR60E, crossing 1 in 9,5.....	215
Figura 186 Switchtype = 66, NR60E, crossing 1 in 11.....	216
Figura 187 Switchtype = 67, NR60E, crossing 1 in 13,5.....	216
Figura 188 Switchtype = 68, NR60E, crossing 1 in 15,75.....	217
Figura 189 Switchtype = 69, NR60F, crossing 1 in 12,5.....	217
Figura 190 Switchtype = 70, NR60F, crossing 1 in 13,5.....	218
Figura 191 Switchtype = 71, NR60F, crossing 1 in 17,25.....	218
Figura 192 Switchtype = 72, NR60SG, crossing 1 in 17,25.....	219
Figura 193 Switchtype = 73, NR60SG, crossing 1 in 21,5.....	219

Figura 194 Switchtype = 74, NR60SG, crossing 1 in 23,5	220
Figura 195 Switchtype = 75, NR60G, crossing 1 in 21,5.....	220
Figura 196 Switchtype = 76, NR60G, crossing 1 in 27.....	221
Figura 197 Switchtype = 77, NR60H, crossing 1 in 33,5.....	221
Figura 198 Switchtype = 78, NR60C, crossing 1 in 11.....	223
Figura 199 Switchtype = 79, NR60D, crossing 1 in 13,5.....	223
Figura 200 Switchtype = 80, NR60E, crossing 1 in 17,25.....	224
Figura 201 Switchtype = 81, NR60F, crossing 1 in 21,5	224
Figura 202 Switchtype = 82, NR60SG, crossing 1 in 27	225
Figura 203 Switchtype = 83, NR60G, crossing 1 in 31,25.....	225
Figura 204 Switchtype = 84, NR60G, crossing 1 in 33,5.....	226
Figura 118 Objetivos de desarrollo sostenible [ONU15]	227

Índice de tablas

Tabla 1 Tensiones mecánicas de los diferentes hilos de contacto [MONT02]	54
Tabla 2 Tensiones mecánicas de cables para el sustentador [MONT02]	56
Tabla 3 Ángulo de cruzamiento según el tipo de desvío	73
Tabla 4 Características de diferentes tipos de aguja [KIES08]	92
Tabla 5 Altura de los carriles [KIES08]	94
Tabla 6 Agujas cruzadas. Valores característicos para distintos puntos de aguja para desvíos montados en recta. [ADIF01]	95
Tabla 7 Table 1 – CEN56E1 Vertical S&C Switch Details [ASSE16]	107
Tabla 8 Tipo de desvío Matlab de la tabla 1	108
Tabla 9 Table 2 – CEN56E1 Vertical S&C, Standard Circular Curve Turnouts [ASSE16]	110
Tabla 10 Tipo de desvío en Matlab de la tabla 2	112
Tabla 11 Table 4 – CEN56E1 Vertical S&C Standard Transitioned Turnouts and Crossovers [ASSE16]	115
Tabla 12 Tipo de desvío en Matlab de la tabla 4	116
Tabla 13 C.2.1: NR60 Inclined S&C Switch Details. Table 28 - Switch Details. [ASSE16]	120
Tabla 14 C.2.1: NR60 Inclined S&C Switch Details. Table 29 - Positioning of Switch Heels. [ASSE16]	121
Tabla 15 Table 30 - NR60 Inclined S&C Standard Circular Curve Turnouts [ASSE16] ..	121
Tabla 16 Table 31 - NR60 Inclined S&C Standard Circular Curve Turnouts [ASSE16] ..	122
Tabla 17 Table 32 - Transitioned crossovers, across 1970 six foot (running edges) [ASSE16]	124
Tabla 18 Aguja CEN56E1 desvío de transición CV 13 de la tabla 4	128
Tabla 19 Aguja CEN56E1 desvío circular estándar DV 10,75 de la tabla 2	131
Tabla 20 Aguja CEN56E1 desvío de transición EV 21 de la tabla 4	133

Tabla 21 CEN56E1 Vertical s&c switch details [ASSE16]	178
Tabla 22 CEN56E1 Vertical s&c, standard circular curve turnouts [ASSE16]	179
Tabla 23 CEN56E1 Vertical s&c standard transitioned turnouts and crossovers [ASSE16]	202
Tabla 24 NR60 Inclined s&c standard circular curve turnouts [ASSE16].....	212
Tabla 25 NR60 Inclined s&c standard transitioned turnouts & crossovers - leads & radii [ASSE16].....	222

1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo se hace una introducción de este trabajo de fin de máster, se explica el estado del arte y se describe la motivación del proyecto.

1.1 HISTORIA DEL FERROCARRIL

1.1.1 EL SISTEMA FERROVIARIO

El sistema ferroviario es un sistema de transporte de tan solo un grado de libertad, un tren únicamente circula por la vía férrea. Es un transporte de muy poco rozamiento ya que se basa en la rodadura de ruedas de acero por carriles de acero, esto posibilita que se puedan realizar transporte de gran carga gastando menos energía que por otros métodos. Al tener poco rozamiento tiene también poca adherencia, esto hace que acelerar y desacelerar sea difícil, lo que condiciona sobre todo a la capacidad de frenar en distancias cortas. Los ferrocarriles solo pueden circular a una velocidad en la que el maquinista tenga visión por si es necesario detener el tren. Hoy en día se utiliza señalización ferroviaria para conocer de ante mano la disponibilidad de la vía.

1.1.2 HISTORIA DEL FERROCARRIL DE FINALES DEL SIGLO XVIII HASTA EL SIGLO XX

Los antecedentes del ferrocarril datan del siglo XVI cuando en Alemania se usaban raíles para el transporte de vagones dentro de las minas, inicialmente estos iban tirados por caballos. En el siglo XVII empiezan a utilizar vías de hierro y posteriormente ruedas también de hierro. Lo que sería imprescindible para la invención del ferrocarril es la invención de la máquina de vapor en el siglo XVIII.

- **Siglo XVIII**

Los orígenes del ferrocarril datan del siglo XVIII, cuando en 1712 Thomas Newcomen y Thomas Savery empiezan a construir una máquina de vapor que puede usarse como bomba

de achique en minería, esto sentó las bases del comienzo de la revolución industrial. [RIBE17]

En los años 1769 al 1774 James Watt perfecciona la máquina de vapor existente de Thomas Newcomen y se inventa oficialmente la máquina de vapor para uso universal. La innovación consistía en realizar el enfriamiento del exterior del cilindro, luego se desarrolló el doble efecto del pistón y engranaje planetario para que el movimiento fuera circular en lugar de un movimiento de balancín.

- **Siglo XIX**

En 1803 Robert Fulton navega por el Sena en un barco de paletas movido gracias a una máquina de vapor. Este mismo año Richard Trevithick construye la primera locomotora de vapor para un recorrido minero.

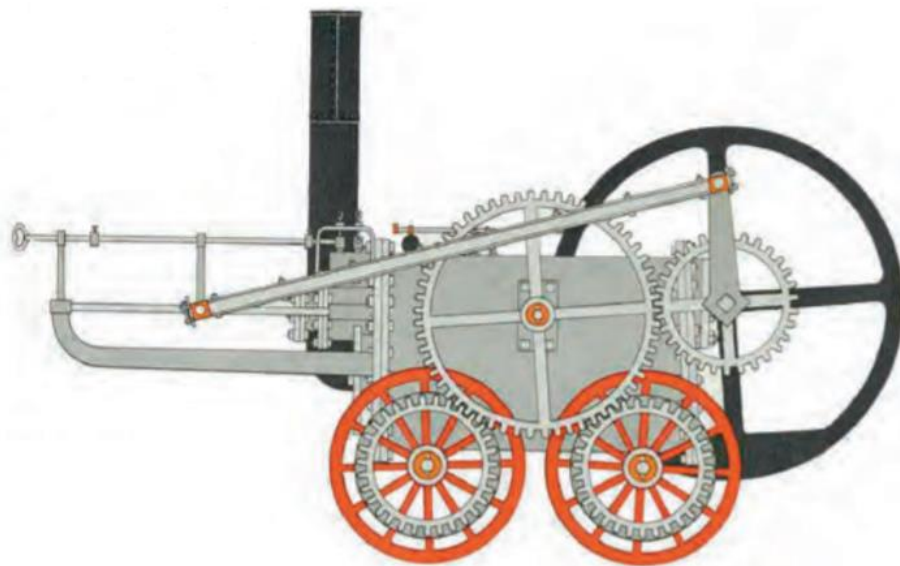


Figura 2 Locomotora de Trevithick [GONZ10]

Oficialmente el ferrocarril nace el 27 de septiembre de 1825 con el servicio comercial de mercancías entre Stockton y Darlington, desde una mina de carbón a un puerto fluvial. El ancho de las vías era de 1,422 m (4' 8''), más adelante pasó a ser 1,435 m (4' 8,5'') que sería la medida estándar para el ferrocarril.

En 1827 se inaugura la línea Saint-Étienne à Andrézieux que transporta carbón.

En 1829 gana el Concurso de Rainhill la locomotora “Rocket” de G. Stephenson que alcanzaba una velocidad de 56 km/h. La locomotora es innovadora en cuanto a su caldera tubular y el tiro mediante el escape de vapor de los cilindros. En este concurso se determinaba el tipo de tracción utilizada para el ferrocarril de Manchester a Liverpool, que transportaba pasajeros y mercancías.

En 1830 en USA se inicia el primer ferrocarril, Baltimore and Ohio Railway. Este año también se inaugura el primer servicio comercial de pasajeros entre Manchester y Liverpool.

En 1835 se inaugura el primer ferrocarril alemán entre Núremberg y Fürth. En Bélgica se abre la primera línea entre Bruselas y Malinas.

En 1836 Smith y Ericsson construyen el primer barco de vapor con hélice.

El primer ferrocarril español se inaugura en 1837 entre La Habana y Bejucal a Güines.

En 1838 Isambard Kingdom Brunel establece para el Great Western Railway (GWR) que el ancho de vía será 7 pies (2,13 m). Las locomotoras de estos años eran de un solo eje motriz y de ruedas motrices de gran diámetro. El ancho de la vía permitía que las calderas fueran grandes y las locomotoras fueran de gran potencia y estabilidad de marcha.

En 1848 se inaugura el primer ferrocarril peninsular en España, de Barcelona a Mataró.

En 1863 se inaugura el primer ferrocarril metropolitano en Londres.

Inicialmente había un “guardavías” que era el que controlaba los trenes y conocía su movimiento y posición aproximada. Cuando el número de trenes aumenta, ya no era posible el sistema anterior y se empiezan a hacer señales con la mano para indicar si el camino estaba libre u ocupado. Lo siguiente fueron las señales mecánicas que se activaban a distancia. Finalmente surge el enclavamiento que permite el accionamiento a distancia de desvíos y señales para evitar colisiones haciendo incompatibles ciertos movimientos.

El frenado ferroviario en esta época consistía en zapatas aplicadas mediante mecanismos manuales como palancas, así como del frenado de detención de las locomotoras de vapor. Posteriormente dotaron a los vagones y coches del tren de “volantes” que activaban los operarios cuando sonaba el silbato que indicaba que el maquinista quería frenar. Las velocidades eran bajas, pero el sistema poco eficaz debido a la imprecisión de transmisión de órdenes.

Al principio los recorridos del ferrocarril eran llanos, pero al cabo del tiempo se fueron haciendo cada vez más complicados, requerían de puentes, túneles, estaciones, etc.

Electricidad al ferrocarril

En el año 1878 Siemens & Halske presentaron el primer motor eléctrico.

En 1879 en una exposición en Berlín apareció el primer ferrocarril con tracción eléctrica. La alimentación era en corriente continua (100 – 150V) mediante un carril central y retorno por los carriles.

En 1881 en Berlín se inaugura un tranvía eléctrico de corriente continua de 2,5 km de recorrido, convirtiéndose en el primer vehículo eléctrico comercial.

En 1884 George Westinghouse presenta la corriente alterna.

En 1891 Mikhail O. Dolivo-Dobrovolsky presenta el motor eléctrico de corriente alterna. Este año Daimler construye una locomotora con motor de gasolina de 4 CV en la que la transmisión va por engranajes.

En 1890 se introduce la electricidad en el metro de Londres lo que facilita la construcción de grandes líneas subterráneas.

En 1892 Patton construye una locomotora benzoeléctrica. Este mismo año Otto y Lagen preparan en Europa un vagón con motor a petróleo de 8 CV utilizando embrague de fricción, engranajes y cadenas.

En 1893 se comienza a aplicar en USA el freno automático inventado por Westinghouse, que se irá implementando en el resto del mundo y que sentó las bases para el freno ferroviario actual. Este mismo año se aprueba en USA el “Safety Appliance Act” que reduce en los próximos años los accidentes por enganche y desenganche al usarse una versión automática.

En 1895 se realiza en Baltimore el primer servicio comercial con una línea de tracción eléctrica en corriente continua. Este mismo año se crea el primer tranvía en corriente alterna trifásica, la tercera fase en los carriles y dos cables aéreos.

En 1897 Rudolf Diésel desarrolla el motor Diésel.

En 1898 se inauguró la primera electrificación de los tranvías de Madrid y un año más tarde se electrificarían los tranvías de Barcelona.

A finales del siglo XIX aparece en el campo de las locomotoras de vapor, se empezaron a usar tubos recalentadores dentro de los tubos de la caldera, esto aumenta la temperatura del vapor y por tanto aumenta la potencia sin aumentar la presión. Otra invención importante fue el uso de la doble expansión fraccionada del vapor en dos etapas de cilindros, para aumentar el rendimiento y la potencia. La nueva locomotora se llamaba “Compound”. A finales de siglo también se inventó el circuito de vía para la detección de los trenes y aplicación a la señalización automática, el Block System.

A finales de siglo la locomotora de vapor está en plena evolución y crecimiento, siendo la mejor en tracción. El ferrocarril es el motor de la industrialización.

- **Siglo XX**

Los primeros ferrocarriles eléctricos se inventan en el siglo XIX, pero es en el siglo XX cuando comienzan a excederse, especialmente en zonas urbanas con túneles y montañosas.

En 1902 en Inglaterra se utiliza un automotor de 85 CV y se construyen automotores con transmisión eléctrica de 35/70 CV en la casa Dion-Boutn.

En 1903 dos automotores eléctricos en trifásica circulan en la línea Berlín – Marienfeld a 210 km/h, superando así la barrera de 200 km/h.

En 1904 se inaugura una línea de alimentación monofásica a 25 Hz entre Indianápolis y Greensburg de 172 km.

En 1905 se electrifican casi todas las líneas del metro de Londres que fue inaugurado en 1863.

En el 1905 el Barcelona a Sarria se electrifica a 600 V y se cambia al ancho estándar.

En 1907 empieza la explotación monofásica a 16⅔ Hz en el sur de Francia y más adelante se implementa en Alemania.

En 1911 se inaugura el ferrocarril Pamplona Sangüesa de 58 km y 1 m de ancho. Primera electrificación en monofásica en España de 6 kV y 25 Hz.

En 1912 aparece la primera aplicación de tracción diésel, la locomotora Sulzer. El acoplamiento entre motor y ruedas era directo, por lo que no resultó muy satisfactorio.

En 1917 – 1918 General Electric construye tres locomotoras diésel eléctricas con diseño de control Lemp, las primeras de este tipo inventadas en USA.

En 1919 se inaugura la primera línea del metro de Madrid.

En 1925 aparece la primera locomotora diésel eléctrica de maniobras para servicio comercial en USA.

En 1938 se alcanza en Inglaterra el récord mundial de velocidad con una locomotora de vapor, alcanza 203 km/h.

En 1978 el Talgo III alcanza el récord de velocidad con locomotora diésel, 230 km/h en España.

En 1987 se alcanza en Reino Unido una velocidad de 238 km/h, récord mundial diésel.

En 1990 el TGV-A 325 francés alcanza 515,3 km/h, el récord mundial de tracción eléctrica.

1.2 TIPOS DE LOCOMOTORAS

Los tipos de locomotoras de tracción pueden clasificarse en función del motor que usan: vapor, combustible líquido (diésel) y eléctricas. [GONZ10]

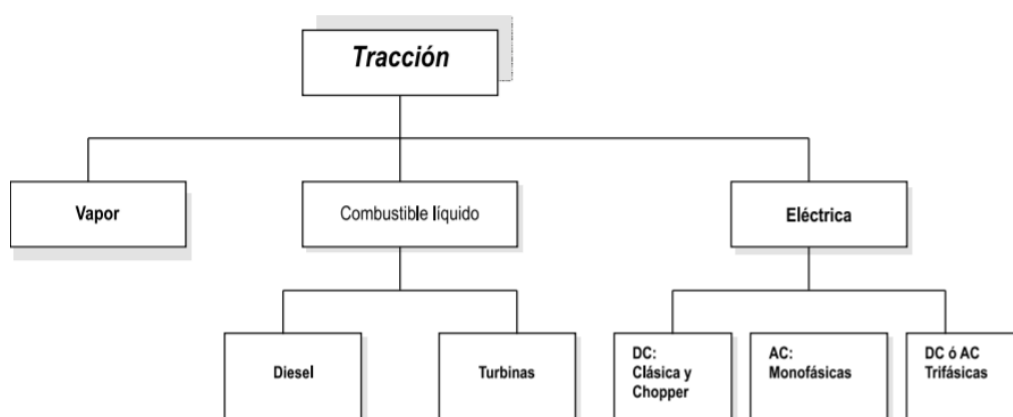


Figura 3 Tipos de tracción de las locomotoras [GONZ10]

1.2.1 LOCOMOTORAS DE VAPOR

Son las locomotoras precursoras de tracción, hoy en día siguen utilizándose en algunos países. Las instalaciones motrices de vapor utilizan agua en su fase líquida y de vapor, constan de tres funciones principales:

- Producción de corriente continua de vapor a alta temperatura y presión a partir de agua líquida.
- Transformación en trabajo mecánico de la energía utilizable de la corriente.
- Enfriamiento de la corriente en el que el agua vuelve al estado líquido inicial una vez que se ha aprovechado su energía.

•

Las partes principales de la instalación de vapor son: la caldera, con el supercalentador y bomba, la máquina, puede ser alternativa o una turbina de vapor, y el condensador.

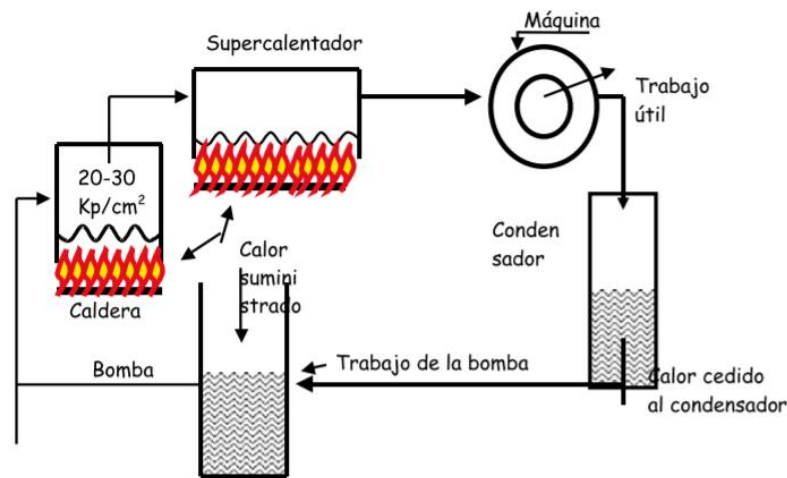


Figura 4 Máquina de vapor [GONZ10]

Primero el agua va a la caldera donde se calienta y a continuación al supercalentador para elevar aún más la temperatura y pasa a la máquina donde se expande y se produce el trabajo útil. Luego el vapor húmedo pasa por el condensador donde se enfría y el agua pasa a estado líquido hasta estar a temperatura ambiente y que se haya completado el circuito. El ciclo termodinámico es el Rankine, si se realiza sin pérdidas o rozamiento.

Las locomotoras de vapor fueron empleadas por primera vez en el siglo XIX, la primera fue la de Trevithick y The Rocket de Stephenson. Constan de una caldera que produce vapor, una máquina motora y un carro. El vapor que se produce en una caldera que puede ser de vapor saturado o recalentado, con hogar interno, sistema tubular y tiro forzado. Sobre la caldera está la cúpula que es un cilindro por el que el vapor alimenta a los cilindros motores. Los residuos de la combustión salen por una chimenea de tiro forzado y se reúnen con el vapor procedente de los cilindros. El vapor a presión va hasta la máquina motora, a simple o doble expansión, por un distribuidor de válvulas que lo introduce en los cilindros y se da el movimiento alternativo de los émbolos. Los émbolos están unidos a las ruedas motoras por bielas y manivelas que transforman un movimiento rectilíneo alterno en el circular uniforme de las ruedas. Además de estas partes también hay una bomba de alimentación de agua, reguladores de presión a vapor, indicadores del nivel y presión, recalentadores, silbatos, etc.

El carro contiene al aparato motor y se compone de chasis, carrocería y los ejes de las ruedas. Tras la locomotora va un vagón con carbón de repuesto y agua.

1.2.2 LOCOMOTORAS DIESEL

Las locomotoras diésel son las que utilizan la tracción de la fuerza motriz de un motor de combustión interna o explosión. Este motor se transporta en el mismo vehículo. Inicialmente se empezó con aplicación de transportes industriales y mineros.

Inicialmente los motores empleados para tracción diésel eran de explosión alimentados por gasolina o gas. Actualmente el motor diésel empleado consume una tercera parte menos de combustible y no es tan peligroso. Inicialmente el problema de era que a igualdad de potencia era más pesado y voluminoso, pero actualmente se han mejorado los materiales.

En este tipo de tracción la utilización de las calorías del combustible es más completa que en las anteriores, otras de sus ventajas son la facilidad de conservación y conducción, puesta en servicio rápida y ausencia de humos.

Los automotores ferroviarios del motor diésel deben ser ligeros, seguros y estar refrigerados. Los motores utilizados son de tipo rápido con velocidades proporcionales al tamaño de los pistones, su potencia. El motor suele ser de cuatro tiempos porque a pesar de que el de dos tiempos es menos pesado y da el doble de emboladas motoras a igual potencia, el de cuatro tiempos emplea bombas de barrido de gases, mejor refrigeración, el número de revoluciones es superior y se dan menos tensiones térmicas por lo que hay menos averías en los pistones.

En la locomotora de vapor y en la eléctrica el movimiento del motor empieza cuando arranca el vehículo, pero en la tracción con motor de combustión interna la energía motriz se produce por consumo de una parte de potencia del motor, esta hace que el combustible se introduzca al motor y aportando calor libere energía para desplazar el pistón. Por lo tanto, en este caso el motor se pone en marcha antes de arrancar porque de la potencia total sólo se aprovecha la que supere a la necesaria para mantener moviéndose el motor.

El par motor del diésel es aproximadamente constante con la velocidad para una cierta inyección. Las transmisiones se emplean para conseguir que la curva de variación del par motor diésel se adapte a la hipérbola equilátera ideal. Los tipos de transmisiones son mecánica, hidráulica, eléctrica o combinaciones de estas. En países montañosos se emplean transiciones eléctricas, en países llanos se suelen emplear transiciones mecánicas y la última en aparecer fue la transición hidráulica que es de las más utilizadas actualmente.

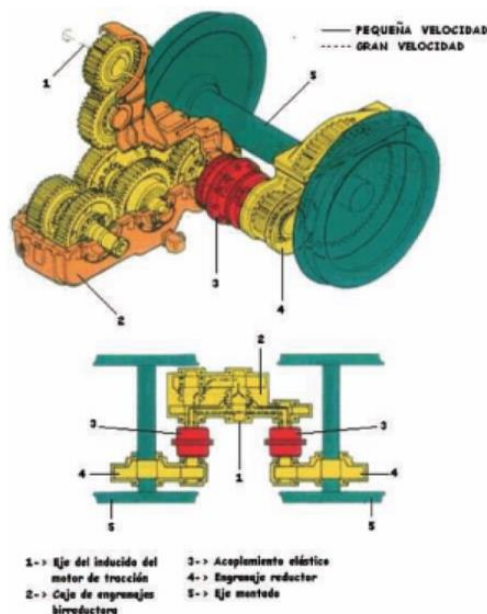


Figura 5 Transmisión mecánica. Tracción diésel. [GONZ10]

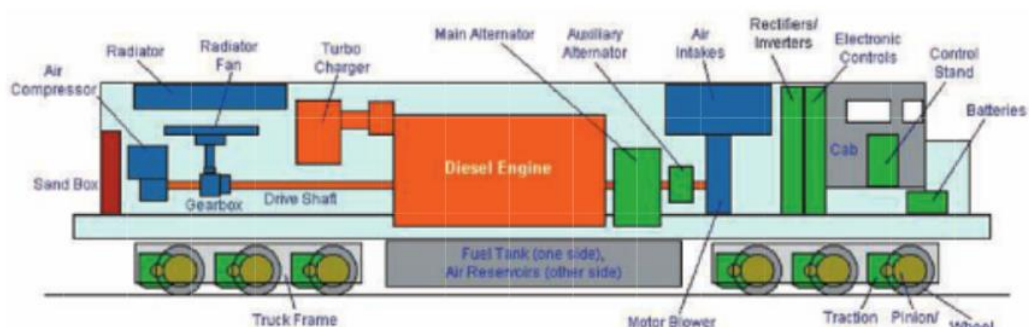


Figura 6 Locomotora diésel eléctrica [GONZ10]

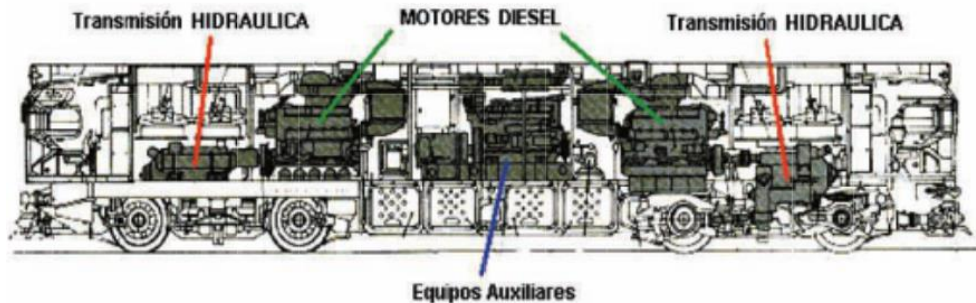


Figura 7 Transmisión hidráulica. Locomotora RENFE diésel hidráulica. [GONZ10]

1.2.3 LOCOMOTORAS ELÉCTRICAS

Las locomotoras eléctricas son las más utilizadas en la actualidad son el final de la evolución lógica del ferrocarril, sustituyendo a las locomotoras de vapor y diésel.

Los inicios de la tracción eléctrica son muy dispares, alternando entre tracción en continua y alterna, con soluciones que eran poco industrializables. Comienza un desarrollo más industrializado de estas técnicas con la tracción reostática donde para regular la locomotora se intercalan resistencias en serie con los motores de tracción. Gracias a este sistema se pudo regular la aceleración y potencia del tren porque la resistencia hacía que se aplicara más o menos tensión.

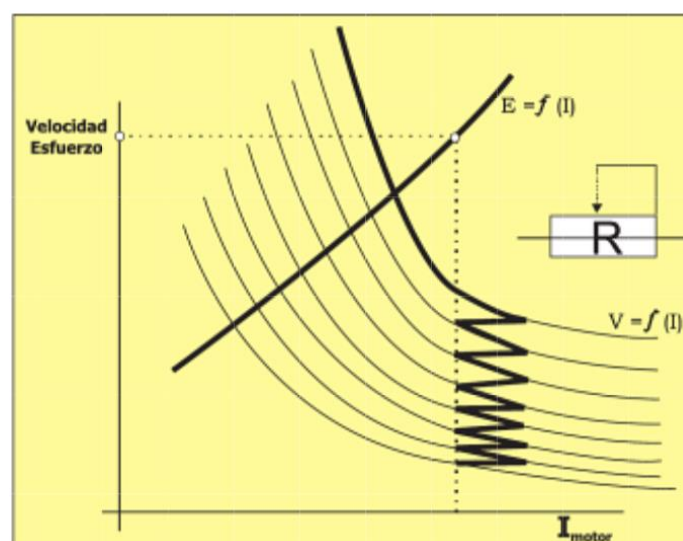


Figura 8 Tracción reostática. Intercalar resistencias en serie con los motores de tracción. [GONZ10]

Lo que supuso un gran avance fueron las técnicas de tracción Chopper que empezaron en los años 70. El Sistema Chopper consiste en un transformador de corriente continua a continua, inicialmente sólo funcionaba en AC. Por lo tanto, la tensión media de los motores es siempre menor que la de la catenaria porque es como un interruptor que abre y cierra el circuito constantemente. Este sistema permitió que fuera menor el mantenimiento electromecánico de contactores y combinadores; y se ahorrara energía en la fase de tracción que se podía utilizar en la fase de freno. Esta técnica requería filtrar los rizados que se provocaban por lo que eran necesarios complementar con filtros L/C a la entrada del tren.

La técnica de tracción monofásica fue utilizada en varias locomotoras, presenta como inconveniente que los problemas de la corriente continua. Su configuración más básica se muestra en la siguiente figura. Primero va un transformador, luego un motor monofásico en serie y la alimentación cambia a través de un sistema de levass que introduce tomas intermedias en el transformador de entrada.

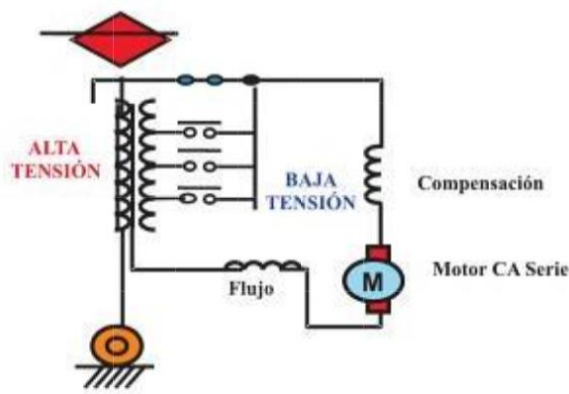


Figura 9 Esquema básico de tracción monofásica [GONZ10]

En 1972 aparece el primer equipo de tracción trifásica, equipado con motores asíncronos con rotor de jaula de ardilla y un equipo eléctrico sin contactos. Por aquel entonces la electrónica de potencia, en especial los tiristores funcionaban mal y daban interferencias, lo que hizo que no se desarrollara tanto este campo.

A continuación, se muestra una imagen de la estructura de una locomotora trifásica moderna.

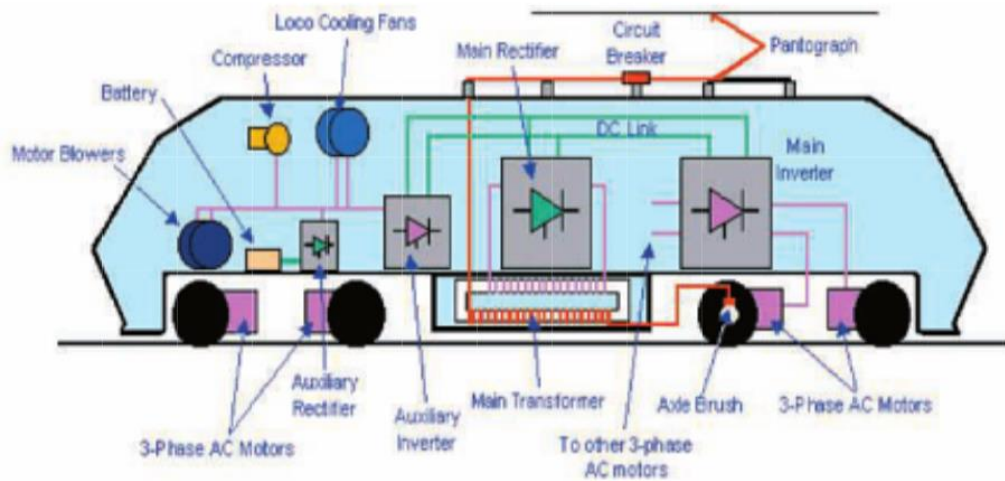


Figura 10 Locomotora trifásica [GONZ10]

1.3 ESTADO DEL ARTE

Actualmente existen softwares para el diseño de la línea aérea de contacto, dos comunes son PROL y Linear Draft. A continuación, en la figura se muestra un ejemplo de diseño en Linear Draft, esta herramienta ofrece una solución general, el problema es que existen particularidades, especialmente en zonas de desvíos.

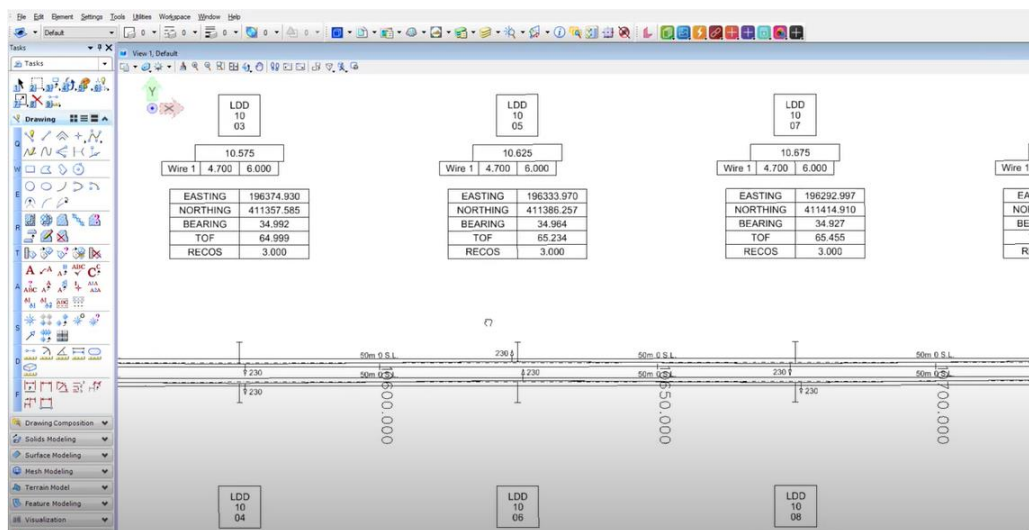


Figura 11 Linear Draft - Design Automation

En el caso de las zonas de aguja, el diseño de la línea aérea de contacto es complejo porque depende de muchos factores. Estos factores no se tienen en cuenta en los software existentes, por lo tanto estos son ineficientes a la hora de diseñar la catenaria en estas zonas.

1.4 MOTIVACIÓN DEL PROYECTO

Desarrollar una herramienta para el estudio del sistema de catenaria en la zona de cambio de agujas o desvío. El diseño de la línea aérea de contacto es complejo y depende de una gran cantidad de factores. Hoy en día no existen herramientas comerciales eficaces para el diseño de la línea aérea de contacto en zona de agujas, debido a la particularidad del proceso.

Para el diseño de la línea aérea de contacto deben tenerse en cuenta factores que no se contemplan en las herramientas de diseño existentes. Las estructuras de soporte de los desvíos y de los cruces deberían colocarse en el punto nominal 300 mm de la zona de apertura. Algunos de los factores que se deben tener en cuenta son los siguientes:

- Desplazamiento del aislador de sección
- Desplazamiento por el viento

- Desviación máxima lateral
- Instalación de atirantados
- Longitud del vano
- El verseno de la vía
- Peralte; inclinación transversal de la vía en las curvas, el carril exterior ha de estar una cota superior a la del interior

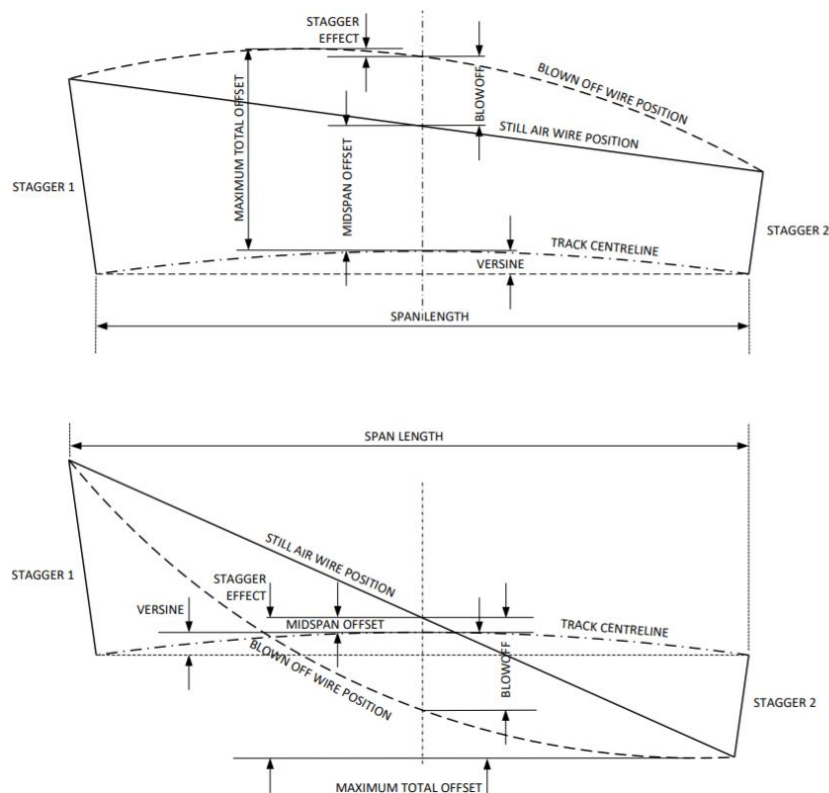


Figura 12 Desplazamiento máximo total [KEEN18]

1.5 OBJETIVOS

- El objetivo del proyecto es desarrollar una herramienta de cálculo y de representación gráfica que permita analizar el correcto diseño geométrico del sistema de catenaria en las cercanías de los desvíos, al ser estas zonas especialmente sensibles.
- Tener en cuenta la zona libre de obstáculos cuando se diseña la línea aérea de contacto. Contemplar todas las peculiaridades de cada tipo de desvío para el correcto diseño de la catenaria.
- Adquirirá conocimientos sobre los sistemas ferroviarios, la plataforma ferroviaria y los sistemas de tracción eléctrica.
- Adquirir conocimientos sobre las líneas aéreas de contacto y la especial dificultad existente en su diseño para la zona de agujas.

1.6 ESTRUCTURA DEL TRABAJO DE FIN DE MÁSTER

El trabajo de fin de máster se divide en los siguientes apartados:

1. Al principio se introducirá el ferrocarril, su historia y tipos de locomotoras. Este capítulo marca las bases del proyecto y se ve la evolución del ferrocarril a lo largo del tiempo, cómo se ha ido evolucionando hacia la electrificación en este campo de estudio.
2. Se introducirá el tema de la Electrificación del ferrocarril y sus distintos tipos. Se describirá en especial la línea aérea de contacto y sus características más significativas en cuanto a su diseño.
3. A continuación, se pasará a describir la interfaz vía y catenaria. Este capítulo consta de tres partes, elementos de la catenaria, elementos de la vía y la interacción entre estos. Se empezará describiendo los distintos elementos de una línea aérea de contacto, como los postes, ménsulas, vanos, descentramientos, y otros elementos fundamentales para su diseño como la altura del hilo de contacto. Luego se pasará a describir los elementos de la vía, el carril, los cambios de agujas, los desvíos,

travesías, etc. Al final se describirá la interacción en los elementos de vía y la catenaria.

4. Una vez definido todo lo anterior se pasará a ver la metodología de trabajo, cómo se desarrolla la herramienta que servirá para diseñar la línea aérea de contacto en zona de desvíos donde la particularidad y los factores que influyen hace difícil el encontrar herramientas comerciales para esta tarea.
5. Con el desarrollo de la herramienta finalizado, se mostrarán los resultados obtenidos y su contribución al diseño de la catenaria en zona de agujas.
6. Por último, se finaliza el trabajo sacando conclusiones sobre la realización de la herramienta y la investigación realizada, así como una descripción de futuros desarrollos.

2 ELECTRIFICACIÓN

En este capítulo se introduce el concepto de línea aérea de contacto, sus elementos, cómo se diseña y su desarrollo.

2.1 LÍNEA AÉREA DE CONTACTO (LAC)

2.1.1 INTRODUCCIÓN DE LAS LÍNEAS AÉREAS DE CONTACTO

El sistema de línea aérea de contacto (LAC) se encarga de entregar electricidad de forma continua al tren gracias al contacto deslizante del equipo que se encuentre en la parte superior del tren y toma la energía de un suministro de electricidad constante en la parte de arriba.

El sistema de línea aérea de contacto dota al tren de electricidad continuamente, por lo que debe de haber un contacto contante entre este y el pantógrafo. Una pérdida de contacto supondría una parada en la transferencia de energía que produciría un arco eléctrico entre el pantógrafo y la línea provocando daños irreversibles.

Este sistema está muy expuesto al exterior y es vulnerable al clima, aves, contaminación y vandalismo. Por lo tanto, tiene que poder resistir fallos eléctricos frecuentes sin que se degrade el rendimiento.

2.1.2 VENTAJAS E INCONVENIENTES DE LAS LÍNEAS AÉREAS DE CONTACTO

Las ventajas de los sistemas de línea aérea de contacto frente a la tracción diésel o por turbina de vapor:

- Mayor aceleración y frenado debido a que el peso es menor y capacidad de superar la potencia nominal para periodos cortos, mayor capacidad en trayectos de muchas paradas
- Costes menores de material rodante, así como de su operación (combustible) y mantenimiento

- Mayor fiabilidad del tren, por lo tanto, menores requisitos de flota
- Menos costes de mantenimiento de la vía
- Eliminación de la contaminación de los trenes diésel, y los riesgos de salud asociados
- La fuente de energía es flexible
- Reducción de gases de efecto invernadero
- Uso del frenado regenerativo lo que supone menor uso de energía
- Reduce el ruido y la vibración para mayor comodidad del pasajero

Las desventajas son las siguientes:

- Gran capital inicial de instalación
- Falta de redundancia en el cable de contacto
- Gestión del riesgo de seguridad por alto voltaje

Los sistemas de línea aérea de contacto tienen un coste inicial muy elevado, por esta razón el sistema debe de ser fiable y que se minimicen los costes de mantenimiento e interrupciones no planificadas.

2.2 DESARROLLO DE LAS LÍNEAS AÉREAS DE CONTACTO

2.2.1 COMIENZOS ELÉCTRICOS

Los primeros sistemas de línea aérea de contacto se utilizaron en los tranvías de pasajeros del siglo XIX. Eran un sistema de un solo cable que estaba suspendido entre postes y edificios, se alimentaba a baja tensión. Esto fue preferido a intentos anteriores con el tercer carril.

A principios del siglo XX la línea aérea de contacto se extendió a este sistema se incluyó en las líneas principales cuando se vieron las claras ventajas. Las pérdidas de voltaje aumentaron con la distancia por lo que se aumentó el voltaje para compensarlas. Hicieron

falta sistemas de suspensión más sofisticados para mantener la corriente a pedida que aumentaba la velocidad de la línea. En determinados casos los ferrocarriles tenían sus propias estaciones eléctricas.

Se empezaron a implementar esquemas de corriente alterna para las líneas de Lancaster a Heysham, y London Victoria a London Bridge, a 6,7 kV y 25 Hz de CA. Se necesitaban equipos complejos de rectificación en el tren debido a que la tecnología del motor no era madura en este momento.

La línea del norte de Inglaterra de Newport a Shildon que inicialmente era de carbón y atravesaba grandes pendientes, se electrificó a 1500 V CC en el año 1915.

2.2.2 CORRIENTE CONTINUA

Debido a las barreras de usar corriente alterna y a las limitaciones al usar corriente continua, el LAC sólo se utilizó en sistemas suburbanos y de carga donde la corriente continua LAC era económica por tratarse de cargas eléctricas pesadas y distancias cortas. En 1930 se acordó como estándar nacional el sistema de línea aérea de contacto en corriente continua a 1500 V. La Segunda Guerra Mundial paralizó estos avances. Tras la guerra se centraron en reconstruir las infraestructuras destrozadas en vez de financiar nuevos proyectos.



Figura 13 Ruta de Sheffield - Manchester con 1500 V CC LAC. [KEEN18]

El estándar de CC se volvía obsoleto y las líneas inglesas del este decidieron cambiar a 25 kV CA. Mientras que el resto de Europa adoptó los 1500 V CC antes y después de la guerra, esta red aún está en uso en algunos lugares de Europa.

2.2.3 CORRIENTE ALTERNA

En 1950 aumentó el interés por la corriente alterna en la línea aérea de contacto debido al surgimiento de la industria de suministro de electricidad que contaba con tecnología de frecuencia industrial. La transmisión de CA de alta tensión y larga distancia era factible y en 1940 Alemania fue la primera en experimentar con tracción a 50 Hz CA. En Europa se comenzó a usar 25 kV CA a frecuencia industrial, 50 Hz; en Reino Unido esto se aprobó en 1956.

Los sistemas de CA de 25 kV requerían tolerancias eléctricas en la infraestructura existente, por lo tanto, se adoptó una distancia de 275 mm como estándar de espacio de aire para puentes. En Reino Unido esta adaptación supuso reconstrucciones importantes, especialmente en puentes cercanos a grandes estaciones, en estas áreas se propuso reducir el voltaje a 6,25 kV y los espacios libres de 100 mm. Los trenes serían de doble voltaje y

cambiarían entre uno y otro cuando fuera necesario, usando las áreas neutras que se encontraban a cada lado del puente.

La adaptación de las líneas en Reino Unido de 1500 V CC a 6,25 kV CA supuso una especial precaución en las tolerancias estándar. Posteriormente las tolerancias fueron más reducidas para poder adoptar los 25 kV.



Figura 14 Línea de Gidea Park 1500 V CC, se convierte a 6.25 kV CA y posteriormente a 25 kV.

[KEEN18]

La electrificación de West Coast Mainline (WCML) fue el primer esquema de 25 kV a gran escala implementado en Reino Unido. British Rail propuso un programa de adaptación continua de esquemas eléctricos para la línea principal, pero los costes eran muy elevados y el Ministerio de Transporte dijo que tenían que bajar debido a las presiones por la expansión de la red de autopistas y empeoramiento de las finanzas. Por lo que el British Rail hizo una revisión general del diseño del OLE (Overhead Line Equipment), se abandonaron los arreglos personalizados y pesados de los portales, sustituyéndolos por un nuevo sistema métrico ligero, modularizado y que se basaba en cabezales, se creó el OLEMI (Overhead Line Equipment Master Index). El OLEMI que se conoció como Mask 3, se desarrolló posteriormente a Mask 3a y se implementó en la segunda fase de la línea del oeste, de Weaver Junction a Glasgow en 1974.

2.2.4 LÍNEAS DE ALTA VELOCIDAD

En Europa se empezó a explorar la alta velocidad en trenes de pasajeros con la llegada de la tracción eléctrica. En la década de 1950 se llevó a cabo en Francia un experimento ferroviario estatal que alcanzó el récord de 326 km/h en marzo de 1955. Utilizó un sistema de 1500 V CC en el que se aumentaba el voltaje de la línea de 1900 V mediante subtracciones móviles. Esta prueba mostró los obstáculos que se debían superar si la velocidad pasaba de los 300 km/h. El calor por fricción provocó que el pantógrafo colapsara y se dañara la vía de forma que prácticamente se descarrila el tren.

Japón fue el primero en desarrollar un ferrocarril electrificado desde el cero, en 1964 se inauguró el Tokyo – Osaka que utilizaba 25 kV, 60 Hz CA; sin pasos a nivel, la línea fue diseñada para alta velocidad con velocidades de línea de hasta 210 kph.

Francia continuó desarrollando su sistema de alta velocidad (LGV). Utilizaban líneas de alta velocidad, trenes de alta potencia y un autotransformador de 50 kV. El primer LGV entre París y Lyon se inauguró en 1981, más adelante se exportó a Alemania (ICE), Reino Unido (High Speed One) y al resto del mundo.

2.3 TIPOS DE LÍNEAS AÉREAS DE CONTACTO

Existen distintos tipos de sistemas de línea aérea de contacto. En los siguientes puntos se explicarán los tipos y aplicaciones de las líneas aéreas de contacto, carriles conductores (tercer carril) y perfil conductor aéreo (catenaria rígida). [KIES08]

2.3.1 TIPOS DE LÍNEAS AÉREAS DE CONTACTO

Se utilizan líneas aéreas de contacto, por un tema de seguridad, si la tensión sobrepasa los 1000 V CA y 1500 V CC. Si la velocidad supera los 100 km/h es esencial centrarse en la

transmisión de energía, por lo que las líneas aéreas de contacto han evolucionado de los sistemas tipo trolley a los utilizados en alta velocidad de hoy en día.

Los hilos de contacto son los que están tensos y en contacto con el captador de corriente o pantógrafo, estos junto con la catenaria o sustentador, péndolas y péndola en “Y” si la hay, forman el equipo de línea de contacto longitudinal. Los hilos de contacto están montados en zig-zag con respecto al eje de la vía porque de esta manera se consigue un desgaste uniforme de las pletinas del pantógrafo.

En las líneas aéreas de contacto de trolebuses se utiliza un montaje distinto porque los trolebuses son vehículos de tracción eléctrica para pasajeros que toman corriente de una línea aérea bifilar por un trole y cuentan con neumáticos que les permiten circular libremente sin necesitar carriles. El trole es el dispositivo de toma de corriente que tiene una pértiga metálica flexible con un contacto deslizante para que el dispositivo no se desenganche de la corriente.

a) Líneas de contacto tipo trolley

Son los sistemas que no tienen sustentador, su velocidad máxima es de 80 km/h y su montaje es muy sencillo. Sólo pueden utilizarse para tranvías, trolebuses y ferrocarriles industriales.



Figura 15 Trolebús en Lucerne, Suiza. [KEEN18]

Existen varios tipos de suspensiones y apoyos para este tipo de sistemas, que se muestran a continuación.

- La **suspensión sencilla** es aquella que el hilo de contacto se sujeta por una grifa montada en una ménsula.

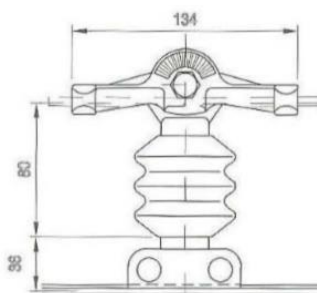


Figura 16 Suspensión sencilla [KIES08]

- **Suspensión con y sin regulación automática**, el hilo de contacto está sujeto por péndolas que se fijan a punto de apoyo que solo permiten que se muevan por el hilo de contacto

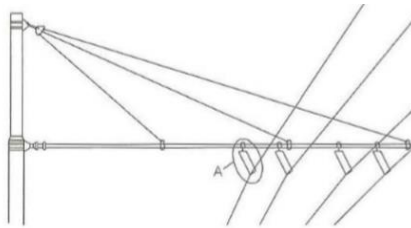


Figura 17 Sistema de suspensión de una línea aérea de contacto para trolebuses [KIES08]

- **Suspensión tipo Delta**, el hilo de contacto se sostiene por dos grifas con un falso sustentador que le deja moverse de forma longitudinal sobre la polea sujeta por la ménsula.

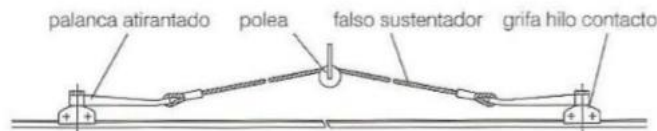


Figura 18 Suspensión tipo Delta [KIES08]

- **Apoyos articulados** son ménsulas que cuentan con resortes de goma para amortiguar los movimientos del hilo de contacto.

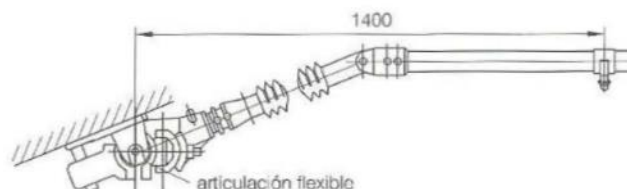


Figura 19 Apoyo articulado [KIES08]

La línea de contacto tipo trolley con péndola en “Y” tiene el diseño de una línea de contacto simple con el hilo de contacto unido al apoyo por un falso sustentador.

b) Línea aérea de contacto con sustentador

Las líneas aéreas de contacto con sustentador son las que tienen sustentadores sujetando los hilos de contacto. Los sustentadores soportan los hilos de contacto con péndolas. Los vanos en este diseño pueden ser más largos que los del tipo trolley.

- **Línea aérea de contacto con péndolas en los apoyos**, está soportados por una catenaria simple. Son los que se utilizaban inicialmente cuando se comenzó la electrificación ferroviaria. Están semicompensadas y cuentan con péndolas que conectan el hilo de contacto con la catenaria en el apoyo. La elasticidad en los apoyos era inadecuada debido a la presencia de las péndolas, esto provocaba cambios en la altura del hilo de contacto debido a que las variaciones de temperatura modificaban la longitud de la catenaria.

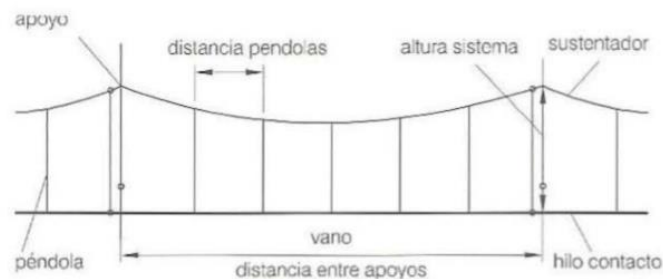


Figura 20 Línea de contacto con péndolas en los apoyos [KIES08]

- **Línea aérea de contacto sin péndolas en los apoyos**, en estas las péndolas se colocan a una distancia entre 2,5 y 10 m de los apoyos para evitar las desventajas mencionadas en el punto anterior. Estas están totalmente compensadas, cuentan con equipos de compensación colocados a ambos lados de un punto fijo. El equipo de compensación está formado por contrapesos que cuando los hilos se dilatan o contraen las poleas se enrollan o desenrollan.

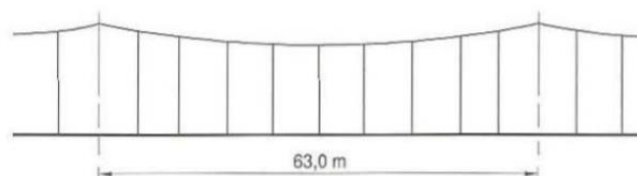


Figura 21 Línea de contacto sin péndolas en los apoyos [KIES08]

- **Línea de contacto con péndola en Y**, tienen un falso sustentador que se encuentra entre el cable sustentador y el hilo de contacto. El falso sustentador hace que se igualen las elasticidades en el apoyo y en el centro del vano.

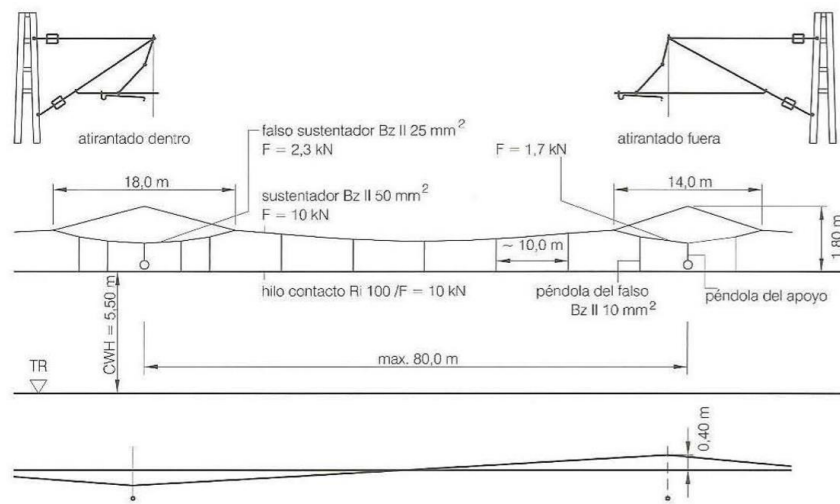


Figura 22 Línea aérea de contacto Rc 200 con diferentes longitudes de péndolas en "Y"

- **Línea de contacto con suspensión inclinada**, son las que tienen descentramiento el cable sustentador y el hilo de contacto.

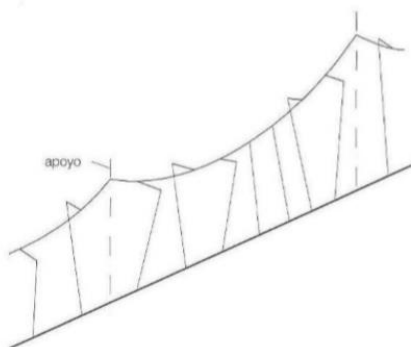


Figura 23 Línea de contacto con suspensión inclinada [KIES08]

- **Línea de contacto con péndolas elásticas**, sirven para igualar la elasticidad en el vano, las péndolas se conectan a los extremos elevados y gracias al sustentador se logra una curvatura en la que se modifica la elasticidad.
- **Línea de contacto con sustentador auxiliar**, cuenta con un segundo sustentador, uno auxiliar que está entre el principal y el hilo de contacto.



Figura 24 Línea de contacto con sustentador auxiliar [KIES08]

c) Línea aérea de contacto horizontal

En este tipo, los sustentadores e hilos de contacto están en posición horizontal con el otro. Estos sistemas no necesitan estructuras tan altas porque no se mueven tanto con el viento. Se comenzaron a usar cuando se querían evitar en zonas urbanas el uso de postes, los hilos de la catenaria se podían anclar a la pared.

2.3.2 TERCER CARRIL CONDUCTOR

Es la primera forma de suministro de energía eléctrica en vehículos de tracción ferroviarios, se suele utilizar en el metro y ferrocarriles urbanos. Los sistemas de tercer carril son conductores rígidos situados sobre elementos aislados fuera del gálibo y al lado de la vía, de esta forma son seguros para las personas. La captación de corriente se puede realizar desde la parte lateral, desde la parte superior o desde la parte inferior del carril. Las medidas de protección en estos sistemas constan de pantallas aislantes que se montan sobre los aisladores del apoyo o soporte del tercer carril.

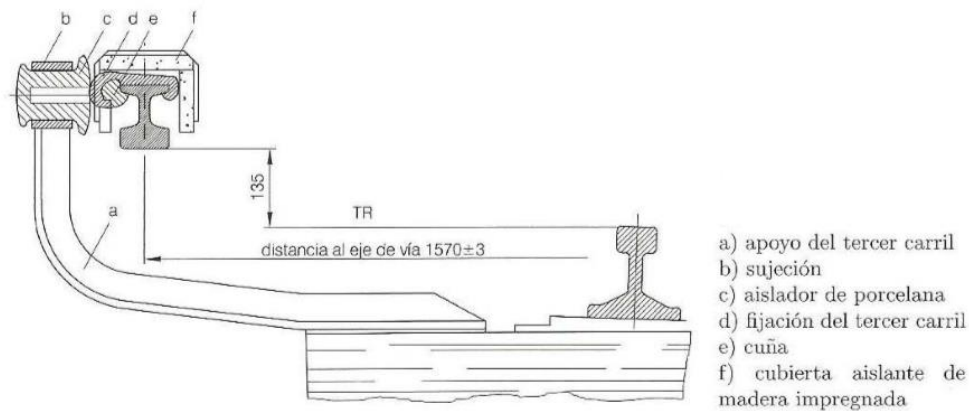


Figura 25 Sistema tercer carril, Metro de Berlín. [KIES08]

En sistemas de tercer carril inicialmente se usaban carriles conductores de acero, más adelante surgieron carriles compuestos de acero aluminio con el fin de incrementar la potencia de los ferrocarriles de CC. Los carriles compuestos acero aluminio cuentan con una superficie de contacto de acero inoxidable que es muy resistente al desgaste y tiene una gran vida útil.

2.3.3 CATENARIA RÍGIDA

La catenaria rígida o perfil conductor aéreo, es el sistema en el que se instalan perfiles conductores en la parte superior del gálibo. Esto permite reducir el espacio necesario para su montaje, especialmente en túneles cuyo gálibo es reducido, se reducen también los costes. En este caso no hay que contar con juntas de compensación para las variaciones de temperatura, en lugar de esto la catenaria rígida tiene una forma senoidal por la que se reduce el descentramiento con las contracciones y dilataciones. Este sistema permite velocidades de hasta 100 km/h. Este tipo de instalación facilita el mantenimiento y reparación, es una buena opción para las zonas de túneles y de agujas.

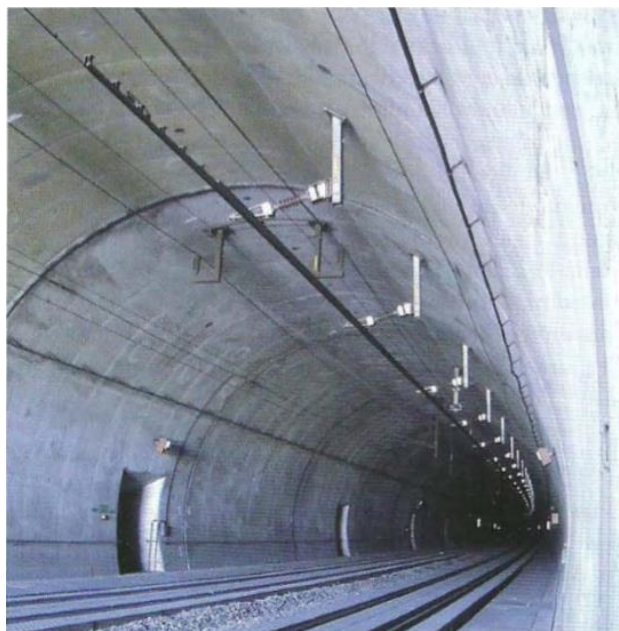


Figura 26 Catenaria rígida. Túnel de Sittenberg, Austria. [KIES08]

2.4 DISEÑO DE LAS LÍNEAS AÉREAS DE CONTACTO

Este sistema de línea aérea de contacto comprende la línea aérea de contacto, las ménsulas, los postes, cimentaciones y conductores de retorno de corriente. La línea aérea de contacto (LAC) se forma por cable sustentador, hilo de contacto, péndolas, falsos sustentadores, puntos fijos y equipos de compensación.

Hay varios tipos de diseños para una línea aérea de contacto, entre los más comunes se encuentran las que utilizan postes individuales, las montadas sobre un pórtico funicular, las de semipórticos o pórticos rígidos.

En la figura de a continuación se muestra una línea de contacto aérea que usa postes individuales para cada vía, este diseño suele encontrarse en vías principales, también en transporte urbano. En la figura se pueden apreciar los componentes principales de este tipo de diseño: postes, ménsulas, sustentador, hilo de contacto, líneas feeder de alimentación, conductor de retorno, etc.

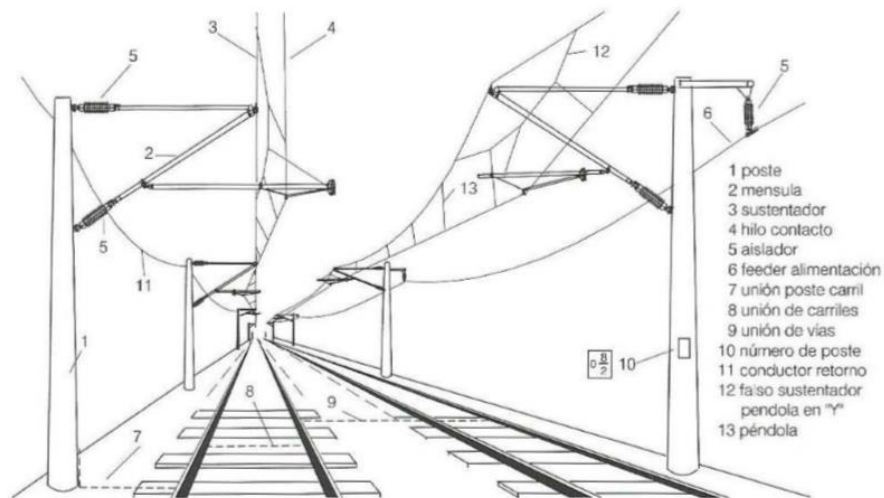


Figura 27 Líneas aéreas de contacto sobre apoyos individuales, utilizando postes de hormigón.

[KIES08]

La línea aérea de contacto consta de vanos individuales, cada cual con su función; esta también está dividida en cantones de regulación de tensión mecánica. Al final de los cantones se instalan los anclajes fijos o anclajes con equipos de compensación, estos últimos sirven para mantener constante la tensión mecánica del sustentador y del hilo, que puede variar debido a los cambios de temperatura. Se coloca un punto fijo en medio del cantón de regulación para darle estabilidad y no permitir desplazamientos de los equipos por la línea. Los seccionamientos son los que permiten la transición entre secciones de línea de contacto colaterales.

La línea de contacto debe de satisfacer en todo momento los requisitos eléctricos, térmicos estáticos y dinámicos. Para seleccionar un tipo de línea aérea de contacto hay que basarse en cada uno de sus parámetros y elegir la más adecuada en cada caso. Para diseñar una línea eléctrica hay que seleccionar muchos factores, entre ellos las secciones de los conductores y tensiones mecánicas, las longitudes de los vanos, la altura del sistema, distancia entre péndolas, y muchas otras características que dependen del tipo de línea seleccionado y del lugar donde haya que instalarle.

3 ELEMENTOS DE LA CATENARIA

En este capítulo se muestran los distintos elementos de la catenaria.

3.1 INTRODUCCIÓN DE LOS ELEMENTOS DE LA CATENARIA

El **hilo de contacto** es el elemento principal de la catenaria, es el cable por el que el pantógrafo obtiene electricidad de la red. La altura a la que está situada el hilo de contacto es importante porque para que el rozamiento con el pantógrafo sea homogéneo la altura debe de ser constante. Cuando la velocidad del tren es baja, entre 40-50 km/h, basta con tensar el hilo de contacto, puede haber hasta una diferencia de 20 cm de altura. Sin embargo, cuando la velocidad del tren es más alta, la diferencia de altura es crítica, para ello hay que tender un cable extra, el **sustentador**, este sujeta al hilo de contacto a través de **péndolas**, de esta manera la altura entre el carril y el hilo de contacto se mantiene constante. [MONT02]

Para sostener el hilo de contacto, sustentador y péndolas de forma correcta dependiendo de las características de diseño, existen dos sistemas, pórticos y ménsulas. En el **pórtico** la catenaria se sostiene a través de una estructura, puede ser un pórtico rígido si esta es metálica y formada mediante perfiles; o pórtico funicular si está formada por cables de acero. En el caso de las ménsulas, son postes sobre los que se monta una estructura metálica que soporta los cables.

Estos son los distintos elementos de la catenaria:

3.1.1 HILO DE CONTACTO

El hilo de contacto es el elemento fundamental de la catenaria. Gracias a este elemento que se conecta con el pantógrafo, se le suministra la corriente necesaria al tren para desplazarse. Está formado por un conductor y tiene dos ranuras para soportarlo. Normalmente es de cobre

electrolítico, también los hay de aleaciones de plata para aumentar la conductividad, cadmio para aumentar la dureza y magnesio porque aumentan las tensiones mecánicas de trabajo. Las secciones más utilizadas son las de 107, 120 y 150 mm².

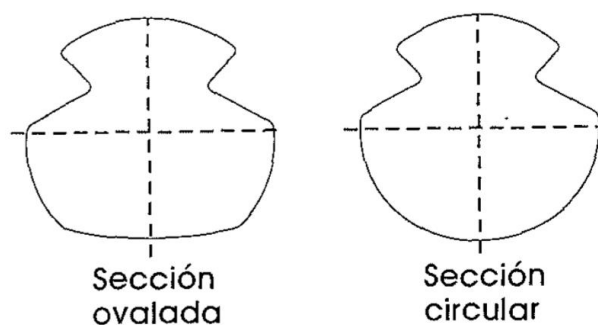


Figura 28 Dos tipos de secciones de un hilo de contacto [MONT02]

La catenaria se desplaza de forma alternativa de un lado a otro del eje central, esta distancia horizontal se llama **descentramiento**. El descentramiento evita que el pantógrafo se caliente debido a la concentración del hilo de contacto en un solo punto donde se produciría un desgaste excesivo que acabaría por romper las pletinas del pantógrafo.

3.1.2 SUSTENTADOR

El sustentador es el cable que soporta el sistema de hilos de contacto y péndolas, se encarga de aplicar tensión mecánica al sistema. El sustentador está formado por hilos enrollados, su sección depende del tipo de electrificación y tensión.

Corriente continua: 750/1500/3000 V; Cobre: 299, 182, 153, 120, 95 mm²; Bronce: 184, 116 mm²

Corriente alterna: 15000/25000 V; Bronce: 50 y 65 mm²

En vías secundarias que no precisan de grandes consumos, se usan cables de acero en lugar de bronce o cobre porque son más baratos, aunque tengan mayor resistencia eléctrica.

En la actualidad es común utilizar un cable Cooperwell que está formado por alambres de acero con un recubrimiento de cobre.

Si el sustentador está por debajo de la ménsula la catenaria es suspendida, si está por debajo la catenaria es apoyada.

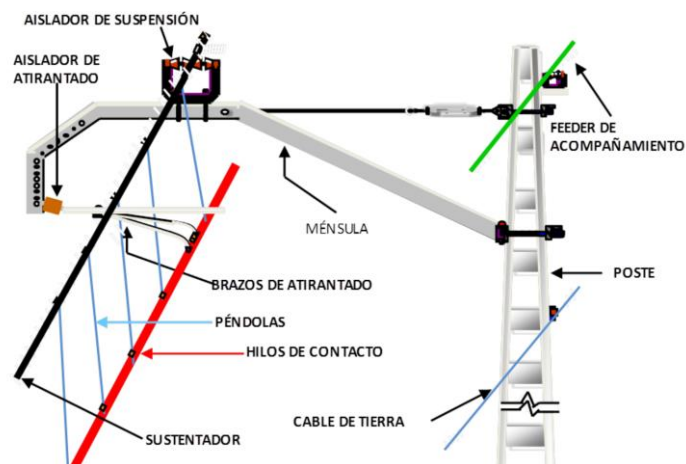


Figura 29 Catenaria apoyada [VADE__]

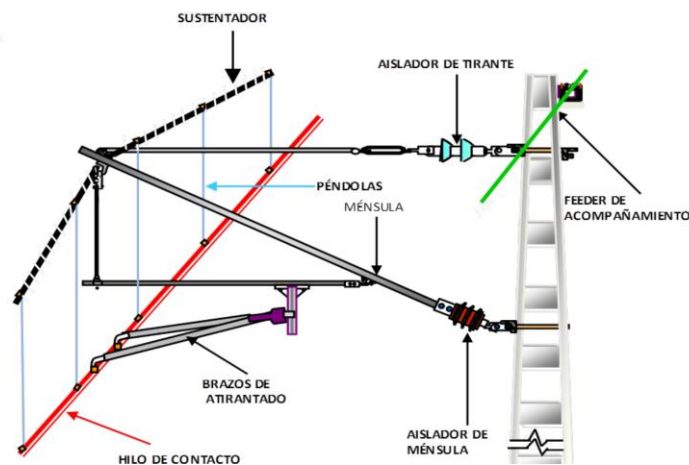


Figura 30 Catenaria suspendida [VADE__]

Algunas veces es necesario utilizar falsos sustentadores, cables intermedios entre el sustentador y los hilos de contacto. Estos cables suelen ser de acero y su función es la de formar una péndola en Y.

3.1.3 FEEDER DE ACOMPAÑAMIENTO

Cuando el consumo de corriente es elevado, del orden de 2000 A, hay que tener en cuenta la temperatura. El paso de la corriente eléctrica hace que se caliente el hilo de contacto y el sustentador; por lo que hay que tenerlo en cuenta para diseñar la catenaria y decidir los límites de funcionamiento de la instalación. Para evitar que los cables se calienten en exceso, las secciones de cobre son elevadas, lo que se opone a la ligereza y flexibilidad que debe tener una catenaria.

Para que la catenaria se mantenga ligera y flexible, permitiendo también consumos de corriente elevados, se recurre al feeder de acompañamiento. Este consiste en un tendido de cables de cobre, aislados, que se monta sobre la cabeza del poste o en su lateral, y se conecta a la catenaria cada 120 o 300 metros. Esto consigue reducir la sección de los hilos de contacto y el sustentador para mantener una sección equivalente de línea adaptada a grandes consumos.

3.1.4 PÉNDOLAS

Las péndolas son un conjunto de cables cuya función es la de mantener los hilos de contacto a una distancia homogénea del plano de rodamiento, son de cobre o bronce. Las más comunes tienen una sección de 5 mm de diámetro y son de cobre. Si su longitud es inferior a 600 mm se llaman péndolas cortas y rígidas; si su longitud es superior a 600 mm, péndolas largas o articuladas. Cuando las péndolas son largas es necesario poner conjuntos de alimentación cada 200 o 300 m porque sin ellos la conexión eléctrica del sustentador y el hilo de contacto no está garantizada.

Existen un tipo de péndolas con cable flexible de 16, 20 o 25 mm² que además de mantener el hilo de contacto a una distancia adecuada, también proporcionan la unión eléctrica entre el hilo de contacto y el sustentador. Este nuevo tipo de péndolas evita colocar alimentadores entre sustentador e hilo de contacto, esto podía provocar puntos duros en la línea donde el pantógrafo tenía riesgo de separarse.

La péndola se une al hilo de contacto a través de **grifas**, se monta sobre las ranuras del hilo de contacto, permiten la libre circulación del pantógrafo.

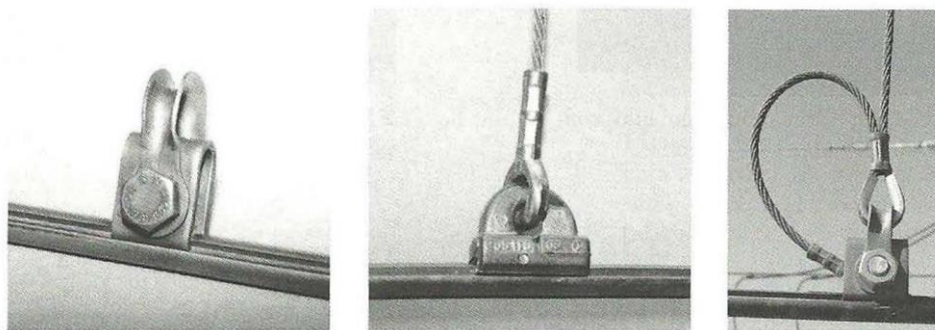


Figura 31 Grifas de péndola de hilo de contacto [KIES08]

El conjunto péndola grifa permite que se adapten a las inclinaciones que los descentramientos provocan sobre el pantógrafo.

3.1.5 CABLES DE ACERO

Los cables de acero están formados por un cable que sirve de eje y otros que se van arrollando con un paso de hélice sobre este. Se utilizan para soportar esfuerzos mecánicos a tracción cuando se monta la catenaria. A veces se usan como conductores en vías secundarias. Las secciones más comunes son las de 6, 8, 12, 48, 60, 72, y 108 mm².

3.1.6 POSTES

Los postes se encargan de sujetar la catenaria y sus elementos auxiliares. Su base se fija con macizos de hormigón u otros materiales. Suelen ser de acero galvanizado y se forman por perfiles en U, angulares unidos con pletinas angulares, o a veces son postes en forma de doble T. Otro tipo de poste también utilizado es el de hormigón prensado y armado.

Para saber qué poste es el adecuado se deben calcular primero los esfuerzos en su base dependiendo del punto de la línea donde se encuentra, y elegir el que sea capaz de soportarlos y el macizo que resista el momento volcador.

El eje del poste está fuera del gálibo de circulación del tren, a 3 m del eje, la superficie general del macizo debe estar a 50 cm de altura por debajo del plano medio de rodamiento. Los postes generalmente están colocados con una pequeña inclinación para compensar los esfuerzos del peso de ménsula sustentador e hilos de contacto. Además de estos pesos, los cables están sometidos a tensiones mecánicas elevadas de 1000 a 2000 kg por lo que es necesario que haya uno o dos tirantes anclados al suelo por un macizo de hormigón que soporte las tensiones.

3.1.7 MACIZOS DE FUNDACIÓN DE POSTES Y ANCLAJES

Los postes de la catenaria se montan a través de cimentaciones de hormigón que se denominan macizos de fundación. En función de la plataforma de la vía pueden ser macizo de fundación en desmonte, cuando el terreno es llano o en trinchera, y macizo de fundación en terraplén si la plataforma está en terraplén. Hay otro tipo que sirve como contrapeso de los anclajes de catenaria y puntos fijos de la línea y se llama macizo de anclaje. La elección de macizo depende del terreno y las cargas que deba sostener.

3.1.8 AISLADORES

La catenaria está formada por conductores que deben de estar aislados en los apoyos y tierra por aisladores que suelen ser de porcelana, vidrio o material plástico. Los aisladores se sujetan a los apoyos a través de herrajes. Sus características principales son rigidez dieléctrica para soportar la tensión de trabajo, resistencia mecánica y forma adecuada.

3.1.9 MÉNSULAS

La ménsula es el elemento que se apoya en el poste y permite que la línea aérea de contacto se encuentre en la posición correcta. Hay dos tipos de ménsulas, de celosía y tubulares.

Las **ménsulas de celosía** son las que están formadas por cuerpo que se forma por dos perfiles de acero galvanizado en forma de U, y este está unido a su parte inferior. En la parte inferior existe un mecanismo para fijarlo al poste. En la parte superior hay un tirante que es un cable

de acero si la ménsula trabaja a tracción, en el caso de que trabaje a compresión está formado por un perfil de hierro.

Las **ménsulas tubulares** tienen un tubo principal de acero o aluminio y en su interior se desplaza otro de inferior diámetro paralelamente al plano de rodamiento y así se colocan los elementos de atirantado sobre él. Esta ménsula también tiene un tirante que soporta esfuerzos de tracción o compresión, como pasa con la de celosía.

Las ménsulas se fijan de forma rígida al poste o pueden girar sobre el plano horizontal al regular la tensión mecánica del sustentador, en este caso incluyen una rótula en el poste. La rótula permite que la ménsula gire con respecto al poste y el sustentador e hilos de contacto se muevan linealmente debido a la dilatación.

3.1.10 PÓRTICOS

Los pórticos están constituidos por postes, a ambos lados de la vía, cuyos extremos superiores se unen entre sí mediante una vía o cable de acero y aquí se sostiene la catenaria. Hay dos tipos de pórticos, se llama funicular a los que la unión de los postes se lleva a cabo mediante un cable de acero, y pórtico rígido aquel en el que la unión se realiza con una viga rígida o una celosía metálica. Los pórticos son comunes en las estaciones, agrupan catenarias de varias vías porque no existe espacio para postes en cada una de ellas.

3.2 CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS DE LA CATENARIA

Una instalación de línea aérea de contacto tiene como objetivo funcionar de forma homogénea y asegurar que el pantógrafo capta correctamente la corriente. Para que la instalación funcione hay que evitar cambios bruscos de movimiento de las masas y la concentración puntual de estas. Hay que poner especial atención en que los desplazamientos de la geometría de la catenaria estén dentro de los límites permitidos.

Las tensiones mecánicas elevadas de la catenaria, debidas a la elevada velocidad del tren, transmiten esfuerzos elevados en las ménsulas y resto de elementos. Para evitar la concentración puntual de masas se distribuyen péndolas y pesos para dar elasticidad al vano.

3.2.1 VANO

Es la distancia existente entre dos postes contiguos que soportan la catenaria. La longitud típica del vano es de 60 m en línea recta, cuando aumenta la curvatura el vano se reduce.

Al estar descentrada la catenaria a ambos lados de la vía, el descentramiento del hilo de contacto debe estar relacionado con la longitud del vano con respecto al centro del pantógrafo. Con ello se consigue que haya el máximo descentramiento y el hilo de contacto esté en la zona de frotamiento del pantógrafo. También hay que tener en cuenta el viento lateral que se puede ejercer en la línea de contacto y desviarla de la posición original.

La zona de frotamiento de los hilos de contacto no puede exceder la máxima longitud del semipantógrafo.

Al proyectar la catenaria en el plano horizontal, las tensiones que se tienen en cuenta son la mecánica de los hilos de contacto más la del sustentador, y la producida por el viento transversal. Se debe analizar el caso más crítico que es el de tensión mínima y viento máximo, que daría el máximo descentramiento.

3.2.2 TENSIONES MECÁNICAS DE LOS CABLES

Las tensiones mecánicas de trabajo máximas dependen del hilo de contacto y están normalizadas.

En la siguiente tabla se ven las tensiones mecánicas según el tipo de hilo de contacto. La capacidad mecánica de la tabla indica la tensión que se aplica a una sección para que se rompa. El límite elástico de 0,2% de deformación permanente debe alcanzarse por lo menos con el 85% de la capacidad mecánica.

Los hilos de contacto se desgastan progresivamente, se consideran útiles si el desgaste es igual o menor del 30%. La tensión máxima que soportan, con coeficiente de seguridad mínimo de 2, debe calcularse con respecto al 70% de la sección.

Tabla 1 Tensiones mecánicas de los diferentes hilos de contacto [MONT02]

Tipo	Designación UNE 37.137	Sección en mm²	Capacidad d mecánica mínima (N)	Coeficiente e seguridad mínimo	Tensión máxima (N)
Hc 71 Cu ET P Cobre electrolítico	C-110	107	38300	2	13400
HC 74 Cu-Ag 0,1% Cobre-Plata	C-1141	107	38300	2	13400
HC 76 Cu-Cd 1% Cobre-Cadmio	C-1160	107	47750	2	16700
HC 201 Cu ET P Cobre electrolítico	C-1110	120	43000	2	15000

HC 204					
Cu-Ag 0,1%	C-1141	120	43000	2	15000
Cobre-plata					
HC 206					
Cu-Cd-1%	C-1160	120	53500	2	18700
Cobre-Cadmio					
HC 501					
Cu ET P	C-1110	150	53700	2	18800
Cobre electrolítico					
HC 504					
Cu-Ag 0,1%	C-1141	150	53700	2	18800
Cobre-Plata					
HC 506					
Cu-Cd 1%	C-1160	150	66900	2	23415
Cobre-Cadmio					

La tensión mecánica para el cable sustentador tiene los valores mostrados en la siguiente tabla. En este caso los coeficientes de seguridad no están afectados por las condiciones atmosféricas porque la tensión mecánica permanece constante mediante un sistema de compensación automática de tensiones.

Tabla 2 Tensiones mecánicas de cables para el sustentador [MONT02]

Tipo	Sección en mm ²	Capacidad mecánica mínima (N)	Coefficiente seguridad mínimo	Tensión máxima (N)
Bronce Bz11 70/19	65,81	38600	2,5	15440 12866
Cobre	153,7	59388	2,5	23750 19796
Bronce	184	107923	3	43170 35975
Cobre	225	86240	3	28746
L-253	253,35	41940	3	13980
LA-110	94,2	43100	3	14367
L-110	117	19306	3	6435
Ac-60	60	72422	3	24140
Ac-72	72	92120	3	30700

Los cables de feeder de acompañamiento, los cables de tierra y todos los que no tengan compensación mecánica, deben de tener en cuenta las condiciones climatológicas y coeficientes de seguridad al diseñarlos.

3.2.3 ESFUERZOS EN LOS BRAZOS DE ATIRANTADO

Los hilos de contacto no pueden estar en la misma posición del eje de vía porque con el frotamiento constante del pantógrafo acabarían produciendo un calentamiento en la zona de contacto y desgaste en las pletinas que podría acabar cortándolas. Para evitarlo los hilos de

contacto se colocan formando una línea poligonal para que el punto de contacto se desplace a por ambos lados del centro del pantógrafo durante el desplazamiento del tren. Esto permite que la pletina dure más al desgaste y que este se dé uniformemente por toda su superficie, así como su enfriamiento.

Se llama **descentramiento** a la distancia existente en el poste desde el eje de vía hasta donde se sitúa el hilo de contacto. El **conjunto de atirantado** es el formado por las piezas mecánicas que posibilitan el descentramiento.

- **Esfuerzo radial sobre el brazo atirantado en recta**

Cuando el eje de la vía está en línea recta la catenaria tiene que desplazarse respecto al eje una distancia llamada descentramiento en cada apoyo. Para desplazar los hilos de contacto del eje se llama esfuerzo radial, lo transmite el brazo de atirantado.

El esfuerzo radial depende del descentramiento (D), la longitud del vano (L_v), el número de hilos de contacto (n) y la tensión de estos hilos (T).

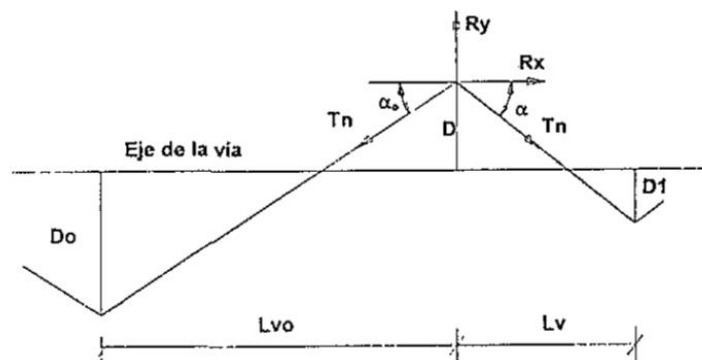


Figura 32 Descentramiento de la catenaria en línea recta [MONT02]

Por lo tanto, el esfuerzo radial en línea recta en sus componentes x e y es el siguiente:

$$R_y = n \cdot T \cdot \left(\frac{D + D_0}{Lv_0} + \frac{D + D_1}{Lv} \right)$$

$$R_x = n \cdot T \cdot \left(\sqrt{1 - \left(\frac{D + D_1}{Lv} \right)^2} - \sqrt{1 - \left(\frac{D + D_0}{Lv_0} \right)^2} \right)$$

- **Esfuerzo radial sobre el brazo de atirantado en curva**

En el caso en el que la vía está en curva, la catenaria forma una línea poligonal siguiendo la traza de la vía. La línea poligonal forma un descentramiento real que es mayor que el de la línea recta del caso anterior, debe tenerse en cuenta en los cálculos.

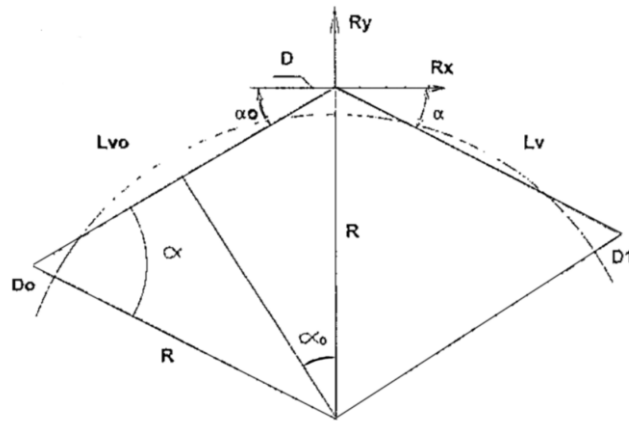


Figura 33 Descentramiento de la catenaria en curva [MONT02]

Por lo tanto, el esfuerzo radial en curva en sus componentes x e y es el siguiente:

$$R_y = n \cdot T \cdot \left(\frac{Lv_0^2 + (R + D)^2 - (R + D_0)^2}{2 \cdot Lv_0 \cdot (R + D)} + \frac{Lv^2 + (R + D)^2 - (R + D_1)^2}{2 \cdot Lv \cdot (R + D)} \right)$$

$$R_x = n \cdot T \cdot \left[\sqrt{1 - \left(\frac{Lv_0^2 + (R + D)^2 - (R + D_0)^2}{2 \cdot Lv_0 \cdot (R + D)} \right)^2} - \sqrt{1 - \left(\frac{Lv^2 + (R + D)^2 - (R + D_1)^2}{2 \cdot Lv \cdot (R + D)} \right)^2} \right]$$

3.2.4 MOMENTO DE VUELCO PRODUCIDO POR UNA CATENARIA

Para calcular el momento de vuelco producido por una catenaria hay que tener en cuenta los esfuerzos verticales y horizontales.

- **Esfuerzos verticales**

Los esfuerzos verticales que se deben de tener en cuenta al calcular el momento de vuelco de la catenaria son los del peso de los cables de la línea aérea de contacto (hilos de contacto, sustentador, feeder de acompañamiento, cable de tierra, péndolas) y los pesos de los elementos que mantienen los cables (ménsulas, soporte feeder, conjuntos de atirantado).

- **Esfuerzos horizontales**

Los esfuerzos horizontales son los que se producen en sentido perpendicular al tendido de la catenaria debidos al viento y los descentramientos en recta y curva. Se consideran esfuerzos horizontales los esfuerzos radiales del sustentador e hilos de contacto y los incrementos de tensión del viento sobre los cables y postes.

3.3 COMPENSACIÓN MECÁNICA DE LA CATENARIA

Los cables que forman la catenaria son conductores de calor y electricidad, por estar sometidos a tensión mecánica y variaciones climatológicas, se producen variaciones de longitud debidas a la dilatación y elasticidad. A aumentar la longitud de los cables, la tensión mecánica varía y por ello también varía la altura respecto al plano de rodamiento. Cuando la velocidad del tren es mayor, más difícil es que se ajuste el pantógrafo a la variación de altura del hilo de contacto, lo que puede dar lugar al despegue del pantógrafo del hilo, produce a su vez un fallo en el sistema.

3.3.1 CANTÓN

El objetivo principal del cantón es contrarrestar las dilataciones de la catenaria, para ello se divide la línea en partes entre de entre 900 y 1200 metros. Cada división de la línea se llama cantón y en el centro de cada uno de ellos se ponen cables que sostengan y estabilicen los hilos de contacto y el sustentador para que la línea no se mueva. Las partes que están a cada lado del centro del cantón, el punto fijo, se llaman semicantones, su longitud máxima es de 600 metros.

El punto fijo del cantón tiene que estar en una ménsula y hacer que esta no se desplace o gire independientemente de la temperatura. Un cable de acero fijado al poste, reforzado con un tirante de anclaje de punto fijo, permite la estabilización de la ménsula.

El cantón puede tener dispositivos de regulación automática de la tensión mecánica, si no los tiene el hilo de contacto y sustentador se sujetan aislados a los postes con tensores que regulan la tensión mecánica de forma manual. Con el cantón compensado los cables se sujetan a los postes por un sistema de contrapesos y poleas para mantener la tensión mecánica del cable constante.

3.3.2 CANTÓN SIN COMPENSACIÓN AUTOMÁTICA

En el montaje de cantón sin compensación automática no se compensan las dilataciones o contracciones de los elementos, cuando hace calor el hilo de contacto y el sustentador aumentan su longitud, la altura de la catenaria disminuye y la flecha entre apoyos aumenta. Este tipo de catenaria no suele usarse, su velocidad máxima está limitada a 120 km/h, se usa para vías de longitud de menos de 1000 metros, vías secundarias de estaciones, vías de apartadero o maniobras. Necesitan gran mantenimiento de su geometría.

3.3.3 CANTÓN COMPENSADO

En el caso del cantón compensado, las dilataciones y contracciones de la línea aérea de contacto se llevan a cabo a través de un sistema automático de poleas y contrapesos en el sustentador y hilos de contacto. Hay dos formas de realizar la compensación, de forma independiente para el sustentador y el hilo de contacto, o de forma conjunta en ambos.

Se montan unos equipos en los extremos de cada cantón que compensan el cambio de longitud de los cables, estos equipos cuentan con dos poleas solidarias y concéntrica. El cable de la línea va a una polea de menor radio y los contrapesos cuelgan del cable arrollado a la polea mayor. Al aumentar la longitud del cable del semicantón, los contrapesos arrollan el cable excedente sobre la polea pequeña debido al efecto que realizan en la polea grande, esto hace que se mantenga la tensión mecánica constante.

3.3.4 SECCIONAMIENTO

La línea aérea de contacto no puede tener discontinuidades porque el pantógrafo tiene que estar constantemente recibiendo corriente, cuando un cantón termina los cables deben solaparse con el siguiente, la zona donde se solapan ambas secciones de cable se llama seccionamiento. Hay dos tipos, el seccionamiento de cantón y el seccionamiento de lámina de aire.

El **seccionamiento de cantón** es en el que su principal misión es la división mecánica de la línea para evitar el alargamiento de los cables por dilatación térmica. Los sustentadores se unen entre sí con los hilos de contacto de la línea que está ya elevada en las proximidades de los apoyos, esto asegura la continuidad eléctrica.

El **seccionamiento de lámina de aire** tiene como función mecánica de separar los dos tramos de la catenaria y la función eléctrica de aislarlos. Se instalan cuando se necesita aislar una línea de otra. Cuando el seccionador está abierto, la línea está aislada eléctricamente; cuando está cerrado, el seccionador se comporta como un cantón.

3.4 PENDOLADO

Es el estudio de las péndolas que son los elementos que se encargan de sujetar los hilos de contacto y mantenerlos en la posición de trabajo. Para ello se calculan los pesos que soportan, su longitud, su peso, etc. El pendolado influye en el reparto uniforme de pesos y en que la flecha del hilo de contacto. El rendimiento del brazo de atirantado define su posición con respecto a los hilos de contacto.

El objetivo principal de estos conceptos es que el pantógrafo consiga la corriente necesaria, que tenga un contacto uniforme con el mínimo rozamiento posible, y así el tren se desplace a velocidad nominal.

3.4.1 FUNCIONES DEL PENDOLADO

Las péndolas sujetan los hilos de contacto para mantenerlos paralelos a una altura sobre los carriles. Las péndolas equipotenciales también proporcionan una conexión eléctrica adecuada entre el sustentador e hilos de contacto.

Si se usan dos hilos de contacto, la misma péndola puede sujetar ambos con la grifa adecuada. El montaje da flexibilidad a los hilos de contacto para adaptarse a la basculación que se produce en el pantógrafo debido al descentramiento. Si los hilos de contacto están paralelos al plano de rodamiento, cuando el hilo de contacto toque al pantógrafo a un lado de su eje, el pantógrafo basculará y solo el hilo más próximo al pantógrafo lo rozará, el otro no lo roza. Cuando el descentramiento cambia, el hilo que antes no se ha rozado, será el que estará en contacto con el pantógrafo ahora, y el que antes se desgastaba estará libre. Como solo se roza uno de los dos hilos de forma alternativa, el desgaste de los hilos es más rápido que si se rozaran ambos permanentemente, y también limita la captación de corriente pudiendo haber arcos eléctricos.

Para evitar este problema la péndola y grifa deben dejar que los hilos de contacto se adapten a las inclinaciones que el descentramiento produce en el pantógrafo, las grifas son de doble hilo. Para solucionarlo el ascenso de los dos hilos no se puede dar a la vez, el atirantado de los dos hilos debe de ser independiente y las péndolas que están cerca del conjunto de atirantado, que es donde el descentramiento es mayor, deben de ser independientes para cada hilo de contacto, que cada hilo de contacto quede sujeto por su propia péndola y grifa.

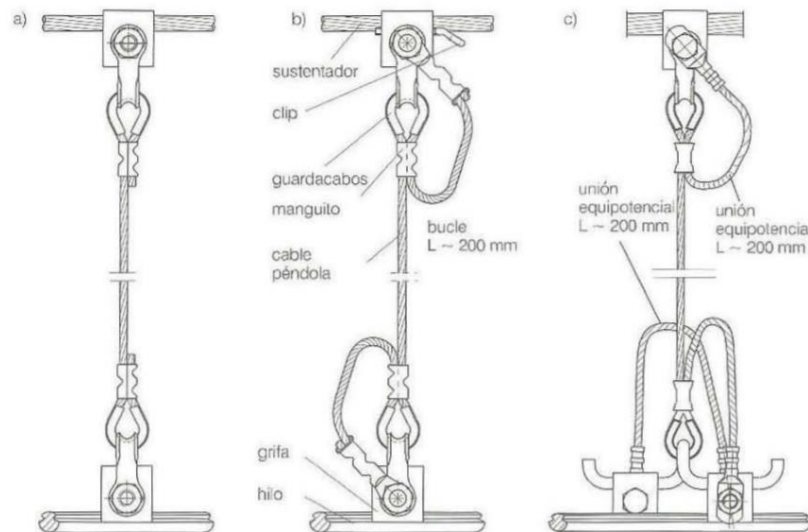


Figura 34 a) Péndola normal, b) Péndola equipotencial, c) Péndola para dos hilos [KIES08]

3.4.2 PESOS SOPORTADOS POR LAS PÉNDOLAS

Es importante que las péndolas soporten pesos similares a lo largo de la línea, ya que esto evita que al pasar el pantógrafo se den diferencias de presión que desgasten el hilo de contacto de forma no uniforme y se acorte su vida media.

Si las catenarias se diseñan con flecha y empieza en la péndola cercana al apoyo, la disminución de peso soportada por las demás péndolas, lo aguanta la primera. A continuación, la forma de calcular la disminución de peso correspondiente a la primera péndola (p) cuando hay dos hilos de contacto.

$$p = \frac{y \cdot 2 \cdot T}{x^2}$$

Donde y es la longitud del vano, x es la distancia desde la primera péndola al centro del vano y T es la tensión del cable.

Para evitar el incremento de peso que soporta la primera péndola lo mejor es sustituirla por un par de péndolas, otra forma sería que el brazo de atirantado trabaje como una péndola. El objetivo es distribuir los pesos mejor.

3.4.3 PÉNDOLAS EQUIPOTENCIALES

Las péndolas al principio solo sujetaban los hilos de contacto para que se encontraran en posición adecuada. Para que los hilos de contacto permitieran el paso de la corriente eléctrica, había unos conjuntos de alimentación entre sustentador e hilos de contacto. Estos conjuntos hacían que la concentración de masas fuera demasiado elevada dando lugar a fallos mecánicos. Además, aunque las péndolas no tenían buen contacto eléctrico, sí podía pasar la corriente por ellas y esto da lugar a averías.

Surge un nuevo tipo de péndola para evitar los problemas antes mencionados, la péndola equipotencial que permite el paso de corriente eléctrica desde el sustentador al hilo de contacto, a la vez que actuar como soporte del hilo de contacto para que se encuentre en la posición adecuada. Esta péndola se forma con hilo de cobre de 16 o 25 mm² de sección y se une al hilo de contacto y al sustentador a través de grifas con tornillos que se aseguren del buen contacto eléctrico.

3.4.4 HOMOGENEIDAD ELÁSTICA DE LAS PÉNDOLAS

El pantógrafo debe captar la corriente eléctrica continuamente y sin interrupciones. La línea no puede tener puntos duros porque esto supone una discontinuidad, que se pueda producir un arco eléctrico y se desgaste el hilo de contacto de forma excesiva.

Es importante que la flexibilidad de la línea sea homogénea a lo largo de todo el vano, pero la línea tiende a ser más flexible en la parte central del vano y menos en los apoyos. El empuje que el pantógrafo ejerce eleva más la línea en el centro del vano que en los apoyos con el mismo empuje.

Si la distancia entre apoyos, la velocidad, la altura de la línea y el empuje son constantes, el pantógrafo irá aumentando la velocidad en el centro del vano y disminuyéndola en los apoyos produciéndose un movimiento ondulatorio del pantógrafo por la línea.

Si la velocidad del tren y la inercia del pantógrafo con elevadas se pueden llegar a dar despegues del pantógrafo. Para que el pantógrafo no varíe su altura de forma significativa hay varios sistemas. Uno de estos es la catenaria con flecha y consiste en bajar el hilo de contacto en el centro del vano tanto como lo elevaría el pantógrafo, este sistema tiene una variante que cuenta con un brazo atirantado ligero que trabaja como péndola. Otro es la catenaria con péndola en Y que conecta al sustentador y al apoyo un cable y que las péndolas se sujeten a este cable. Otro posible sistema es en el que se instalan dos sustentadores, uno principal y otro auxiliar, en el auxiliar también se une mediante péndolas al hilo de contacto.

3.5 AISLADORES DE SECCIÓN

Los aisladores de sección son elementos que permiten interrumpir el circuito en las instalaciones de la línea aérea de contacto. Son equipos que se conectan a los hilos de la LAC y tienen la capacidad de interrumpir la corriente eléctrica de la línea, pero no la mecánica. Se colocan en los hilos de contacto, en el sustentador hay que colocar otro aislador para asegurarse de que se interrumpe la corriente eléctrica completamente.

El objetivo del aislador de sección es formar **paquetes de vías**, separar eléctricamente unas vías de otras, que sean circuitos independientes.

El aislador de sección cuenta con las siguientes partes:

- **Deflectores:** piezas colocadas lateralmente en la barra de unión.
- **Aisladores:** formados por una o dos barras, unen mecánicamente y separan eléctricamente las catenarias separadas por el aislador de sección.
- **Cuernos apagachispas:** son barras de acero inoxidable, unidas al deflector, que disipan el arco eléctrico formado cuando el pantógrafo pasa de un lado a otro del aislador.
- **Grifas de unión:** unen los hilos de contacto de las catenarias al aislador de sección a ambos lados.

Los aisladores de sección deben de ser ligeros, soportar las tensiones mecánicas de la catenaria, resistencia a los arcos eléctricos y capacidad para disipar su energía, y fácil nivelación.

3.5.1 AISLADORES DE SECCIÓN SIMÉTRICOS

Los aisladores de sección simétricos interrumpen la continuidad eléctrica, manteniendo las tensiones mecánicas de los hilos de contacto. Este tipo de aislador evita la continuidad eléctrica cuando pasa el pantógrafo por él. Se usa cuando a cada lado del aislador puede tener distinto potencial. Suele utilizarse en vías de carga o descarga.

Este aislador va asociado a un seccionador, cuando el seccionador está cerrado pasa corriente por el seccionador y si el seccionador está abierto se interrumpe y la línea no tiene tensión. El seccionador también puede tener una apertura a tierra.

La distancia entre pletinas del pantógrafo tiene que ser menor que la distancia de aislamiento del aislador sección simétrico.

3.5.2 AISLADORES DE SECCIÓN ASIMÉTRICOS

Los aisladores de sección asimétricos separan eléctricamente los cables de ambos lados de la línea y mantienen sus características mecánicas. El pantógrafo puentea los deflectores cuando pasa por ellos y por ello el pantógrafo siempre tiene tensión eléctrica, no se interrumpe el suministro de corriente al tren.

Se instalan diagonales de unión para que no se interconecten los circuitos pares con los impares permanentemente. Ambas partes del aislador de sección asimétrico están en tensión, cada cual con su circuito eléctrico independiente; esto hace que los circuitos sean independientes pero el pantógrafo siempre reciba corriente cuando pasa.

Es importante que los aisladores de tensión tengan elementos de nivelación cuando las velocidades del tren superan los 120 km/h. También deben de tener la longitud adecuada

para adaptar la elasticidad de la catenaria en estos puntos para que no se conviertan en puntos duros.

4 ELEMENTOS DE LA VÍA

4.1 VÍA

La vía es uno de los elementos de la superestructura que comprende la vía y el conjunto de aparatos e instalaciones necesarias para que el tren circule de forma segura y eficaz.

La vía se compone de varios componentes: el carril, las traviesas, el balasto, los tirafondos y las placas de asiento. [ADIF08]

4.1.1 EL CARRIL

Es una barra de acero laminado por las que se desplazan las ruedas de trenes y tranvías. Tiene como función guiar y sustentar al tren, también sirve para el retorno de circuitos eléctricos de la catenaria y de señales. El carril tiene distintos pesos por metro lineal y distintas longitudes. El carril consta de tres partes que están soldadas como una sola:

- Cabeza: es la parte superior del carril, se utiliza como elemento de rodadura.
- Patín: es la base del carril, es más ancho que la cabeza y su superficie inferior es plana para su sujeción a las traviesas.
- Alma: es la parte que une cabeza y patín, es la más estrecha.

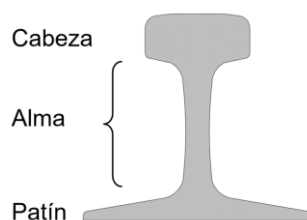


Figura 35 Perfil de un carril ferroviario [ADIF08]

4.1.2 LAS TRAVIESAS

Se constituyen de distintos materiales (madera, hormigón armado etc.), son los elementos sostienen al carril siendo la unión entre el carril y el basalto. Están situados en dirección transversal al eje de la vía.

4.1.3 EL BALASTO

Elemento granular de silíceo sobre el que se asientan las traviesas. Tiene como función amortiguar y repartir los esfuerzos que se ejercen sobre la vía para que no se desplace y la plataforma esté protegida.

4.1.4 LOS TIRAFONDOS Y LAS PLACAS DE ASIENTO

Elementos que fijan el carril a la traviesa, existen distintas formas en función del tipo de traviesa.

4.2 APARATOS DE LA VÍA

Elementos que permiten el desdoblamiento de los carriles mediante las agujas. Las agujas están compuestas por dos partes, el corazón que es la parte fija y se encuentra en el punto de conexión entre las dos vías, y el espadín que es la parte móvil y permite el paso de una vía a otra.

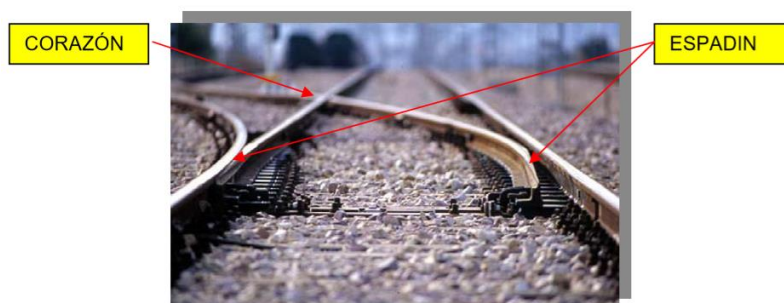


Figura 36 Partes de las agujas [ADIF08]

Los aparatos de vía son los siguientes:

- Desvíos
- Travesía
- Combinación de aparatos de vía

4.2.1 LOS DESVÍOS

Permiten el desdoblamiento de una vía en dos. Hay distintos tipos según la velocidad máxima de paso por la vía, los ejes de las vías son tangentes entre sí. La vía que sigue la trayectoria recta se denomina vía directa, y las que cambia de dirección se denomina vía desviada. Si hace falta compatibilizar dos anchos de vía distintos se usan desvíos mixtos.

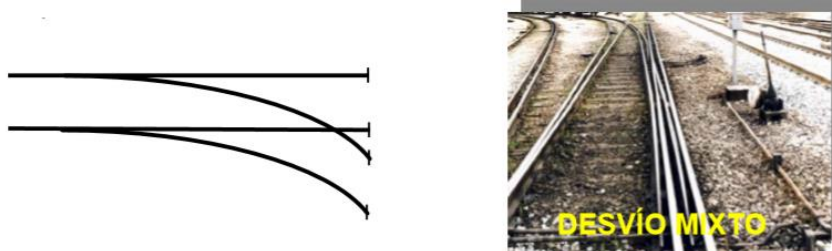


Figura 37 Desvío mixto [ADIF08]

Partes del desvío

El desvío tiene tres partes principales: el cambio, una zona intermedia y el cruzamiento.

El cambio empieza en el punto de comienzo del desvío y cuenta con agujas y contra agujas fijas, que son carriles apuntados en su extremo, y los tirantes.

El cruzamiento comienza donde se hace efectivo el cambio de dirección y es la parte de más complejidad, especialmente para trenes de alta velocidad. Esta parte está compuesta por corazón, contracarriles, patas de liebre y laguna.

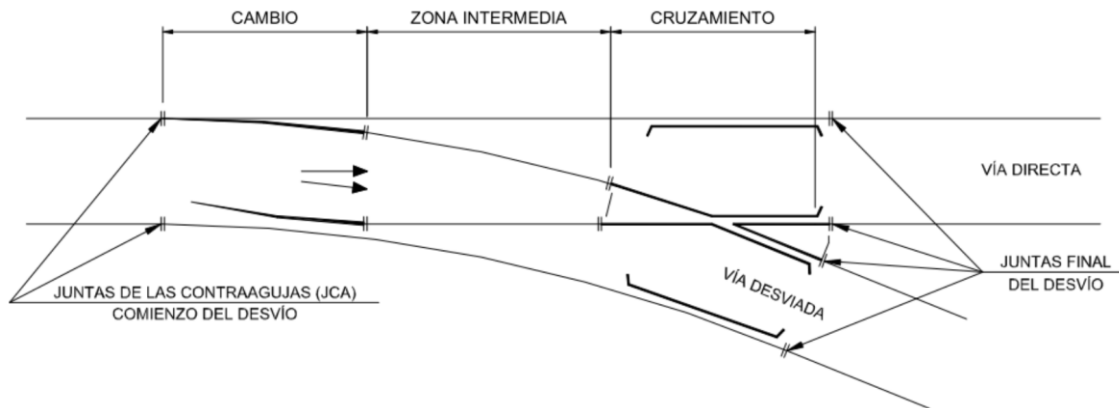


Figura 38 Partes de un desvío ferroviario [AGIC17]

- El cambio

El cambio tiene dos conjuntos de aguja – contra aguja, llamados semicambios, están asentados sobre las traviesas. La aguja es móvil excepto en su extremo más próximo al cruzamiento, el talón, mientras que la contra aguja es fija y es exterior a ella. Para permitir la desviación del tren, la aguja se acopla con la contra aguja mediante los elementos de accionamiento. [AGIC17]

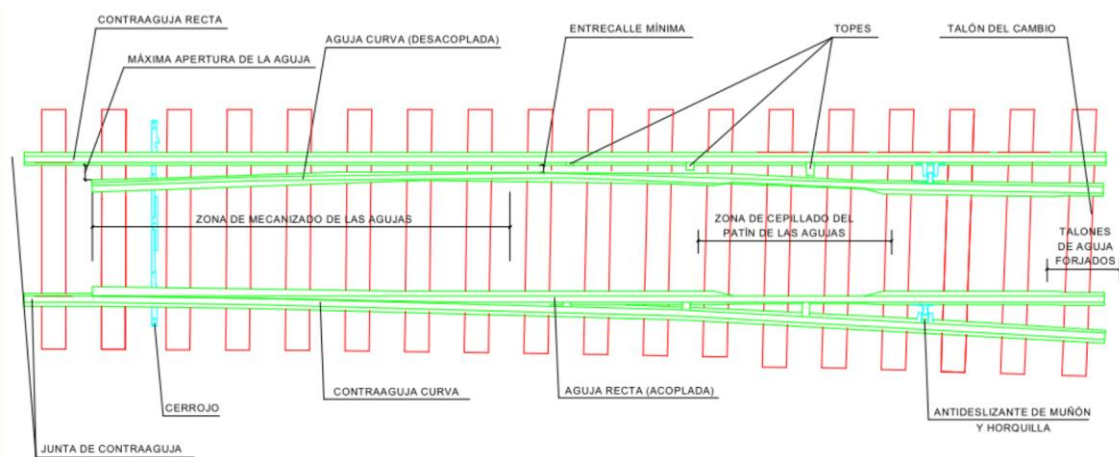


Figura 39 Desvío – El cambio [AGIC17]

- El cruzamiento

El cruzamiento tiene tres partes: corazón, contracarriles y carriles exteriores. El corazón es la parte donde materializa el corte de uno de los carriles de la vía directa con el carril de la mano contraria de la vía desviada.

El corazón puede ser recto o curvo. En el caso de desvíos para alta velocidad el corazón puede ser de punta móvil y no haría falta emplear contracarriles.

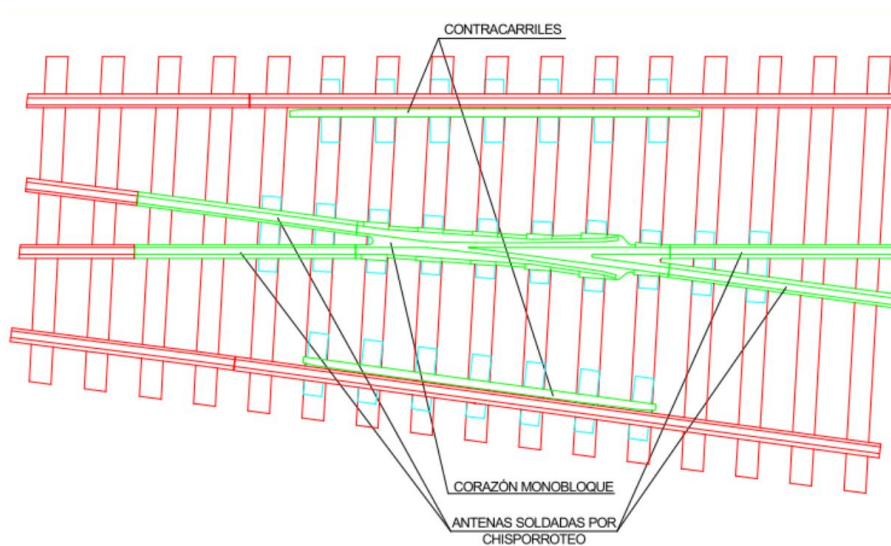


Figura 40 Desvío – El cruzamiento [AGIC17]

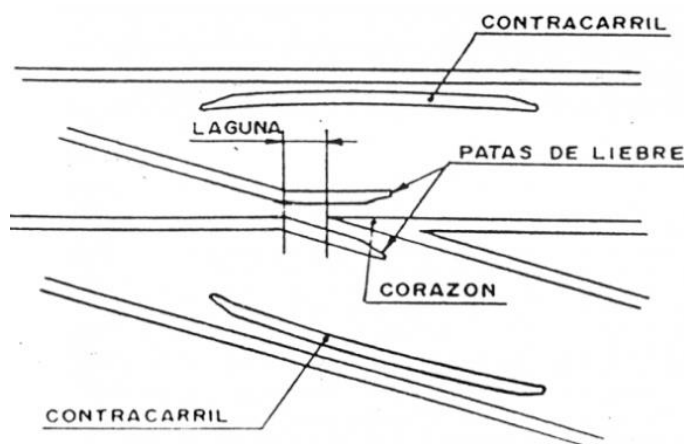


Figura 41 Desvío – Partes del cruzamiento [AGIC17]

Los cruzamientos o desvíos se caracterizan por el ángulo de cruzamiento. Los ángulos más comunes de cruzamiento son los siguientes:

Tabla 3 Ángulo de cruzamiento según el tipo de desvío

Ángulo de cruzamiento	Tipo de desvío	Velocidad (mph)
1 en 8	B	25
1 en 9 ¼	C	25
1 en 10		30
1 en 10 ¾	D	35
1 en 13 ¼		40
1 en 15	E	50
1 en 18 ½	F	60
1 en 21		65
1 en 24	G	80
1 en 32	H	90

Para medir un ángulo de cruce en Reino Unido se utiliza el método de la medida central, en el que el ángulo de cruce se define como 1 en N, tal y como se muestra en la siguiente figura. [OGRA11]

$$N = 0.5 \cdot \cot \frac{\theta}{2}$$

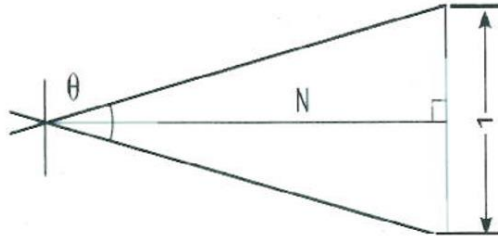


Figura 42 Cálculo del ángulo de cruzamiento. [OGRA11]

4.2.1.1 La travesía

Permite que se crucen dos vías en oblicuo o perpendicular sin posibilidad de pasar de una a otra y con continuidad de sus direcciones respectivas.

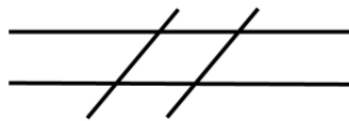


Figura 43 Travesía [ADIF08]

Hay varios tipos de travesías:

- **Travesía sin unión:** cruce de dos vías en el que no hay acceso entre ellas.

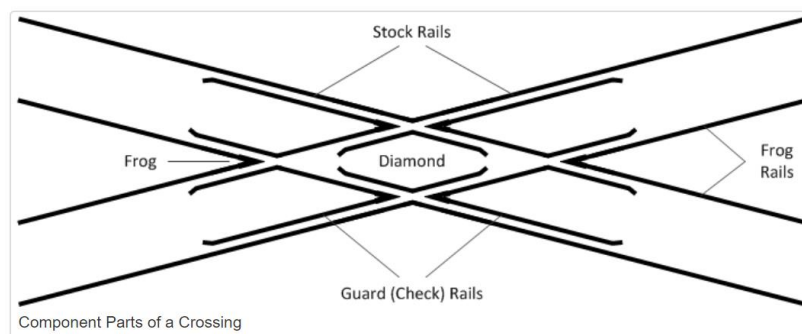
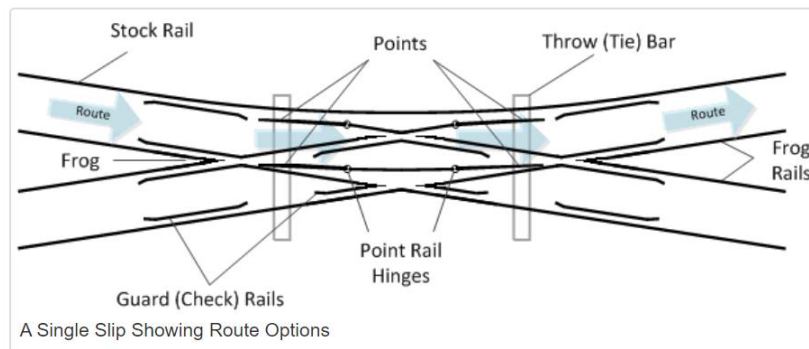


Figura 5 Travesía sin unión [WIKI13]



Figura 44 Travesía sin unión [JTCU15]

- **Travesía de unión sencilla:** cruce entre vías y el paso de una a otra solamente entre dos de los extremos opuestos por medio de dos cambios.



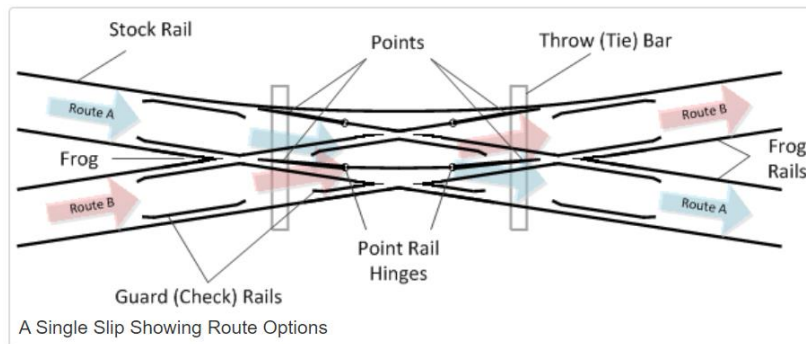
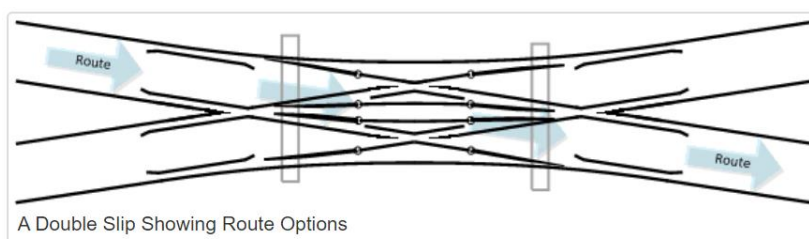


Figura 45 Travesía de unión sencilla [WIKI13]



Figura 46 Travesía de unión sencilla [JTCU15]

- **Travesía de unión doble:** cruce entre vías y el paso de una a otra entre todos sus extremos opuestos por medio de cuatro cambios.



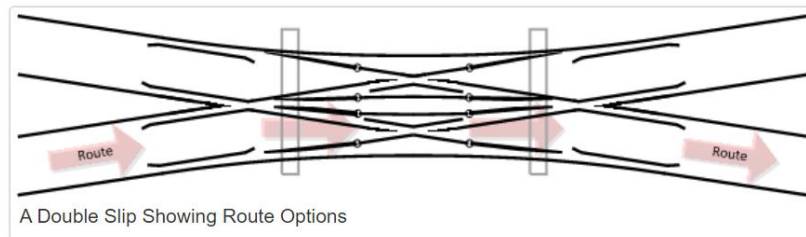
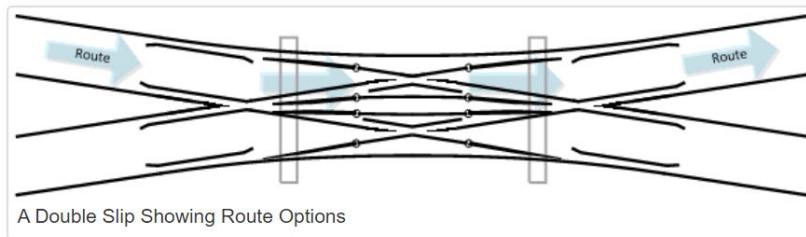
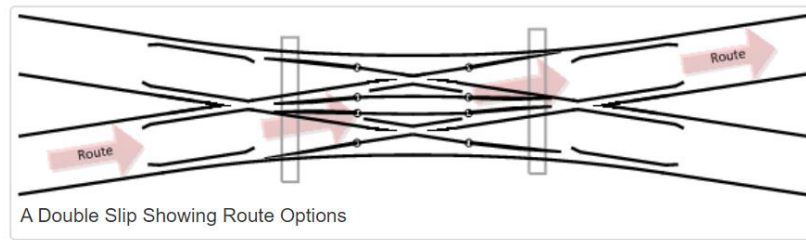


Figura 47 Travesía de unión doble [WIKI13]



Figura 48 Travesía de unión doble [JTCU15]

4.2.2 COMBINACIÓN DE APARATOS DE VÍA

Son una combinación de desvíos y travesías. Hay distintos tipos: escape, diagonal, haz y bretelle.



Figura 49 Combinación de desvíos y travesías [ADIF08]

- **Escape:** constituida por dos desvíos sencillos, colocados sobre vías contiguas en sentido opuesto y de tal forma que sus vías desviadas se encuentran en prolongación una de otra.
- **Diagonal:** vía que atraviesa un haz formando ángulos agudos con sus distintas vías.
- **Haz:** permiten el desdoblamiento de una vía en más de dos carriles. Gracias a la sucesión de cambios de agujas se tiene acceso a varias vías paralelas.
- **Bretelle:** conjunto de dos escapes sencillos e inversos superpuestos y de una travesía ordinaria que permita el paso por ellos.



Figura 50 Bretelle [JTCU15]

4.3 CAMBIO DE AGUJA

El cambio es la parte del desvío que direcciona la circulación de una vía a otra. Hay cuatro piezas fundamentales: dos contraagujas, exteriores; y dos agujas o espadines, interiores. Las dos agujas o espadines están unidas a uno o más tirantes y tienen una parte móvil que según se acople con una u otra contraaguja, se determina la dirección de circulación.

4.3.1 CONTRAAGUJAS

Las contraagujas son parte del carril, constituyen la parte fija del cambio. Se caracterizan por:

- Se componen de orificios en el alma para sostener las resbaladeras y otras piezas.
- La planta está formada de tal forma que el espadín se ajuste a esta.
- La cara lateral del borde activo se cepilla para alojar la aguja.

4.3.2 ESPADINES O AGUJAS

Los espadines o agujas son partes del carril que están cepilladas para ajustarse con la contraaguja y guiar y sostener las ruedas del tren. Partes de una aguja o espadín:

- Punta matemática de una aguja (P): es el punto teórico de intersección de la aguja y la contraaguja. El vértice del ángulo de desviación (beta). Intersección teórica de los hilos de la vía directa y la desviada.
- Punta real (P1): extremo material de la aguja. Materializa el principio de la unión de dos carriles.
- Ángulo de desviación de una aguja (β): ángulo con el que incide la aguja de la vía desviada sobre su contraaguja.
- Ángulo de ataque (α): ángulo más bajo en el que el eje encuentra el borde activo de la aguja. Interesa que sea lo menor posible para suavizar la marcha.

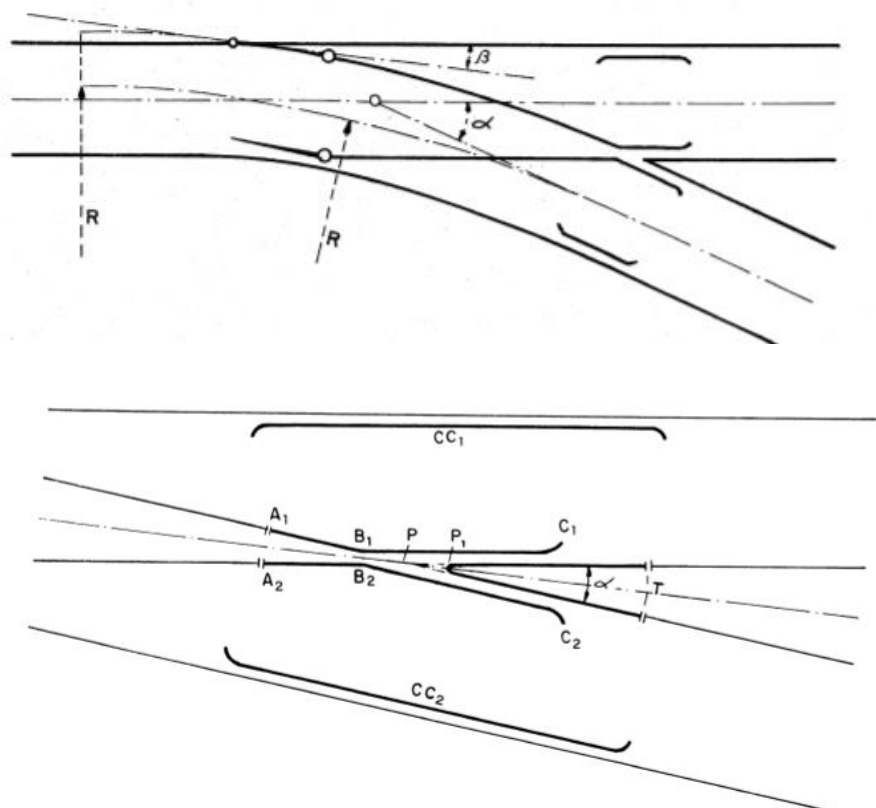


Figura 51 Partes de la aguja [OGRA11]

En un principio las agujas se construían con carriles ordinarios que eran posteriormente cepillados por la cabeza y el patín. Esto hacía que la contraaguja se debilitara y no aportaba suficiente estabilidad y solidez para resistir choques laterales; las agujas acababan separándose de su contraaguja. Por esta razón, hoy en día los perfiles de las agujas son de menor altura y más robustos. [OGRA11]

4.3.3 ACCIONAMIENTO

Los cambios de vías se realizan a través de cambios de aguja. El accionamiento de las agujas se puede realizar de forma manual o a distancia, hay diferentes tipos:

- **Eléctricos:** son accionados a distancia desde estaciones o Centros de Control de Tráfico. El accionamiento se utiliza con un motor eléctrico de baja tensión.
- **Mecánicos:** son accionados desde la estación con un cable de acero.
- **Funicular:** por medio de cables que están fijados a contrapesos y guiados por pequeñas poleas.
- **Fluida:** se utiliza aire o agua como vehículo impulsor.
- **Manuales:** son accionados a pie de cambio. Hay un elemento auxiliar llamado indicador de posición de la aguja que indica si el cambio es a la vía directa o a la desviada. Este mecanismo consiste en una palanca que actúa sobre el tirante de maniobra de la aguja.

Para asegurar que la aguja y contra aguja están perfectamente fijadas tras el cambio, se utilizan unos dispositivos de seguridad llamados cerrojos, así como indicadores de posición que indican la posición actual de las agujas.

4.4 CURVA DE TRANSICIÓN

En los desvíos hay tramos en los que hay que unir una parte curva con una recta, o una curva con otra curva de radio distinto, para que se pase de una parte a otra con suavidad se usan las curvas de transición. Las curvas de transición más utilizadas en ciertos tramos de las agujas ferroviarias son las siguientes.

4.4.1 CLOTOIDE

La clotoide forma parte de la familia de las espirales, curvas cuyo radio va en función del ángulo. Una clotoide es una curva que es tangente al eje de abscisas en el origen y en la cual el radio de la curva disminuye de forma inversamente proporcional a la distancia recorrida, en el origen de coordenadas el radio empieza siendo infinito.

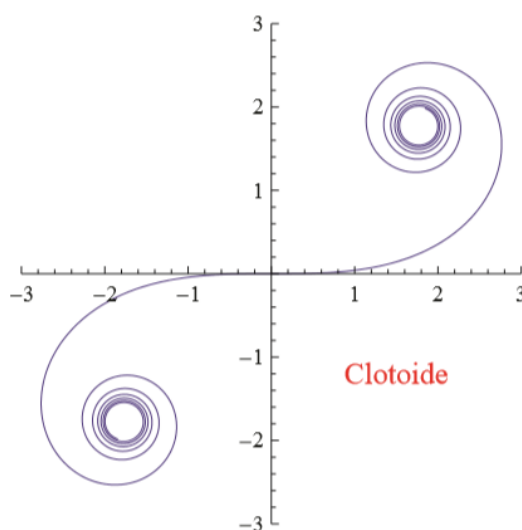


Figura 52 Clotoide [BLAN13]

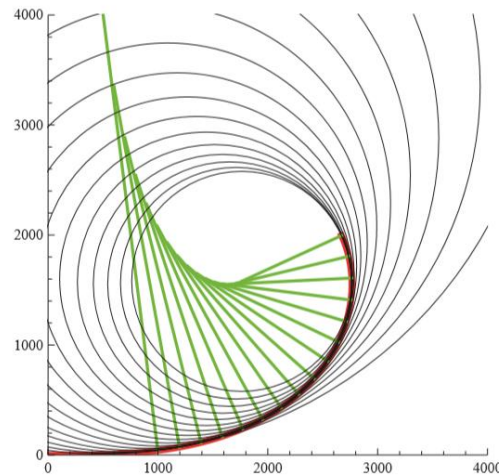


Figura 53 Variación del radio de curvatura en una clotoide [BLAN13]

Las clotoides se suelen utilizar en carreteras y ferrocarriles como curvas de transición que conectan tramos rectos con tramos curvos o incluso dos tramos curvos. Las clotoides permiten que la transición entre un tramo y otro sea suave, así el conductor se puede adaptar a esta. [BLAN13]

En la clotoide se sabe que cada uno de los puntos que la componen cumple que el producto entre la longitud del arco recorrido y el radio de curvatura es igual a una constante, A^2 .

$$A^2 = RL$$

En el caso de la clotoide de la aguja, se conoce el radio de la curva y la recta, así como la longitud del tramo clotoide. Este tipo de curvas son especialmente útiles cuando se dan velocidades altas para que la transición fuera gradual.

Para dibujar la parte de la clotoide de las agujas se realizan los siguientes cálculos.

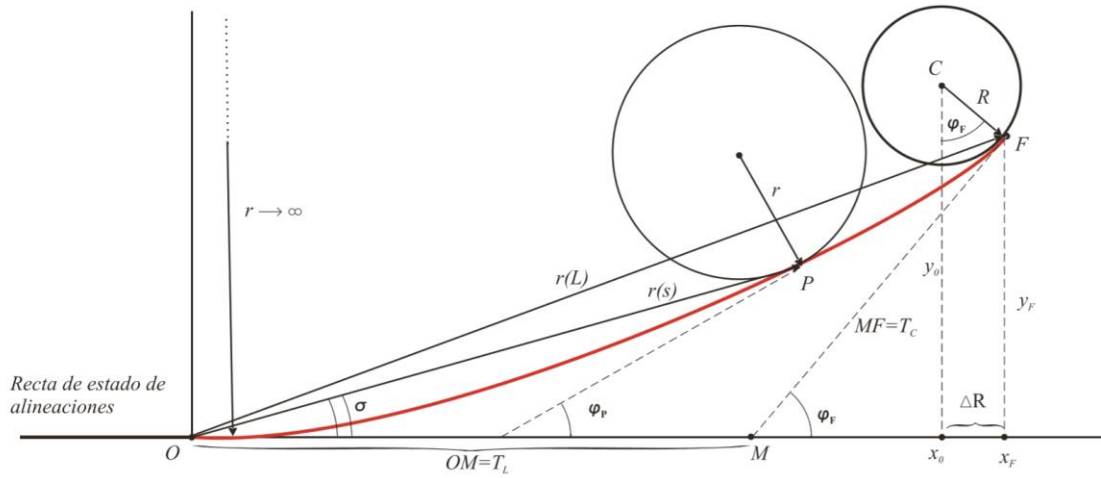


Figura 54 Cálculos de la clotoide [BLAN13]

La representación paramétrica de la clotoide será $r(s)$, cada punto de esta curva cumple que el radio de curvatura, r , y la longitud del arco del origen hasta este punto, s , es constante e igual a A^2 . Se considera que el ángulo girado ϕ_F , se relaciona con el radio de la circunferencia, R , y con la longitud de arco de la clotoide, L , de la siguiente manera: $\phi_F = \frac{L}{2R}$.

Cada punto de la clotoide cumple lo siguiente $P = r(s)$:

$$r(s) = \left(\int_0^s \cos\left(\frac{s^2}{2RL}\right) ds, \int_0^s \sin\left(\frac{s^2}{2RL}\right) ds \right)$$

$$r(s) = \left(\int_0^s \cos\left(\frac{s^2}{2A^2}\right) ds, \int_0^s \sin\left(\frac{s^2}{2A^2}\right) ds \right)$$

Para representar la clotoide se utilizarán las integrales de Fresnel del coseno y seno, $\int_0^s \cos\left(\frac{\pi u^2}{2}\right) du$ y $\int_0^s \sin\left(\frac{\pi u^2}{2}\right) du$. Hay que realizar un cambio de variable en la integral de la clotoide para poder utilizar las integrales de Fresnel en Matlab. El cambio de variable será:

$$s = \sqrt{\pi} A u$$

$$x(s) = \int_0^s \cos\left(\frac{s^2}{2A^2}\right) ds = \sqrt{\pi}A \int_0^{s/(\sqrt{\pi}A)} \cos\left(\frac{\pi u^2}{2}\right) du$$

$$y(s) = \int_0^s \sin\left(\frac{s^2}{2A^2}\right) ds = \sqrt{\pi}A \int_0^{s/(\sqrt{\pi}A)} \sin\left(\frac{\pi u^2}{2}\right) du$$

Se ha utilizado para dibujar la clotoide el comando de Matlab de las integrales de Fresnel, haciendo el cambio de variable indicado anteriormente.

$$fresnelc(z) = \int_0^z \cos\left(\frac{\pi t^2}{2}\right) dt$$

$$fresnels(z) = \int_0^z \sin\left(\frac{\pi t^2}{2}\right) dt$$

Otra forma de dibujar la clotoide es a partir de las aproximaciones de las que se dispone en el Track Design Handbook. [MATH16]

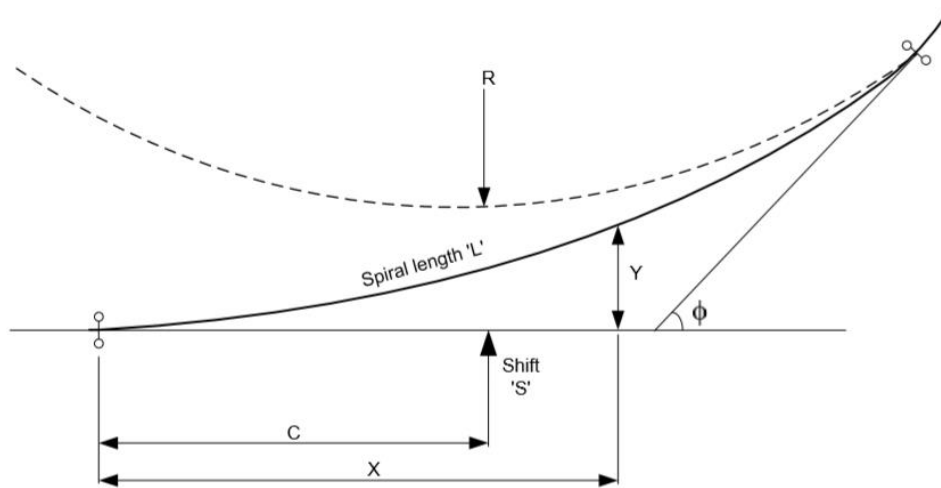


Figura 55 Clotoide [MATH16]

$$\varphi = \frac{l^2}{2RL} \text{ radianes} = \frac{90L}{\pi R} \text{ grados}$$

$$S = \frac{L^2}{24R} - \frac{L^4}{2668R^3}$$

$$X = l - \frac{l^5}{40(RL)^2}$$

$$Y = \frac{l^3}{6RL} - \frac{l^7}{336(RL)^3}$$

$$C = \frac{L}{2} - \frac{L^3}{240R^2}$$

4.4.2 PARÁBOLA HIPERBÓLICA

Otra curva de transición también utilizada para conectar una recta y una curva es la parábola hiperbólica. Cuando las velocidades de los ferrocarriles aumentaron, se hizo necesario que para pasar de tramos rectos a curvos la curvatura variase gradualmente, la primera curva que se utilizó fue la parábola cúbica.

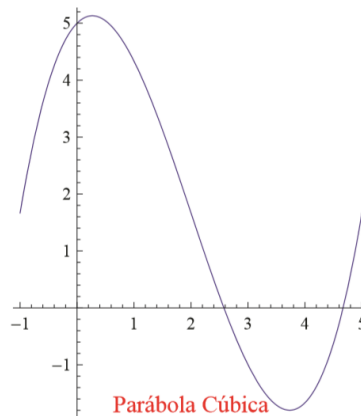


Figura 56 Parábola cúbica [BLAN13]

Para dibujar la parábola hiperbólica se dispone en el Track Design Handbook de las siguientes ecuaciones que la definen. [MATH16]

Este tipo de curva de transición solamente puede utilizarse si el ángulo α es menor que 4° , si fuera mayor se tiene que utilizar una clotoide.

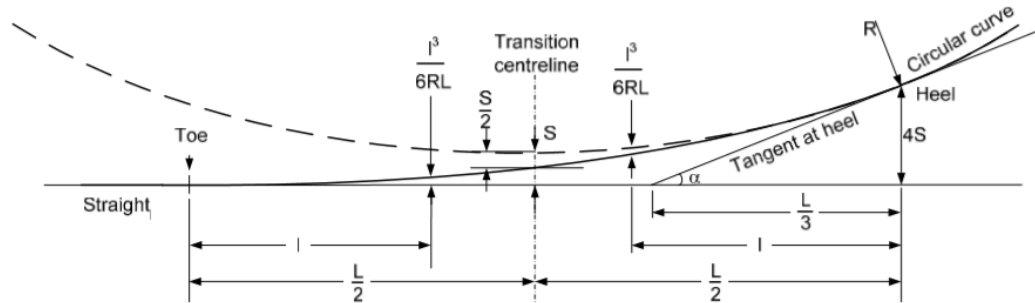


Figura 57 Parábola hiperbólica [MATH16]

$$y = \frac{l^3}{6RL}$$

$$\tan \alpha = \frac{L}{2R}$$

$$s = \frac{L^2}{24R}$$

5 INTERACCIÓN VÍA CATENARIA

5.1 AGUJAS AÉREAS

Una aguja aérea es un montaje requerido en la catenaria cuando un tren pasa de una vía a otra a través de un desvío, también llamado cambio o aguja. En un tren de tracción eléctrica el pantógrafo tiene que estar conectado a la catenaria en todo momento, por eso se requiere de este montaje para que cambie a la catenaria de la nueva vía.

La mejora de los equipos y el mayor radio de los desvíos han hecho posible que los trenes circulen a mayor velocidad, para ello es necesario que las instalaciones de LAC en estos puntos tengan un diseño fiable.

Se distingue entre vía directa que es la que es la que tiene el mismo eje que la vía de antes de llegar al desvío, mientras que la vía desviada es la que se separa de la directa por el desvío.

Hay dos tipos de agujas aéreas, las agujas aéreas tangenciales y las agujas aéreas cruzadas. La diferencia es que en las cruzadas las catenarias de la vía directa y desviada se cruzan, mientras que en las agujas tangenciales no se cruzan.

En las agujas aéreas cruzadas, al pasar por ellas el pantógrafo roza la catenaria de la vía directa y también la de la vía desviada, esto produce un cambio de homogeneidad en la línea que produce arcos eléctricos y aumenta el desgaste ya que se aumenta el esfuerzo entre el pantógrafo y la catenaria. Para evitar estos problemas se crea la aguja tangencial donde el pantógrafo no roza la catenaria de la vía desviada si va por la vía directa.

Se llama **junta de contraaguja** al punto de unión entre la vía directa y la desviada, sirve de referencia para determinar distancias donde se montarán los postes de la LAC. El **punto de aguja** es el punto donde se monta la aguja aérea de catenaria, indicado por la distancia en centímetros que existe desde la vía directa a la desviada en el lugar donde se mide.

La aguja aérea consta de tres vanos de catenaria:

- **Vano de aguja:** vano donde la catenaria de la vía directa y la de la vía desviada se cruzan (aguja cruzada) o tienen su punto de mínima distancia (aguja tangencial). Hay un vano de aguja para la vía desviada y otro para la vía directa.
- **Vano de elevación:** vano común para la catenaria de la vía desviada y la de la vía directa. El hilo de contacto de la vía directa mantiene su altura, el de la vía desviada se eleva. En las agujas cruzadas la elevación empieza a partir del poste de aguja o en el punto de cruce de hilos de contacto. En el caso de agujas tangenciales, la altura del hilo de contacto de la desviada se empieza a elevar en el punto 50 de la aguja.
- **Vano de anclaje:** vano donde aumenta la elevación de la catenaria de la vía desviada y esta se fija al poste de anclaje. Este vano no suele ir pendolado y requiere de un cable de acero desde el poste de elevación a los hilos de contacto para evitar que estos bajen.

En el caso de las agujas cruzadas pueden estar compensadas o no, o compensar solo los hilos de contacto, sin embargo, las agujas tangenciales tienen que estar compensadas. Los cables de la vía directa y desviada es conveniente que sean los mismos, que tengan la misma sección y características el sustentador e hilos de contacto, que haya el mismo número de hilo de contacto y que para que se comporten con homogeneidad.

Cuando el radio de curvatura de un desvío es demasiado pequeño, los elementos de la catenaria es posible que tengan problemas para soportar el esfuerzo de la tensión radial producido por un radio de curva tan pequeño. En estas ocasiones las tensiones mecánicas de los hilos de contacto y sustentador se reducen proporcionalmente hasta que la tensión radial en el brazo de atirantado de la vía desviada esté comprendida entre la nominal de la línea.

Las compensaciones de la catenaria de la vía desviada y de la directa tienen que hacerse hacia el mismo sentido. El pendolado de cada vía es independiente. El descentramiento de la catenaria de la vía directa en el poste de aguja es hacia el lado de la vía desviada.

5.1.1 DESIGNACIÓN Y ESQUEMA DE LAS AGUJAS

En la siguiente figura se ve el esquema en planta de una aguja, el punto PS marca el inicio de la aguja, PC es el centro de la aguja, PE es el final de la aguja y BS indica el principio del espadín. [KIES08]

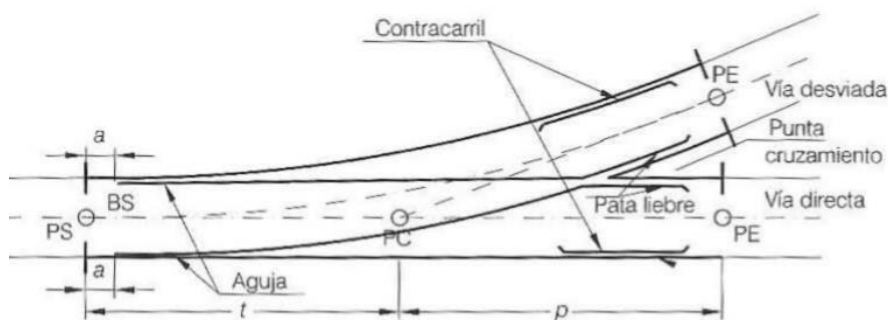


Figura 58 Plano en planta de una aguja [KIES08]

La siguiente representación es la utilizada para el montaje de la catenaria en la aguja porque cuenta con el radio de la vía desviada R y la tangente de desvío $1:n$, estos dos parámetros determinan el tipo de desvío y la velocidad de paso.

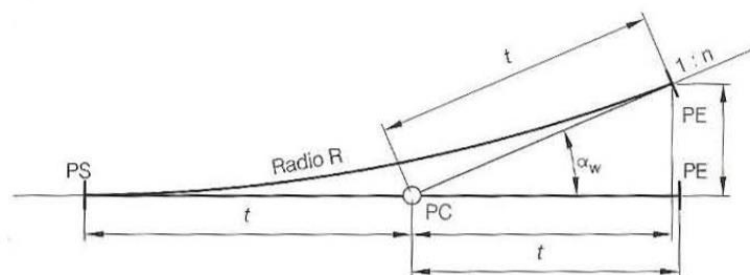


Figura 59 Esquema de una aguja [KIES08]

La vía directa permite velocidades mayores que la vía desviada. En los desvíos que utilizan curvas tipo clotoide permiten velocidades mayores, hasta 200 km/h, que las vías desviadas con curvas constantes. Para realizar el correcto tendido de la línea aérea de contacto, es necesario conocer el tipo de aguja. Las agujas se nombran con la siguiente nomenclatura:

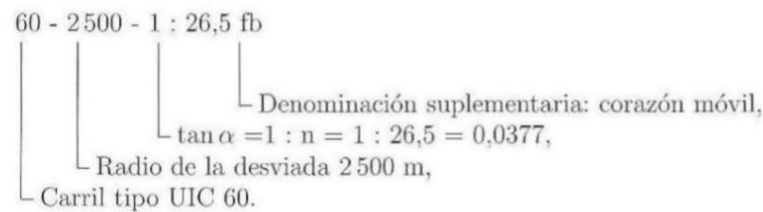


Figura 60 Nomenclatura de agujas con curvatura constante, UIC 711 [KIES08]

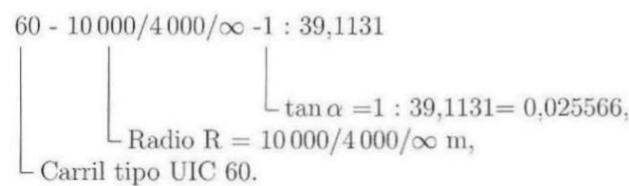


Figura 61 Nomenclatura de agujas con curvatura en forma de clotoide, UIC 711 [KIES08]

Hay varios tipos de desvíos, los **desvíos simples** son aquellos en los que la vía directa o general es recta, sin embargo, si la vía general tiene un tramo curvo, se trata de un **desvío en curva**. Como se indica en la figura de a continuación, los desvíos curvos se obtienen girando el vértice del triángulo. Se trata de un desvío **divergente** cuando los centros de las curvas de la vía principal y de la desviada están en lados opuestos; si están en el mismo lado se llama **convergente**.

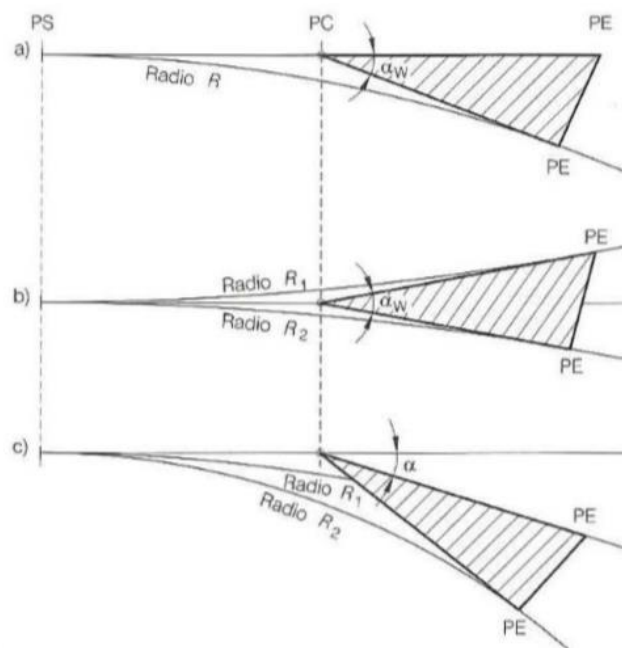


Figura 62 Tipos de desvíos; a) desvío simple, b) desvío divergente y c) desvío convergente. [KIES08]

En la siguiente tabla se ven los distintos parámetros característicos de distintos tipos de desvíos, así como la velocidad permisible en cada uno de ellos, como se puede observar los desvíos con curvatura clotoide admiten velocidades mayores que los de curvatura con radio constante.

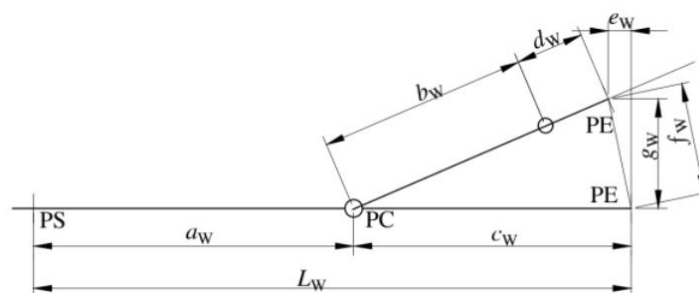


Tabla 4 Características de diferentes tipos de aguja [KIES08]

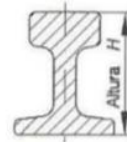
Point type	L_W	a_W	b_W	c_W	d_W	e_W	f_W	g_W	$v^1)$
Simple points with fixed diamond									
60-190-1:7,5	25 862	12 611	12 611	13 251	640	116	1 755	1 751	40
60-190-1:9	27 138	10 523	10 523	16 615	6 092	102	1 838	1 835	50
60-300-1:9	33 230	16 615	16 615	16 615	0	102	1 838	1 835	50
60-300-1:9/1:9,4	33 230	15 912	15 912	17 318	1 406	97	1 835	1 832	50
60-300-1:14	37 809	10 701	10 701	27 108	16 407	69	1 933	1 931	50
60-500-1:12	41 594	20 797	20 797	20 797	0	72	1 729	1 727	60
60-500-1:14	44 942	17 834	17 834	27 108	9 274	69	1 933	1 931	60
60-760-1:14	54 216	27 108	27 108	27 108	0	69	1 933	1 931	80
60-760-1:14/1:15	54 216	25 305	25 305	28 911	3 606	64	1 924	1 923	80
60-760-1:18,5	52 935	20 526	20 526	32 409	11 883	47	1 750	1 749	80
60-1200-1:18,5	64 818	32 409	32 409	32 409	0	47	1 750	1 749	100
60-1200-1:18,5/1:19,28	64 818	31 105	31 105	33 713	2 608	45	1 747	1 747	100
Simple points with movable diamond									
60-500-1:12	45 361	20 797	20 797	24 564	3 767	85	2 042	2 040	60
60-760-1:14	54 216	27 108	27 108	27 108	0	69	1 933	1 931	80
60-760-1:14/1:15	54 216	25 305	25 305	28 911	3 606	64	1 924	1 923	80
60-760-1:18,5	54 801	20 526	20 526	34 275	13 749	50	1 851	1 850	80
60-1200-1:18,5	66 615	32 409	32 409	34 206	1 797	50	1 847	1 846	100
60-1200-1:18,5/1:19,28	66 615	31 104	31 104	35 511	4 407	48	1 841	1 840	100
60-2500-1:26,5	94 306	47 153	47 153	47 153	0	34	1 778	1 778	130
60-2500-1:26,5/1:27,85	94 306	44 869	44 869	49 437	4 568	32	1 774	1 774	130
Clothoide type points with movable diamond									
60-2500/1000/∞-1:19,16	78 275	33 141	45 112	45 112	0	61	2 352	2 351	80
60-2500/1000-1:14,104	78 016	42 160	35 855	35 855	0	90	2 537	2 536	80
60-3000/1500/∞-1:23,73	89 485	38 410	51 075	51 075	0	45	2 150	2 150	100
60-3000/1500-1:18,132	89 416	47 624	41 792	41 792	0	63	2 302	2 301	100
60-4800/2450-1:24,257	111 016	57 672	51 343	51 344	0	1	2 115	2 115	130
60-6000/3700-1:32,5	122 253	64 569	57 684	57 684	0	27	1 774	1 774	160
60-7000/6000-1:42	154 266	80 104	74 162	74 162	0	21	1 765	1 765	200
60-10000/4000/∞-1:33,5	136 945	62 746	78 252	74 199	0	21	2 000	2 000	160
60-16000/6100/∞-1:41,5	168 823	80 899	95 329	87 924	0	7 724	2 000	2 000	220

¹⁾ maximum operational speed in branching-track

Para calcular los datos de la aguja en el caso de que fuera necesario, se pueden determinar como se explica a continuación. Primero se encuentra PS que es el principio de la aguja (junta de la contraaguja) que sirve de punto de partida para el tendido de la catenaria y los postes. Después a partir de la siguiente tabla se determina la altura H.

Tabla 5 Altura de los carriles [KIES08]

Forma del carril	S 41	S 45	S 49	S 50	S 54	S 64	UIC 60	R 65
Altura carril H en mm	138	142	149	152	154	172	172	180



Y se obtiene el radio de la desviada R con la siguiente ecuación que se demuestra en la gráfica.

$$R = l_s^2 / (8 \cdot h_f)$$

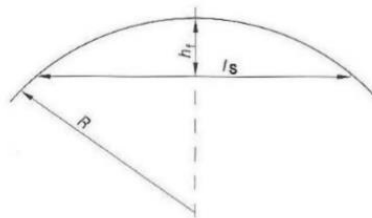


Figura 63 Determinación del radio de la desviada R [KIES08]

Tras determinar el radio, saber el tipo de carril y sabiendo la distancia de PS (principio de la aguja) a BS (principio del espadín), que depende de cada tipo de aguja, se puede conocer el principio de aguja PS. Este punto sirve de referencia para colocar los postes que llevarán la catenaria.

5.1.2 MONTAJE DE AGUJAS CRUZADAS

Para ver cómo funcionan las agujas cruzadas se ubicará el perfil de aguja en el punto 50. Aunque el óptimo es que el poste de aguja esté en el punto 50. La aguja cruzada puede realizarse como mínimo en el punto 30 y como máximo en el punto 70.

La máxima longitud del vano de la vía desviada marca la longitud del vano de elevación y el de anclaje. El vano de la vía desviada viene determinado por el descentramiento máximo que no debe de ser mayor de 35 cm.

En esta tabla se recogen los datos más característicos para diferentes puntos de aguja de desvíos montados en recta. Se ve que los puntos críticos son el 30 y el 70, que no es aconsejable usar. Los descentramientos de la table son para la vía directa y la desviada.

Tabla 6 Aguja cruzada. Valores característicos para distintos puntos de aguja para desvíos montados en recta. [ADIF01]

Aguja cruzada	Puntos de poste de aguja (Tolerancia $\pm 2,5$ cm)								
Poste de aguja	30	35	40	45	50	55	60	65	70
Descentramiento	20	22	25	27	30	32	35	37	40
Dist. Eje V.G a HC V.S	10	13	15	18	20	23	25	28	30
Alargamiento ménsula	10	15	20	25	30	35	40	45	50
Longitud brazo	100	105	110	115	120	125	130	135	140

- **Análisis de zonas de frotamiento entre el pantógrafo y la catenaria**

En la siguiente gráfica se muestra el recorrido del pantógrafo al circular por la vía desviada.

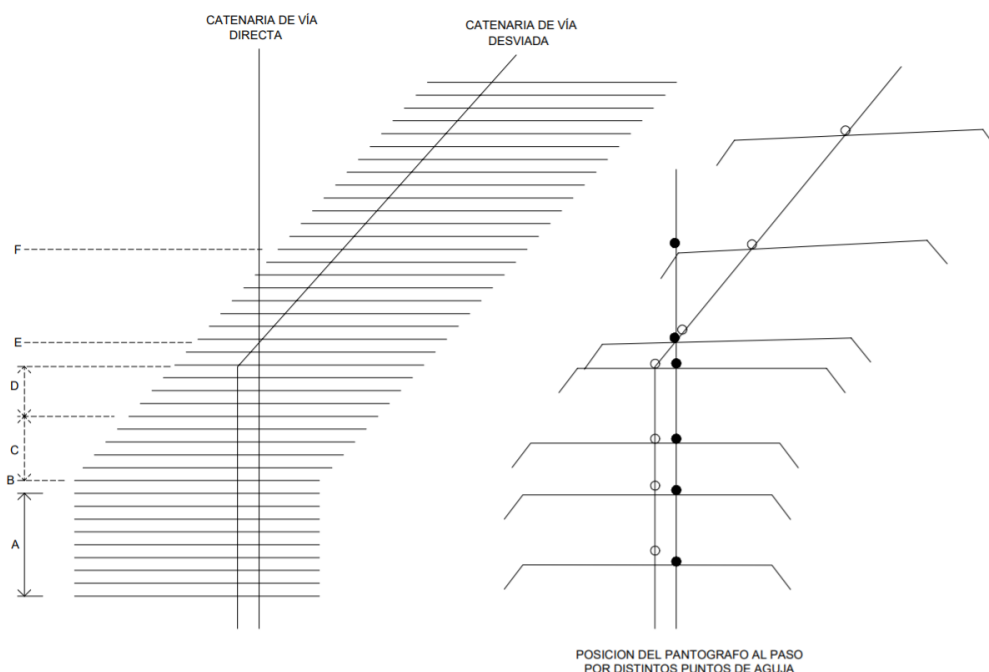


Figura 64 Esquema del recorrido del pantógrafo en la aguja P50. [ADIF01]

En la figura se muestran varias zonas o posiciones que se describen a continuación:

- Zona A: el pantógrafo avanza por el vano de elevación y va por la vía directa, roza la catenaria directa. Los hilos de contacto están atirantados 30 cm.
- Posición B: es el punto de contraaguja, punto de aguja cero, el semipantógrafo sigue en la misma posición del A. En este punto la posición del pantógrafo empieza a variar su posición con respecto a las catenarias.

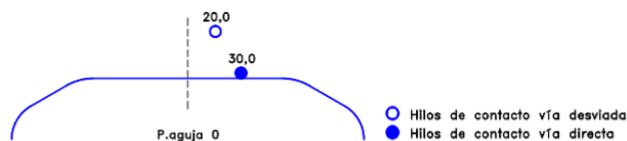


Figura 65 Pantógrafo en el punto de aguja 0. Aguja cruzada. [ADIF01]

- Posición C: esta zona se corresponde a los puntos de aguja entre 5 y 25 cm donde el pantógrafo solo está en contacto con la catenaria de la vía directa. Los hilos de contacto están a la misma distancia, pero su posición con respecto al pantógrafo cambia a medida que avanza desplazándose hacia el semipantógrafo izquierdo. En la posición final de C, el punto de aguja 25, los hilos de contacto están a 5 cm del eje del pantógrafo y los de la vía desviada empiezan a tocar el pantógrafo.

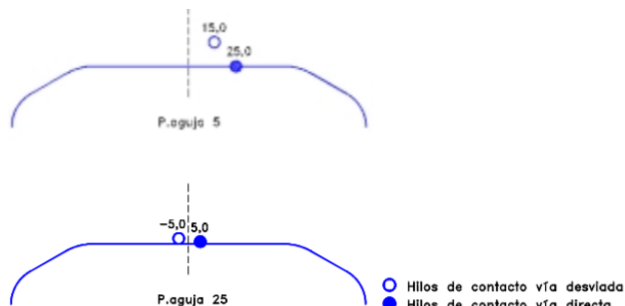


Figura 66 Pantógrafo en los puntos de aguja 5 y 25. Aguja cruzada. [ADIF01]

- Posición D: los hilos de contacto de ambas vías siguen desplazándose por el semipantógrafo izquierdo hasta que llegan al punto 50 donde se encuentran con los brazos de atirantado. En este punto los hilos de contacto empiezan a converger y se llegan a cruzar en el punto E.



Figura 67 Pantógrafo en el punto de aguja 50. Aguja cruzada. [ADIF01]

- Posición E: los hilos de contacto se cruzan, los de la vía desviada van por encima de los de la directa, los hilos a partir de esta posición se van separando.



Figura 68 Pantógrafo en el punto de aguja 62. Aguja cruzada. [ADIF01]

- Posición F: es el punto de aguja 100, los hilos de contacto se separan pasando a formar dos catenarias, la de la vía directa y la de la vía desviada.



Figura 69 Pantógrafo en el punto de aguja 100. Aguja cruzada. [ADIF01]

- **Zona libre de obstáculos para el pantógrafo en las agujas cruzadas**

Como ya se ha visto en el apartado anterior, hay un periodo en el que el pantógrafo está en contacto con los hilos de contacto de la vía directa y los de la desviada en la zona de la aguja cruzada. Cuando uno de los hilos de contacto está en el extremo de la mesilla del pantógrafo había peligro de que algún elemento de la catenaria alcance la parte extrema y curvada de este.

Para evitar este peligro se declara una zona libre de obstáculos, que se determina teniendo en cuenta las elevaciones dinámicas del pantógrafo y el movimiento lateral del tren.

La zona libre de obstáculos no debe de incluir elementos como: alimentaciones, grifas de péndolas o de contacto, aisladores de sección. Hay que tener en cuenta que estos elementos

a veces se desplazan por las condiciones atmosféricas; grapas de anclaje y grifas de empalme de hilo de contacto.

A continuación, se muestra en la figura la zona libre de obstáculos en un pantógrafo de 1950 mm y en el Europantógrafo de 1600 mm. En el pantógrafo de 1950 mm la zona de obstáculos es de 450 mm, mientras que la zona de obstáculos del Europantógrafo es de 520 mm.

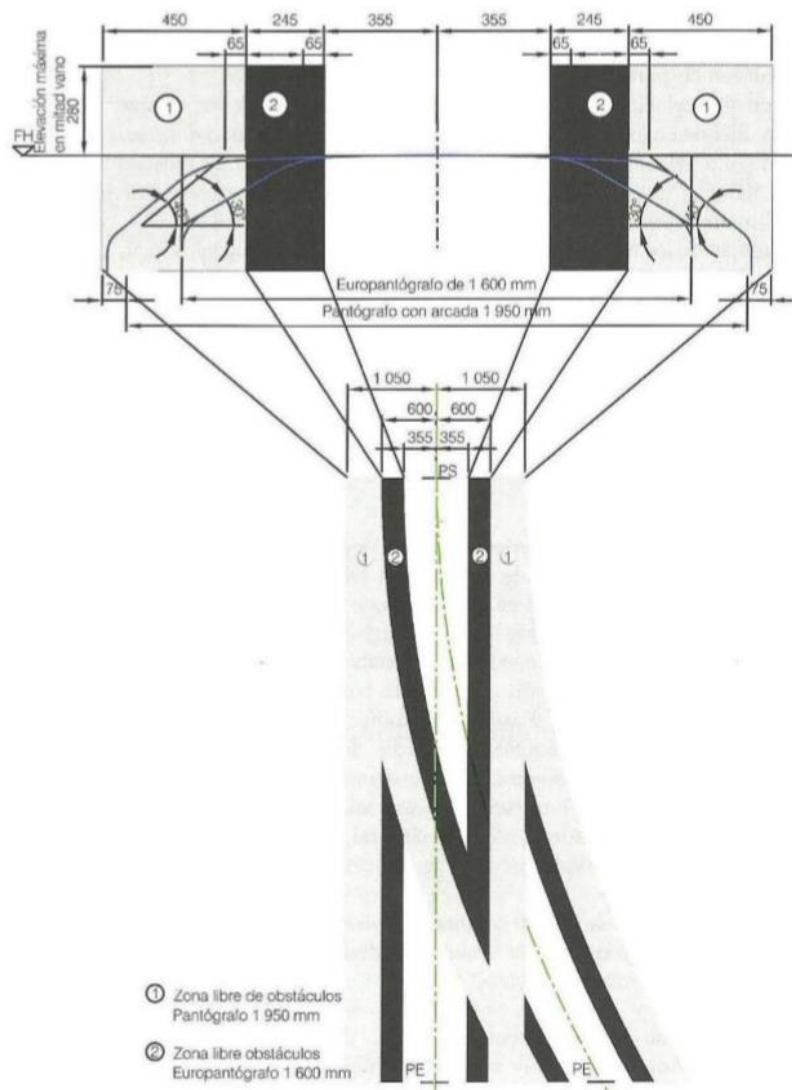


Figura 70 Zona libre de obstáculos para el pantógrafo de 1950 mm y para el pantógrafo de 1600 mm.

[KIES08]

- **Disposición de las catenarias en agujas cruzadas**

El pantógrafo y la línea aérea de contacto deben cumplir lo siguiente para que se capte adecuadamente la corriente:

- Cuando el pantógrafo tanto el hilo de contacto de la directa como el de la desviada, el eje de las vías tiene que estar a cierta distancia que depende del ancho del pantógrafo. El hilo de contacto de la vía directa toca la mesilla del pantógrafo y hace que se incline y favorezca a que más tarde el hilo de contacto de la desviada toque al pantógrafo de forma correcta (a). El caso límite es cuando el hilo de la directa está en el centro del pantógrafo (b). Lo que no se permite, porque puede provocar el basculamiento brusco de la mesilla del pantógrafo, es que el hilo de contacto de la directa esté en el otro semipantógrafo (c).

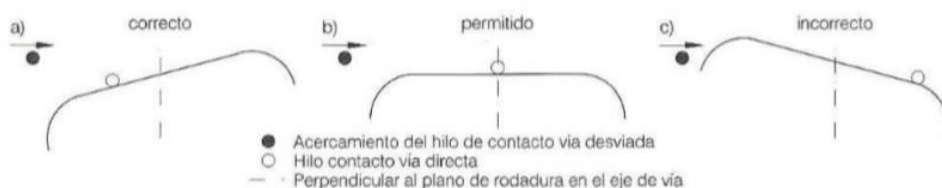


Figura 71 Requisitos para los hilos de contacto en la zona de agujas [KIES08]

- En la siguiente figura se muestra un plano de aguja donde se puede ver el punto de cruce P_c de los hilos de contacto, el hilo de la desviada se eleva 150 mm en el apoyo 1 con respecto al de la directa, el pantógrafo solo toca un hilo de contacto en el apoyo 1. Si el apoyo del hilo de contacto de la desviada estuviera entre el eje de la vía y el extremo de la zona libre de obstáculos, este hilo podría tocarlo el pantógrafo cuando va por la vía directa si se da la elevación máxima del hilo de contacto de la directa. En este caso el ángulo de inclinación del hilo de contacto de la desviada tiene que ser menor que 5 para vías principales en el punto P_1 del apoyo 1, y menos de 15 en vías secundarias.
- Si el apoyo del hilo de contacto de la desviada está situado a más de 150 mm por encima de la vía directa, el ángulo de inclinación lo limita la fuerza radial del apoyo,

que es como máximo 2500 N para brazos de atirantado ligeros y 1340 N si el hilo de contacto va fijado al tubo registrador de atirantado.

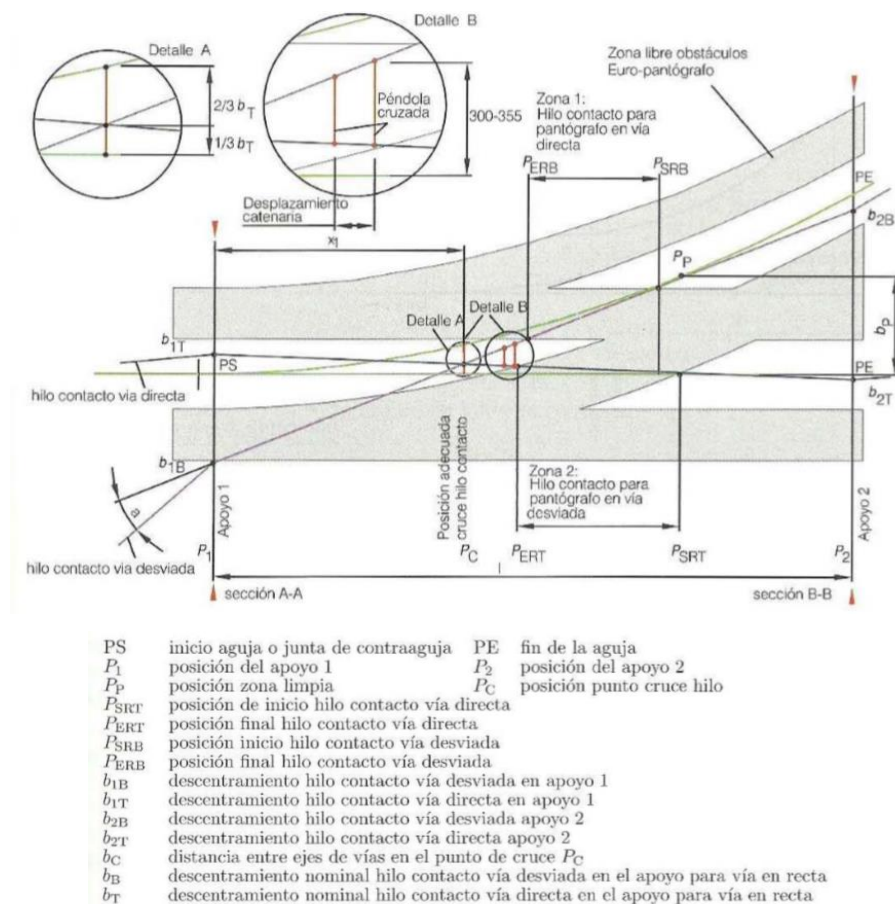


Figura 72 Puntos de referencia en el plano de las agujas [KIES08]

- En los apoyos de la LAC se debe intentar evitar que el pantógrafo toque más de un hilo de contacto, para evitar puntos duros.
- En el punto de cruce de los hilos de contacto, el descentramiento con respecto a la vía directa debe de ser menor que con respecto a la desviada. Esto se puede apreciar en la figura anterior el detalle A.
- El cruce de los hilos de contacto de vía directa y desviada debe estar lo más lejano posible de los apoyos porque si el tren va por la vía directa no tendría que tocar el hilo de contacto de la desviada.

- Para la elección de la longitud de vano entre los postes 1 y 2 tiene que asegurar que los hilos de contacto de ambas vías estén dentro de los límites, incluso cuando hay viento.
- La zona libre de obstáculos es importante respetarla para el paso seguro del pantógrafo por la catenaria.
- La longitud de vano máxima permitida es de 65 m.

5.1.3 MONTAJE DE AGUJAS TANGENCIALES

Se ubica la aguja en el punto 90; los valores extremos en este caso, aunque no aconsejables, están en el punto 80 y en el punto 105.

En este tipo de agujas las catenarias de la vía directa y de la vía desviada son independientes, el punto 90 por los tanto, será la referencia de la catenaria de la desviada, pero no tiene porqué ser el de la directa.

A continuación, se ven los valores de descentramiento para la vía directa y la desviada si el punto de aguja se pone en diferentes posiciones. Al pasar el pantógrafo, entre los puntos de aguja 80 y 100, por la vía directa, no toca la catenaria de la desviada porque los hilos de contacto están a igual o mayor distancia de la que existe entre el eje del pantógrafo y su extremo.

Aguja tangencial	Puntos de poste de aguja, con tolerancia (– 0;+5) cm				
Poste de aguja	80	85	90	95	100
Descentramiento vía general	20	25	25	25	30
Descentramiento vía secundaria	10	10	15	20	20
Dist. eje vía general a H.C. vía desviada	70	75	75	75	80
Alargamiento de ménsula	55	60	65	70	75
Longitud brazo atirantado	150	155	160	165	170

Figura 73 Aguja tangencial. Valores característicos para distintos puntos de poste de aguja.

[ADIF01]

- **Análisis de zonas de frotamiento entre el pantógrafo y la catenaria**

En la siguiente gráfica se muestra el recorrido del pantógrafo al circular por la vía desviada y la posición las catenarias de las vías directa y desviada. En el punto 90 hay 30 cm de descentramiento de los hilos de contacto de la vía directa hacia la desviada, y 15 cm de la vía desviada a la directa.

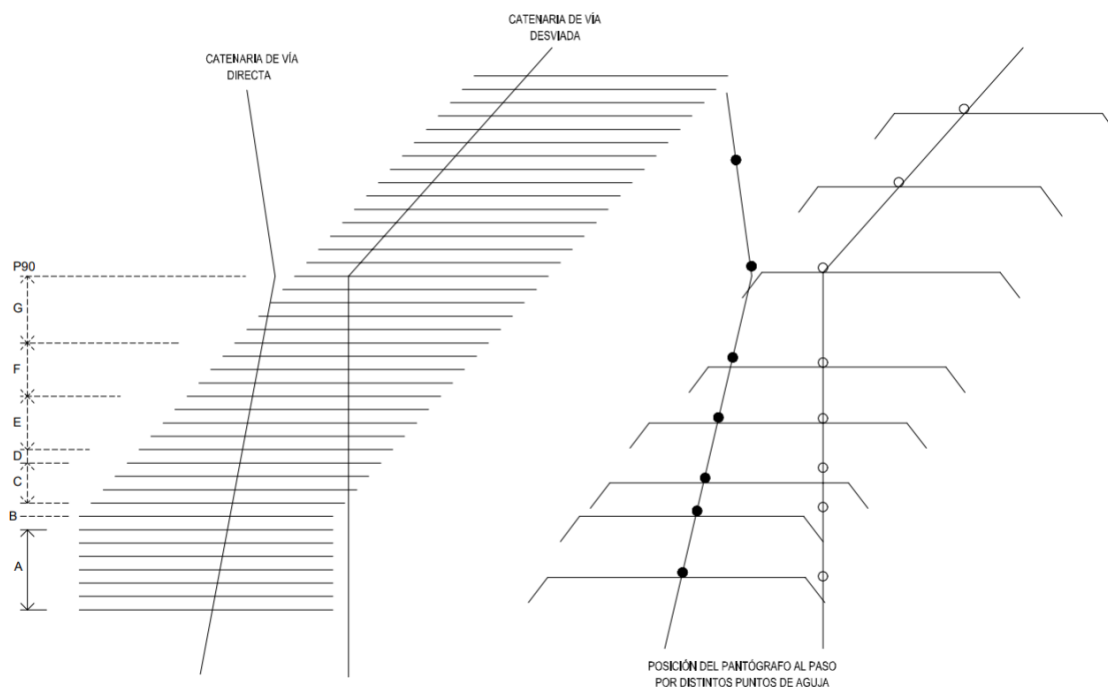


Figura 74 Esquema del recorrido del pantógrafo al pasar por una aguja en el punto 90. [ADIF01]

En la figura se muestran varias zonas o posiciones que se describen a continuación:

- Zona A: el pantógrafo se encuentra en el vano de elevación, está circulando por la vía directa, los hilos de contacto
- Posición B: aguja en el punto 0, punto de contraaguja. Los hilos de contacto de la vía directa están en la posición 0, y los de la vía desviada están separados entre 60 y 70 cm del pantógrafo, la catenaria de la desviada está elevada. A partir de este punto el pantógrafo comienza a variar su posición con respecto a la vía directa.

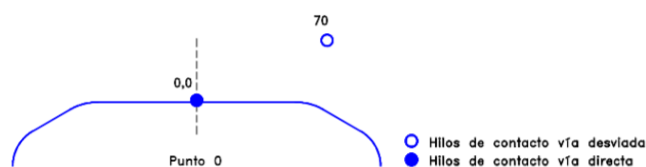


Figura 75 Pantógrafo en el punto de aguja 0. Aguja tangencial. [ADIF01]

- Posición C: puntos de aguja entre 5 y 20. En este caso el pantógrafo va desplazándose del eje de la vía directa, sólo contacta con la catenaria de la directa. La catenaria de la desviada está elevada y se encuentra entre 65 y 40 cm del eje del pantógrafo.

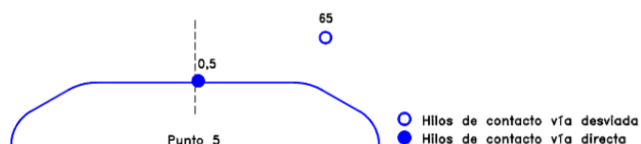


Figura 76 Pantógrafo en el punto de aguja 5. Aguja tangencial. [ADIF01]

- Posición D: puntos de aguja entre 20 y 25. Los hilos de contacto de la vía directa están cercanos al eje del pantógrafo en el semipantógrafo izquierdo, mientras que los hilos de contacto de la desviada están en el semipantógrafo derecho entre 35 y 45 cm del centro del pantógrafo. La catenaria de la vía desviada está estáticamente elevada sobre la directa, pero al pasar el pantógrafo y elevar los hilos de contacto de la vía directa, ambas se encuentran a la misma altura. En esta zona la catenaria de la vía desviada llega a contactar con el pantógrafo.

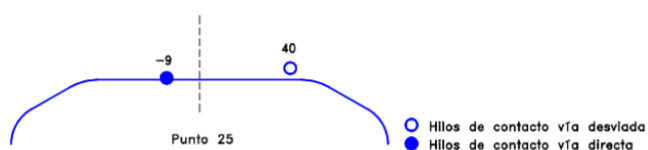


Figura 77 Pantógrafo en el punto de aguja 25. Aguja tangencial. [ADIF01]

- Posición E: puntos de aguja de 25 a 45. La catenaria de la vía desviada se va acercando al eje del pantógrafo y la de la vía directa se va alejando. Cada catenaria está en un semipantógrafo distinto, la catenaria de la vía desviada va descendiendo. En el punto 45 las dos catenarias son simétricas con respecto al eje del pantógrafo.



Figura 78 Pantógrafo en el punto de aguja 45. Aguja tangencial. [ADIF01]

- Posición F: puntos de aguja entre 50 y 65. En el punto 50 los hilos de contacto de las dos catenarias están a la misma altura, a partir de este punto los de la desviada irán descendiendo hasta que en el punto 90 estarán aproximadamente 30 mm más abajo que los de la vía directa. El pantógrafo está inclinado hacia el lado de la vía directa.

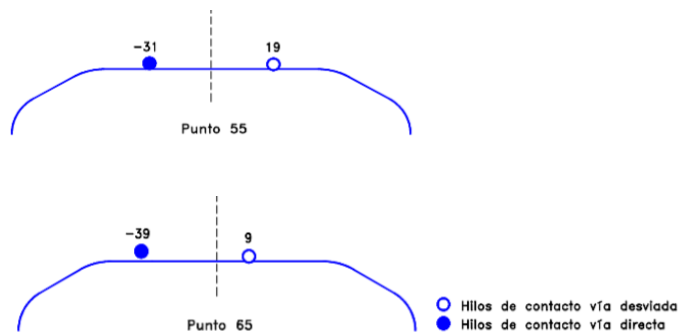


Figura 79 Pantógrafo en los puntos de aguja 55 y 65. Aguja tangencial. [ADIF01]

- Zona G: desde el punto de aguja 65 hasta el 90. Los hilos de contacto de la vía desviada se van desplazando al semipantógrafo izquierdo y los de la vía directa se van desplazando al borde del pantógrafo, esto hace que el pantógrafo esté inclinado hacia el lado de la vía directa. La distancia entre las dos catenarias aumenta y como la de la vía desviada está por debajo de la de la directa, la catenaria de la vía directa no toca el pantógrafo.



Figura 80 Pantógrafo en el punto de aguja 80. Aguja tangencial. [ADIF01]

- A partir del punto 90 el pantógrafo sólo estará rozando la catenaria de la vía desviada, irá independiente por ella.

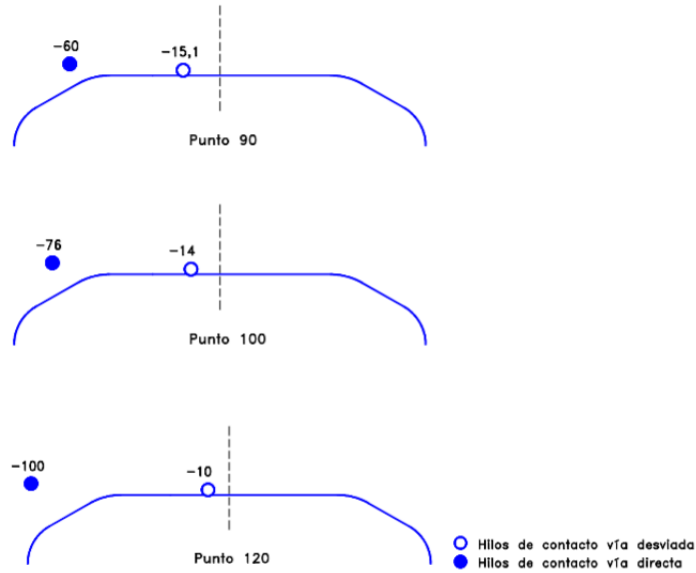


Figura 81 Pantógrafo en los puntos de aguja 90, 100 y 120. Aguja tangencial. [ADIF01]

6 ANÁLISIS DE RESULTADOS

Se ha realizado una herramienta en Matlab que analiza todos los distintos tipos de agujas de la norma inglesa, el Track Design Handbook: NR/L3/TRK/2049/mod03. En esta herramienta se selecciona el tipo de aguja que se va a utilizar y se muestra la zona libre de obstáculos que aparece en gris claro, para diseñar la línea aérea de contacto adecuadamente en cada caso. La línea aérea de contacto de la vía directa se representa en azul, la de la desviada está en rojo. La figura que se muestra a continuación es el tipo de aguja CEN56E1, AV con ángulo de cruce en 6 (ángulo Xing).

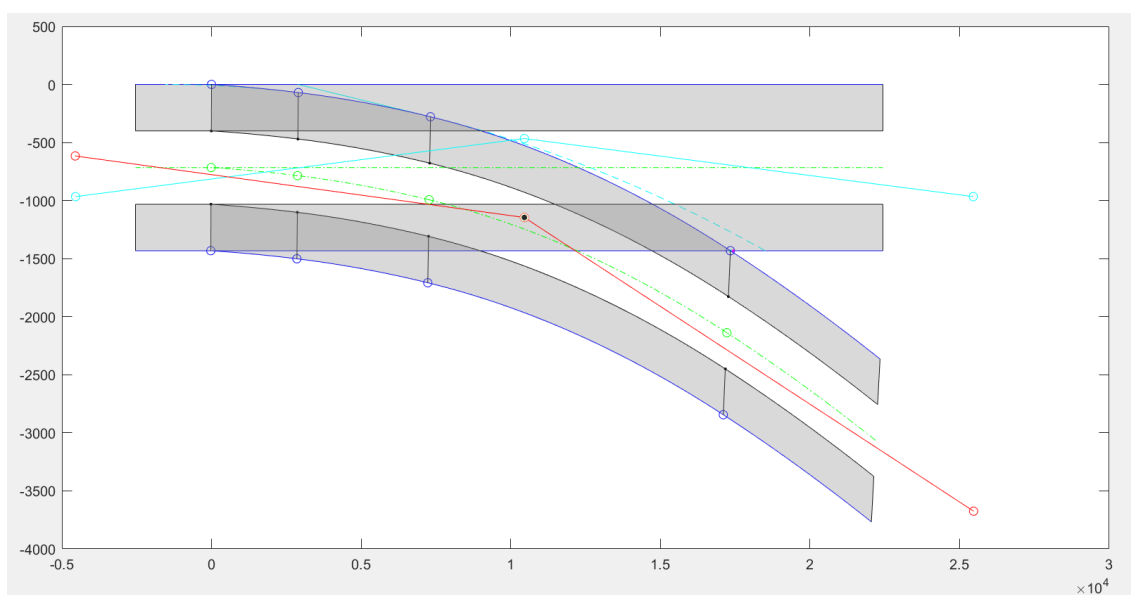


Figura 82 CEN56E1 Vertical S&C, Standard Circular Curve Turnouts, AV Crossing in ~ 6. MATLAB switchtype=1.

Como se puede observar en la figura, la proporción de los ejes en este caso no es igual, se mostrarán las agujas de esta manera, aunque la imagen está distorsionada. En la siguiente imagen se muestran los ejes con longitudes proporcionales.

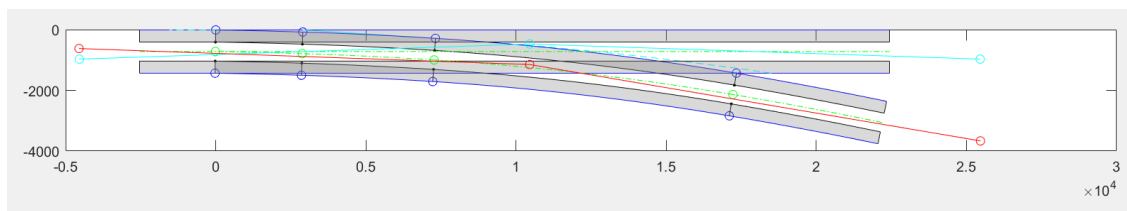


Figura 83 CEN56E1 Vertical S&C, Standard Circular Curve Turnouts, AV Crossing in ~ 6. MATLAB switchtype=1. Vista proporcional.

Esta herramienta es necesaria porque hay muchos tipos distintos de agujas, cada una con sus particularidades. A continuación, se estudian los distintos tipos y dentro de cada uno se hará hincapié en los casos que tienen peculiaridades y no se pueden dibujar de la misma forma que los otros tipos.

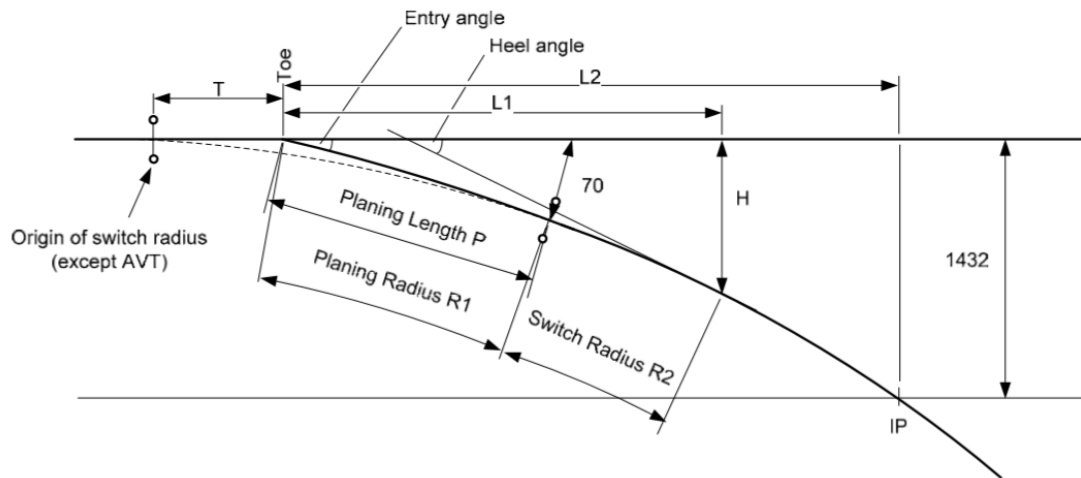
Las agujas se agrupan en dos grupos: CEN56E1 y NR60.

6.1 AGUJAS TIPO CEN56E1

En la siguiente tabla acompañada de su ilustración correspondiente, se encuentran los valores significativos de las agujas *CEN56E1 Vertical S&C Switch Details*, con estos valores se pueden llegar a representar los distintos tipos de agujas de esta primera tabla.

Tabla 7 Table 1 – CEN56E1 Vertical S&C Switch Details [ASSE16]

Switch type	Natural angle 1 in	Turnout Speed mph	Length of planing P	Planing radius R1	Switch radius R2	Toe to origin of switch curve T	Lead length. Toe to IP L2	Heel offset H	Toe to heel L1	Heel angle 1 in	Entry angle 1 in
AV	7	20	2900	196 750.16	141 052	1542.98208	18 505	278.53865	7317	15.904403	59.669887
AVT	8		2900	196 750.16	186 936.65	2988.02322	20 288	219.55314	6527	19.633740	59.669886
BV	8	20	3500	230 724.78	184 012	1574.84848	21 337	289.16004	8737	17.830694	80.586548
CV	9.25	25	4250	287 251.45	245 767	1615.10392	24 877	372.99182	11 920	18.143969	110.266503
DV	10.75	30	5200	367 038.30	331 687	1613.80233	29 174	297.86830	12 440	23.590631	156.854444
EV	15	40	7000	739 696.30	645 116	2503.06229	40 457	302.69882	17 257	32.639808	189.846820
FV	18.5	50	8550	1 137 066.68	980 920	3168.39649	49 816	293.04404	20 807	40.907497	225.888333
SGV	21	60	10 150	1 398 518.18	1 263 740	3150.95190	56 993	299.41963	24 357	45.935453	306.055765
GV	24	70	11 600	1 826 293.27	1 650 380	3600.16188	65 136	300.77672	27 907	52.376332	349.842595
HV	32.365*	90	17 495	3 000 716.00	3 000 716	3000.35326	89 693	291.75251	38 843	71.709978	500.059376



Para dibujar este tipo de agujas en Matlab se seguirá la siguiente numeración, casi todas las agujas de esta tabla coinciden con la tabla siguiente, porque el radio $R2$ switch radius y $R3$ turnout radius son iguales.

Tabla 8 Tipo de desvío Matlab de la tabla 1

MATLAB switchtype	Switch type
3	AV
0	AVT
9	BV
14	CV
21	DV
26	EV
31	FV
35	SGV
39	GV
43	HV

En este caso las notas a pie de tabla indican varias particularidades:

- El origen del radio de cambio (switch radius $R2$) de aguja AVT se da 22.75992 mm por por fuera del eje de la línea principal.

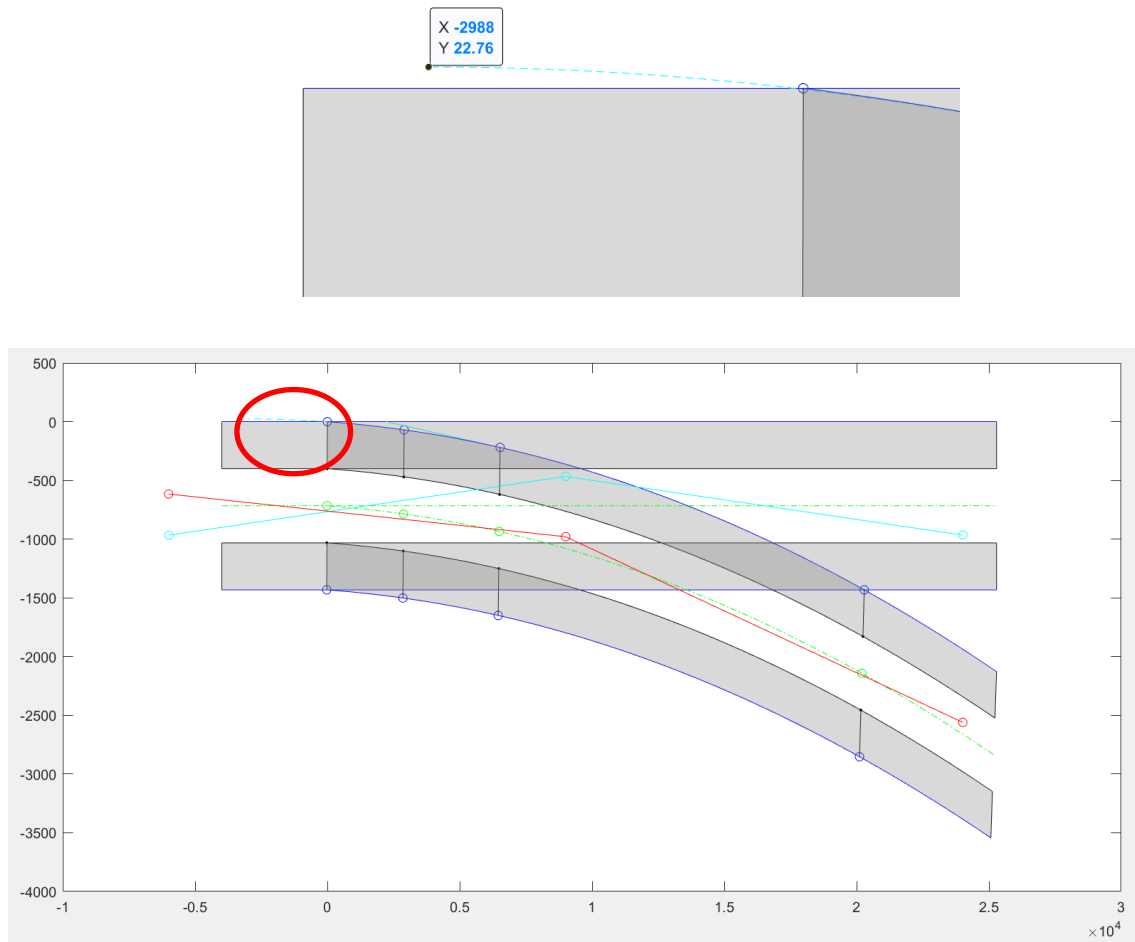
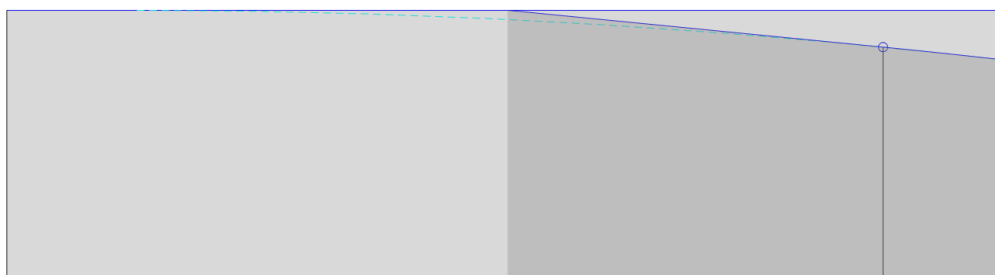


Figura 84 Aguja CEN56E1 AVT, switchtype = 0

- La aguja de tipo HV tienen una parte inicial recta de 3000 mm desde el pie (toe, origen de coordenadas).



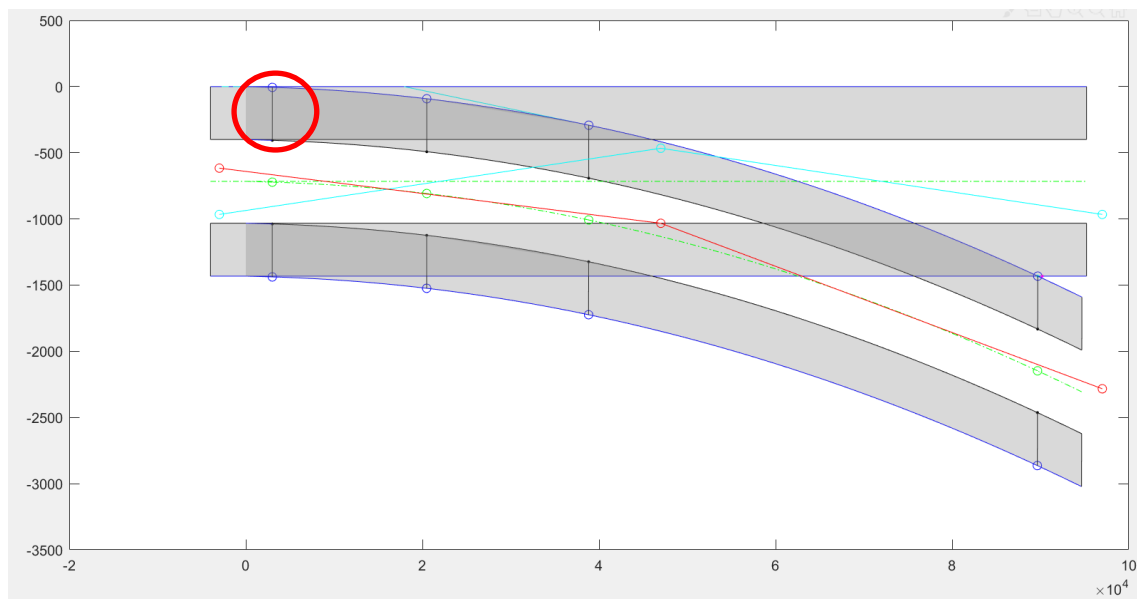
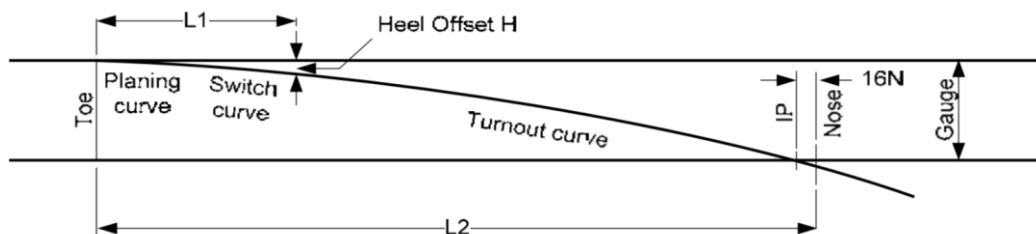


Figura 85 Aguja CEN56E1 HV, switchtype = 43

Tabla 9 Table 2 – CEN56E1 Vertical S&C, Standard Circular Curve Turnouts [ASSE16]

Switch	Crossing 1 in ~	Lead L2. Nose to toe	Planing radius	Switch radius	Turnout radius	Toe to heel L1	Heel H	Max turnout speed [A] mph. See note 6	Max turnout speed [B] mph. See note 7
AV	6	17 437	196 750	141 052	97 599	7317	279	15	
	6.5	18 040	196 750	141 052	117 821	7317	279	15	
	7	18 617	196 750	141 052	141 052*	7317	279	20	
	7.5	19 170	196 750	141 052	167 780	7317	279	20	
	8	19 700	196 750	141 052	198 620	7317	279	20	
	9.25	20 934	196 750	141 052	299 450	7317	279	20	
BV	7	20 315	230 725	184 012	133 185	8737	289	20	
	7.5	20 901	230 725	184 012	157 024	8737	289	20	
	8	21 465	230 725	184 012	184 012*	8737	289	20	
	9.25	22 785	230 725	184 012	268 573	8737	289	20	
	10	23 520	230 725	184 012	344 544	8737	289	20	
	10.75	24 218	230 725	184 012	416 918	8737	289	20	
CV	8	23 787	287 251	245 767	169 051	11 920	373	20	
	9.25	25 025	287 251	245 767	245 767*	11 920	373	25	
	10	25 716	287 251	245 767	305 201	11 920	373	25	
	STR 10 #	25 117	287 251	245 767	245 767/Str.	11 920	373	25	
	10.75	26 371	287 251	245 767	378 263	11 920	373	25	
	13	28 152	287 251	245 767	737 191	11 920	373	25	
DV	9.25	27 642	367 038	331 687	230 112	12 440	298	25	
	10	28 513	367 038	331 687	277 328	12 440	298	25	
	10.75	29 346	367 038	331 687	331 687*	12 440	298	30	25
	13	31 644	367 038	331 687	551 575	12 440	298	30	
	STR 13 \$	29 940	367 038	331 687	331 687/Str.	12 440	298	25	
	15	33 464	367 038	331 687	858 076	12 440	298	30	
EV	13	38 451	739 696	645 116	454 448	17 257	303	35	30
	15	40 697	739 696	645 116	645 116*	17 257	303	40	35
	16	41 752	739 696	645 116	762 010	17 257	303	40	35
	18.5	44 211	739 696	645 116	1 139 974	17 257	303	40	
	21	46 444	739 696	645 116	1 700 938	17 257	303	40	
FV	16	47 252	1 137 067	980 920	689 242	20 807	293	45	35
	18.5	50 112	1 137 067	980 920	980 920*	20 807	293	50	40
	21	52 743	1 137 067	980 920	1 363 999	20 807	293	50	45
	24	55 638	1 137 067	980 920	2 001 909	20 807	293	50	
SGV	18.5	54 518	1 398 518	1 263 740	926 126	24 357	299	50	40
	21	57 329	1 398 518	1 263 740	1 263 740*	24 357	299	60	40
	24	60 441	1 398 518	1 263 740	1 795 616	24 357	299	60	50
	28	64 202	1 398 518	1 263 740	2 827 066	24 357	299	50	
GV	21	62 149	1 826 293	1 650 380	1 189 637	27 907	301	55	40
	24	65 520	1 826 293	1 650 380	1 650 380*	27 907	301	70	45
	28	69 628	1 826 293	1 650 380	2 484 540	27 907	301	70	55
	32.365	73 676	1 826 293	1 650 380	3 835 055	27 907	301	55	
HV	28	85 208	3 000 716	3 000 716	2 110 303	38 843	292	75	50
	32.365	90 211	3 000 716	3 000 716	3 000 716*	38 843	292	90	55



En esta tabla las agujas se representan con los siguientes números en Matlab:

Tabla 10 Tipo de desvío en Matlab de la tabla 2

MATLAB switchtype	Switch
1	AV
2	
3	
4	
5	
6	
7	BV
8	
9	
10	
11	
12	
13	CV
14	
15	
16	
17	
18	
19	DV
20	
21	
22	
23	
24	
25	EV
26	
27	
28	
29	
30	FV
31	
32	
33	
34	SGV
35	
36	
37	
38	GV
39	
40	
41	
42	HV
43	

En la siguiente figura se pueden apreciar las distintas zonas de este tipo de agujas. En esta figura se muestran también las coordenadas de donde se colocaría un posible diseño de la catenaria.

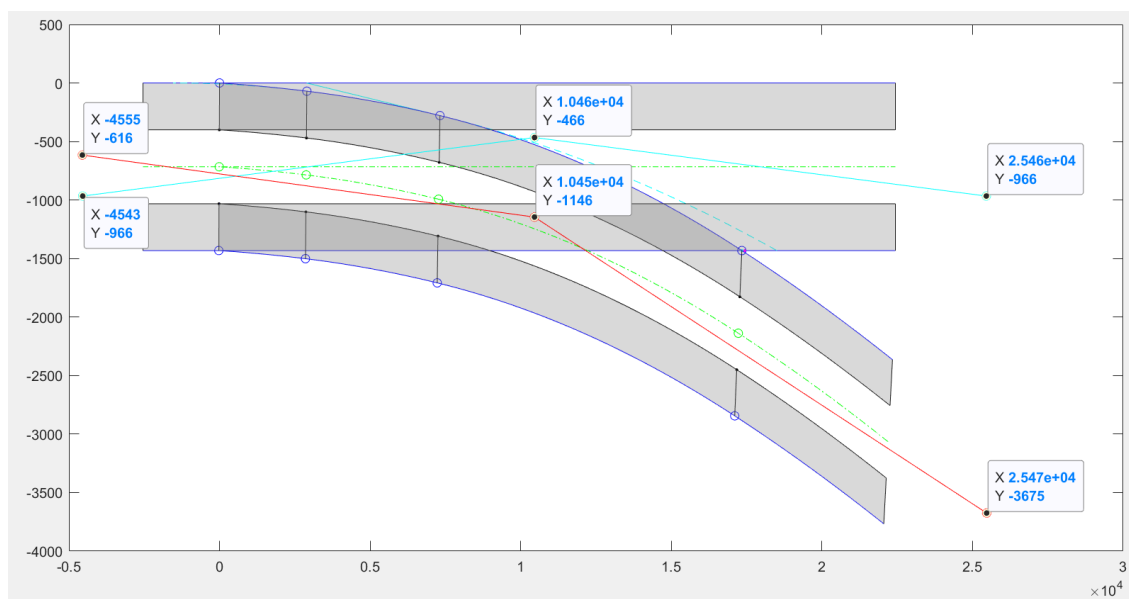


Figura 86 Switchtype = 1, CEN56E1 AV, crossing 1 in 6

Estas agujas se distinguen de las de la tabla vista anteriormente en que tienen una zona de cruce después del cambio. Las agujas que tienen el radio de cambio (switch radius R2) igual al radio de cruce (turnout radius R3) coinciden con las de la primera tabla analizada (switchtype = 3, 9, 14, 21, 26, 31, 35, 39, 43).

Este grupo de desvíos también tiene particularidades en algunas de las agujas. Las siguientes agujas son las que presentan diferencias con respecto a las de su mismo tipo:

- La aguja CV STR 10 tiene una parte recta de 2217 mm que se mide desde la nariz (Nose) de la aguja al pie (Toe).

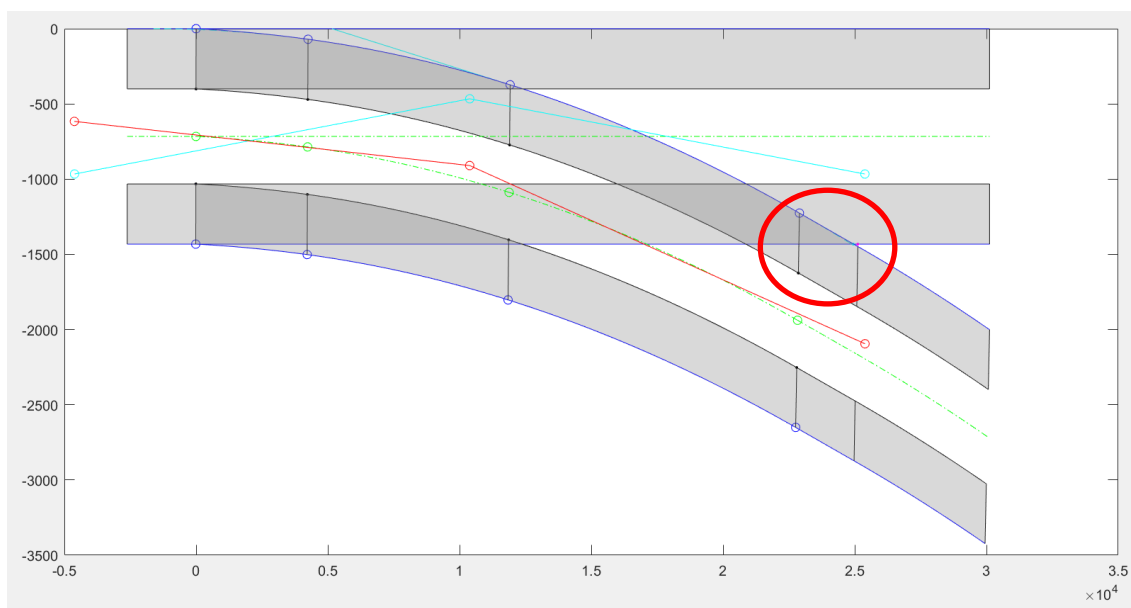


Figura 87 Switchtype = 16, CEN56E1 CV STR 10

- La aguja DV STR 13 tiene una parte recta de 6077 mm que se mide desde la nariz (Nose) de la aguja al pie (Toe).

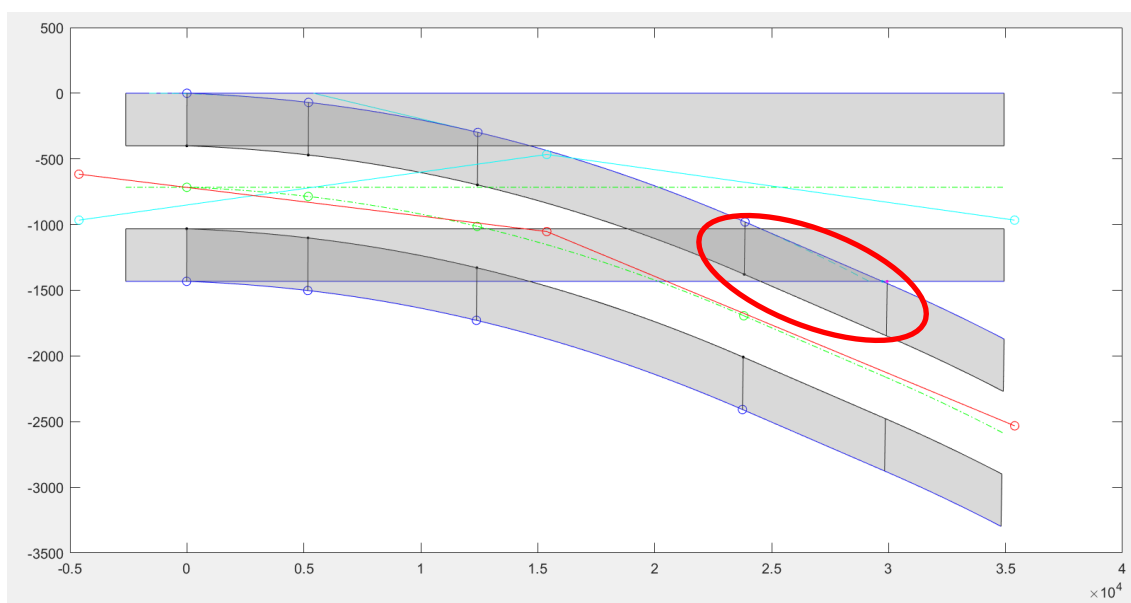


Figura 88 Switchtype = 23, CEN56E1 CV STR 13

- La tercera particularidad de esta tabla viene dada por las agujas HV que tienen un tramo recto, como ya se había mencionado en la tabla anterior.

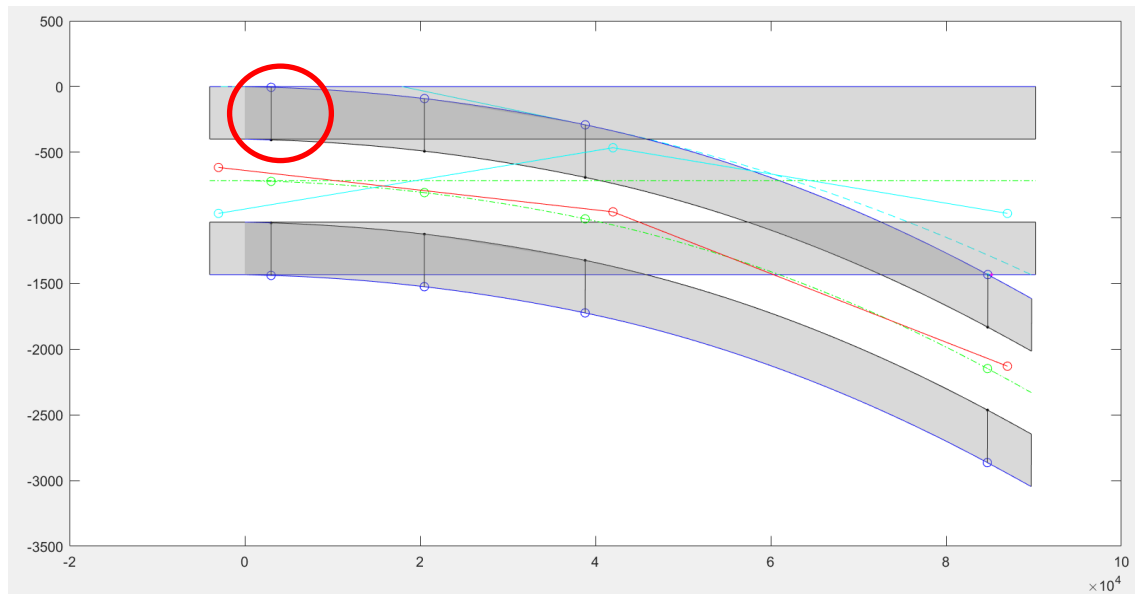
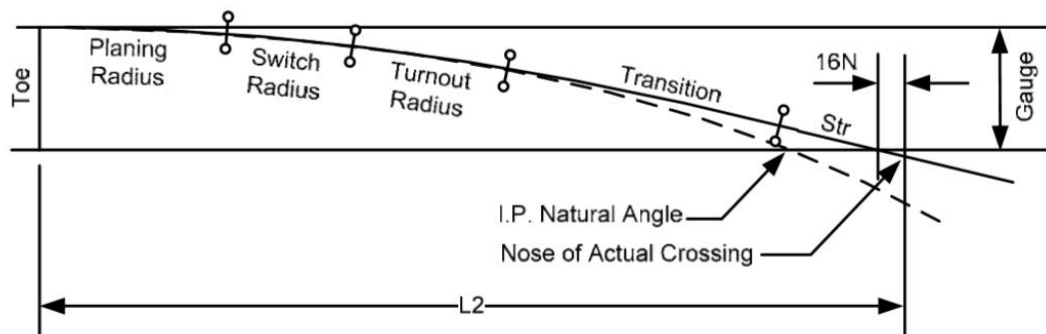


Figura 89 Aguja CEN56E1 HV, switchtype = 42

Tabla 11 Table 4 – CEN56E1 Vertical S&C Standard Transitioned Turnouts and Crossovers [ASSE16]

Switch	Crossing 1 in ~		Lead lengths			Switch radius	Turnout radius	Length of transition	Length of straight to nose	Turnout speed (mph)
	Natural	Actual	Toe to nose L2	Nose to nose across a 1970 interval	Toe to toe across a 1970 interval					
AV	7	9.25	19 698	4589	43 984	141 052	141 052	9760	1188	20
BV	8	9.25	21 808	4589	48 204	184 012	184 012	6195	469	15
	8	10	22 261	4975	49 497	184 012	184 012	9170	920	20
	8	10.75	22 852	5360	51 065	184 012	184 012	11 730	1510	20
CV	9.25	10.75	25 448	5360	56 256	245 767	245 767	7366	584	20
	9.25	13	27 007	6513	60 526	245 767	245 767	13 000	3271	25
DV	10.75	13	30 125	6513	66 762	331 687	331 687	10 630	964	25
	10.75	15	31 713	7533	70 960	331 687	331 687	17 455	2534	30
EV	15	18.5	42 017	9315	93 349	645 116	645 116	16 255	1560	35
	15	21	44 066	10 585	98 718	645 116	645 116	24 555	3605	40
FV	18.5	24	52 606	12 109	117 321	980 920	980 920	24 290	2787	50
	21	28	56 331	14 138	126 801	980 920	1 364 999	30 000	5165	50
SGV	21	28	60 782	14 138	135 702	1 263 740	1 263 740	30 075	3787	60
GV	24 #	28	66 678	14 138	147 493	1 650 380	1 650 380	19 640	1538	60
	24 *	28	67 135	14 040	148 310	1 650 380	1 650 380	36 200	- 7056	70
	24	32.365	69 933	16 350	156 216	1 650 380	1 650 380	38 000	3559	70
HV	32.365	45.75	93 153	32 830	219 137	3 000 716	3 000 716	55 700	2730	90



En Matlab la numeración es la siguiente:

Tabla 12 Tipo de desvío en Matlab de la tabla 4

MATLAB switchtype	Switch
44	AV
45	BV
46	
47	
48	CV
49	
50	DV
51	
52	EV
53	
54	FV
55	
56	SGV
57	GV
58	
59	
60	HV

En esta tabla hay algunos tipos de agujas que tienen características particulares, esto impide que se puedan graficar todos ellos de la misma manera:

- En la aguja HV 32.365/45.75 se mide el ángulo de forma distinta, se usa otro tipo distinto de medida de la nariz de la aguja al punto IP, esto se muestra a continuación:

Swing Nose Geometry

SN = 65.1216216216 (swing nose numerical angle)

$\theta = 00^\circ 15' 13.11''$

$\alpha = 01^\circ 48' 16.61''$

F = Flash butt weld

N = 45.75 (swing nose crossing angle)

$\beta = 00^\circ 37' 34.17''$

$\varphi = 01^\circ 25' 55.55''$

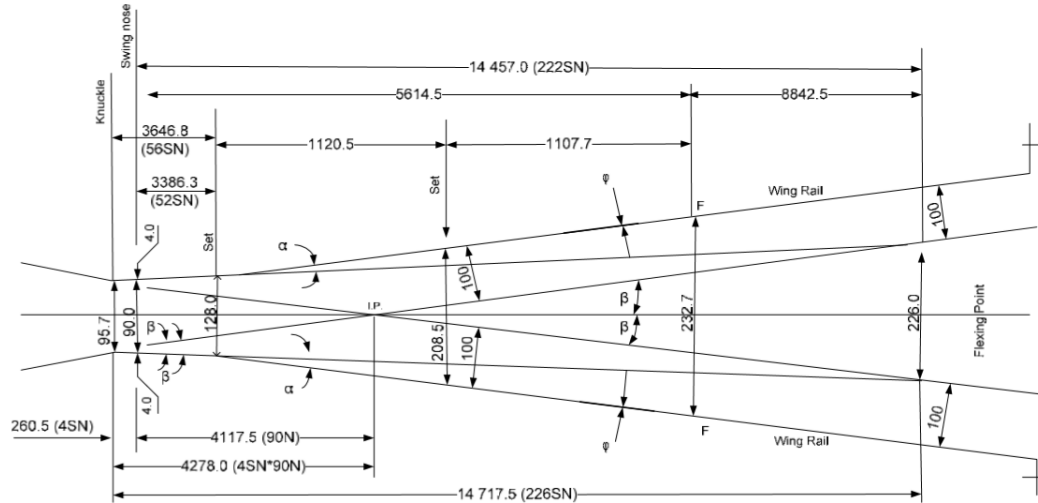


Figura 90 Swing Nose Geometry [ASSE16]

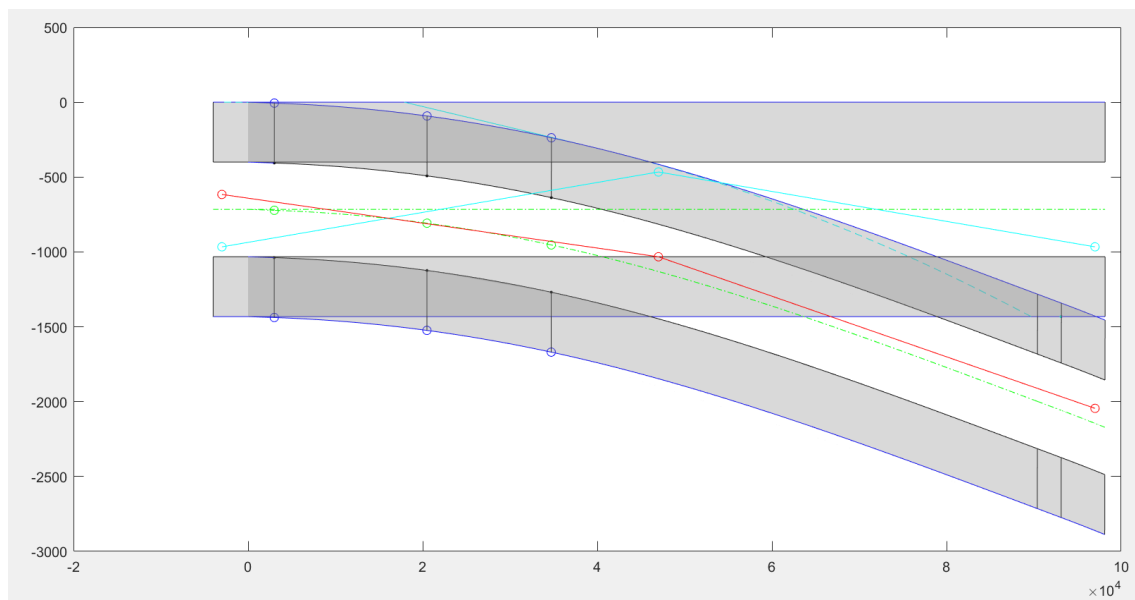


Figura 91 Switchtype = 60, CEN56E1 HV, crossing 1 in 45,75

- En el caso de la aguja GV 24/28, el valor del tramo que es recto que se encuentra en la nariz es negativo porque hay que medirlo en sentido contrario al resto de los casos. El resultado se muestra en la siguiente figura.

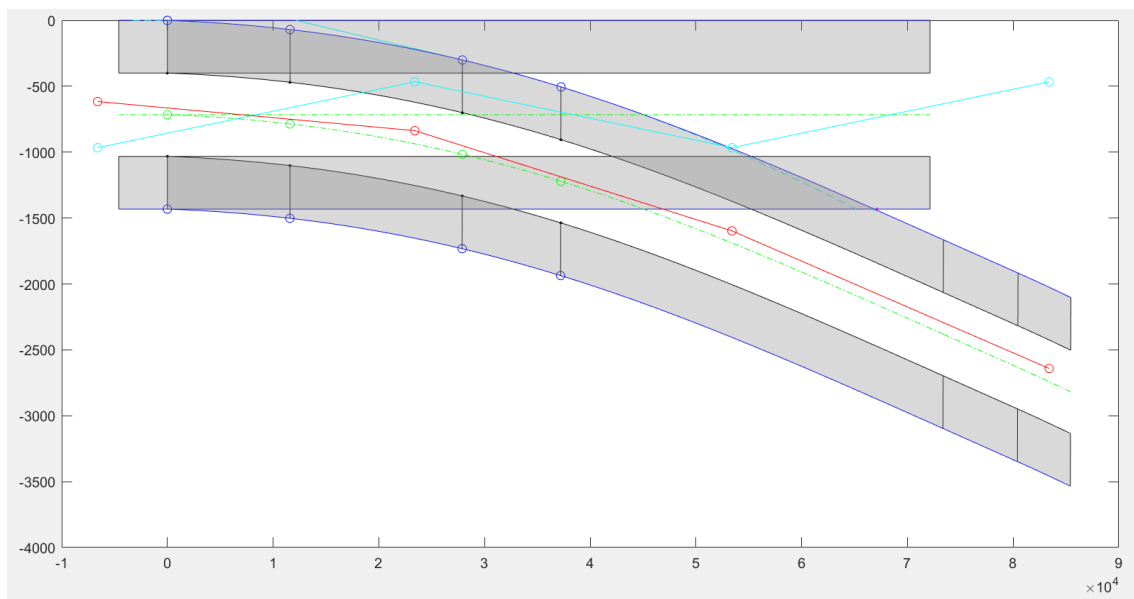


Figura 92 Switchtype = 58, CEN56E1 GV 24/28

- Otros casos particulares son las agujas CV 9,25/13; DV 10,75/15 y EV 15/21, el punto donde se medía H (heel offset) y el ángulo de talón (heel angle) se puede usar como referencia para conocer el centro de la curva R2, pero en este caso no es parte de la aguja porque el tramo donde se encuentra pertenece a la zona de cruce (turnout curve).

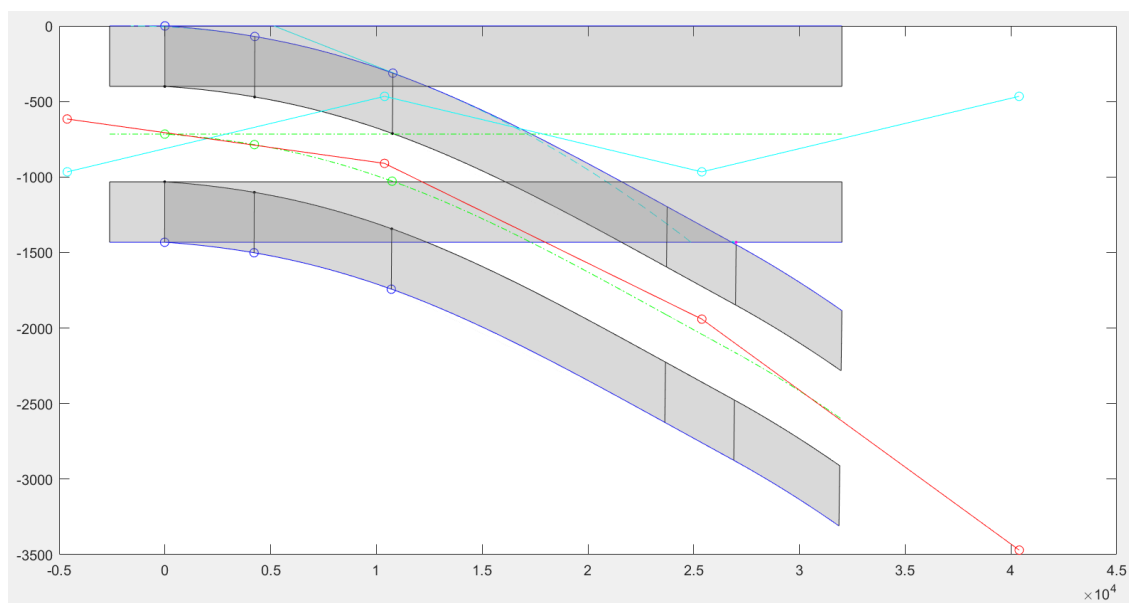


Figura 93 Switchtype = 49, CEN56E1 CV, crossing 1 in 13

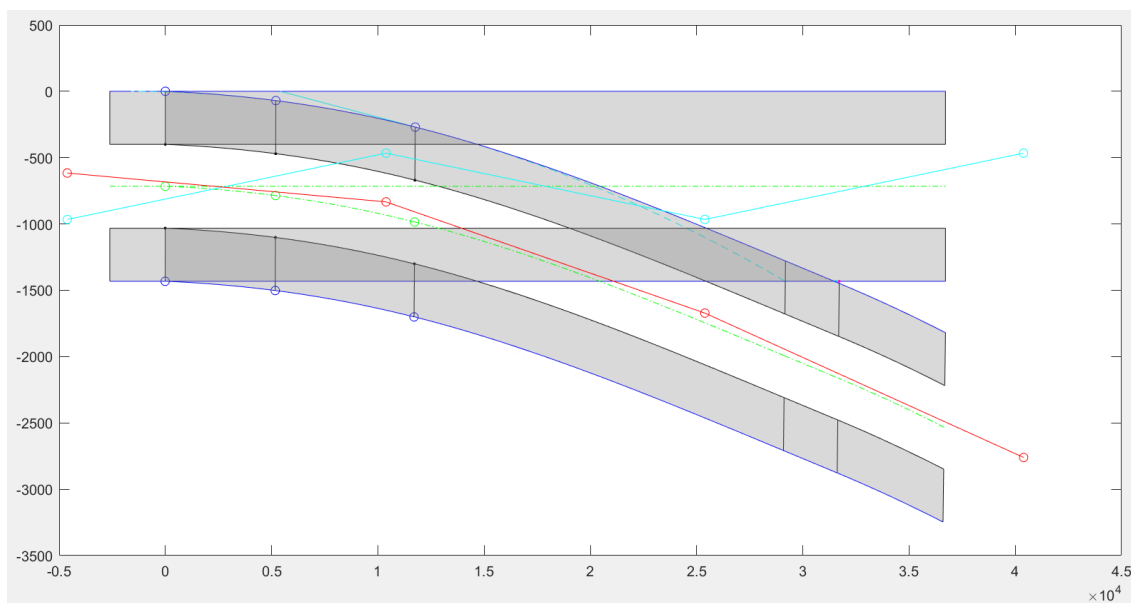


Figura 94 Switchtype = 51, CEN56E1 DV, crossing 1 in 15

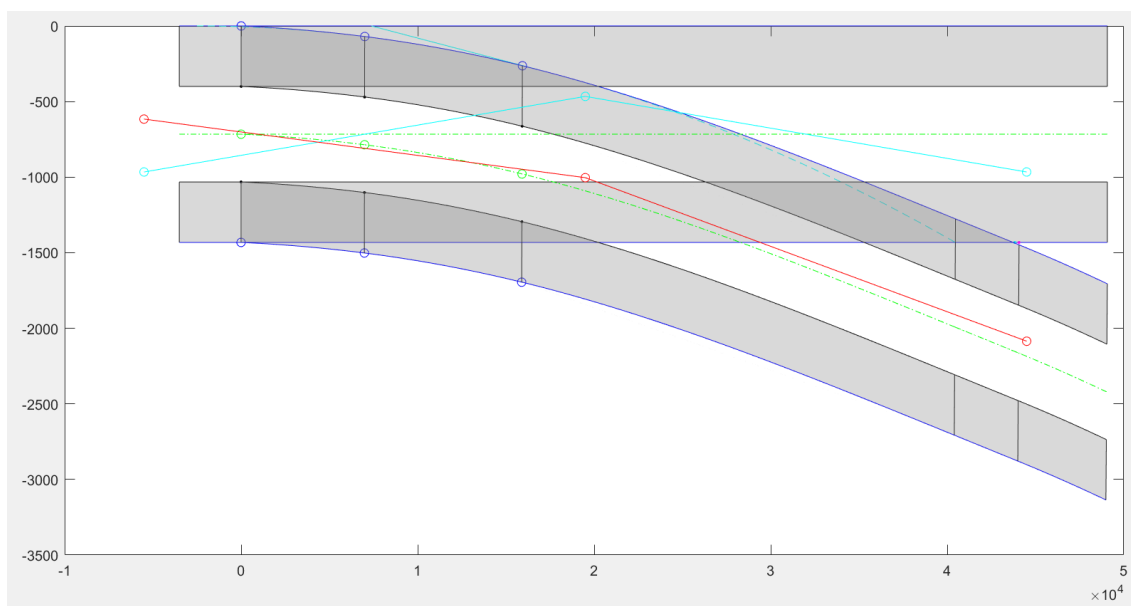


Figura 95 Switchtype = 53, CEN56E1 EV, crossing 1 in 21

6.2 AGUJAS TIPO NR60

Este tipo de agujas en vez de empezar con una curva como hemos visto anteriormente, empiezan con una recta seguida de una clotoide, como se puede ver en las siguientes dos figuras.

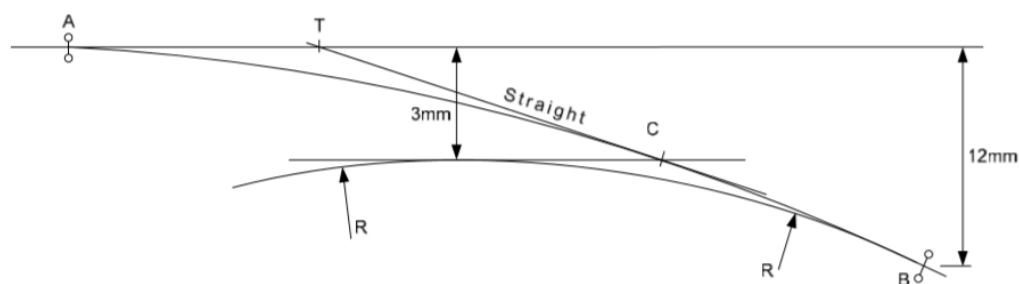


Tabla 13 C.2.1: NR60 Inclined S&C Switch Details. Table 28 - Switch Details. [ASSE16]

Switch designation	Natural crossing angle	Turnout speed mph	Switch radius R (R6)	Length of straight at toe T - C (L1)	Entry angle 1 in ~	Length of transition at toe C - B (L2)	Headcut length	Moveable Length
NR60C	8.25	25	195 647	788	263	1389	5497	10 580
NR60D	9.5	30	259 192	907	302	1599	6327	11 230
NR60E	12.5	40	448 216	1193	398	2102	8320	14 480
NR60F	15.75	50	711 167	1503	501	2648	10 480	17 080
NR60SG	20.25	65	1 175 135	1932	644	3404	13 471	20 330
NR60G	23.5	75	1 582 360	2241	747	3950	15 632	22 280
NR60H	31.25	100	2 797 591	2980	993	5251	20 783	30 080

Tabla 14 C.2.1: NR60 Inclined S&C Switch Details. Table 29 - Positioning of Switch Heels. [ASSE16]

Switch designation	Switch curve origin to heel	Heel to toe	Heel angle 1 in N
NR60C	11 129.663	11 430.014	17.564647
NR60D	11 237.949	11 583.654	23.053150
NR60E	14 962.163	15 416.757	29.948284
NR60F	19 867.924	20 440.557	35.787745
NR60SG	27 698.972	28 435.061	42.419327
NR60G	27 446.977	28 301.106	57.647184
NR60G Trans 31.25	31 346.649	32 200.778	50.476757
NR60H	36 514.040	37 648.303	76.613595

El primer tipo de agujas NR60 son aquellas en las que el radio de cambio (switch radius R2) coincide con el radio de cruce (turnout radius R3), estos casos también se recogen en la siguiente tabla en las que estas dos curvas ya no tienen por qué ser iguales.

Tabla 15 Table 30 - NR60 Inclined S&C Standard Circular Curve Turnouts [ASSE16]

Switch Designation	Crossing Angle 1 in ~	Lead (Toe to IP) L2	Centreline switch radius	Centreline turnout radius	Heel length L1	Heel Offset H	Max turnout speed [A] mph. See note 4	Max turnout speed [B] mph. See note 4
NR60C	8.25	23 928	194 930	194 930	11 430	319.82	25	20
NR60D	9.5	27 554	258 475	258 475	11 584	246.74	30	25
NR60E	12.5	36 255	447 498	447 498	15 417	252.80	40	30
NR60F	15.75	45 681	710 450	710 450	20 441	280.58	50	35
NR60SG	20.25	58 732	1 174 417	1 174 417	28 435	329.49	65	40
NR60G	23.5	68 158	1 581 643	1 581 643	28 301	241.06	75	45
NR60H	31.25	90 634	2 796 873	2 796 873	37 648	241.30	100	55

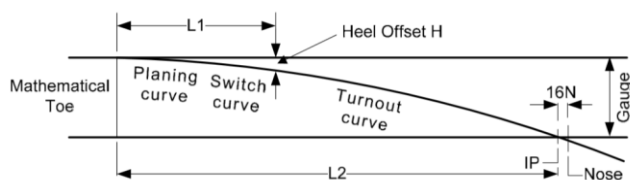


Tabla 16 Table 31 - NR60 Inclined S&C Standard Circular Curve Turnouts [ASSE16]

Switch Designation	Crossing Angle 1 in ~	Lead toe - IP L2	Centreline switch radius	Centreline turnout radius	Heel length L1	Heel Offset H	Max turnout speed [A] mph. See note 4	Max turnout speed [B] mph. See note 4
NR60C	9.5	25 160	194 930	284 822	11 430	319.82	25	
NR60D	8.25	26 004	258 475	185 562	11 584	246.74	25	20
	11	29 264	258 475	372 559	11 584	246.74	30	25
	12.5	30 829	258 475	526 343	11 584	246.74	30	
NR60E	9.5	32 454	447 498	237 267	15 417	252.80	25	
	11	34 424	447 498	330 766	15 417	252.80	30	25
	13.5	37 405	447 498	540 978	15 417	252.80	40	30
	15.75	39 809	447 498	811 082	15 417	252.80	40	35
NR60F	12.5	41 818	710 450	410 903	20 440	280.58	35	30
	13.5	43 061	710 450	490 648	20 440	280.58	40	30
	17.25	47 304	710 450	895 159	20 440	280.58	50	35
NR60SG	17.25	55 540	1 174 417	788 326	28 435	329.49	50	35
	21.5	59 974	1 174 417	1 375 580	28 435	329.49	65	45
	23.5	61 862	1 174 417	1 762 047	28 435	329.49	60	50
NR60G	21.5	65 687	1 581 643	1 282 213	28 301	241.06	65	45
	27	72 202	1 581 643	2 230 155	28 301	241.06	70	50
NR60H	33.5	93 289	2 796 873	3 312 779	37 648	241.30	100	60

En esta última tabla se pueden observar los distintos valores que sirven para dibujar los desvíos NR60, se muestra a continuación uno de ellos como ejemplo. En la siguiente figura se diferencian las distintas partes de este tipo de agujas.

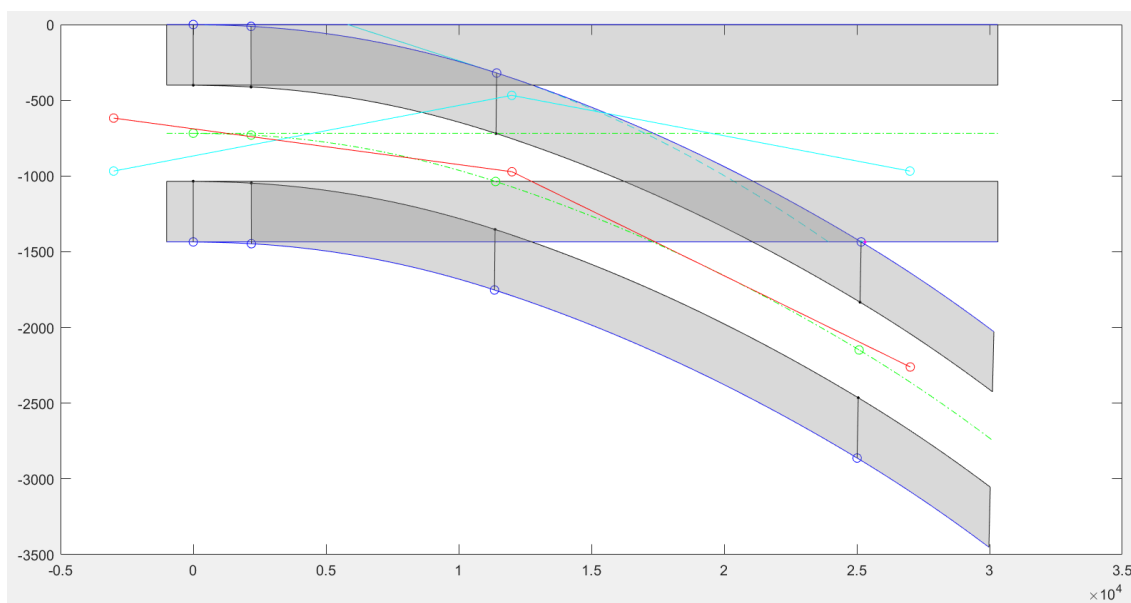


Figura 96 Switchtype = 61, NR60C, crossing 1 in 9,5

Por último, la siguiente tabla muestra los desvíos NR60 que tienen una parte de transición después de la curva de cruce.

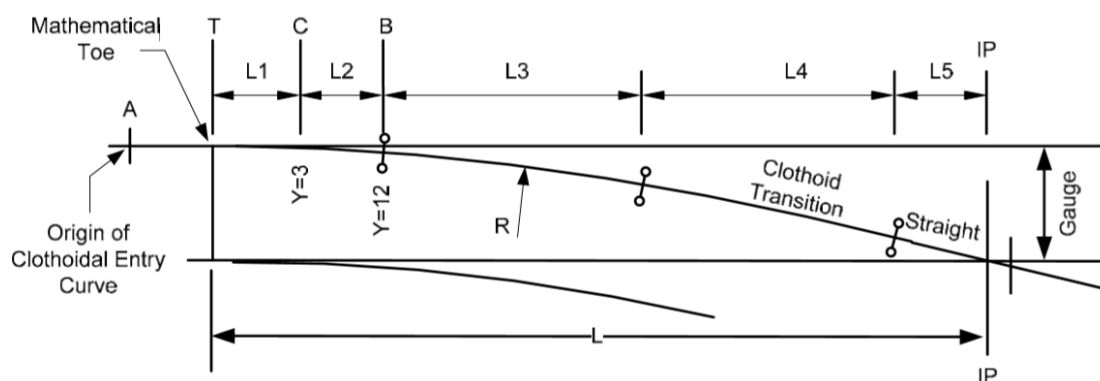


Tabla 17 Table 32 - Transitioned crossovers, across 1970 six foot (running edges) [ASSE16]

Switch Designation	Crossing angle 1 in ~	L3	L4	L5	L	Turnout speed mph
NR60C	11	9253	13 234	662	25 326	25
NR60D	13.5	9078	15 872	2345	29 800	30
NR60E	17.25	12 122	21 997	1492	38 906	40
NR60F	21.5	16 290	26 382	1939	48 761	50
NR60SG	27	23 100	31 618	2054	62 107	60
NR60G	#31.25	26 010	38 550	1384	72 135	70
NR60G	33.5	22 110	39 555	5958	73 814	75

Switch designation	Crossing angle 1 in ~	Turnout lead length L	Lead across 1970 six-foot	Total crossover lead length	Crossover speed mph
NR60C	11	25 326	5808	56 460	25
NR60D	13.5	29 800	7159	66 760	30
NR60E	17.25	38 906	9179	86 991	40
NR60F	21.5	48 761	11 463	108 985	50
NR60SG	27	62 107	14 413	138 627	60
NR60G	#31.25	72 135	16 692	160 961	70
NR60G	33.5	73 814	17 897	165 525	75

En este caso la aguja NR60G 31.25 tiene el talón a 201.085mm del pie de la aguja (toe) y H (heel offset) sería 313.52mm.

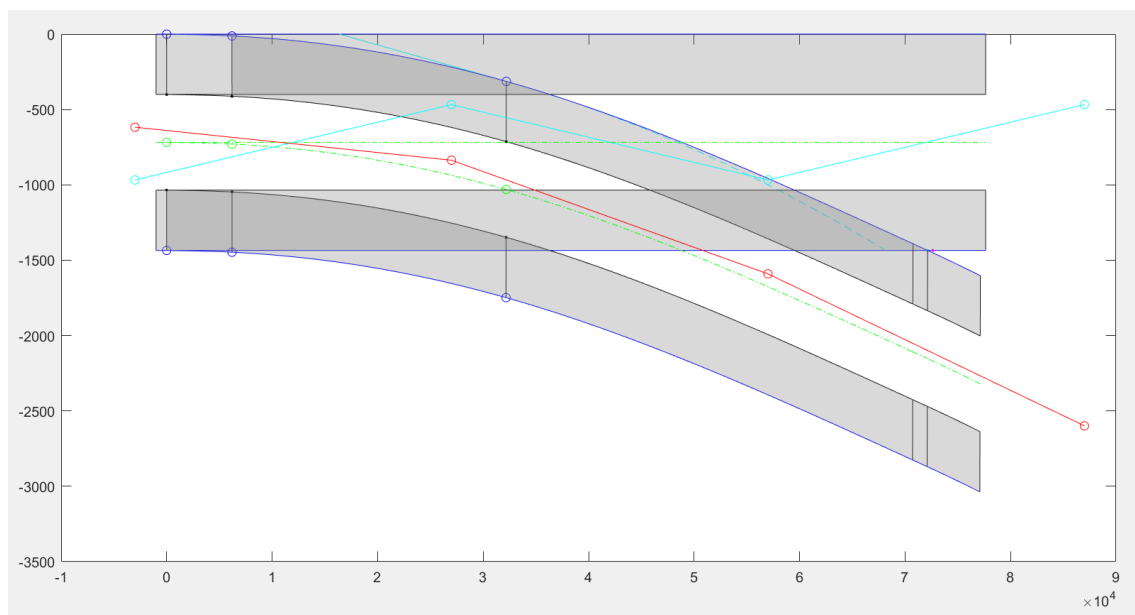


Figura 97 Switchtype = 83, NR60G, crossing 1 in 31,25

6.3 VALIDACIÓN DE RESULTADOS

Ciertas agujas han sido comprobadas con más detalle analizando en profundidad sus planos porque había particularidades.

A continuación, se muestra el plano en detalle de la aguja CEN56E1 desvío circular estándar CV 9,25 de la tabla 2 del Track Design Handbook: NR/L3/TRK/2049/mod03.

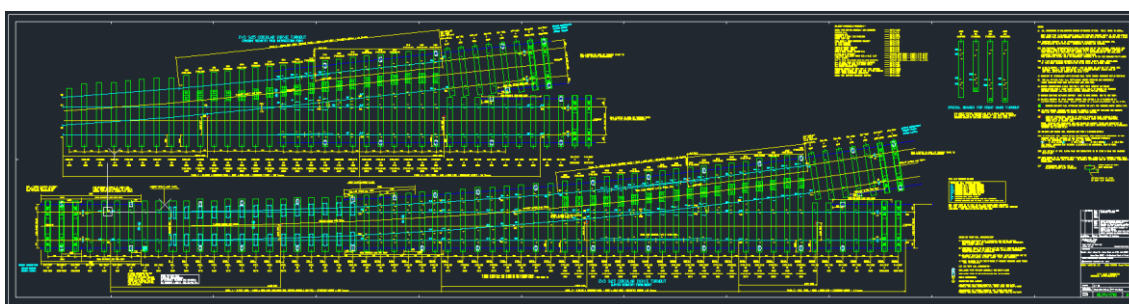


Figura 98 CEN56E1 CVS 9,25 Circular curve turnout

Switch	Crossing 1 in ~	Lead L2. Nose to toe	Planing radius	Switch radius	Turnout radius	Toe to heel L1	Heel H	Max turnout speed [A] mph.	Max turnout speed [B] mph.	N
CV	9,25	25025	287251	245767	245767	11920	373	25		148

Para comprobar el plano se miden las distancias entre los puntos característicos que se muestran en la siguiente figura, en estos cambia el radio de la curva.

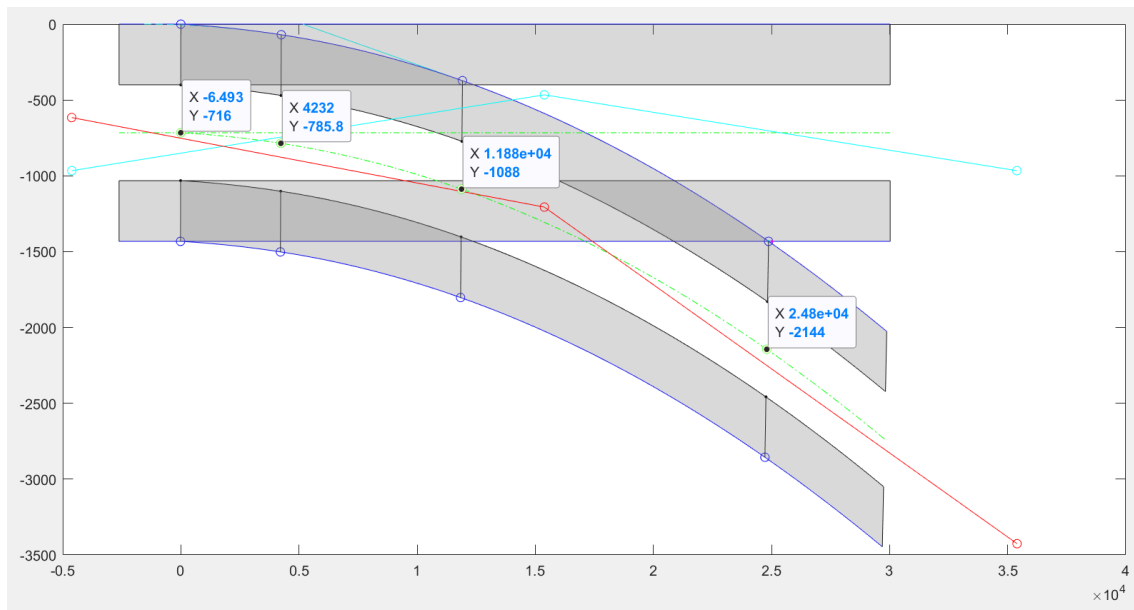


Figura 99 Switchtype = 14, CEN56E1 CV, crossing 1 in 9,25

distancia1 = 4.2394e+03 mm

distancia2 = 7.6542e+03 mm

distancia3 = 1.2962e+04 mm

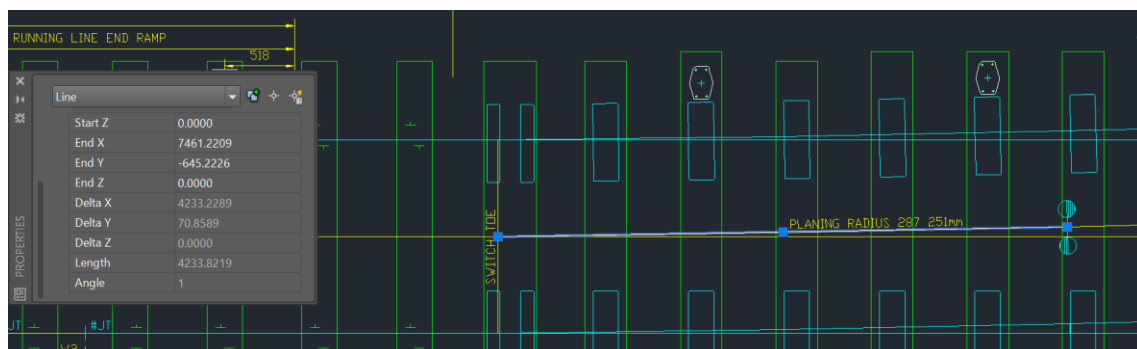


Figura 100 CEN56E1 CVS 9,25 Circular curve turnout. Planing radius 287251 mm.

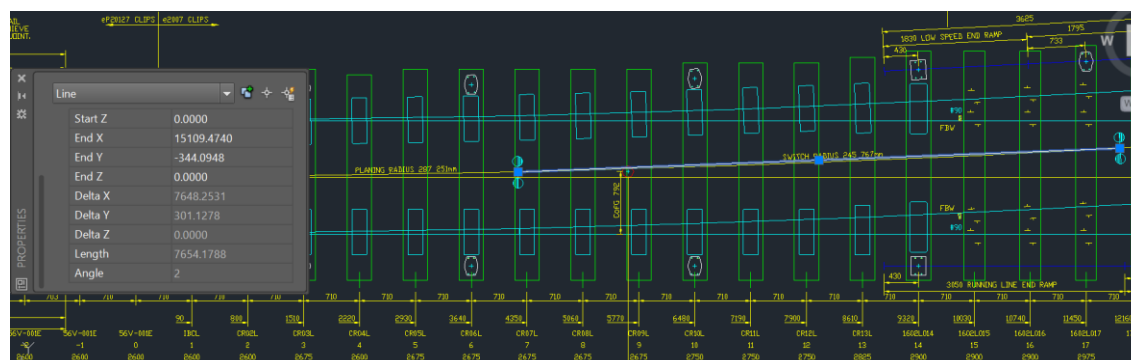


Figura 101 CEN56E1 CVS 9,25 Circular curve turnout. Switch radius 245767 mm.

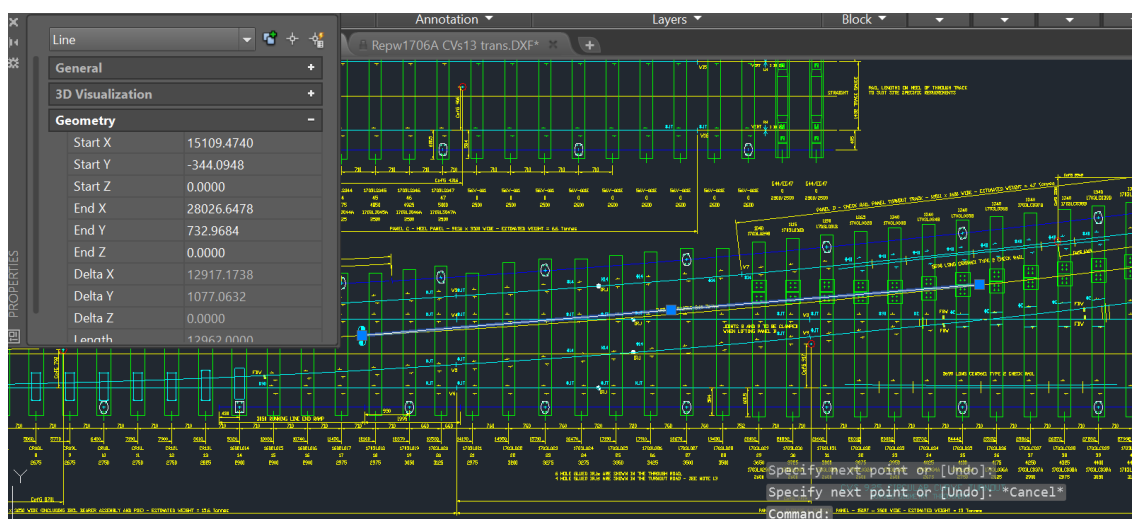


Figura 102 CEN56E1 CVS 9,25 Circular curve turnout. Turnout radius 245767 mm.

Como se ha podido comprobar las dimensiones del plano coinciden con las de Matlab en el caso de la aguja CEN56E1 CV, crossing 1 in 9,25.

Ahora se muestra el plano en detalle de la aguja CEN56E1 desvío de transición CV 13 de la tabla 4 del Track Design Handbook: NR/L3/TRK/2049/mod03.

Tabla 18 Aguja CEN56E1 desvío de transición CV 13 de la tabla 4

Switch	Crossing 1 in ~		Lead lengths			Switch radius	Turnout radius	Length of transition	Length of straight to nose	Turnout speed (mph)
	Natural	Actual	Toe to nose L2	Nose to nose across	Toe to toe across a					

				a 1970 interval	1970 interval					
CV	9,25	13	27007	6513	60526	245767	245767	13000	3271	25

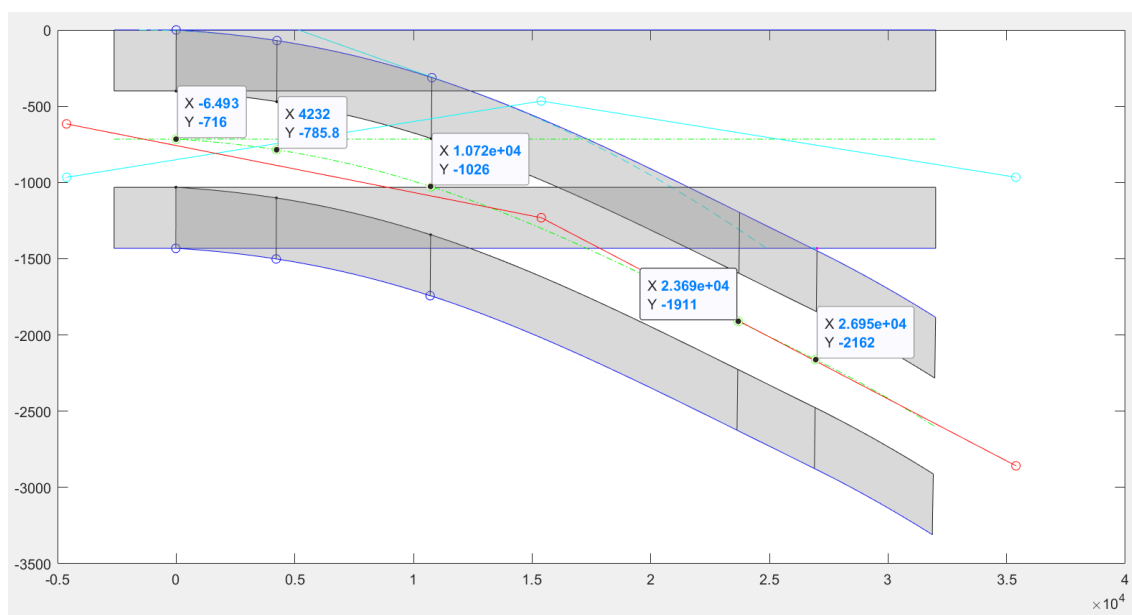


Figura 103 Switchtype = 49, CEN56E1 CV, crossing 1 in 13

distancia1 = 4.2394e+03 mm

distancia3 = 6.5116e+03 mm

distancia4 = 1.2981e+04 mm

distancia5 = 3.2710e+03 mm

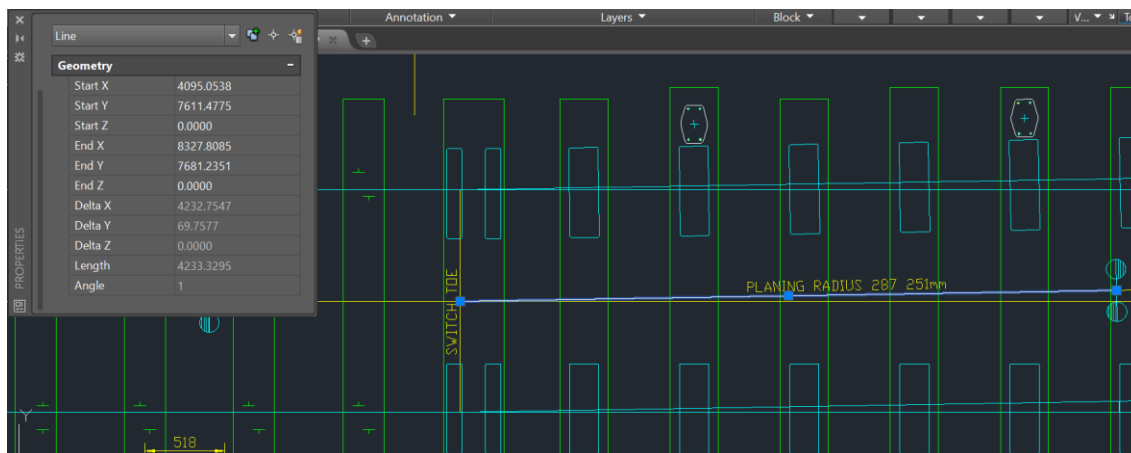


Figura 104 CEN56E1 CVS 13 Transition Turnout. Planing radius 287251 mm.

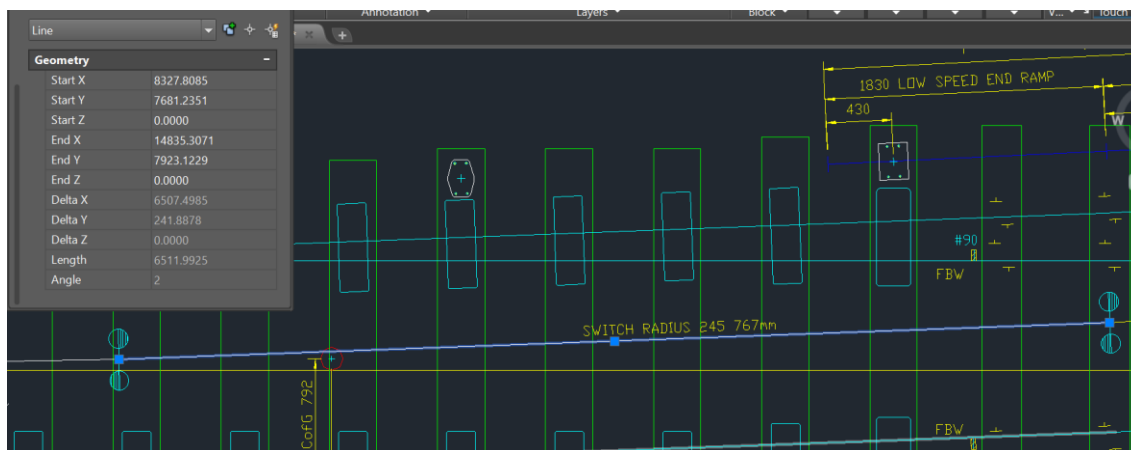


Figura 105 CEN56E1 CVS 13 Transition Turnout. Switch radius 245767 mm.

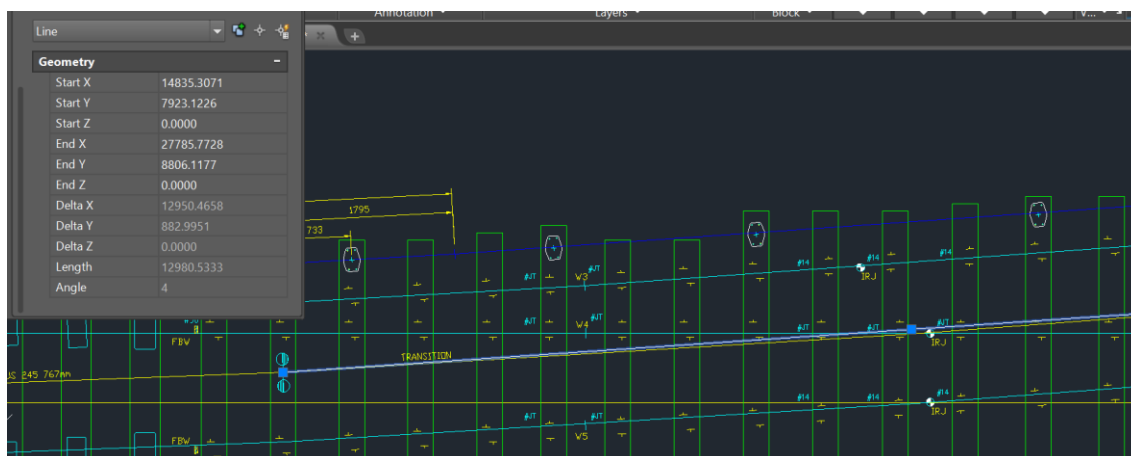


Figura 106 CEN56E1 CVS 13 Transition Turnout. Transition length 13000 mm.

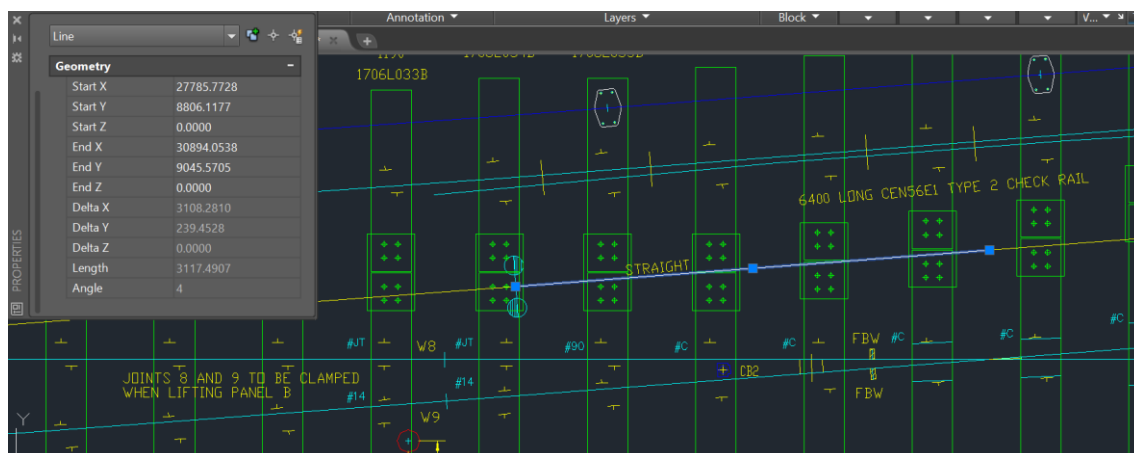


Figura 107 CEN56E1 CVS 13 Transition Turnout. Straight length 3271 mm.

En el caso de la aguja CEN56E1 desvío circular estándar DV 10,75 de la tabla 2 del Track Design Handbook: NR/L3/TRK/2049/mod03.

Tabla 19 Aguja CEN56E1 desvío circular estándar DV 10,75 de la tabla 2

Switch	Crossing 1 in ~	Lead L2. Nose to toe	Planing radius	Switch radius	Turnout radius	Toe to heel L1	Heel H	Max turnout speed [A] mph.	Max turnout speed [B] mph.	N
DV	10,75	29346	367038	331687	331687	12440	298	30	25	172

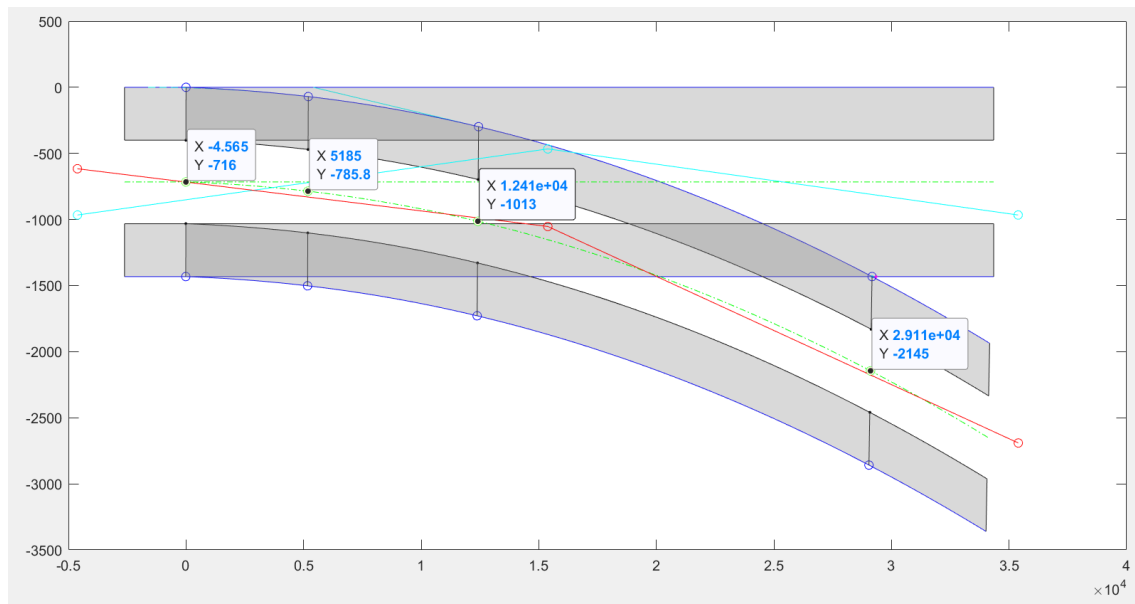


Figura 108 Switchtype = 21, CEN56E1 DV, crossing 1 in 10,75

distancia1 = 5.1898e+03

distancia2 = 7.2285e+03

distancia3 = 1.6736e+04

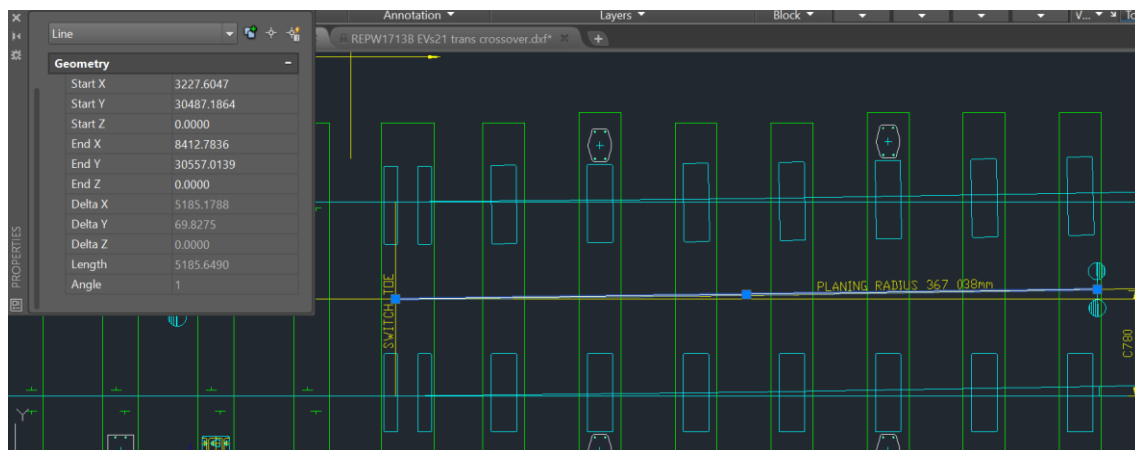


Figura 109 CEN56E1 DVS 10,75 Circular curve turnout. Planing radius 367038 mm.

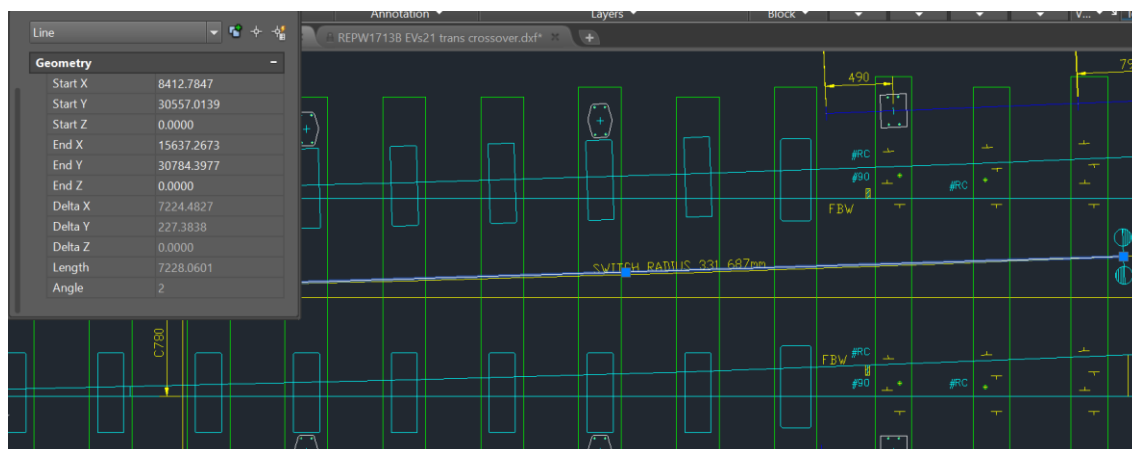


Figura 110 CEN56E1 DVS 10,75 Circular curve turnout. Switch radius 331687 mm.

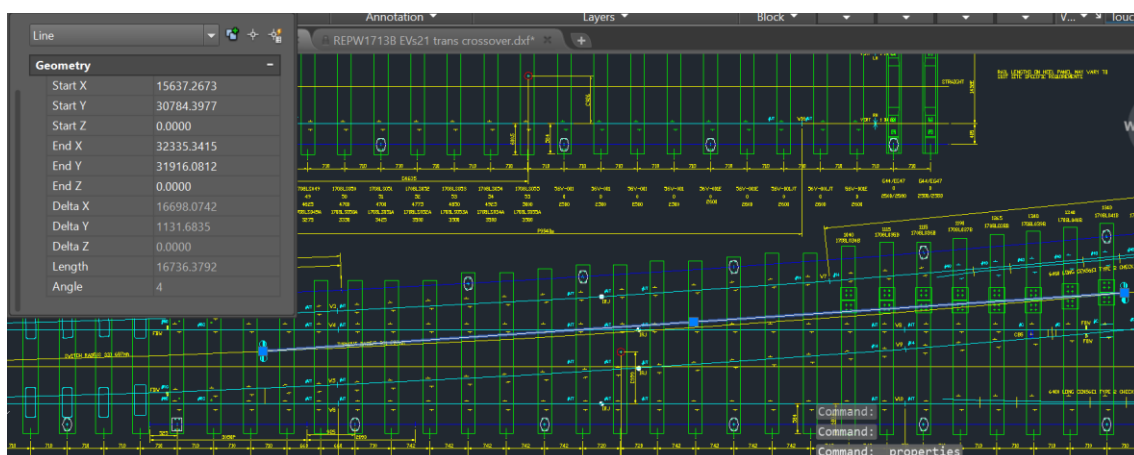


Figura 111 CEN56E1 DVS 10,75 Circular curve turnout. Turnout radius 331687 mm.

Para el caso de la aguja CEN56E1 desvío de transición EV 21 de la tabla 4 del Track Design Handbook: NR/L3/TRK/2049/mod03.

Tabla 20 Aguja CEN56E1 desvío de transición EV 21 de la tabla 4

Switch	Crossing 1 in ~		Lead lengths			Switch radius	Turnout radius	Length of transition	Length of straight to nose	Turnout speed (mph)
	Natural	Actual	Toe to nose L2	Nose to nose across a 1970 interval	Toe to toe across a 1970 interval					
EV	15	21	44066	10585	98718	645116	645116	24555	3605	40

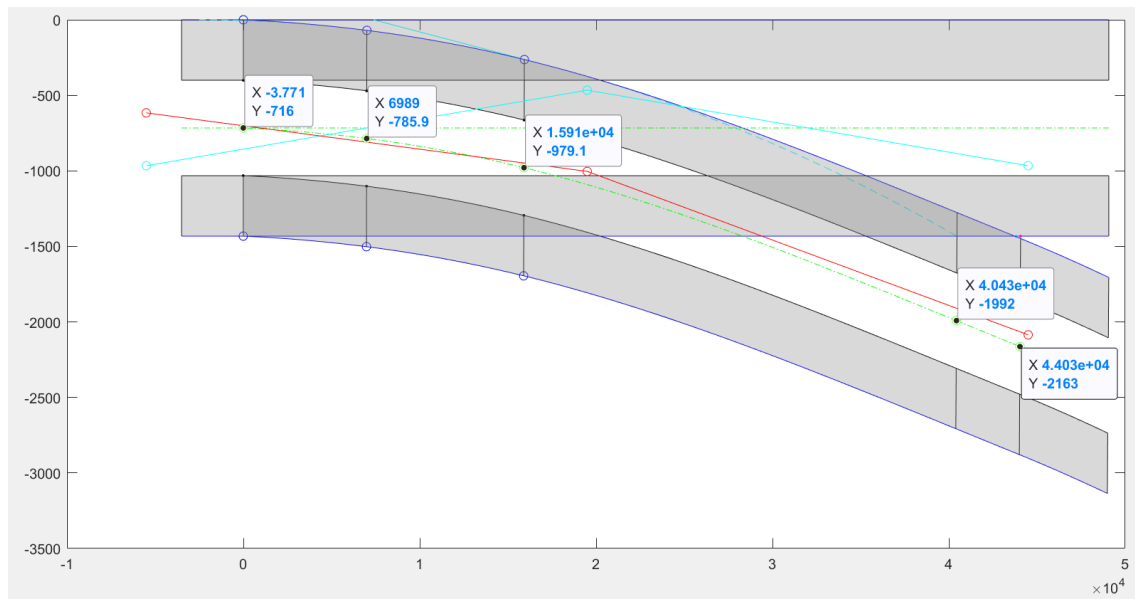


Figura 112 Switchtype = 53, CEN56E1 EV, crossing 1 in 21

distancia1 = 6.9932×10^3

distancia3 = 8.9235×10^3

distancia4 = 2.4541×10^4

distancia5 = 3.6050×10^3

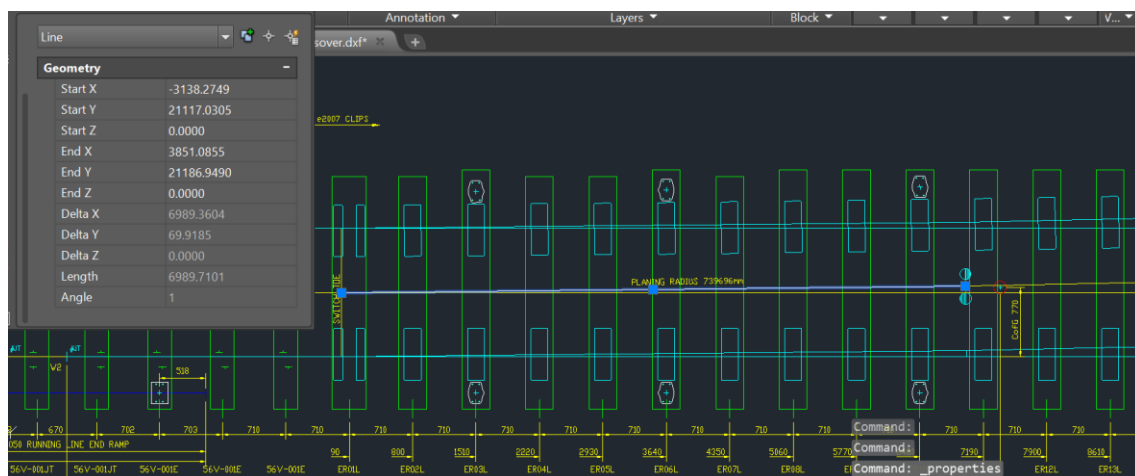


Figura 113 CEN56E1 EVS 21 Transitioned Crossover. Planing radius 739696 mm.

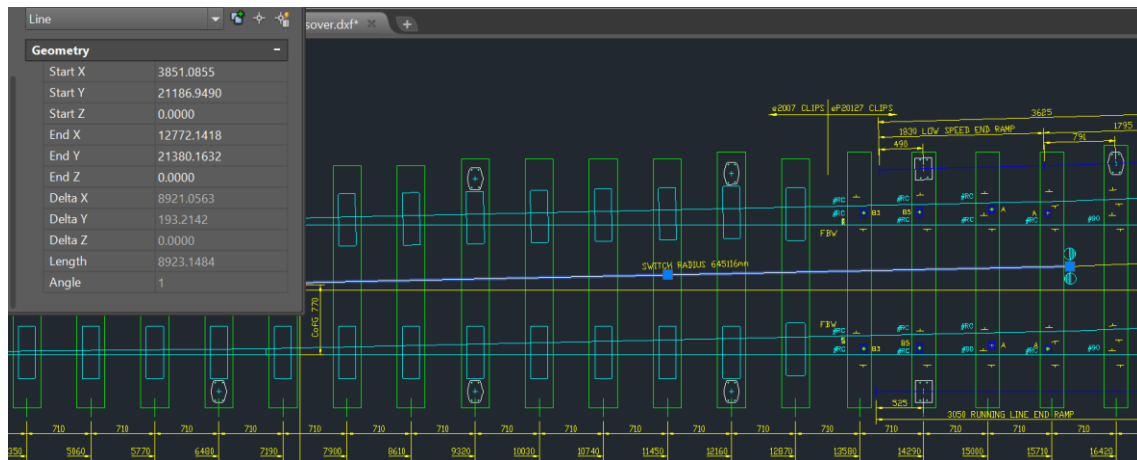


Figura 114 CEN56E1 EVS 21 Transitioned Crossover. Switch radius 645116 mm.

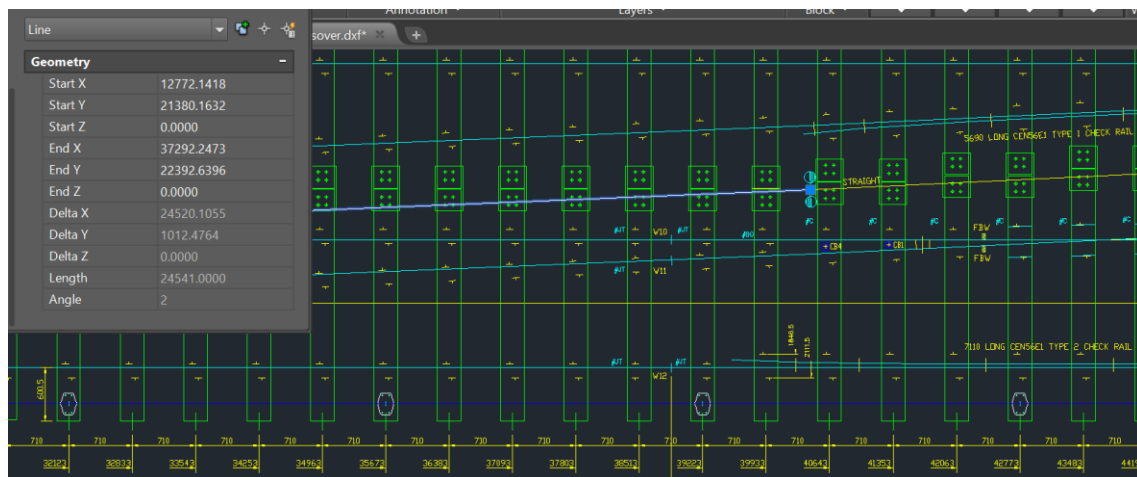


Figura 115 CEN56E1 EVS 21 Transitioned Crossover. Length of transition 24555 mm.

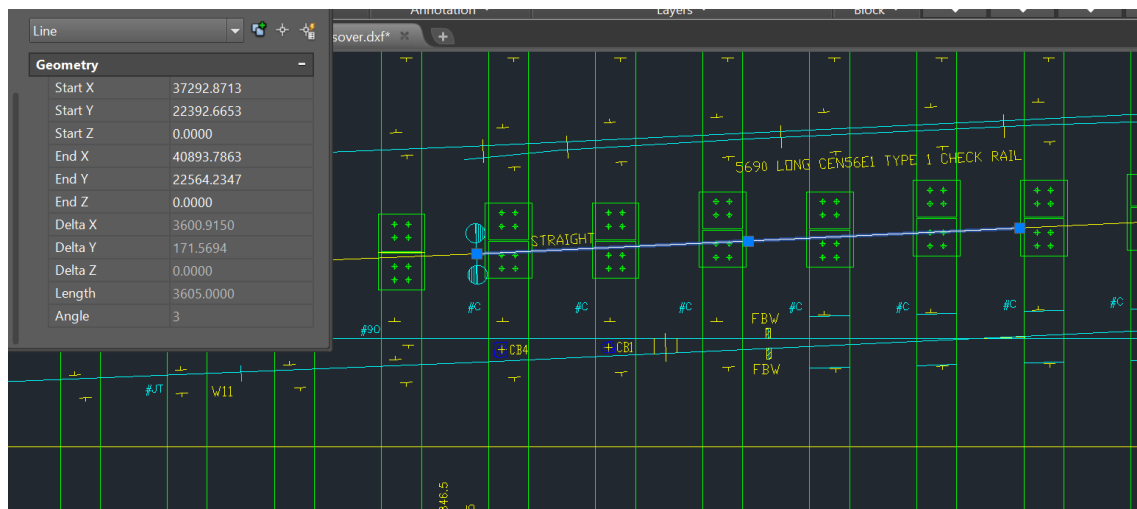


Figura 116 CEN56E1 EVS 21 Transitioned Crossover. Length of straight 3605 mm.

7 CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

En este último capítulo se indicarán las conclusiones obtenidas del proyecto, las aportaciones al trabajo de fin de máster en el ámbito indicado, así como futuros desarrollos posibles. También se analiza el análisis económico de este trabajo.

7.1 CONCLUSIONES

En este trabajo se cumplen los objetivos indicados al inicio. Se ha conseguido desarrollar una herramienta desde cero con Matlab que ayude en el diseño de la línea aérea de contacto en la zona de las agujas ferroviarias.

Esta herramienta permite diseñar la línea aérea de contacto adecuadamente, sólo hay que indicar en el programa la distancia del vano y el descentramiento que se quiere tener en la vía directa y en la desviada.

Esta herramienta desarrollada es extrapolable a otro tipo de geometrías, por lo tanto, se podría seguir desarrollando para que sirviera para el diseño de la catenaria de otras zonas de la vía más complejas.

Esta herramienta permite que se diseñe la catenaria en las agujas ferroviarias, donde anteriormente los softwares existentes no lo permitían.

Las agujas que se grafican en este trabajo están basadas en casos reales, sacadas de la norma inglesa, del Track Design Handbook. Se han validado los resultados obtenidos con los datos de la geometría real, a partir de los planos correspondientes midiéndolos en Autocad.

A continuación, se muestra la gráfica de una de las agujas. Como se puede ver en la figura, la herramienta indica la forma en la que habría que diseñar la línea aérea de contacto. La zona gris clara es la zona libre de obstáculos, en esta no pueden encontrarse nunca los hilos de contacto.

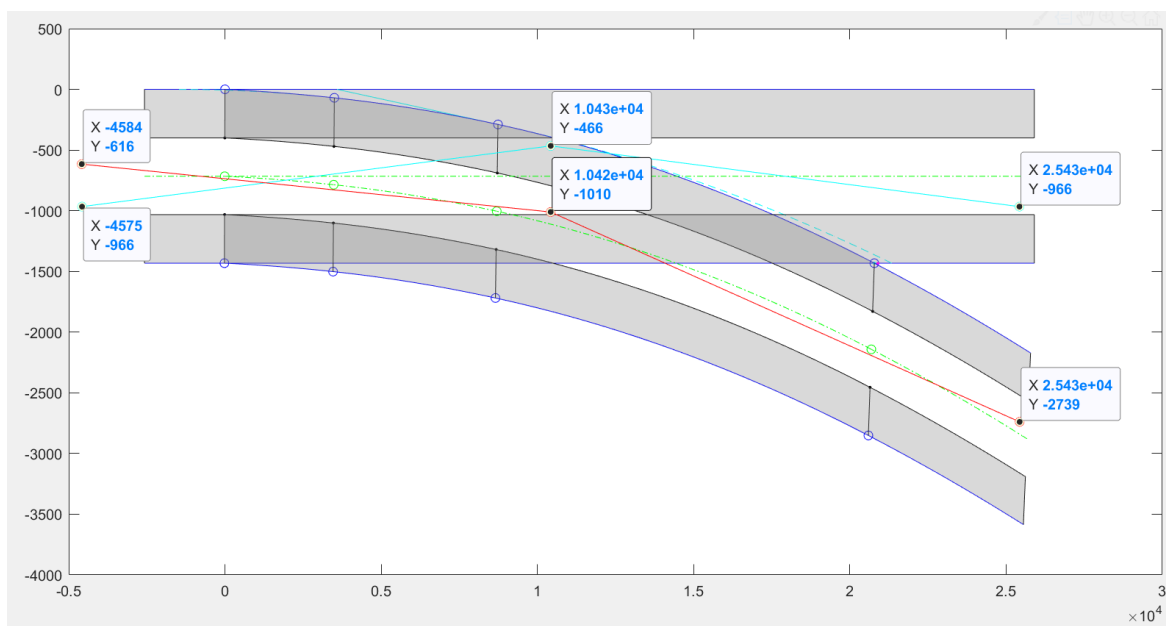


Figura 117 Switchtype = 8, CEN56E1 BV, crossing 1 in 7,5

7.1.1 ANÁLISIS ECONÓMICO

Para desarrollar esta herramienta se ha utilizado Matlab porque es necesario para realizar las gráficas correspondientes a los desvíos. Matlab es una herramienta muy potente y fiable para trabajos de ingeniería.

En este caso se cuenta con una licencia de estudiante. Los precios de Matlab de la última versión del software son los indicados a continuación.

MATLAB Product Family	Price
MATLAB and Simulink Student Suite Includes MATLAB, Simulink, Control System Toolbox, Curve Fitting Toolbox, DSP System Toolbox, Image Processing Toolbox, Instrument Control Toolbox, Optimization Toolbox, Parallel Computing Toolbox, Signal Processing Toolbox, Statistics and Machine Learning Toolbox, Symbolic Math Toolbox	EUR 69,00
MATLAB	EUR 35,00
Parallel Computing	
Parallel Computing Toolbox	EUR 20,00
Math and Optimization	
Statistics and Machine Learning Toolbox	EUR 20,00
Curve Fitting Toolbox	EUR 20,00
Optimization Toolbox	EUR 20,00
 Global Optimization Toolbox	EUR 20,00
Symbolic Math Toolbox	EUR 20,00
Mapping Toolbox	EUR 20,00
Partial Differential Equation Toolbox	EUR 20,00

Figura 118 Precios Matlab licencia estudiante

7.2 FUTUROS DESARROLLOS

Para mejorar esta herramienta gráfica se podría modificar el programa para que cuando la vía directa sea curva en vez de recta, se pueda dibujar la aguja y diseñar así la línea aérea de contacto. Para este caso existe una fórmula que modifica los radios de las curvas del desvío cuando la vía directa está en curva.

En este caso el programa se centra en la norma inglesa, en el Track Design Handbook: NR/L3/TRK/2049/mod03, y dibuja todos los desvíos que se encuentran en esta, como posterior desarrollo se podrían incluir los desvíos de otras normas como la española, porque se basan en las mismas propiedades.

Otro desarrollo pendiente sería que la herramienta también dibujara geometrías más complejas como travesías dobles, cruzamientos con más de una vía, diagonal, bretelle, escape, haz, etc.

Por último, también se podría considerar qué ocurre en las zonas adyacentes a las agujas, cómo se diseña aquí la catenaria.

8 BIBLIOGRAFÍA

- [BARR20] Javier Barrio Pérez, “El ferrocarril en la revolución industrial”. Abril 2020.
- [GONZ10] Francisco Javier González Fernández, “Ingeniería ferroviaria”, Segunda edición actualizada y ampliada, Editorial UNED. Enero de 2010.
- [KIES08] Kiessling / Puschmann / Schmieder / Vega, “Líneas de contacto para ferrocarriles electrificados – Planificación Diseño Instalación Mantenimiento”, Siemens AG Erlangen. 2008.
- [KEEN18] Gary Keenor CEng MIET, “Overhead Line Electrification for Railways”, 5th Edition. 2018.
- [RIBE17] Ignacio de Ribera, “LA INGENIERIA FERROVIARIA DESDE FINALES DEL SIGLO XVIII AL PRIMER TERCIO DEL SIGLO XX”, Foro ICAI Tren. Madrid 15 de febrero de 2017.
- [ONU15] ONU, “Objetivos de desarrollo sostenible”. Año 2015.
- [ADIF18] Adif, “Informe de Sostenibilidad 2018”. Año 2018.
- [ADIF08] Adif, “Conceptos básicos ferroviarios”, Convocatoria de factor de circulación de entrada. Oferta pública de empleo 2007-2008.
- [MASQ15] Más que ingeniería, “Aparatos de vía: Los desvíos ferroviarios”, Ferrocarriles. Noviembre 2015
- [JIME13] Cristian Jiménez Fernández, director: Luis Lezáun Martínez de Ubago, “Estudio de la evolución de los desvíos ferroviarios”. Septiembre 2013.
- [ADIF92] ADIF. NAV 3-6-0.1. “Desvíos - Características de los tipos y modelos”, 1ª edición. Julio de 1992.
- [NORT__] North American Rail Products, “GLOSSARY OF TERMS”.
- [MINE__] MI-NE SEISAKU-SHO CO., LTD., “Railway turnouts and rail products”.
- [WIKI19] DCC Wiki, “Wiring turnouts”. Octubre 2019.
- [WIKI13] DCC Wiki, “Crossing”. Junio 2013.
- [JTCU15] Jtcurses, “Travesía”, Ferropedia. Mayo 2015.
- [WIKI08] Wikipedia, “Desvío ferrocarril”. Marzo 2008.

- [PALS14] BJÖRN A. PÅLSSON, “Optimisation of Railway Switches and Crossings”, Department of Applied Mechanics, CHALMERS UNIVERSITY OF TECHNOLOGY. Göteborg, Sweden 2014.
- [AGIC17] The Agico Group, “What Is A Railway Switch?”. Febrero 2017.
- [JUAN15] Alberto de Juan, “Conociendo a fondo el cambio de agujas”, Trenvista. Mayo 2015.
- [OGRA11] James O’Grady, “Permanent Way Component Identification”, Network Rail. Noviembre 2011.
- [MONT02] Jesús Montesinos Ortuño, Manuel Carmona Suárez, “Tecnología de catenaria”. Febrero 2002.
- [VADE_] VADEMECUM REMER, “Catálogo de protección civil”
- [ADIF01] Adif, “NORMA DE EJECUCIÓN, MONTAJE DE AGUJAS AÉREAS (CATENARIA 300 V CC)”, Renfe. UN Mantenimiento de Infraestructura. Dirección Técnica. Junio de 2001.
- [MATH16] Network Rail, Mathematics, Track Design Handbook: NR/L3/TRK/2049/mod02. Marzo 2016
- [ASSE16] Network Rail, Assembly, Track Design Handbook: NR/L3/TRK/2049/mod03. Marzo 2016
- [SYST16] Network Rail, System Interfaces, NR/L3/TRK/2049/MOD05. Septiembre 2017.
- [BLAN13] Luís Blanch, Emilio Checa, Josefa Marín, “Una aproximación a la curva de transición Clotoide vista desde Mathematica”, Modelling in Science Education and Learning. 2013.

ANEXO I CÓDIGO EN MATLAB

Código en Matlab

El siguiente código dibuja las agujas con la zona libre de obstáculos y así se puede diseñar la línea aérea de contacto.

```
% Agujas Lara
% Esta función representa gráficamente una aguja

close all
clear all

%% Datos de Entrada

switchtype = 1; % Tipo de desvío:
% Agujas CEN56E1 - tabla 1: del 0 al 43, tabla 2: del 44 al 60
% Agujas NR60 - tabla 31: del 61 al 77, tabla 32: del 78 al 84

[datos] = lectura_datos_agujas( switchtype );

%% Cálculos geometría vía

[aguja] = aguja_calculos( switchtype, datos );

% comprobar_distancia = sqrt((aguja.x6_ini-aguja.x6_ini_p).^2+(aguja.y6_ini-
aguja.y6_ini_p).^2)
% comprobar_distancia = sqrt((aguja.x3_fin-aguja.x3_fin_p).^2+(aguja.y3_fin-
aguja.y3_fin_p).^2)

%% Cálculos línea aérea de contacto

vano = 15*10^3; %mm
descentramiento_r = 250; %mm
descentramiento_d = 100;

x_poste_ini_r = aguja.x1_ini -datos.T+datos.pktoe*(10^3) - datos.limite_ini -
2000;
x_poste_fin_r = aguja.x6_fin + 2000;

x_poste_ini_d = aguja.x1_ini_ep -datos.T+datos.pktoe*(10^3) - datos.limite_ini -
2000;
x_poste_fin_d = aguja.x6_fin_ep + 2000;

[OLE] = OLE_calculos(descentramiento_r,descentramiento_d,vano,aguja,...
datos,x_poste_ini_r,x_poste_fin_r,x_poste_ini_d,x_poste_fin_d,switchtype);
```

```
% % Introducir los valores a mano

% % Vía directa
% x_postelr = aguja.x1_ini - 5000;
% x_poste2r = aguja.x6_fin;
%
% OLE.x_r1 = x_postelr;
% OLE.y_r1 = -datos.gauge/2 - descentramiento_r;
% OLE.x_r2 = (x_poste2r - x_postelr)*(1/3);
% OLE.y_r2 = -datos.gauge/2 + descentramiento_r;
% OLE.x_r3 = (x_poste2r - x_postelr)*(2/3);
% OLE.y_r3 = -datos.gauge/2 - descentramiento_r;
% OLE.x_r4 = x_poste2r;
% OLE.y_r4 = -datos.gauge/2 + descentramiento_r;
%
% % Vía desviada
% x_posteld = aguja.x1_ini_ep - 5000;
% y_posteld = aguja.y1_ini_ep;
% x_poste2d = aguja.x6_fin_ep;
% y_poste2d = aguja.y6_fin_ep;
%
% OLE.x_d1 = x_posteld + descentramiento_d*sind(datos.crossingangled);
% OLE.y_d1 = y_posteld + descentramiento_d*cosd(datos.crossingangled);
% OLE.x_d2 = (x_poste2d - x_posteld)*(1/3) -
descentramiento_d*sind(datos.crossingangled);
% OLE.y_d2 = -OLE.Poste_d2*tand(datos.crossingangled) -
descentramiento_d*cosd(datos.crossingangled);
% OLE.x_d3 = (x_poste2d - x_posteld)*(2/3) +
descentramiento_d*sind(datos.crossingangled);
% OLE.y_d3 = -OLE.Poste_d3*tand(datos.crossingangled) +
descentramiento_d*cosd(datos.crossingangled);
% OLE.x_d4 = x_poste2d - descentramiento_d*sind(datos.crossingangled);
% OLE.y_d4 = -OLE.Poste_d4*tand(datos.crossingangled) -
descentramiento_d*cosd(datos.crossingangled);

%% Representación gráfica

aguja_graficas(switchtype,datos,aguja,OLE);

function [datos] = lectura_datos_agujas( switchtype )
%% Datos de entrada
% swithtype, variable tipo char que contiene el nombre del tipo de agujas

%% Datos de salida
% gauge = Distancia entre las vías, viene en mm.
```

```
% L1 = longitud desde el toe al heel en el eje x
% L2 = longitud desde el toe hasta IP en el eje x
% H = longitud en el eje y del carril a el punto tangente a la curva R2 con
% ángulo heel angle
% R1 = radio de la curva de planning
% R2 = radio de la curva switch
% P = distancia del toe a el punto de intersección entre las curvas R1 y R2
% entryangle = ángulo que forma el carril con la tangente a la curva R1 en
% el toe
% heelangle = ángulo que forma la curva R2 con la tangente en el punto de
% longitud H
% T = longitud desde el punto donde la curva R2 es tangente a el origen de
% coordenadas o toe
% hv = si es 3000 la aguja es de tipo HV, si no es 0

% Datos extra para la tabla 2
% L2 = longitud desde el toe hasta (IP+16N) en el eje x
% R3 = Turnout radius
% crossingangle = ángulo que forma la curva R3, su tangente en el punto L2-IP
% con el rail

%% Calculos

datos1 = xlsread('datos.xlsx','C4:M13');
datos2 = xlsread('datos.xlsx','C18:X60');
datos3 = xlsread('datos.xlsx','C66:X82');
datos4 = xlsread('datos.xlsx','C87:T103');
datos5 = xlsread('datos.xlsx','C108:W114');

%% Asignación variables de salida

datos.pktoe = 0; % Este es el punto kilométrico del toe, viene dado en metros.
datos.desviacion_max = 400; % Zona libre de obstáculos mm.
datos.limite_fin = 5000;
datos.limite_ini = 1000;

% Tipo de aguja/ Crossing angle/ switchtype
% Tipo  Cros  switchtype
% AV    6      1
%       6.5    2
%       7      3*
%       7.5    4
%       8      5
%       9.25   6
% BV    7      7
%       7.5    8
%       8      9*
%       9.25   10
%       10     11
%       10.75  12
% CV    8      13
```

```
%      9.25      14*
%      10        15
%      STR 10    16
%      10.75     17
%      13        18
% DV     9.25     19
%      10        20
%      10.75     21*
%      13        22
%      STR 13    23
%      15        24
% EV     13       25
%      15        26*
%      16        27
%      18.5      28
%      21        29
% FV     16       30
%      18.5      31*
%      21        32
%      24        33
% SGV    18.5     34
%      21        35*
%      24        36
%      28        37
% GV     21       38
%      24        39*
%      28        40
%      32.365    41
% HV     28       42
%      32.365    43*

% En el caso de agujas de la tabla 1
% tipo1: AV=1, AVT=2, BV=3, CV=4, DV=5, EV=6, FV=7, SGV=8, GV=9, HV=10

% Si queremos representar la tabla 1 hay que poner el tipo 2 así:
% switchtype: AV=3, AVT=0*, BV=9, CV=14, DV=21, EV=26, FV=31, SGV=35, GV=39,
% HV=43
% *Este caso solo existe en agujas de la tabla 1, no de la tabla 2, AVT=0

% En el caso de las agujas de la tabla 4, switchtype es el siguiente:
% Tipo  Cros nat      Cros act      switchtype
% AV     7            9,25          44
% BV     8            9,25          45
%      8            10            46
%      8            10,75         47
% CV     9,25         10,75         48
%      9,25         13            49
% DV     10,75        13            50
%      10,75        15            51
% EV     15           18,5          52
%      15           21            53
% FV     18,5         24            54
```

```
%      21      28      55
% SGV   21      28      56
% GV    24      28      57
%      24      28      58
%      24      32,365    59
% HV    32,365    45,75    60

if (switchtype >= 0) & (switchtype <= 60)
    datos.gauge = 1432;
elseif (switchtype > 60) & (switchtype <= 84)
    datos.gauge = 1435;
end

if (switchtype == 0)

    tipol = 2;

    datos.P = datos1(tipol,3);
    datos.R1 = datos1(tipol,4);
    datos.R2 = datos1(tipol,5);
    datos.R3 = datos.R2;
    datos.T = datos1(tipol,6);
    datos.L2 = datos1(tipol,7);
    datos.H = datos1(tipol,8);
    datos.L1 = datos1(tipol,9);
    datos.heelangle = datos1(tipol,10);
    datos.entryangle = datos1(tipol,11);
    datos.naturalangle = datos1(tipol,1); %natural angle
    datos.crossingangle = datos.naturalangle;

    datos.N = 0;
    datos.str = 0;

    %Datos que no hacen falta en este caso
    %datos.nose_nose = 0;
    %datos.toe_toe = 0;
    datos.transition = 0;

    datos.TC = 0;
    datos.CB = 0;
    datos.L3 = 0;
    datos.L4 = 0;
    datos.L5 = 0;

elseif (switchtype > 0) & (switchtype <= 43)

    datos.crossingangle = datos2(switchtype,1);
    datos.L2 = datos2(switchtype,2);
    datos.R3 = datos2(switchtype,5);
    datos.N = datos2(switchtype,10);
```

```
datos.str = datos2(switchtype,11);

datos.naturalangle = datos2(switchtype,12);
datos.P = datos2(switchtype,14);
datos.R1 = datos2(switchtype,15);
datos.R2 = datos2(switchtype,16);
datos.T = datos2(switchtype,17);
datos.H = datos2(switchtype,19);
datos.L1 = datos2(switchtype,20);
datos.heelangle = datos2(switchtype,21);
datos.entryangle = datos2(switchtype,22);

%Datos que no hacen falta en este caso
%datos.nose_nose = 0;
%datos.toe_toe = 0;
datos.transition = 0;

datos.TC = 0;
datos.CB = 0;
datos.L3 = 0;
datos.L4 = 0;
datos.L5 = 0;

elseif (switchtype > 43) & (switchtype <= 60)

    tipo3 = switchtype - 43;

    datos.naturalangle = datos3(tipo3,1); %natural crossing angle
    datos.crossingangle = datos3(tipo3,2); %actual crossing angle
    datos.L2 = datos3(tipo3,3);
    %datos.nose_nose = datos3(tipo3,4);
    %datos.toe_toe = datos3(tipo3,5);
    datos.R3 = datos3(tipo3,7);
    datos.transition = datos3(tipo3,8);
    datos.str = datos3(tipo3,9);
    datos.N = datos3(tipo3,11);

    datos.P = datos3(tipo3,14);
    datos.R1 = datos3(tipo3,15);
    datos.R2 = datos3(tipo3,16);
    datos.T = datos3(tipo3,17);
    datos.H = datos3(tipo3,19);
    datos.L1 = datos3(tipo3,20);
    datos.heelangle = datos3(tipo3,21);
    datos.entryangle = datos3(tipo3,22);

    datos.TC = 0;
    datos.CB = 0;
    datos.L3 = 0;
    datos.L4 = 0;
    datos.L5 = 0;

elseif (switchtype > 60) & (switchtype <= 77)
```

```
% Aguja NR60
tipo4 = switchtype - 60;

datos.TC = datos4(tipo4,13);
datos.CB = datos4(tipo4,15);

datos.crossingangle = datos4(tipo4,1);
datos.N = datos4(tipo4,9);
datos.L2 = datos4(tipo4,2) + datos.N;
datos.R2 = datos4(tipo4,12);
datos.R3 = datos4(tipo4,4) + datos.gauge/2;

datos.naturalangle = datos4(tipo4,10);
datos.H = datos4(tipo4,6);
datos.L1 = datos4(tipo4,5);
datos.heelangle = datos4(tipo4,18);
datos.entryangle = datos4(tipo4,14);

%Datos que no hacen falta en este caso
%datos.nose_nose = 0;
%datos.toe_toe = 0;
datos.transition = 0;
datos.T = 0;
datos.R1 = 0;
datos.P = 0;
datos.str = 0;
datos.L3 = 0;
datos.L4 = 0;
datos.L5 = 0;

elseif (switchtype > 77) & (switchtype <= 84)

    % Aguja NR60 - Transition
    tipo5 = switchtype - 77;

    datos.naturalangle = datos5(tipo5,13); %natural crossing angle
    datos.crossingangle = datos5(tipo5,1); %actual crossing angle
    datos.N = datos5(tipo5,9);
    datos.L2 = datos5(tipo5,2) + datos.N;
    datos.R2 = datos5(tipo5,15);
    datos.R3 = datos.R2;
    datos.H = datos5(tipo5,21);
    datos.heelangle = datos5(tipo5,12);
    datos.entryangle = datos5(tipo5,17);
    datos.TC = datos5(tipo5,16);
    datos.CB = datos5(tipo5,18);

    datos.L3 = datos5(tipo5,6);
    datos.L4 = datos5(tipo5,7);
    datos.L5 = datos5(tipo5,8);

    datos.L1 = datos.TC + datos.CB + datos.L3;
```

```

    datos.transition = (angulo_xing_a_grados(datos.crossingangle) - ...
        angulo_xing_a_grados(datos.heelangle)) * (pi*datos.R3/90);
    datos.str = datos.L5/cosd(angulo_xing_a_grados(datos.crossingangle));

    %Datos que no hacen falta en este caso
    datos.P = 0;
    %datos.nose_nose = 0;
    %datos.toe_toe = 0;
    datos.R1 = 0;
    datos.T = 0;

end

if (switchtype == 42) | (switchtype == 43) | (switchtype == 60)
    datos.hv = 3000;
else
    datos.hv = 0;
end

% Cálculo de los ángulos en grados
datos.entryangled = angulo_xing_a_grados(datos.entryangle);
datos.heelangled = angulo_xing_a_grados(datos.heelangle);
datos.crossingangled = angulo_xing_a_grados(datos.crossingangle);
datos.naturalangled = angulo_xing_a_grados(datos.naturalangle);

function [aguja] = aguja_calculos(switchtype,datos)
%Función que calcula los puntos característicos de una aguja y la curva

%% Zona 1: Planning

%Puntos característicos de la zona 1: planning

if (switchtype > 60) & (switchtype <= 84)

    aguja.x1_ini = datos.pktoe*(10^3);
    aguja.y1_ini = 0;

    ang = acosd((datos.R2-(12-3))/datos.R2);
    L = ang*pi*datos.R2/90;
    A = sqrt(datos.R2*L);
    AB = A*sqrt(pi)*fresnelc(L/(sqrt(pi)*A));

    x_a = - (AB - datos.TC - datos.CB);
    y_a = 0;

    aguja.y_c = -3; % Punto C de la gráfica pg 35 NR/L3/TRK/2049/mod03
    aguja.x_c = 3/tand(datos.entryangled);

```

```

aguja.x1_fin = aguja.x1_ini + datos.TC + datos.CB;
aguja.y1_fin = -12;

% Puntos no necesarios en este caso
xc1 = 0;
yc1 = 0;

else

% Punto del Toe
aguja.x1_ini = datos.pktoe*(10^3) + datos.hv*cosd(datos.entryangled);
aguja.y1_ini = 0 - datos.hv*sind(datos.entryangled);

% Punto del cambio de R1 a R2, tangente a la línea que forma el ángulo
% entryangled
delta = (180/pi)*datos.P/datos.R1;
distancia = 2*datos.R1*sind(delta/2);
alfa = datos.entryangled + asind(distancia/(2*datos.R1)); %ángulo entre la vía y
la recta que une x1_ini con x1_fin
aguja.x1_fin = aguja.x1_ini + distancia*cosd(alfa);
aguja.y1_fin = aguja.y1_ini - distancia*sind(alfa);

% Cálculo del centro de la curva de radio R1
[xc1,yc1] = centro_circunf(datos.R1,datos.entryangled,aguja.x1_ini,aguja.y1_ini);
% Ángulo de inicio y final de la curva de radio R1
[thetal_ini,thetal_fin] = angulos_limite(datos.R1,aguja.x1_ini,aguja.x1_fin,xc1);

end

%Cálculo de la curva de la zona 1: planning

if (switchtype > 60) & (switchtype <= 84)
% Recta y clotoide de la zona 1
[aguja.x1,aguja.y1] =
recta_clotoide_1(datos.entryangled,aguja.x1_ini,aguja.y1_ini,aguja.x_c,aguja.y_c,
datos.R2,x_a,y_a);

% Paralela a y1 en el otro rail
[aguja.x1p,aguja.y1p,aguja.x1_ini_p,aguja.y1_ini_p,aguja.x1_fin_p,aguja.y1_fin_p]
=...
    recta_clotoide_paralela_1(-
datos.gauge,datos.entryangled,aguja.x1_ini,aguja.y1_ini,aguja.x_c,aguja.y_c,datos
.R2,x_a,y_a);

% ZONA LIBRE DE OBSTÁCULOS para la zona 1

[aguja.xlobs_1,aguja.ylobs_1,aguja.x1_ini_obs1,aguja.y1_ini_obs1,aguja.x1_fin_obs
1,aguja.y1_fin_obs1] =...
    recta_clotoide_paralela_1(-
datos.desviacion_max,datos.entryangled,aguja.x1_ini,aguja.y1_ini,aguja.x_c,aguja.
y_c,datos.R2,x_a,y_a);

```

```
[aguja.xlobs_2,aguja.ylobs_2,aguja.xl_ini_obs2,aguja.yl_ini_obs2,aguja.xl_fin_obs
2,aguja.yl_fin_obs2] =...
    recta_clotoide_paralela_1(-
datos.gauge+datos.desviacion_max,datos.entryangled,aguja.xl_ini,aguja.yl_ini,aguja
a.x_c,aguja.y_c,datos.R2,x_a,y_a);

% EJE en la zona 1
[aguja.xlep,aguja.ylep,aguja.xl_ini_ep,aguja.yl_ini_ep,aguja.xl_fin_ep,aguja.yl_f
in_ep] =...
    recta_clotoide_paralela_1(-
datos.gauge/2,datos.entryangled,aguja.xl_ini,aguja.yl_ini,aguja.x_c,aguja.y_c,dat
os.R2,x_a,y_a);

else
% Curva R1
[aguja.xl,aguja.yl,theta1] = curva(datos.R1,theta1_ini,theta1_fin,xcl,ycl);

% Curva del otro rail en la zona 1
% Paralela a yl
[aguja.xlp,aguja.ylp,aguja.xl_ini_p,aguja.yl_ini_p,aguja.xl_fin_p,aguja.yl_fin_p]
= ...
    curva_paralela(-
datos.gauge,datos.R1,theta1,theta1_ini,theta1_fin,xcl,ycl,aguja.xl_ini,aguja.yl_i
ni,aguja.xl_fin,aguja.yl_fin);

% ZONA LIBRE DE OBSTÁCULOS para la zona 1

% Paralelas a yl, paralelas a la vía superior, zona libre de obstáculos
[aguja.xlobs_1,aguja.ylobs_1,aguja.xl_ini_obs1,aguja.yl_ini_obs1,aguja.xl_fin_obs
1,aguja.yl_fin_obs1] = ...
    curva_paralela(-
datos.desviacion_max,datos.R1,theta1,theta1_ini,theta1_fin,xcl,ycl,aguja.xl_ini,a
guja.yl_ini,aguja.xl_fin,aguja.yl_fin);
% Paralelas a yl, paralelas a la vía inferior, zona libre de obstáculos
[aguja.xlobs_2,aguja.ylobs_2,aguja.xl_ini_obs2,aguja.yl_ini_obs2,aguja.xl_fin_obs
2,aguja.yl_fin_obs2] = ...
    curva_paralela(-
datos.gauge+datos.desviacion_max,datos.R1,theta1,theta1_ini,theta1_fin,xcl,ycl,ag
uja.xl_ini,aguja.yl_ini,aguja.xl_fin,aguja.yl_fin);

% EJE en la zona 1

% Eje paralelo a yl
[aguja.xlep,aguja.ylep,aguja.xl_ini_ep,aguja.yl_ini_ep,aguja.xl_fin_ep,aguja.yl_f
in_ep] = ...
    curva_paralela(-
datos.gauge/2,datos.R1,theta1,theta1_ini,theta1_fin,xcl,ycl,aguja.xl_ini,aguja.yl
_ini,aguja.xl_fin,aguja.yl_fin);

end
```

```
%% Zona 2: Switch

%Puntos característicos de la zona 2: Switch

% Punto del cambio de curva de radio R1 a R2, tangente a la línea que forma
% el ángulo entryangled
aguja.x2_ini = aguja.x1_fin;
aguja.y2_ini = aguja.y1_fin;

if (switchtype == 49) | (switchtype == 51) | (switchtype == 53) | (switchtype ==
60)

aguja.x2_fin = aguja.x2_ini;
aguja.y2_fin = aguja.y2_ini;

% Cálculo del centro de la curva de radio R2
[xc2,yc2] = centro_circunf(datos.R2,datos.heelangled,datos.pktoe*(10^3) +
datos.L1,-datos.H);
% Ángulo de inicio y final de la curva de radio R2
[theta2_ini,theta2_fin] = angulos_limite(datos.R2,aguja.x2_ini,aguja.x2_fin,xc2);

else

% Punto donde acaba la curva de radio R2, tangente a la línea que forma el
% ángulo heelangled
aguja.x2_fin = datos.pktoe*(10^3) + datos.L1;
aguja.y2_fin = -datos.H;

% Cálculo del centro de la curva de radio R2
[xc2,yc2] = centro_circunf(datos.R2,datos.heelangled,aguja.x2_fin,aguja.y2_fin);
% Ángulo de inicio y final de la curva de radio R2
[theta2_ini,theta2_fin] = angulos_limite(datos.R2,aguja.x2_ini,aguja.x2_fin,xc2);

end

%Cálculo de la curva de la zona 2: Switch

% Curva R2 hasta el punto 2_fin
[aguja.x2,aguja.y2,theta2] = curva(datos.R2,theta2_ini,theta2_fin,xc2,yc2);

% Curva R2 hasta su punto tangente al rail
%[x0,y0,theta0] = curva(R2,90,theta2_ini,xc2,yc2);
%[theta0_ini,theta0_fin] = angulos_limite(R2,pktoe*10^3-T,pktoe*10^3+L2,xc2);
theta0_fin = asind((-datos.gauge - yc2)/datos.R2);
[aguja.x0,aguja.y0,theta0] = curva(datos.R2,90,theta0_fin,xc2,yc2);

% Curva del otro rail en la zona 2
% Paralela a y2
[aguja.x2p,aguja.y2p,aguja.x2_ini_p,aguja.y2_ini_p,aguja.x2_fin_p,aguja.y2_fin_p]
= ...
    curva_paralela(-
datos.gauge,datos.R2,theta2,theta2_ini,theta2_fin,xc2,yc2,aguja.x2_ini,aguja.y2_i
ni,aguja.x2_fin,aguja.y2_fin);
```

```
% ZONA LIBRE DE OBSTÁCULOS para la zona 2

% Paralelas a y2, paralelas a la vía superior, zona libre de obstáculos
[aguja.x2obs_1,aguja.y2obs_1,aguja.x2_ini_obs1,aguja.y2_ini_obs1,aguja.x2_fin_obs
1,aguja.y2_fin_obs1] = ...
    curva_paralela(-
datos.desviacion_max,datos.R2,theta2,theta2_ini,theta2_fin,xc2,yc2,aguja.x2_ini,a
guja.y2_ini,aguja.x2_fin,aguja.y2_fin);
% Paralelas a y2, paralelas a la vía inferior, zona libre de obstáculos
[aguja.x2obs_2,aguja.y2obs_2,aguja.x2_ini_obs2,aguja.y2_ini_obs2,aguja.x2_fin_obs
2,aguja.y2_fin_obs2] = ...
    curva_paralela(-
datos.gauge+datos.desviacion_max,datos.R2,theta2,theta2_ini,theta2_fin,xc2,yc2,ag
uja.x2_ini,aguja.y2_ini,aguja.x2_fin,aguja.y2_fin);

% EJE en la zona 2

% Eje paralelo a y2
[aguja.x2ep,aguja.y2ep,aguja.x2_ini_ep,aguja.y2_ini_ep,aguja.x2_fin_ep,aguja.y2_f
in_ep] = ...
    curva_paralela(-
datos.gauge/2,datos.R2,theta2,theta2_ini,theta2_fin,xc2,yc2,aguja.x2_ini,aguja.y2
_ini,aguja.x2_fin,aguja.y2_fin);

%% Zona 3: Turnout

%Puntos característicos de la zona 3: Turnout

% Punto donde empieza la curva de radio R3
aguja.x3_ini = aguja.x2_fin;
aguja.y3_ini = aguja.y2_fin;

if ((switchtype > 43) & (switchtype <= 48)) | ...
    ((switchtype > 49) & (switchtype <= 50)) | ...
    ((switchtype == 52)) | ((switchtype > 53) & (switchtype <= 59))...
    | ((switchtype > 77) & (switchtype <= 84))

% Cálculo del centro de la curva de radio R3
[xc3,yc3] = centro_circunf(datos.R3,datos.heelangled,aguja.x3_ini,aguja.y3_ini);

% En este código la curva de la transición se realiza con una clotoide como
% se indica en la pg 29 del Track Design Handbook: NR/L3/TRK/2049/mod02

% longitud = transition-(transition.^5/(40*(R3*transition).^2));
% alfa = atand(longitud/(2*R3));
% OLE.x3_fin = xc3 + R3 * cosd(90- (crossingangled - alfa));

% Punto IP
% En este caso el punto x4_ini o x3_fin se calcula a partir del ángulo del
% punto de la curva de la clotoide
```

```

aguja.x3_fin = xc3 + datos.R3 * cosd(90- (datos.crossingangled -
(90*datos.transition/(pi*datos.R3))));

% % Otra forma de calcular el punto x4_ini o x3_fin es a partir de las
% % coordenadas sacadas a partir de la distancia de la clotoide

% A = sqrt(R3*transition);
% OLE.x3_fin = (L2 + pktoe*10^3 - str*cosd(crossingangled)) + ...
% (A*sqrt(pi)*fresnelc(transition/(sqrt(pi)*A))*cosd(180-crossingangled)...
% - (A*sqrt(pi)*fresnels(transition/(sqrt(pi)*A))*sind(180-crossingangled);

% Ángulo de inicio y final curva R3 en el punto IP
[theta3_ini,theta3_fin] = angulos_limite(datos.R3,aguja.x3_ini,aguja.x3_fin,xc3);
aguja.y3_fin = yc3 + datos.R3*sind(theta3_fin);

elseif (switchtype == 49) | (switchtype == 51) | (switchtype == 53) | (switchtype
== 60)

[xc3,yc3] = centro_circunf(datos.R3,datos.heelangled,datos.pktoe*(10^3) +
datos.L1,-datos.H);

aguja.x3_fin = xc3 + datos.R3 * cosd(90- (datos.crossingangled -
(90*datos.transition/(pi*datos.R3))));

% Ángulo de inicio y final curva R3 en el punto IP
[theta3_ini,theta3_fin] = angulos_limite(datos.R3,aguja.x3_ini,aguja.x3_fin,xc3);
aguja.y3_fin = yc3 + datos.R3*sind(theta3_fin);

else

% Cálculo del centro de la curva de radio R3
[xc3,yc3] = centro_circunf(datos.R3,datos.heelangled,aguja.x3_ini,aguja.y3_ini);

% Punto IP
aguja.x3_fin = xc3 + datos.R3*sind(datos.crossingangled);
aguja.y3_fin = yc3 + datos.R3*cosd(datos.crossingangled);

% Ángulo de inicio y final curva R3 en el punto IP
[theta3_ini,theta3_fin] = angulos_limite(datos.R3,aguja.x3_ini,aguja.x3_fin,xc3);

end

%Cálculo de la curva de la zona 3: Turnout

% Curva R3
[aguja.x3,aguja.y3,theta3] = curva(datos.R3,theta3_ini,theta3_fin,xc3,yc3);

% Curva del otro rail en la zona 3
% Paralela a y3
[aguja.x3p,aguja.y3p,aguja.x3_ini_p,aguja.y3_ini_p,aguja.x3_fin_p,aguja.y3_fin_p]
= ...

```

```

    curva_paralela(-
datos.gauge,datos.R3,theta3,theta3_ini,theta3_fin,xc3,yc3,aguja.x3_ini,aguja.y3_i
ni,aguja.x3_fin,aguja.y3_fin);

% ZONA LIBRE DE OBSTÁCULOS para la zona 3

% Paralelas a y3, paralelas a la vía superior, zona libre de obstáculos
[aguja.x3obs_1,aguja.y3obs_1,aguja.x3_ini_obs1,aguja.y3_ini_obs1,aguja.x3_fin_obs
1,aguja.y3_fin_obs1] = ...
    curva_paralela(-
datos.desviacion_max,datos.R3,theta3,theta3_ini,theta3_fin,xc3,yc3,aguja.x3_ini,a
guja.y3_ini,aguja.x3_fin,aguja.y3_fin);
% Paralelas a y3, paralelas a la vía inferior, zona libre de obstáculos
[aguja.x3obs_2,aguja.y3obs_2,aguja.x3_ini_obs2,aguja.y3_ini_obs2,aguja.x3_fin_obs
2,aguja.y3_fin_obs2] = ...
    curva_paralela(-
datos.gauge+datos.desviacion_max,datos.R3,theta3,theta3_ini,theta3_fin,xc3,yc3,ag
uja.x3_ini,aguja.y3_ini,aguja.x3_fin,aguja.y3_fin);

% EJE en la zona 3

% Eje paralelo a y3
[aguja.x3ep,aguja.y3ep,aguja.x3_ini_ep,aguja.y3_ini_ep,aguja.x3_fin_ep,aguja.y3_f
in_ep] = ...
    curva_paralela(-
datos.gauge/2,datos.R3,theta3,theta3_ini,theta3_fin,xc3,yc3,aguja.x3_ini,aguja.y3
_ini,aguja.x3_fin,aguja.y3_fin);

%% Zona 4: Clothoid transition

%Puntos característicos de la zona 4: Clothoid transition

if ((switchtype > 43) & (switchtype <= 57)) | ((switchtype > 58) & (switchtype <=
59))

% Puntos de la recta de transición
aguja.x4_ini = aguja.x3_fin;
aguja.y4_ini = aguja.y3_fin;

aguja.x4_fin = datos.L2 + datos.pktoe*10^3 -
datos.str*cosd(datos.crossingangled);
aguja.y4_fin = -datos.gauge + (datos.str*sind(datos.crossingangled) - 16);

elseif (switchtype == 60)

% Puntos de la recta de transición
aguja.x4_ini = aguja.x3_fin;
aguja.y4_ini = aguja.y3_fin;

aguja.x4_fin = datos.L2 + datos.pktoe*10^3 -
datos.str*cosd(datos.crossingangled);
aguja.y4_fin = -datos.gauge + (datos.str*sind(datos.crossingangled) + 90);

```

```
elseif (switchtype == 58)

% Puntos de la recta de transición
aguja.x4_ini = aguja.x3_fin;
aguja.y4_ini = aguja.y3_fin;

% Cálculo del punto 4_fin
A4 = sqrt(datos.R3*datos.transition);

clx = A4*sqrt(pi)*fresnelc(datos.transition/(sqrt(pi)*A4)) * cosd(180-
datos.crossingangled) - ...
    A4*sqrt(pi)*fresnels(datos.transition/(sqrt(pi)*A4)) * sind(180-
datos.crossingangled);
cly = A4*sqrt(pi)*fresnels(datos.transition/(sqrt(pi)*A4)) * cosd(180-
datos.crossingangled) + ...
    A4*sqrt(pi)*fresnelc(datos.transition/(sqrt(pi)*A4)) * sind(180-
datos.crossingangled);

aguja.x4_fin = aguja.x4_ini - clx;
aguja.y4_fin = aguja.y4_ini - cly;

elseif (switchtype > 77) & (switchtype <= 84)

% Puntos de la recta de transición
aguja.x4_ini = aguja.x3_fin;
aguja.y4_ini = aguja.y3_fin;

aguja.x4_fin = datos.L2 + datos.pktoe*10^3 - datos.N -
datos.str*cosd(datos.crossingangled);
aguja.y4_fin = -datos.gauge + (datos.str*sind(datos.crossingangled));

else

aguja.x4_ini = aguja.x3_fin;
aguja.y4_ini = aguja.y3_fin;

aguja.x4_fin = aguja.x3_fin;
aguja.y4_fin = aguja.y3_fin;

end

%Cálculo de la curva de la zona 4: Clothoid transition

if ((switchtype > 43) & (switchtype <= 60)) | ((switchtype > 77) & (switchtype <=
84))

% Transition
[aguja.x4,aguja.y4] =
clotoide_R_Str(datos.transition,datos.R3,aguja.x4_fin,aguja.y4_fin,datos.crossing
angled);
```

```

else

aguja.x4 = aguja.x3_fin;
aguja.y4 = aguja.y3_fin;

end

% Curva del otro rail en la zona 4

if ((switchtype > 43) & (switchtype <= 60)) | ((switchtype > 77) & (switchtype <=
84))

% Paralela a Transition
%[OLE.x4p,OLE.y4p,OLE.x4_ini_p,OLE.y4_ini_p,OLE.x4_fin_p,OLE.y4_fin_p] =
transition_paralela(-
gauge,longitud,R3,OLE.x4_fin,OLE.y4_fin,crossingangled,OLE.x3_fin_p,OLE.y3_fin_p)
;
[aguja.x4p,aguja.y4p,aguja.x4_ini_p,aguja.y4_ini_p,aguja.x4_fin_p,aguja.y4_fin_p]
= ...
    clotoide_paralela(-
datos.gauge,datos.transition,datos.R3,aguja.x4_fin,aguja.y4_fin,datos.crossingang
led,aguja.x3_fin_p,aguja.y3_fin_p)

else

aguja.x4p = aguja.x3_fin_p;
aguja.y4p = aguja.y3_fin_p;
aguja.x4_ini_p = aguja.x3_fin_p;
aguja.y4_ini_p = aguja.y3_fin_p;
aguja.x4_fin_p = aguja.x3_fin_p;
aguja.y4_fin_p = aguja.y3_fin_p;

end

% ZONA LIBRE DE OBSTÁCULOS para la zona 4

if ((switchtype > 43) & (switchtype <= 60)) | ((switchtype > 77) & (switchtype <=
84))

%Transition zona libre de obstáculos

% Paralelas a y4, paralelas a la vía superior, zona libre de obstáculos
[aguja.x4obs_1,aguja.y4obs_1,aguja.x4_ini_obs1,aguja.y4_ini_obs1,aguja.x4_fin_obs
1,aguja.y4_fin_obs1] = ...
    clotoide_paralela(-
datos.desviacion_max,datos.transition,datos.R3,aguja.x4_fin,aguja.y4_fin,datos.cr
ossingangled,aguja.x3_fin_obs1,aguja.y3_fin_obs1);
% Paralelas a y4, paralelas a la vía inferior, zona libre de obstáculos
[aguja.x4obs_2,aguja.y4obs_2,aguja.x4_ini_obs2,aguja.y4_ini_obs2,aguja.x4_fin_obs
2,aguja.y4_fin_obs2] = ...
    clotoide_paralela(-
datos.gauge+datos.desviacion_max,datos.transition,datos.R3,aguja.x4_fin,aguja.y4_
fin,datos.crossingangled,aguja.x3_fin_obs2,aguja.y3_fin_obs2);

```

```
else

aguja.x4obs_1 = aguja.x3_fin_obs1;
aguja.y4obs_1 = aguja.y3_fin_obs1;

aguja.x4_ini_obs1 = aguja.x3_fin_obs1;
aguja.y4_ini_obs1 = aguja.y3_fin_obs1;
aguja.x4_fin_obs1 = aguja.x3_fin_obs1;
aguja.y4_fin_obs1 = aguja.y3_fin_obs1;

aguja.x4obs_2 = aguja.x3_fin_obs2;
aguja.y4obs_2 = aguja.y3_fin_obs2;

aguja.x4_ini_obs2 = aguja.x3_fin_obs2;
aguja.y4_ini_obs2 = aguja.y3_fin_obs2;
aguja.x4_fin_obs2 = aguja.x3_fin_obs2;
aguja.y4_fin_obs2 = aguja.y3_fin_obs2;

end

% EJE en la zona 4

if ((switchtype > 43) & (switchtype <= 60)) | ((switchtype > 77) & (switchtype <=
84))

% Transition eje
[aguja.x4ep,aguja.y4ep,aguja.x4_ini_ep,aguja.y4_ini_ep,aguja.x4_fin_ep,aguja.y4_f
in_ep] = ...
    clotoide_paralela(-
datos.gauge/2,datos.transition,datos.R3,aguja.x4_fin,aguja.y4_fin,datos.crossinga
ngled,aguja.x3_fin_ep,aguja.y3_fin_ep);

else

aguja.x4ep = aguja.x3_fin_ep;
aguja.y4ep = aguja.y3_fin_ep;
aguja.x4_ini_ep = aguja.x3_fin_ep;
aguja.y4_ini_ep = aguja.y3_fin_ep;
aguja.x4_fin_ep = aguja.x3_fin_ep;
aguja.y4_fin_ep = aguja.y3_fin_ep;

end

%% Zona 5: Straight

%Puntos característicos de la zona 5: Straight

if ((switchtype > 43) & (switchtype <= 57)) | ((switchtype > 58) & ...
    (switchtype <= 60)) | ((switchtype > 77) & (switchtype <= 84))

% Punto y ángulo final representado de la vía desviada (de la curva R3)
% Parte recta
```

```

aguja.x5_ini = aguja.x4_fin;
aguja.y5_ini = aguja.y4_fin;

aguja.x5_fin = aguja.x5_ini + datos.str*cosd(datos.crossingangled);
aguja.y5_fin = aguja.y5_ini - tand(datos.crossingangled)*(aguja.x5_fin -
aguja.x5_ini);

elseif (switchtype == 58)

% Punto y ángulo final representado de la vía desviada (de la curva R3)
% Parte recta
aguja.x5_ini = aguja.x4_fin;
aguja.y5_ini = aguja.y4_fin;

aguja.x5_fin = aguja.x5_ini + (-datos.str)*cosd(datos.crossingangled);
aguja.y5_fin = aguja.y5_ini - tand(datos.crossingangled)*(aguja.x5_fin -
aguja.x5_ini);

else

% Punto y ángulo final representado de la vía desviada (de la curva R3)
% Parte recta
aguja.x5_ini = aguja.x3_fin;
aguja.y5_ini = aguja.y3_fin;

aguja.x5_fin = aguja.x5_ini + datos.str;
aguja.y5_fin = aguja.y5_ini - tand(datos.crossingangled)*(aguja.x5_fin -
aguja.x5_ini);

end

%Cálculo de la curva de la zona 5: Straight
[aguja.x5,aguja.y5] =
recta(aguja.x5_ini,aguja.y5_ini,aguja.x5_fin,datos.crossingangled);

% Curva del otro rail en la zona 5

if ((switchtype > 43) & (switchtype <= 60)) | ((switchtype > 77) & (switchtype <=
84))

% Paralela a vía tras el desvío
% Parte recta
[aguja.x5p,aguja.y5p,aguja.x5_ini_p,aguja.y5_ini_p,aguja.x5_fin_p,aguja.y5_fin_p]
= ...
    recta_paralela(-
datos.gauge,aguja.x5_fin,aguja.y5_fin,datos.crossingangled,aguja.x4_fin_p,aguja.y
4_fin_p);

else

% Paralela a vía tras el desvío
% Parte recta

```

```
[aguja.x5p,aguja.y5p,aguja.x5_ini_p,aguja.y5_ini_p,aguja.x5_fin_p,aguja.y5_fin_p]
= ...
    recta_paralela(-
datos.gauge,aguja.x5_fin,aguja.y5_fin,datos.crossingangled,aguja.x3_fin_p,aguja.y
3_fin_p);

end

% ZONA LIBRE DE OBSTÁCULOS para la zona 5

if ((switchtype > 43) & (switchtype <= 60)) | ((switchtype > 77) & (switchtype <=
84))

%Transition zona libre de obstáculos

% Parte recta
% Paralelas a y5, paralelas a la vía superior, zona libre de obstáculos
[aguja.x5obs_1,aguja.y5obs_1,aguja.x5_ini_obs1,aguja.y5_ini_obs1,aguja.x5_fin_obs
1,aguja.y5_fin_obs1] = ...
    recta_paralela(-
datos.desviacion_max,aguja.x5_fin,aguja.y5_fin,datos.crossingangled,aguja.x4_fin_
obs1,aguja.y4_fin_obs1);
% Paralelas a y5, paralelas a la vía inferior, zona libre de obstáculos
[aguja.x5obs_2,aguja.y5obs_2,aguja.x5_ini_obs2,aguja.y5_ini_obs2,aguja.x5_fin_obs
2,aguja.y5_fin_obs2] = ...
    recta_paralela(-
datos.gauge+datos.desviacion_max,aguja.x5_fin,aguja.y5_fin,datos.crossingangled,a
guja.x4_fin_obs2,aguja.y4_fin_obs2);

else

% Parte recta
% Paralelas a y5, paralelas a la vía superior, zona libre de obstáculos
[aguja.x5obs_1,aguja.y5obs_1,aguja.x5_ini_obs1,aguja.y5_ini_obs1,aguja.x5_fin_obs
1,aguja.y5_fin_obs1] = ...
    recta_paralela(-
datos.desviacion_max,aguja.x5_fin,aguja.y5_fin,datos.crossingangled,aguja.x3_fin_
obs1,aguja.y3_fin_obs1);
% Paralelas a y5, paralelas a la vía inferior, zona libre de obstáculos
[aguja.x5obs_2,aguja.y5obs_2,aguja.x5_ini_obs2,aguja.y5_ini_obs2,aguja.x5_fin_obs
2,aguja.y5_fin_obs2] = ...
    recta_paralela(-
datos.gauge+datos.desviacion_max,aguja.x5_fin,aguja.y5_fin,datos.crossingangled,a
guja.x3_fin_obs2,aguja.y3_fin_obs2);

end

% EJE en la zona 5

if ((switchtype > 43) & (switchtype <= 60)) | ((switchtype > 77) & (switchtype <=
84))

% Eje paralelo a y5, Parte recta
```

```
[aguja.x5ep,aguja.y5ep,aguja.x5_ini_ep,aguja.y5_ini_ep,aguja.x5_fin_ep,aguja.y5_f
in_ep] = ...
    recta_paralela(-
datos.gauge/2,aguja.x5_fin,aguja.y5_fin,datos.crossingangled,aguja.x4_fin_ep,aguja.y4_fin_ep);

else

% Eje paralelo a y5, Parte recta
[aguja.x5ep,aguja.y5ep,aguja.x5_ini_ep,aguja.y5_ini_ep,aguja.x5_fin_ep,aguja.y5_f
in_ep] = ...
    recta_paralela(-
datos.gauge/2,aguja.x5_fin,aguja.y5_fin,datos.crossingangled,aguja.x3_fin_ep,aguja.y3_fin_ep);

end

%% Zona 6: Vía tras el punto IP

%Puntos característicos de la zona 6: Vía

% Parte curva final
% Cálculo del centro de la curva de radio R3
aguja.x6_ini = aguja.x5_fin;
aguja.y6_ini = aguja.y5_fin;

[xc6,yc6] =
centro_circunf(datos.R2,datos.crossingangled,aguja.x6_ini,aguja.y6_ini);

aguja.x6_fin = aguja.x5_fin + datos.limite_fin;
[theta6_ini,theta6_fin] = angulos_limite(datos.R2,aguja.x6_ini,aguja.x6_fin,xc6);
aguja.y6_fin = datos.R2*sind(theta6_fin) + yc6;

%Cálculo de la curva de la zona 6: Vía
[aguja.x6,aguja.y6,theta6] = curva(datos.R2,theta6_ini,theta6_fin,xc6,yc6);

% Curva del otro rail en la zona 6
% Parte curva
[aguja.x6p,aguja.y6p,aguja.x6_ini_p,aguja.y6_ini_p,aguja.x6_fin_p,aguja.y6_fin_p]
= ...
    curva_paralela(-
datos.gauge,datos.R2,theta6,theta6_ini,theta6_fin,xc6,yc6,aguja.x6_ini,aguja.y6_i
ni,aguja.x6_fin,aguja.y6_fin);

% ZONA LIBRE DE OBSTÁCULOS para la zona 6

% Parte curva
% Paralelas a y6, paralelas a la vía superior, zona libre de obstáculos
[aguja.x6obs_1,aguja.y6obs_1,aguja.x6_ini_obs1,aguja.y6_ini_obs1,aguja.x6_fin_obs
1,aguja.y6_fin_obs1] = ...
    curva_paralela(-
datos.desviacion_max,datos.R2,theta6,theta6_ini,theta6_fin,xc6,yc6,aguja.x6_ini,a
guja.y6_ini,aguja.x6_fin,aguja.y6_fin);
```

```
% Paralelas a y6, paralelas a la vía inferior, zona libre de obstáculos
[aguja.x6obs_2,aguja.y6obs_2,aguja.x6_ini_obs2,aguja.y6_ini_obs2,aguja.x6_fin_obs
2,aguja.y6_fin_obs2] = ...
    curva_paralela(-
datos.gauge+datos.desviacion_max,datos.R2,theta6,theta6_ini,theta6_fin,xc6,yc6,ag
uja.x6_ini,aguja.y6_ini,aguja.x6_fin,aguja.y6_fin);

% EJE en la zona 6

% Eje paralelo a y6, Parte curva
[aguja.x6ep,aguja.y6ep,aguja.x6_ini_ep,aguja.y6_ini_ep,aguja.x6_fin_ep,aguja.y6_f
in_ep] = ...
    curva_paralela(-
datos.gauge/2,datos.R2,theta6,theta6_ini,theta6_fin,xc6,yc6,aguja.x6_ini,aguja.y6
_ini,aguja.x6_fin,aguja.y6_fin);

%Comprobación
aguja.xc1 = xc1;
aguja.yc1 = yc1;
aguja.xc2 = xc2;
aguja.yc2 = yc2;
aguja.xc3 = xc3;
aguja.yc3 = yc3;
aguja.xc6 = xc6;
aguja.yc6 = yc6;

end
```

```
function [] = aguja_graficas(switchtype,datos,aguja,OLE)

%% Gráfica aguja
%   Dibuja la aguja a partir de las curvas calculadas

%Representación de las vías
plot([-datos.T+datos.pktoe*(10^3)-datos.limite_ini,
datos.L2+datos.pktoe*(10^3)+datos.limite_fin], [0, 0], 'b')
hold on
plot([-datos.T+datos.pktoe*(10^3)-datos.limite_ini,
datos.L2+datos.pktoe*(10^3)+datos.limite_fin],[-datos.gauge, -datos.gauge], 'b')

%Representación de puntos característicos
plot(aguja.x1_ini,aguja.y1_ini,'ob')
plot(aguja.x1_fin,aguja.y1_fin,'ob')
plot(aguja.x2_fin,aguja.y2_fin,'ob')
plot(aguja.x3_fin,aguja.y3_fin,'ob')

plot(datos.L2 + datos.pktoe*10^3, -datos.gauge, '.m')
```

```
plot(datos.L2 + datos.pktoe*10^3 - datos.N, -datos.gauge, '.c')

%Representación del heel angle
plot([datos.L1+datos.pktoe*(10^3)-(datos.H/tand(datos.heelangled)),
datos.L1+datos.pktoe*(10^3)], [0, -datos.H], 'c')

% Representación de la curva R2 hasta el punto IP
plot(aguja.x0,aguja.y0,'--c')
% Representación de la curva R1
plot(aguja.x1,aguja.y1,'b')
% Representación de la curva R2 hasta el punto 2_fin
plot(aguja.x2,aguja.y2,'b')
% Representación de la curva R3 hasta su punto tangente al rail
plot(aguja.x3,aguja.y3,'b')
% Representación de la transición
plot(aguja.x4,aguja.y4,'b')

% Líneas de la vía tras el desvío
plot(aguja.x5,aguja.y5,'b')
plot(aguja.x6,aguja.y6,'b')

% Si la aguja es de tipo HV
plot([datos.pktoe*(10^3), aguja.x1_ini],[0, aguja.y1_ini],'b');

% Gráfica del otro rail
% Paralela a y1
plot(aguja.x1p, aguja.y1p,'b')
plot(aguja.x1_ini_p, aguja.y1_ini_p,'ob')
plot(aguja.x1_fin_p, aguja.y1_fin_p,'ob')
% Paralela a y2
plot(aguja.x2p, aguja.y2p,'b')
plot(aguja.x2_fin_p, aguja.y2_fin_p,'ob')
% Paralela a y3
plot(aguja.x3p, aguja.y3p,'b')
plot(aguja.x3_fin_p, aguja.y3_fin_p,'ob')
% Si la aguja es de tipo HV
plot([datos.pktoe*(10^3), aguja.x1_ini_p],[-datos.gauge, aguja.y1_ini_p],'b');

% Paralela a la transition
plot(aguja.x4p,aguja.y4p,'b')
% Paralelas, Líneas de la vía tras el desvío
plot(aguja.x5p,aguja.y5p,'b')
plot(aguja.x6p,aguja.y6p,'b')

% ZONA LIBRE DE OBSTÁCULOS

% Paralelas a la vía
plot([-datos.T+datos.pktoe*(10^3)-datos.limite_ini,
datos.L2+datos.pktoe*(10^3)+datos.limite_fin], ...
[-datos.desviacion_max, -datos.desviacion_max],'k')
```

```
plot([-datos.T+datos.pktoe*(10^3)-datos.limite_ini,
datos.L2+datos.pktoe*(10^3)+datos.limite_fin], ...
[-datos.gauge+datos.desviacion_max, -datos.gauge+datos.desviacion_max], 'k')

% Paralelas a y1, zona libre de obstáculos
plot(aguja.x1obs_1, aguja.y1obs_1, 'k')
plot(aguja.x1_ini_obs1, aguja.y1_ini_obs1, '.k')
plot(aguja.x1_fin_obs1, aguja.y1_fin_obs1, '.k')

plot(aguja.x1obs_2, aguja.y1obs_2, 'k')
plot(aguja.x1_ini_obs2, aguja.y1_ini_obs2, '.k')
plot(aguja.x1_fin_obs2, aguja.y1_fin_obs2, '.k')

% Paralelas a y2, zona libre de obstáculos
plot(aguja.x2obs_1, aguja.y2obs_1, 'k')
plot(aguja.x2_fin_obs1, aguja.y2_fin_obs1, '.k')

plot(aguja.x2obs_2, aguja.y2obs_2, 'k')
plot(aguja.x2_fin_obs2, aguja.y2_fin_obs2, '.k')

% Paralelas a y3, zona libre de obstáculos
plot(aguja.x3obs_1, aguja.y3obs_1, 'k')
plot(aguja.x3_fin_obs1, aguja.y3_fin_obs1, '.k')

plot(aguja.x3obs_2, aguja.y3obs_2, 'k')
plot(aguja.x3_fin_obs2, aguja.y3_fin_obs2, '.k')

% Paralelas a y4, zona libre de obstáculos
plot(aguja.x4obs_1, aguja.y4obs_1, 'k')
plot(aguja.x4obs_2, aguja.y4obs_2, 'k')

% Paralelas a y5, zona libre de obstáculos
plot(aguja.x5obs_1, aguja.y5obs_1, 'k')
plot(aguja.x5obs_2, aguja.y5obs_2, 'k')

plot(aguja.x6obs_1, aguja.y6obs_1, 'k')
plot(aguja.x6obs_2, aguja.y6obs_2, 'k')

% Si la aguja es de tipo HV
plot([datos.pktoe*(10^3), aguja.x1_ini_obs1], [-datos.desviacion_max,
aguja.y1_ini_obs1], 'b');
plot([datos.pktoe*(10^3), aguja.x1_ini_obs2], [-datos.gauge+datos.desviacion_max,
aguja.y1_ini_obs2], 'b');

% % Líneas que unen los puntos característicos de la vía desviada con los
% % puntos característicos de la zona de libre de obstáculos
plot([aguja.x1_ini, aguja.x1_ini_obs1], [aguja.y1_ini, aguja.y1_ini_obs1], 'k')
plot([aguja.x1_fin, aguja.x1_fin_obs1], [aguja.y1_fin, aguja.y1_fin_obs1], 'k')
plot([aguja.x1_ini_p, aguja.x1_ini_obs2], [aguja.y1_ini_p,
aguja.y1_ini_obs2], 'k')
plot([aguja.x1_fin_p, aguja.x1_fin_obs2], [aguja.y1_fin_p,
aguja.y1_fin_obs2], 'k')
```

```

plot([aguja.x2_fin, aguja.x2_fin_obs1], [aguja.y2_fin, aguja.y2_fin_obs1], 'k')
plot([aguja.x2_fin_p, aguja.x2_fin_obs2], [aguja.y2_fin_p,
aguja.y2_fin_obs2], 'k')

plot([aguja.x3_fin, aguja.x3_fin_obs1], [aguja.y3_fin, aguja.y3_fin_obs1], 'k')
plot([aguja.x3_fin_p, aguja.x3_fin_obs2], [aguja.y3_fin_p,
aguja.y3_fin_obs2], 'k')

plot([-datos.T+datos.pktoe*(10^3)-datos.limite_ini, -datos.T+datos.pktoe*(10^3)-
datos.limite_ini], [0, -datos.desviacion_max], 'k')
plot([datos.L2+datos.pktoe*(10^3)+datos.limite_fin,
datos.L2+datos.pktoe*(10^3)+datos.limite_fin], [0, -datos.desviacion_max], 'k')

plot([-datos.T+datos.pktoe*(10^3)-datos.limite_ini, -datos.T+datos.pktoe*(10^3)-
datos.limite_ini], [-datos.gauge+datos.desviacion_max, -datos.gauge], 'k')
plot([datos.L2+datos.pktoe*(10^3)+datos.limite_fin,
datos.L2+datos.pktoe*(10^3)+datos.limite_fin], [-
datos.gauge+datos.desviacion_max, -datos.gauge], 'k')

plot([aguja.x5(end), aguja.x5obs_1(end)], [aguja.y5(end), aguja.y5obs_1(end)], 'k')
plot([aguja.x5p(end), aguja.x5obs_2(end)], [aguja.y5p(end), aguja.y5obs_2(end)], 'k')

plot([aguja.x5(1), aguja.x5obs_1(1)], [aguja.y5(1), aguja.y5obs_1(1)], 'k')
plot([aguja.x5p(1), aguja.x5obs_2(1)], [aguja.y5p(1), aguja.y5obs_2(1)], 'k')

plot([aguja.x6(1), aguja.x6obs_1(1)], [aguja.y6(1), aguja.y6obs_1(1)], 'k')
plot([aguja.x6p(1), aguja.x6obs_2(1)], [aguja.y6p(1), aguja.y6obs_2(1)], 'k')

% Relleno de color de la zona libre de obstáculos
color = [0.5,0.5,0.5];
transparencia = 0.3; %nivel de transparencia, 1=opaco, 0=invisible

zonal_x = [-datos.T+datos.pktoe*(10^3)-datos.limite_ini, -
datos.T+datos.pktoe*(10^3)-datos.limite_ini, ...
datos.L2+datos.pktoe*(10^3)+datos.limite_fin,
datos.L2+datos.pktoe*(10^3)+datos.limite_fin];
zonal_y = [0, -datos.desviacion_max, -datos.desviacion_max, 0];
fill(zonal_x,zonal_y,color,'edgecolor','none','facealpha',transparencia)

zona2_x = [-datos.T+datos.pktoe*(10^3)-datos.limite_ini, -
datos.T+datos.pktoe*(10^3)-datos.limite_ini, ...
datos.L2+datos.pktoe*(10^3)+datos.limite_fin,
datos.L2+datos.pktoe*(10^3)+datos.limite_fin];
zona2_y = [-datos.gauge+datos.desviacion_max, -datos.gauge, -datos.gauge, -
datos.gauge+datos.desviacion_max];
fill(zona2_x,zona2_y,color,'edgecolor','none','facealpha',transparencia)

```

```

zona3_x1 =
[aguja.x1obs_1,[aguja.x1_ini_obs1,aguja.x1_ini],aguja.x1,[aguja.x1_fin,aguja.x1_f
in_obs1]];
zona3_y1 =
[aguja.y1obs_1,[aguja.y1_ini_obs1,aguja.y1_ini],aguja.y1,[aguja.y1_fin,aguja.y1_f
in_obs1]];
fill(zona3_x1,zona3_y1,color,'edgecolor','none','facealpha',transparencia)
fill(aguja.x1,aguja.y1,color,'edgecolor','none','facealpha',transparencia)

zona3_x2 =
[aguja.x2obs_1,[aguja.x2_ini_obs1,aguja.x2_ini],aguja.x2,[aguja.x2_fin,aguja.x2_f
in_obs1]];
zona3_y2 =
[aguja.y2obs_1,[aguja.y2_ini_obs1,aguja.y2_ini],aguja.y2,[aguja.y2_fin,aguja.y2_f
in_obs1]];
fill(zona3_x2,zona3_y2,color,'edgecolor','none','facealpha',transparencia)
if (switchtype >= 0) & (switchtype <= 60)
fill(aguja.x2,aguja.y2,color,'edgecolor','none','facealpha',transparencia)
end

zona3_x3 =
[aguja.x3obs_1,[aguja.x3obs_1(end),aguja.x3(end)],aguja.x3,[aguja.x3(1),aguja.x3o
bs_1(1)]];
zona3_y3 =
[aguja.y3obs_1,[aguja.y3obs_1(end),aguja.y3(end)],aguja.y3,[aguja.y3(1),aguja.y3o
bs_1(1)]];
fill(zona3_x3,zona3_y3,color,'edgecolor','none','facealpha',transparencia)
fill(aguja.x3,aguja.y3,color,'edgecolor','none','facealpha',transparencia)

zona3_x4 =
[aguja.x4obs_1,[aguja.x4_fin_obs1,aguja.x4_fin],aguja.x4,[aguja.x4_ini,aguja.x4_i
ni_obs1]];
zona3_y4 =
[aguja.y4obs_1,[aguja.y4_fin_obs1,aguja.y4_fin],aguja.y4,[aguja.y4_ini,aguja.y4_i
ni_obs1]];
fill(zona3_x4,zona3_y4,color,'edgecolor','none','facealpha',transparencia)
%fill(OLE.x4,OLE.y4,color,'edgecolor','none','facealpha',transparencia)

zona3_x5 =
[[aguja.x5_ini_obs1,aguja.x5_fin_obs1],[aguja.x5_fin_obs1,aguja.x5_fin],...
 [aguja.x5_fin,aguja.x5_ini],[aguja.x5_ini,aguja.x5_ini_obs1]];
zona3_y5 =
[[aguja.y5_ini_obs1,aguja.y5_fin_obs1],[aguja.y5_fin_obs1,aguja.y5_fin],...
 [aguja.y5_fin,aguja.y5_ini],[aguja.y5_ini,aguja.y5_ini_obs1]];
fill(zona3_x5,zona3_y5,color,'edgecolor','none','facealpha',transparencia)

zona3_x6 =
[aguja.x6obs_1,[aguja.x6_ini_obs1,aguja.x6_ini],aguja.x6,[aguja.x6_fin,aguja.x6_f
in_obs1]];
zona3_y6 =
[aguja.y6obs_1,[aguja.y6_ini_obs1,aguja.y6_ini],aguja.y6,[aguja.y6_fin,aguja.y6_f
in_obs1]];
fill(zona3_x6,zona3_y6,color,'edgecolor','none','facealpha',transparencia)

```

```
fill(aguja.x6,aguja.y6,color,'edgecolor','none','facealpha',transparencia)

zona4_x1 =
[aguja.x1p,[aguja.x1_ini_p,aguja.x1_ini_obs2],aguja.x1obs_2,[aguja.x1_fin_obs2,aguja.x1_fin_p]];
zona4_y1 =
[aguja.y1p,[aguja.y1_ini_p,aguja.y1_ini_obs2],aguja.y1obs_2,[aguja.y1_fin_obs2,aguja.y1_fin_p]];
fill(zona4_x1,zona4_y1,color,'edgecolor','none','facealpha',transparencia)
fill(aguja.x1obs_2,aguja.y1obs_2,color,'edgecolor','none','facealpha',transparencia)

zona4_x2 =
[aguja.x2p,[aguja.x2_ini_p,aguja.x2_ini_obs2],aguja.x2obs_2,[aguja.x2_fin_obs2,aguja.x2_fin_p]];
zona4_y2 =
[aguja.y2p,[aguja.y2_ini_p,aguja.y2_ini_obs2],aguja.y2obs_2,[aguja.y2_fin_obs2,aguja.y2_fin_p]];
fill(zona4_x2,zona4_y2,color,'edgecolor','none','facealpha',transparencia)
if (switchtype >= 0) & (switchtype <= 60)
fill(aguja.x2obs_2,aguja.y2obs_2,color,'edgecolor','none','facealpha',transparencia)
end

zona4_x3 =
[aguja.x3p,[aguja.x3_ini_p,aguja.x3_ini_obs2],aguja.x3obs_2,[aguja.x3_fin_obs2,aguja.x3_fin_p]];
zona4_y3 =
[aguja.y3p,[aguja.y3_ini_p,aguja.y3_ini_obs2],aguja.y3obs_2,[aguja.y3_fin_obs2,aguja.y3_fin_p]];
fill(zona4_x3,zona4_y3,color,'edgecolor','none','facealpha',transparencia)
fill(aguja.x3obs_2,aguja.y3obs_2,color,'edgecolor','none','facealpha',transparencia)

zona4_x4 =
[aguja.x4p,[aguja.x4_fin_p,aguja.x4_fin_obs2],aguja.x4obs_2,[aguja.x4_ini_obs2,aguja.x4_ini_p]];
zona4_y4 =
[aguja.y4p,[aguja.y4_fin_p,aguja.y4_fin_obs2],aguja.y4obs_2,[aguja.y4_ini_obs2,aguja.y4_ini_p]];
fill(zona4_x4,zona4_y4,color,'edgecolor','none','facealpha',transparencia)
%fill(OLE.x4obs_2,OLE.y4obs_2,color,'edgecolor','none','facealpha',transparencia)

% zona4_x4 =
[OLE.x4p,[OLE.x4p(end),OLE.x4obs_2(end)],OLE.x4obs_2,[OLE.x4obs_2(1),OLE.x4p(1)]]
;
% zona4_y4 =
[OLE.y4p,[OLE.y4p(end),OLE.y4obs_2(end)],OLE.y4obs_2,[OLE.y4obs_2(1),OLE.y4p(1)]]
;
% fill(zona4_x4,zona4_y4,color,'edgecolor','none','facealpha',transparencia)
%
fill(OLE.x4obs_2,OLE.y4obs_2,color,'edgecolor','none','facealpha',transparencia)
```

```

zona4_x5 =
[aguja.x5_ini_obs2,aguja.x5_fin_obs2],[aguja.x5_fin_obs2,aguja.x5_fin_p],...
    [aguja.x5_fin_p,aguja.x5_ini_p],[aguja.x5_ini_p(1),aguja.x5_ini_obs2]];
zona4_y5 =
[aguja.y5_ini_obs2,aguja.y5_fin_obs2],[aguja.y5_fin_obs2,aguja.y5_fin_p],...
    [aguja.y5_fin_p,aguja.y5_ini_p],[aguja.y5_ini_p(1),aguja.y5_ini_obs2]];
fill(zona4_x5,zona4_y5,color,'edgecolor','none','facealpha',transparencia)

zona4_x6 =
[aguja.x6p,[aguja.x6_ini_p,aguja.x6_ini_obs2],aguja.x6obs_2,[aguja.x6_fin_obs2,ag
uja.x6_fin_p]];
zona4_y6 =
[aguja.y6p,[aguja.y6_ini_p,aguja.y6_ini_obs2],aguja.y6obs_2,[aguja.y6_fin_obs2,ag
uja.y6_fin_p]];
fill(zona4_x6,zona4_y6,color,'edgecolor','none','facealpha',transparencia)
fill(aguja.x6obs_2,aguja.y6obs_2,color,'edgecolor','none','facealpha',transparenc
ia)

% Relleno si la aguja es de tipo HV
zonal_hv_x = [datos.pktoe*(10^3), datos.pktoe*(10^3), aguja.x1_ini_obs1,
aguja.x1_ini];
zonal_hv_y = [0, -datos.desviacion_max, aguja.y1_ini_obs1, aguja.y1_ini];
fill(zonal_hv_x,zonal_hv_y,color,'edgecolor','none','facealpha',transparencia)

zona2_hv_x = [datos.pktoe*(10^3), datos.pktoe*(10^3), aguja.x1_ini_p,
aguja.x1_ini_obs2];
zona2_hv_y = [-datos.gauge+datos.desviacion_max, -datos.gauge, aguja.y1_ini_p,
aguja.y1_ini_obs2];
fill(zona2_hv_x,zona2_hv_y,color,'edgecolor','none','facealpha',transparencia)

% EJE

plot([-datos.T+datos.pktoe*(10^3)-datos.limite_ini,
datos.L2+datos.pktoe*(10^3)+datos.limite_fin],[-datos.gauge/2,-datos.gauge/2],'-
.g')

% Eje paralelo a y1
plot(aguja.x1ep,aguja.y1ep,'-.g')
plot(aguja.x1_ini_ep, aguja.y1_ini_ep,'og')
plot(aguja.x1_fin_ep, aguja.y1_fin_ep,'og')

% Eje paralelo a y2
plot(aguja.x2ep,aguja.y2ep,'-.g')
plot(aguja.x2_fin_ep, aguja.y2_fin_ep,'og')

% Eje paralelo a y3
plot(aguja.x3ep,aguja.y3ep,'-.g')

% Eje paralelo a y4
plot(aguja.x4ep,aguja.y4ep,'-.g')

```

```
% Eje paralelo a y5
plot(aguja.x5ep,aguja.y5ep,'-.g')
plot(aguja.x3_fin_ep,aguja.y3_fin_ep,'og')
plot(aguja.x6ep,aguja.y6ep,'-.g')

% Si la aguja es de tipo HV
plot([datos.pktoe*(10^3), aguja.x1_ini_ep],[-datos.gauge/2, aguja.y1_ini_ep],'-
.g');

% % Comprobación de las gráficas
% plot(aguja.x2_ini,aguja.y2_ini,'oy')
% plot(aguja.x2_fin,aguja.y2_fin,'oy')
% plot(aguja.x3_ini,aguja.y3_ini,'om')
% plot(aguja.x3_fin,aguja.y3_fin,'om')
% plot(aguja.x4_ini,aguja.y4_ini,'or')
% plot(aguja.x4_fin,aguja.y4_fin,'or')
% plot(aguja.x5_ini,aguja.y5_ini,'oy')
% plot(aguja.x5_fin,aguja.y5_fin,'oy')
% plot([aguja.xc1,aguja.x1_ini],[aguja.yc1,aguja.y1_ini],'m')
% plot([aguja.xc1,aguja.x1_fin],[aguja.yc1,aguja.y1_fin],'m')
% plot([aguja.xc2,aguja.x2_fin],[aguja.yc2,aguja.y2_fin],'m')
% plot([aguja.xc3,aguja.x3_fin],[aguja.yc3,aguja.y3_fin],'m')
% plot([aguja.xc6,aguja.x6_ini],[aguja.yc6,aguja.y6_ini],'m')
% plot([aguja.xc6,aguja.x6_fin],[aguja.yc6,aguja.y6_fin],'m')

%% Gráfica Línea Aérea de Contacto

% % Si se introducent los numeros a mano
% plot(OLE.x_r1,OLE.y_r1,'oc')
% plot(OLE.x_r2,OLE.y_r2,'oc')
% plot(OLE.x_r3,OLE.y_r3,'oc')
% plot(OLE.x_r4,OLE.y_r4,'oc')
% plot([OLE.x_r1,OLE.x_r2,OLE.x_r3,OLE.x_r4],...
%      [OLE.y_r1,OLE.y_r2,OLE.y_r3,OLE.y_r4],'c')

plot(OLE.x_r,OLE.y_r,'o-c')

% plot(OLE.x_d1,OLE.y_d1,'or')
% plot(OLE.x_d2,OLE.y_d2,'or')
% plot(OLE.x_d3,OLE.y_d3,'or')
% plot(OLE.x_d4,OLE.y_d4,'or')
% plot([OLE.x_d1,OLE.x_d2,OLE.x_d3,OLE.x_d4],...
%      [OLE.y_d1,OLE.y_d2,OLE.y_d3,OLE.y_d4],'r')

plot(OLE.x_d,OLE.y_d,'o-r')

% Si queremos que x e y tengan una relación proporcional
%daspect([1 1 1])

hold off
```

```

end

function [OLE] =
OLE_calculos(descentramiento_r,descentramiento_d,vano,aguja,datos,x_poste_ini_r,x
_poste_fin_r,x_poste_ini_d,x_poste_fin_d,switchtype)
%Función que calcula la línea aérea de contacto

%% Cálculos línea aérea de contacto

% Vía directa
i_fin = round((x_poste_fin_r - x_poste_ini_r)/vano) + 1;
i = 1;

for i = 1 : 1 : i_fin
    if rem(i,2)==0
        OLE.x_r(i) = x_poste_ini_r + (i-1)*vano;
        OLE.y_r(i) = -datos.gauge/2 + descentramiento_r;
    else
        OLE.x_r(i) = x_poste_ini_r + (i-1)*vano;
        OLE.y_r(i) = -datos.gauge/2 - descentramiento_r;
    end
    i = i + 1;
end

% OLE.x_r1 = x_poste_ini_r;
% OLE.y_r1 = -datos.gauge/2 - descentramiento_r;
%
% OLE.x_r2 = (x_poste_fin_r - x_poste_ini_r)*(1/3);
% OLE.y_r2 = -datos.gauge/2 + descentramiento_r;
%
% OLE.x_r3 = (x_poste_fin_r - x_poste_ini_r)*(2/3);
% OLE.y_r3 = -datos.gauge/2 - descentramiento_r;
%
% OLE.x_r4 = x_poste_fin_r;
% OLE.y_r4 = -datos.gauge/2 + descentramiento_r;

% Vía desviada

n_fin = round((x_poste_fin_d - x_poste_ini_d)/vano) + 1;
n = 1;

for n = 1 : 1 : n_fin
    if rem(n,2)==0
        [OLE.x_d(n),OLE.y_d(n)] = puntos_OLE(x_poste_ini_d + (n-
1)*vano,descentramiento_d,aguja,datos,switchtype)
    else
        [OLE.x_d(n),OLE.y_d(n)] = puntos_OLE(x_poste_ini_d + (n-
1)*vano,descentramiento_d,aguja,datos,switchtype)
    end
end

```

```

end
n = n + 1;
end

% x1 = x_poste_ini_d;
% [OLE.x_d1,OLE.y_d1] = puntos_OLE(x1,descentramiento_d,aguja,datos,switchtype)
%
% x2 = (x_poste_fin_d - x_poste_ini_d)*(1/3);
% [OLE.x_d2,OLE.y_d2] = puntos_OLE(x2,-descentramiento_d,aguja,datos,switchtype)
%
% x3 = (x_poste_fin_d - x_poste_ini_d)*(2/3);
% [OLE.x_d3,OLE.y_d3] = puntos_OLE(x3,descentramiento_d,aguja,datos,switchtype)
%
% x4 = x_poste_fin_d;
% [OLE.x_d4,OLE.y_d4] = puntos_OLE(x4,-descentramiento_d,aguja,datos,switchtype)

end

function [px,py] = puntos_OLE(x,descentramiento,aguja,datos,switchtype)
%UNTITLED2 Summary of this function goes here
% Detailed explanation goes here

if (x <= aguja.x1_ini_ep)

    px = x;
    py = -datos.gauge/2 + descentramiento;

elseif (x > aguja.x1_ini_ep) & (x <= aguja.x1_fin_ep)

    if (switchtype > 60) & (switchtype <= 84)
        if (x < aguja.x_c)
            px = x + descentramiento*sind(datos.entryangled);
            py = -tand(datos.entryangled)*x + ...
                (aguja.y1_ini_ep + tand(datos.entryangled)*aguja.x1_ini_ep) +...
                + descentramiento*cosd(datos.entryangled);
        else
            ang = acosd((datos.R2-(12-3))/datos.R2);
            px = x + descentramiento*sind(ang);
            k1 = min(find(aguja.x1ep>x & aguja.x1ep<x+500));
            py = aguja.y1ep(k1) + descentramiento*cosd(ang);
        end
    else
        theta = acosd((x - aguja.xc1)/(datos.R1-datos.gauge/2));
        px = (datos.R1-datos.gauge/2 + descentramiento)*cosd(theta) + aguja.xc1;
        py = (datos.R1-datos.gauge/2 + descentramiento)*sind(theta) + aguja.yc1;
    end

elseif (x > aguja.x2_ini_ep) & (x <= aguja.x2_fin_ep)

    theta = acosd((x - aguja.xc2)/(datos.R2-datos.gauge/2));

```

```

    px = (datos.R2-datos.gauge/2 + descentramiento)*cosd(theta) + aguja.xc2;
    py = (datos.R2-datos.gauge/2 + descentramiento)*sind(theta) + aguja.yc2;

elseif (x > aguja.x3_ini_ep) & (x <= aguja.x3_fin_ep)

    theta = acosd((x - aguja.xc3)/(datos.R3-datos.gauge/2));
    px = (datos.R3-datos.gauge/2 + descentramiento)*cosd(theta) + aguja.xc3;
    py = (datos.R3-datos.gauge/2 + descentramiento)*sind(theta) + aguja.yc3;

elseif (x > aguja.x4_ini_ep) & (x <= aguja.x4_fin_ep)

    px = x + descentramiento*sind(datos.crossingangled);
    k4 = min(find(aguja.x4ep>x & aguja.x4ep<x+500));
    py = aguja.y4ep(k4) + descentramiento*cosd(datos.crossingangled);

elseif (x > aguja.x5_ini_ep) & (x <= aguja.x5_fin_ep)

    px = x + descentramiento*sind(datos.crossingangled);
    py = -tand(datos.crossingangled)*x + ...
        (aguja.y5_ini_ep + tand(datos.crossingangled)*aguja.x5_ini_ep) +...
        + descentramiento*cosd(datos.crossingangled);

elseif (x > aguja.x6_ini_ep)

    theta = acosd((x - aguja.xc6)/(datos.R2-datos.gauge/2));
    px = (datos.R2-datos.gauge/2 + descentramiento)*cosd(theta) + aguja.xc6;
    py = (datos.R2-datos.gauge/2 + descentramiento)*sind(theta) + aguja.yc6;

end

end

function [x,y] =
transition_R_Str(longitud,R,x_ini,y_ini,x_fin,y_fin,crossingangled)
%Transition
% Función de la transición entre una curva y una línea recta

gamma = atand(-(y_fin-y_ini)/longitud);
theta = crossingangled - gamma;
dist = longitud/cosd(gamma);
L = cosd(theta)*dist;

x1 = linspace(0,L);
y1 = - (L-x1).^3/(6*R*L);

px = x_fin - L*cosd(crossingangled);
py = y_fin + L*sind(crossingangled);

alfa = -crossingangled;

```

```
x = px + x1*cosd(alfa) - y1*sind(alfa);
y = py + y1*cosd(alfa) + x1*sind(alfa);

end
```

```
function [xp,yp,x_ini_p,y_ini_p,x_fin_p,y_fin_p] =
transition_paralela(distancia,transition,R,x_fin,y_fin,crossingangled,xant_fin_p,
yant_fin_p)
%Transition paralela
% Función paralela a la de transición conociendo la distancia que las
% separa

x_ini_p = xant_fin_p;
y_ini_p = yant_fin_p;

x_fin_p = x_fin + (distancia)*sind(crossingangled);
y_fin_p = y_fin + (distancia)*cosd(crossingangled);

[xp,yp] =
transition_R_Str(transition,R,x_ini_p,y_ini_p,x_fin_p,y_fin_p,crossingangled);

end
```

```
function [xp,yp,x_ini_p,y_ini_p,x_fin_p,y_fin_p] =
recta_paralela(distancia,x_fin,y_fin,theta_ini,xant_fin_p,yant_fin_p)
%UNTITLED7 Summary of this function goes here
% Detailed explanation goes here

% Puntos significativos curva paralela a y5 (linea recta)
x_ini_p = xant_fin_p;
y_ini_p = yant_fin_p;
x_fin_p = x_fin + (distancia)*sind(theta_ini);
y_fin_p = y_fin + (distancia)*cosd(theta_ini);
% Si a partir de IP la vía es recta, y5 sería:
xp = linspace(x_ini_p, x_fin_p);
yp = -tand(theta_ini)*xp + (yant_fin_p + tand(theta_ini)*xant_fin_p);

end
```

```
function [xlp,ylp,xl_ini_p,yl_ini_p,xl_fin_p,yl_fin_p] =
recta_clotoide_paralela_1(distancia,entryangled,xl_ini,yl_ini,x_c,y_c,R2,x_a,y_a)
%Paralela a y1 en los tipos de aguja NR60
% Paralela a la zona 1, recta y clotoide, conociendo la distancia

xl_ini_p = xl_ini;
yl_ini_p = yl_ini + (distancia);

xlr_fin_p = x_c + (distancia)*sind(entryangled);
```

```

ylr_fin_p = y_c + (distancia)*cosd(entryangled);

x_ap = x_a;
y_ap = distancia;

[xlp,ylp] =
recta_clotoide_1(entryangled,xl_ini_p,yl_ini_p,xlr_fin_p,ylr_fin_p,R2-
distancia,x_ap,y_ap);

xl_fin_p = xlp(end);
yl_fin_p = ylp(end);

end

function [xl,y1] = recta_clotoide_1(entryangled,xl_ini,yl_ini,x_c,y_c,R2,x_a,y_a)
%Curva en la zona 1, tipo de aguja NR60
% La primera parte es una recta y la segunda una clotoide

[xlr,ylr] = recta(xl_ini,yl_ini,x_c,entryangled);

ang = acosd((R2-(12-3))/R2);
L = ang*pi*R2/90;
A = sqrt(R2*L);

sc = sqrt( entryangled*2*R2*L * (pi/180) );

s = linspace(sc,L);
xlcl = A*sqrt(pi)*fresnelc(s/(sqrt(pi)*A)) + x_a;
ylcl = - A*sqrt(pi)*fresnels(s/(sqrt(pi)*A)) + y_a;

xl = [xlr,xlcl];
y1 = [ylr,ylcl];

end

function [x,y] = recta(x_ini,y_ini,x_fin,theta_ini)
%Recta
% Recta a partir de el punto inicial y final, y el ángulo con la
% horizontal desde el punto inicial
x = linspace(x_ini, x_fin);
y = -tand(theta_ini)*x + (y_ini + tand(theta_ini)*x_ini);
end

function [xp,yp,x_ini_p,y_ini_p,x_fin_p,y_fin_p] =
curva_paralela(distancia,R,theta,theta_ini,theta_fin,xc,yc,x_ini,y_ini,x_fin,y_fi
n)
%Curva paralela
% Paralela a y1 y sus puntos característicos a partir de los datos de la
% curva y la distancia a la que es paralela

```

```

xp = (R+distancia)*cosd(theta) + xc;
yp = (R+distancia)*sind(theta) + yc;
% Puntos significativos curva paralela a y1
x_ini_p = x_ini + (distancia)*cosd(theta_ini);
y_ini_p = y_ini + (distancia)*sind(theta_ini);
x_fin_p = x_fin + (distancia)*cosd(theta_fin);
y_fin_p = y_fin + (distancia)*sind(theta_fin);

end

function [x,y,theta] = curva(R,theta_ini,theta_fin,xc,yc)
%Curva
% Curva a partir del radio, centro y los límites
theta = linspace(theta_fin,theta_ini);
x = R*cosd(theta) + xc;
y = R*sind(theta) + yc;
end

function [x,y] = clotoide_R_Str(L,R,x_fin,y_fin,crossingangled)
%Curva de transición clotoide entre una curva y una recta
% Con la longitud de la transición, los puntos inicial y final, el radio
% de la curva y el ángulo de la recta final

A = sqrt(R*L);
s = linspace(0,L);
x1 = A*sqrt(pi)*fresnelc(s/(sqrt(pi)*A));
y1 = A*sqrt(pi)*fresnels(s/(sqrt(pi)*A));

alfa = 180-crossingangled;

x = x_fin + x1*cosd(alfa) - y1*sind(alfa);
y = y_fin + y1*cosd(alfa) + x1*sind(alfa);

% x1_ini = 0;
% x1_fin = L-(L.^5/(40*(R*L).^2));
% longitud = x1_fin - x1_ini;
%
% x1 = linspace(x1_ini,x1_fin);
% y1 = 1/R * ( ((x1).^4/(4*longitud.^2)) - ((x1).^5/(10*longitud.^3)) );
%
% px = x_fin;
% py = y_fin;
% alfa = 180-crossingangled;
% x = px + x1*cosd(alfa) - y1*sind(alfa);
% y = py + y1*cosd(alfa) + x1*sind(alfa);

end

```

```
function [xp,yp,x_ini_p,y_ini_p,x_fin_p,y_fin_p] =
clotoide_paralela(distancia,L,R,x_fin,y_fin,crossingangled,xant_fin_p,yant_fin_p)
%Transition paralela, clotoide
% Función paralela a la de transición conociendo la distancia que las
% separa

x_ini_p = xant_fin_p;
y_ini_p = yant_fin_p;

x_fin_p = x_fin + (distancia)*sind(crossingangled);
y_fin_p = y_fin + (distancia)*cosd(crossingangled);

[xp,yp] = clotoide_R_Str(L,R-distancia,x_fin_p,y_fin_p,crossingangled);

end

function [xc,yc] = centro_circunf(R,angulo,x1,y1)
%Función que da el centro de una circunferencia
% Con el radio de la curva, un punto y el ángulo de este punto con la
% vía se conoce el centro de la curva
xc = x1 - R*sind(angulo);
yc = y1 - R*cosd(angulo);
end

function [theta_ini,theta_fin] = angulos_limite(R,x_ini,x_fin,xc)
%Ángulo de inicio y final de la curva de radio R
% Ángulo de inicio y final de la curva de radio R, de la x inicial y
% final, y de la x del centro de la circunferencia
theta_ini = acosd((x_ini - xc)/R);
theta_fin = acosd((x_fin - xc)/R);
end

function [angulogrados] = angulo_xing_a_grados(anguloN)
%Esta función pasa el ángulo N a grados
% El ángulo se pasa de medirse en N (Xing) estar en grados
angulogrados = 2*atand(1/(2*anguloN));
end
```

ANEXO II REPRESENTACIÓN DE AGUJAS

Representación agujas

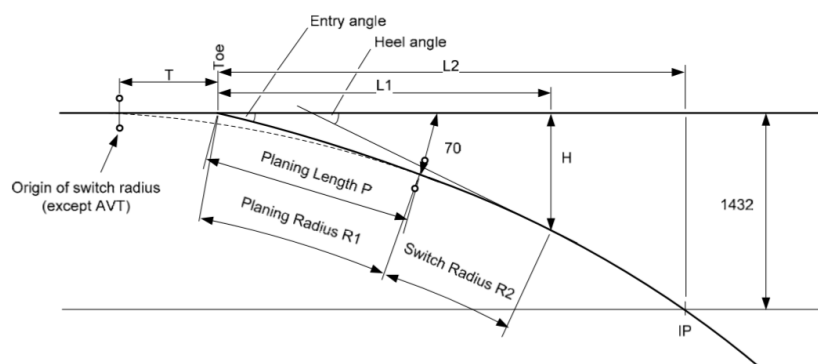
Las agujas se han representado en función de la norma inglesa, siguiendo como referencia el Track Design Handbook: NR/L3/TRK/2049/mod03.

A continuación, se muestran todas las representaciones de agujas.

CEN56E1 Vertical S&C Switch Details [ASSE16]

Tabla 21 CEN56E1 Vertical s&c switch details [ASSE16]

MATLAB switchtype	Switch type	Natural angle 1 in	Turnout Speed mph	Length of planing P	Planing radius R1	Switch radius R2	Toe to origin of switch curve T	Lead length. Toe to IP L2	Heel offset H	Toe to heel L1	Heel angle 1 in	Entry angle 1 in
3	AV	7	20	2900	196750,16	141052	1542,98208	18505	278,53865	7317	15,904403	59,669887
0	AVT	8		2900	196750,16	186937	2988,02322	20288	219,55314	6527	19,63374	59,669886
9	BV	8	20	3500	230724,78	184012	1574,84848	21337	289,16004	8737	17,830694	80,586548
14	CV	9,25	25	4250	287251,45	245767	1615,10392	24877	372,99182	11920	18,143969	110,266503
21	DV	10,75	30	5200	367038,3	331687	1613,80233	29174	297,8683	12440	23,590631	156,854444
26	EV	15	40	7000	739696,3	645116	2503,06229	40457	302,69882	17257	32,639808	189,84682
31	FV	18,5	50	8550	1137066,68	980920	3168,39649	49816	293,04404	20807	40,907497	225,888333
35	SGV	21	60	10150	1398518,18	1263740	3150,9519	56993	299,41963	24357	45,935453	306,055765
39	GV	24	70	11600	1826293,27	1650380	3600,16188	65136	300,77672	27907	52,376332	349,842595
43	HV	32,3649	90	17495	3000716	3000716	3000,35326	89693	291,75251	38843	71,709978	500,059376



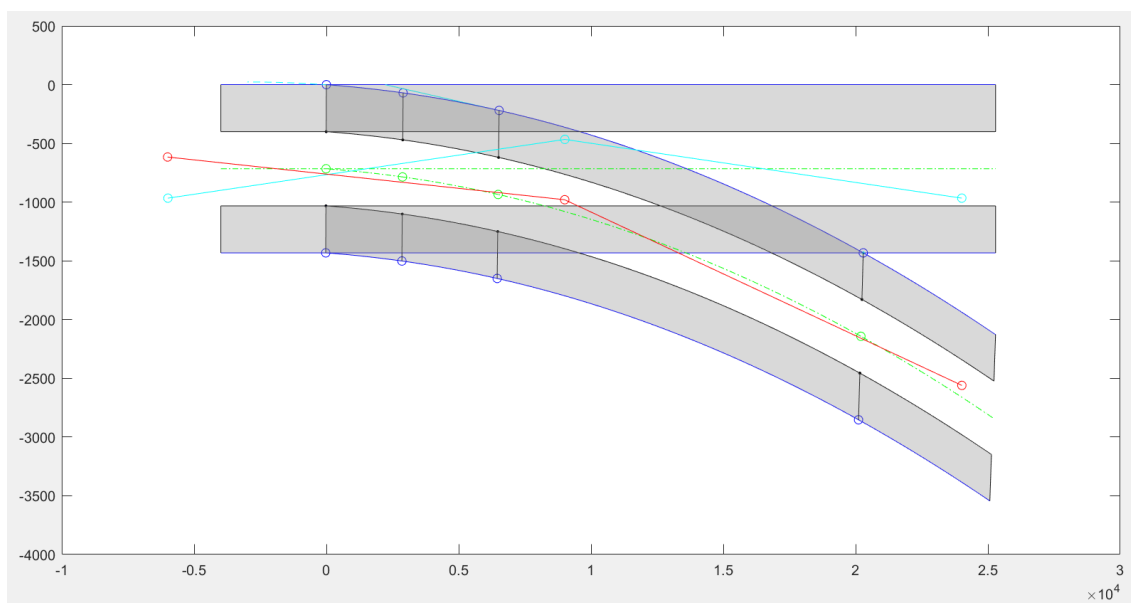


Figura 119 Switchtype = 0, CEN56E1 AVT

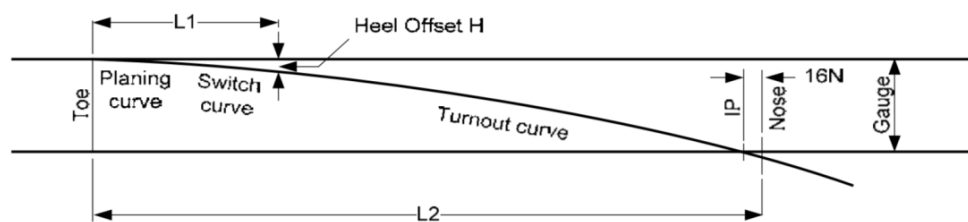
El resto de las figuras correspondientes a esta tabla se muestran en la siguiente tabla, son los casos en los que el R1 (switch radius) es igual a R2 (turnout radius).

CEN56E1 Vertical S&C, Standard Circular Curve Turnouts [ASSE16]

Tabla 22 CEN56E1 Vertical s&c, standard circular curve turnouts [ASSE16]

MATLAB switchtype	Switch	Crossing 1 in ~	Lead L2. Nose to toe	Planing radius	Switch radius	Turnout radius	Toe to heel L1	Heel H	Max turnout speed [A] mph. See note 6	Max turnout speed [B] mph. See note 7
1	AV	6	17437	196750	141052	97599	7317	279	15	
2		6,5	18040	196750	141052	117821	7317	279	15	
3		7	18617	196750	141052	141052	7317	279	20	
4		7,5	19170	196750	141052	167780	7317	279	20	
5		8	19700	196750	141052	198620	7317	279	20	
6		9,25	20934	196750	141052	299450	7317	279	20	
7	BV	7	20315	230725	184012	133185	8737	289	20	
8		7,5	20901	230725	184012	157024	8737	289	20	
9		8	21465	230725	184012	184012	8737	289	20	
10		9,25	22785	230725	184012	268573	8737	289	20	
11		10	23520	230725	184012	344544	8737	289	20	

12		10,75	24218	230725	184012	416918	8737	289	20	
13		8	23787	287251	245767	169051	11920	373	20	
14		9,25	25025	287251	245767	245767	11920	373	25	
15		10	25716	287251	245767	305201	11920	373	25	
16		10	25117	287251	245767	245767	11920	373	25	
17		10,75	26371	287251	245767	378263	11920	373	25	
18		13	28152	287251	245767	737191	11920	373	25	
19		9,25	27642	367038	331687	230112	12440	298	25	
20		10	28513	367038	331687	277328	12440	298	25	
21		10,75	29346	367038	331687	331687	12440	298	30	25
22		13	31644	367038	331687	551575	12440	298	30	
23		13	29940	367038	331687	331687	12440	298	25	
24		15	33464	367038	331687	858076	12440	298	30	
25		13	38451	739696	645116	454448	17257	303	35	30
26		15	40697	739696	645116	645116	17257	303	40	35
27		16	41752	739696	645116	762010	17257	303	40	35
28		18,5	44211	739696	645116	1139974	17257	303	40	
29		21	46444	739696	645116	1700938	17257	303	40	
30		16	47252	1137067	980920	689242	20807	293	45	35
31		18,5	50112	1137067	980920	980920	20807	293	50	40
32		21	52743	1137067	980920	1363999	20807	293	50	45
33		24	55638	1137067	980920	2001909	20807	293	50	
34		18,5	54518	1398518	1263740	926126	24357	299	50	40
35		21	57329	1398518	1263740	1263740	24357	299	60	40
36		24	60441	1398518	1263740	1795616	24357	299	60	50
37		28	64202	1398518	1263740	2827066	24357	299	50	
38		21	62149	1826293	1650380	1189637	27907	301	55	40
39		24	65520	1826293	1650380	1650380	27907	301	70	45
40		28	69628	1826293	1650380	2484540	27907	301	70	55
41		32,365	73676	1826293	1650380	3835055	27907	301	55	
42		28	85208	3000716	3000716	2110303	38843	292	75	50
43		32,365	90211	3000716	3000716	3000716	38843	292	90	55



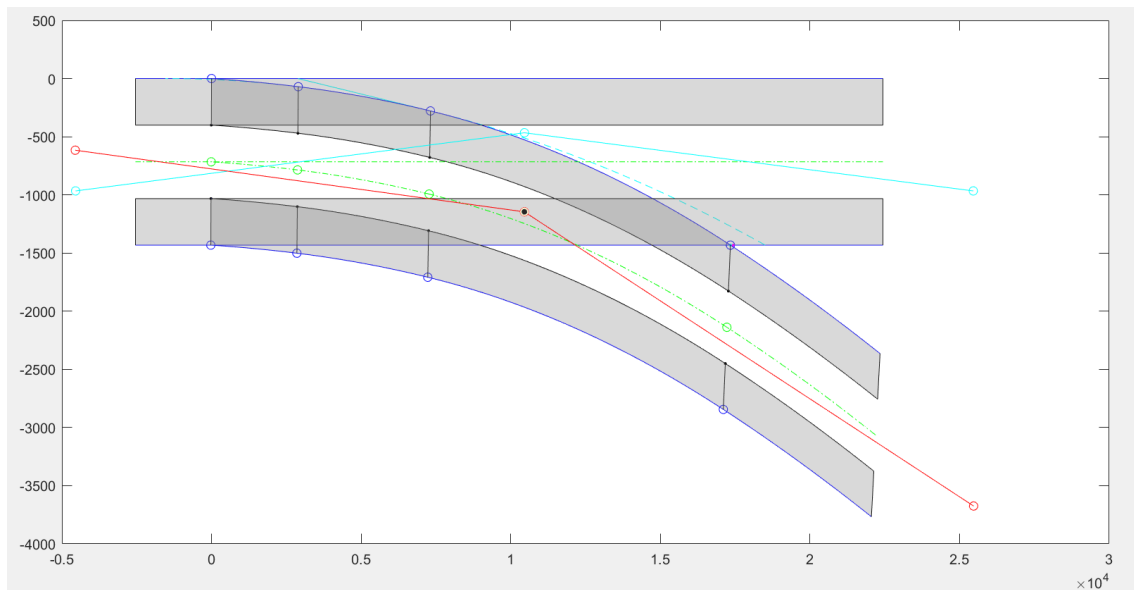


Figura 120 Switchtype = 1, CEN56E1 AV, crossing 1 in 6

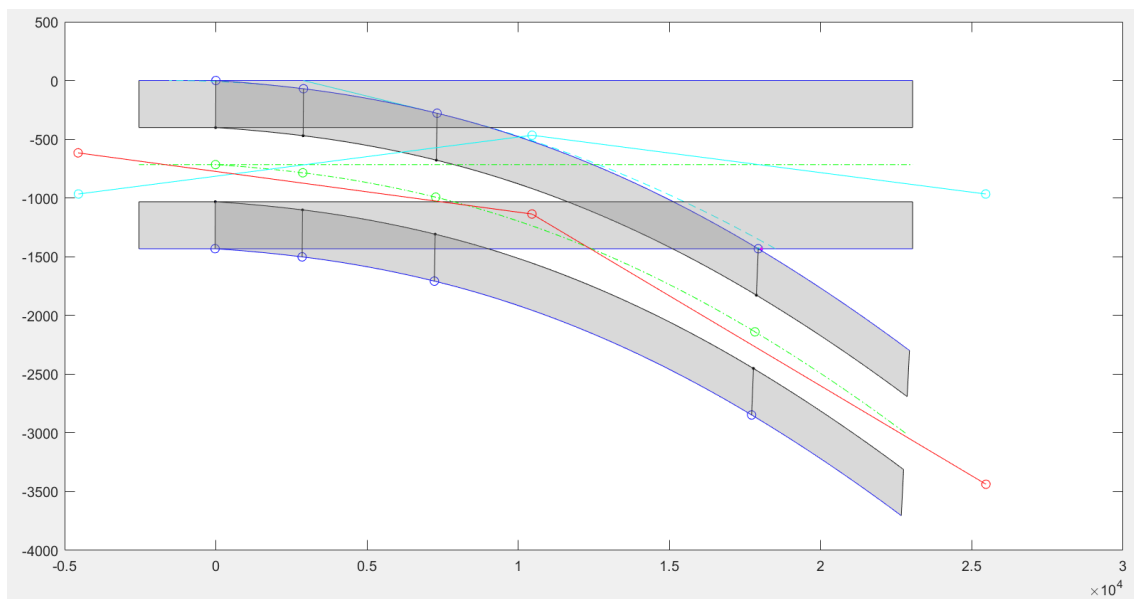


Figura 121 Switchtype = 2, CEN56E1 AV, crossing 1 in 6,5

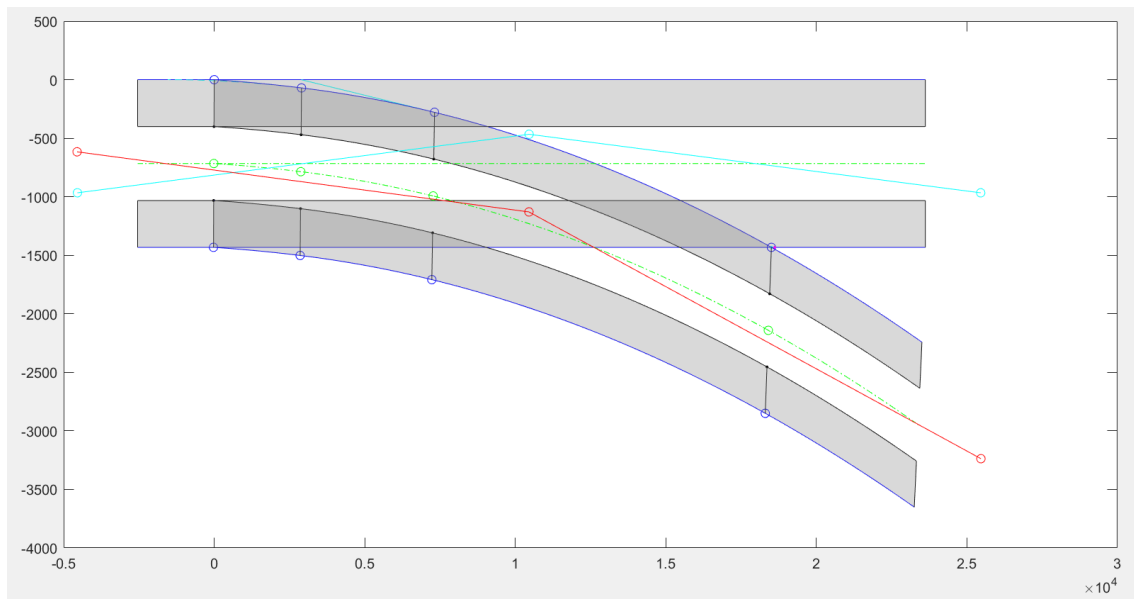


Figura 122 Switchtype = 3, CEN56E1 AV, crossing 1 in 7

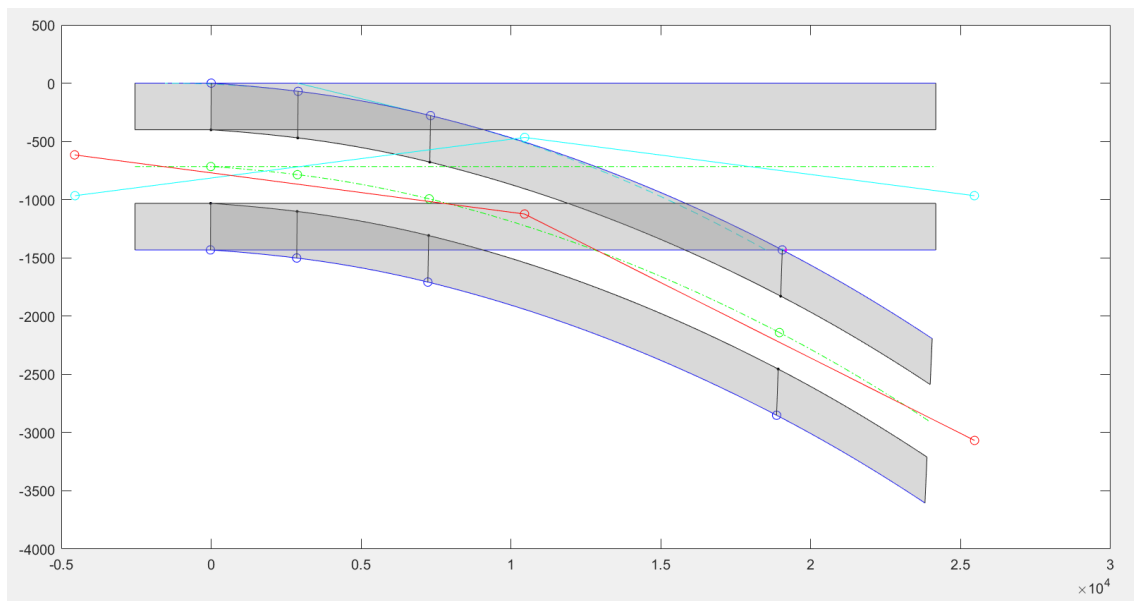


Figura 123 Switchtype = 4, CEN56E1 AV, crossing 1 in 7,5

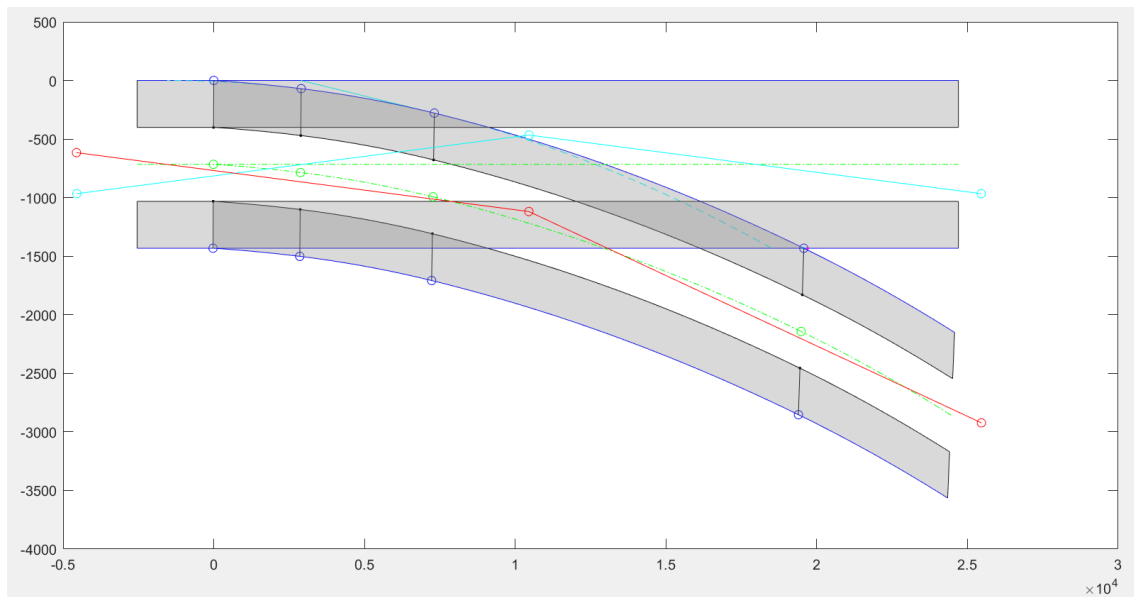


Figura 124 Switchtype = 5, CEN56E1 AV, crossing 1 in 8

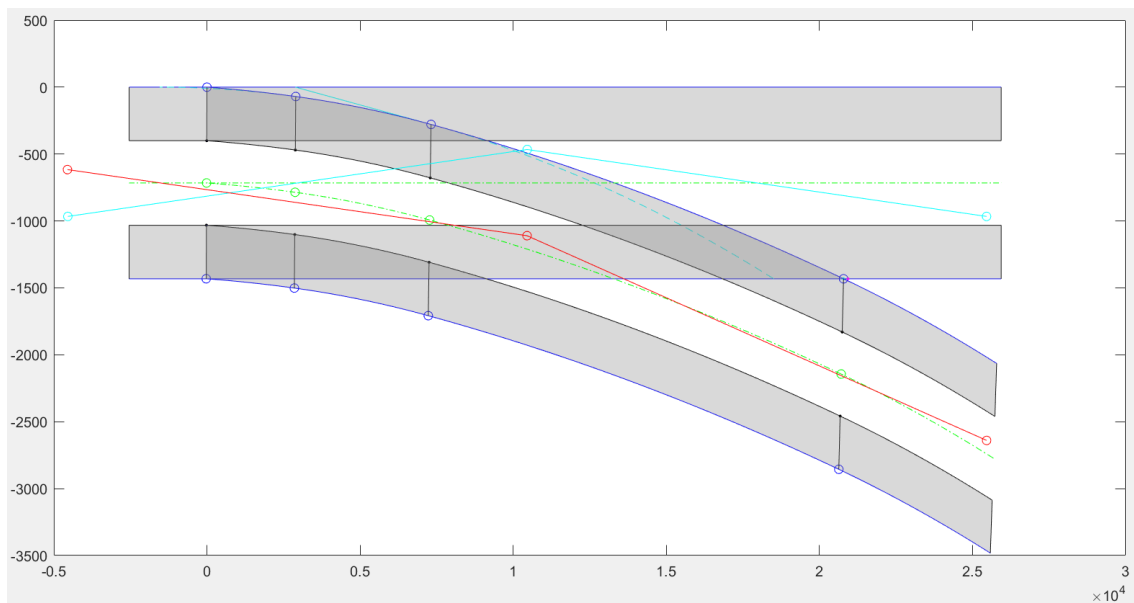


Figura 125 Switchtype = 6, CEN56E1 AV, crossing 1 in 9,25

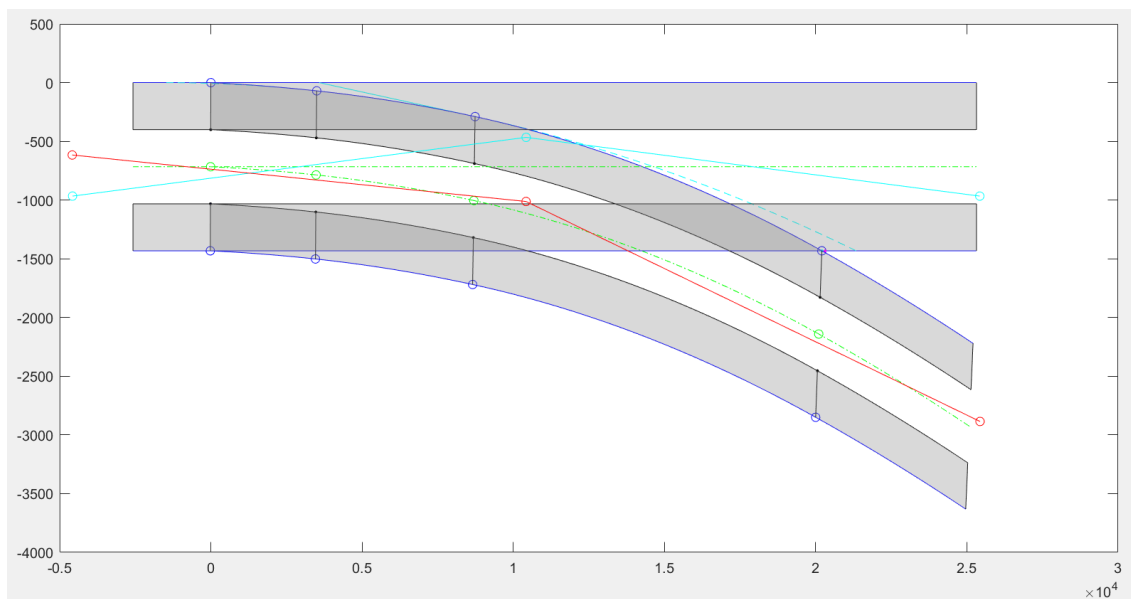


Figura 126 Switchtype = 7, CEN56E1 BV, crossing 1 in 7

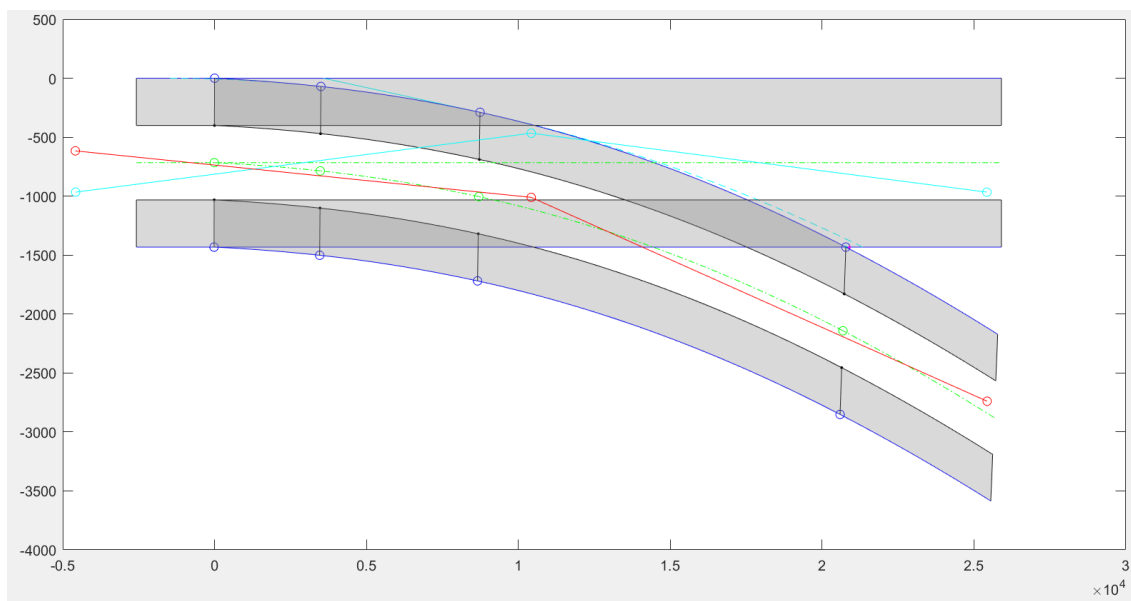


Figura 127 Switchtype = 8, CEN56E1 BV, crossing 1 in 7,5

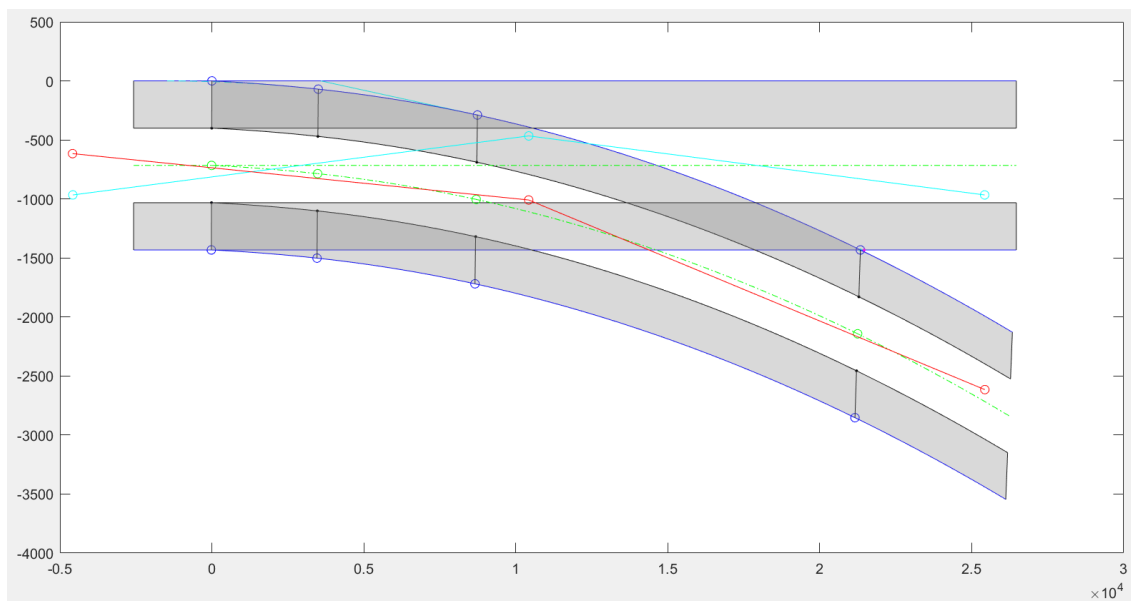


Figura 128 Switchtype = 9, CEN56E1 BV, crossing 1 in 8

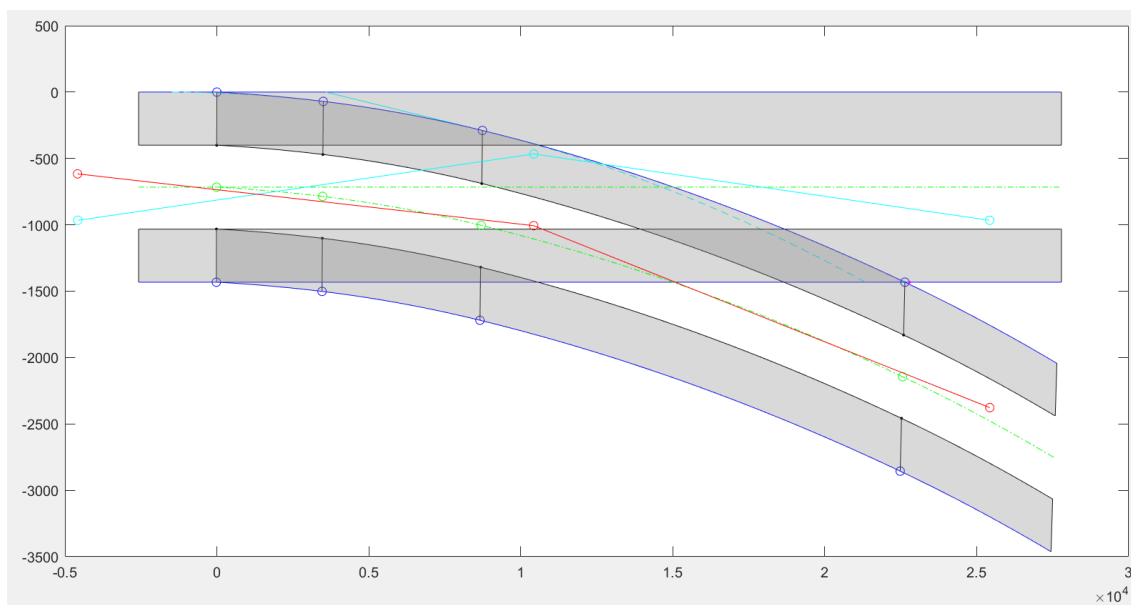


Figura 129 Switchtype = 10, CEN56E1 BV, crossing 1 in 9,25

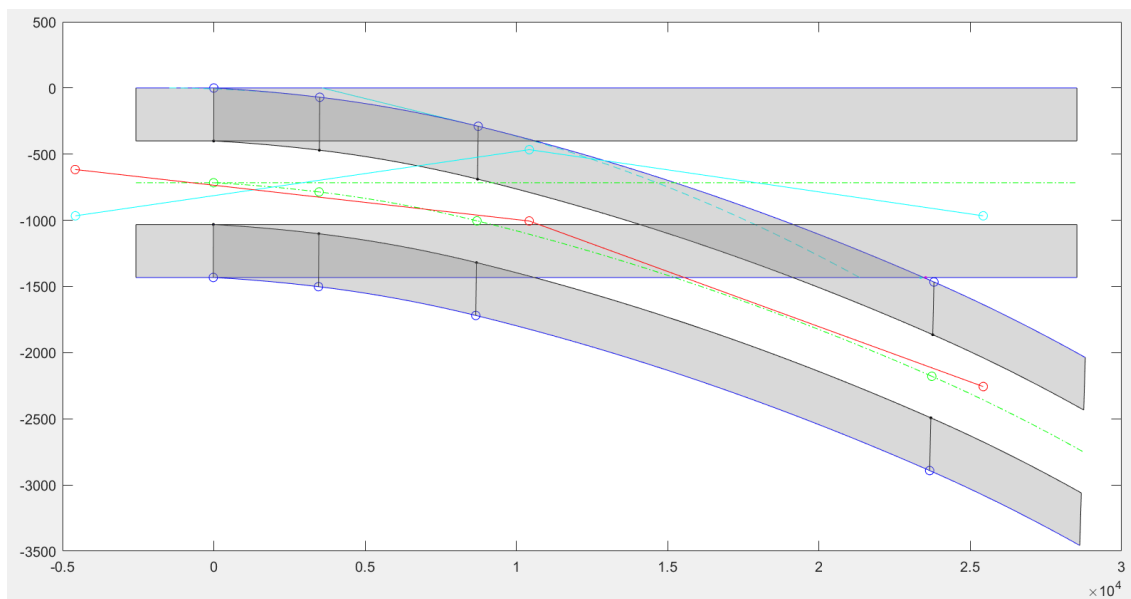


Figura 130 Switchtype = 11, CEN56E1 BV, crossing 1 in 10

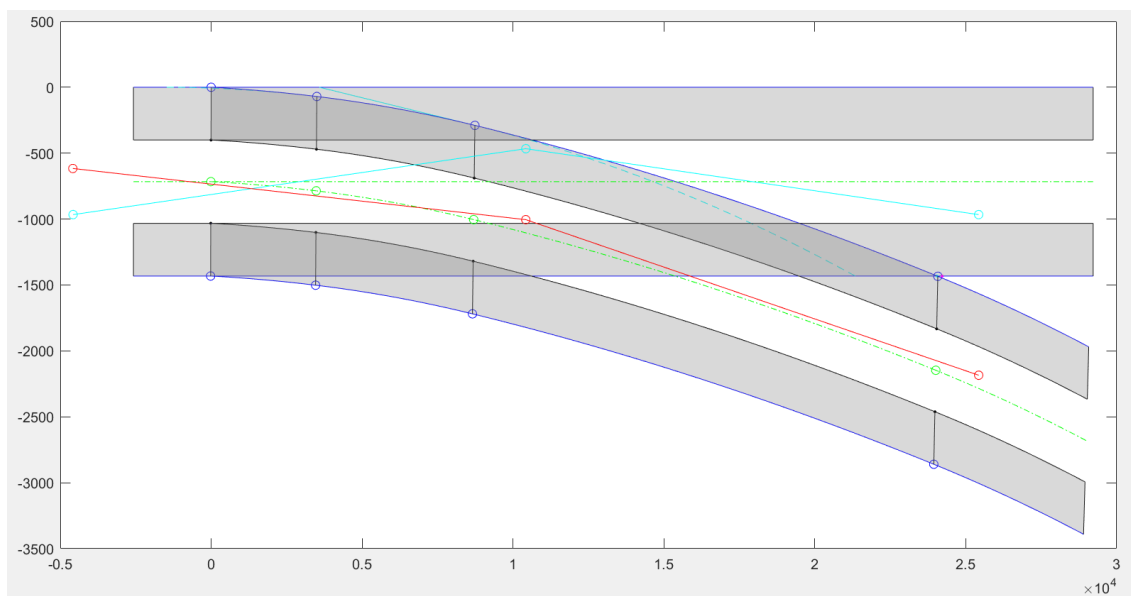


Figura 131 Switchtype = 12, CEN56E1 BV, crossing 1 in 10,75

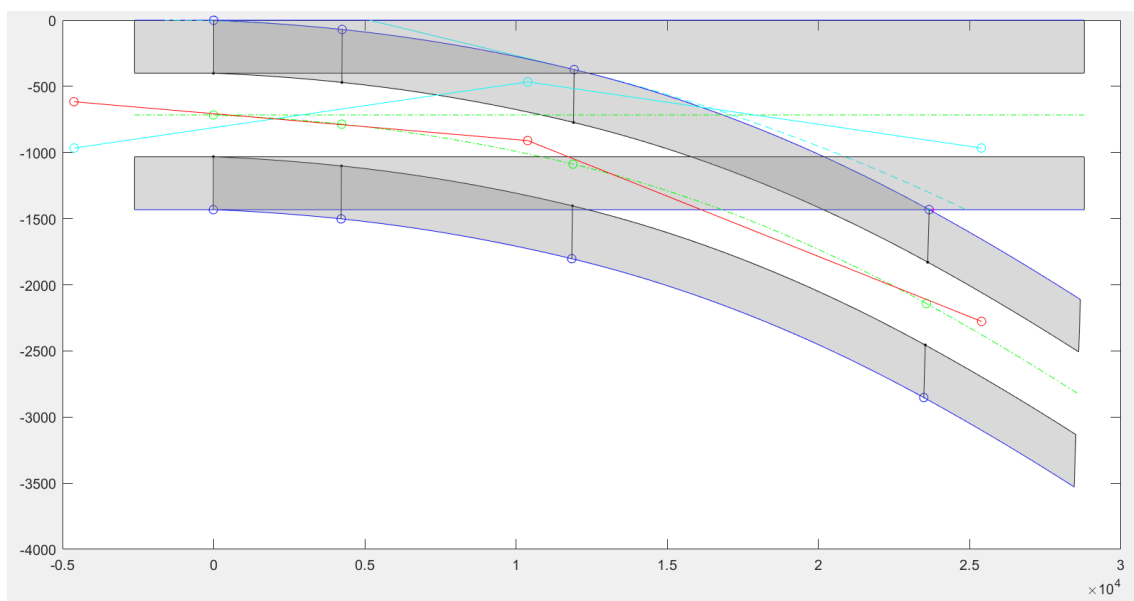


Figura 132 Switchtype = 13, CEN56E1 CV, crossing 1 in 8

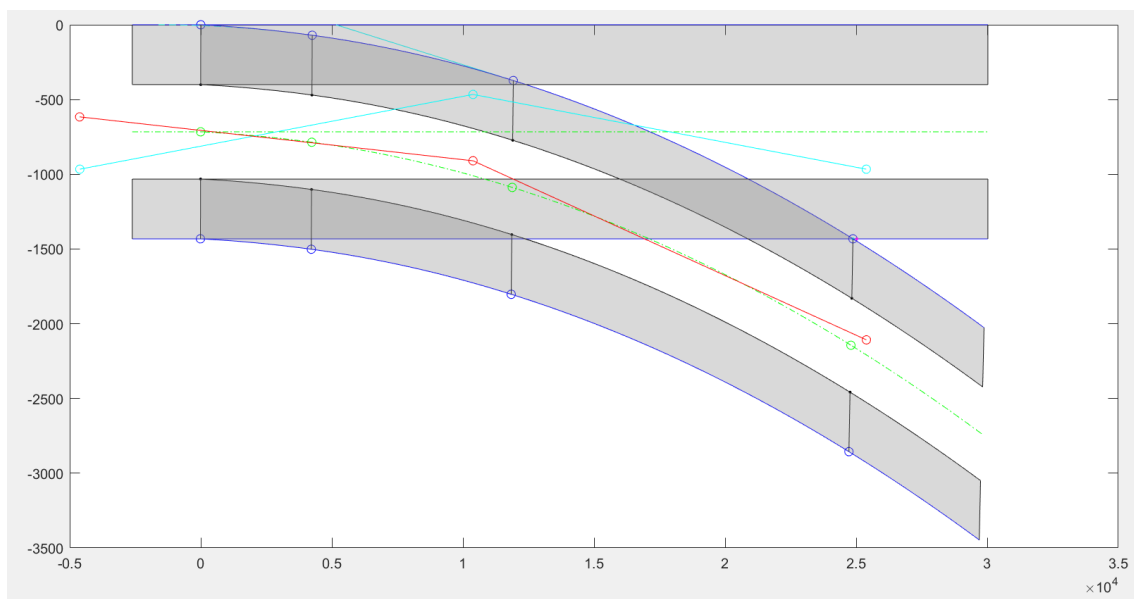


Figura 133 Switchtype = 14, CEN56E1 CV, crossing 1 in 9,25

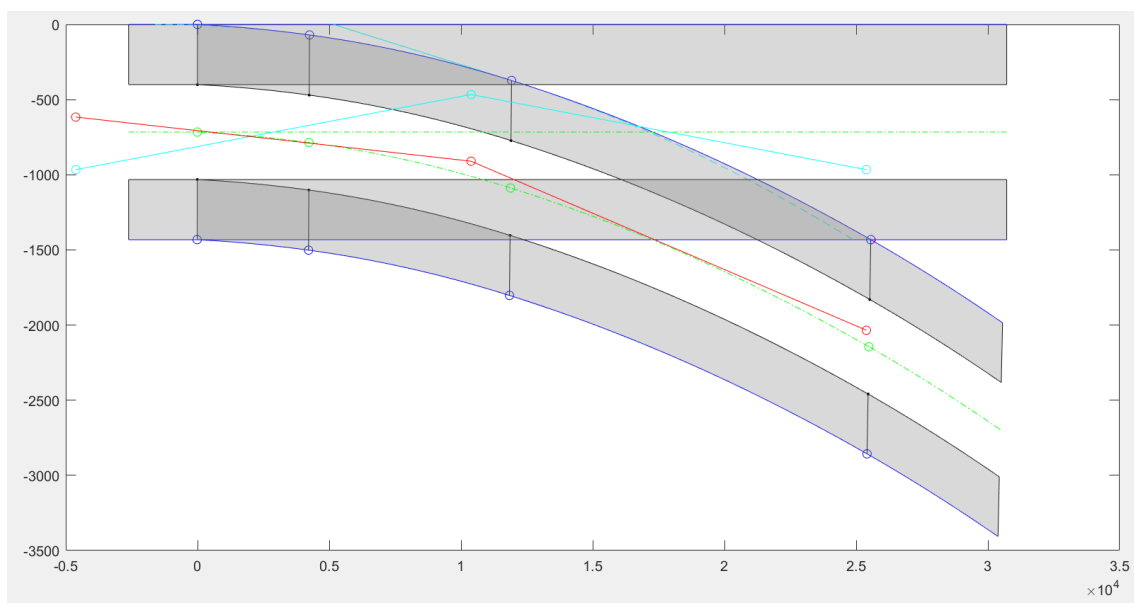


Figura 134 Switchtype = 15, CEN56E1 CV, crossing 1 in 10

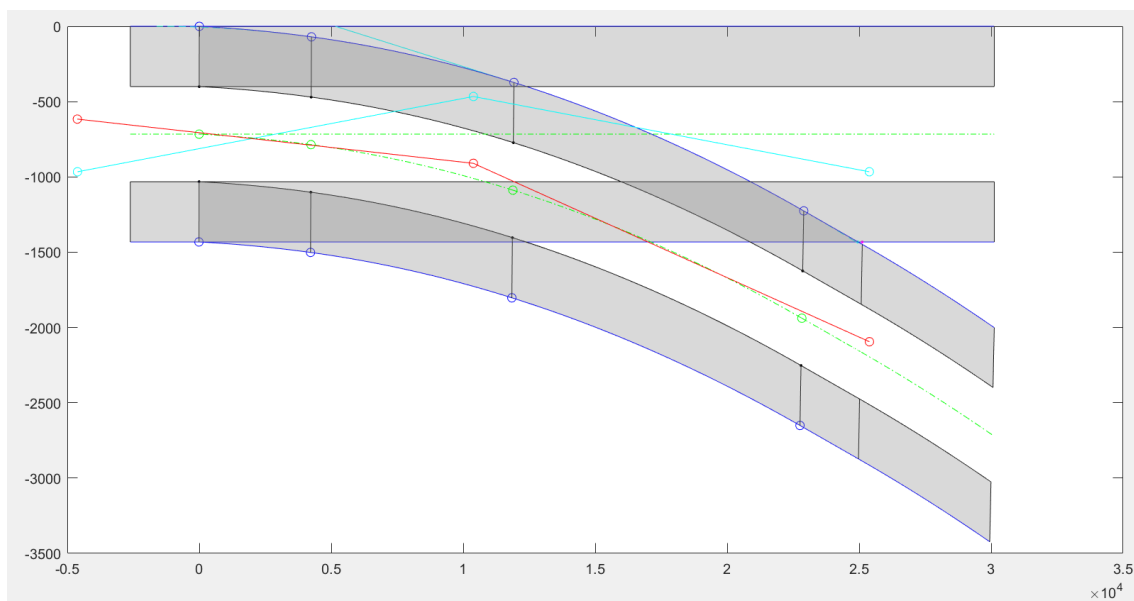


Figura 135 Switchtype = 16, CEN56E1 CV, crossing 1 in 10

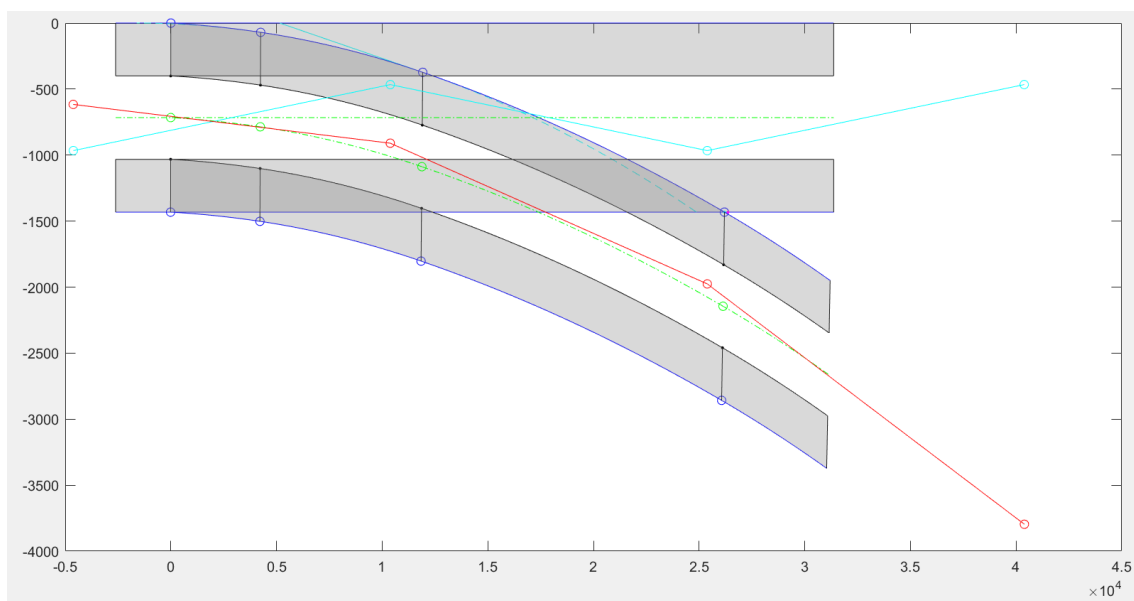


Figura 136 Switchtype = 17, CEN56E1 CV, crossing 1 in 10,75

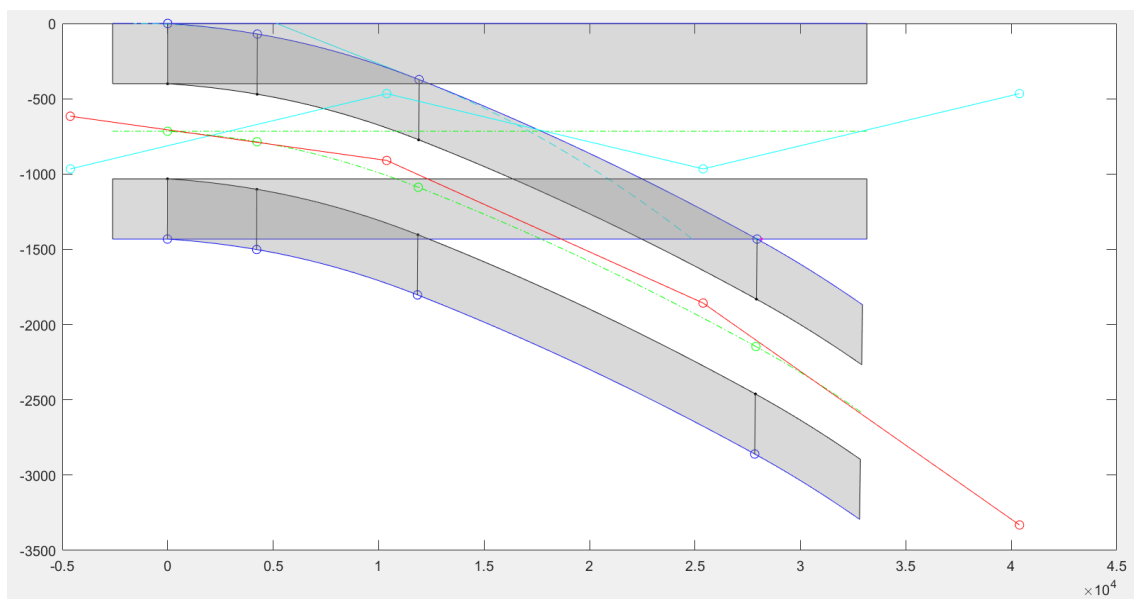


Figura 137 Switchtype = 18, CEN56E1 CV, crossing 1 in 13

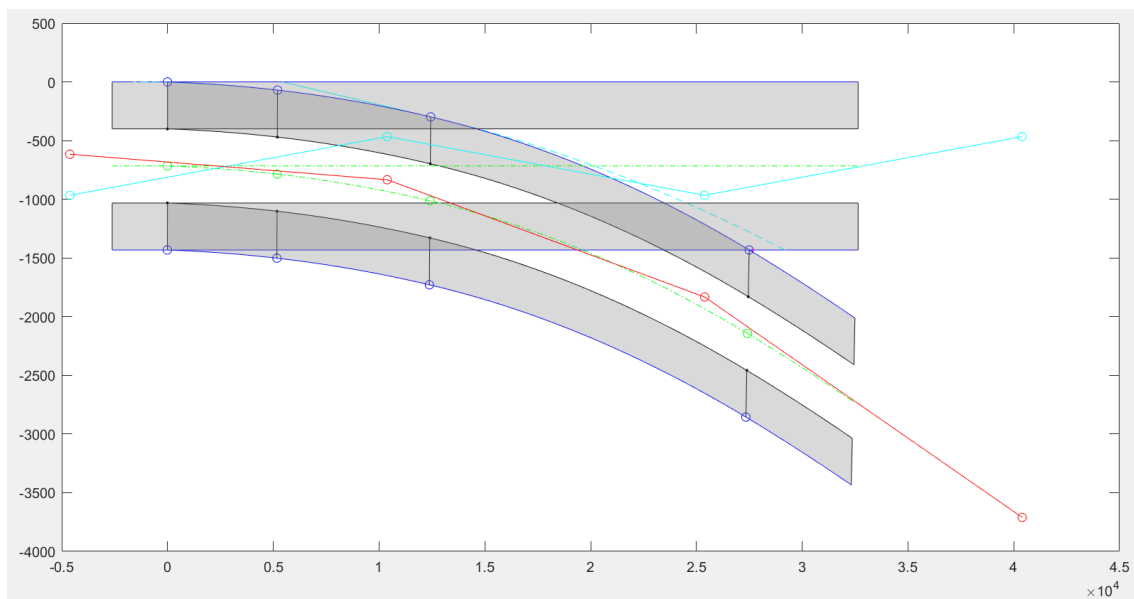


Figura 138 Switchtype = 19, CEN56E1 DV, crossing 1 in 9,25

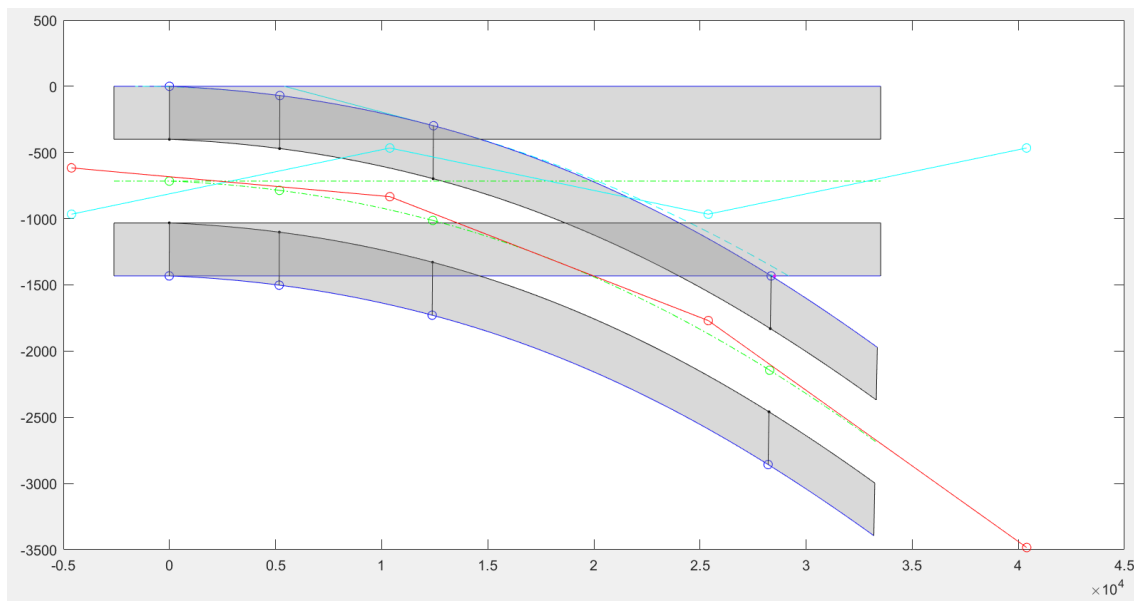


Figura 139 Switchtype = 20, CEN56E1 DV, crossing 1 in 10

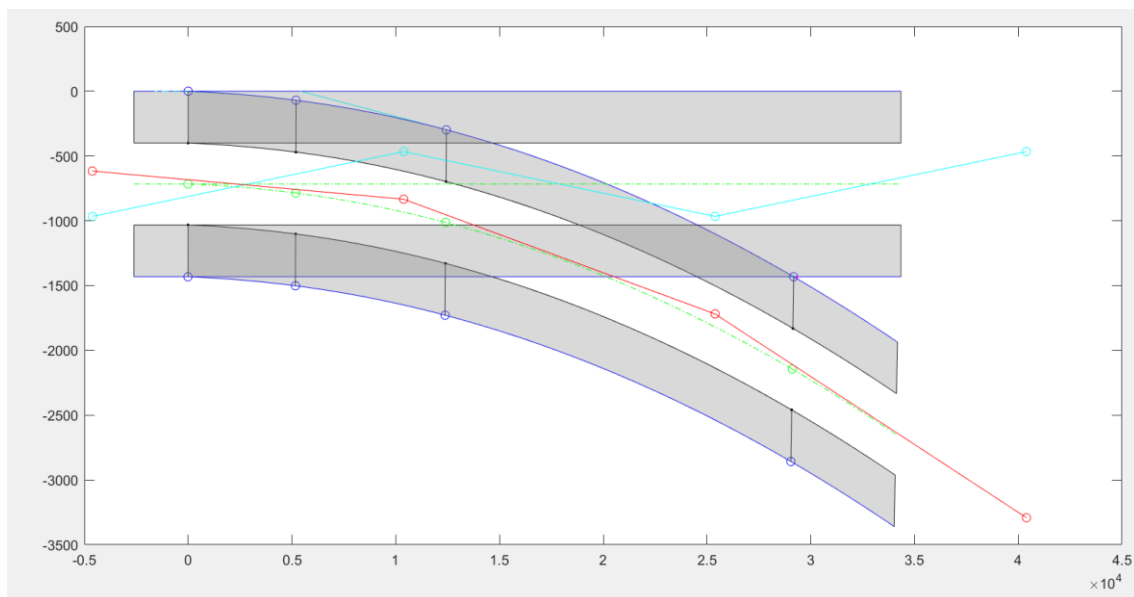


Figura 140 Switchtype = 21, CEN56E1 DV, crossing 1 in 10,75

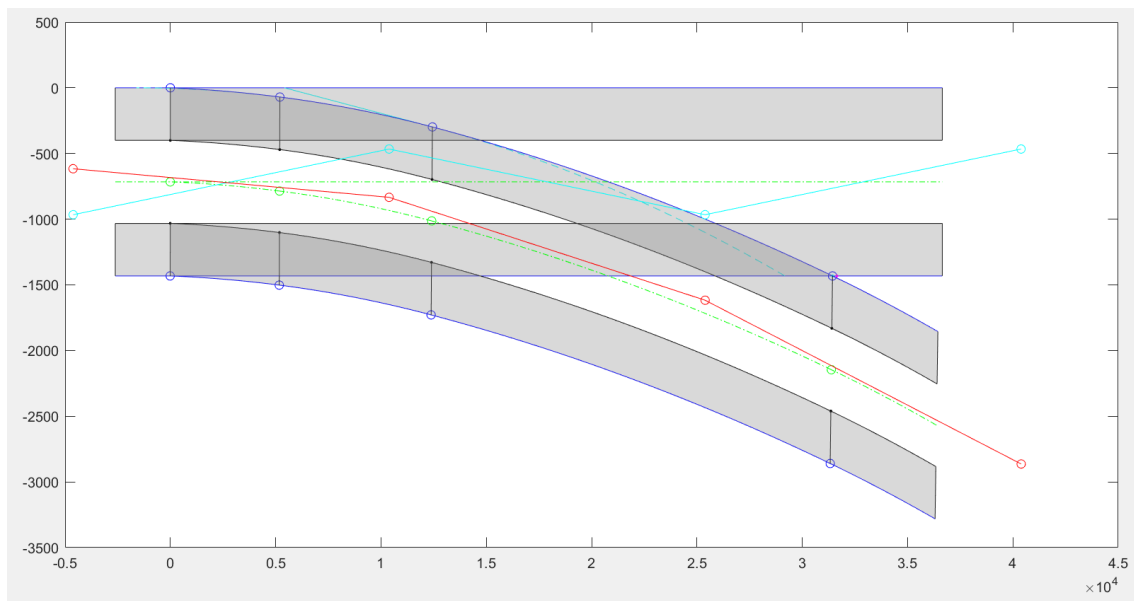


Figura 141 Switchtype = 22, CEN56E1 DV, crossing 1 in 13

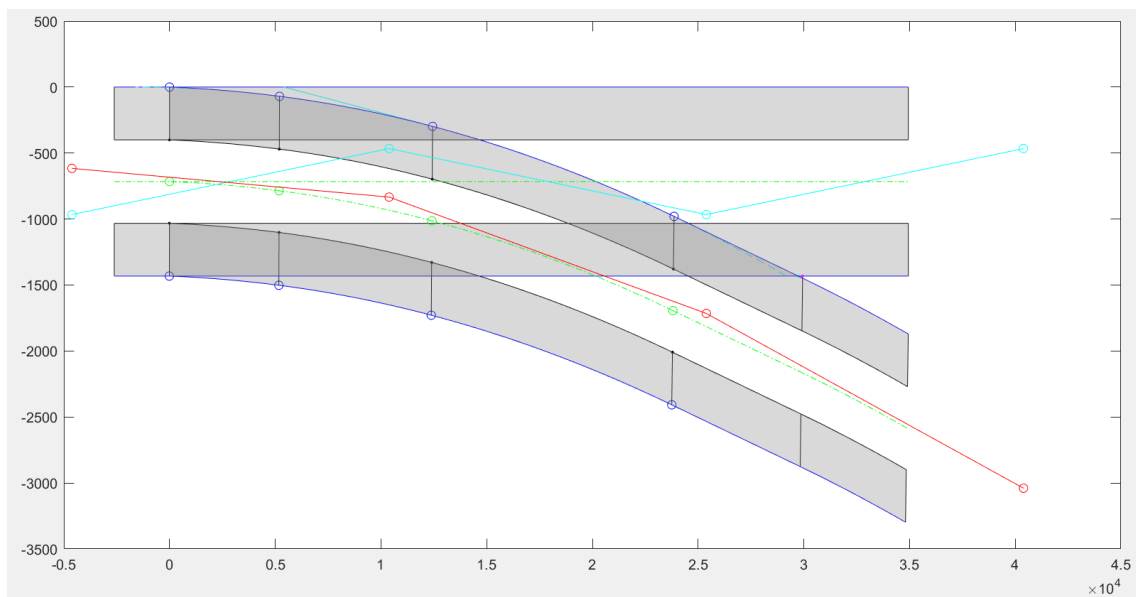


Figura 142 Switchtype = 23, CEN56E1 DV, crossing 1 in 13

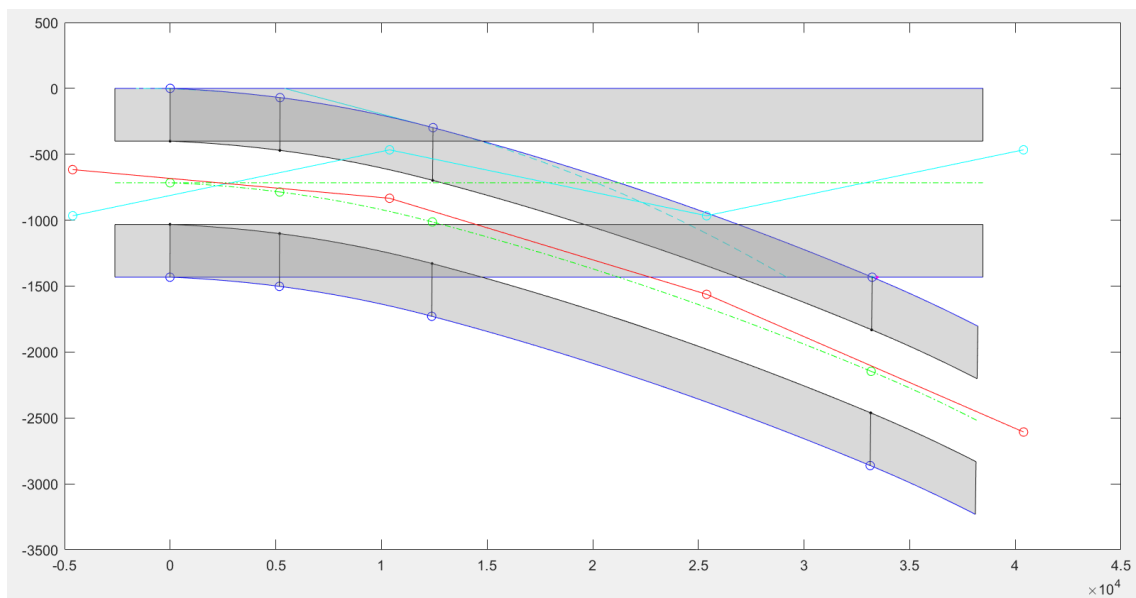


Figura 143 Switchtype = 24, CEN56E1 DV, crossing 1 in 15

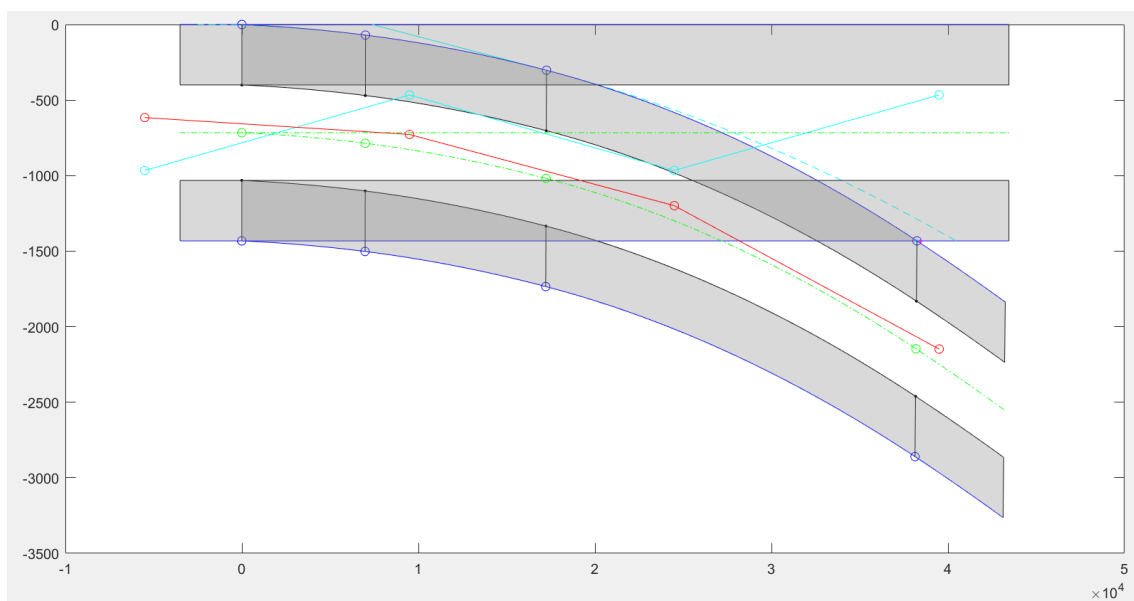


Figura 144 Switchtype = 25, CEN56E1 EV, crossing 1 in 13

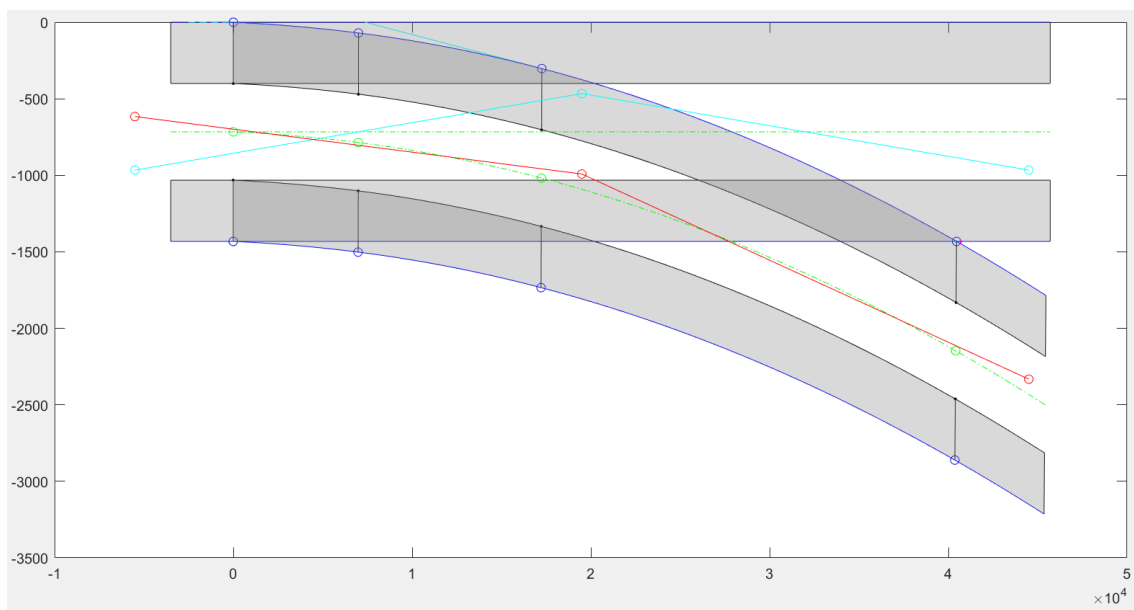


Figura 145 Switchtype = 26, CEN56E1 EV, crossing 1 in 15

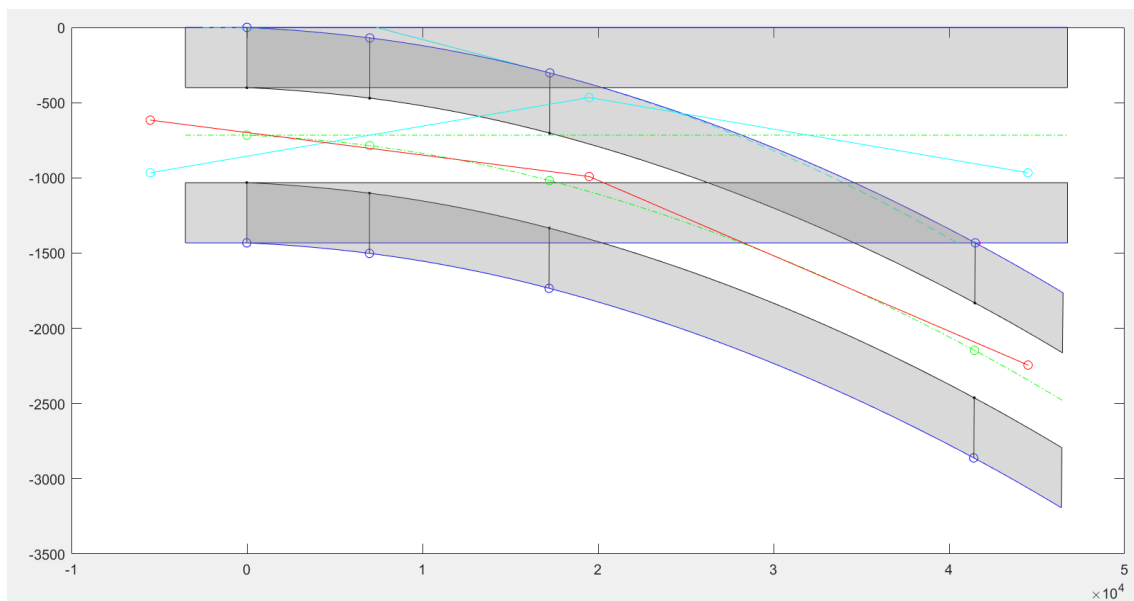


Figura 146 Switchtype = 27, CEN56E1 EV, crossing 1 in 16

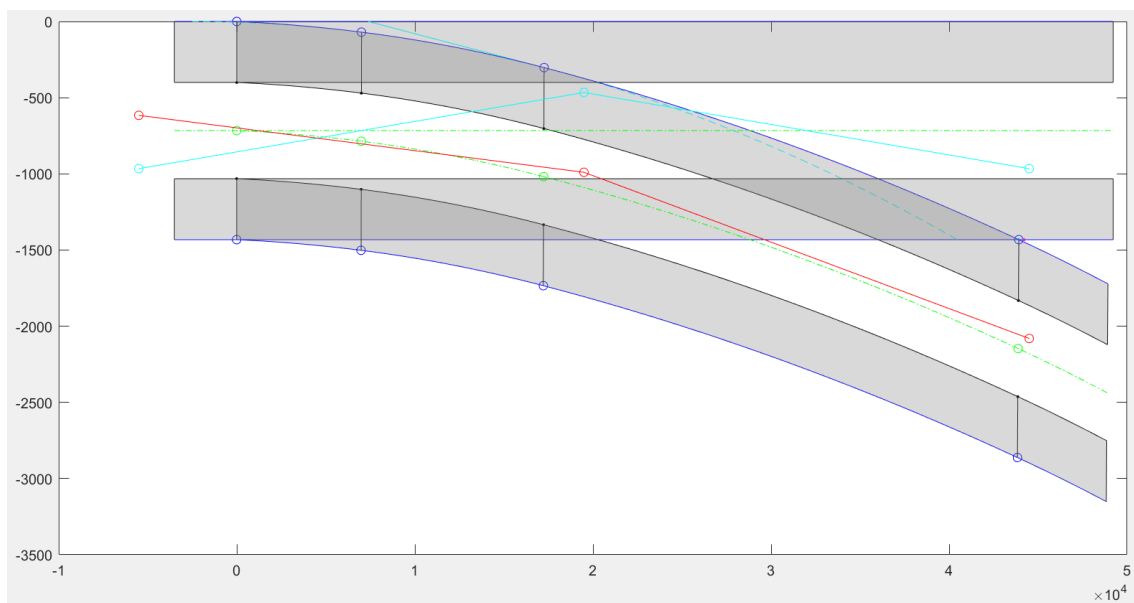


Figura 147 Switchtype = 28, CEN56E1 EV, crossing 1 in 18,5

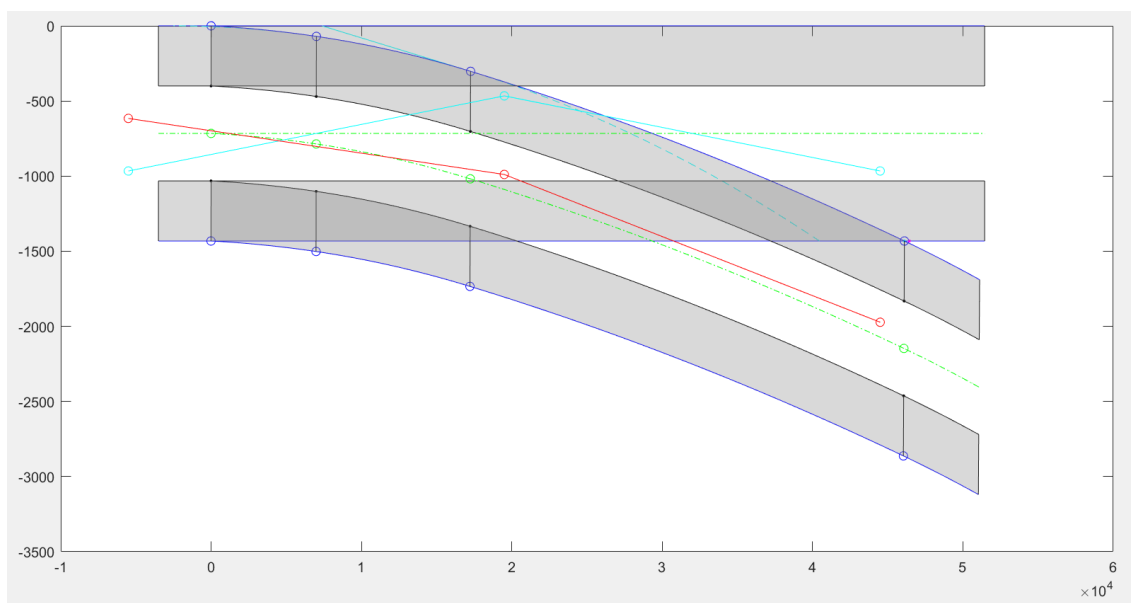


Figura 148 Switchtype = 29, CEN56E1 EV, crossing 1 in 21

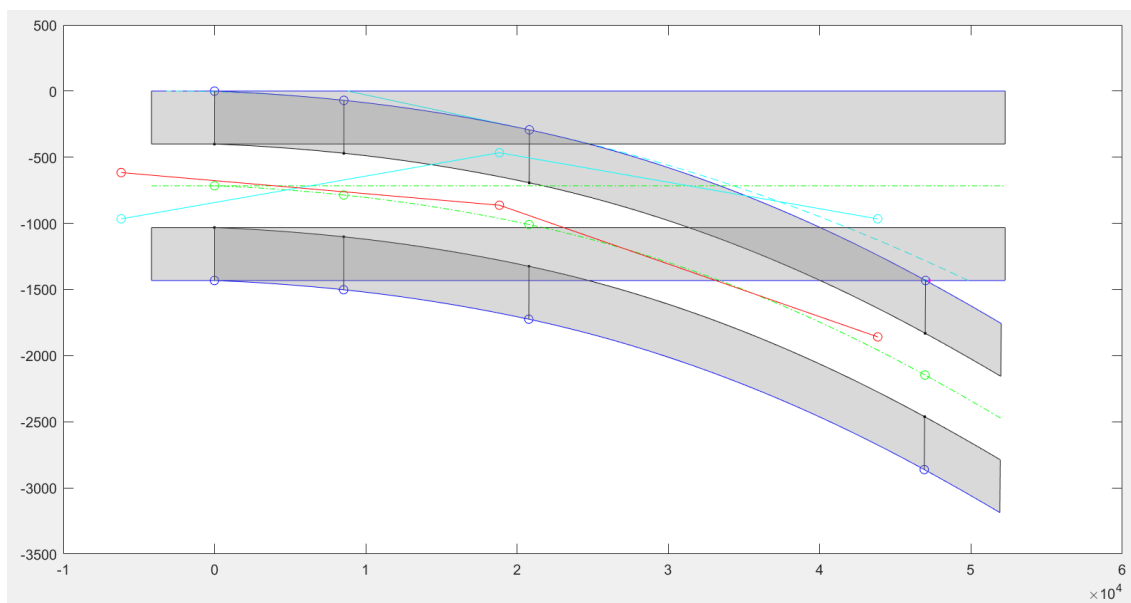


Figura 149 Switchtype = 30, CEN56E1 FV, crossing 1 in 16

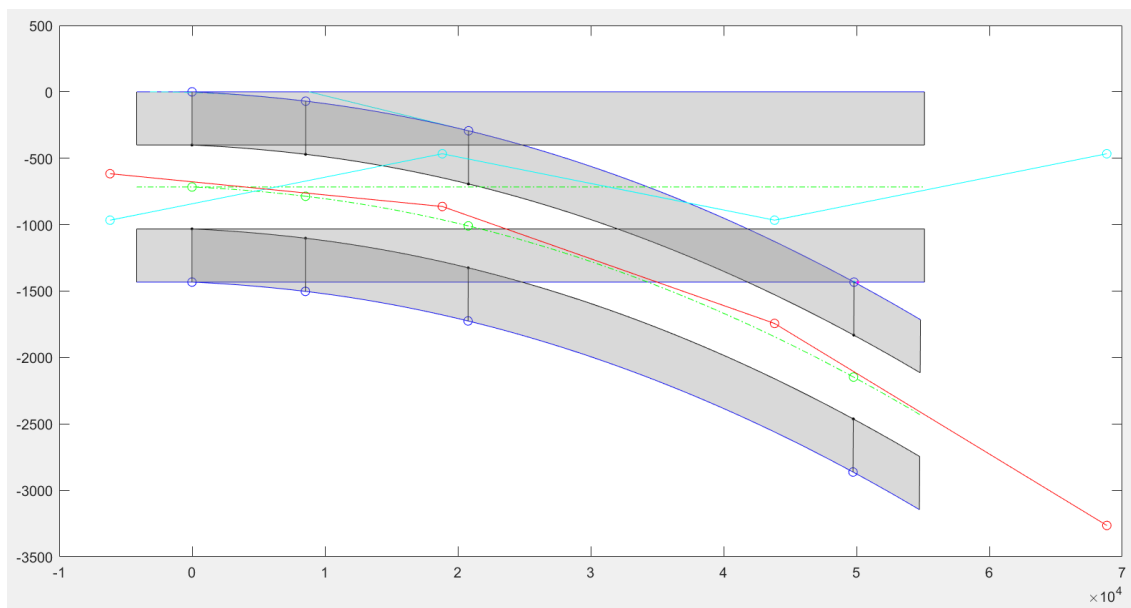


Figura 150 Switchtype = 31, CEN56E1 FV, crossing 1 in 18,5

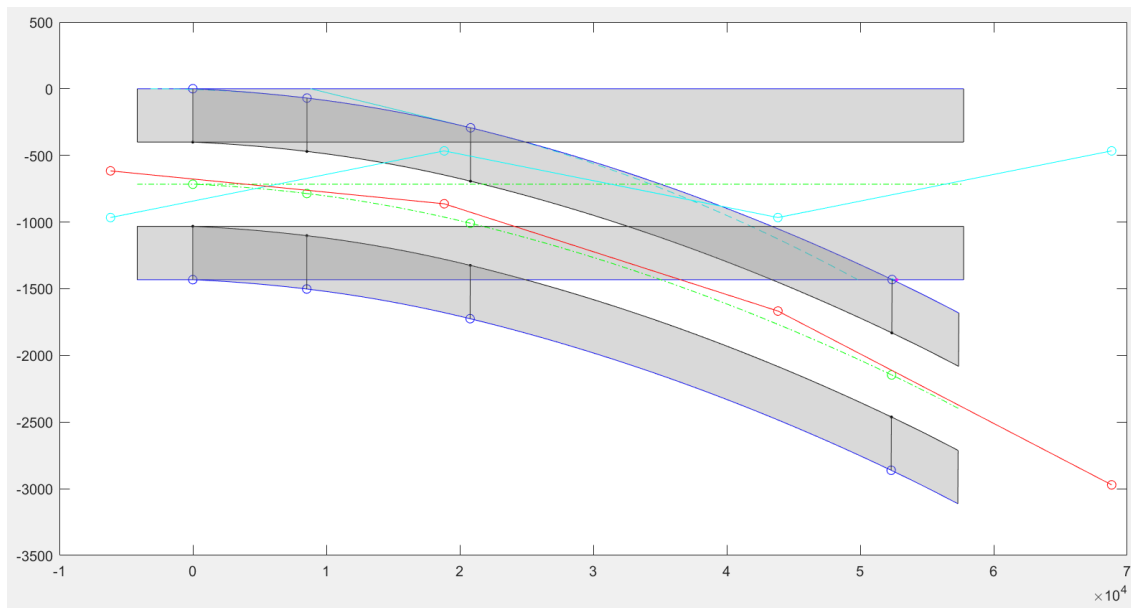


Figura 151 Switchtype = 32, CEN56E1 FV, crossing 1 in 21

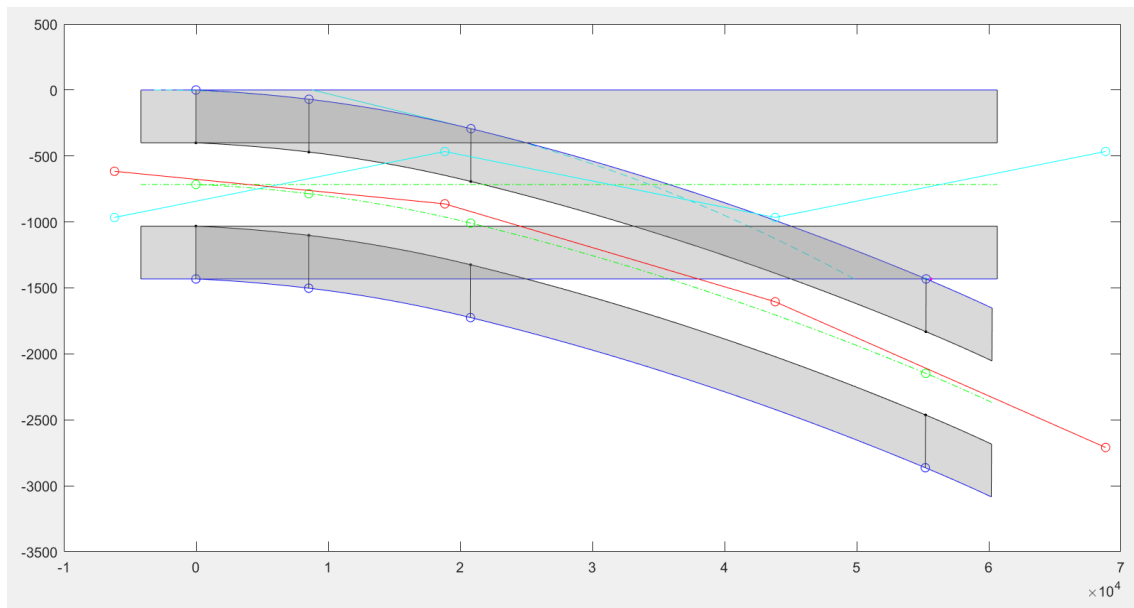


Figura 152 Switchtype = 33, CEN56E1 FV, crossing 1 in 24

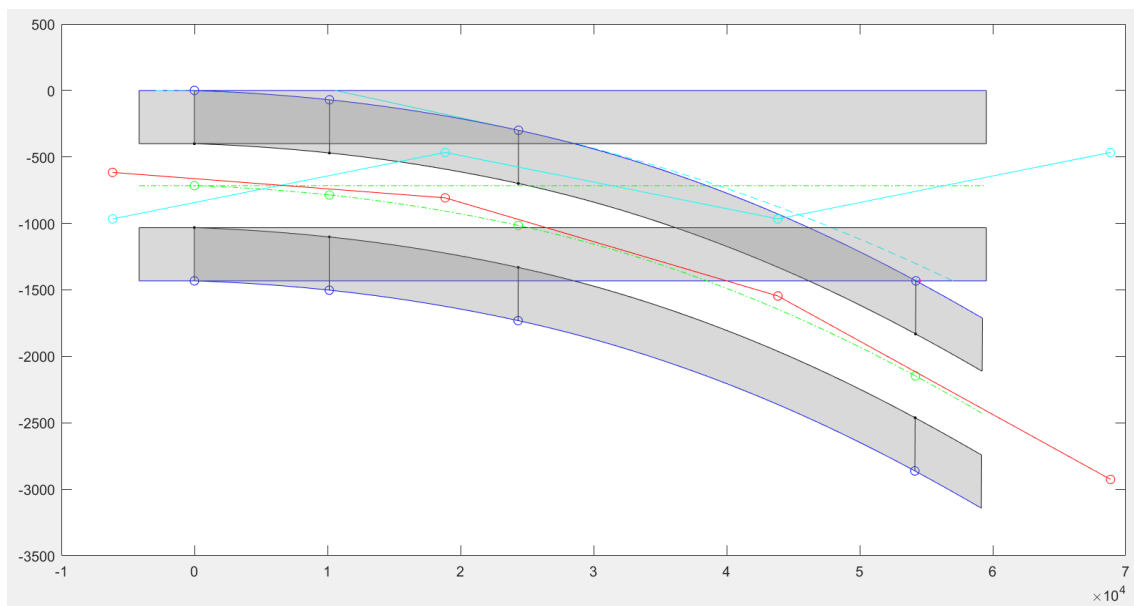


Figura 153 Switchtype = 34, CEN56E1 SGV, crossing 1 in 18,5

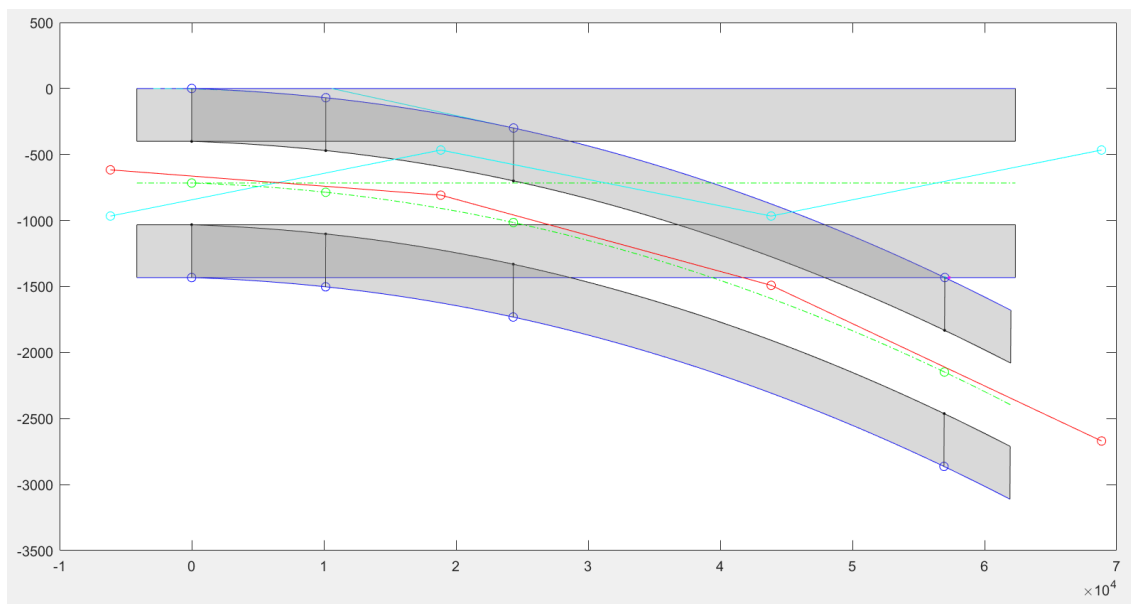


Figura 154 Switchtype = 35, CEN56E1 SGV, crossing 1 in 21

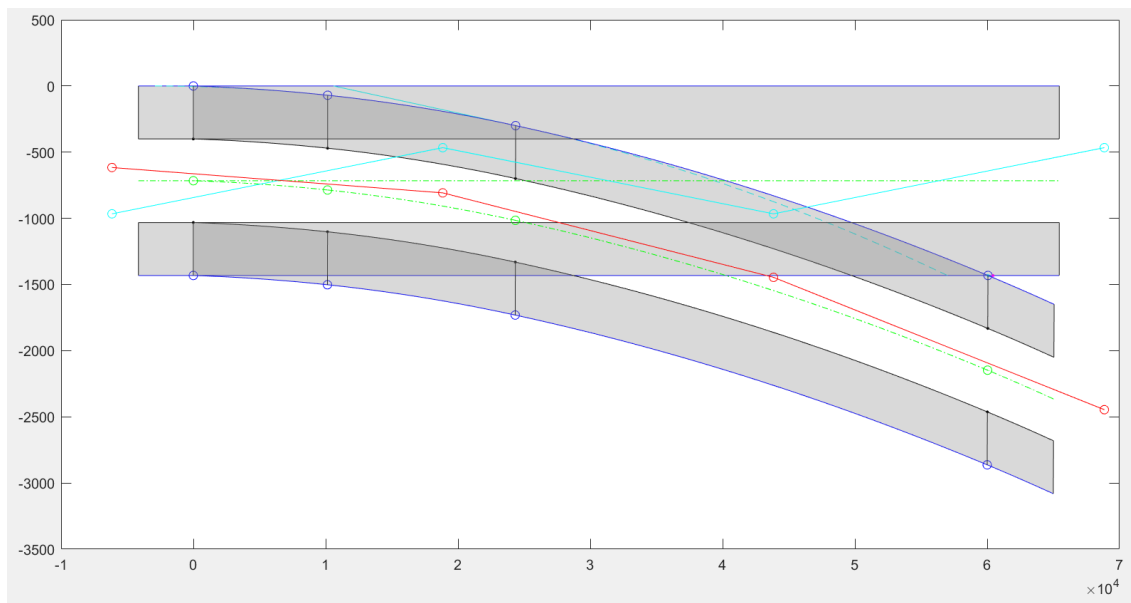


Figura 155 Switchtype = 36, CEN56E1 SGV, crossing 1 in 24

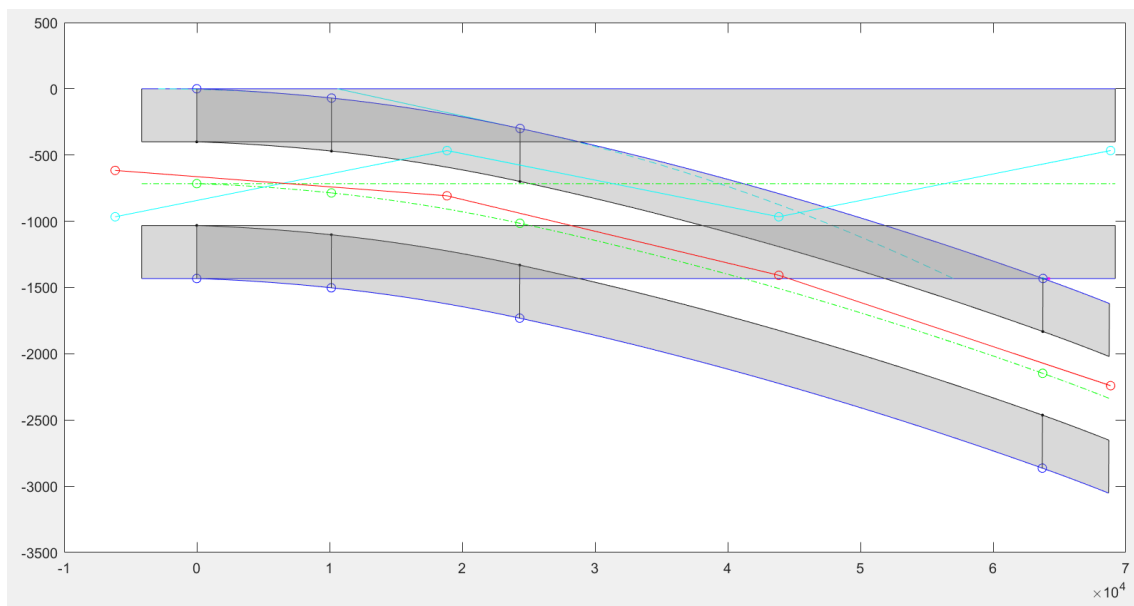


Figura 156 Switchtype = 37, CEN56E1 SGV, crossing 1 in 28

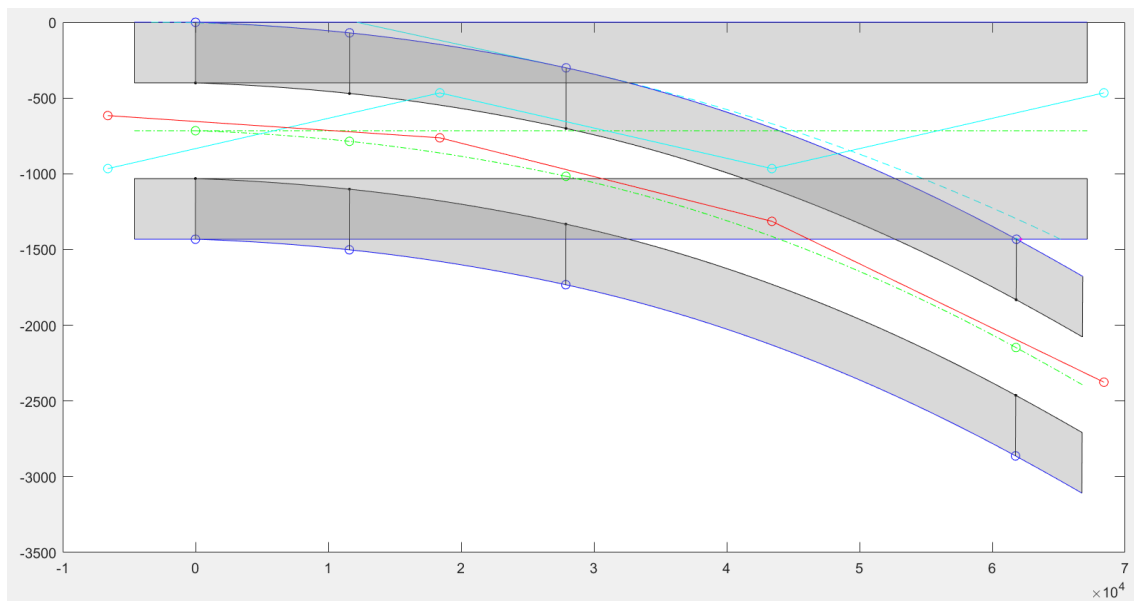


Figura 157 Switchtype = 38, CEN56E1 GV, crossing 1 in 21

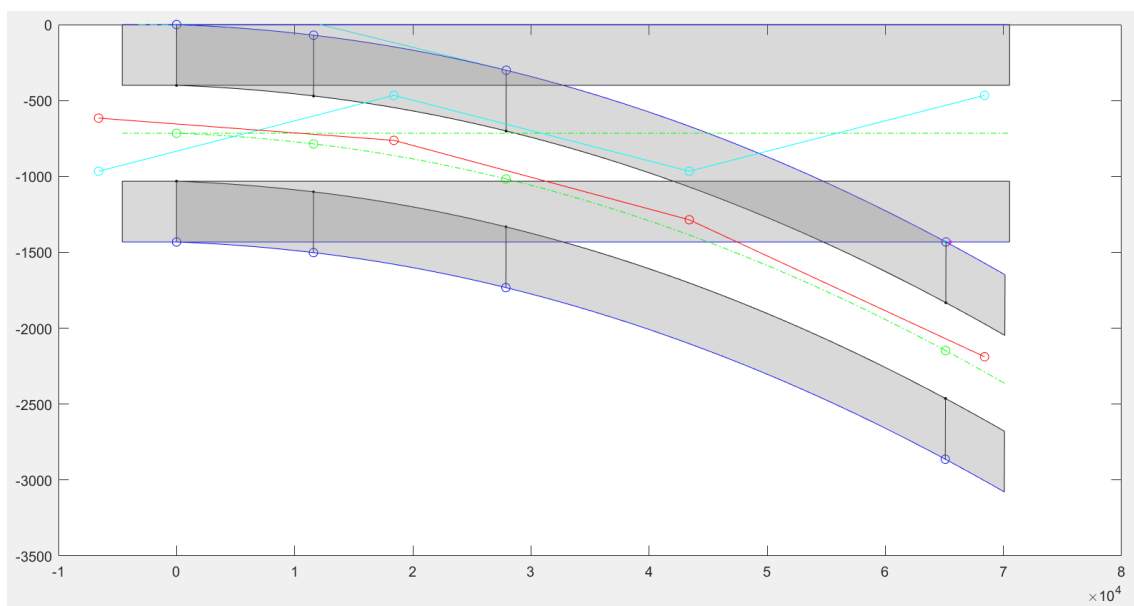


Figura 158 Switchtype = 39, CEN56E1 GV, crossing 1 in 24

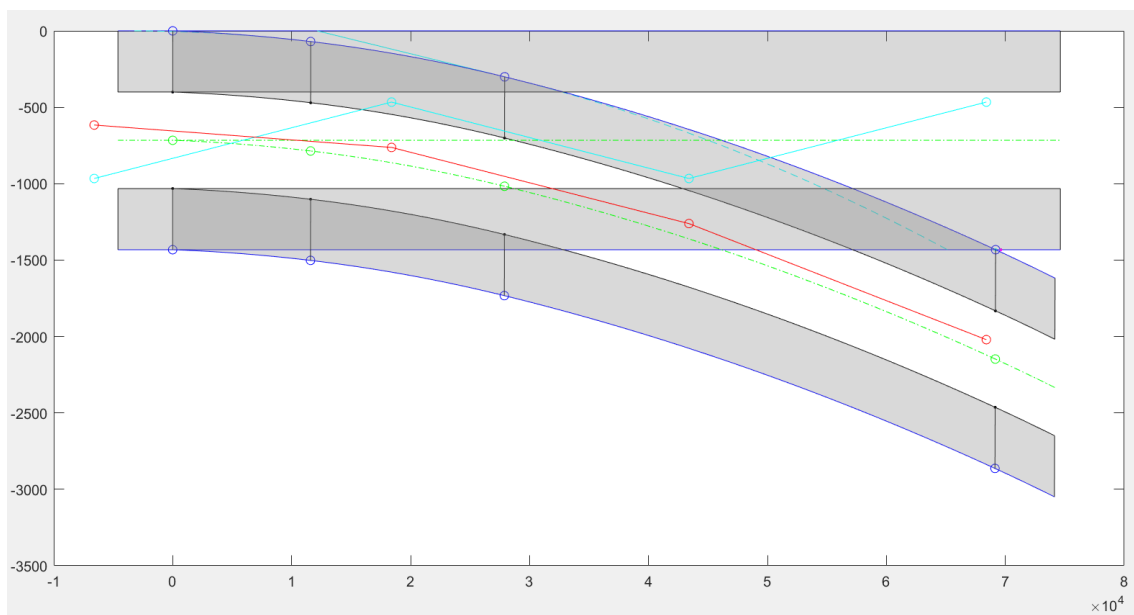


Figura 159 Switchtype = 40, CEN56E1 GV, crossing 1 in 28

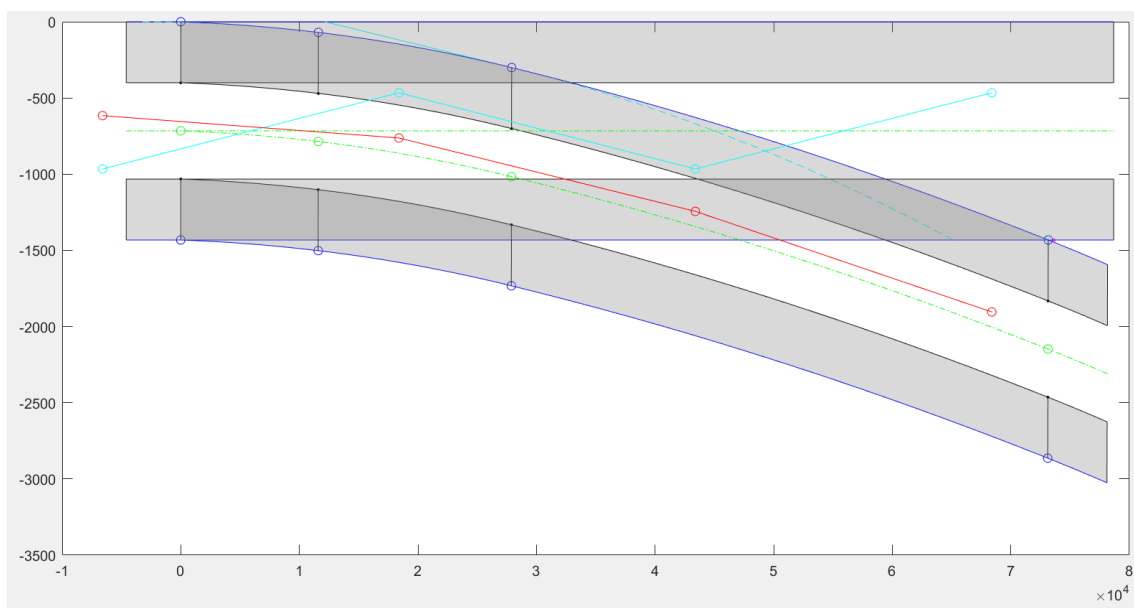


Figura 160 Switchtype = 41, CEN56E1 GV, crossing 1 in 32,365

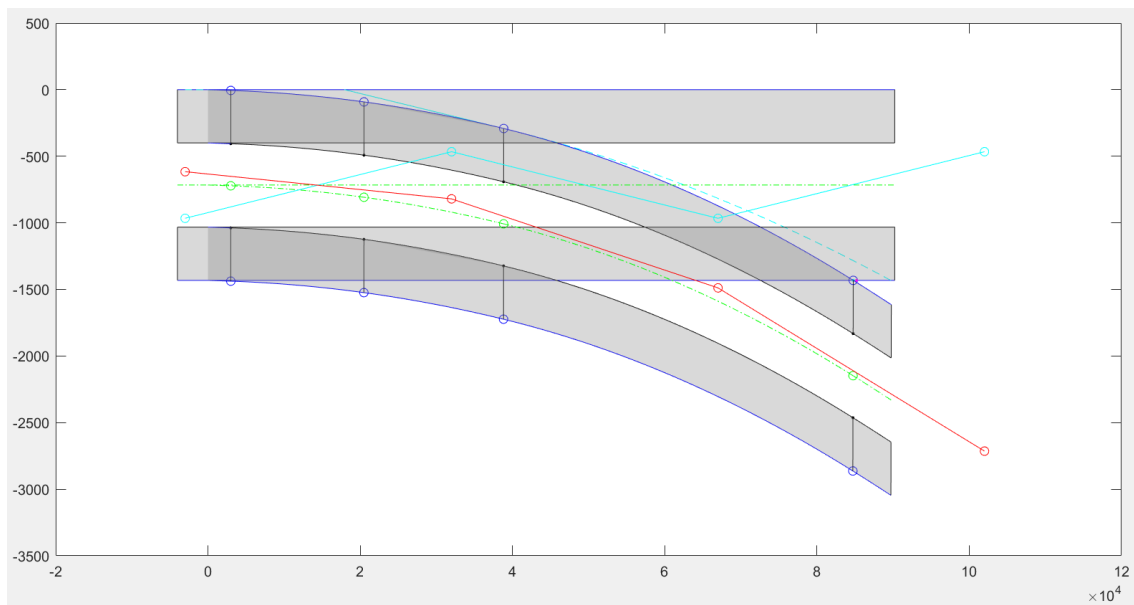


Figura 161 Switchtype = 42, CEN56E1 HV, crossing 1 in 28

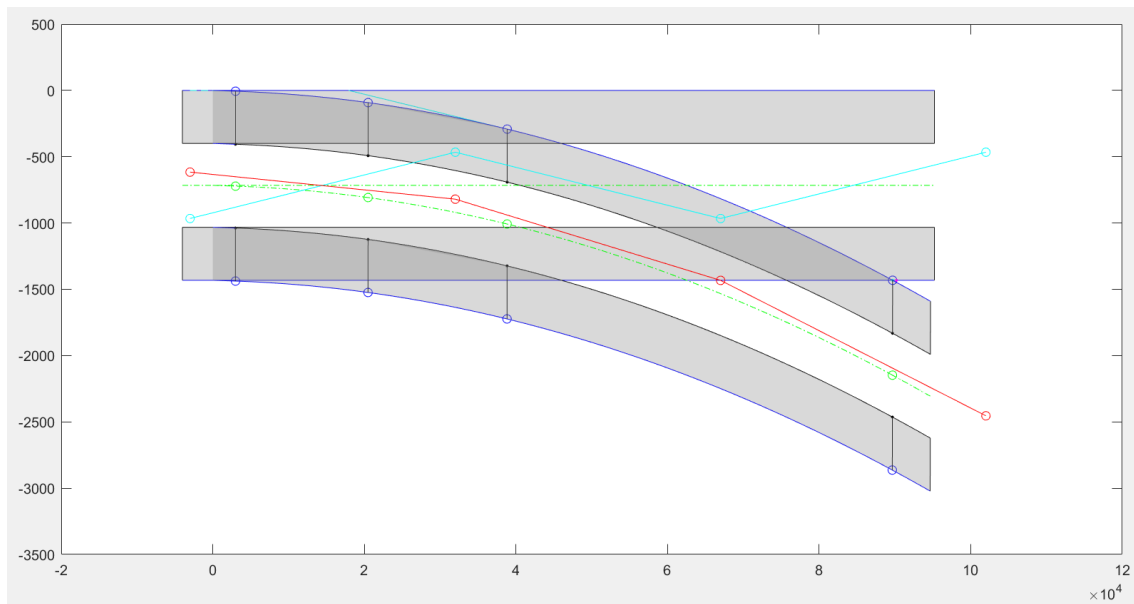


Figura 162 Switchtype = 43, CEN56E1 HV, crossing 1 in 32,365

CEN56E1 VERTICAL S&C STANDARD TRANSITIONED TURNOUTS AND Crossovers [ASSE16]

Tabla 23 CEN56E1 Vertical s&c standard transitioned turnout and crossovers [ASSE16]

MATLAB switchtype	Switch	Crossing 1 in ~		Lead lengths			Switch radius	Turnout radius	Length of transition	Length of straight to nose	Turnout speed (mph)
		Natural	Actual	Toe to nose L2	Nose to nose across a 1970 interval	Toe to toe across a 1970 interval					
44	AV	7	9,25	19698	4589	43984	141052	141052	9760	1188	20
45	BV	8	9,25	21808	4589	48204	184012	184012	6195	469	15
46		8	10	22261	4975	49497	184012	184012	9170	920	20
47		8	10,75	22852	5360	51065	184012	184012	11730	1510	20
48	CV	9,25	10,75	25448	5360	56256	245767	245767	7366	584	20
49		9,25	13	27007	6513	60526	245767	245767	13000	3271	25
50	DV	10,75	13	30125	6513	66762	331687	331687	10630	964	25
51		10,75	15	31713	7533	70960	331687	331687	17455	2534	30
52	EV	15	18,5	42017	9315	93349	645116	645116	16255	1560	35
53		15	21	44066	10585	98718	645116	645116	24555	3605	40
54	FV	18,5	24	52606	12109	117321	980920	980920	24290	2787	50
55		21	28	56331	14138	126801	980920	1364999	30000	5165	50
56	SGV	21	28	60782	14138	135702	1263740	1263740	30075	3787	60
57	GV	24	28	66678	14138	147493	1650380	1650380	19640	1538	60
58		24	28	67135	14040	148310	1650380	1650380	36200	-7056	70

59		24	32,365	69933	16350	156216	1650380	1650380	38000	3559	70
60	HV	32,365	45,75	93153	32830	219137	3000716	3000716	55700	2730	90

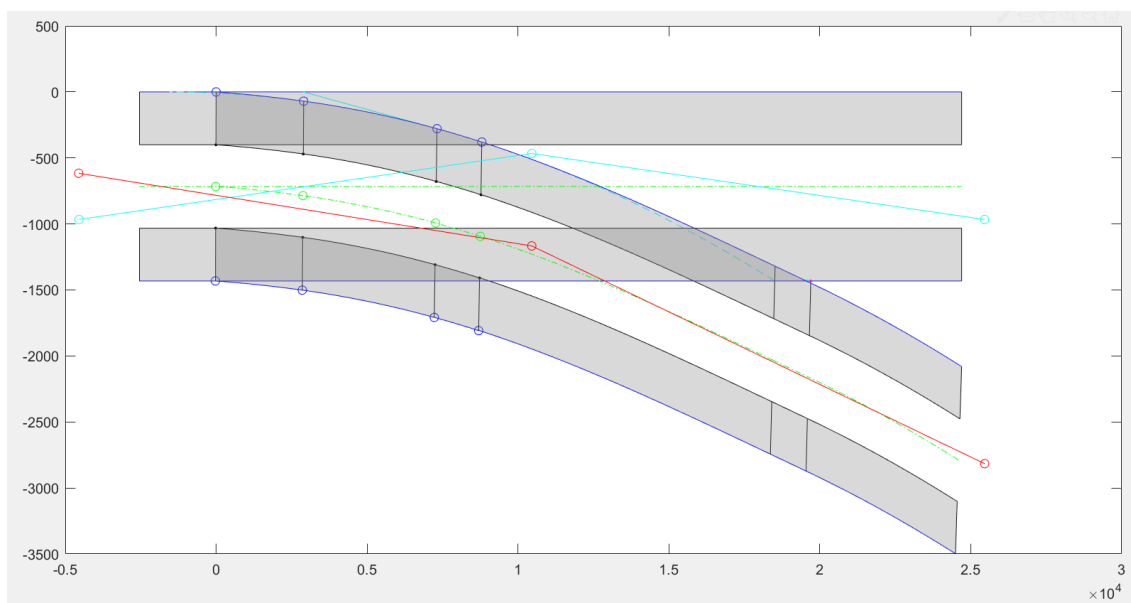
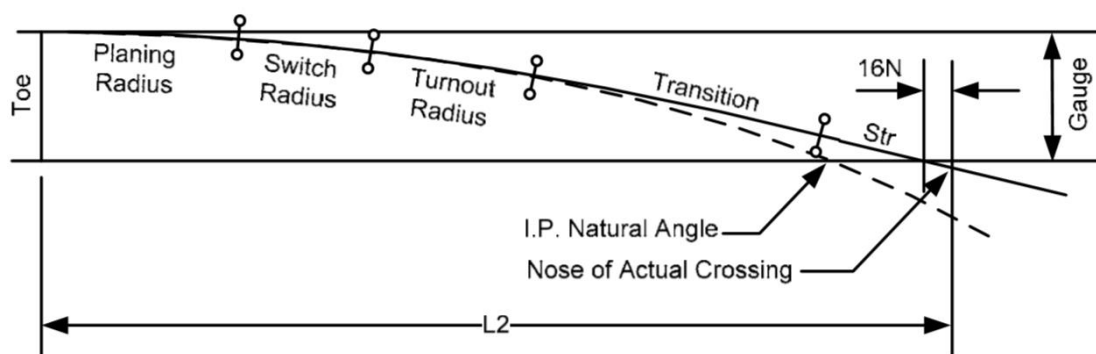


Figura 163 Switchtype = 44, CEN56E1 AV, crossing 1 in 9,25

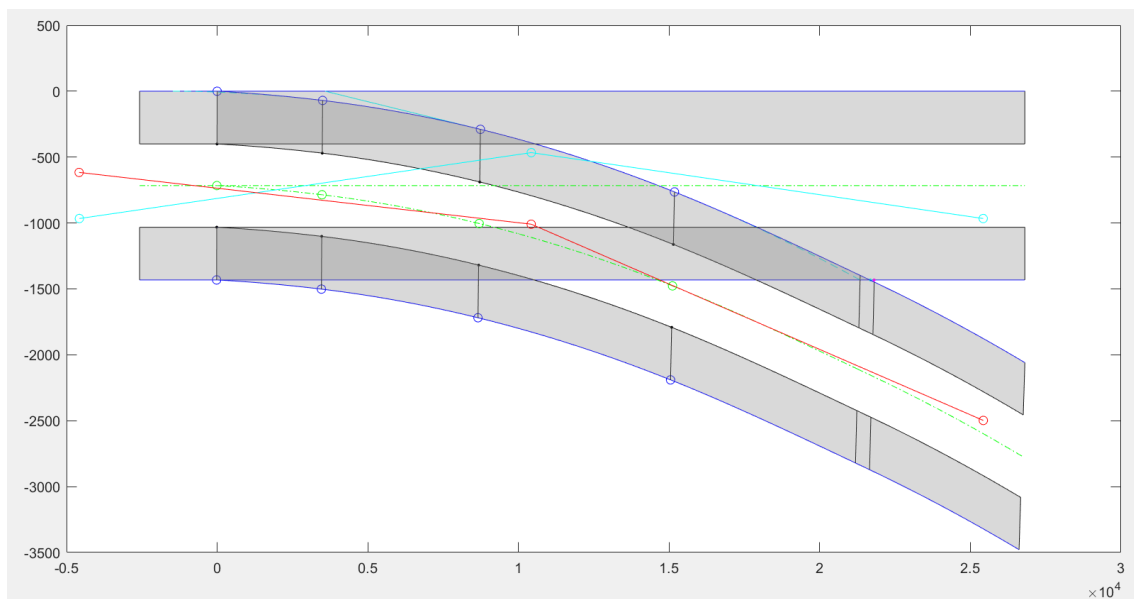


Figura 164 Switchtype = 45, CEN56E1 BV, crossing 1 in 9,25

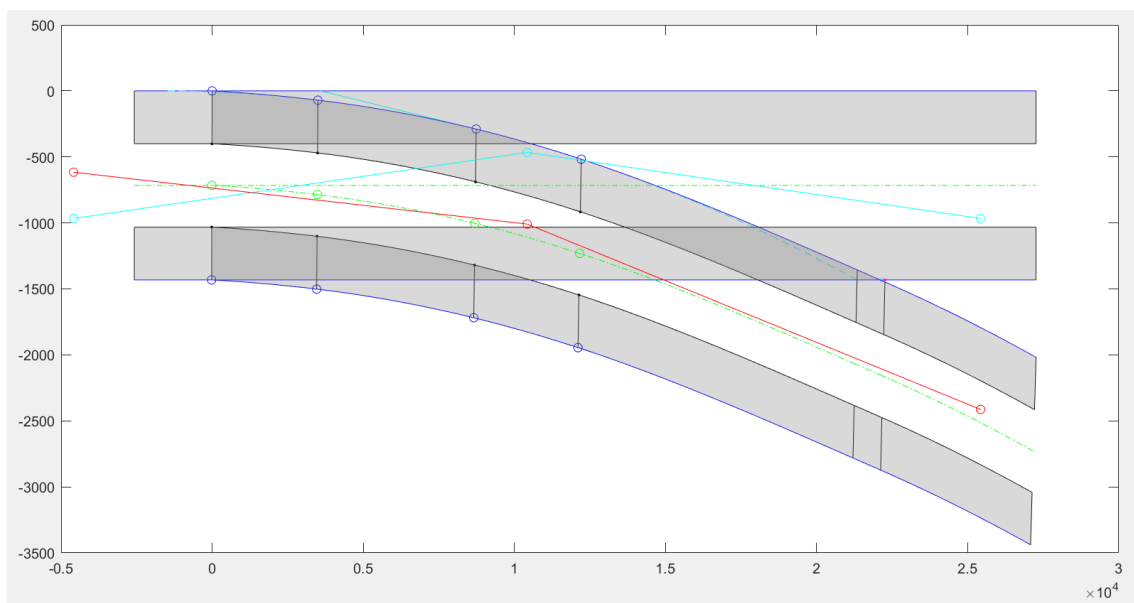


Figura 165 Switchtype = 46, CEN56E1 BV, crossing 1 in 10

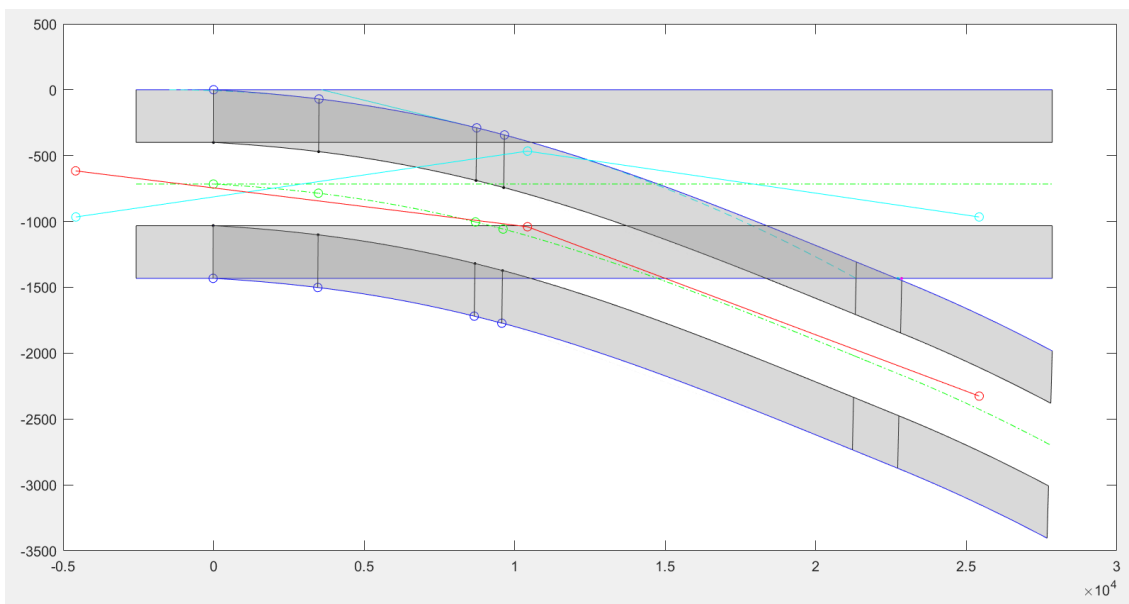


Figura 166 Switchtype = 47, CEN56E1 BV, crossing 1 in 10,75

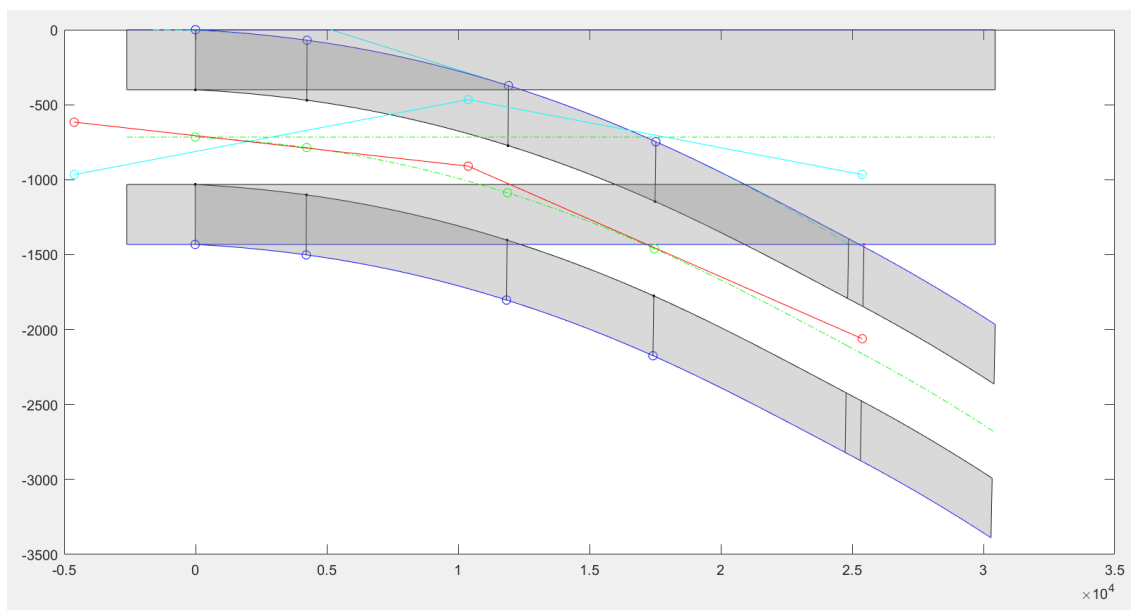


Figura 167 Switchtype = 48, CEN56E1 CV, crossing 1 in 10,75

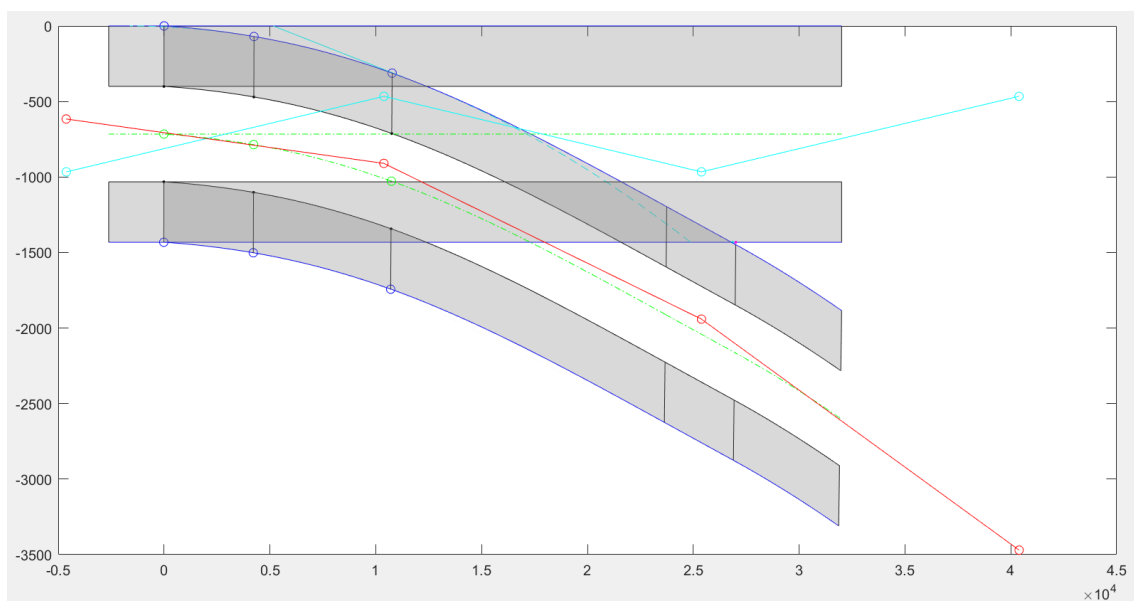


Figura 168 Switchtype = 49, CEN56E1 CV, crossing 1 in 13

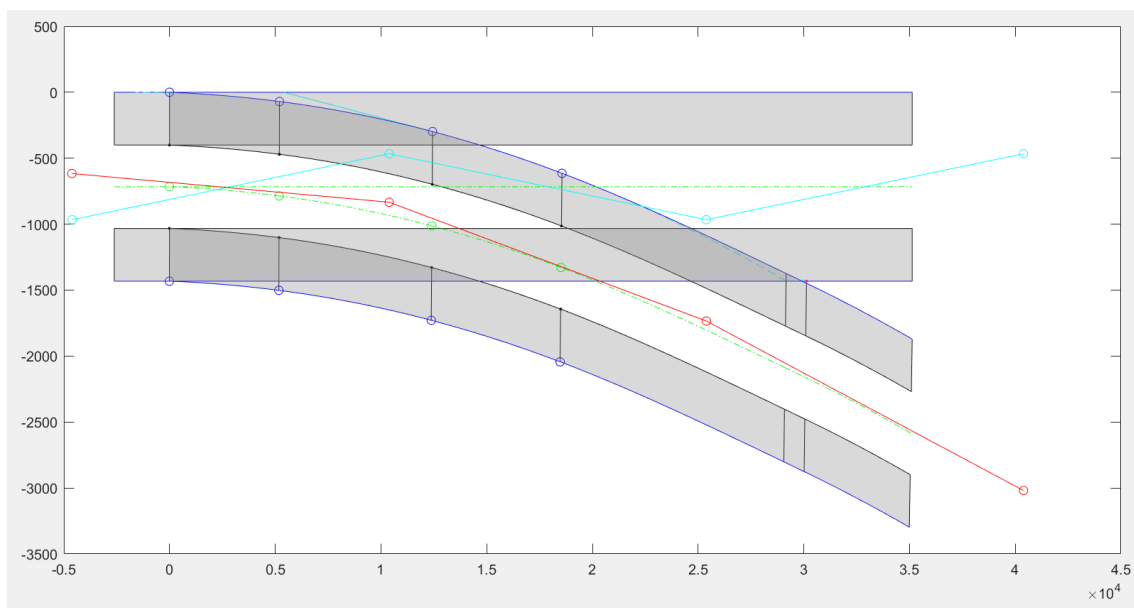


Figura 169 Switchtype = 50, CEN56E1 DV, crossing 1 in 13

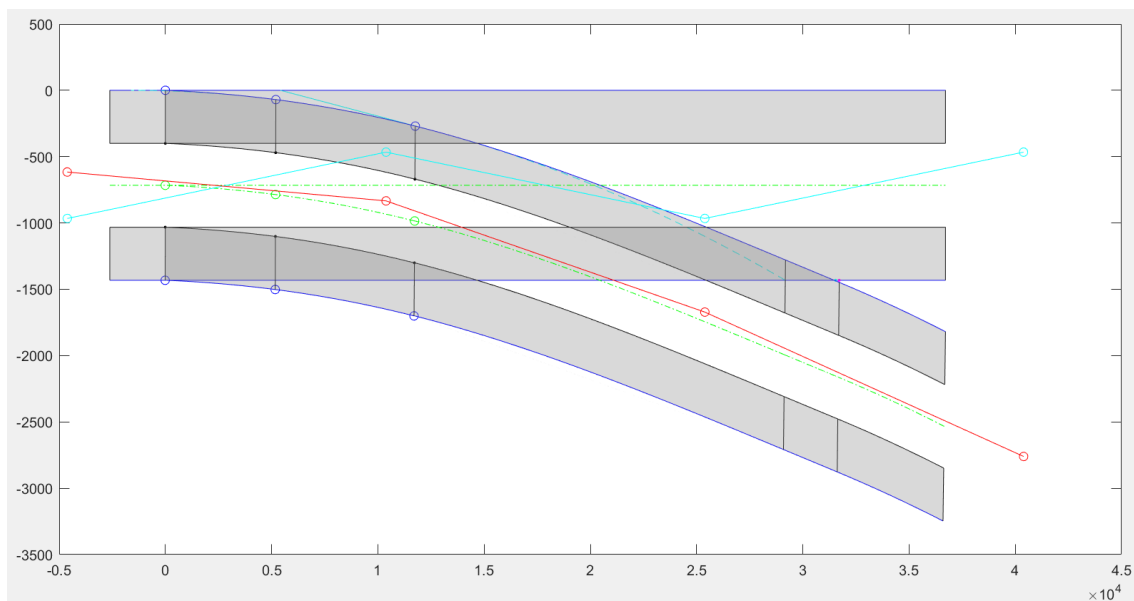


Figura 170 Switchtype = 51, CEN56E1 DV, crossing 1 in 15

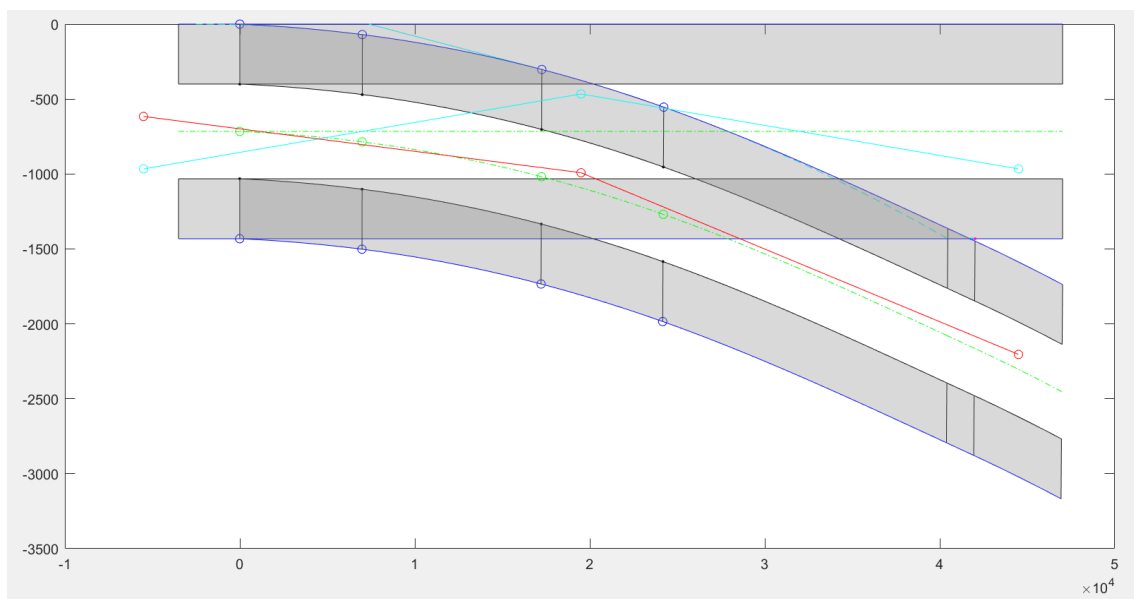


Figura 171 Switchtype = 52, CEN56E1 EV, crossing 1 in 18,5

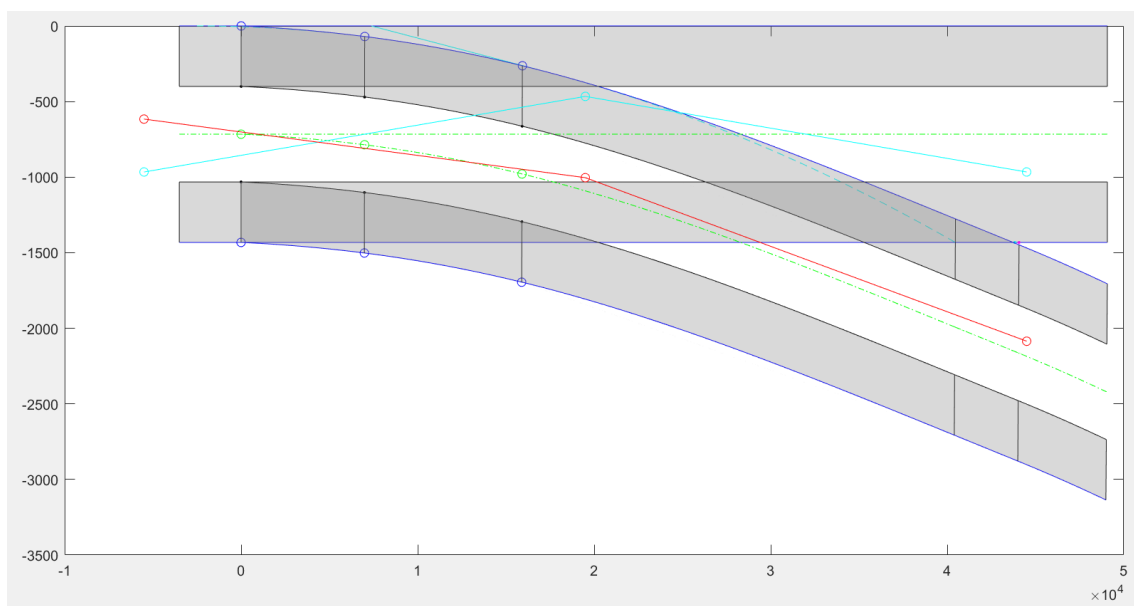


Figura 172 Switchtype = 53, CEN56E1 EV, crossing 1 in 21

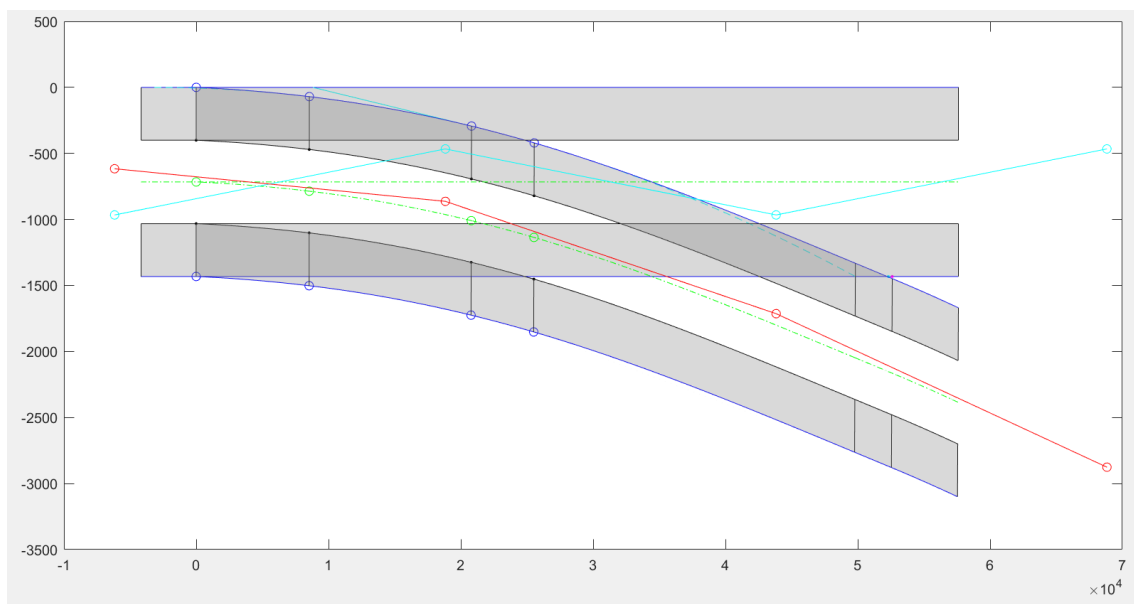


Figura 173 Switchtype = 54, CEN56E1 FV, crossing 1 in 24

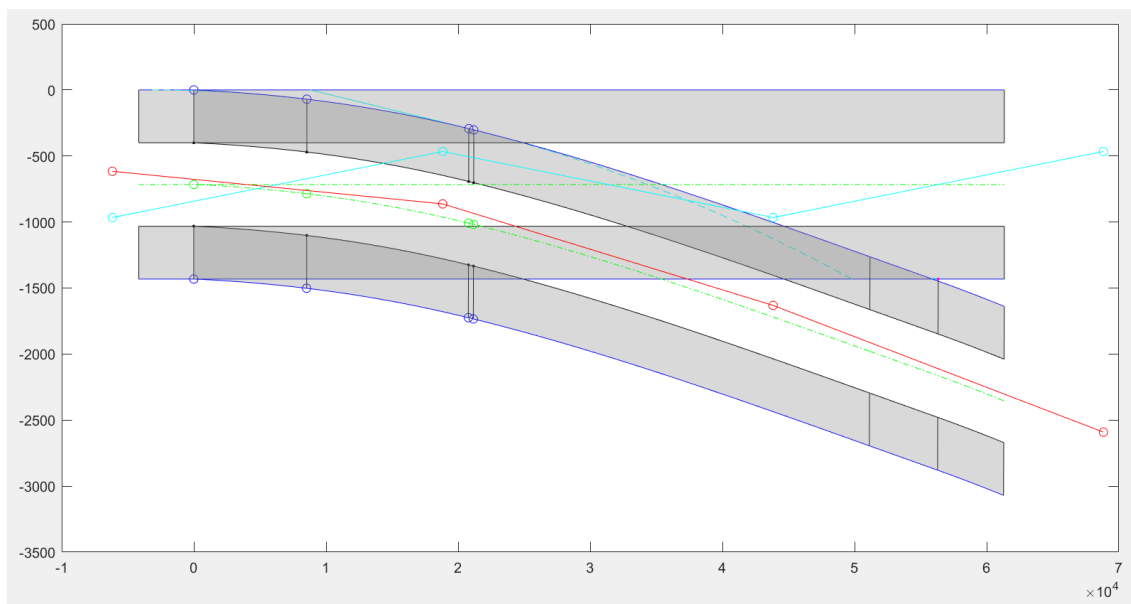


Figura 174 Switchtype = 55, CEN56E1 FV, crossing 1 in 28

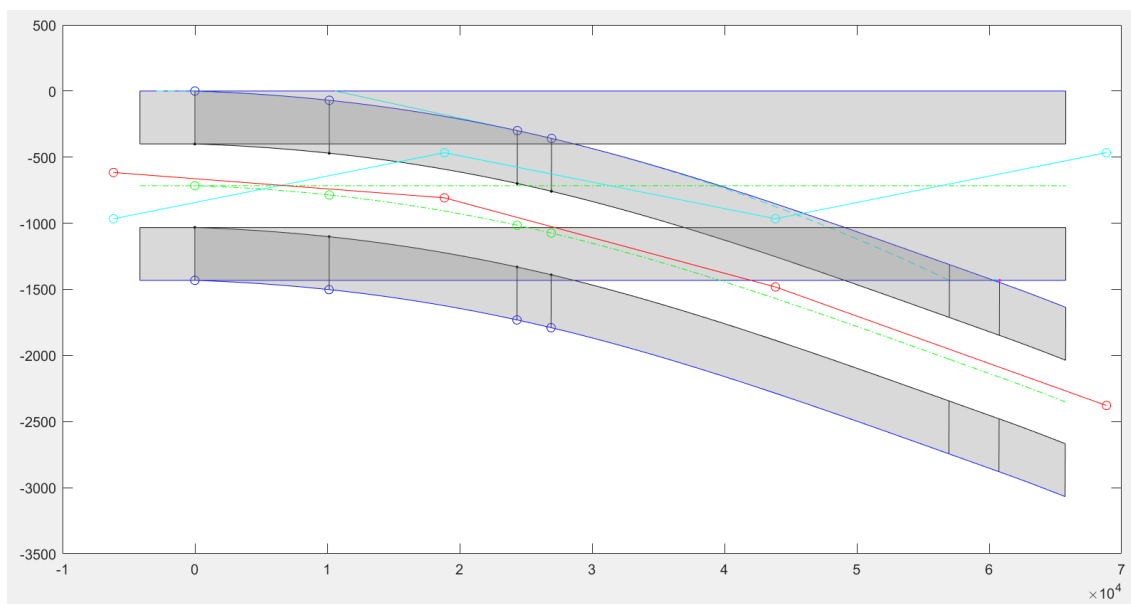


Figura 175 Switchtype = 56, CEN56E1 SGV, crossing 1 in 28

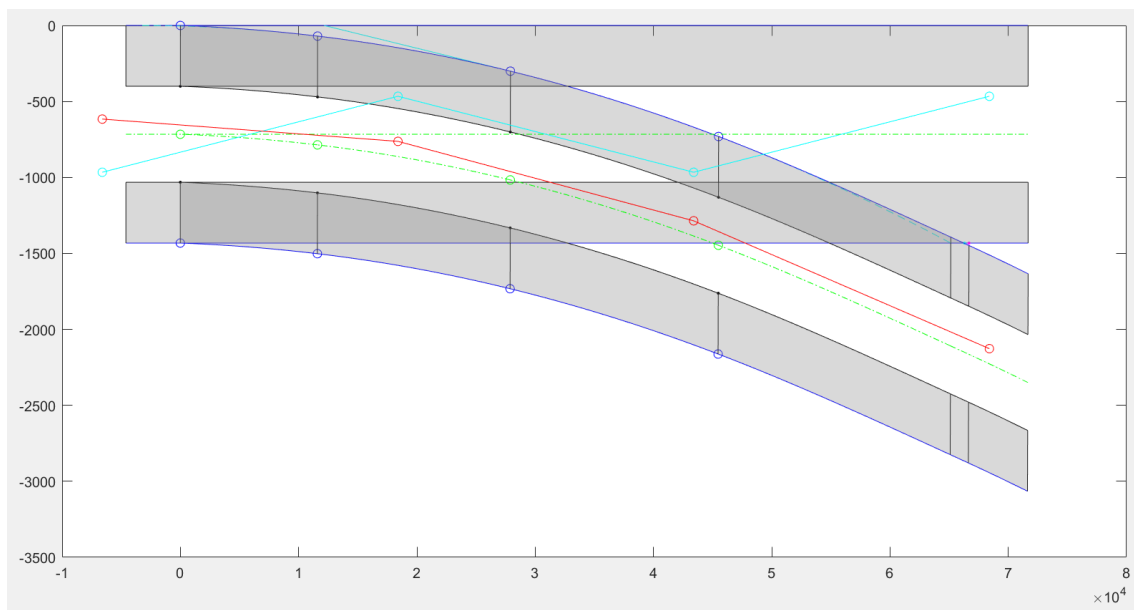


Figura 176 Switchtype = 57, CEN56E1 GV, crossing 1 in 28

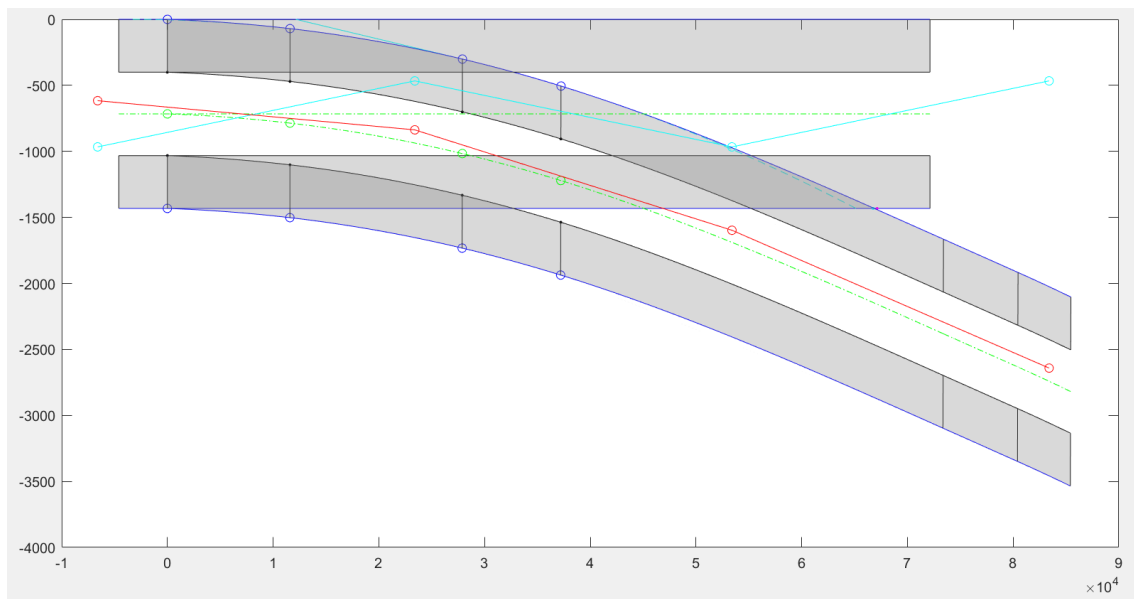


Figura 177 Switchtype = 58, CEN56E1 GV, crossing 1 in 28

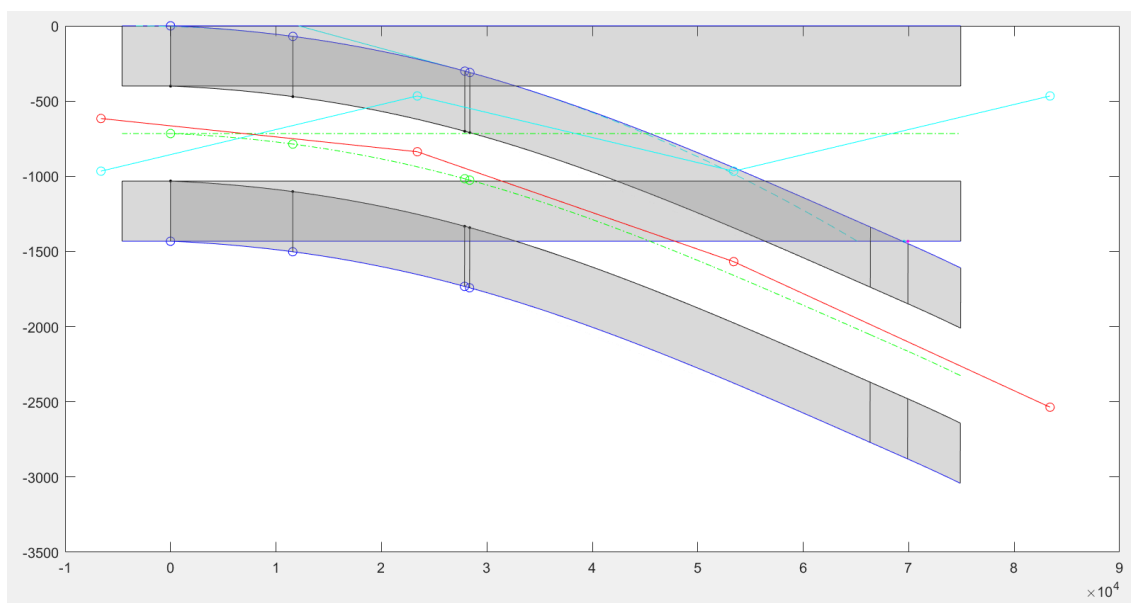


Figura 178 Switchtype = 59, CEN56E1 GV, crossing 1 in 32,365

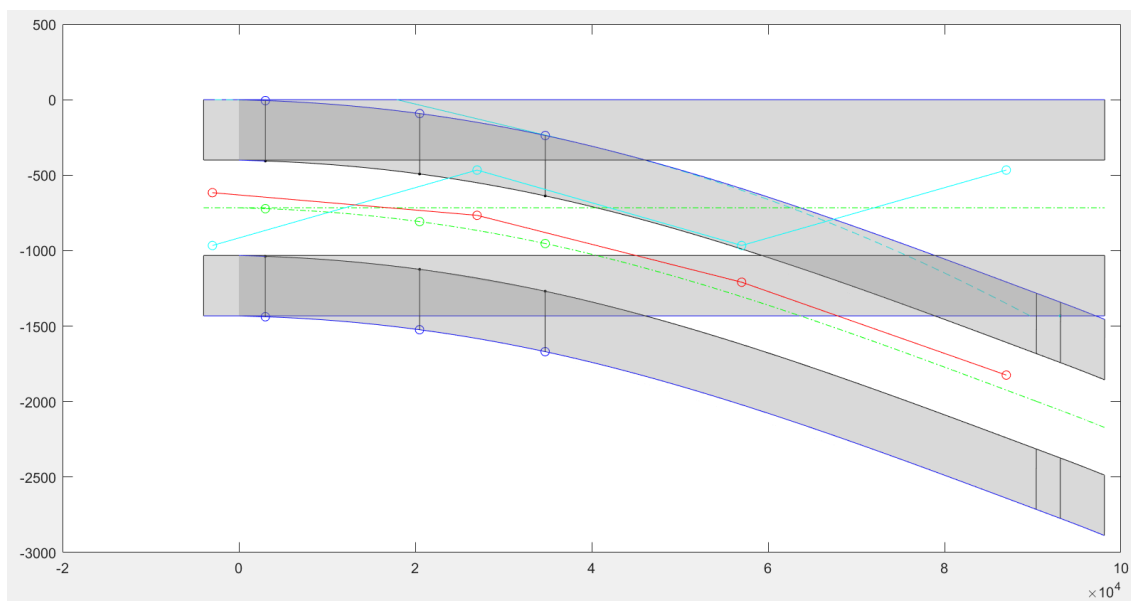


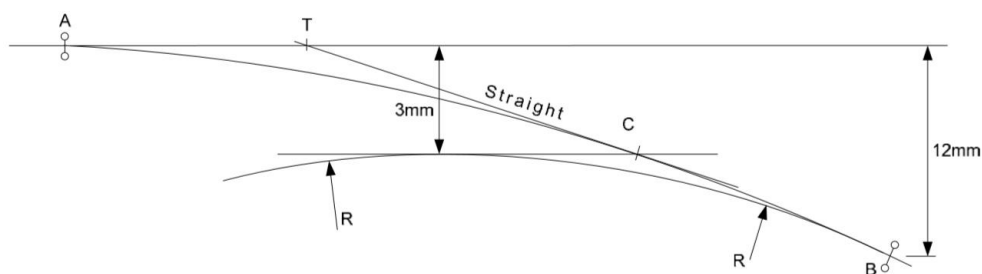
Figura 179 Switchtype = 60, CEN56E1 HV, crossing 1 in 45,75

NR60 INCLINED S&C STANDARD CIRCULAR CURVE TURNOUTS [ASSE16]

Tabla 24 NR60 Inclined s&c standard circular curve turnout [ASSE16]

Switch designation	Natural crossing angle	Turnout speed mph	Switch radius R	Length of straight at toe T-C (L1)	Entry angle 1 in ~	Length of transition at toe C-B (L2)	Headcut length	Moveable Length
NR60C	8,25	25	195647	788	263	1389	5497	10580
NR60D	9,5	30	259192	907	302	1599	6327	11230
NR60E	12,5	40	448216	1193	398	2102	8320	14480
NR60F	15,75	50	711167	1503	501	2648	10480	17080
NR60SG	20,25	65	1175135	1932	644	3404	13471	20330
NR60G	23,5	75	1582360	2241	747	3950	15632	22280
NR60H	31,25	100	2797591	2980	993	5251	20783	30080

Switch designation	Switch curve origin to heel	Heel to toe	Heel angle 1 in N
NR60C	11129,663	11430	17,5646
NR60D	11237,949	11583,7	23,0532
NR60E	14962,163	15416,8	29,9483
NR60F	19867,924	20440,6	35,7877
NR60SG	27698,972	28435,1	42,4193
NR60G	27446,977	28301,1	57,6472
NR60G Trans 31,25	31346,649	32200,8	50,4768
NR60H	36514,04	37648,3	76,6136



MATLAB switchtype	Switch	Crossing angle 1 in ~	Lead toe-IP L2	Centreline switch radius	Centreline turnout radius	Heel length L1	Heel Offset H	Max Turnout speed [A]	Max Turnout speed [B]
61	NR60C	9,5	25160	194930	284822	11430	319,82	25	
62	NR60D	8,25	26004	258475	185562	11584	246,74	25	20
63		11	29264	258475	372559	11584	246,74	30	25

64		12,5	30829	258475	526343	11584	246,74	30	
65	NR60E	9,5	32454	447498	237267	15417	252,8	25	
66		11	34424	447498	330766	15417	252,8	30	25
67		13,5	37405	447498	540978	15417	252,8	40	30
68		15,75	39809	447498	811082	15417	252,8	40	35
69	NR60F	12,5	41818	710450	410903	20440	280,58	35	30
70		13,5	43061	710450	490648	20440	280,58	40	30
71		17,25	47304	710450	895159	20440	280,58	50	35
72	NR60SG	17,25	55540	1174417	788326	28435	329,49	50	35
73		21,5	59974	1174417	1375580	28435	329,49	65	45
74		23,5	61862	1174417	1762047	28435	329,49	60	50
75	NR60G	21,5	65687	1581643	1282213	28301	241,06	65	45
76		27	72202	1581643	2230155	28301	241,06	70	50
77	NR60H	33,5	93289	2796873	3312779	37648	241,3	100	60

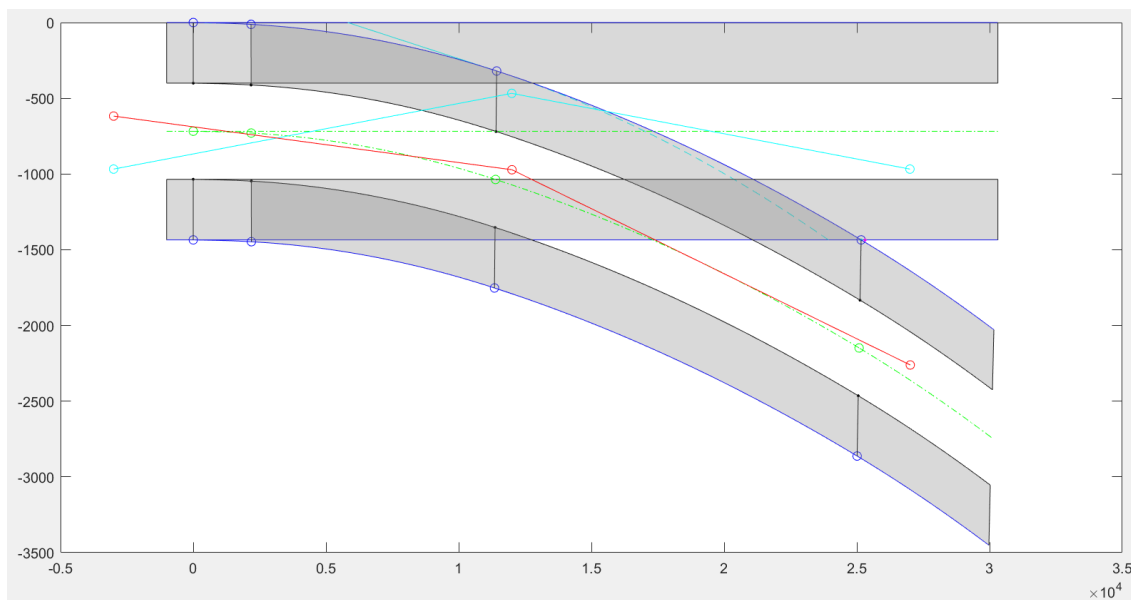
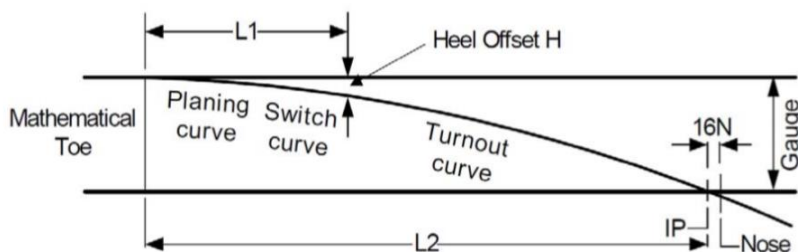


Figura 180 Switchtype = 61, NR60C, crossing 1 in 9,5

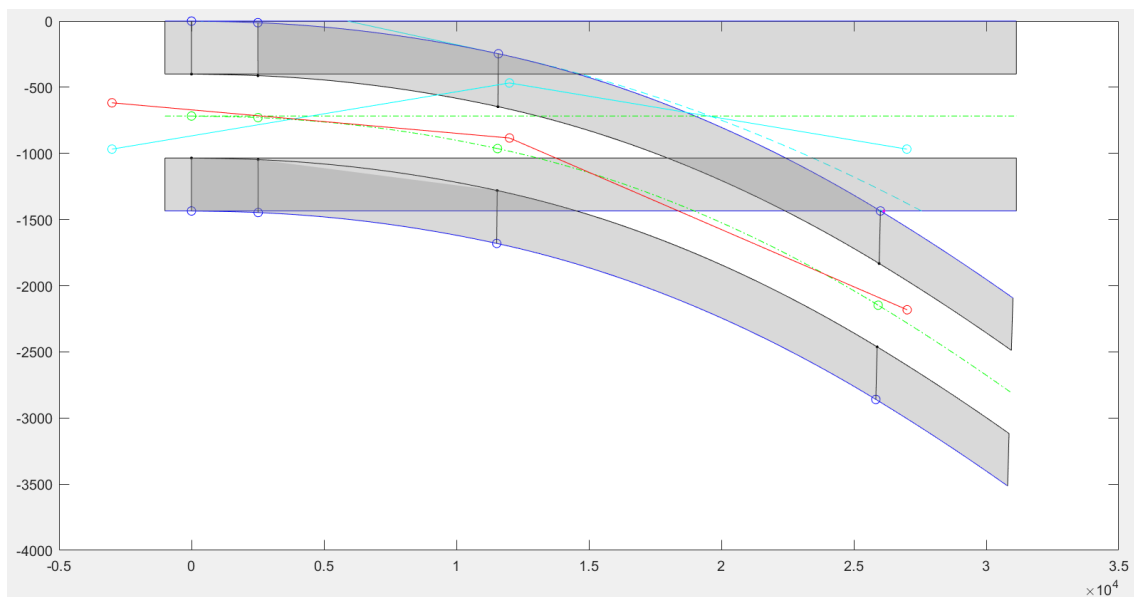


Figura 181 Switchtype = 62, NR60D, crossing 1 in 8,25

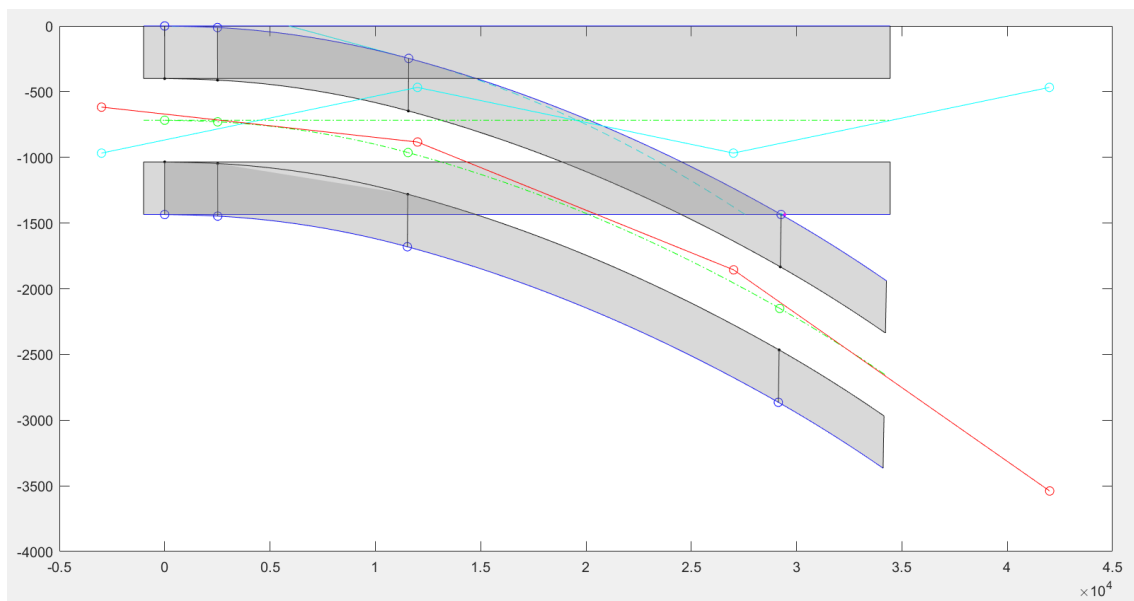


Figura 182 Switchtype = 63, NR60D, crossing 1 in 11

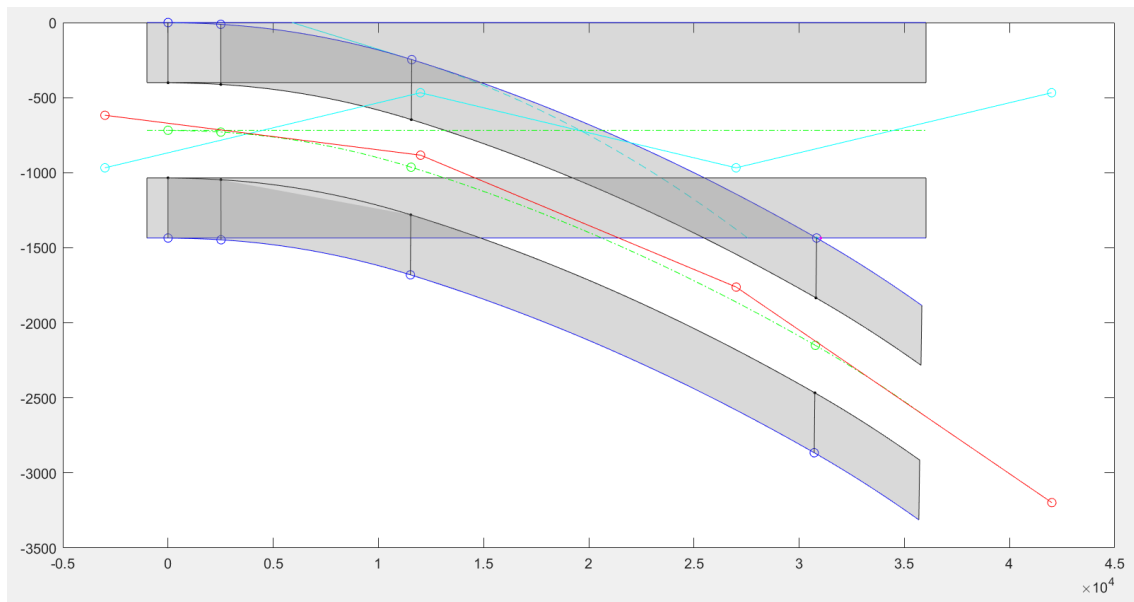


Figura 183 Switchtype = 64, NR60D, crossing 1 in 12,5

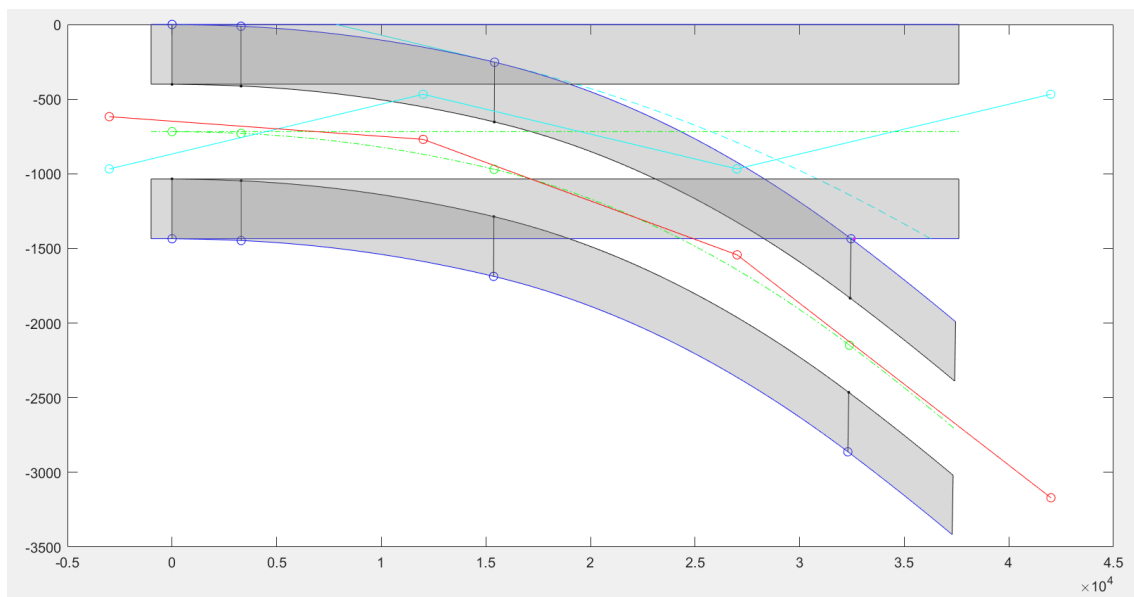


Figura 184 Switchtype = 65, NR60E, crossing 1 in 9,5

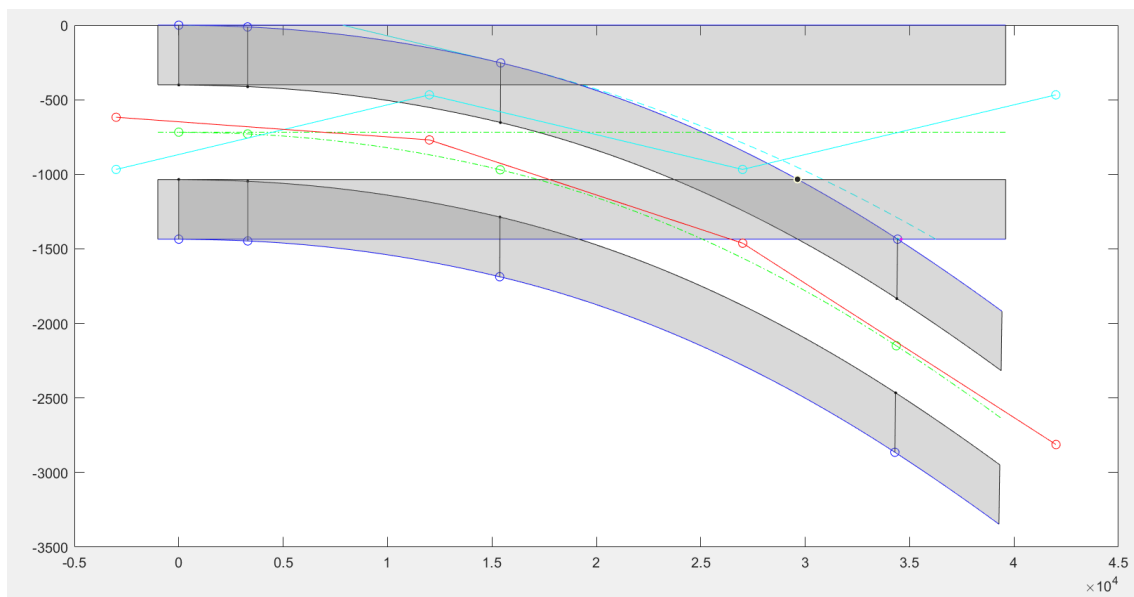


Figura 185 Switchtype = 66, NR60E, crossing 1 in 11

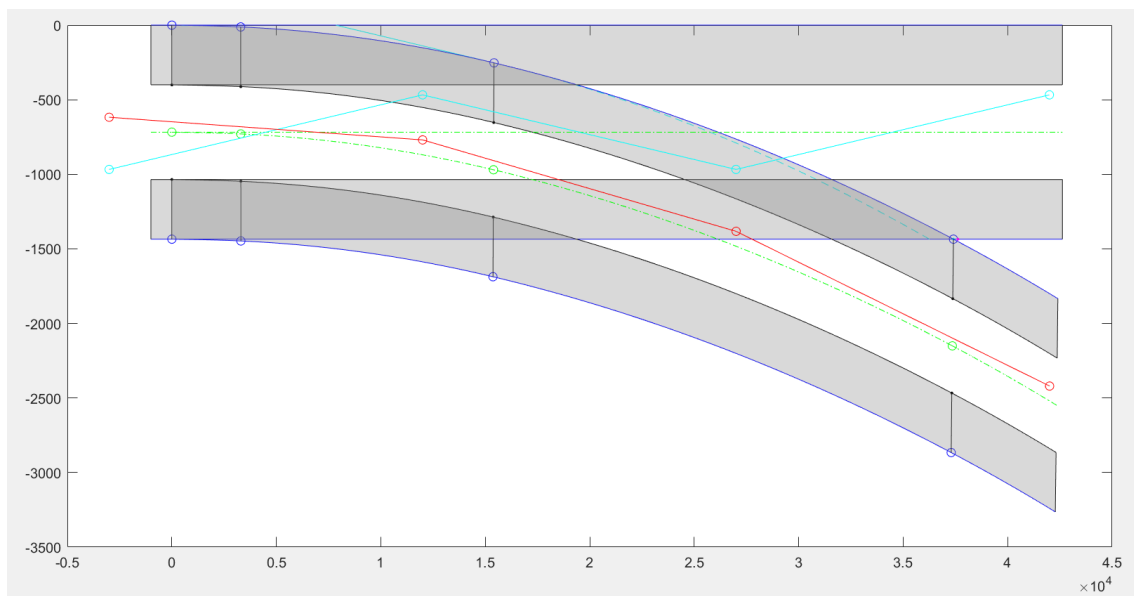


Figura 186 Switchtype = 67, NR60E, crossing 1 in 13,5

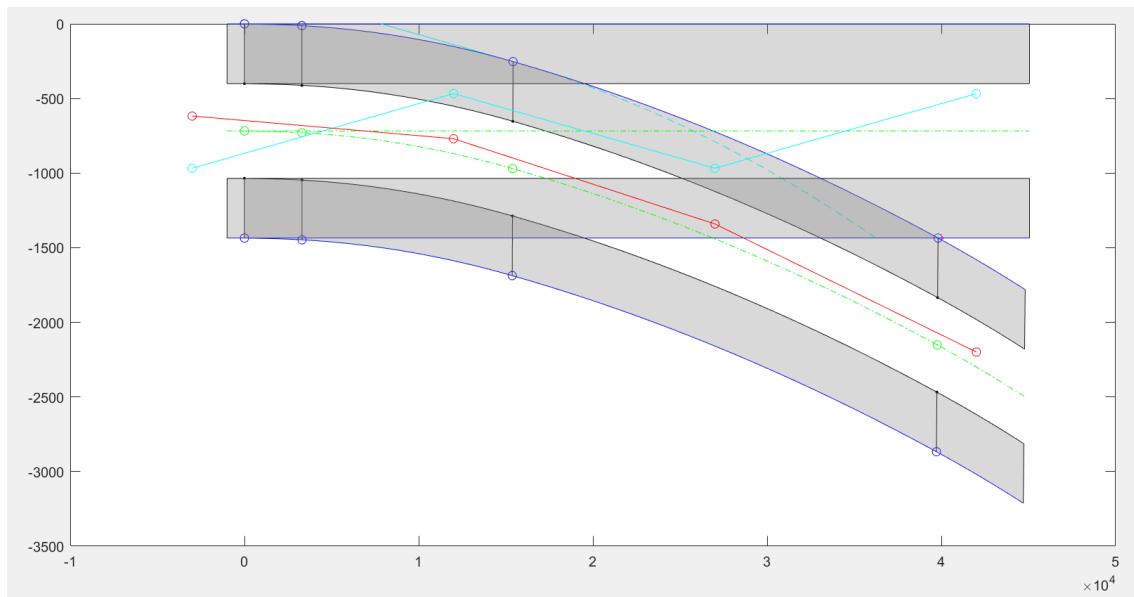


Figura 187 Switchtype = 68, NR60E, crossing 1 in 15,75

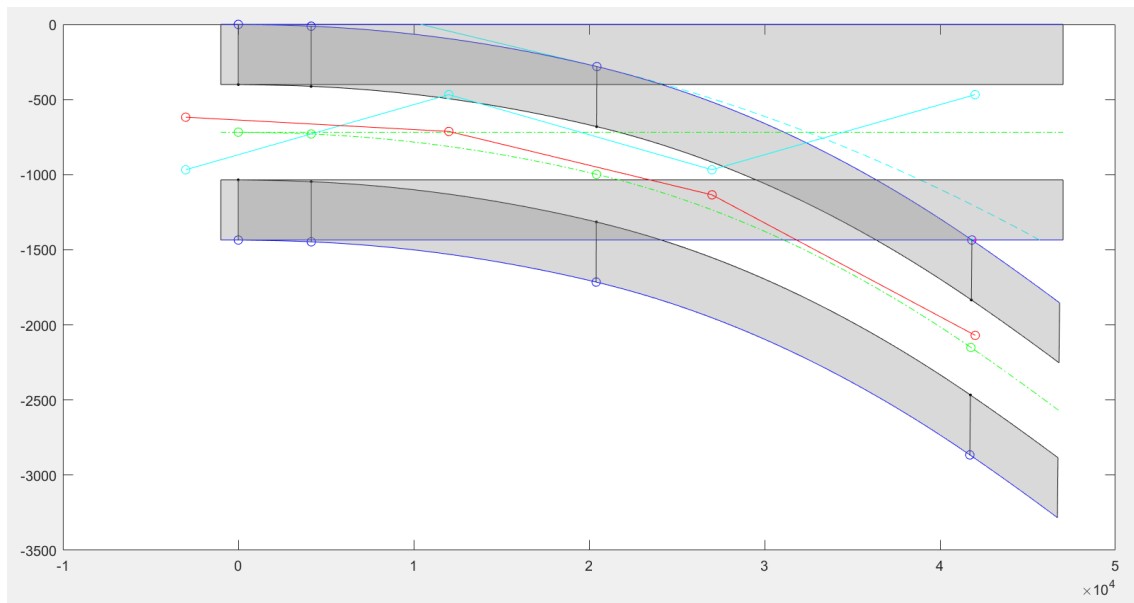


Figura 188 Switchtype = 69, NR60F, crossing 1 in 12,5

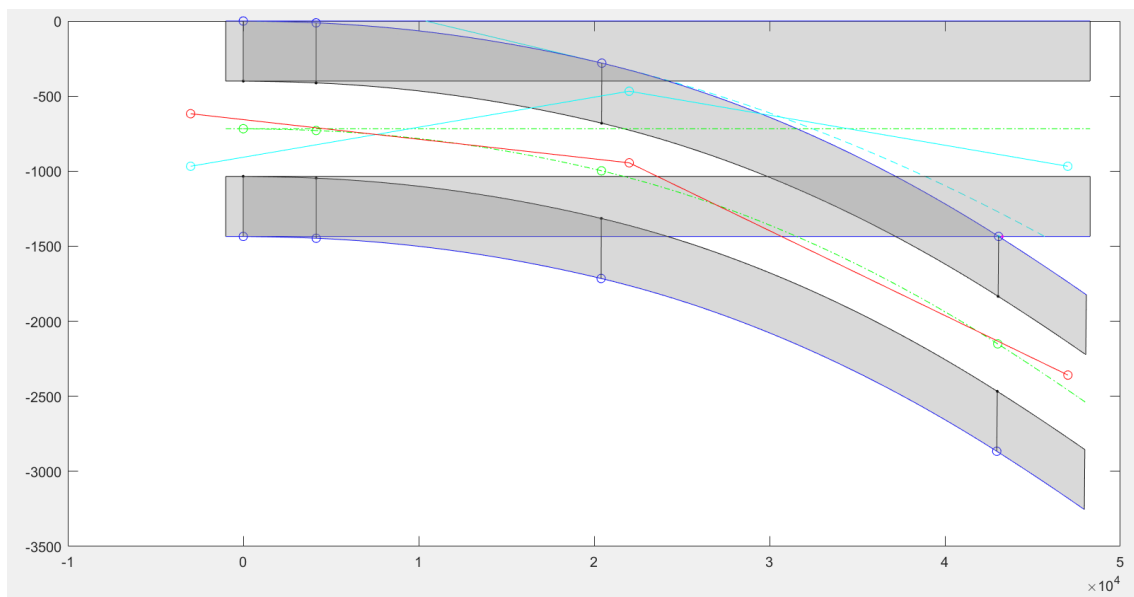


Figura 189 Switchtype = 70, NR60F, crossing 1 in 13,5

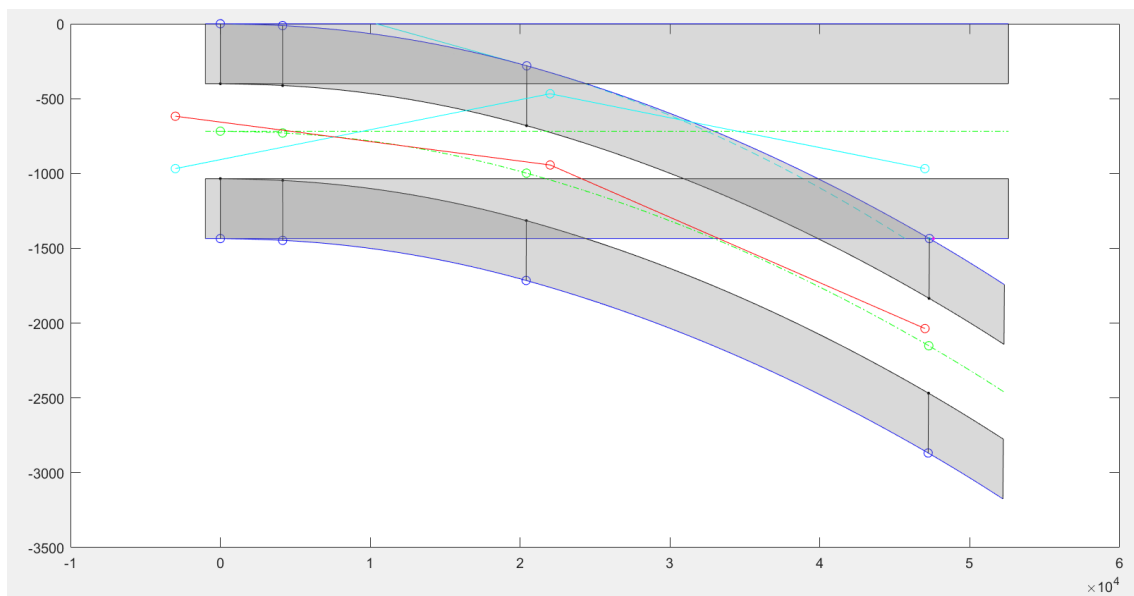


Figura 190 Switchtype = 71, NR60F, crossing 1 in 17,25

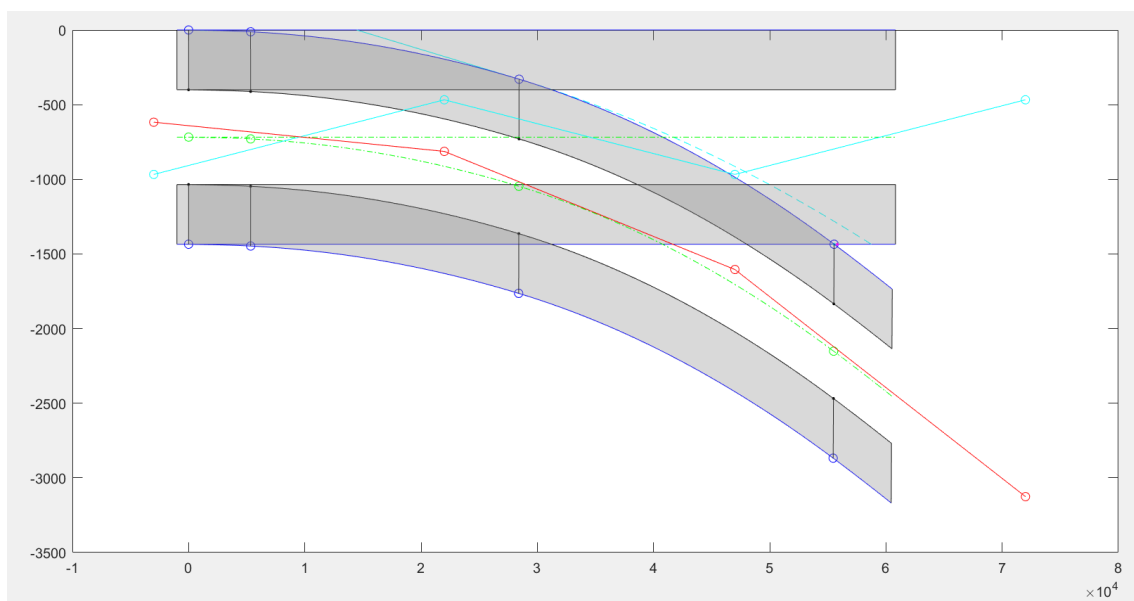


Figura 191 Switchtype = 72, NR60SG, crossing 1 in 17,25

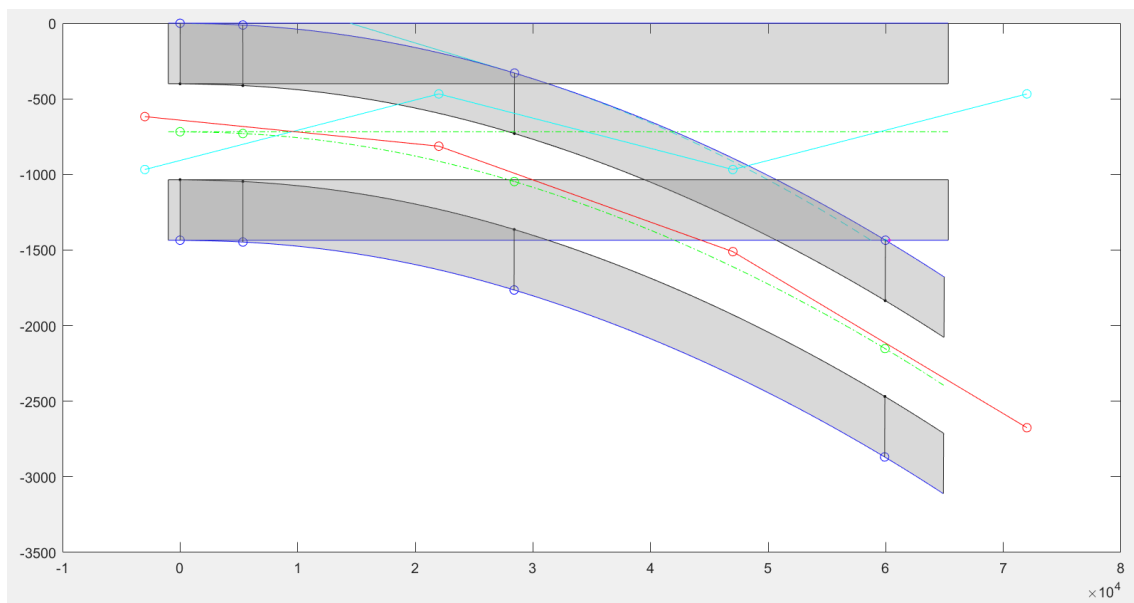


Figura 192 Switchtype = 73, NR60SG, crossing 1 in 21,5

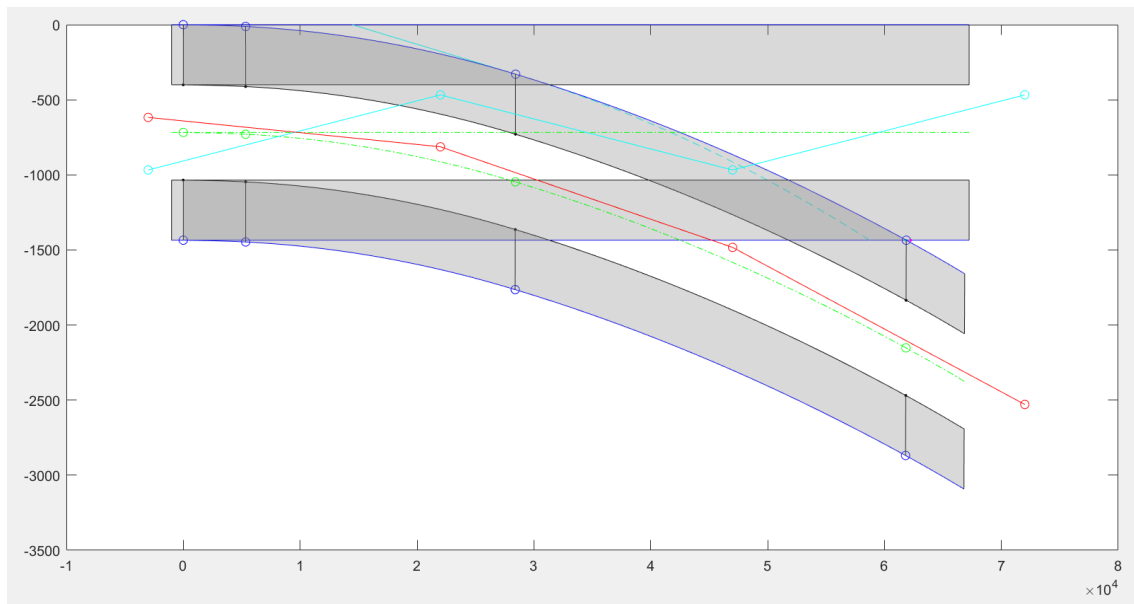


Figura 193 Switchtype = 74, NR60SG, crossing 1 in 23,5

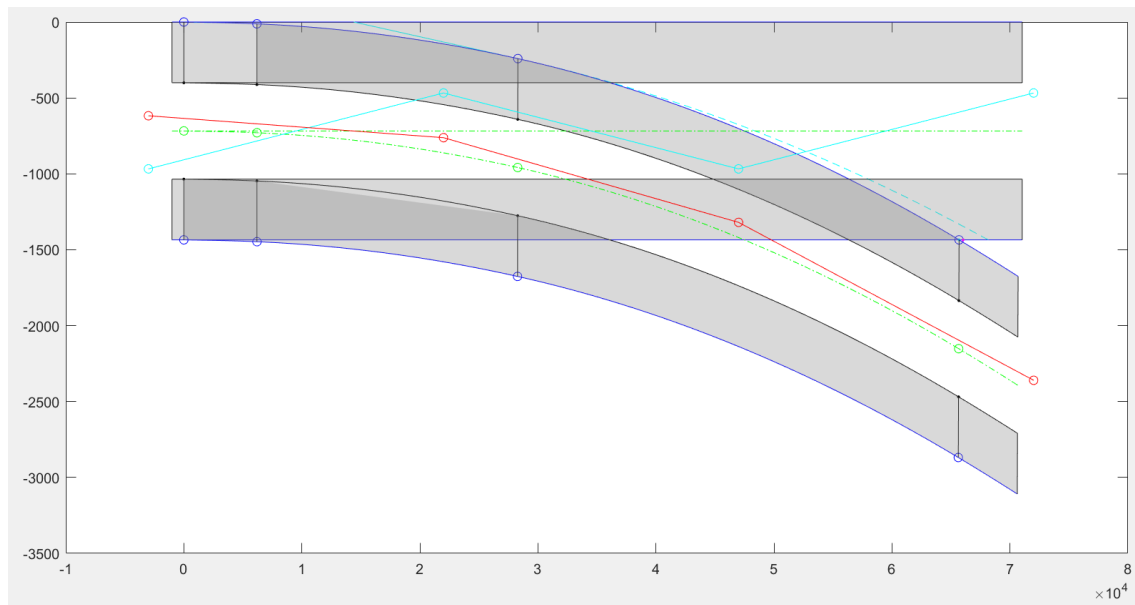


Figura 194 Switchtype = 75, NR60G, crossing 1 in 21,5

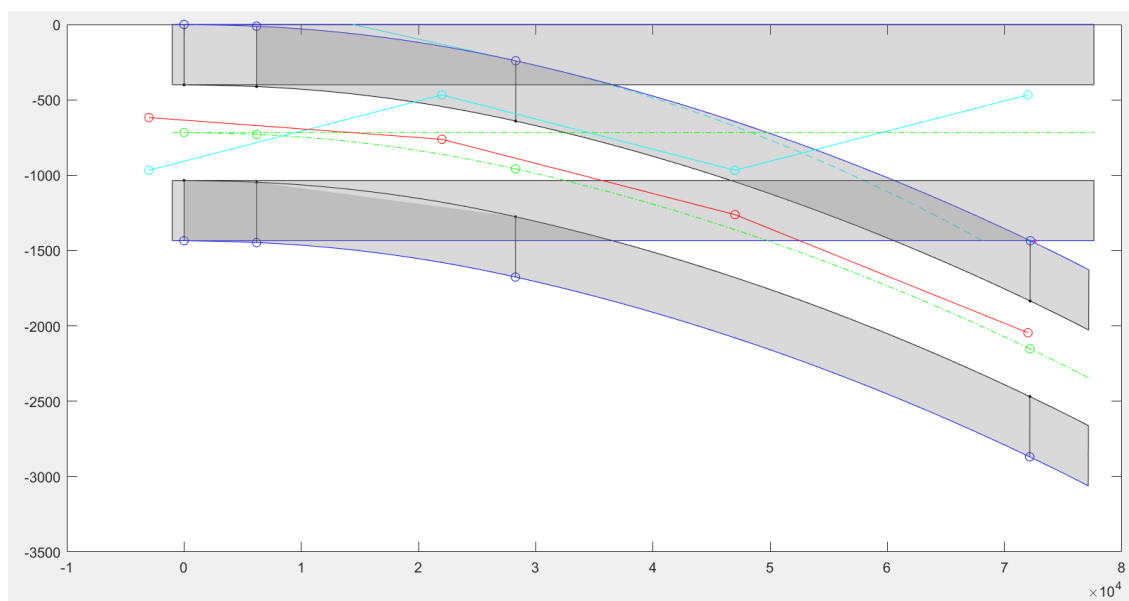


Figura 195 Switchtype = 76, NR60G, crossing 1 in 27

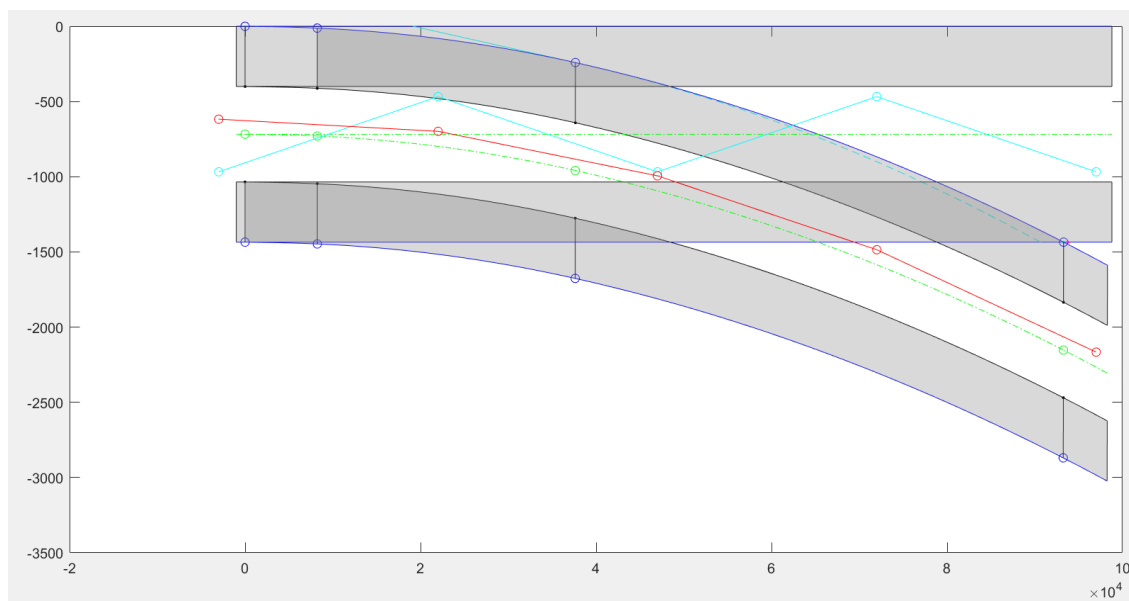
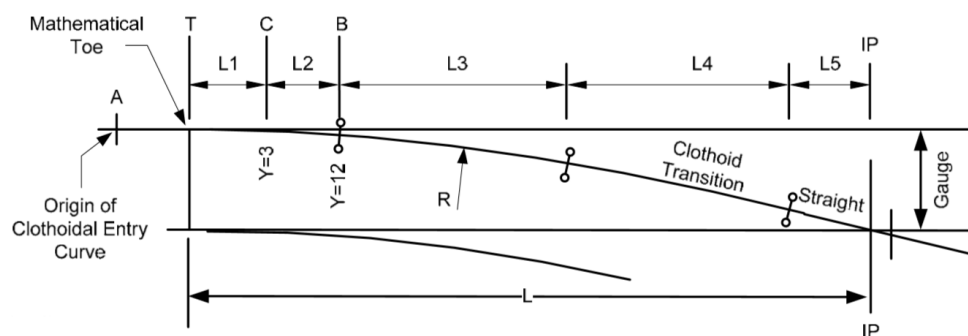


Figura 196 Switchtype = 77, NR60H, crossing 1 in 33,5

NR60 INCLINED S&C STANDARD TRANSITIONED TURNOUTS & CROSSOVERS - LEADS & RADII [ASSE16]

Tabla 25 NR60 Inclined s&c standard transitioned turnouts & crossovers - leads & radii [ASSE16]

MATLAB switchtype	Switch designation	Crossing angle 1 in ~	Turnout lead length L	Lead across 1970 six- foot	Total crossover lead length	Crossover speed mph	L3	L4	L5
78	NR60C	11	25326	5808	56460	25	9253	13234	662
79	NR60D	13,5	29800	7159	66760	30	9078	15872	2345
80	NR60E	17,25	38906	9179	86991	40	12122	21997	1492
81	NR60F	21,5	48761	11463	108985	50	16290	26382	1939
82	NR60SG	27	62107	14413	138627	60	23100	31618	2054
83	NR60G	31,25	72135	16692	160961	70	26010	38550	1384
84	NR60G	33,5	73814	17897	165525	75	22110	39555	5958



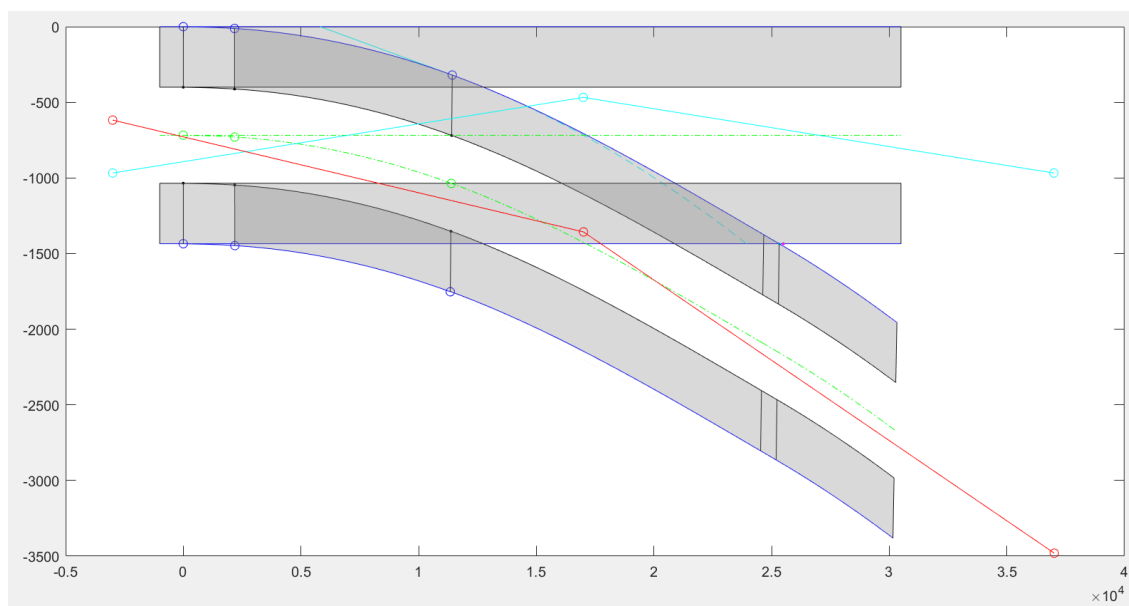


Figura 197 Switchtype = 78, NR60C, crossing 1 in 11

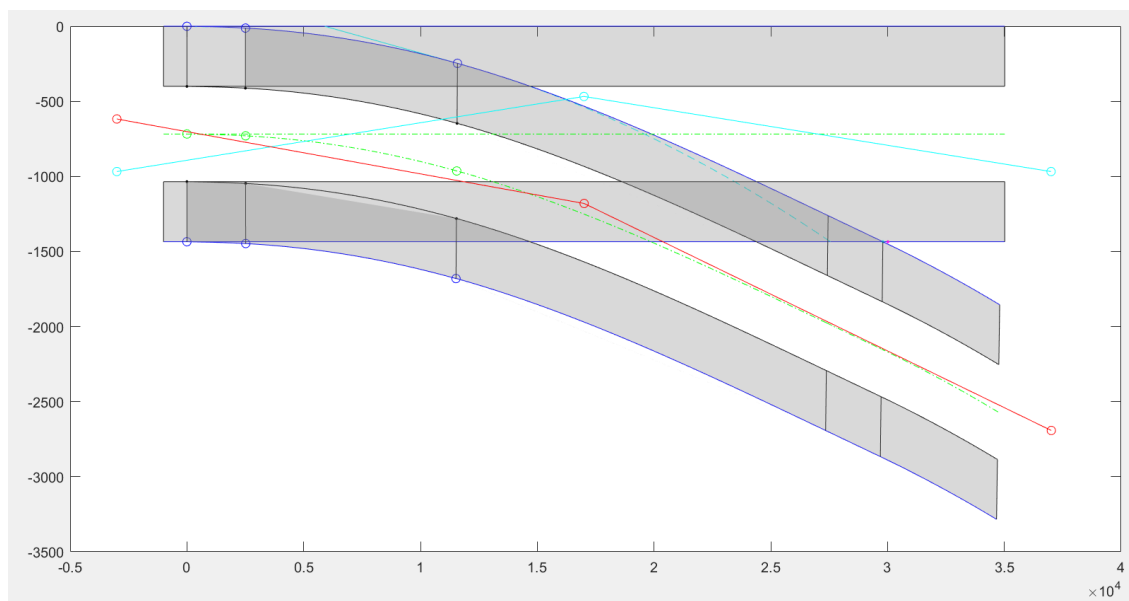


Figura 198 Switchtype = 79, NR60D, crossing 1 in 13,5

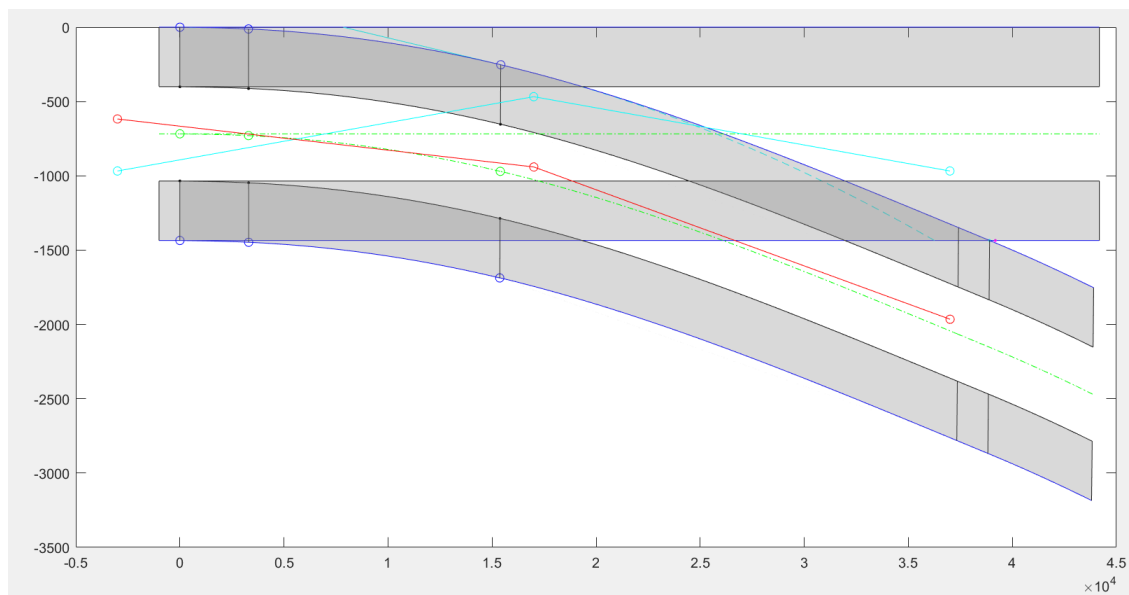


Figura 199 Switchtype = 80, NR60E, crossing 1 in 17,25

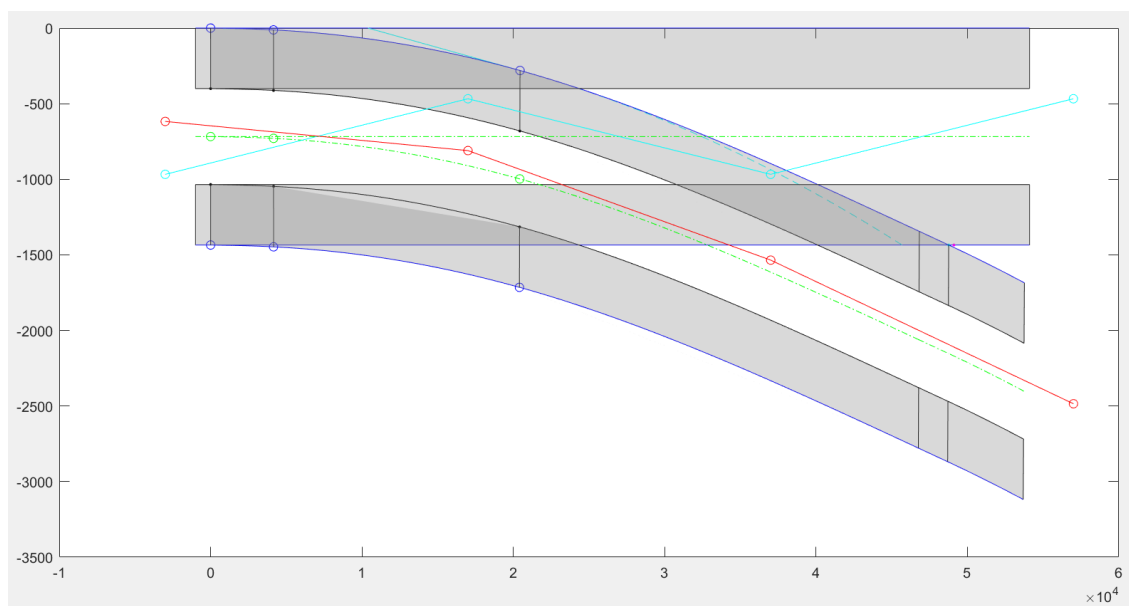


Figura 200 Switchtype = 81, NR60F, crossing 1 in 21,5

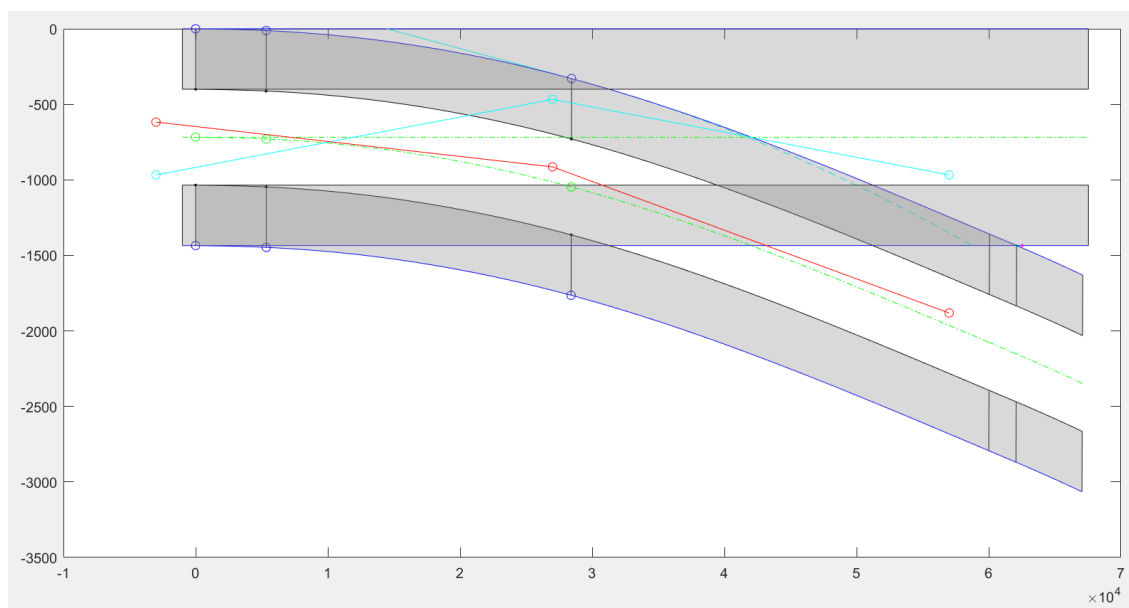


Figura 201 Switchtype = 82, NR60SG, crossing 1 in 27

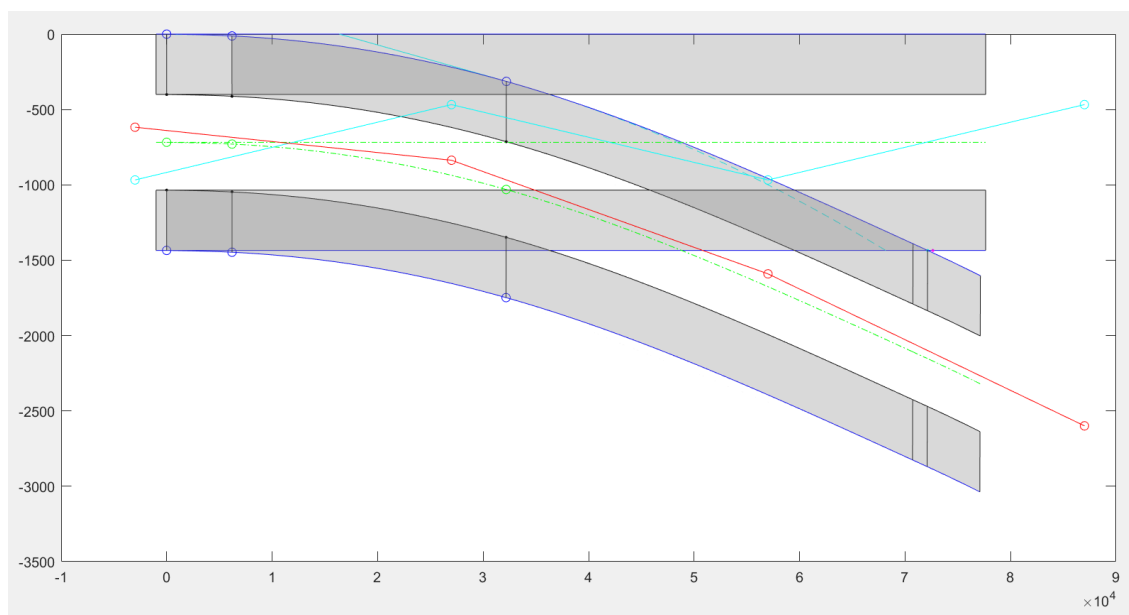


Figura 202 Switchtype = 83, NR60G, crossing 1 in 31,25

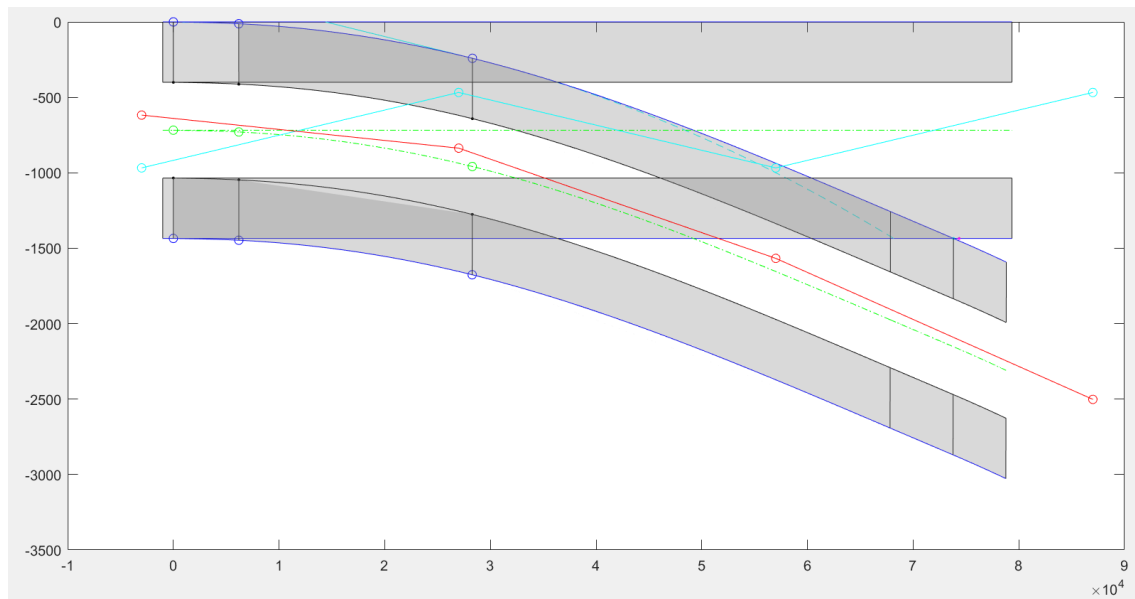


Figura 203 Switchtype = 84, NR60G, crossing 1 in 33,5

ANEXO III ODS

Objetivos de desarrollo sostenible

Los principales objetivos de desarrollo sostenible que se identifican en el mundo ferroviario son los siguientes.



Figura 204 Objetivos de desarrollo sostenible [ONU15]

Industria, innovación e infraestructura

La industrialización, la innovación y la infraestructura tienen un papel muy importante en la sostenibilidad, gracias a estas se genera empleo e ingresos, se introducen nuevas tecnologías y se usan de forma más eficiente los recursos. Este potencial es más aprovechado en los países más desarrollados, se debe conseguir aprovechar su potencial en lugares menos desarrollados. [ONU15]

En el caso del sector ferroviario se orienta a gestionar y crear infraestructuras que sean de calidad, seguras y sostenibles. Este sector apuesta también por modernizar e innovar sus infraestructuras para que estas sean más eficientes. [ADIF18]

Ciudades y comunidades sostenibles

El mundo tiende a estar cada vez más urbanizado, se espera que las ciudades y centros urbanos estén cada vez más poblados. En las ciudades se usan la mayoría de los recursos, más del 60%, y las emisiones de carbono son del 70% de las totales. A medida que las ciudades crecen, aumentan los barrios pobres con infraestructuras y servicios inadecuados. La contaminación del aire en las ciudades está aumentando.

El ferrocarril conecta el mundo urbano y el rural. En el sector ferroviario se busca reducir los accidentes y mejorar el sistema de transporte para que sea más seguro. En este trabajo en particular se trata de diseñar la línea de contacto para que en las zonas de desvíos el pantógrafo esté siempre en contacto con la catenaria, evitando que se choque con obstáculos que provoquen accidentes muy graves.

Acción por el clima

En la actualidad se están registrando datos preocupantes, la pasada década fue la más calurosa de la historia y los gases de efecto invernadero de la atmósfera no paran de aumentar. El cambio climático está cambiando los sistemas meteorológicos, subiendo el nivel del mar y afectando a las economías. Las emisiones van a seguir aumentando, el cambio climático no va a parar.

La lucha contra el cambio climático es un elemento fundamental, los ferrocarriles han contribuido en la búsqueda de un medio de transporte limpio y eficiente, la mayoría de los trenes actuales con eléctricos.