



ESTUDIO Y APLICACIÓN DE LA NORMATIVA AAR (Association of American Railroads) PARA LA VERIFICACIÓN DE INSCRIPCIÓN EN CURVAS DE VAGONES DE FERROCARRIL

Joaquin F. Desirio^{1,2,3}, Alejandro J. Patanella^{1,2,3}, Lucas Montelongo⁴

¹ Centro Tecnológico Aeroespacial.
Calle 116 e/47 y 48, La Plata, Argentina
correo-e: joaquin.desirio@ing.unlp.edu.ar

² Grupo de Ensayos Mecánicos Aplicados.

³ Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata.

⁴ Fabricaciones Militares Sociedad del Estado.

RESUMEN

Se realizará un análisis y presentación de los resultados de cálculos para la verificación de inscripción en curvas (horizontales y verticales) de un vagón de ferrocarril siguiendo los lineamientos especificados en "Manual of Standards and Recommended Practices – SECTION C - PART II – Design, Fabrication and Construction of Freight Cars (2011)" pudiendo negociar las curvas mínimas posibles con el uso de sistemas de enganches estándar y alternativos, teniendo en cuenta para este estudio que los vagones no deberán exceder las curvas de radio mínimo especificadas según AAR^[1] y FAT^[2] y sin registrarse interferencia entre la carrocería del vagón, los bogies y la vía. Es de destacar que este estudio es desarrollado en conjunto entre Centro Tecnológico Aeroespacial (Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata), y Fabricaciones Militares Sociedad del Estado.

Palabras Clave: Verificación inscripción curvas vagones AAR.

1 INTRODUCCIÓN

Se realizará el análisis de un vagón de diseño para verificar si el mismo puede negociar las curvas mínimas posibles, evaluando las posibilidades con el uso de un sistema de enganche estándar y otra con enganche alternativo, pero en ningún caso los vagones deberán exceder las curvas de radio mínimo especificadas según AAR y FAT.

Se presentarán los distintos resultados del cálculo y los análisis de las geometrías correspondientes para la determinación del cumplimiento de la inscripción en curva (horizontal y vertical) y de la negociación de cambio de vías. Este análisis se realiza para las distintas trochas.

Se seguirán los lineamientos especificados en “Manual of Standards and Recommended Practices – SECTION C - PART II – Design, Fabrication and Construction of Freight Cars (2011)”, ESPECIFICACION TECNICA FAT: VP-3009 “especificación técnica para la aprobación y matriculación de vagones de propiedad particular (1978)”

1.1 INSCRIPCION EN CURVAS

La inscripción del vagón acoplado en una curva horizontal y vertical se debe verificar para el enganche con un vagón estándar AAR (BASE CAR) y con otro vagón de diseño (LIKE CAR), tanto en la posición de ingreso a la curva como ya inscripto.

Para el presente análisis se utilizará un vagón estándar (BASE) y un vagón de diseño (LIKE), este último con las dos variantes en el equipo de enganche, tracción y choque con Acople SBE68C, Yugo Y45A y otra con Acople 13B, Yugo 13B.

Los cálculos deben realizarse considerando el sistema de amortiguamiento en posición de reposo, en compresión y en tracción, como así también para diferentes combinaciones de vagones.

1.1.1 CURVAS HORIZONTALES

Los vagones deberán estar diseñados para operar sobre las respectivas curvas horizontales sin interferencia entre bogies y carrocería, ni atascamiento de la timonera de frenos.

Los mismos no deberán exceder los requerimientos de radios de curva horizontal mínimos para vagones acoplados especificados en la AAR y Ferrocarriles Argentinos según especificación técnica FAT.

1.1.1.1 Vagón Acoplado

De acuerdo a [R.1] el método estándar para el cálculo del radio mínimo de curva es una derivación de métodos analíticos y datos de servicio. El cálculo comienza con la Ecuación (1) y si el ángulo de desplazamiento lateral del enganche no cumple con los datos de la Tabla 2.2 sección 2.1.4.4 [R.1] se debe utilizar la Ecuación (2)

$$R = \frac{(B_2)^2 - (D_2)^2 - E^2}{2E} \quad (1)$$

$$R = \frac{(B_2 + L_1)^2 - (D_2)^2 - E^2}{2E} \quad (2)$$

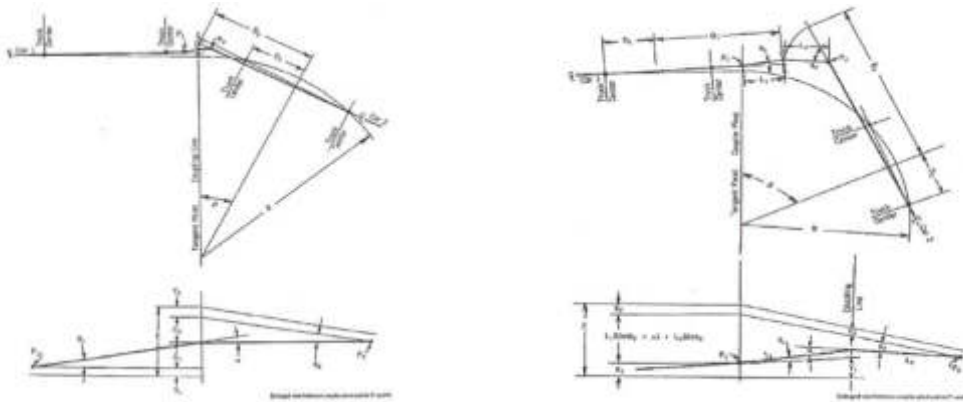


Figura 1: Vagones acoplados en curva con enganche en la tangente y con pivote en la tangente

Para cada una de las configuraciones (Tabla 1, Tabla 4) se expresan los resultados obtenidos utilizando la Ecuación (1) (Tabla 2, Tabla 5) y Ecuación (2) (Tabla 3, Tabla 6) para las distintas combinaciones de vagones, donde se indican el ángulo horizontal máximo entre acoples (α) y la verificación de los radios mínimos para las distintas trochas.

Tabla 1. Datos de Vagón BASE y Vagón LIKE (Configuración 1)

	Vagón estándar (BASE)	Vagón diseño (LIKE)
Acople	SBE60C	SBE68C
Yugo	Y40A	Y45A
Largo entre caras de acople [ft]	44,65	43,37
Largo entre cabezales [ft]	42,03	40,32
Largo entre centros de bogie [ft]	31,11	30,67
e [°]	7	13
Amortiguador normal [in]	3,47	9,67
Amortiguador tracción [in]	3,77	10,24
Amortiguador compresión [in]	3,16	9,11
Long. centro de acople fin de cola [in]	28,46	43,0
Angulo α horizontal max. entre acoples [°]	13,5	

Tabla 2. Resultados análisis Curva Horizontal para configuración 1 (Ecuación 1)

ECUACION 1: Centro de acople en tangencia																
LIKE(1)+BASE(2)																
CONDICION	R (ft)	E	B1	B2	D1	D2	Y1	Y2	C1	C2	α	β	θ1	θ2	R (m)	
NORMAL	94,48	1,35	21,69	22,33	15,34	15,555	1,51	1,52	9,67	3,47	19,47	13,47	13	7	28,80	
COMPRESION	99,92	1,28	21,69	22,33	15,34	15,555	1,51	1,52	9,11	3,16	18,74	12,74	13	7	30,46	
TRACCION	89,58	1,42	21,69	22,33	15,34	15,555	1,51	1,52	10,24	3,77	20,20	14,20	13	7	27,30	

BASE(1)+LIKE(2)																
CONDICION	R (ft)	E	B1	B2	D1	D2	Y1	Y2	C1	C2	α	β	θ1	θ2	R (m)	
NORMAL	86,55	1,35	22,33	21,69	15,56	15,34	1,52	1,51	3,47	9,67	8,28	14,28	7	13	26,38	
COMPRESION	91,54	1,28	22,33	21,69	15,56	15,34	1,52	1,51	3,16	9,11	7,51	13,51	7	13	27,90	
TRACCION	82,06	1,42	22,33	21,69	15,56	15,34	1,52	1,51	3,77	10,24	9,06	15,06	7	13	25,01	

LIKE(1)+LIKE(2)																
CONDICION	R (ft)	E	B1	B2	D1	D2	Y1	Y2	C1	C2	α	β	θ1	θ2	R (m)	
NORMAL	62,15	1,86	21,69	21,69	15,34	15,34	1,51	1,51	9,67	9,67	19,80	19,80	13	13	18,94	
COMPRESION	65,53	1,77	21,69	21,69	15,34	15,34	1,51	1,51	9,11	9,11	18,80	18,80	13	13	19,97	
TRACCION	59,05	1,96	21,69	21,69	15,34	15,34	1,51	1,51	10,24	10,24	20,82	20,82	13	13	18,00	

Tabla 3. Resultados análisis Curva Horizontal para configuración 1 (Ecuación 2)

ECUACION 2: Pivote en punto de tangencia																	
LIKE(1)+BASE(2)																	
CONDICION	R (ft)	E	B1	B2	D1	D2	Y1	Y2	L1	L2	X1	X2	α	β	θ1	θ2	R (m)
NORMAL	118,59	1,80	21,69	22,33	15,34	15,555	0,126	0,127	3,58	2,37	0,114	0,139	13,5	12,43	8,07	7	36,14
COMPRESION	118,59	1,80	21,69	22,33	15,34	15,555	0,126	0,127	3,58	2,37	0,114	0,139	13,5	12,43	8,07	7	36,14
TRACCION	118,59	1,80	21,69	22,33	15,34	15,555	0,126	0,127	3,58	2,37	0,114	0,139	13,5	12,43	8,07	7	36,14

BASE(1)+LIKE(2)																	
CONDICION	R (ft)	E	B1	B2	D1	D2	Y1	Y2	L1	L2	X1	X2	α	β	θ1	θ2	R (m)
NORMAL	80,09	2,12	22,33	21,69	15,56	15,34	0,127	0,126	2,37	3,58	0,119	0,134	13,5	17,02	9,48	13	24,41
COMPRESION	80,09	2,12	22,33	21,69	15,56	15,34	0,127	0,126	2,37	3,58	0,119	0,134	13,5	17,02	9,48	13	24,41
TRACCION	80,09	2,12	22,33	21,69	15,56	15,34	0,127	0,126	2,37	3,58	0,119	0,134	13,5	17,02	9,48	13	24,41

LIKE(1)+LIKE(2)																	
CONDICION	R (ft)	E	B1	B2	D1	D2	Y1	Y2	L1	L2	X1	X2	α	β	θ1	θ2	R (m)
NORMAL	74,59	2,66	21,69	21,69	15,34	15,34	0,126	0,126	3,58	3,58	0,114	0,138	13,5	19,09	7,41	13	22,73
COMPRESION	74,59	2,66	21,69	21,69	15,34	15,34	0,126	0,126	3,58	3,58	0,114	0,138	13,5	19,09	7,41	13	22,73
TRACCION	74,59	2,66	21,69	21,69	15,34	15,34	0,126	0,126	3,58	3,58	0,114	0,138	13,5	19,09	7,41	13	22,73

Tabla 4. Datos de Vagón BASE y Vagón LIKE (Configuración 2)

	Vagón estándar (BASE)	Vagón diseño (LIKE)
Acople	SBE60C	13B
Yugo	Y40A	13B
Largo entre caras de acople [ft]	44,65	43,37
Largo entre cabezales [ft]	42,03	40,32
Largo entre centros de bogie [ft]	31,11	30,67
ε [°]	7	7
Amortiguador normal [in]	3,47	3,67
Amortiguador tracción [in]	3,77	3,99
Amortiguador compresión [in]	3,16	3,36
Long. centro de acople fin de cola [in]	28,46	30,17
Angulo α horizontal max. entre acoples [°]	13,5	

Tabla 5. Resultados análisis Curva Horizontal para configuración 2 (Ecuación 1)

ECUACION 1: Centro de acople en tangencia																
LIKE(1)+BASE(2)																
CONDICION	R (ft)	E	B1	B2	D1	D2	Y1	Y2	C1	C2	α	β	θ1	θ2	R (m)	
NORMAL	150,86	0,85	21,69	22,33	15,34	15,555	1,51	1,52	3,67	3,47	8,46	8,46	7	7	45,98	
COMPRESION	160,71	0,80	21,69	22,33	15,34	15,555	1,51	1,52	3,36	3,16	7,95	7,95	7	7	48,98	
TRACCION	142,14	0,90	21,69	22,33	15,34	15,555	1,51	1,52	3,99	3,77	8,98	8,98	7	7	43,32	

BASE(1)+LIKE(2)																
CONDICION	R (ft)	E	B1	B2	D1	D2	Y1	Y2	C1	C2	α	β	θ1	θ2	R (m)	
NORMAL	138,25	0,85	22,33	21,69	15,56	15,34	1,52	1,51	3,47	3,67	8,97	8,97	7	7	42,14	
COMPRESION	147,28	0,80	22,33	21,69	15,56	15,34	1,52	1,51	3,16	3,36	8,42	8,42	7	7	44,89	
TRACCION	130,26	0,90	22,33	21,69	15,56	15,34	1,52	1,51	3,77	3,99	9,52	9,52	7	7	39,70	

LIKE(1)+LIKE(2)																
CONDICION	R (ft)	E	B1	B2	D1	D2	Y1	Y2	C1	C2	α	β	θ1	θ2	R (m)	
NORMAL	135,74	0,86	21,69	21,69	15,34	15,34	1,51	1,51	3,67	3,67	9,13	9,13	7	7	41,37	
COMPRESION	144,44	0,81	21,69	21,69	15,34	15,34	1,51	1,51	3,36	3,36	8,59	8,59	7	7	44,02	
TRACCION	127,79	0,92	21,69	21,69	15,34	15,34	1,51	1,51	3,99	3,99	9,70	9,70	7	7	38,95	

Tabla 6. Resultados análisis Curva Horizontal para configuración 2 (Ecuación 2)

ECUACION 2: Pivote en punto de tangencia																	
LIKE(1)+BASE(2)																	
CONDICION	R (ft)	E	B1	B2	D1	D2	Y1	Y2	L1	L2	X1	X2	α	β	θ1	θ2	R (m)
NORMAL	131,16	1,42	21,69	22,33	15,34	15,555	0,126	0,127	2,51	2,37	0,117	0,135	13,5	10,80	9,70	7	39,98
COMPRESION	131,16	1,42	21,69	22,33	15,34	15,555	0,126	0,127	2,51	2,37	0,117	0,135	13,5	10,80	9,70	7	39,98
TRACCION	131,16	1,42	21,69	22,33	15,34	15,555	0,126	0,127	2,51	2,37	0,117	0,135	13,5	10,80	9,70	7	39,98

BASE(1)+LIKE(2)																	
CONDICION	R (ft)	E	B1	B2	D1	D2	Y1	Y2	L1	L2	X1	X2	α	β	θ1	θ2	R (m)
NORMAL	122,92	1,39	22,33	21,69	15,56	15,34	0,127	0,126	2,37	2,51	0,119	0,134	13,5	11,16	9,34	7	37,46
COMPRESION	122,92	1,39	22,33	21,69	15,56	15,34	0,127	0,126	2,37	2,51	0,119	0,134	13,5	11,16	9,34	7	37,46
TRACCION	122,92	1,39	22,33	21,69	15,56	15,34	0,127	0,126	2,37	2,51	0,119	0,134	13,5	11,16	9,34	7	37,46

LIKE(1)+LIKE(2)																	
CONDICION	R (ft)	E	B1	B2	D1	D2	Y1	Y2	L1	L2	X1	X2	α	β	θ1	θ2	R (m)
NORMAL	121,10	1,44	21,69	21,69	15,34	15,34	0,126	0,126	2,51	2,51	0,117	0,134	13,5	11,39	9,11	7	36,91
COMPRESION	121,10	1,44	21,69	21,69	15,34	15,34	0,126	0,126	2,51	2,51	0,117	0,134	13,5	11,39	9,11	7	36,91
TRACCION	121,10	1,44	21,69	21,69	15,34	15,34	0,126	0,126	2,51	2,51	0,117	0,134	13,5	11,39	9,11	7	36,91

1.1.1.2 Negocio de cambio

Según [R.1] el vagón debe ser capaz de negociar un cambio de vía N° 7 con separación de 3962 mm. Sin embargo, para el caso del FCGSM se utilizan cambios de vías del tipo N° 8 con una separación entre vías de 4500 mm.

Los parámetros principales de un cruce de vías vienen dados por su número (n), el cual es el cociente entre el largo y el ancho de las agujas. A su vez este número define el ángulo de la tangente del desvío según Ecuación (3), con el cual se determina la factibilidad de inscripción del vagón en los desvíos.

$$F = 2 \cdot \arctg \left(\frac{1}{2n} \right) \tag{3}$$

Los datos de los cambios se presentan en la (Tabla 7, Tabla 8). A partir de ellos se determina el radio del empalme, el cual se compara con los radios de curva horizontal para asegurarse el paso sin problemas por el cambio.

Los resultados son válidos mientras ambos bogies no se encuentren en el radio de empalme a la vez.

Tabla 7. Datos para cambio N°7

Trocha [mm]	1435
n°FROG	7
Angulo de la tangente [°]	8,17
Separación entre vías [mm]	3962
Radio de empalme [m]	140

Tabla 8. Datos para cambio N°8

Trocha [mm]	1676
n°FROG	8
Angulo de la tangente [°]	7,15
Separación entre vías [mm]	4500
Radio de empalme [m]	214,5

1.1.1.3 Interferencia en curva

Se verifica que no haya contacto entre las esquinas de los vagones al transitar una curva. La posición de los vagones transitando una curva se muestra en las siguientes figuras. Delta (Δ) representa la luz disponible entre vagones durante una curva.

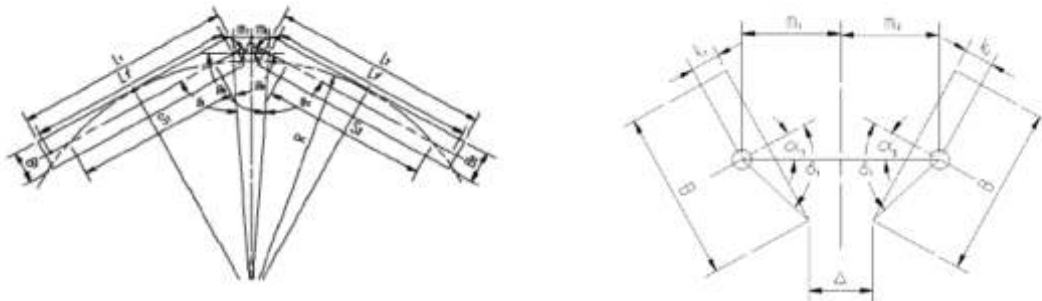


Figura 2: Vagones en curva

A través de la geometría de la Figura 2 se determina la Ecuación (4) que es la utilizada para el cálculo de la luz entre vagones:

$$\Delta = 2m - \cos(\delta_1 - \alpha_1) \sqrt{\left(\frac{B_1}{2}\right)^2 + K_1^2} - \cos(\delta_2 - \alpha_2) \sqrt{\left(\frac{B_2}{2}\right)^2 + K_2^2} \quad (4)$$

A continuación, se muestran los resultados obtenidos para cada una de las 2 (dos) configuraciones entre el vagón BASE y los vagones LIKE con sus respectivos enganches y con sus tres combinaciones entre vagones. (Tabla 9, Tabla 10)

Tabla 9. Interferencia en curva (Configuración 1)

Curva Horizontal de 50 m			
Resultados			
	LIKE(1)+BASE(2)	BASE(1)+LIKE(2)	LIKE(1)+LIKE(2)
$\beta 1(^{\circ})$	83,67	83,03	83,67
$\beta 4(^{\circ})$	83,03	83,67	83,67
$\beta 2(^{\circ})$	88,96	88,96	88,75
$\beta 3(^{\circ})$	88,96	88,96	88,75
$\alpha 1(^{\circ})$	7,36	8,00	7,57
$\alpha 2(^{\circ})$	8,00	7,36	7,57
$\delta 1(^{\circ})$	63,36	75,49	63,36
$\delta 2(^{\circ})$	75,49	63,36	63,36
Δ (mm)	538,38	538,41	611,41

Tabla 10. Interferencia en curva (Configuración 2)

Curva Horizontal de 50 m			
Resultados			
	LIKE(1)+BASE(2)	BASE(1)+LIKE(2)	LIKE(1)+LIKE(2)
$\beta 1(^{\circ})$	83,31	83,03	83,31
$\beta 4(^{\circ})$	83,03	83,31	83,31
$\beta 2(^{\circ})$	89,15	89,15	89,12
$\beta 3(^{\circ})$	89,15	89,15	89,12
$\alpha 1(^{\circ})$	7,55	7,82	7,57
$\alpha 2(^{\circ})$	7,82	7,55	7,57
$\delta 1(^{\circ})$	76,44	75,49	76,44
$\delta 2(^{\circ})$	75,49	76,44	76,44
Δ (mm)	535,76	535,74	605,86

1.1.2 CURVAS VERTICALES

Los vagones deberán estar diseñados para operar sobre las respectivas curvas verticales sin registrarse interferencia entre la caja del vagón, los bogies y la vía. La inscripción en estas curvas debe verificarse para el caso de máxima deflexión de la suspensión (3").

Los mismos no deberán exceder los requerimientos de radios de curva vertical mínimos para vagones acoplados especificados en la AAR y Ferrocarriles Argentinos según especificación técnica FAT.

1.1.2.1 Vagón acoplado

De acuerdo a [R.1] el método de determinación del radio mínimo de curva se deriva de métodos analíticos y de datos de operación. El mismo se debe calcular para curvas cóncavas y convexas, y

para el enganche en la tangente o el punto de pivote en la tangente. El cálculo debe comenzar con la Ecuación (5), y en el caso de que no se cumpla el ángulo de rotación vertical de acuerdo a la Tabla 2.2 sección 2.1.4.4 [R.1] se debe continuar con la Ecuación (6)

$$R = \frac{(B_2)^2 - (D_2)^2 - E^2}{2E} \quad (5)$$

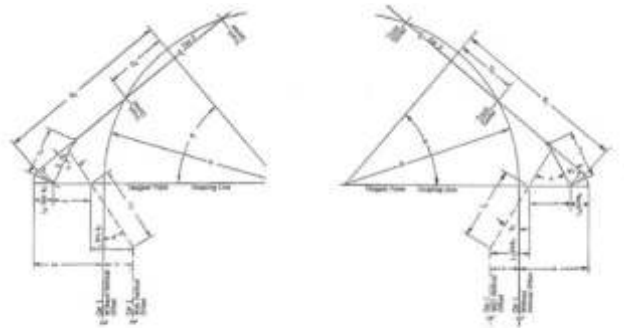


Figura 3: vagones acoplados en curva vertical convexa y cóncava con enganche en la tangente

$$R = \frac{(B_2 + L_1)^2 - (D_2)^2 - E^2}{2E} \quad (6)$$

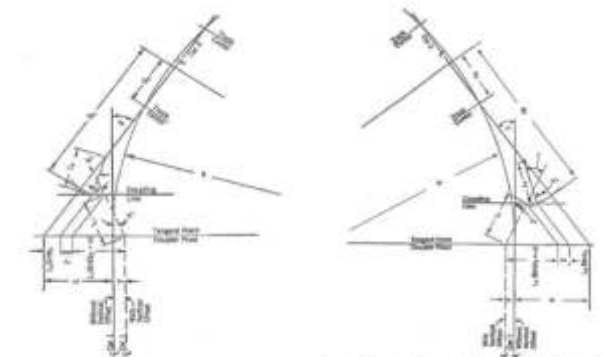


Figura 4: vagones acoplados en curva vertical convexa y cóncava con pivote en la tangente

Para cada una de las configuraciones (Tabla 11, Tabla 14) se expresan los resultados obtenidos utilizando la Ecuación (5) (Tabla 12, Tabla 15) y Ecuación (6) (Tabla 13, Tabla 16) para las distintas combinaciones de vagones, donde se indican el ángulo vertical máximo entre acoples (α) y la verificación de los radios mínimos para las distintas trochas.

Para la determinación del cálculo del radio mínimo utilizando la Ecuación (6) se tuvo en cuenta la consideración del movimiento angular nulo de los acoples (hacia abajo) según las distintas configuraciones propuestas, tanto en curva convexa como para curva cóncava según referencia [R.1].

Tabla 11. Datos de Vagón BASE y Vagón LIKE (Configuración 1)

	Vagón estándar (BASE)	Vagón diseño (LIKE)
Acople	SBE60C	13B
Yugo	Y40A	13B
Largo entre caras de acople [ft]	44,65	43,37
Largo entre cabezales [ft]	42,03	40,32
Largo entre centros de bogie [ft]	31,11	30,67
e [°] Arriba	1,77	1,17
e [°] Abajo	0	0
Long. centro de acople fin de cola [in]	28,46	43,0
Angulo α vertical max. entre acoples [°]	4,75	
Zmax [ft]	0,604	
Y=0 [ft]	0	
Y=3" [ft]	0,25	

Tabla12. Resultados análisis Curva Vertical para configuración 1 (Ecuación 5)

ECUACION 5: Centro de acople en tangencia																
LIKE(1)+BASE(2)																
CONDICION	E	B1	B2	D1	D2	Y	Z	L1	L2	α	β	θ1	θ2	R (ft)	R (m)	
CONVEXA	Y=0	0,677	21,69	22,33	15,34	15,555	0,00	0,604	3,58	2,37	7,93	6,76	1,17	0	189,01	57,61
	Y=3"	0,427	21,69	22,33	15,34	15,555	0,25	0,604	3,58	2,37	5,43	4,26	1,17	0	299,96	91,43
CONCAVA	Y=0	0,677	21,69	22,33	15,34	15,555	0,00	0,604	3,58	2,37	4,99	6,76	0	1,77	188,99	57,60
	Y=3"	0,427	21,69	22,33	15,34	15,555	0,25	0,604	3,58	2,37	2,49	4,26	0	1,77	299,90	91,41

BASE(1)+LIKE(2)																
CONDICION	E	B1	B2	D1	D2	Y	Z	L1	L2	α	β	θ1	θ2	R (ft)	R (m)	
CONVEXA	Y=0	0,677	22,33	21,69	15,555	15,34	0,00	0,604	2,37	3,58	8,93	7,16	1,77	0	173,21	52,80
	Y=3"	0,427	22,33	21,69	15,555	15,34	0,25	0,604	2,37	3,58	6,29	4,52	1,77	0	274,89	83,79
CONCAVA	Y=0	0,677	22,33	21,69	15,555	15,34	0,00	0,604	2,37	3,58	5,99	7,16	0	1,17	173,24	52,80
	Y=3"	0,427	22,33	21,69	15,555	15,34	0,25	0,604	2,37	3,58	3,35	4,52	0	1,17	274,94	83,80

LIKE(1)+LIKE(2)																
CONDICION	E	B1	B2	D1	D2	Y	Z	L1	L2	α	β	θ1	θ2	R (ft)	R (m)	
CONVEXA	Y=0	0,677	21,69	21,69	15,34	15,34	0,00	0,604	3,58	3,58	8,33	7,16	1,17	0	173,24	52,80
	Y=3"	0,427	21,69	21,69	15,34	15,34	0,25	0,604	3,58	3,58	5,69	4,52	1,17	0	274,94	83,80
CONCAVA	Y=0	0,677	21,69	21,69	15,34	15,34	0,00	0,604	3,58	3,58	5,99	7,16	0	1,17	173,24	52,80
	Y=3"	0,427	21,69	21,69	15,34	15,34	0,25	0,604	3,58	3,58	3,35	4,52	0	1,17	274,94	83,80

Tabla13. Resultados análisis Curva Vertical para configuración 1 (Ecuación 6)

ECUACION 6: Pivote en punto de tangencia																
LIKE(1)+BASE(2)																
CONDICION	E	B1	B2	D1	D2	Y	Z	L1	L2	α	β	θ1	θ2	R (ft)	R (m)	
CONVEXA	Y=0	0,901	21,69	22,33	15,34	15,555	0,00	0,604	3,58	2,37	4,75	6,23	-1,48	0	237,85	72,50
	Y=3"	0,651	21,69	22,33	15,34	15,555	0,25	0,604	3,58	2,37	4,75	4,50	0,25	0	329,52	100,44
CONCAVA	Y=0	1,084	21,69	22,33	15,34	15,555	0,00	0,604	3,58	2,37	4,75	6,52	0,00	1,77	227,08	69,21
	Y=3"	0,834	21,69	22,33	15,34	15,555	0,25	0,604	3,58	2,37	4,75	6,52	0,00	1,77	227,33	69,29

BASE(1)+LIKE(2)																
CONDICION	E	B1	B2	D1	D2	Y	Z	L1	L2	α	β	θ1	θ2	R (ft)	R (m)	
CONVEXA	Y=0	0,800	22,33	21,69	15,555	15,34	0,00	0,604	2,37	3,58	4,75	6,42	-1,67	0	214,22	65,29
	Y=3"	0,550	22,33	21,69	15,555	15,34	0,25	0,604	2,37	3,58	4,75	4,42	0,33	0	311,83	95,05
CONCAVA	Y=0	0,922	22,33	21,69	15,555	15,34	0,00	0,604	2,37	3,58	4,75	5,92	0,00	1,17	232,32	70,81
	Y=3"	0,672	22,33	21,69	15,555	15,34	0,25	0,604	2,37	3,58	4,75	5,92	0,00	1,17	232,57	70,89

LIKE(1)+LIKE(2)																
CONDICION	E	B1	B2	D1	D2	Y	Z	L1	L2	α	β	θ1	θ2	R (ft)	R (m)	
CONVEXA	Y=0	0,901	21,69	21,69	15,34	15,34	0,00	0,604	3,58	3,58	4,75	6,47	-1,72	0	223,44	68,10
	Y=3"	0,651	21,69	21,69	15,34	15,34	0,25	0,604	3,58	3,58	4,75	4,67	0,08	0	309,58	94,36
CONCAVA	Y=0	1,047	21,69	21,69	15,34	15,34	0,00	0,604	3,58	3,58	4,75	5,92	0,00	1,17	243,94	74,35
	Y=3"	0,797	21,69	21,69	15,34	15,34	0,25	0,604	3,58	3,58	4,75	5,92	0,00	1,17	244,19	74,43

Tabla 14. Datos de Vagón BASE y Vagón LIKE (Configuración 2)

	Vagón estándar (BASE)	Vagón diseño (LIKE)
Acople	SBE60C	SBE68C
Yugo	Y40A	Y45A
Largo entre caras de acople [ft]	44,65	43,37
Largo entre cabezales [ft]	42,03	40,32
Largo entre centros de bogie [ft]	31,11	30,67
e [°] Arriba	1,77	0
e [°] Abajo	0	0
Long. centro de acople fin de cola [in]	28,46	30,17
Angulo α vertical max. entre acoples [°]	4,75	
Zmax [ft]	0,604	
Y=0 [ft]	0	
Y=3" [ft]	0,25	

Tabla15. Resultados análisis Curva Vertical para configuración 2 (Ecuación 5)

ECUACION 5: Centro de acople en tangencia																
LIKE(1)+BASE(2)																
CONDICION	E	B1	B2	D1	D2	Y	Z	L1	L2	α	β	θ_1	θ_2	R (ft)	R (m)	
CONVEXA	Y=0	0,604	21,69	22,33	15,34	15,555	0,00	0,604	2,51	2,37	6,03	6,03	0	0	211,99	64,61
	Y=3"	0,354	21,69	22,33	15,34	15,555	0,25	0,604	2,51	2,37	3,53	3,53	0	0	362,04	110,35
CONCAVA	Y=0	0,677	21,69	22,33	15,34	15,555	0,00	0,604	2,51	2,37	4,99	6,76	0	1,77	188,99	57,60
	Y=3"	0,427	21,69	22,33	15,34	15,555	0,25	0,604	2,51	2,37	2,49	4,26	0	1,77	299,90	91,41

BASE(1)+LIKE(2)																
CONDICION	E	B1	B2	D1	D2	Y	Z	L1	L2	α	β	θ_1	θ_2	R (ft)	R (m)	
CONVEXA	Y=0	0,677	22,33	21,69	15,555	15,34	0,00	0,604	2,37	2,51	8,93	7,16	1,77	0	173,21	52,80
	Y=3"	0,427	22,33	21,69	15,555	15,34	0,25	0,604	2,37	2,51	6,29	4,52	1,77	0	274,89	83,79
CONCAVA	Y=0	0,604	22,33	21,69	15,555	15,34	0,00	0,604	2,37	2,51	6,39	6,39	0	0	194,30	59,22
	Y=3"	0,354	22,33	21,69	15,555	15,34	0,25	0,604	2,37	2,51	3,74	3,74	0	0	331,85	101,15

LIKE(1)+LIKE(2)																
CONDICION	E	B1	B2	D1	D2	Y	Z	L1	L2	α	β	θ_1	θ_2	R (ft)	R (m)	
CONVEXA	Y=0	0,604	21,69	21,69	15,34	15,34	0,00	0,604	2,51	2,51	6,39	6,39	0	0	194,30	59,22
	Y=3"	0,354	21,69	21,69	15,34	15,34	0,25	0,604	2,51	2,51	3,74	3,74	0	0	331,85	101,15
CONCAVA	Y=0	0,604	21,69	21,69	15,34	15,34	0,00	0,604	2,51	2,51	6,39	6,39	0	0	194,30	59,22
	Y=3"	0,354	21,69	21,69	15,34	15,34	0,25	0,604	2,51	2,51	3,74	3,74	0	0	331,85	101,15

Tabla16. Resultados análisis Curva Vertical para configuración 2 (Ecuación 6)

ECUACION 6: Pivote en punto de tangencia																
LIKE(1)+BASE(2)																
CONDICION	E	B1	B2	D1	D2	Y	Z	L1	L2	α	β	θ_1	θ_2	R (ft)	R (m)	
CONVEXA	Y=0	0,812	21,69	22,33	15,34	15,555	0,00	0,604	2,51	2,37	4,75	4,75	0,00	0	299,15	91,18
	Y=3"	0,562	21,69	22,33	15,34	15,555	0,25	0,604	2,51	2,37	4,75	4,75	0,00	0	299,40	91,26
CONCAVA	Y=0	0,963	21,69	22,33	15,34	15,555	0,00	0,604	2,51	2,37	4,75	6,52	0,00	1,77	217,79	66,38
	Y=3"	0,713	21,69	22,33	15,34	15,555	0,25	0,604	2,51	2,37	4,75	6,52	0,00	1,77	218,04	66,46

BASE(1)+LIKE(2)																
CONDICION	E	B1	B2	D1	D2	Y	Z	L1	L2	α	β	θ_1	θ_2	R (ft)	R (m)	
CONVEXA	Y=0	0,800	22,33	21,69	15,555	15,34	0,00	0,604	2,37	2,51	4,75	6,42	-1,67	0	214,22	65,29
	Y=3"	0,550	22,33	21,69	15,555	15,34	0,25	0,604	2,37	2,51	4,75	4,42	0,33	0	311,83	95,05
CONCAVA	Y=0	0,800	22,33	21,69	15,555	15,34	0,00	0,604	2,37	2,51	4,75	4,75	0,00	0	289,71	88,30
	Y=3"	0,550	22,33	21,69	15,555	15,34	0,25	0,604	2,37	2,51	4,75	4,75	0,00	0	289,96	88,38

LIKE(1)+LIKE(2)																
CONDICION	E	B1	B2	D1	D2	Y	Z	L1	L2	α	β	θ_1	θ_2	R (ft)	R (m)	
CONVEXA	Y=0	0,812	21,69	21,69	15,34	15,34	0,00	0,604	2,51	2,51	4,75	4,75	0,00	0	215,33	65,63
	Y=3"	0,562	21,69	21,69	15,34	15,34	0,25	0,604	2,51	2,51	4,75	4,75	0,00	0	291,67	88,90
CONCAVA	Y=0	0,812	21,69	21,69	15,34	15,34	0,00	0,604	2,51	2,51	4,75	4,75	0,00	0	291,42	88,82
	Y=3"	0,562	21,69	21,69	15,34	15,34	0,25	0,604	2,51	2,51	4,75	4,75	0,00	0	291,67	88,90

2. CONCLUSIONES

A continuación, se presenta el cumplimiento de los requerimientos obtenidos del análisis y resultados para el vagón acoplado en cada una de las configuraciones de vagones y combinaciones propuestas:

Tabla17. Resumen de resultados de análisis

CURVA HORIZONTAL VAGON ACOPLADO					
CONFIGURACION 1		TROCHA			ECUACION N°
COMBINACION	CONDICION	1000	1435	1676	
LIKE(1)+BASE(2)	NORMAL	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE	ECUACION 2
	COMPRESION	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE	ECUACION 2
	TRACCION	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE	ECUACION 2
BASE(1)+LIKE(2)	NORMAL	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE	ECUACION 1
	COMPRESION	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE	ECUACION 1
	TRACCION	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE	ECUACION 1
LIKE(1)+LIKE(2)	NORMAL	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE	ECUACION 2
	COMPRESION	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE	ECUACION 2
	TRACCION	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE	ECUACION 2
CONFIGURACION 2		TROCHA			ECUACION N°
COMBINACION	CONDICION	1000	1435	1676	
LIKE(1)+BASE(2)	NORMAL	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE	ECUACION 1
	COMPRESION	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE	ECUACION 1
	TRACCION	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE	ECUACION 1
BASE(1)+LIKE(2)	NORMAL	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE	ECUACION 1
	COMPRESION	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE	ECUACION 1
	TRACCION	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE	ECUACION 1
LIKE(1)+LIKE(2)	NORMAL	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE	ECUACION 1
	COMPRESION	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE	ECUACION 1
	TRACCION	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE	ECUACION 1
NEGOCIO DE CAMBIO					
CONFIGURACION 1		NUMERO DE NEGOCIO DE CAMBIO			
COMBINACION	CONDICION	N°7		N°8	
LIKE(1)+BASE(2)	NORMAL	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE
	COMPRESION	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE
	TRACCION	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE
BASE(1)+LIKE(2)	NORMAL	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE
	COMPRESION	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE
	TRACCION	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE
LIKE(1)+LIKE(2)	NORMAL	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE
	COMPRESION	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE
	TRACCION	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE
CONFIGURACION 2		NUMERO DE NEGOCIO DE CAMBIO			
COMBINACION	CONDICION	N°7		N°8	
LIKE(1)+BASE(2)	NORMAL	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE
	COMPRESION	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE
	TRACCION	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE
BASE(1)+LIKE(2)	NORMAL	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE
	COMPRESION	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE
	TRACCION	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE
LIKE(1)+LIKE(2)	NORMAL	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE
	COMPRESION	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE
	TRACCION	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE
INTERFERENCIA EN CURVA					
CONFIGURACION 1					
COMBINACION	CURVA HORIZONTAL	INTERFERENCIA ENTRE VAGONES			
LIKE(1)+BASE(2)	50 m	SIN INTERFERENCIA			
BASE(1)+LIKE(2)	50 m	SIN INTERFERENCIA			
LIKE(1)+LIKE(2)	50 m	SIN INTERFERENCIA			
CONFIGURACION 2					
COMBINACION	CURVA HORIZONTAL	INTERFERENCIA ENTRE VAGONES			
LIKE(1)+BASE(2)	50 m	SIN INTERFERENCIA			
BASE(1)+LIKE(2)	50 m	SIN INTERFERENCIA			
LIKE(1)+LIKE(2)	50 m	SIN INTERFERENCIA			

CURVA VERTICAL VAGON ACOPLADO						
CONFIGURACION 1			TROCHA			ECUACION N°
COMBINACION	CONDICION		1000	1435	1676	
LIKE(1)+BASE(2)	CONVEXA	Y=0	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE	ECUACION 6 (*)
		Y=3"	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE	ECUACION 6
	CONCAVA	Y=0	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE	ECUACION 6
		Y=3"	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE	ECUACION 6
BASE(1)+LIKE(2)	CONVEXA	Y=0	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE	ECUACION 6
		Y=3"	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE	ECUACION 6
	CONCAVA	Y=0	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE	ECUACION 6
		Y=3"	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE	ECUACION 6
LIKE(1)+LIKE(2)	CONVEXA	Y=0	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE	ECUACION 6 (*)
		Y=3"	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE	ECUACION 6
	CONCAVA	Y=0	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE	ECUACION 6
		Y=3"	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE	ECUACION 6
CONFIGURACION 2			TROCHA			ECUACION N°
COMBINACION	CONDICION		1000	1435	1676	
LIKE(1)+BASE(2)	CONVEXA	Y=0	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE	ECUACION 6
		Y=3"	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE	ECUACION 6
	CONCAVA	Y=0	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE	ECUACION 6
		Y=3"	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE	ECUACION 6
BASE(1)+LIKE(2)	CONVEXA	Y=0	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE	ECUACION 6
		Y=3"	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE	ECUACION 6
	CONCAVA	Y=0	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE	ECUACION 6
		Y=3"	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE	ECUACION 6
LIKE(1)+LIKE(2)	CONVEXA	Y=0	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE	ECUACION 6
		Y=3"	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE	ECUACION 6
	CONCAVA	Y=0	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE	ECUACION 6
		Y=3"	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE	ECUACION 6

Nota (*): Los valores calculados muestran que el ángulo vertical máximo de los acoples (Θ_1) sobrepasan el máximo permitido, y cumplen con los radios mínimos de curva vertical para las trochas (1000mm, 1435mm y 1676mm).

3. REFERENCIAS

[1] AAR. MANUAL OF STANDARDS AND RECOMMENDED PRACTICES SECTION C PART II DESIGN, FABRICATION, AND CONSTRUCTION OF FREIGHT CARS. 2011.

[2] FAT: VP-3009 Especificación técnica para la aprobación y matriculación de vagones de propiedad particular, 1978.

[3] J.B. Calvert Railways: History, Signalling, Engineering, Fecha de creación: 19 de Junio de 2004