

**UNIVERSIDAD RICARDO PALMA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA  
PROGRAMA DE TITULACIÓN POR TESIS  
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL**



**ACTUALIZACIÓN DE CRITERIOS DE DISEÑO GEOMÉTRICO DE VÍAS  
FÉRREAS DEL PERÚ PARA MEJORAR EL REGLAMENTO NACIONAL DE  
FERROCARRILES**

**TESIS  
PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE  
INGENIERO CIVIL**

**PRESENTADA POR:**

**Bach. CLAUDIO MENA, INGRID YAJANIA  
Bach. GARCÍA ARRUNÁTEGUI, JOSÉ ERNESTO**

**ASESOR: Mg. Ing. ARÉVALO LAY, VÍCTOR ELEUTERIO**

**LIMA-PERÚ**

**2019**

## **DEDICATORIA**

Dedico esta tesis a mi madre, por ser el pilar más importante y por demostrarme siempre su cariño y apoyo incondicional sin importar las situaciones adversas. A mi padre, por siempre estar dispuesto a escucharme y ayudarme en cualquier momento. A kadzumy, porque con su dulzura alegra cada momento de mi vida y a todas las personas especiales que me acompañaron en esta etapa, aportando a mi formación tanto profesional y como ser humano.

Ingrid Yajania Claudio Mena

Dedico esta tesis a mi padre, madre, esposa, hijo, hermanos, hermanas, sobrino, abuelos, abuelas, tíos, tías, primos, primas y a mi familia en general, quienes me brindaron consejos, apoyo y conocimiento a lo largo de mi formación académica y personal.

José Ernesto García Arrunátegui

## **AGRADECIMIENTO**

Nuestro agradecimiento a nuestra alma mater, por habernos dado los conocimientos de esta carrera; a nuestro asesor, por guiarnos en la investigación; y a los docentes, familiares y personas que de alguna manera nos apoyaron en el desarrollo de la tesis.

Ingrid Claudio Mena y José García Arrunátegui

# ÍNDICE GENERAL

RESUMEN .....	xiii
ABSTRACT.....	xiv
INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	3
1.1 Descripción de la realidad de la problemática.....	3
1.2 Formulación del problema.....	4
1.2.1 Problema principal.....	4
1.2.2 Problemas secundarios.....	5
1.3 Objetivos de la investigación.....	5
1.3.1 Objetivo principal.....	5
1.3.2. Objetivos secundarios.....	5
1.4 Justificación e importancia de la investigación.....	6
1.4.1 Conveniencia.....	6
1.4.2 Relevancia social.....	7
1.4.3 Implicancia práctica.....	7
1.5 Limitaciones de la investigación.....	7
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO.....	9
2.1 Antecedentes de la investigación.....	12
2.1.1 En el ámbito internacional.....	12
2.1.2 En el ámbito nacional.....	20
2.2 Bases teóricas.....	21
2.3 Definiciones conceptuales.....	22
2.4 Estructura teórica y científica que sustenta la investigación.....	24
2.4.1 Infraestructura ferroviaria.....	25
2.4.2 Superestructura ferroviaria.....	32
2.4.3 Geometría y trazado de la vía férrea.....	49
2.4.4 Tracción ferroviaria e interacción rueda – carril.....	75
2.4.5 Señalización de la vía férrea.....	96
2.4.6 Mantenimiento ferroviario.....	100

2.4.7 Ferrocarriles modernos .....	102
2.5 La normatividad férrea en el Perú.....	104
2.5.1 Normas y especificaciones técnicas para el diseño de vías férreas en el Perú.....	105
2.5.2 Reglamento nacional de ferrocarriles .....	109
2.5.3 Diferencias entre el reglamento vigente y sus normas complementarias.....	110
2.6 Formulación de hipótesis .....	110
2.6.1 Hipótesis general .....	110
2.6.2 Hipótesis específicas .....	110
2.6.3 Variables.....	111
CAPÍTULO III: DISEÑO METODOLÓGICO .....	113
3.1 Tipo y nivel.....	113
3.2 Diseño de la investigación .....	113
3.3 Población y muestra.....	113
3.4 Técnicas de recolección de datos.....	113
3.4.1 Tipos de técnicas e instrumentos.....	114
3.4.2 Criterios de validez y confiabilidad de los instrumentos.....	114
3.4.3 Técnicas para el procesamiento y análisis de datos.....	114
CAPÍTULO IV: DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN .....	115
4.0 Revisión de la normativa internacional .....	115
4.1 Manual de la American Railway Engineering and Maintenance-of-Way Association (AREMA) – Estados Unidos de América.....	116
4.1.1 Velocidad de diseño .....	117
4.1.2 Alineamiento horizontal .....	117
4.1.3 Alineamiento vertical .....	122
4.2 Recomendaciones de Diseño para Proyectos de Infraestructura Ferroviaria – Chile.....	125
4.2.1 Velocidad de Diseño.....	125
4.2.2. Alineamiento horizontal .....	127
4.2.3. Alineamiento vertical .....	136

4.3 Normas de la Red Nacional de Ferrocarriles Españoles o RENFE Vía (NRV) e Instrucciones Generales para los Proyectos de Plataforma (IGP) - España.....	138
4.3.1 N.R.V.0-2-0.0 Geometría de la vía. Parámetros geométricos .....	138
4.3.2 N.R.V.0-2-0.1 Geometría de la vía. Parámetros geométricos de nuevas líneas en ancho internacional.....	139
4.3.3 Parámetros de diseño de trazado para líneas de ancho internacional.....	140
4.4 Manual de Normatividad Férrea – Colombia .....	142
4.4.1 Velocidad de diseño .....	142
4.4.2 Alineamiento horizontal .....	143
4.4.3 Alineamiento vertical .....	148
4.5 Rules Respecting Track Safety (TC E-54) - Canadá .....	150
4.5.1 Velocidad de diseño .....	150
4.5.2 Alineamiento horizontal .....	151
4.6 Track Standards Manual (GC/RT5017) y Track System Requeriments (GC/RT5021) – Gran Bretaña.....	154
4.6.1 Velocidad de diseño .....	154
4.6.2 Alineamiento horizontal .....	155
4.6.3 Alineamiento vertical .....	157
4.7 Track and Civil Infraestructure Code of Practice (Volumen 2): Sistema Ferroviario (CP2) – Australia Meridional.....	159
4.7.1 Velocidad de diseño .....	159
4.7.2 Alineamiento horizontal .....	160
4.7.3 Alineamiento vertical .....	164
4.8 Resumen comparativo de las normativas evaluadas.....	166
CAPÍTULO V: PROPUESTA O APLICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN .....	168
5.1 Ferrocarril Bellavista – Santa Anita.....	168
5.1.1 Velocidad de diseño .....	169
5.1.2 Alineamiento horizontal .....	172
5.1.3 Alineamiento vertical .....	181
CAPÍTULO VI: PRESENTACIÓN DE RESULTADOS .....	188
6.1 Resultado de la investigación .....	188

6.1.1 Velocidad de diseño .....	188
6.1.2 Alineamiento horizontal .....	189
6.1.3 Alineamiento vertical .....	191
6.2 Análisis e interpretación de los resultados.....	192
6.2.1 Velocidad de diseño .....	192
6.2.2 Alineamiento horizontal .....	195
6.2.3 Alineamiento vertical .....	199
6.3 Contrastación de hipótesis .....	202
6.3.1 Contrastación de las hipótesis específicas.....	202
6.3.2 Contrastación de la hipótesis general .....	205
6.4 Propuesta de mejora.....	205
CONCLUSIONES .....	206
RECOMENDACIONES.....	209
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	210
ANEXOS .....	215
Anexo 1: Matriz de consistencia.....	215
Anexo 2: Operacionalización de las variables .....	217
Anexo 3: Planos .....	218

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Distribución geográfica de la red ferroviaria mundial.....	9
Tabla 2: Densidad de la red ferroviaria mundial .....	10
Tabla 3: Espesores de capas en función del tipo de línea y traviesa .....	30
Tabla 4: Perfiles de carriles más usados .....	36
Tabla 5: Anchos de vía habituales a nivel internacional .....	49
Tabla 6: Aceleración transversal soportable por los viajeros en $m/s^2$ .....	52
Tabla 7: Sobreancho de vía en curvas .....	53
Tabla 8: Variación de la aceleración centrífuga sin compensar respecto al tiempo .....	68
Tabla 9: Resistencia específica al rodamiento .....	80
Tabla 10: Valores de $c_1$ y $c_2$ para obtener la resistencia específica en curva .....	85
Tabla 11: Valores mínimos de aceleración de arranque .....	86
Tabla 12: Esfuerzo acelerador mínimo en rampa .....	86
Tabla 13: Prestaciones mínimas de los frenos en la ETI de alta velocidad .....	96
Tabla 14: Distancias máximas de frenado con freno de emergencia.....	96
Tabla 15: Distancias de frenado.....	98
Tabla 16: Radios mínimos de la norma y especificaciones técnicas del Perú.....	106
Tabla 17: Sobreancho de la norma y especificaciones técnicas peruanas .....	106
Tabla 18: Clasificación de la vía por su máxima velocidad de operación.....	109
Tabla 19: Diferencias de los reglamentos nacional y del sistema eléctrico.....	110
Tabla 20: Dimensiones e indicadores de la variable independiente .....	112
Tabla 21: Dimensiones e indicadores de la variable dependiente .....	112
Tabla 22: Peralte, velocidad y grados de curva - AREMA.....	121
Tabla 23: Longitud de tangente entre curvas inversas sin peralte - AREMA .....	122
Tabla 24: Clasificación de las vías de circulación - Chile.....	126
Tabla 25: Sobreancho en curva - Chile.....	128
Tabla 26: Velocidad, radio de curva y peralte para trocha de 1676 mm - Chile .....	132
Tabla 27: Velocidad, radio de curva y peralte para trocha de 1435 mm - Chile .....	134
Tabla 28: Distancia mínima de entrevía - Chile .....	136
Tabla 29: Radios mínimos de curvas de acuerdo - Chile .....	137
Tabla 30: Parámetros geométricos para trocha de 1668 mm - España.....	139
Tabla 31: Parámetros geométricos para trocha de estándar - España.....	139

Tabla 32: Parámetros funcionales y geométricos para trocha estándar - España .....	140
Tabla 33: Geometría del trazado para distintas velocidades - España.....	141
Tabla 34: Peralte, velocidad y grados de curva - Colombia .....	147
Tabla 35: Clasificación de vías de circulación – Canadá .....	151
Tabla 36: Velocidad, peralte y ángulos de curvas - Canadá.....	153
Tabla 37: Sobreebanco en curva – Gran Bretaña .....	155
Tabla 38: Peralte máximo según radio de la curva – Gran Bretaña.....	156
Tabla 39: Resumen comparativo de las normas y reglamentos evaluados.....	166
Tabla 40: Velocidad mínima para el Ferrocarril Bellavista – Santa Anita (FBS) .....	170
Tabla 41: Velocidad mínima para el FBS con el peralte máximo de las normas comparadas.....	170
Tabla 42: Velocidad máxima para el FBS aplicando normativa comparadas .....	171
Tabla 43: Velocidad máxima para el FBS con propuesta de insuficiencia de peralte en el RNFF .....	171
Tabla 44: Velocidad máxima para el FBS con propuesta de insuficiencia de peralte y modificación del peralte máximo en el RNFF .....	172
Tabla 45: Elementos del alineamiento horizontal del caso ferrocarril Bellavista - Santa Anita.....	172
Tabla 46: Longitud mínima de recta horizontal para el FBS.....	175
Tabla 47: Radio mínimo de curva circular para el FBS.....	176
Tabla 48: Radio mínimo de curva circular para el FBS con propuesta de insuficiencia de peralte en el RNFF .....	177
Tabla 49: Radio mínimo de curva circular para el FBS aplicando el peralte máximo permitido por las normas.....	178
Tabla 50: Radio mínimo de curva circular para el FBS con propuesta de insuficiencia de peralte y modificación del peralte máximo en el RNFF .....	178
Tabla 51: Longitud mínima de curva circular para el FBS.....	179
Tabla 52: Peralte máximo e insuficiencia máxima de peralte para el FBS .....	179
Tabla 53: Longitud de curva de transición para el FBS.....	180
Tabla 54: Longitud de curva de transición para el FBS aplicando el peralte máximo permitido por las normas internacionales y modificando el peralte máximo en el RNFF .....	181
Tabla 55: Elementos del alineamiento vertical para el caso ferrocarril Bellavista - Santa Anita.....	182

Tabla 56: Longitud mínima de recta de perfil para el FBS .....	184
Tabla 57: Radio mínimo de acuerdo vertical para el FBS .....	185
Tabla 58: Radio mínimo de acuerdo vertical para el FBS con pendiente máxima.....	186
Tabla 59: Radio mínimo de acuerdo vertical para el FBS con propuesta de modificación de pendiente máxima en el RNFF .....	186
Tabla 60: Longitud mínima de acuerdo vertical para el FBS .....	187
Tabla 61: Longitud mínima de acuerdo vertical para el FBS con propuesta de modificación de pendiente máxima en el RNFF .....	187
Tabla 62 Factores que inciden en la elección de la velocidad de diseño .....	192
Tabla 63: Velocidades máximas empleando las fórmulas de normativas internacionales y propuesta de insuficiencia de peralte en el RNFF.....	194
Tabla 64: Velocidades máximas empleando las fórmulas de normativas internacionales, propuesta de insuficiencia de peralte y de modificación del peralte máximo en el RNFF .....	194
Tabla 65: Peralte de equilibrio empleando las fórmulas de normativas internacionales y propuesta de insuficiencia de peralte en el RNFF.....	197
Tabla 66: Peralte de equilibrio empleando las fórmulas de normativas internacionales, propuesta de insuficiencia de peralte y de modificación del peralte máximo en el RNFF .....	198
Tabla 67: Peralte de equilibrio a máxima velocidad de operación.....	198
Tabla 68: Propuesta de actualización y mejoras en el RNFF .....	205
Tabla 69 Propuestas de actualización en el RNFF .....	206
Tabla 70 Reducción del radio de curva circular resultado de la actualización del criterio de alineamiento horizontal.....	207
Tabla 71 Reducción de la longitud de la curva de transición resultado de la actualización del criterio de alineamiento horizontal.....	207

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Esquema de capas de asiento en la sección transversal de una vía. ....	28
Figura 2: Estructura con capa de forma de la misma calidad que la capa de base .....	29
Figura 3: Estructura con capa de forma de mejor calidad que la capa base .....	30
Figura 4: Estructura con capa de forma de mejor calidad que la capa base .....	30
Figura 5: Estructura en túnel.....	32
Figura 6: Estructura en túnel.....	32
Figura 7: Carriles UIC más usados .....	34
Figura 8: Tipos de traviesa.....	40
Figura 9: Colocación del balasto sobre la plataforma.....	42
Figura 10: Vía en placa años 60.....	45
Figura 11: Aparatos de vía.....	46
Figura 12: Esquema y detalle de paso por cambio .....	47
Figura 13: Esquema de cruzamiento.....	47
Figura 14: Ancho de vía estándar .....	48
Figura 15: Esquema de ancho de una vía doble.....	48
Figura 16: Partes de una curva circular .....	50
Figura 17: Peralte.....	54
Figura 18: Aceleración no compensada.....	56
Figura 19: Insuficiencia de peralte.....	58
Figura 20: Exceso de peralte.....	59
Figura 21: Aceleración no compensada en caja de viajero.....	60
Figura 22: La clotoide.....	62
Figura 23: Métodos para la disposición de la clotoide .....	63
Figura 24: Desarrollo de la clotoide .....	63
Figura 25: Desarrollo del peralte en la transición.....	65
Figura 26: Velocidad de subida en transición.....	66
Figura 27: Alabeo de la vía durante la transición del peralte .....	69
Figura 28: Velocidad del giro del plano de la vía.....	70
Figura 29: Acuerdos verticales .....	72
Figura 30: Longitud del acuerdo.....	75
Figura 31: Resistencia a velocidad constante .....	77

Figura 32: Superficie de contacto rueda – carril.....	78
Figura 33: Resistencia de rodadura.....	78
Figura 34: Resistencia en rodamiento.....	79
Figura 35: Resistencia en rampa.....	82
Figura 36: Resistencia del bogie en curva.....	83
Figura 37: Adherencia rueda – carril.....	88
Figura 38: Curvas de adherencia, potencia y resistencia.....	89
Figura 39: Movimiento del tren.....	90
Figura 40: Baja adherencia y alta resistencia.....	90
Figura 41: Frenado.....	91
Figura 42: Seudodeslizamiento.....	92
Figura 43: Frenado por zapata.....	93
Figura 44: Freno por zapata.....	93
Figura 45: Frenado mediante discos.....	95
Figura 46: Señalización ferroviaria.....	99
Figura 47: Defectología.....	101
Figura 48: Evolución de la mecanización del mantenimiento.....	101
Figura 49: Trenes de caja inclinable.....	103
Figura 50: Espiral.....	119
Figura 51: Curva de acuerdo vertical.....	123
Figura 52: Curva de transición – Norma de Colombia.....	146
Figura 53: Radio mínimo de curva del Ferrocarril Bellavista – Santa Anita.....	177
Figura 54: Longitud de curva de transición del Ferrocarril Bellavista – Santa Anita ..	180
Figura 55: Pendiente máxima del Ferrocarril Bellavista – Santa Anita.....	185

## RESUMEN

El trabajo de investigación “Actualización de criterios de diseño geométrico de vías férreas del Perú para mejorar el Reglamento Nacional de Ferrocarriles” tuvo como objetivo actualizar criterios de diseño geométrico como la velocidad de diseño, el alineamiento horizontal y el alineamiento vertical causando, como efecto el mejoramiento del Reglamento Nacional de Ferrocarriles (RNFF), comparándolo con normas internacionales.

La investigación fue aplicada, con enfoque cualitativo – cuantitativo, a nivel descriptivo, y de diseño no experimental y transversal.

La población de la investigación correspondió a la población de ferrocarriles de la costa del Perú – Lima, teniendo como muestra los criterios de diseño geométrico para el Ferrocarril Bellavista – Santa Anita.

La presente investigación comprobó que elementos como la insuficiencia de peralte del criterio de alineamiento horizontal y la pendiente del criterio de alineamiento vertical, en comparación con normas internacionales pueden actualizar los criterios mencionados y, por efecto mejorar el RNFF.

**Palabras clave:** Diseño geométrico de vías férreas, velocidad de diseño, alineamiento horizontal y alineamiento vertical.

## **ABSTRACT**

The research work “Updating the geometric design criteria of railways in Peru to improve the National Railroad Regulation” aimed to update geometric design criteria such as design speed, horizontal alignment and vertical alignment causing, as an effect the improvement of the National Railroad Regulation (RNFF), comparing it with international standards.

The research was applied, with a qualitative - quantitative approach, at a descriptive level, and a non-experimental and transversal design.

The research population corresponded to the population of railroads on the coast of Peru - Lima, taking as a sample the geometric design criteria for the Bellavista - Santa Anita Railroad.

The present investigation found that elements such as the cant deficiency of the horizontal alignment criterion and the slope of the vertical alignment criterion, compared to international standards, can update the mentioned criteria and, in effect, improve the RNFF.

**Keywords:** Geometric design of railways, design speed, horizontal alignment and vertical alignment.

# INTRODUCCIÓN

La presente investigación consiste en el análisis comparativo de criterios de diseño geométrico de vías férreas como la velocidad de diseño, el alineamiento horizontal y el alineamiento vertical del Reglamento Nacional de Ferrocarriles; con respecto a las normas internacionales, las cuales se explican en el desarrollo.

El tema de investigación elegido se debe a que el Perú cuenta con el RNFF aprobado el año 2005 y vigente desde el 2006, con base en el documento “Norma y especificaciones técnicas para el diseño de vías férreas en el Perú” del año 1978, pero en apreciación de los autores, el reglamento vigente con respecto a otras normas internacionales puede ser actualizada.

Esperando que del análisis comparativo se obtengan valores o información que sirvan a complementar y/o mejorar los criterios mencionados y por ende el RNFF.

El desarrollo de esta investigación consta de seis capítulos:

En el primer capítulo se presenta el planteamiento del problema, además abarca objetivos, justificación e importancia y limitaciones de la investigación.

En el segundo capítulo se presentan los antecedentes nacionales e internacionales, estructura teórica vinculada a las variables de estudio, definiciones conceptuales e hipótesis de la investigación.

En el tercer capítulo se determina el tipo, diseño, población y muestra de la investigación acompañada de las técnicas de recolección de datos.

En el cuarto capítulo se describe el desarrollo de la investigación conformada por la revisión de las normativas internacionales como: Manual de la American Railway Engineering and Maintenance-of-Way Association (AREMA) de Estados Unidos de América, Recomendaciones de Diseño para Proyectos de Infraestructura Ferroviaria de Chile, Normas de la Red Nacional de Ferrocarriles Españoles o RENFE Vía (NRV) e Instrucciones Generales para los Proyectos de Plataforma (IGP) de España, Manual de Normatividad Férrea de Colombia, Rules Respecting Track Safety (TC E-54) de Canadá, Track Standards Manual (GC/RT5017) y Track System Requirements (GC/RT5021) de Gran Bretaña y Track and Civil Infrastructure Code of Practice (Volumen 2): Sistema Ferroviario (CP2) de Australia Meridional acompañado de un cuadro de resumen comparativo.

El quinto capítulo consiste en la aplicación de la investigación sobre el proyecto “Ferrocarril Bellavista – Santa Anita”.

En el sexto capítulo se presentan los resultados los cuales comprenden de análisis e interpretación y contrastación de hipótesis.

Finalmente, se presentan las conclusiones y recomendaciones obtenidas durante el desarrollo de la investigación.

# **CAPÍTULO I:**

## **PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

### 1.1 Descripción de la realidad de la problemática

Un signo que simboliza el progreso de un país se evidencia en el desarrollo de obras de infraestructura de vías terrestres. Vías que le permiten a la población no solo el traslado de un punto a otro, sino la posibilidad de generar comercio y tener acceso a nuevas oportunidades. En tal sentido, se tiene una consideración particular al transporte masivo de pasajeros y carga donde se encuentran los ferrocarriles, tan importantes en países de Europa, que son la columna vertebral de sus sistemas de transporte.

En Perú, hasta la fecha la mayoría de proyectos en materia de transporte se destinan a las carreteras, proyectos que son respaldados por normativas que en la última década se han venido actualizando o ajustando a las tendencias mundiales.

En menor medida, los autores evidencian que desde hace 10 años el estado, siguiendo el ejemplo de países del hemisferio norte, viene impulsando la inversión y ejecución de obras ferroviarias (las Líneas 2 al 6 del Metro de Lima) en la metrópolis y el mejoramiento de vías existentes como el Ferrocarril Huancayo - Huancavelica, que generan grandes expectativas en los futuros usuarios y cuya obra piloto, la Línea 1, hoy en día se ha convertido en uno de los principales medios para trasladarse hacia sus destinos.

La escasa experiencia en el sector ferroviario obliga a que, para realizar un proyecto desde la concepción de su idea, se deba recurrir a normativas, reglamentos o manuales de países donde el ferrocarril es, como ya se mencionó, el pilar de sus sistemas de transporte.

En general, un país, que comienzan a introducirse en el sistema férreo, hace referencia a los manuales estadounidenses o a los de los países de la Unión Europea y los modifica o adapta a su expectativa y/o realidad generando nuevo material y creando un marco normativo aplicable en su territorio y para su propio beneficio.

## 1.2 Formulación del problema

Si bien la acción de transportarse se reduce a ir de un punto X a un punto Y en el menor tiempo posible, no se puede dejar lado aspectos fundamentales como la seguridad, el confort, la economía y demás. Entre otros, para lograr los aspectos mencionados se necesita contar con una normativa clara y precisa; ya que la libre interpretación del marco normativo genera que los proyectistas o consultores propongan valores para los criterios o parámetros de diseño que deriven en una inadecuada aplicación.

En ese sentido, el Perú cuenta con el Reglamento Nacional de Ferrocarriles (RNFF) aprobado el año 2005 y vigente desde el 2006, con base en el documento Norma y especificaciones técnicas para el diseño de vías férreas en el Perú del año 1978. Pero, en apreciación de los autores, esta actualización ha tocado de manera genérica y poco restrictiva los criterios para el diseño geométrico dejando abierta la posibilidad a los diseñadores de utilizar valores para estos criterios según su conveniencia.

Otro aspecto a considerar es el avance tecnológico (mejores materiales, trenes, softwares de diseño, otros) que obliga a mejorar los diseños existentes y los métodos constructivos de nuevos proyectos. Sin embargo, el reglamento peruano vigente exige remitirse a las normas de 1978 para el diseño de la geometría.

Entonces, en el RNFF, criterios como: el alineamiento horizontal, el alineamiento vertical y la velocidad de diseño se explican de forma muy ambigua, dejando a la interpretación de los proyectistas su desarrollo al momento de elaborar una propuesta, como en el caso de la insuficiencia de peralte (elemento del alineamiento horizontal) que es mencionado, pero no delimitado en el reglamento peruano. Finalmente, esta situación genera la necesidad de emplear, en sus criterios de diseño, normas y/o reglamentos internacionales no ajustados a nuestra realidad.

### 1.2.1 Problema principal

¿Cómo influye la actualización de criterios de diseño geométrico comparándola con reglamentos internacionales en el reglamento nacional de ferrocarriles?

### 1.2.2 Problemas secundarios

- a) ¿De qué manera influye la actualización del criterio de velocidad de diseño comparándolo con reglamentos internacionales en la velocidad de diseño?
- b) ¿De qué manera influye la actualización del criterio de alineamiento horizontal comparándolo con reglamentos internacionales en el alineamiento horizontal?
- c) ¿De qué manera influye la actualización del criterio de alineamiento vertical comparándolo con reglamentos internacionales en el alineamiento vertical?

### 1.3 Objetivos de la investigación

#### 1.3.1 Objetivo principal

Actualizar criterios de diseño geométrico de las vías férreas del Perú para mejorar el reglamento nacional de ferrocarriles comparando con normas internacionales.

#### 1.3.2. Objetivos secundarios

- a) Actualizar el criterio de velocidad de diseño en el reglamento nacional de ferrocarriles para incrementar la velocidad de diseño, comparando con normas internacionales.
- b) Actualizar el criterio de alineamiento horizontal en el reglamento nacional de ferrocarriles a fin de complementar el alineamiento horizontal, comparando con normas internacionales.
- c) Actualizar el criterio de alineamiento vertical en el reglamento nacional de ferrocarriles a fin de mejorar el alineamiento vertical, comparando con normas internacionales.

## 1.4 Justificación e importancia de la investigación

Con el pasar de los años es común la actualización de muchas de las normas dentro del sector construcción, como la norma de diseño geométrico de vías y su reciente versión que pasó del DG-14 al DG-18, y demás ministerios, ya que el desarrollo normativo es un proceso evolutivo y constante, que permite mantener los estándares óptimos que aseguren la calidad y seguridad de la construcción.

Si bien es cierto que, el Reglamento Nacional de Ferrocarriles, vigente desde el 2005, ha actualizado las normas y especificaciones técnicas para el diseño de vías férreas en el Perú del año 1978, éste no les ha dado la respectiva importancia a los criterios de diseño tales como el alineamiento vertical, el alineamiento horizontal y la velocidad de diseño.

Se ven los dos primeros introducidos de manera implícita en los artículos 15 y 48 pero que no se desarrollan en extensión y cuyos valores máximos y mínimo no son limitantes, permitiendo así que puedan ser modificados y/o ajustados a conveniencia del proyecto y el tercero no es mencionado como criterio para el diseño, sino para clasificar las vías por máxima velocidad de operación permisible dentro del artículo.

En lo metodológico, se busca, mediante un análisis comparativo, identificar las diferencias en el diseño de proyectos ferroviarios entre normas internacionales con nuestro reglamento a fin de complementarla. Respecto al conocimiento, se busca generar conceptos claros en nuestra reglamentación en la que se apliquen herramientas y parámetros del diseño geométrico para ferrocarriles, actualizando los criterios de alineamiento horizontal y vertical y velocidad de diseño de vías férreas para mejorar el reglamento vigente y que este sirva para estandarizar futuros proyectos.

### 1.4.1 Conveniencia

Además, como se mencionó, las características y la calidad de la geometría de una vía férrea son importantes para garantizar la seguridad, el confort y otros; entonces se vuelve fundamental contar con una reglamentación con contenido preciso, claro y que no esté sujeta a interpretaciones por la falta de una delimitación de los valores que pueden adoptar los criterios de diseño.

Aclarar estas ambigüedades permite que los futuros proyectos se diseñen de acuerdo a nuestra realidad, se homogenicen en los básicos y no se tenga que recurrir a normativas o reglamentos de otros países para la absolución de dudas.

#### 1.4.2 Relevancia social

En lo social, se busca que el estado no tenga como necesidad la utilización de normas internacionales para el diseño de vías férreas, puesto que, el Perú está entrando a una reciente etapa de su desarrollo, promoviendo la creación de ferrocarriles de servicio público (pasajeros) para el mejoramiento del sistema de transporte en beneficio de los usuarios.

Entonces, un coherente y adecuado marco normativo permite que el estado desarrolle líneas ferroviarias mejores (seguridad, confort y otros para el público usuario) y a costos no tan altos (economía y otros).

#### 1.4.3 Implicancia práctica

Una norma o reglamento con contenido que presenta vacíos y no se ajusta a una realidad origina que se conciben proyecto con propuestas pobres en su diseño geométrico, alto costo en su construcción y operaciones y alto riesgo de accidentes.

La actualización y complemento de información faltante evita que en un futuro se siga diseñando y construyendo bajo criterios de particulares que no se ajusten a la necesidad y a la realidad de un estado y no se tengan líneas férreas con distintas características en locaciones con similares realidades.

#### 1.5 Limitaciones de la investigación

Los reglamentos de otras naciones se vienen actualizando dependiendo de sus requerimientos internos, lo que origina que, si bien se pueda obtener las últimas versiones de reglamentos, exista un desfase de varios años entre ellos. Para tal caso, el análisis comparativo se enfocará en reglamentos que se encuentren vigentes.

El contenido del reglamento nacional de ferrocarriles abarca no solo lo concerniente al diseño constructivo, y como tal se debería entender como un todo para que funcione

óptimamente. Sin embargo, por su extensión, muchos de los puntos que se mencionan en él escapan de la competencia de este trabajo. Por este motivo, los autores de la presente tesis ven conveniente el centrarse en el estudio del diseño geométrico y específicamente lo referente al alineamiento horizontal, alineamiento vertical y velocidad de diseño.

La presente investigación cuenta con información bibliográfica sobre la reglamentación y normatividad para el diseño de ferrocarriles de diversos países y ciudades.

La muestra está delimitada por la información de países que cuentan con reglamentación actualizada en la industria ferroviaria, además de existir documentación para casos particulares ejecutados de diversas ciudades. Los datos técnicos se obtienen del MTC y de ministerios de otros países a través de fuentes abiertas de internet ya que adquirir los textos físicamente es oneroso.

## CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

Según la exposición del Ing. Américo Soto, en enero del 2018 en el CIP, en la Inglaterra de 1802, Richard Trevithick construyó la primera locomotora de vapor que posteriormente en 1804 la probaría en un tren de 5 vagones, con un total de 10 toneladas y 70 pasajeros, que recorrió 15.70 km a una velocidad de 3.9 km/h; y de acuerdo al portal Curiosfera en su artículo la historia del tren, dicha máquina, de escasa utilidad puesto que, en su máxima capacidad de carga, su velocidad no era superior a la del hombre caminando, su primer uso se dio en minas inglesas de carbón donde la poca resistencia de la enrieldura al peso de la máquina derivó en el rechazo de la locomotora.

En la misma presentación, expone que, en 1830, inició la era del ferrocarril con la línea que iba de Liverpool a Manchester, impulsado por vapor, donde se lograron velocidades mayores a las del caballo. Así también, fue el primero en tener doble vía, un sistema de señalización y un programa a tiempo completo. Luego, ya en 1870, Europa contaba con más de 100 mil kilómetros de ferrocarril y Estados Unidos superaba los 70 mil kilómetros. Ello conllevaría a mejorar el comercio nacional e internacional, así como también las relaciones políticas.

Según la Unión Internacional de Ferrocarriles (UIC por sus siglas en francés), para el año 2004, la red de ferrovías en el mundo se extendía por más de 900 mil kilómetros, tal y como se presenta en la Tabla 1.

Tabla 1: Distribución geográfica de la red ferroviaria mundial.

Zona geográfica	Longitud de vías (km)	Porcentaje del total (%)
Europa	352450	38.19
- Unión Europea	(197842)	(21.44)
- Resto de Europa	(154608)	(16.75)
África y Medio Oriente	76970	8.34
América	296690	32.15
Asia y Oceanía	196812	21.32
Total	922922	100

Fuente: UIC (noviembre 2004) e “Infraestructura ferroviaria” por López, Andrés (2006, p.19).

Encontrando mayor presencia de líneas en los continentes América (32%) y Europa (38%); ambos concentrando más del 70%.

López, Andrés (2006) considera que una mirada más acorde, sobre el desarrollo del ferrocarril, se obtiene mediante el uso de los indicadores densidad y longitud por habitantes; el primero de ellos evalúa la longitud construida por kilómetro cuadrado de superficie y el segundo, la longitud construida por millón de habitantes.

De esta práctica se muestra que Europa tiene 14 km de red ferroviaria por cada 1000 km<sup>2</sup> de superficie y América, 13 km. En cuanto al segundo indicador, las posiciones se invierten, América presenta 813 km de red por cada millón de habitantes y Europa, 443 km, tal y como se indica en la Tabla 2.

Tabla 2: Densidad de la red ferroviaria mundial

Zona geográfica	Superficie (miles de km <sup>2</sup> )	Población (millones de habitantes)	Longitud de vías (km)	Longitud de vías en km por	
				Miles de km <sup>2</sup>	Millón de habitantes
Europa	23685	794.6	352450	14.88	443.56
- Unión Europea	(3988)	(453.9)	(197842)	(49.61)	(435.87)
- Resto Europa	(19697)	(340.7)	(154608)	(7.85)	(453.80)
África y Medio Oriente	21710	756.6	76970	3.55	101.73
América	21292	364.6	296690	13.93	813.74
Asia y Oceanía	28833	3007.6	196812	6.83	65.44

Fuente: UIC (noviembre 2004) e “Infraestructura ferroviaria” por López, Andrés (2006, p.20).

Se resalta que en los últimos 30 años fueron cerradas un gran número de líneas férreas; ferrocarriles que debido a sus características geométricas se perdió el interés en su empleo, pero que, sin embargo, las nuevas construcciones no han logrado compensar el déficit generado por sus cierres. (p.19)

En Perú, dicta el informe encargado por el Congreso de la República: El Sistema Ferroviario y sus Planes, fue durante el primer gobierno de Ramón Castilla, en mayo de 1851, donde se construyó el primer ferrocarril a vapor de América del Sur, uniendo Lima y Callao en una vía de 14 km. Desde entonces hasta la actualidad, según el MTC (2013), el Perú cuenta con 1906.60 km de vías férreas existentes y 7965.00 km proyectados. Y desde julio del 2015, con un Comité Técnico de Normalización: Ingeniería Ferroviaria (CTN 141-IF) con 32 representantes y que, de acuerdo al Instituto Nacional de Calidad (INACAL), hasta la fecha han elaborado 11 normas de equipos y sistemas y 1 norma de calidad de servicio.

Así también, mediante resolución ministerial 369-2016-MTC/01.02, el 9 de junio de 2016, se aprobó el Plan Nacional de Desarrollo Ferroviario en convenio con el Banco de Desarrollo de América Latina (CAF). Cuyo propósito, entre otros, está orientado a la conservación, desarrollo y promoción de la infraestructura para asegurar un transporte de calidad (Portal Andina, 2016). Y como parte de sus alcances recomienda la actualización del reglamento en cuanto a los criterios y parámetros de diseño, construcción y mantenimiento de modo que las normas de diseño sean más estrictas.

Esponda, Palvacini, Navarrete, Cuentas, Castellanos, Esparza y Peñalva (2001) mencionan que uno de los más claro ejemplos de la necesidad de normalizar y reglamentar procedimientos, es el incendio ocurrido en 1904 en Baltimore, Estados Unidos; cuando las compañías de bomberos cercanas que llegaron no les fue posible conectar sus mangueras a los hidrantes porque los diámetros eran distintos. Ello originó que se limitaran a observar cómo eran arrasadas 80 manzanas. (p.18)

Previamente, el jueves 5 enero del año 2006 se publicó en el diario oficial El Peruano, en sus páginas 309350 – 309351, la aprobación del nuevo Reglamento Nacional de Ferrocarriles. Aprobada por el presidente en funciones, Alejandro Toledo, mediante la Ley N° 27181, y modificada por la Ley N° 28172, en el literal h) del artículo 23°.

Así, derogando el Reglamento General de Ferrocarriles de 1978 y sus normas complementarias y modificatorias, Normas y Especificaciones Técnicas para el Diseño de Vías Férreas en el Perú.

Teniendo en cuenta el cambio de Norma a Reglamento, debemos considerar las diferencias que el INACAL (2016) hace y cuyos dos puntos de mayor importancia para los autores de la presente tesis son: los reglamentos son de uso obligatorio y su incumplimiento es sancionable.

La publicación del nuevo reglamento se efectuó un día después en las páginas 309455 – 309486 del diario oficial El Peruano. Dicho reglamento, vigente, cuenta con 173 artículos, además de 8 disposiciones complementarias, transitorias y finales y 5 anexos.

Sin embargo, los autores de la presente tesis podemos notar que los criterios que son objetos de estudio de esta tesis no se abordan de manera extensa, o se tocan de manera

efímera. Desde ese punto, nuestro reglamento vigente se vuelve ambiguo en los puntos estudiados en el presente trabajo.

Evidenciando que, hasta la fecha, no se ejecutan las recomendaciones del plan nacional.

Comenzando por el criterio de la velocidad, este punto solo es mencionado para ejemplificar el artículo 6° “clasificación de las vías férreas”, y en lo concerniente a la geometría del diseño, se incluyen dentro de los artículos 15° “conformación de la vía férrea”, donde refieren a las normas derogadas, y 48° “aspectos técnicos a considerar en el estudio de ingeniería del proyecto” que fija ciertos parámetros máximos y mínimos, pero sin ser de carácter limitante pudiendo ser modificados a gusto del proyectista.

Esta deficiencia en el carácter limitante del reglamento se refleja en la Resolución Directoral N.º 09-2018-MTC/14 en donde se deja sin efecto la Resolución Directoral N.º 11-2017-MTC/14, que precisa la obligatoriedad de sujetarse a la normativa vigente, para beneficio del proyecto de mejoramiento del Ferrocarril Huancayo – Huancavelica porque este se ejecutará sobre una vía ya existente y la licitación para elaborar su expediente técnico se aprobó antes de la emisión de la resolución afectada.

## 2.1 Antecedentes de la investigación

### 2.1.1 En el ámbito internacional

Díaz, David (2013) en su tesina de especialización realiza un estudio en el cual se analizan 3 alternativas (una sobre vía existente y dos sobre vías nuevas) para la ejecución del tren interurbano mencionado y en el cual se consideran fundamentales 3 aspectos para la elección del trazo definitivo: la factibilidad (que incluye la calidad, el costo y el tiempo de ejecución), las características geométricas y la cantidad de usuarios.

Para la ruta seleccionada de aproximadamente 60 km, el autor considera una velocidad de diseño de 130 a 140 km/h; pudiendo así recorrer toda la vía en menos de 45 minutos, que es el tiempo que demorarían autos particulares. Díaz especifica que para la velocidad designada el radio mínimo de curvas es 800 m, además, las

pendientes que logran rebasar los trenes modernos pueden ser mayores al 4%, pero de preferencia deberán ser menores al 3.5%

Para el año en que Díaz elaboró su tesina, la falta de un cuerpo normativo importante en relación al transporte ferroviario en México, obligaba a en la práctica hacer referencia a las normas internacionales de la American Railway Engineering and Maintenance-of-Way Association (AREMA) para el diseño de la infraestructura, y otras más.

Como ya se mencionó, son 3 los aspectos fundamentales para la elección del trazo definitivo, y dentro de las características geométricas, el autor concluye que, por las particularidades del terreno, las pendientes y las curvas tienen mayor relevancia. De las 3 alternativas analizadas, Díaz descarta la propuesta sobre la vía existente por su alto costo debido a la gran cantidad de modificaciones en su geometría, optando por una de las otras dos sobre vías nuevas.

Finalmente, se explica que las opciones presentadas pueden presentar limitaciones en lo referente a la geometría y afectar a la velocidad y la seguridad de los pasajeros, por lo que propone el uso de trenes de suspensión pendular. Sin embargo, incide en la imperiosa necesidad de la creación de una normativa especializada para el diseño geométrico de ferrocarriles y la rectificación de trazos y mejoras de los radios de curvas para mejor aprovechamiento de las vías férreas.

Hodas, Stanislav (2014) en su artículo compara los reglamentos vigentes de Eslovaquia para posicionamiento geométrico y disposición de la vía de ancho estándar (STN 73 6360) actualizada en 2003 y de la Unión Europea para parámetros de diseño para vías de ancho estándar (EN 13803-1) de 2010, y una nueva propuesta de reglamento de Eslovaquia para posicionamiento geométrico para vía de ancho de 1435 mm (STN 73 6360-1) a emitirse entre 2014 y 2015.

El autor menciona que los miembros de la UE han adoptado la reglamentación impuesta por la organización, pero que en varios casos se han regulado los parámetros a las condiciones particulares de cada país. En el caso del país en mención, el nuevo reglamento contempla el aumento de la velocidad de diseño, agregando dos nuevas categorías, RP5 y RP6. Su reglamento vigente en ese entonces contenía cuatro categorías del RP1 al RP4 para velocidades hasta 160

km/h, el nuevo agrega el RP5 para velocidades hasta 230 km/h y el RP6, hasta 300 km/h. Conllevando a criterios de diseño más estrictos en la geometría, en la deformación, entre otros, de la vía.

Hodas recomienda que, debido al nuevo reglamento, sus vías de hasta 160 km/h pasen a ser de hasta 200 km/h mediante el empleo de trenes de caja inclinable, mientras que para las nuevas categorías recomienda un recálculo de los radios, peraltes, gradientes y demás parámetros, considerando si el uso de la vía será para solo pasajeros, carga o mixto. En su evaluación, menciona que los radios de las curvas aumentarán o disminuirán en función a la velocidad y al peralte, su insuficiencia y su exceso (para transporte de carga o mixto), como se muestra en la siguiente fórmula:

$$\frac{11.8}{p+I} \times V_{\text{máx}}^2 \leq R \leq \frac{11.8}{p-E} \times V_{\text{mín}}^2$$

Donde:

V: velocidad según su categoría RP (km/h).

R: radio de la curva (m).

p: altura de peralte (mm).

I: insuficiencia de peralte (mm).

E: exceso de peralte (mm).

También, para el cálculo del radio mínimo en vías reconstruidas, el reglamento eslovaco emplea la fórmula:

$$\frac{6.5}{p} \times V_{\text{máx}}^2$$

Mientras que para la normativa europea se emplea la fórmula:

$$\frac{7.1}{p} \times V_{\text{máx}}^2$$

La reglamentación eslovaca empleaba un peralte máximo de 150 mm tanto para su reglamento de 2003 como para el propuesto para 2014, en comparación con los 160 mm sugeridos por el reglamento europeo. Esto resulta en radios de mayor tamaño que los propuestos por la UE, pero en relación al radio mínimo en vías reconstruidas se muestran menos conservadores.

Finalmente, con los parámetros anteriores ya definidos, el autor explica que ya se pueden diseñar los demás parámetros y concluye que, el trabajo de diseñar incluye

procedimientos complicados mientras haya que cumplir con todos los criterios, estándares y regulaciones, tanto como para líneas de velocidad como para líneas de alta velocidad, cada proyecto tendrá particularidades que volverán diferentes sus parámetros básicos de diseño.

Mora, María (2014) en su trabajo final de maestría expone los aspectos técnicos y operativos que se verían afectados por el cambio de trocha angosta (914 mm) a estándar (1435 mm) para lograr un transporte férreo eficiente.

Para el año en mención, la red ferroviaria de Colombia estaba compuesta por 3328 km de vías y, debido a la accidentada geografía y difícil acceso, puntos determinantes para la elección del ancho, casi en su totalidad por trocha angosta. Vías con pendientes por encima del 3%, e incluso mayores al 4.5%, radios mínimos de hasta 70 metros y velocidades de operación de 25 km/h; la autora explica que el cambio a trocha estándar que requiere de pendientes muy bajas y curvas muy amplias, implicaría una gran inversión. Además, menciona que el cambio a trocha estándar se propone porque se le asocia con mayores ventajas operativas y en visión a la integración regional (la mayoría de países de Sudamérica ha adoptado la trocha de 1435 mm), pero sin embargo debido a las características topográficas de Colombia, ésta será la variable más importante a considerar.

Mora, a continuación, menciona que la norma de Colombia que es producto de la revisión de las normas AREMA, UIC, SNCF, y otros más, mantiene la trocha angosta para líneas existentes y la trocha angosta para líneas nuevas de ahí en adelante, además de la implementación de un tercer carril para línea mixtas 914.4/1435 mm. Luego, las velocidades serán también modificadas quedando las mínimas en 50 km/h para líneas de carga, 80 km/h para trenes de pasajeros y 60 km/h para mixtas. También los radios mínimos, en vías de pasajeros serán diseñadas con velocidad mínima de 120 km/h. Finalmente, el peralte para vías de trochas mixtas será el máximo permitido para su sección estándar, obligando a la verificación constante del centro de gravedad de los vagones de ancho angosto para evitar siniestros.

La autora concluye que es mucha la importancia dada a la trocha estándar como parámetro para el aumento en la capacidad de carga de los ternes de mercancías y que el uso de la trocha angosta no es limitante para el desarrollo, pero su reemplazo podría, además de la alta inversión, complicar las actividades e interconexión local. Y recomienda una normativa adecuada a las particularidades de su país y mejor producción de información, estudios.

Franco, Marcelo; Chamas, Polyana; Queiroz, José; Baracho, Renata y Ramos, Nilson (2015) en su artículo, por la necesidad de adaptar los ferrocarriles a las necesidades actuales ante el incremento de la demanda ferroviaria en Brasil, investigan un sistema automático para verificar el cumplimiento de los estándares y especificaciones geométricas de proyectos ferroviarios y así poder evitar altos costos de construcción y operación y posibles siniestros.

Los autores revisan algunos elementos de la geometría comparando su reglamentación con otras internacionales, encontrando que: el radio mínimo en su reglamentación para tren de pasajeros es de 120 m y para tren de carga, 90 m, cuando de acuerdo al PTSOM's Code of Practice (Australia) es de 200 m; el peralte máximo, por confort y seguridad, expresado en milímetros es considerado 125 veces el ancho de la vía expresado metros; la máxima velocidad es fijada en función al radio y peralte de la curva; la mínima velocidad debe evitar que el tren cargue sobre el riel interior (evitar el exceso de peralte); y el sobreancho hasta 2 cm (20 mm).

Luego evalúan, mediante la metodología BIM, el caso de la línea que va desde San Luis hasta Itapecuru Mirim, recorriendo una extensión de 115 km y ancho de vía de 1000 m. La evaluación la realizan para velocidades de 60, 80, 100 y 120 km/h, detectando inconformidades para varios elementos de la geometría. Si bien los radios son mayores a los mínimos exigidos tanto por las normas brasileñas como por las internacionales, estos resultados obtenidos de la normativa brasilera están muy por debajo de los valores obtenidos y requeridos por las fórmulas aplicadas internacionalmente. De igual forma ocurre con los peraltes cuyo valor máximo permitido solo se cumple para las velocidades hasta los 60 km. Finalmente las velocidades analizadas deben ser modificadas y disminuidas en

algunos casos a menos de 50 km/h. Por consiguiente, proponen la modificación de las curvas 16, 17, 18, 19, 25, 26, 27 y 31 para cumplir con los estándares mínimos internacionales.

Los autores concluyen que la conformidad en el cumplimiento de las especificaciones no solo es importante para la aprobación del proyecto. Técnicas pobres en el diseño geométrico implican alto costo en la construcción y operación y alto riesgo de accidentes.

Green, John; Miller, Francis y Teng, Hualiang (2015) en su presentación contrastan los estándares de diseño y directivas respecto a la máxima velocidad, características aerodinámicas, infraestructura y demás. La documentación comparada es de los Estados Unidos, la Unión Europea, Japón y China.

En la parte Fuerzas horizontales, los autores encuentran que las velocidades máximas permitidas son 354 km/h en EE.UU., 350 km/h en Europa y China y 300 km/h en Japón, también que los radios mínimos de curvas son 1200 en EE.UU., 150 m en Europa siempre y cuando no se exceda el total de la suma del peralte máximo más la insuficiencia máxima de peralte, 4000 m en Japón y 3500 en China. Luego en la parte Fuerzas de aceleración y frenado, se menciona que las gradientes máximas son, aunque no está definido para EE.UU., 4% en AREMA, 3.5% en Europa y Japón y 3% en China.

Los autores concluyen que no existen diferencias significativas entre los sistemas comparados, pero que debido a que en Estados Unidos emplean trenes más pesados, se podrían diferenciar dos estandarizaciones: para Estados Unidos y para el resto del mundo.

Altamirano, Byron (2016) en su tesis de magister menciona la importancia de obtener los presupuestos actualizados de los rubros que intervienen en la rehabilitación y/o reconstrucción de un kilómetro de vía férrea pues facilitará al Área de Infraestructura de la Empresa Pública Ferrocarriles del Ecuador por consiguiente tiene como objetivo describir los elementos constitutivos para conformar el armado de una vía férrea.

Las variables que considera el autor se enfocan primordialmente en la infraestructura y la superestructura, haciendo énfasis en la geotecnia de los suelos y la geometría del trazado de la vía, como tangentes y curvas. Dentro del capítulo III analiza los parámetros geométricos de la vía férrea, dentro de ello sus criterios de diseño como: diseño horizontal, diseño vertical y velocidad de directriz en este caso 40 km/h para terreno llano según las Normas de diseño absolutas; radio mínimo de curvas circulares tomando así 60 m de radio mínimo para líneas de este orden; secciones típicas adoptadas como ancho de vía que es de 2.70 m y su trocha es de 1.067; estructura de la vía, y demás; fundamentando que dichos parámetros globales para caracterizar el escenario más probable se ha recurrido a normativas extranjeras que permitan generar resultados con un orden de magnitud razonable y que sean susceptibles de comprobación y verificación en campo.

Concluyendo finalmente como consecuencia de no contar con una normativa ferroviaria propia ecuatoriana, y con base en otras normativas internacionales como RENFE o AREMA, puede ocasionar que diseñadores o consultores propongan presupuestos referenciales que se ajusten a su propio beneficio económico y no tanto al criterio técnico.

Márquez, Luis (2017) en su artículo efectúa una revisión descriptiva de la literatura sobre el ferrocarril colombiano para comprender el futuro del transporte de carga, que les permitió identificar 4 puntos principales en su problemática, de los cuales son de interés para la presente tesis los “Aspectos técnicos” tratados en el capítulo 5.

Explica de manera concisa la relación directa entre el ancho de la trocha con la velocidad y las curvas circulares. Se dejan claras las limitaciones que significa la construcción de ferrocarriles de una sola vía afectando la capacidad ferroviaria y las complicaciones de la falta de estandarización de los anchos de vías que se repite para toda Sudamérica y se proponen consideraciones para mejorar las velocidades afectando las distancias entre estaciones. También explica que la topografía no es factor determinante en relación al alineamiento vertical, puesto que, esta se puede moldear a los requerimientos.

Machado, Martha (2017) en su tesis de maestría realiza un análisis de los parámetros técnicos de la red ferroviaria en mención para que sirva como aporte a su modernización.

Para la vía de trocha de 914mm, la autora detalla las características geométricas de la vía, de las cuales resalta velocidades de 25 y 40 km/h, radio mínimo de curva de 80 m, peralte máximo de 90 mm, insuficiencia máxima de peralte de 60 mm, pendiente máxima de 2.5% y rampa de peralte de 3 mm/m.

Además, explica que en un primer mejoramiento efectuado el año 2007, se corrigieron la longitud de la espiral con la fórmula:

$$L = \frac{V \times z}{90}$$

Y el peralte efectivo según la expresión:

$$z = 7.7 \times \frac{V^2}{R}$$

Donde:

L: longitud mínima de la espiral (m).

V: velocidad (km/h).

z: altura de peralte (mm).

R: radio de la curva circular (m).

Parte del análisis también se enfoca en la situación de la normativa colombiana para ese año y que considera un conjunto de leyes, decretos y resoluciones mal organizadas y muy genéricas en su interpretación y aplicación.

Finalmente, Machado recomienda para nuevas vías o reconstrucciones pendientes mínimas de 2.4%, radios mínimos de curvas circulares de 200 m y velocidades de 60 km/h para terrenos ondulados, 80 km/h para terrenos ondulados y 120 km/h para terrenos planos. También propone realizar un análisis costo – beneficio para el empleo de la trocha estándar o en todo caso de la trocha polivalente o mixta 914.4/1435 mm en el cual se pueden alcanzar velocidades hasta los 160 km/h.

## 2.1.2 En el ámbito nacional

Soto, Herikson (2015) en su tesis de grado describe el proceso constructivo de la vía férrea de 6 km. De viaducto elevado, específicamente desde la estación los jardines hasta el patio de maniobras, ambos puntos ubicados dentro del distrito de San Juan de Lurigancho - Lima, teniendo como uno de sus objetivos detallar el procedimiento adecuado para la construcción de vías férreas.

En el segundo capítulo se presenta las condiciones del proyecto, como es el caso del diseño geométrico, perfil longitudinal, verificación de velocidades y otros. Teniendo como criterio para el cálculo de espirales y sugerencias para el perfil longitudinal a la norma AREMA (American Railway Engineering and Maintenance-of-Way Association) y usando los criterios de diseño establecidos en C. A. Metro de Caracas, para evaluar el impacto de la coincidencia de curvas circulares y verticales con respecto a la velocidad civil usando la siguiente fórmula:

$$\frac{U}{U_i} + \left( \frac{A_g * V^2}{C - M_s * E_s} \right) \leq 1$$

Donde:

U: insuficiencia de peralte (mm).

Es: peralte (mm).

Ui: insuficiencia máxima de peralte (75 mm).

Ms: coeficiente de confort.

curvas convexas: 0.00

curvas cóncavas: 0.44

Ag: razón de cambio de pendiente (%/m).

V: velocidad de diseño (km/h).

C: coeficiente de confort.

curvas convexas (deseable): 220

curvas convexas (máximo): 320

curvas cóncavas (máximo): 630

Dando finalmente la conclusión de que su diseño desarrollado está basado en la norma AREMA, que considera tanto el confort de los pasajeros como la distancia

visual; incidiendo una vez más a la necesidad de hacer referencia a normas internacionales.

Bazán, José (2016) en su tesis tiene como objetivo explicar un estudio para implementar una red ferroviaria sub urbana (cercanías) de alimentación eléctrica y ser una guía fuente de información previa al inicio de vida del proyecto.

Explicando que el transporte en Lima, por su rápida urbanización, requiere mayor fluidez, tanto de personas como de mercancías, y ser eficiente. El autor refirió que, en base al artículo “Proyecto de ley busca restringir circulación de vehículos” publicado el 21 de junio del 2015 en el diario El Comercio, la eficiencia o calidad del transporte público está en función al uso del tiempo adecuado, con estándares de comodidad y de seguridad. Pero la realidad peruana, con respecto a la calidad, está fuera del contexto actual; se avanzan distancias relativamente cortas y el promedio de velocidad del transporte público en horas punta no suele superar los 16 km/h, cuando la velocidad mínima requerida es de 40 km/h.

Bazán también menciona que, el sistema de control de trenes basado en comunicaciones (CBTC), también conocido como sistema de control de trenes automático y continuo del tren, utilizado en vías ferroviarias de gran demanda, permite servicios con velocidades medias de 60 a 90 km/h y máximas de 120 a 150 km/h, sin afectar la frecuencia de paradas según la demanda local.

Finalmente, el autor resalta la falta de una normativa para el diseño ferroviario señalando la necesidad de diseñar bajo normas internacionales y concluye que es de necesidad prioritaria implementar el proyecto propuesto; y no solo tenerlo en agenda, porque ejecutarlo conllevaría beneficios ambientales, sociales y económicos para la ciudadanía.

## 2.2 Bases teóricas

La investigación Actualización de Criterios de Diseño Geométrico de Vías Férreas del Perú para Mejorar el Reglamento Nacional de Ferrocarriles, pretende tratar los siguientes temas: Teoría para el diseño geométrico de vías férreas, estructura actual del Reglamento

Nacional de Ferrocarriles y Normativas internacionales para el diseño geométrico del transporte ferroviario.

Pretendiendo integrar los datos investigados, analizarlos, compararlos y que sean un reflejo más preciso de la realidad que vive el Perú frente al diseño geométrico de vías férreas, la construcción de nuevas líneas y la remodelación de las existentes, teniendo como reto poder aportar información para lograr una actualización del Reglamento Nacional de Ferrocarriles a fin de mejorarla y así prescindir de la necesidad de trabajar en base a normas internacionales. Se establecen como textos guía de la investigación:

- Libros:

- “Ferrocarriles metropolitanos” de Melis y González.
- “Infraestructuras ferroviarias” de López.
- “Una introducción al ferrocarril” de Insa, Salvador, Martínez, Villalba, García y Pallarol.
- “Ferrocarriles” de Togno.
- “Ingeniería ferroviaria” de González y Fuentes.

- Reglamentos:

- Manual de la American Railway Engineering and Maintenance-of-Way Association (AREMA) – Estados Unidos.
- Recomendaciones de diseño para proyectos de infraestructura ferroviaria – Chile.
- Manual de normatividad férrea – Colombia.
- Track safety rules – Canadá
- Reglamento nacional de ferrocarriles – Perú.
- Track system requirements – Gran Bretaña.
- Instrucciones generales para los proyectos de plataforma – España

### 2.3 Definiciones conceptuales

Las definiciones a continuación se obtuvieron del portal web Federación Castellano Manchega de Amigos del Ferrocarril y a su vez contrastadas con la información obtenida de los libros de teoría y reglamentos, normas y manuales consultados.

Aceleración: Variación de velocidad en la unidad de tiempo.

**Acuerdo:** Conexión entre alineaciones rectas verticales. Su curvatura o radio puede no ser constante. También conocidas como acuerdo vertical.

**Adherencia:** Cohesión entre las ruedas de un vehículo ferroviario y el carril.

**Alabeo de la vía:** Deformación de la alineación de la vía por pandeo de carriles.

**Alineación:** La alineación teórica de una vía es la proyección horizontal del hilo director definido por el proyecto o por el replanteo. Es la correcta figura geométrica que den de tener los carriles (recta, transición o curva).

**Altura de peralte:** Peralte real o colocado en una curva de radio determinado; cuando logra su altura máxima es el peralte máximo.

**Ancho de vía o trocha:** Es la mínima distancia entre las caras activas de las cabezas de sus carriles, medida a 14 milímetros por debajo del plano de rodadura.

**Balasto:** Lecho de material granular pétreo (silíceo o calizo) de fácil drenaje, que se tiende sobre la explanación de la vía para asentar y sujetar sobre ella las traviesas y cuya función es evitar que la vía se mueva y contribuir a la distribución del peso de los trenes.

**Bogie:** Carro o eje al que se fijan las ruedas de un vehículo ferroviario, que soporta un vagón, el extremo de arrastre de una locomotora o un extremo del vehículo, y que puede pivotar bajo él. También se llama carretón o carretilla.

**Carril:** Elemento de acero sustentador del material rodante que se utiliza como dispositivo para su guiado y como conductor de las corrientes eléctricas, en su caso. También conocido como riel.

**Clotoide:** Tipo de curva de transición en la vía, cuya característica es que en todos sus puntos el producto de radio por longitud es constante.

**Curva circular:** Conexión entre alineaciones rectas horizontales. Por su curvatura o radio constante también conocidas como curva horizontal.

**Descarrilamiento:** Caída del riel por el que circula, de una o más ruedas, de uno o más vehículos ferroviarios, que conforman un tren.

**Distancia de frenado:** Distancia necesaria para que se detenga un tren que circula a la velocidad máxima permitida, aplicando una deceleración tal que los viajeros no sufran incomodidades o alarma.

**Entrevía:** Distancia entre los ejes de dos vías contiguas.

**Exceso de peralte:** Diferencia entre la altura de peralte y el de equilibrio, se aplica para los trenes lentos y mercancías.

**Freno:** Sistema o dispositivo para detener el tren mediante presión sobre las ruedas.

**Gradiente:** En el ferrocarril, plano inclinado del perfil de vía en subida.

Insuficiencia de peralte: Diferencia entre el peralte de equilibrio y la altura de peralte, se considera para los trenes de velocidad y alta velocidad.

Pendiente: En el ferrocarril, plano inclinado del perfil de vía en bajada.

Peralte: Diferencia de cota entre las superficies de rodadura de los dos carriles de una vía, dentro de una misma sección normal a ella en zona curva para compensar la fuerza centrífuga.

Peralte de equilibrio: Peralte teórico para compensar la fuerza centrífuga en una curva de radio determinado y a velocidad máxima o de diseño. Compuesto por la altura de peralte más la insuficiencia de peralte.

Traviesa: Elemento de apoyo de madera, hormigón o metal colocado transversalmente al eje de la vía, sobre el que se arrostran los carriles constituyendo el nexo de unión entre éstos y el balasto. Tiene dos funciones: mantener el espaciamiento de los carriles (es decir, el ancho de vía) y transmitir los esfuerzos que recibe al balasto subyacente. También conocida como durmiente.

Vagón o Coche de pasajeros: Material rodante o móvil ferroviaria sin sistema de propulsión propio destinada al transporte de mercancías. Su equivalente para el transporte de viajeros se denomina coche.

Velocidad de diseño: velocidad máxima que el maquinista no debe exceder en ningún momento durante la marcha del tren.

Vía: Estructura compuesta por dos rieles cuya inclinación y separación relativa son mantenidas por traviesas que están apoyadas sobre una capa de balasto de espesor variable separada de la plataforma por una subbase.

#### 2.4 Estructura teórica y científica que sustenta la investigación

Insa, Salvador, Martínez, Villalba, García y Pallarol (2016) mencionan que “las estructuras de toda obra de ferrovías se componen por una infraestructura y una superestructura”. (p.17)

Gonzáles y Fuentes (2010) describen a la infraestructura como “el conjunto de obras civiles necesarias para la construcción de la plataforma sobre la cual se coloca la vía y a la superestructura como la conformación de la vía por los carriles, aparatos de sujeción, traviesas y balasto”. (p.22)

#### 2.4.1 Infraestructura ferroviaria

Obras civiles como los túneles, desmontes, pasos, puentes y/o terraplenes que serán referidos a continuación, pero no tocados a extensión en la presente tesis.

##### a. Obras de tierra

Insa et al (2016) refieren que luego de diseñar el trazado en alzado, se sabrá si los tramos en los que la vía se encontrará estarán por encima o por debajo del terreno natural.

Las obras de tierra son excavaciones o depósitos que permiten posicionar la vía en la cota establecida. Si el perfil longitudinal de la vía debe estar por encima del terreno natural hablamos de terraplenes en caso fuera lo contrario, hablamos de desmonte. Así se podrá decir que las obras de tierra son la secuencia de los desmontes y terraplenes que crean la infraestructura sobre la que se dispone la plataforma. (p.17-18)

##### - Desmontes

Insa et al (2016) mencionan que un desmonte es una excavación en el terreno que permite que el perfil longitudinal esté por debajo del terreno natural. La parte fundamental de un desmonte son los taludes, esto es la inclinación de las tierras excavadas.

Para encontrar este valor se debe que realizar un estudio geotécnico que proporcionará el tipo de terreno y ángulo de inclinación de los taludes garantizando la estabilidad del mismo.

Una elección correcta de la pendiente del talud evitará desprendimientos de material, pues es evidente que no todos los terrenos admiten taludes inclinados que aseguren su perfecto funcionamiento. Es en el caso de terrenos muy fracturados que puede ser necesario aplicar técnicas de sostenimiento como anclajes, bulones o construcción de obras de protección como muros, falsos túneles, entre otros.

Un desmonte no deja de ser una gran zanja en el terreno, en este sentido la escorrentía superficial se ve afectada, por ello se debe diseñar un sistema de drenaje superficial que servirá para canalizar el flujo superficial de agua que se

crea en periodos de lluvia y así evitar que ésta afecte directamente al talud, ya que si se introduce agua por las grietas se puede desencadenar un movimiento de la masa de tierra. (p.18-19)

#### - Terraplén

Insa et al (2016) lo mencionan como un depósito de terreno que permite posicionar el perfil longitudinal de la vía por encima del terreno natural. Se pueden distinguir varias zonas atendiendo a la función que cumplen los materiales constituyentes.

Las 4 zonas de un terraplén son:

- Coronación: Parte superior del relleno cuya superficie constituye la explanada sobre la que se asientan las capas intermedias de la plataforma.
- Núcleo: Parte del relleno compactación constituida por el material colocado entre el cimientado y la coronación, en la zona central del terraplén.
- Espaldón: Parte exterior del relleno constituido por material que envuelve lateralmente el núcleo protegiéndolo de los agentes externos.
- Cimientado: Parte inferior del terraplén en contacto con el terreno natural. (p.22-23)

Lichtberger, Bernhard (2011) menciona que “los requisitos geométricos exigidos a la plataforma son:

- Inclinación transversal de 1:20 ó del  $5\% \pm 0.5\%$ .
- Altura teórica  $\pm 0.03$  m.
- Plataforma plana en sentido longitudinal ( $\leq 0.02$  m sobre base longitudinal de 4 m) sin depresiones”. (p.237)

#### b. Drenaje

Insa et al (2016) lo mencionan como elementos del sistema de drenaje superficial, se dividen en las cunetas de guarda y drenaje de la plataforma.

Las cunetas de guarda se colocan en la coronación de los desmontes, sirven para captar las aguas que llegan a la vía férrea procedente de terrenos más altos y su función es conducir las hasta las cunetas de explanación.

En el drenaje de plataforma pueden ser de dos tipos drenaje superficial y drenaje profundo. (p.19-22)

#### - Cunetas

Insa et al (2016) los mencionan como los elementos principales del drenaje y tienen como misión recoger y evacuar las aguas de escorrentía de los taludes, las procedentes de la propia plataforma y las infiltradas a través del balasto, y conducir el agua hacia las obras de drenaje longitudinal. (p.20-21)

#### c. Plataforma

Insa et al (2016) mencionan que es la superficie sobre la que se apoyará la superestructura de la vía y la que recibe las tensiones por el tráfico a través de la capa de balasto y está formada por el propio terreno, en caso de desmontes, o por suelos de aportación, en caso de terraplenes.

Con el desarrollo de la red ferroviaria, las exigencias de tráfico y cargas, es necesario tener consideraciones a la plataforma para prevenir problemas derivados de capacidad portante o disposiciones geométrico-estructurales inadecuadas.

En el caso de desmontes se suele rebajar por debajo de la cota definitiva para colocar una capa de material seleccionado para conseguir mayor rigidez uniforme posible en el terreno; esto pasa cuando hay excavaciones en roca y la superficie podría quedar muy rígida.

Cuando haya excavaciones en terrenos no adecuados se deberá profundizar más, al menos un metro, para sustituir dichos terrenos por otros de mayor calidad.

En el caso de terraplenes la capa de terminación debe ser de mejor calidad que la que constituye el núcleo teniendo a su vez mayor grado de compactación, también, tanto en desmontes como en terraplenes, la capa de terminación debe tener pendientes transversales para la evacuación de las aguas pluviales. (p.27-63)

#### - Capas de asiento ferroviario

Insa et al (2016) mencionan que las capas de asiento se disponen entre la plataforma y las traviesas para asegurar un comportamiento adecuado de la vía bajo el punto de

vista de la rigidez- elasticidad, geometría (alineación y nivelación) y drenaje. Están compuestas por la banqueta de balasto y una subbase que hace el papel de capa de adaptación entre la banqueta y la plataforma.

Los espesores de las capas de asiento, mostradas en la Figura 1, se definen en función de las características de los suelos que integran la plataforma, las características globales de la plataforma, los condicionamientos climáticos debido a su ubicación, las características del tráfico y las características de la superestructura de vía.

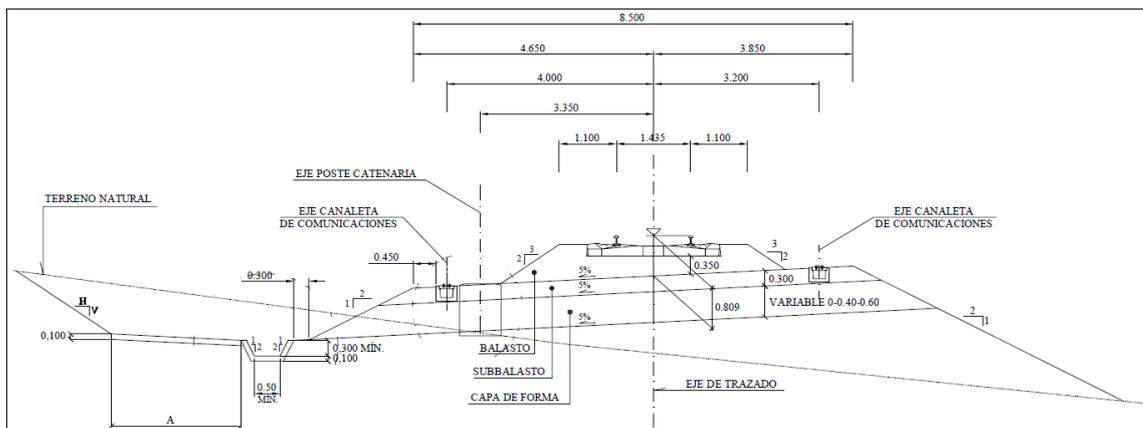


Figura 1: Esquema de capas de asiento en la sección transversal de una vía.

Fuente: Renfe (2011)

La estructura de capas de asiento está dada por la combinación de las calidades del suelo soporte y de las propias capas. La estructura más completa puede tener las siguientes capas:

- Banqueta de balasto: en su función estructural debe resistir las cargas, repartirlas y empotrar las traviesas; geoméricamente, dar geometría a la vía en alineación y constituir el peralte; en mantenimiento, recuperar la geometría de la vía; y en relación con el agua: drenar y evaporar rápidamente el agua.
- Capa de subbalasto: debe colocarse en todas las plataformas, incluso en pedraplenes (capa de igualación) y como elemento repartidor de cargas. Sus funciones a desarrollar son: mejorar la capacidad portante, protección contra la erosión y el hielo, aislante de contaminación entre capas inferiores y balasto (impermeabilización) y evacuación de aguas superficiales.
- Capa de fundación: debe permitir el paso de maquinaria durante la ejecución de las obras y sus funciones a desarrollar son: nivelación antes de la capa de

subbalasto, mejora de la capacidad portante de la coronación del terraplén y evacuación de aguas.

- Capas y fieltros anticontaminantes: tienen la misión de proteger el balasto de la contaminación proveniente de las plataformas de baja calidad. En el caso de los fieltros, también tienen misión anticontaminante, pero además facilitan la construcción de las capas de asiento. (p.63-67)

#### - Catálogos de estructuras de asiento

Insa et al (2016) mencionan que las últimas tendencias de las distintas administraciones ferroviarias es un acuerdo en la utilización de catálogos de estructuras de asiento que proporciona de forma esquemática la naturaleza, espesor y características de las capas protectoras de la plataforma. Esta utilización de catálogos de estructuras en el dimensionamiento de la vía no es una idea nueva, pero hay que destacar que la Sociedad Nacional de Ferrocarriles Franceses (SNCF por sus siglas en francés) ha agregado mayor puntualización sobre las características de la plataforma. (p.77-78)

Las propuestas estructurales de la SNCF se muestran en las Figura 2, Figura 3 y Figura 4, mientras que la Tabla 3 muestra los espesores de las capas en función al tipo de vía y de traviesa empleada.

#### Propuestas de la SNCF:

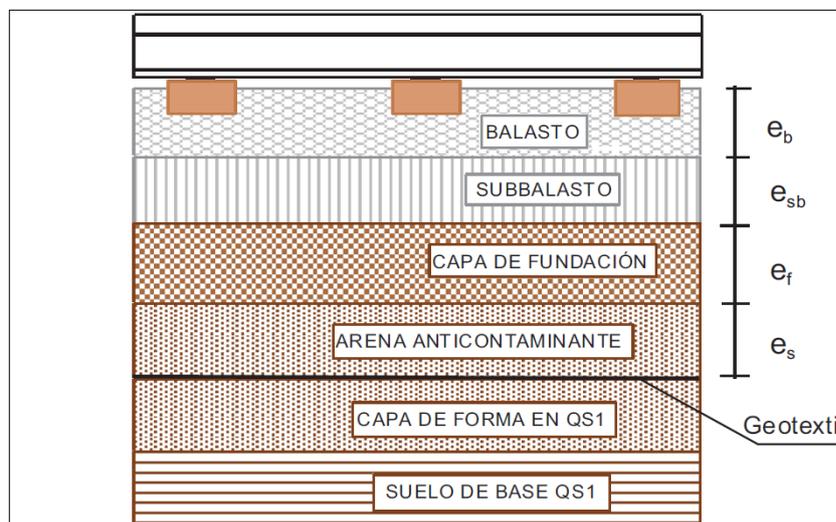


Figura 2: Estructura con capa de forma de la misma calidad que la capa de base  
Fuente: Una introducción al ferrocarril (vol. II) por Insa et al (2016, p.78)

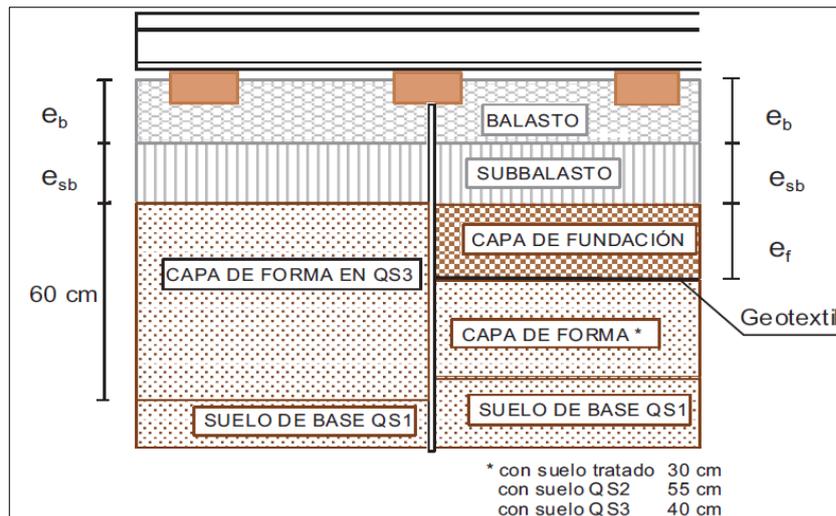


Figura 3: Estructura con capa de forma de mejor calidad que la capa base  
Fuente: Una introducción al ferrocarril (vol. II) por Insa et al (2016, p.80)

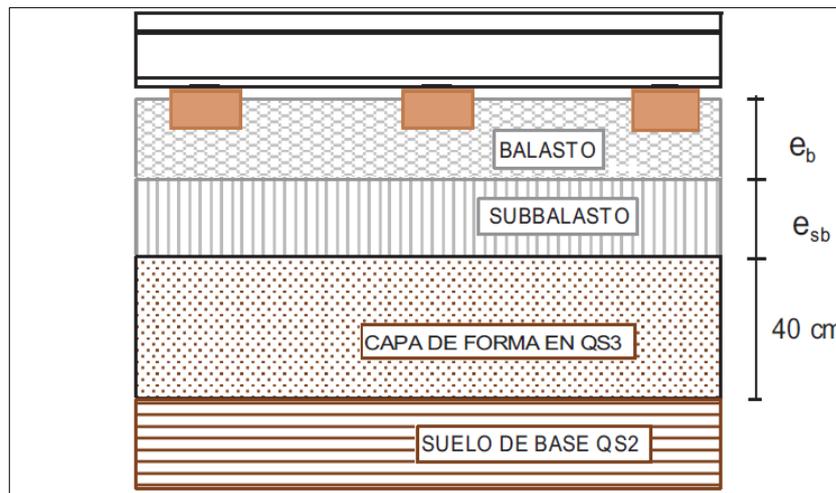


Figura 4: Estructura con capa de forma de mejor calidad que la capa base  
Fuente: Una introducción al ferrocarril (vol. II) por Insa et al (2016, p.80)

Tabla 3: Espesores de capas en función del tipo de línea y traviesa

Grupo UIC	Líneas (200 km/h)	1 - 2 - 3		4 - 5 - 6 - 7av		7sv - 6 - 9	
Traviesas	C	M	C	M	C	M	C
Balasto (cm)	30	20	25	15	20	0	5
Subbalasto (cm)	20	20	20	20	20	15	15
Fundación (cm)	20	20	20	15	15	15	15
Arena ant. (cm)	15	15	15	15	15	15	15

H: concreto armado, M: madera

Fuente: Una introducción al ferrocarril (vol. II) por Insa et al (2016, p.81)

#### d. Estaciones y túneles

##### - Estaciones

Melis y González (2008) mencionan que, en relación al servicio dado, y obviando la seguridad, por encima de la reducción del tiempo de viaje se encuentra la accesibilidad del usuario al servicio. El diseño de las estaciones debe permitir que el público ingrese en ellas con el mínimo esfuerzo.

Para el trazado de nuevas líneas, cuyo objetivo es transportar más rápido y cómodamente al cliente, se requieren estaciones en zona de máxima demanda y de radio de acción mayor a los 350 metros; esto significa que la distancia mínima entre estaciones sea de 700 metros y no mayores al kilómetro. Así mismo, éstas tendrán longitudes de acuerdo a la longitud del ferrocarril. (p.75-78)

##### - Túneles

Por la topografía/orografía, es probable que se tenga la necesidad de construir túneles.

López, Andrés (2006) explica que en el interior de un túnel la estructura es diferente a la que existe en cielo abierto. Esta puede estar formada por el propio terreno natural, tratado o no, o bien por solera de hormigón, con lo que se limita los efectos sobre la vía de las habituales filtraciones de agua. En Alemania, Francia y el Reino Unido, los túneles con solera representan de 10% - 30%, en Austria asciende al 50% y en Italia al 70%.

Algunas soluciones típicas adoptadas para el establecimiento de la estructura e infraestructura ferroviaria se presentan en las Figura 5 y Figura 6. (p.289-290)

Melis y Gonzáles (2008) refieren que los túneles pueden ser de una o dos vías, donde las de vía única:

- Son túneles pequeños, de fácil construcción y más seguros.

Y las de vía dobles:

- Ahorro en tiempo y dinero en la construcción de un solo túnel para dos vías en lugar de uno para cada una.

- Posibilidad de uso de la otra vía en caso de que sea necesario ante algún inconveniente o problema. (p.78-79)

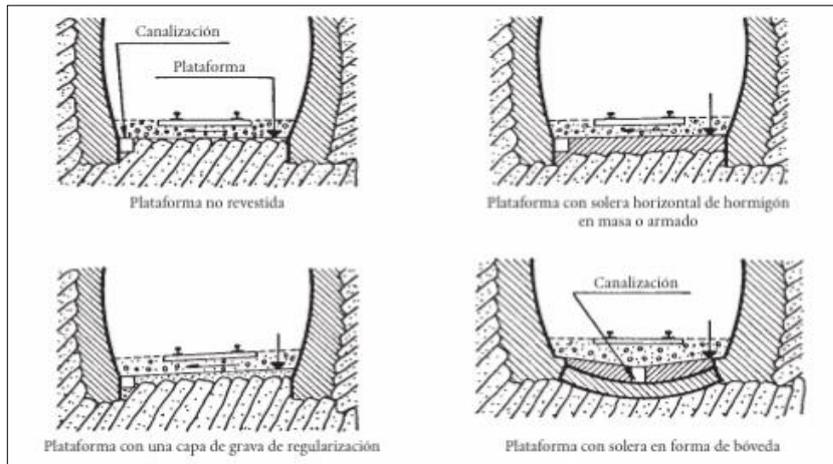


Figura 5: Estructura en túnel  
Fuente: UIC y SNCF

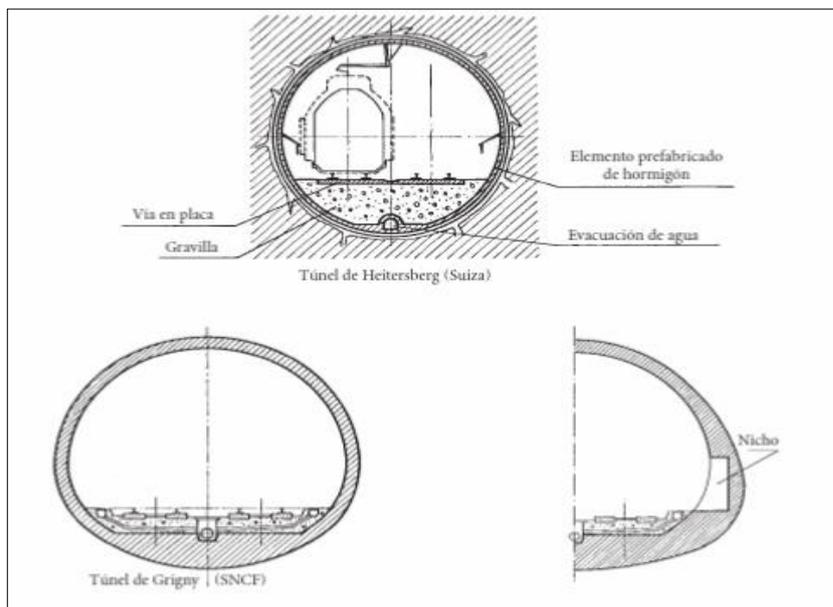


Figura 6: Estructura en túnel  
Fuente: UIC y SNCF

#### 2.4.2 Superestructura ferroviaria

López, Andrés (2006) se refiere a la superestructura como la configuración típica para el montaje de una línea férrea; ésta puede ir sobre infraestructura natural, infraestructura rígida y hormigón. Con el carril apoyado sobre la durmiente y ésta a su vez asentada en la capa de balasto, cuya inclinación en la unión con la

plataforma/terraplén permite la evacuación de las aguas provenientes de lluvias por medio del drenaje. (p.41)

a. La vía convencional

López, Andrés (2006) la describe como “un emparrillado conformado por los carriles que se fijan mediante sujeciones en las durmientes, que a su vez se apoyan sobre el lecho formado por el balasto y la plataforma”. (p.41)

- El carril

Melis y González (2008) lo describen como el elemento que recibe directamente las cargas y que debe cumplir con lo siguiente:

1. Resistir y transmitir las cargas del ferrocarril a los elementos de la vía.
2. Guiar al móvil y tener adherencia suficiente para acelerar y frenar.
3. Conducir electricidad necesaria para la señalización y para poner en marcha el motor (en trenes eléctricos). (p.189-190)

Lichtberger, Bernhard (2011) menciona que los carriles están sometidos a sollicitaciones estáticas y dinámicas, y se emplean para transportar cargas pesadas, hasta 35t por eje. Actualmente, usados en vías donde las velocidades pueden superar los 350 km/h dependiendo de la topografía y de los radios de curva, para que los carriles puedan resistir estas sollicitaciones deben cumplir lo siguiente:

- Alta resistencia al desgaste.
- Alta resistencia a la compresión.
- Alta resistencia a la fatiga.
- Alta resistencia a la tracción.
- Elevada dureza y alto límite elástico.
- Alta resistencia a la rotura.
- Buenas propiedades de soldadura.
- Alto grado de pureza de los materiales.
- Tensiones internas reducidas tras el proceso de fabricación.
- Buena calidad de superficie de rodadura, buena planicidad y fidelidad del perfil.

También refiere que los existen carriles de diferentes tipos:

- Naturalmente duros.
- Templados.
- Fuertemente aliados.
- Bainíticos. (p.86-92)

González y Fuentes (2010) mencionan que el carril es diseñado, para resistir la flexión, como una viga doble T y fue evolucionando hasta obtener su forma actual. En el presente, el carril usado por excelencia es el Vignole que, se muestra en la Figura 7 y cuenta con una cabeza que recibe los esfuerzos que llegan del contacto con la rueda, el alma que da la inercia y el patín que se apoya sobre la durmiente y da la estabilidad. (p.34-36)

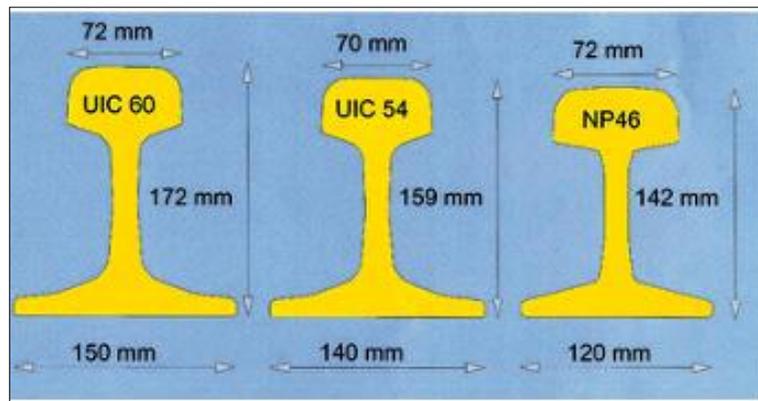


Figura 7: Carriles UIC más usados

Fuente: "Ingeniería ferroviaria" por González y Fuentes (2010, p.31)

Melis y González (2008) explican que la UIC denominó los carriles según su peso por unidad de longitud y normalizó las características de los carriles:

- a) Superficie lisa y de poca deformabilidad, cuya rigidez debe evitar su flexión por acción de la carga recibida. Flexibilidad para evitar roturas que se generan por la propia rigidez del elemento.
- b) Peso adecuado acorde al diseño proyectado. A mayor peso, tendrá mayor duración, resistencia y menor flexión, pero el costo se incrementará.
- c) Adherencia rueda carril. Una baja adherencia permite transportar mayor carga a mayor velocidad y menor potencia, pero limitará la subida en pendientes y la distancia de frenado/parada.
- d) Estandarización en la fabricación. (p.190)

Lichtberger, Bernhard (2011), mientras, menciona que la identificación de los carriles se realiza mediante el fabricante, el año de laminado, el tipo de perfil y la calidad del acero y que en la actualidad los criterios de estandarización del carril son los siguientes:

- Superficie de rodaduras con ancho suficiente y forma adecuada para resistir la presión entre rueda y carril.
- Cabeza, cuya altura, permite un desgaste suficiente para su empleo a largo plazo.
- Alma con suficiente grosor para permitir la rigidez a la flexión.
- Patín con ancho suficiente para la estabilidad y reducción de presiones superficiales en la traviesa/durmientes.
- Resistencia al momento debido a solicitaciones verticales y horizontales.
- Tensiones favorables en radios por compensación en las transiciones.
- Alto y ancho del patín adecuados para evitar volcaduras.
- Centro de gravedad a media altura.
- Sin embargo, parte de estas exigencias se contradicen y hacen difícil el desarrollo de un carril óptimo. (p.95)

En la Tabla 4 se muestran los perfiles internacionales más importantes y sus características.

#### • Longitud del carril

González y Fuentes (2010) mencionan que “los carriles se fabrican en longitudes de 18 m y se sueldan dependiendo de la locación de la vía, en fábrica para ferrocarriles de larga distancia en longitudes de 288 m e in situ en ferrocarriles metropolitano”. (p.36)

Lichtberger, Bernhard (2011) sin embargo, menciona que en la actualidad los carriles pueden laminarse hasta 120 m sin afectar su transportabilidad. La búsqueda de una mayor longitud es debido a sus ventajas:

- Menor costo debido a su producción.
- Mayor cantidad al momento de transportar.
- Tiempos menores de carga y descarga.
- Menor número de soldaduras en el tendido.
- Construcción más rápida.

Tabla 4: Perfiles de carriles más usados

Denominación	Altura del carril H (mm)	Ancho del patín B (mm)	Ancho de la cabeza C2 (mm)	Alma S (mm)	Altura de la cabeza K1 (mm)	Altura de la cabeza K2 (mm)	Altura del Patín F (mm)	Grosor del patín D (mm)	Superficie A (mm <sup>2</sup> )	Peso G (Kg/m)	Eje neutral Yh (mm)	Momento de inercia Ix (cm <sup>4</sup> )	Momento de resistencia Wx (cm <sup>3</sup> )
Perfiles alemanes													
SMR29	115	90	47	12	40	31	19	10	3794	19.8	55	624	104
S30	108	108	60.3	12.3	31	24	19.5	7	3825	30	52.1	606	109
S33	134	105	58	11	39	31.8	19	9.5	4264	33.5	67.3	1040	155
S41, 10R	138	125	67	12	43	31.8	24	9.5	5271	41.4	68.2	1368	196
S41, 14R	138	125	67	12	43	31.8	24	9.5	5216	41	68.2	1368	196
49E1 (S49)	149	125	67	14	51.5	39.8	27.5	10.5	6297	49.4	73.3	1819	240
54E3 (S54)	154	125	67	16	55	43.3	29	12	6948	54.5	75	2073	262
Perfiles UIC													
50E4 (UIC50)	152	125	70	15	49.4	36.3	28	10	6392	50.2	76	1940	253.6
54E2 (UIC54E) (SBBIV)	161	125	67	16	41.4	38.7	30.2	12	6855	53.8	69.5	2308	276.4
54E1 (UIC54) (SBBIII)	159	140	70	16	49.4	36.3	30.2	11	6934	54.4	75	2127	279.2
60E1 (UIC60)	172	150	72	16.5	51	37.5	31.5	11.5	7687	60.3	80.9	3055	335.5
Perfiles americanos													
ASCE60	108	108	60.3	12.3	31	24	19.5	7	3825	30	52.1	606	108.5
ASCE75	122	122	62.7	13.5	36.1	28.9	21.4	7.3	4727	37.1	58.4	952	149

Fuente: "Manual de vía" por Lichtberger, Bernhard (2011, p.96)

Tabla 4: Perfiles de carriles más usados (continuación)

Denominación	Altura del carril H (mm)	Ancho del patín B (mm)	Ancho de la cabeza C2 (mm)	Alma S (mm)	Altura de la cabeza K1 (mm)	Altura de la cabeza K2 (mm)	Altura del Patín F (mm)	Grosor del patín D (mm)	Superficie A (mm <sup>2</sup> )	Peso G (Kg/m)	Eje neutral Yh (mm)	Momento de inercia Ix (cm <sup>4</sup> )	Momento de resistencia Wx (cm <sup>3</sup> )
Perfiles americanos													
ASCE80	127	127	63.5	13.9	38.1	30.8	22.2	7.6	5070	39.8	61.2	1098	165
ASCE90	142.9	130.2	61.5	14.3	37.3	29.2	25.4	9.1	5686	44.6	64.5	1610	205.5
ASCE100	152.4	136.5	65.3	14.3	42.1	33.5	27	9.9	6414	50.4	75.4	2040	247
ASCE115	168.3	139.7	69.1	15.9	42.9	34.2	28.6	11.1	7236	56.8	75.7	2730	295
ASCE132	181	152.4	74.5	16.7	44.5	35	30.2	11.1	7633	65.5	81.3	3671	368.7
ASCE133	179.4	152.4	71.1	17.5	49.2	36.5	30.2	11.6	8429	66.2	81.3	3576	364.7
ASCE136	185.7	152.4	72.6	17.5	49.2	39.9	30.2	11.1	8606	67.6	85	3949	391.5
CB122	172.2	152.4	71.1	16.5	49	36	31.5	11.4	7743	60.8	80.8	3088	337
Perfiles británicos													
BS60R	114.3	109.5	57.2	11.1	35.7	26.2	16.7	7.6	3792	29.8	55.7	677	115.4
BS70A	123.8	111.1	60.3	12.3	39.7	28.2	23	7.9	4438	34.8	61.3	912	146
BS80A	133.4	117.5	63.5	13.1	42.5	30.6	25	8.7	5071	39.8	65.6	1209	178
BS90R	142.9	136.5	66.7	13.9	43.7	32.5	20.6	9.3	5684	44.6	68	1600	214
BS90A	142.9	127	66.7	13.9	46	33.5	26.2	9.1	5735	45	70	1558	214
BS113A	158.8	139.7	69.9	20	49.2	36.1	30.2	11.1	7183	56.4	84.3	2349	278.6

Fuente: "Manual de vía" por Lichtberger, Bernhard (2011, p.96)

- Solicitaciones del carril

Los carriles resisten cargas verticales en las ruedas, fuerzas horizontales de guiado, esfuerzos dinámicos debido a planos en las ruedas y a la superficie de rodadura, (geometría de la vía) corrosión por oxido, esfuerzos longitudinales por temperatura y fuerzas de aceleración y frenado y tensiones internas por fabricación. (p.101)

López, Andrés (2006) refieren que, “por razones de estabilidad lateral, en la instalación del carril, éste se coloca con una inclinación hacia el centro de 1:20 ó 1:40 excepcionalmente. Dicha inclinación será sostenida por medio del empleo de las placas de asiento”. (p.41-44)

- Carriles asimétricos

Lichtberger, Bernhard (2011) también explica el empleo de carriles asimétricos en las curvas de radio pequeños (menores de 500 m) debido al desgaste lateral producido en el contacto de la rueda con el carril exterior y un incremento en el ancho de la superficie de rodadura del carril interior.

La modificación de los carriles se dará en la zona de contacto, en la cabeza, mediante el esmerilado. Esta modificación, por seguridad, limita la velocidad en curva del ferrocarril a menos de 100 km/h para evitar descarrilamiento. (p.98-99)

- Las traviesas

Melis y González (2008) la definen como el elemento transversal de la ferrovía que se apoya en el balasto y soporta al carril (colocado entre el carril y el balasto), conformando el emparrillado en conjunto con el carril. Mantiene el ancho de la vía y la inclinación de los carriles. Transmite al balasto los esfuerzos recibidos del carril. (p.206)

Lichtberger, Bernhard (2011) describe que las funciones de las traviesas son:

- Mantener el ancho de la vía

- Transmitir y distribuir los esfuerzos al balasto (esfuerzos verticales de los ejes, esfuerzos inerciales horizontales y esfuerzos longitudinales en carriles)
- Fijar los carriles (nivelación e inclinación)
- Resistencia transversal a esfuerzos inerciales y transversales y longitudinalmente contra deslizamientos, frenado, aceleración y de temperatura
- Amortiguación de vibraciones de los carriles y disminución del impacto acústico

Luego, explica que las traviesas pueden ser de madera, acero u hormigón armado. De ancho de 260 cm en vías convencionales y 280 cm para traviesas monobloque en vías de alta velocidad. En los extremos las secciones están entre 25 x 21 cm y 30 x 25 cm. La distancia entre ejes de las traviesas se establece en 60 cm.

También realiza una comparación entre traviesas de madera y hormigón, cuyos tipos se pueden observar en la Figura 8.

Ventajas de las traviesas de hormigón:

- Mayor vida útil
- Menor precio en comparación a traviesas de maderas duras
- Mantenimiento de sujeciones prácticamente nulos
- Mayor resistencia lateral debido a su peso superior

Ventajas de las traviesas de madera:

- Mayor resistencia a impactos
- Menor desgaste ondulatorio
- Menores roturas en caso de “bailes” de traviesas
- Debido a su peso es posible la sustitución manual
- Mantenimiento de la nivelación longitudinal es menos exigente por su menor momento de inercia y su menor elasticidad. (p.156-157)

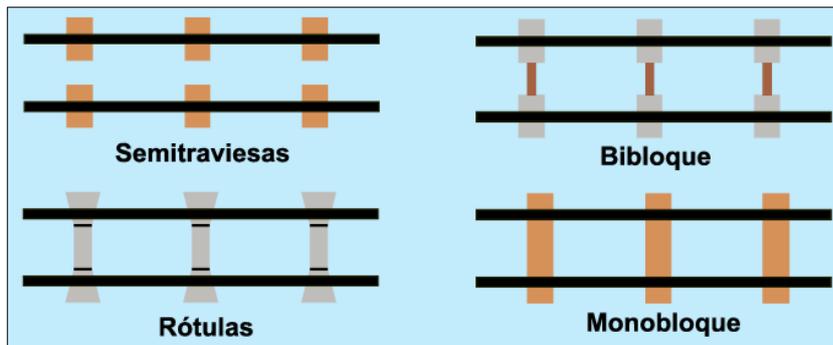


Figura 8: Tipos de traviesa

Fuente: "Ingeniería ferroviaria" por González y Fuentes (2010, p.51)

- Traviesas de madera

González y Fuentes (2010) explican que, debido a las ventajas de las traviesas de hormigón, las de madera se utilizan cada vez menos. Pero, todavía existen miles de kilómetros de ferrovías con traviesas de madera. No se exige que sean rectas, pero sí que su cara inferior sea plana y las laterales paralelas y que en la superior sean planas en los apoyos de los carriles. Su resistencia al deslizamiento se debe a que el balasto se clava en la madera, además su peso la vuelve de fácil manejo y por su composición es reutilizable. (p.52-55)

Lichtberger, Bernhard (2011), sin embargo, dice que en comparación a las de hormigón estas envejecen mucho más rápido, vida útil entre 25 y 45 años dependiendo de las condiciones a las que estuvo expuesta, son combustibles, su peso estabiliza menos la vía y es susceptible a deteriorarse por efectos ambientales y animales, lo que provoca debilitación en las sujeciones. (p.156-160)

Melis y González (2008) explican que se espera que la madera sea de mayor dureza, y por ende útil para vías en las que se desarrollen hasta los 200 km/h, con una densidad hasta 800 kg/m<sup>3</sup>, resistencia al arranque hasta 60 t y módulo de elasticidad hasta 8x10<sup>5</sup>kg/m<sup>2</sup>. (p.207)

- Traviesas de concreto armado

Melis y González (2008) refieren son pretensadas o postensadas, de vida útil por encima de los 40 años y se distinguen diferentes tipos:

- Monobloque: trabaja siempre a compresión, mejorando la resistencia a los esfuerzos alternativos.
- Bibloque: dos bloques de concreto unidas por una riostra metálica, de buena resistencia lateral, alto consumo de acero, poca capacidad de mantener el ancho de la vía y escasa superficie de apoyo en el balasto. (p.210-211)

- Traviesas de acero

Lichtberger, Bernhard (2011) explica que son utilizadas mayormente en cambios de vía y vida útil hasta 60 años:

- Eficaces para el mantenimiento del ancho de vía.
- Mejor manipulación debido al bajo peso.
- Baja resistencia lateral en comparación con la de concreto armado.

Sin embargo, presentan poca resistencia lateral, gran desgaste al balasto por impactos no amortiguados (son livianos) y complicaciones al realizar trabajos de ripiado. (p.162-163)

- El balasto

Lichtberger, Bernhard (2011) la describe como la capa de piedra partida colocada sobre la plataforma y donde se asienta el emparrillado, envolviendo 5 de las 6 caras de las traviesas, deja expuesta su cara superior, y recibe las cargas repartidas por dichos elementos. Cumple las siguientes funciones:

- Transmitir y repartir cargas homogéneamente hacia la plataforma y sin superar las tensiones admisibles de capas inferiores.
- Empotrar las traviesas, dando alta resistencia a su movimiento longitudinal causado por la aceleración, el frenado y la dilatación por temperatura y evitando su movimiento transversal, por movimiento de lazo y fuerza centrífuga.
- Proporcionar elasticidad necesaria a la vía para reducir las fuerzas dinámicas.
- Facilitar el drenaje, la evaporación del agua y buena permeabilidad al aire a fin de mantener la capacidad portante de la plataforma.
- Corrección de la posición de la vía en casos de deformación.

Conformado por partículas individuales, permiten el movimiento y otorgan características elásticas necesarias en la ferrovía, pero que con el tiempo tienden a la deformación de la estructura. Esto genera una inversión constante en el mantenimiento de la vía, elevando los costos iniciales.

El espesor del balasto debe ser el mayor posible y depende de la distancia entre traviesas, el ancho de las traviesas y el ángulo de fricción del balasto. Quedando definidas como las medidas óptimas para las traviesas las descritas anteriormente. Además, se desea que las dimensiones de la sección transversal del lecho sean:

- 50 cm de ancho de balastro delante de las cabezas de las traviesas.
- 1:1.5 de inclinación del talud.
- 40 cm de espesor debajo del borde inferior de la traviesa. (p.178-179)

González y Fuentes (2010) explican que de preferencia sea de roca silíceo, de origen ígneo. Debe aproximarse a una forma cuboide con aristas vivas que logren clavarse a las caras embebidas de las traviesas. Se aceptan y sugieren que el tamaño del balasto este entre 30 y 60 mm. Tamaños inferiores perjudican el drenaje y tamaños mayores afectan la colocación del balasto y la nivelación de la vía que se ajusta al milímetro.

El proceso de colocación que se muestra en la Figura 9, se realiza:

- Se extiende la capa de subbalasto.
- Se extiende una capa inferior sobre la capa de subbalasto.
- Se coloca el emparrillado (rieles sobre traviesas).
- Se agrega la capa superior de balasto sobre el emparrillado.
- Se eleva y coloca sobre su cota final el emparrillado con el uso de bateadoras.

(p.46)

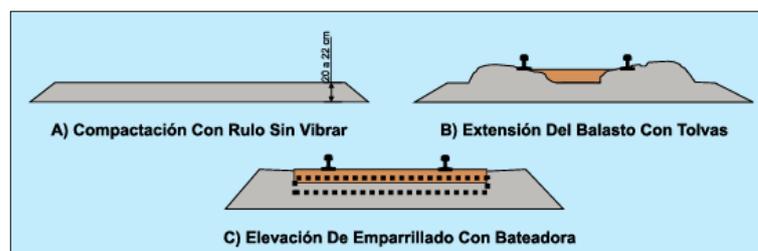


Figura 9: Colocación del balasto sobre la plataforma  
Fuente: "Ingeniería ferroviaria" por González y Fuentes (2010, p.46)

## - Sujeciones

Melis y González (2008) la describen como elemento de fijación que sujeta el carril a la traviesa o al bloque de la vía en placa, posibilita la continuidad estructural de la vía, elemento que más influye en los costos de mantenimiento de la ferrovía debido a que su revisión y reparación tienen rendimiento bajo y se necesita de mucha mano de obra. Es el elemento más numeroso en las ferrovías, en separaciones al eje de 60 cm habrá 6666 sujeciones por kilómetro de vía doble. El fallo de dicho elemento puede significar una catástrofe.

Las sujeciones tienen la función de conservar el ancho de la vía y de transmitir los esfuerzos del carril a la traviesa. Este sistema debe contar con una resistencia vertical adecuada y especialmente cuando va sobre traviesas de concreto armado cuyo peso es hasta tres veces mayor que las de madera.

Evitan el vuelco del carril y el desplazamiento longitudinal sobre la traviesa. Además, cumple con la tarea de aislar la electricidad que recorre por el carril con respecto al resto del emparrillado.

Una sujeción está constituida por elementos de anclaje a la traviesa, placa de asiento, anclajes de la placa, anclaje a la placa, anclaje del carril, elásticos aislantes y elásticos de guía del carril.

Según su disposición se pueden clasificar en:

- Sujeciones directas.
- Sujeciones indirectas (carril unido a la placa de asiento y la placa de asiento a la traviesa).
- Sujeciones mixtas.

Según su naturaleza:

- Sujeciones rígidas.
- Sujeciones elásticas (sujeción indirecta).
- Sujeciones doblemente elásticas.

Según el tipo de fijación:

- Sujeciones rígidas clásicas.
- Clavos elásticos.
- Sujeciones elásticas de lámina o grapa.
- Sujeciones elásticas de clip.
- Sujeciones de apoyo, con el carril flotante.

Actualmente para reducir ruidos y vibraciones se emplean las sujeciones elásticas y de preferencia de clip. Comúnmente conocidas como *fit and forget* cuya principal ventaja es la no necesidad de mantenimiento. (p.227-233)

- Placas de asiento

López, Andrés (2006) explica que, “para evitar el deterioro de la traviesa por acción del contacto con el carril de acero, se sitúa una placa de asiento que a su vez aumenta el área de transmisión de esfuerzos del carril al durmiente”. (p.44)

Melis y González (2008) la describen como el elemento de amortiguación elástico que neutraliza las vibraciones. Distribuye cargas sobre las traviesas producto del hundimiento del carril al contacto con la rueda.

Su principal función es reducir la presión transmitida por el carril a la traviesa de madera y así proteger a las traviesas de los efectos producidos por el carril. Para el caso de las traviesas de hormigón las placas de asiento proporcionan mayor elasticidad vertical a la vía y reduce los efectos dinámicos de los vehículos sobre la vía. (p.233-234)

b. La vía en placa

González y Fuentes (2010) mencionan que, “nacida con el impulso de las vías de alta velocidad, su aplicación ha sido destinada a los túneles en respuesta al alto costo de mantenimiento de las vías de balasto”. (p.59)

Lichtberger, Bernhard (2011) explica que, en la vía en placa, como se muestra en la Figura 10, se sustituye el balasto por elementos como el concreto o el asfalto que

tienen deformaciones plásticas muy bajas y que debido a su rigidez se requieren placas de asiento elásticas entre el carril y la traviesa y las siguientes exigencias:

- Plataforma libre de asentamientos.
- Precisión en acabado y en dureza de las capas portantes superiores.
- Precisión en acabado y resistencia de capas inferiores de material suelto.

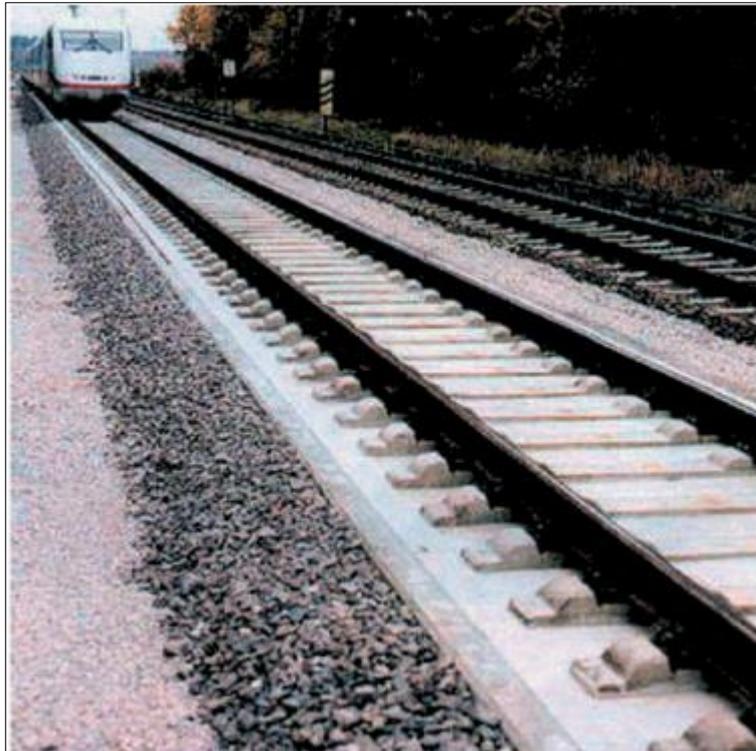


Figura 10: Vía en placa años 60

Fuente: "Ingeniería ferroviaria" por González y Fuentes (2010, p.46)

Ventajas de la vía en placa:

- Bajo costo de conservación.
- Vida útil de 60 años (20 años más que una vía de balasto).
- Trazado más económico que permite el diseño de curvas más cerradas con elevados peraltes (trazados nuevos).
- Casi nulo crecimiento de vegetación.

Desventajas de la vía en placa:

- Por su rigidez es susceptible a agrietarse.
- Baja posibilidad de corrección de las sucesiones ante asentamientos que sedan lo previsto.
- Un defecto solo puede corregirse por una intervención costosa.
- Nula posibilidad de la variación de la geometría a futuro.

- Emisión de mayor ruido que las estructuras de balasto. Aislamiento acústico caro.
- El reparo de cualquier daño genera la suspensión total del servicio por tiempos prolongados. (p.301-307)

### c. Aparatos de vía

Melis y González (2008) explican que, para el máximo aprovechamiento de los ferrocarriles, se hacen necesarios dispositivos de unión y de intersección. Los enlaces entre trayectos se realizan por medio de los desvíos y las travesías; los primeros permiten bifurcaciones o trifurcaciones y los segundos, los cruces de dos rutas.

Así mismo, como se ve en la Figura 11, para cumplir con el propósito, se vuelve necesario el uso de los cambios y los cruzamientos.

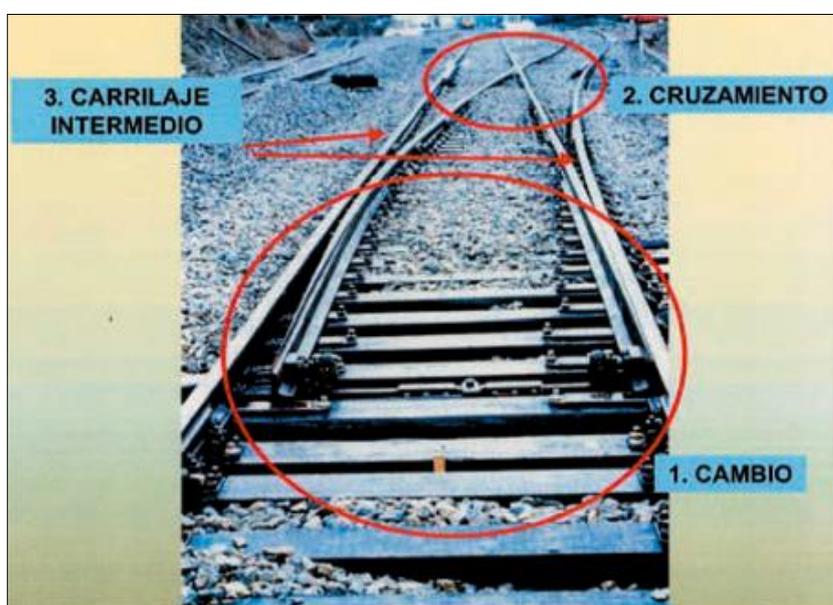


Figura 11: Aparatos de vía  
Fuente: "Ingeniería ferroviaria" por González y Fuentes (2010, p.80)

### - Cambios de vía

Como se visualiza en la Figura 12, permite la continuidad al cambiar de una ruta a otra sin interrumpir la marcha. En el cambio de vías, se reconocen a la rama principal, que está dentro del trayecto principal, y a la rama desviada.

La vía principal debe garantizar la desviación sin la disminución de la velocidad y el radio de la curva del desvío debe ser el suficiente para los vehículos más exigentes.

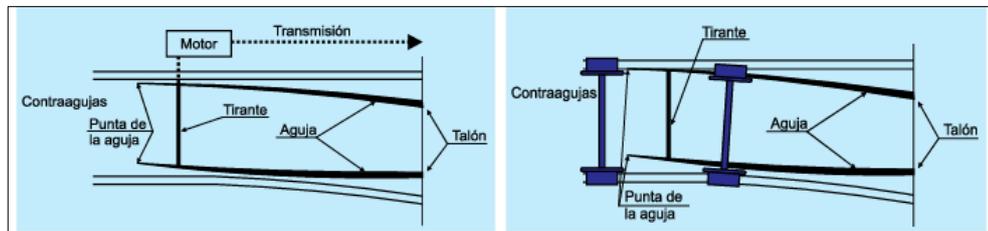


Figura 12: Esquema y detalle de paso por cambio  
Fuente: “Ingeniería ferroviaria” por González y Fuentes (2010, p.80)

De proceso de construcción delicado y de mayor complejidad que el emparrillado, sus defectos en el montaje generan sobreesfuerzos dinámicos produciendo fallas en la geometría y mayor desgaste. Razón por la cual su costo de instalación es hasta 4 veces más que la de 1 kilómetro lineal de vía.

#### - Cruzamientos

Intersección de dos líneas. Cruce de dos vías férreas en el mismo nivel, en el cual el tren no cambia su dirección. (p.234-239)

En la Figura 13 se esquematiza un cruzamiento a nivel y sus elementos necesarios.

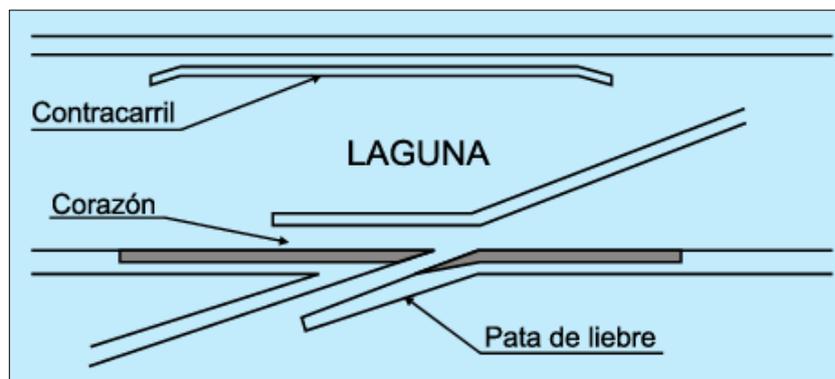


Figura 13: Esquema de cruzamiento  
Fuente: “Ingeniería ferroviaria” por González y Fuentes (2010, p.84)

#### d. El ancho de vía

López, Andrés (2006) define el ancho como la distancia entre las caras internas de los carriles, medida desde 14 mm debajo de la superficie de contacto entre la rueda y

el carril. Fijándose en 1435 mm el ancho estándar internacional, sin que esto signifique no poder usar alguno otro ancho en particular como se muestra en la Figura 14 donde se muestra también el ancho español.

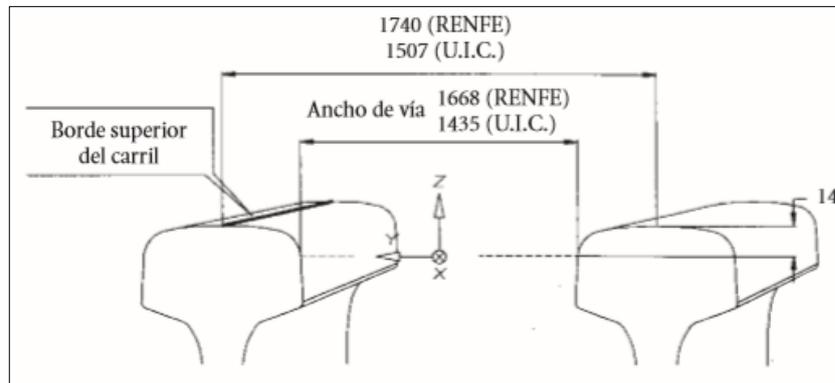


Figura 14: Ancho de vía estándar  
Fuente: “Infraestructuras Ferroviarias” por López, Andrés (2006, p.146)

Estas líneas férreas no están restringidas a la construcción de un solo carril, existiendo las vías de doble carril. Para dicho efecto, como está esquematizado en la Figura 15, la distancia transversal que ésta ocuparía deberá ser mayor a los 13 metros y contará con una entrevía, definida como la distancia entre los ejes de las vías que oscilará entre los 3.5 y los 5.0 metros y dependerá de la velocidad y las dimensiones de la máquina. (p.41)

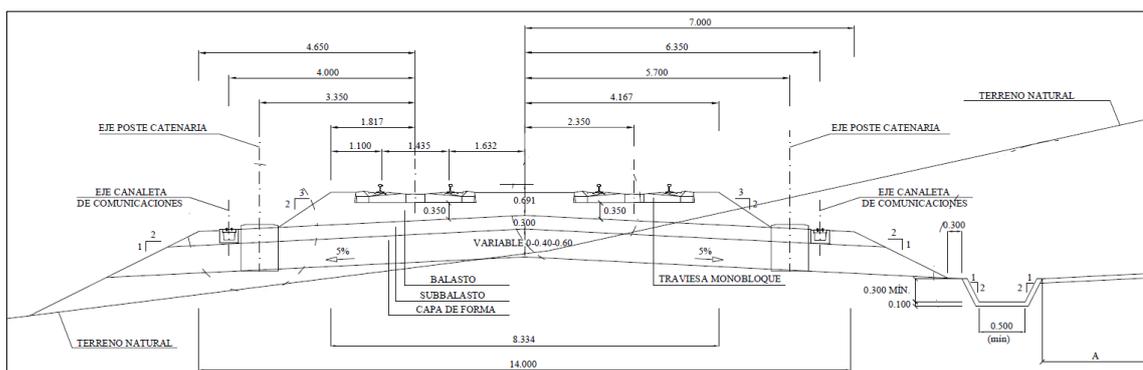


Figura 15: Esquema de ancho de una vía doble.  
Fuente: Renfe (2011)

Para el caso peruano, conjuntamente con el ancho internacional, también se adopta el ancho de trocha angosta de 914 mm, previa autorización de la entidad competente, y para la cual existe la directiva Estándares Mínimos de Seguridad para Vías Férreas de Trocha de 914 Milímetros del MTC (2007).

Otros anchos de uso común se muestran en la Tabla 5.

Tabla 5: Anchos de vía habituales a nivel internacional

Denominación	Ancho (mm)	Países
Vía Decauville	700	Argentina, Dinamarca, Indonesia, Países Bajos, España
Ancho Bosnio	760	Austria, Países de la ex Yugoslavia
	1000	Bélgica, Francia, Grecia, Austria, Polonia, Suiza, España
Ancho Ciudad del Cabo	1067	Sudáfrica
Ancho Ruso	1520 / 1524	Países de la ex Unión Soviética, Finlandia
Ancho Irlandés	1600	Irlanda, Brasil, Australia
Ancho Indio	1676	India, Pakistán, Irán, Chile, Argentina
Ancho Ibérico	1668 / 1674	Portugal, España

Fuente: Manual de vía por Lichtberger, Bernhard (2011, p.28)

### 2.4.3 Geometría y trazado de la vía férrea

Togno, Francisco (1982) considera al diseño geométrico como “un capítulo donde se enseña el material geométrico disponible, teniendo previos conocimientos sobre la dinámica de los trenes y costos. Donde se emplee la mayor cantidad de líneas rectas con pendientes muy pequeñas y ligadas por curvas de grandes radios”. (p.53)

Melis y González (2008) definen el trazado como una sucesión de rectas unidas por curvas, con valores máximos de pendientes de rampas y valores mínimos de radios. Diseñada en función a la topografía, al propósito y a la velocidad, se idealiza al trazado como rectas lo más horizontales posible y pendientes muy pequeña entre las cotas de partida y llegada. (p.271)

Lichtberger, Bernhard (2011) dice que la geometría debe permitir que el ferrocarril al transitar por la vía a una velocidad nominal/máxima, la componente transversal de la fuerza de la gravedad, el vehículo y la componente inercial se mantengan en equilibrio reduciendo las aceleraciones percibidas por el usuario para su confort/seguridad. (p.25)

#### a. Curvas circulares

Togno, Francisco (1982) basa el cálculo y el trazado de las curvas en relación a una cuerda o arco de 20 metros de longitud que, por ser curvas de gran radio, las diferencias entre ellos son mínimas y se asume que tienen el mismo valor, y su denominación de acuerdo al ángulo de dicho arco.

Explica que en un círculo de arco de 20 m y ángulo de 1°, el perímetro de la circunferencia será 7200 m y el radio 1145.92 m, mediante la expresión:

$$R = \frac{P}{2 \times \pi} \quad (1)$$

Donde:

R: radio (m).

P: perímetro (m).

Luego obteniendo la siguiente relación:

$$R = \frac{1145.92}{d} \quad (2)$$

Donde:

R: radio (m).

d: ángulo del arco (°).

Y en el que se identifican sus partes según la Figura 16:

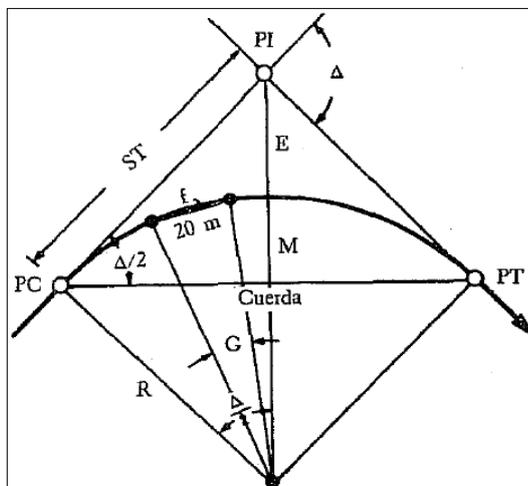


Figura 16: Partes de una curva circular  
Fuente: "Ferrocarriles" por Togno, Francisco (1982, p.53)

De la figura se desprende:

PC: principio de la curva.

PT: principio de tangente.

PI: punto de inflexión.

ST: subtangentes.

$$ST = R \times \tan \frac{\Delta}{2}$$

$$R = \frac{10}{\sin \frac{\Delta}{2}} = ST \times \cot \frac{\Delta}{2} \quad (3)$$

Cuerda:

$$\text{Cuerda} = 2 \times R \times \sin \frac{\Delta}{2} \quad (4)$$

E: externa.

$$E = R \times \text{exsec} \frac{\Delta}{2} \quad (5)$$

M: ordenada media (flecha).

$$M = R \times \text{versen} \frac{\Delta}{2} \quad (6)$$

L: longitud de la curva (m).

$$L = \frac{\Delta}{G} \times 20 \quad (7) \quad (\text{p.52-54})$$

Lichtberger, Bernhard (2011) “propone emplear una cuerda de 30.48 m equivalente a 100 pies, medida utilizada por las instituciones estadounidenses”. (p.26)

López, Andrés (2006) “relaciona el radio de la curva con la velocidad mediante la expresión:

$$V = 4.5 \times \sqrt{R} \quad (8)$$

Entonces, se puede interpretar que para cada velocidad existirá un radio de curva determinado”. (p.34)

Donde:

V: velocidad (km/h).

R: radio circular (m).

Togno, Francisco (1982) da otras relaciones:

- Velocidad de equilibrio:  $V = 3 \times \sqrt{R}$
- Velocidad máxima norma alemana:  $V = 4.5 \times \sqrt{R}$
- Velocidad máxima SNCF:  $V = 5 \times \sqrt{R}$
- Velocidad de confort EEUU:  $V = 3.8 \times \sqrt{R}$
- Velocidad máxima norma inglesa:  $V = 4 \times \sqrt{R}$
- Velocidad de volcamiento:  $V = 8 \times \sqrt{R}$  (p.59)

Melis y González (2008) consideran que, parte importante en el trazado de redes ferroviarias se centra en la alineación de curvas y sus radios propuestos y las reacciones de la interacción del vehículo a velocidad con la vía. De todos modos, el ferrocarril, al salir de una recta, ingresa a una curva circular e inmediatamente aparece la fuerza centrífuga:

$$F_c = \frac{m \times v^2}{R} \quad (9)$$

Y la aceleración centrífuga:

$$a_c = \frac{v^2}{R} \quad (10)$$

Donde:

F<sub>c</sub>: fuerza centrífuga (N).

m: masa (kg).

v: velocidad (m/s).

R: radio de la curva (m).

a<sub>c</sub>: aceleración centrífuga (m/s<sup>2</sup>). (p.273-274)

López, Andrés (2006) también menciona que, “según la Tabla 6, la máxima aceleración centrífuga aceptada por el usuario es 1 m/s<sup>2</sup> y excepcionalmente 1.5 m/s<sup>2</sup>”. (p.114)

Tabla 6: Aceleración transversal soportable por los viajeros en m/s<sup>2</sup>

Nivel de confort	Posición del viajero	
	Sentado	Parado
Muy Bueno	1,00	0,85
Bueno	1,20	1,00
Aceptable	1,40	1,20
Excepcionalmente	1,50	1,40

Fuente: Infraestructuras ferroviarias por López, Andrés (2006, p.114)

Sin embargo, empleando la relación entre el radio de curva y la velocidad de la fórmula (8), para una velocidad v=100 km/h (27.78 m/s), se obtendrían un radio R=500 m y, de la fórmula (10), se obtendría una aceleración centrífuga a<sub>c</sub>=1.54 m/s<sup>2</sup>. Ubicándose el resultado por fuera del límite máximo excepcional. De igual modo, no todos los trenes transitarán con la misma velocidad y el trazado está sujeto a las condiciones que puedan ofrecer la ciudad o el área donde se desea construir, entonces bajo esta premisa, la

expresión citada por López deja de aplicarse. Luego, si por determinadas condiciones, se deben aceptar los siguientes valores: una velocidad  $v=150$  km/h (41.66 m/s) y un radio de curva  $R=500$  m entonces se obtiene una aceleración centrífuga  $a_c=3.47$  m/s<sup>2</sup> (3.5 veces más que el límite aceptado) que debe reducirse obligatoriamente.

Berardo, Baruzzi, Dapás, Freire, Tartabini y Vanoli (2017) dan “valores que limitan la aceleración centrífuga en curvas, ya no por confort, sino por seguridad, consideran: el volcamiento cuando se pasa de 6.5 m/s<sup>2</sup>, el descarrilamiento si es mayor a 5.9 m/s<sup>2</sup> y el desplazamiento de la vía si se excede los 3.7 m/s<sup>2</sup>”. (p.356)

Este problema se resuelve con el uso de dos elementos: el peralte y la curva de transición.

- El sobreebancho

Debido a la presencia de curvas con radios pequeños y para facilitar la rodadura del *bogie* en la curva, se agrega un ancho complementario o sobreebancho, cuyo valor dependerá de qué tan pequeño sea el radio.

Melis y González (2008) mencionan que “el desarrollo de este elemento será gradual a razón de 1 mm/m”. (p. 188-189)

Berardo et al (2017) agregan que “el ensanche se debe dar en el riel interior”. (p.361)

Lichtberger, Bernhard (2011) muestra la Tabla 7 para el sobreebancho correspondiente para determinado radio de curva. (p.29)

Tabla 7: Sobreebancho de vía en curvas

Rango de radios (m)	Sobreebancho (mm)
$150 \leq R < 200$	10
$120 \leq R < 150$	15
$R < 120$	20

Fuente: “Manual de vía” por Lichtberger, Bernhard (2011, p.29)

- El peralte

Melis y González (2008) describen que, en un plano horizontal, la fuerza centrífuga empujaría al ferrocarril hacia afuera y los carriles recibirían cargas desiguales. Posteriormente, la excesiva carga recibida por el carril exterior podría desencadenar en el descarrilamiento.

Para reducir el efecto de la acción de la fuerza centrífuga, a la curva se le proporciona de cierta elevación llamado peralte y definido como el desnivel “z” entre las cabezas de los carriles medidos sobre la horizontal de la sección transversal.

El peralte teórico, debe equilibrar totalmente a la fuerza centrífuga y la resultante de ésta con el peso deberá ser normal al plano inclinado de la vía, tal como se muestra en la Figura 17. (p.274-275)

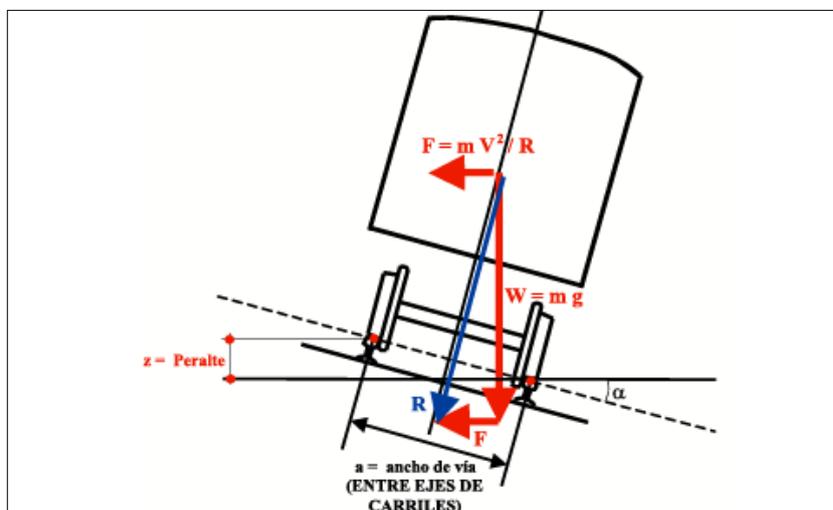


Figura 17: Peralte  
Fuente: “Ingeniería ferroviaria” por González y Fuentes (2010, p.90)

De la Figura 17 se deduce que:

$$\tan \alpha = \frac{F_c}{P} = \frac{m \frac{v^2}{R}}{m \times g} = \frac{v^2}{g \times R} \quad (11)$$

Además:

$$\sin \alpha = \frac{z}{a} \quad \text{y} \quad \tan \alpha = \frac{z}{\sqrt{a^2 - z^2}}$$

Donde:

$\alpha$ : ángulo de inclinación del peralte (°).

P: peso del ferrocarril (N).

- z: altura del peralte (m).
- a: distancia entre ejes de los rieles (m).
- m: masa (kg)
- v: velocidad (m/s)

De las fórmulas dadas, se calcula el peralte:

$$\frac{v^2}{g \times R} = \frac{z}{\sqrt{a^2 - z^2}} \quad \rightarrow \quad z = \frac{a \times v^2}{\sqrt{g^2 \times R^2 + v^4}}$$

Melis y González (2008) refieren que todavía se usa la ecuación simplificada en la que, por ser  $\alpha$  un ángulo pequeño, el  $\text{sen}\alpha = \text{tan}\alpha$ :

$$\frac{v^2}{g \times R} = \frac{z}{a} \quad \rightarrow \quad z = \frac{a \times v^2}{g \times R} \quad (12)$$

Donde:

- v: velocidad (m/s).
- g: aceleración de la gravedad ( $\text{m/s}^2$ ).
- R: radio de la curva circular (m).
- z: altura de peralte (m).
- a: distancia entre ejes de los rieles (m). (p.276)

López, Andrés (2006) explica la existencia de tres argumentos para limitar su elevación: la dificultad de los pasajeros para trasladarse dentro del ferrocarril, la dificultad para arrancar en caso de detención y la inestabilidad del talud del balasto, situando la altura del peralte entre 160 y 200 mm. (p.113)

Melis y González (2008) así también, mencionan que la realidad nos dice que por una misma vía circulan trenes a diferentes velocidades, dependiendo del servicio ofrecido, y el peralte siempre será el mismo. Lo que originará que el tren que transita a mayor o menor velocidad para el cual fue construido el peralte se vea descompensado en la distribución de sus fuerzas. Además, el peralte de las vías férreas no suele superar el 10% del ancho de la vía.

Ante esta problemática se opta por la ejecución de un peralte intermedio que hará sufrir al vehículo de mayor velocidad una aceleración hacia afuera y al lento, una

aceleración hacia adentro. Mejor dicho, se generan aceleraciones sin compensar. (p.274-296)

González y Fuentes (2010) limitan la altura del peralte intermedio al rango de “1/9 a 1/12 del ancho de la trocha o de 0.16 m a 0.18 m”. (p.91)

Entonces, ante lo expuesto, se darán dos situaciones: la insuficiencia de peralte y el exceso de peralte.

- Aceleración sin compensar

Como se mencionó anteriormente, la presencia de ferrocarriles rápidos y lentos en una misma vía evidencia el principal problema del peralte que, debido a que está fijo e inamovible, no logra equilibrar a la fuerza centrífuga de todos.

La aceleración sin compensar está ligada a la insuficiencia y/o al exceso de peralte, como se visualiza en la Figura 18.

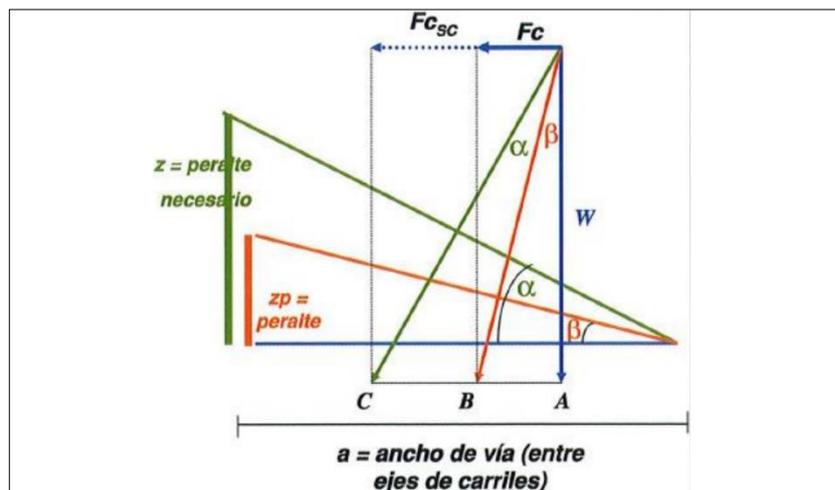


Figura 18: Aceleración no compensada  
Fuente: “Ferrocarriles metropolitanos” por Melis y González (2008, p.274)

De la Figura 18 se desprende:

$$F_{cnc} = \overline{BC} = \overline{AC} - \overline{AB} = P \times \tan \alpha - P \times \tan \beta$$

Donde:

$F_{cnc}$ : fuerza centrífuga no compensada (N).

BC: fuerza centrífuga no compensada (N).

AC: fuerza centrífuga total (N).

AB: fuerza centrífuga compensada por el peralte (N).

P: peso (N).

Descomponiendo, de la figura:

$$F_{cnc} = P \left( \frac{F_c}{P} - \frac{z}{a} \right) = m \times g \left( \frac{m \times v^2}{m \times g \times R} - \frac{z}{a} \right) = m \times g \left( \frac{v^2}{g \times R} - \frac{z}{a} \right) = m \left( \frac{v^2}{R} - \frac{g \times z}{a} \right)$$

Luego, la aceleración centrífuga no compensada:

$$a_{cnc} = \frac{v^2}{R} - \frac{g \times z}{a} \quad (13)$$

Donde:

$a_{cnc}$ : aceleración centrífuga no compensada ( $m/s^2$ ).

v: velocidad (m/s).

R: radio de la curva circular (m).

g: aceleración de la gravedad ( $m/s^2$ ).

z: altura de peralte (m).

a: distancia entre ejes de los rieles (m).

#### • Insuficiencia de peralte

Cuando la altura del peralte no llega a equilibrar a la fuerza centrífuga, existe una insuficiencia de peralte "I" que es la diferencia entre el peralte requerido con el existente.

López, Andrés (2006) expresa la insuficiencia de peralte como:

$$I = z_r - z$$

Donde:

I: insuficiencia de peralte (m).

$z_r$ : altura de peralte requerido para una velocidad v (m).

z: altura de peralte (m). (p.113)

A la Figura 18 se le señala la insuficiencia de peralte, resultando la Figura 19.

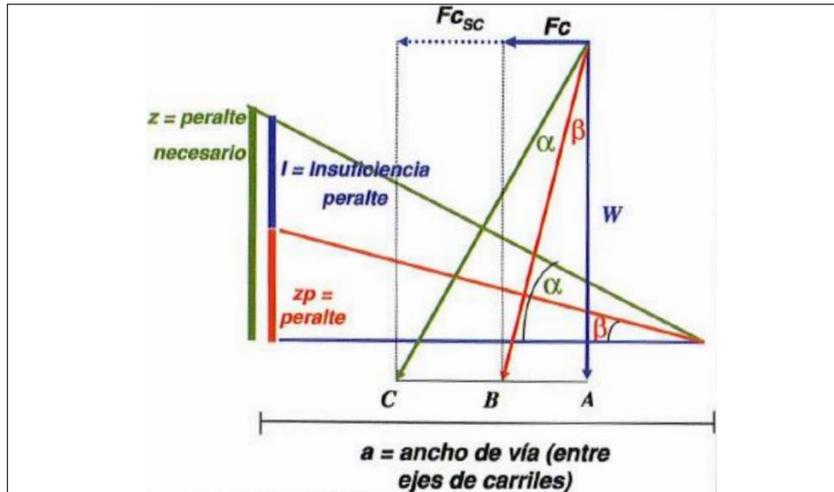


Figura 19: Insuficiencia de peralte  
 Fuente: "Ferrocarriles metropolitanos" por Melis y González (2008, p.275)

Se sabe que:

$$\tan \alpha = \frac{v^2}{g \times R}$$

Además, de la figura y por propiedad del ángulo pequeño:

$$\sin \alpha \approx \tan \alpha = \frac{z+I}{a}$$

Igualando:

$$\frac{z+I}{a} = \frac{v^2}{g \times R} \quad \rightarrow \quad I = \frac{a \times v^2}{g \times R} - z$$

Multiplicando por la gravedad y dividiendo entre la suma del ancho de la trocha más el ancho de la cabeza de un carril:

$$\frac{I \times g}{a} = \frac{v^2}{R} - \frac{g \times z}{a} = a_{cnc}$$

Entonces la insuficiencia de peralte se expresa:

$$I = a_{cnc} \times \frac{a}{g} \tag{14}$$

Donde:

$I$ : insuficiencia de peralte (m).

$a_{cnc}$ : aceleración centrífuga no compensada ( $m/s^2$ ).

$a$ : distancia entre ejes de los rieles (m).

$g$ : aceleración de la gravedad ( $m/s^2$ ).

- Exceso de peralte

De mismo modo que el punto anterior, existe un exceso de peralte “E” que es la diferencia entre el peralte existente con el requerido como se muestra en la Figura 20.

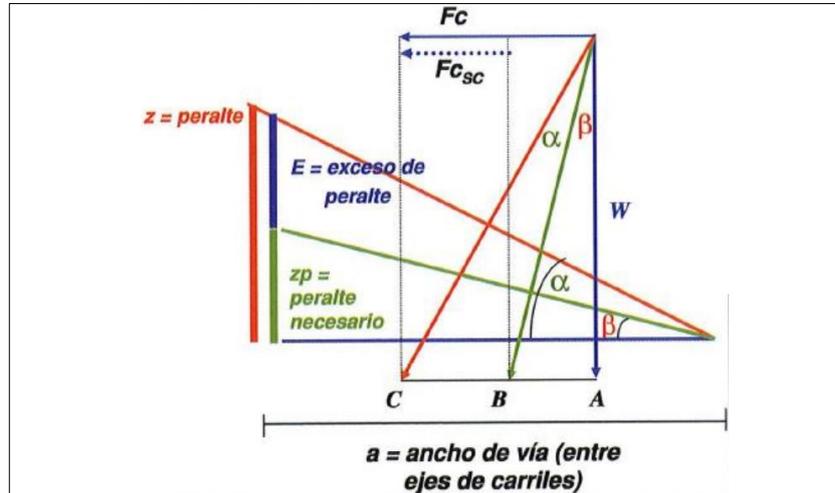


Figura 20: Exceso de peralte

Fuente: “Ferrocarriles metropolitanos” por Melis y González (2008, p.276)

Siguiendo el mismo procedimiento para el caso de insuficiencia de peralte, obtenemos:

$$\frac{z-E}{a} = \frac{v^2}{g \times R} \quad \rightarrow \quad -E = \frac{a \times v^2}{g \times R} - z$$

Entonces el exceso de peralte se expresa:

$$E = a_{cnc} \times \frac{a}{g} \quad (15)$$

Donde:

E: exceso de peralte (m).

$a_{cnc}$ : aceleración centrífuga no compensada ( $m/s^2$ ).

a: distancia entre ejes de los rieles (m).

g: aceleración de la gravedad ( $m/s^2$ ).

Melis y González (2008) refieren que “la aceleración transversal no compensada ( $a_{cnc}$ ) se dirige al centro de la curva. También afirman que los trenes lentos transportan mercancías y por ende no requieren de confort ni limitaciones en la aceleración transversal”. (p.280)

Entonces, se entiende que una resultante negativa (-) significa exceso de peralte y una resultante positiva (+), insuficiencia de peralte.

- Aceleración sin compensar en vagones de viajeros

López, Andrés (2006) menciona que la aceleración que percibe el viajero es mayor que las referidas en los puntos previos, que son a nivel de la vía, debido a que la fuerza centrífuga inclina los vagones del ferrocarril hacia afuera en la curva. Entonces, el plano de referencia de la caja inclinada se acerca al paralelo con la horizontal, es como si se hubiese retirado el peralte, tal y como se muestra en la Figura 21. (p.113-114)

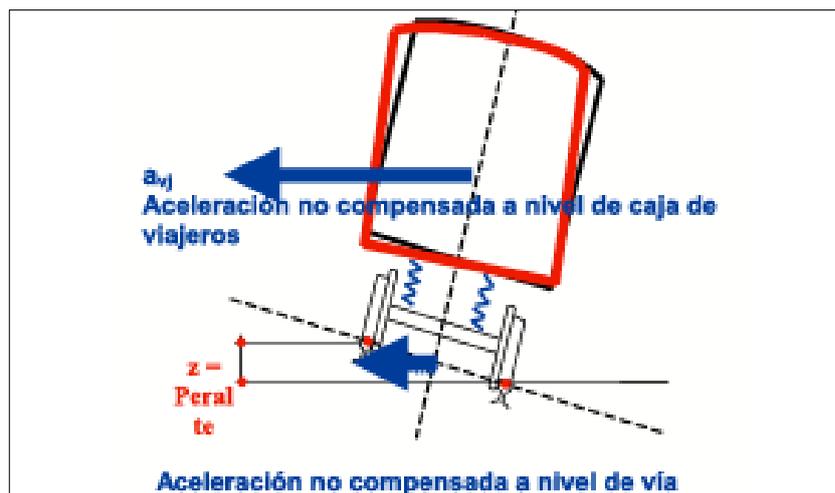


Figura 21: Aceleración no compensada en caja de viajero  
Fuente: Ingeniería ferroviaria por González y Fuentes (2010, p.91)

Melis y González (2008) relacionan ambas aceleraciones por medio de la siguiente ecuación:

$$a_{cvj} = (1 + \sigma) \times a_{cnc} \quad (16)$$

Donde:

$a_{cvj}$ : aceleración transversal del vagón de pasajeros ( $m/s^2$ ).

$\sigma$ : coeficiente de Souplesse o de flexibilidad.

$a_{cnc}$ : aceleración centrífuga no compensada ( $m/s^2$ ).

El coeficiente de Souplesse o de flexibilidad se aplica a los vagones y actualmente oscila entre 0.2 y 0.3 y para vehículos antiguos puede llegar hasta los 0.6. (p.280)

Como consecuencia de lo mostrado en la Figura 21, las administraciones ferroviarias limitan la aceleración soportable por lo viajeros.

Entonces, los valores máximos permitidos para la aceleración centrífuga no compensada se verán afectados reduciéndose en gran medida y por consiguiente también los valores máximos permitidos de la insuficiencia de peralte.

- Limitaciones en la curva para confort del viajero

Melis y González (2008) condicionan a la curva circular a cumplir con:

- Aceleración transversal máxima no compensada de  $0.39 \text{ m/s}^2$ .
- Insuficiencia o exceso de peralte de 60 mm par velocidad de 350 km/h y de 80 mm para velocidad de 220 km/h.
- Aceleración transversal del vagón de pasajeros de  $1 \text{ m/s}^2$  para vías de mala calidad,  $1.2 \text{ m/s}^2$  para vías en buen estado y  $1.5 \text{ m/s}^2$  para excelentes o nuevas. (p.284)

- La curva de transición

López, Andrés (2006) la describe como “una alineación horizontal que busca mejorar la respuesta a los efectos causados por la súbita aparición de la fuerza centrífuga y que también facilita el desarrollo del peralte”. (p.123)

Melis y González (2008) agrega que “son curvas cuyo radio aumenta progresivamente yendo desde el infinito de la recta hasta el radio definitivo de la curva circular y aclara que en la actualidad solo se acepta y se utiliza la clotoide como curva de transición”. (p.284-285)

- La clotoide

También denominada radioide de arcos o espiral de Cornu, su desarrollo enlazará la recta con la curva, como se muestra en la Figura 22.

Su expresión está dada por:

$$\rho \times s = A^2 \quad (17)$$

Donde:

$\rho$ : radio de la curvatura (m).

s: longitud del arco (m)

A: constante de la espiral (m).

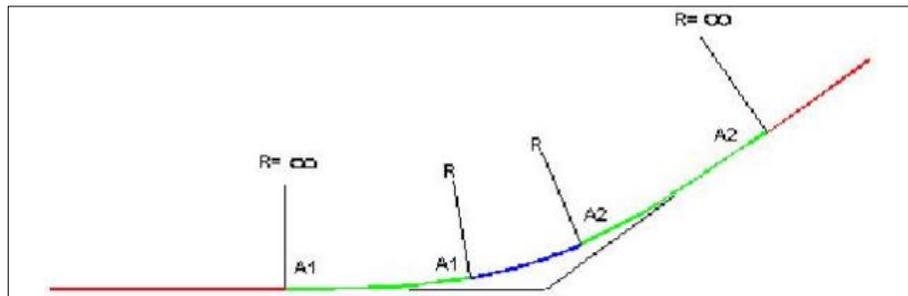


Figura 22: La clotoide

Fuente: “Manual de diseño geométrico vial” (tomo II) por Berardo et al (2017, p.376)

Melis y González (2008) refieren que, “antes de las calculadoras, para el cálculo de la curva de transición (no clotoide) se empleaba la ecuación de la parábola cúbica de Nordling:

$$Y = \frac{X^3}{6 \times C} \quad (18)$$

Donde:

C: constante de multiplicar pxs”. (p.285-286)

- Disposición de la curva de transición

Melis y González (2008) explican que, debido a su uso obligatorio, la curva circular se desplazará sobre el eje Y originando que su radio deje de ser tangente con la recta. La clotoide se desarrolla partiendo de la recta hasta alcanzar a la curva circular haciendo tangencia. La distancia que se desplaza la curva circular se llama retranqueo.

Mencionan la existen 4 métodos para la disposición de la clotoide o de la curva de transición, siendo el utilizado por excelencia el método de centro conservado:

1. M. Centro conservado.
2. M. Radio conservado.
3. M. Centro y radio no conservados.
4. M. Centro y radio conservados.

La Figura 23 esquematiza los cuatro métodos:

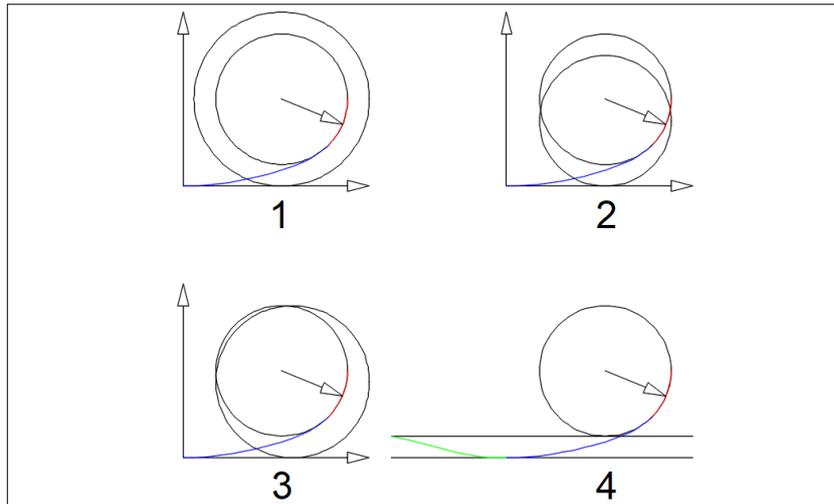


Figura 23: Métodos para la disposición de la clotoide  
 Fuente: “Ferrocarriles metropolitanos” por Melis y González (2008, p.288)

Entonces para el desarrollo del primer caso, se procede de acuerdo a la Figura 24:

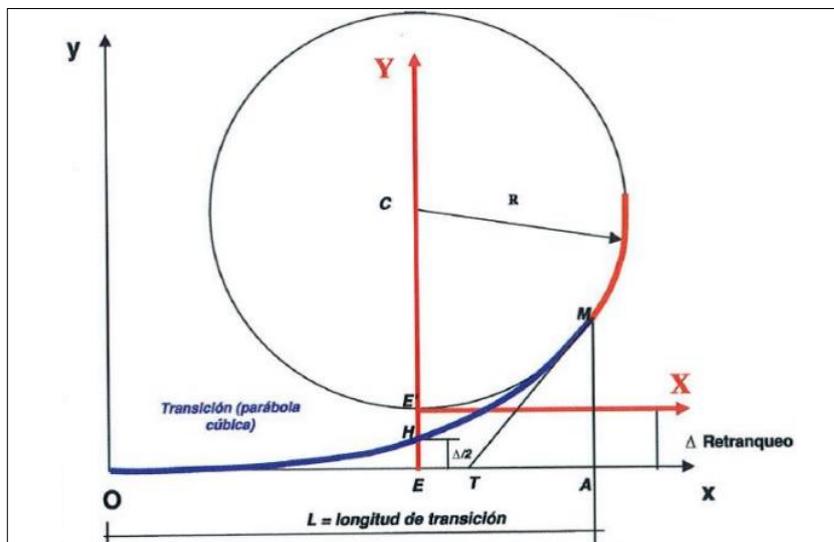


Figura 24: Desarrollo de la clotoide  
 Fuente: “Ingeniería ferroviaria” por González y Fuentes (2010, p.94)

Se muestran dos ejes, uno negro para x-y para la curva de transición y uno rojo Y-X para la curva circular desplazada. La curva de transición está expresada con la ecuación de Nordling y la curva circular con la ecuación de la circunferencia:

$$X^2+(Y-R)^2=R^2 \quad \rightarrow \quad X^2+Y^2=2YR$$

Evaluando en el punto M de tangencia, dentro del eje rojo, Y2 es un valor pequeño en comparación con los demás:

$$X^2=2YR \quad \rightarrow \quad Y=\frac{X^2}{2R}$$

Derivando las ecuaciones del círculo y de curva de transición:

$$\begin{aligned} Y &= \frac{X^2}{2R} & \rightarrow & & Y' &= \frac{X}{R} & \rightarrow & & Y'' &= \frac{1}{R} \\ y &= \frac{x^3}{6C} & \rightarrow & & y' &= \frac{x^2}{2C} & \rightarrow & & y'' &= \frac{x}{C} \end{aligned}$$

1. En el mismo punto de evaluación, haciendo  $x_M$  igual a la longitud  $L_T$  de la transición, igualan los radios:

$$Y''_M = y''_M \quad \rightarrow \quad \frac{1}{R} = \frac{x_M}{C} \quad \rightarrow \quad C = L_T \times R \quad (19)$$

2. Considerando  $X_M$  igual a EA y  $x_M$  igual a  $L_T$ , igualan las tangentes:

$$Y'_M = y'_M \quad \rightarrow \quad \frac{X_M}{R} = \frac{x_M^2}{2C} \quad \rightarrow \quad \frac{EA}{R} = \frac{L_T^2}{2L_T R}$$

Así mismo, indican que OA es igual a EA:

$$OA = EA = \frac{L_T}{2} \quad (20)$$

3. El retranqueo EE' lo obtienen de igualar las ordenadas:

$$\begin{aligned} Y_M = y_M & \rightarrow \quad \frac{X_M^2}{2R} + EE' = \frac{x_M^3}{6C} & \rightarrow & & \frac{OA^2}{2R} + EE' &= \frac{L_T^3}{6L_T R} \\ & & & & EE' &= \frac{L_T^2}{6R} - \frac{L_T^2}{2R} = \frac{L_T^2}{24R} \end{aligned} \quad (21)$$

4. Finalmente explican que del corte en el punto T por la tangente MT, se crea la sección TA que es igual a la tercera parte de la longitud de la transición.

Donde, para todos los casos:

$L_T$ : longitud de la transición.

$R$ : radio de la curva circular. (p.287-290)

- Peralte en la curva de transición

Dado a que la transición también es una curva, ésta debe estar provista de cierto peralte por los motivos explicados en los puntos anteriores.

López, Andrés (2006) explica que en la práctica se ha adoptado por convención desarrollar el peralte, como se muestra en la Figura 25, desde  $z=0$  en la unión recta - clotoide hasta  $z=\text{máx}$  en la unión clotoide - curva circular, llamada variación lineal del peralte y expresada como:

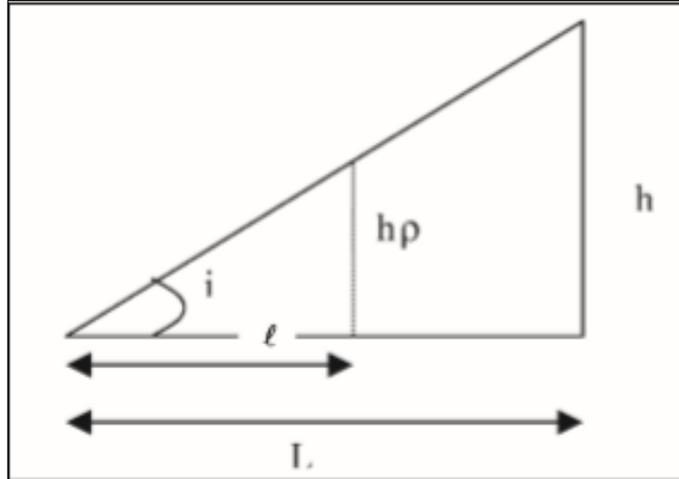


Figura 25: Desarrollo del peralte en la transición  
Fuente: “Infraestructuras Ferroviarias” por López, Andrés (2006, p.124)

$$C = \frac{z}{L_T} \quad (22)$$

Donde:

C: constante para toda la longitud de la transición.

De igual modo existen otras expresiones, como:

- La ecuación de la cosinusoide de Bloss:

$$z_l = \frac{z}{2} \times \left( 1 - \cos \frac{2\pi l}{L_T} \right) \quad (23)$$

- La ecuación de la sinusoide de Klein:

$$z_l = \frac{z}{2} \times \left( \frac{2l}{L_T} - \frac{1}{\pi} \times \sin \frac{2\pi l}{L_T} \right) \quad (24)$$

Donde:

$z_l$ : peralte en función a  $l$  (m).

$l$ : longitud de la transición, de 0 a  $L_T$  (m). (p.123-124)

- Longitud de la curva de transición

En el punto disposición de la curva de transición se propone varias relaciones para la obtención de la longitud de la curva de transición.

López, Andrés (2006), sin embargo, propone aplicar 3 restricciones a considerar al momento de desarrollar dicha longitud:

- Velocidad de subida en la transición

La subida rápida, tal y como se ve en la Figura 26, de la rueda exterior en la curva origina su descarga y aumenta el riesgo a descarrilarse.

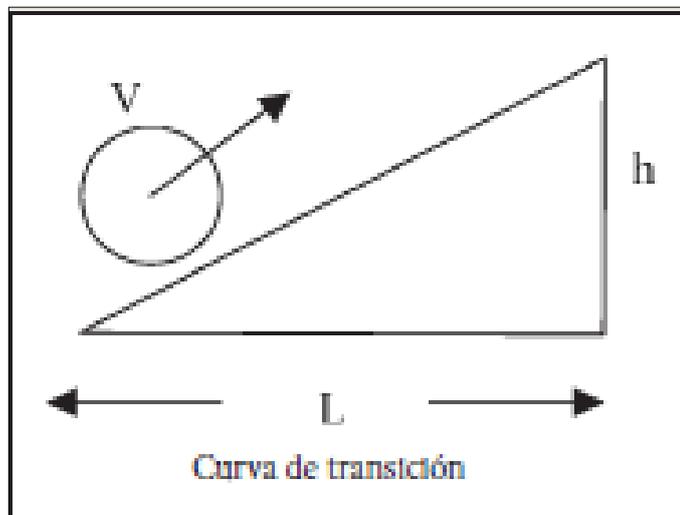


Figura 26: Velocidad de subida en transición  
Fuente: “Infraestructuras Ferroviarias” por López, Andrés (2006, p.124)

Con las siguientes dos relaciones:

$$L_T = v \times t$$

$$z = w \times t$$

Donde:

t: tiempo (s).

w: velocidad de subida de la rueda en la zona de peralte (m/s).

Y del valor de la velocidad en subida de peralte obtenido empíricamente:

$$w = \frac{1}{28.8} \text{ m/s} \quad \text{a} \quad \frac{1}{36.0} \text{ m/s}$$

Se obtiene un valor de longitud de peralte:

$$L_T = 28.8 \times v \times z \quad \text{a} \quad 36.0 \times v \times z \quad (25)$$

Donde:

$L_T$ : longitud de la transición (m).

$v$ : velocidad (m/s).

$z$ : altura de peralte (m).

▸ Rampa de peralte

En función al tipo de vehículo que transitará y a la altura de las pestañas de sus ruedas, y de acuerdo a la Figura 26, se dan las siguientes relaciones:

$$i_r = C = \frac{z}{L_T} \quad \text{e} \quad i_r = \frac{\Delta h}{d}$$

Donde:

$i_r$ : pendiente de la rampa de peralte.

$\Delta h$ : distancia menor a altura de la pestaña de la rueda (0.025 a 0.036 m).

$d$ : distancia del empate de un bogie (2 a 3 m) o distancia entre ejes del vagón (7 a 10 m).

Obteniendo:

$$L_T = z \times \frac{d}{\Delta h} \quad (26)$$

Donde:

$L_T$ : longitud de la transición (m).

$z$ : altura de peralte (m).

▸ Aceleración centrífuga sin compensar respecto al tiempo

Se busca reducir los efectos de la fuerza centrífuga; la aceleración a los valores antes mencionados y a su vez que la variación de la aceleración no compensada respecto al tiempo no exceda los valores expuestos en la Tabla 8:

Tabla 8: Variación de la aceleración centrífuga sin compensar respecto al tiempo

Criterio	Variación (m/s <sup>3</sup> )
Muy Bueno	0,30
Bueno	0,45
Aceptable	0,70
Excepcionalmente	0,85

Fuente: “Infraestructuras ferroviarias” por López, Andrés (2006, p.125)

La expresión para la variación de la aceleración centrífuga no compensada  $\psi_c$  está dada por:

$$\psi_c = \frac{v^3}{R \times L_T} - \frac{g \times z \times v}{a \times L_T}$$

El valor del segundo término, teniendo en cuenta que tiende a ser pequeño, se desprecia, quedando:

$$\psi_c = \frac{v^3}{R \times L_T}$$

Del cuadro se sabe que el valor de  $\psi_c$  está en el rango de 0.3 a 0.8 m/s<sup>3</sup>, entonces la longitud de la transición:

$$L_T = \frac{v^3}{(0.3 \text{ a } 0.8) \times R} \quad (27)$$

Donde:

$L_T$ : longitud de la transición (m).

$v$ : velocidad (m/s).

$R$ : radio de la curva circular (m). (p.124-126)

• Limitaciones de la curva de transición:

▸ Limitación geométrica

Melis y González (2008) explican la aparición del alabeo que, ocurre cuando las 4 ruedas del *bogie* dejan de apoyarse en el mismo plano y éste, para adaptarse, se inclina para lograr el contacto de las ruedas con el carril ocasionando que los ejes no estén paralelos, como se muestra en la Figura 27.

$$\text{Alabeo} = z_{(1+d)} - z_1$$

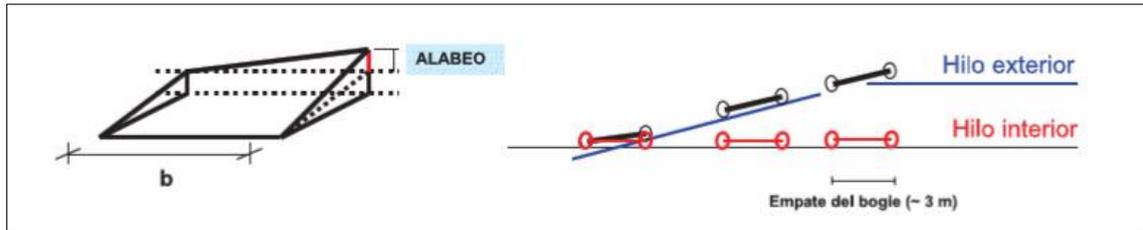


Figura 27: Alabeo de la vía durante la transición del peralte  
 Fuente: “Ferrocarriles metropolitanos” por Melis y González (2008, p.292)

Entonces para evitar grandes esfuerzos en vehículo y vía, se limita la rampa del peralte:

$$\frac{dz}{dL} = \frac{z}{L_T} < 0.5 \text{ a } 2.0 \text{ mm/m} \quad \text{para vías nuevas.} \quad (28)$$

$$\frac{dz}{dL} = \frac{z}{L_T} < 3.0 \text{ mm/m} \quad \text{para vías antiguas.} \quad (29)$$

Donde:

z: altura de peralte (mm).

$L_T$ : longitud de la transición (m). (p.290-291)

López, Andrés (2006) también considera que “esta limitación se debe calcular en función a la velocidad, con la expresión:

$$\frac{C}{V} < 0.78 \text{ a } 1.28 \frac{\text{mm}}{\text{m}} \quad (30)$$

Donde:

C: constante de valor de 100 a 216.

V: velocidad (km/h)”. (p.125)

▸ Limitación dinámica

Melis y González (2008) exponen que “para evitar que la suspensión del ferrocarril sufra un gran impacto, la velocidad de ascenso se ve limitada:

$$\frac{dz}{dt} = \frac{z}{t} < 30 \frac{\text{mm}}{\text{s}} \quad \text{para vías nuevas.} \quad (31)$$

$$\frac{dz}{dt} = \frac{z}{t} < 70 \frac{\text{mm}}{\text{s}} \quad \text{para vías antiguas.} \quad (32)$$

Donde:

z: altura de peralte (mm).

t: tiempo (s).

Excepcionalmente, se puede tolerar hasta 50 mm/s en vías nuevas”. (p.291-292)

▸ Limitaciones por confort

Melis y González (2008) mencionan tres limitaciones por confort:

- Limitación de la aparición de la aceleración no compensada.

$$\frac{da_{nc}}{dt} = \frac{a_{nc}}{t} < 20 \text{ mm/s}^3 \quad (33)$$

Donde:

$a_{nc}$ : aceleración no compensada ( $\text{mm/s}^2$ ).

t: tiempo (s).

- Limitación de la aparición de insuficiencia de peralte.

$$\frac{dI}{dt} = \frac{I}{t} < 30 \text{ mm/s} \quad (34)$$

Donde:

I: insuficiencia de peralte (mm).

t: tiempo (s).

Excepcionalmente, se puede tolerar hasta 50 mm/s en vías nuevas.

- Limitación de la velocidad de giro/angular del plano de vía.

De la Figura 28 se deduce la siguiente expresión:

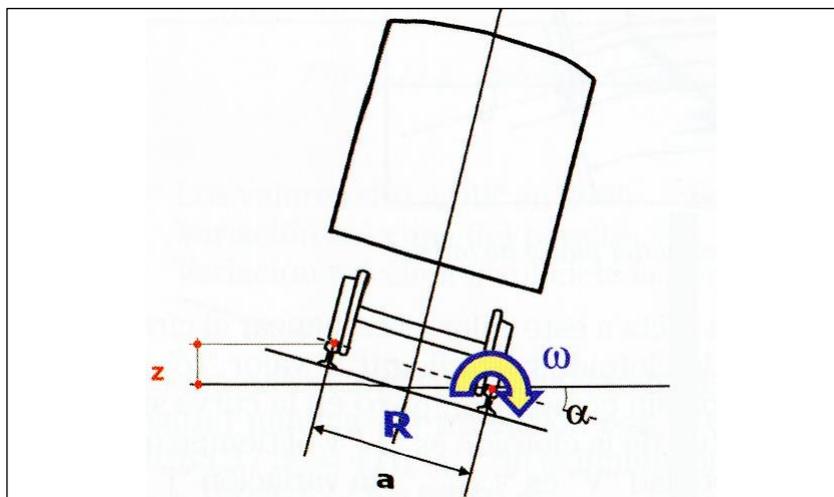


Figura 28: Velocidad del giro del plano de la vía

Fuente: “Ferrocarriles metropolitanos” por Melis y González (2008, p.294)

$$\omega = \frac{\frac{z}{a}}{t} = \frac{\frac{z}{a}}{\frac{v}{L_T}} \quad (35)$$

Donde:

$\omega$ : velocidad angular (rad/s).

z: altura de peralte (m).

a: distancia entre ejes de los rieles (m).

t: tiempo (s).

v: velocidad (m/s).

$L_T$ : longitud de la transición (m).

Se limita este valor hasta 0.020 rad/s y excepcionalmente hasta 0.033 rad/s.

Además, de la expresión (35) se puede obtener la longitud de la transición, sumándose a las mencionadas anteriormente. (p.292-295)

#### - Ferrocarril parado

Melis y González (2008) explican que, con el ferrocarril detenido en una curva, los usuarios no experimentarán mayor variedad de perturbaciones, entonces con una aceleración máxima no compensada de 1.5 m/s<sup>2</sup>, se obtendrá un peralte “z”:

$$a_{cnc} = \left( \frac{v^2}{R} - \frac{g \times z}{a} \right) \times (1 + \sigma) = \left( 0 - \frac{g \times z}{a} \right) \times (1 + \sigma)$$

$$z = \frac{a \times a_{cnc}}{g(1 + \sigma)} \quad (36)$$

Donde:

z: altura de peralte (m).

a: distancia entre ejes de los rieles (m).

$a_{cnc}$ : aceleración centrífuga no compensada (m/s<sup>2</sup>).

g: aceleración de la gravedad (m/s<sup>2</sup>).

$\sigma$ : coeficiente de Souplesse o de flexibilidad.

En cuanto a la marcha, la velocidad es cero y no se evidencian aceleraciones aleatorias, y dependerá de la aceleración no compensada (hasta 1.5 m/s<sup>2</sup>) que se admita, para decidir el peralte máximo:

$$a_{cnc} = \frac{g \times z_{m\acute{a}x}}{a} - \frac{v^2}{R} = \frac{g \times z_{m\acute{a}x}}{a} - 0$$

$$z_{\text{máx}} = \frac{a \times a_{\text{cnc}}}{g} \quad (37)$$

Donde:

$z_{\text{máx}}$ : peralte máximo (m).

$a$ : distancia entre ejes de los rieles (m).

$a_{\text{cnc}}$ : aceleración centrífuga no compensada ( $\text{m/s}^2$ ).

$g$ : aceleración de la gravedad ( $\text{m/s}^2$ ). (p.296)

## b. Acuerdos verticales

López, Andrés (2006) explica el perfil longitudinal como la unión de rectas rasantes y curvas de acuerdo, cuya pendiente máxima teórica de las rectas está limitada por la potencia del motor, la carga transportada, la velocidad, entre otros. Además, sin los factores mencionados, la pendiente puede llegar a un valor de 60‰, pero en la realidad, logran igualar el 20‰ y en casos extremos, el 40‰. (p.122-123)

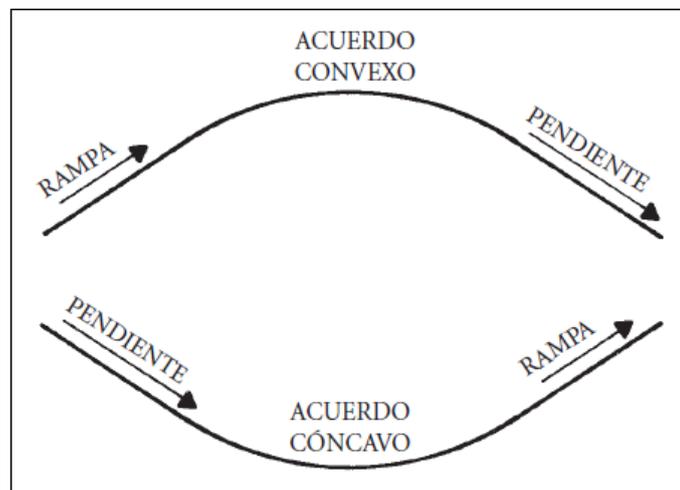


Figura 29: Acuerdos verticales

Fuente: "Infraestructuras ferroviarias" por López, Andrés (2006, p.123)

Melis y González (2008) dicen, de igual modo, cuando entre pendiente continuas existe una diferencia superior al 2.5‰, éstas deberán acoplarse por medio de acuerdos verticales que, ya sean cóncavos o convexos como se muestra en la Figura 29, su importancia se da por:

### ➤ Limitaciones estáticas

Si el ferrocarril viaja a bajas velocidades o se detiene, podrían producirse choque entre vagones.

➤ Limitaciones dinámicas

El cambio de una recta en bajada a una en subida, generará grandes cambios en la velocidad vertical que afectarán al confort del pasajero, movimientos inusuales, sobrecarga en los ejes, gran tensión en los enganches, entre otros. Por ende, se busca, al igual que en las curvas horizontales, limitar estos fenómenos.

En tanto, propone el acuerdo vertical como método de solución. Una curva que une dos rectas, pendiente y rampa, por las tangentes. Curva que en lo ideal tendrá una pendiente “i” constante:

$$i = \frac{d^2 z_v}{dx^2} \quad (38)$$

Donde:

$z_v$ : elevación vertical (m).

$x$ : longitud horizontal (m).

Y ecuación de la curva:

$$z_v = \frac{ix^2}{2}$$

Sin embargo, por una cuestión de simplificación, dicha ecuación se reemplaza por:

$$z_v = \frac{x^2}{2R_v}$$

Donde:

$R_v$ : radio de la parábola o curva de acuerdo vertical (m).

Adicionalmente, matemáticamente, la comprobación del radio de una curvatura en el eje de coordenadas se expresa:

$$R_v = \frac{(1+z_v^2)^{3/2}}{z_v''} \quad (39) \quad (\text{p.297-299})$$

Donde:

$$z_v = \frac{x^2}{2R_v} \quad \rightarrow \quad z_v' = \frac{x}{R_v} \quad \rightarrow \quad z_v'' = \frac{1}{R_v}$$

- Disposición de los acuerdos verticales

Melis y González (2008) mencionan que el análisis de la relación entre el radio, la velocidad y la aceleración vertical es similar al efectuado para las curvas circulares en la fórmula (10), pero precisan que, en el caso de la aceleración vertical, ésta se restringe más que la horizontal.

El círculo/curva de enlace entre pendiente y rampa está en función la longitud  $L_v$  de su arco y el radio  $R_v$ . Además, para el confort del usuario, se admite una aceleración vertical máxima hasta un 4% de la gravedad, es decir:  $0.4 \text{ m/s}^2$ . Por ende, la expresión queda:

$$a_v = \frac{v^2}{R_v} = 0.4 \text{ m/s}^2 \quad (40)$$

Donde:

$a_v$ : aceleración vertical ( $\text{m/s}^2$ ).

$v$ : velocidad ( $\text{m/s}$ ).

$R_v$ : radio del acuerdo vertical ( $\text{m}$ ).

Además, la longitud de la curva está dada por:

$$L_v = \gamma \times R_v$$

Donde:

$L_v$ : longitud del acuerdo vertical ( $\text{m}$ ).

$\gamma$ : diferencia de los ángulos de la pendiente y la rampa ( $i_1 - i_2$ ) (tanto por uno).

Entonces, conocida la velocidad, calculado el radio y conociendo las inclinaciones, la longitud se obtiene mediante:

$$L_v = R_v \times D \quad (41)$$

Donde:

$D$ : diferencia de los ángulos de la pendiente y la rampa ( $i_1 - i_2$ ), como se muestra en la Figura 30 (tanto por uno).

Una consideración final es, evitar acuerdos horizontales y aparatos de vías en el mismo punto/sector donde se proyecten acuerdos verticales porque encarecen la vía. (p.299-300)

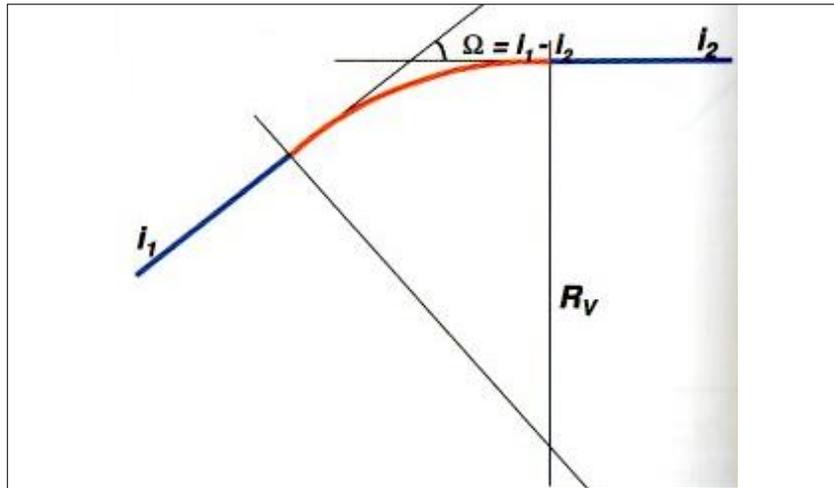


Figura 30: Longitud del acuerdo

Fuente: “Ferrocarriles metropolitanos” por Melis y González (2008, p.300)

#### 2.4.4 Tracción ferroviaria e interacción rueda – carril

Se estudian los esfuerzos necesarios para hacer rodar un tren, las limitaciones del empuje o esfuerzo motor en llanta de la interacción rueda – carril y el movimiento en el frenado.

Melis y Gonzáles (2008) explican que, del esfuerzo motor, indispensable para el arranque, la velocidad y la aceleración, se obtendrá la potencia con la que debe contar el vehículo:

$$\text{Energía}=\text{Trabajo}=\text{Fuerza}\times\text{Distancia} \quad \rightarrow \quad W=F\times L \quad (42)$$

$$\text{Potencia}=\frac{\text{Trabajo}}{\text{Tiempo}}=\frac{\text{Fuerza}\times\text{Distancia}}{\text{Tiempo}} \quad \rightarrow \quad P=F\times v \quad (43)$$

Además, se debe tener especial consideración en los siguientes fundamentos de la física, como la ecuación de Newton:

$$\text{Fuerza}=\text{Masa}\times\text{Aceleración} \quad \rightarrow \quad F=m\times a \quad (44)$$

Cuyo valor de la fuerza, que hará posible el movimiento del vehículo, es también el resultado del esfuerzo en llanta menos la resistencia; resistencia que es la suma de todas las fuerzas que se oponen al movimiento y que dependerá de múltiples factores como la pendiente o gradiente de la recta, las curvas, la velocidad, entre otros:

$$\text{Fuerza}=\text{Esfuerzo}-\text{Resistencia} \quad \rightarrow \quad F=E-R \quad (45)$$

Y esfuerzo de tracción de la máquina que se obtiene mediante la expresión:

$$\text{Esfuerzo} = \frac{\text{Potencia máquina}}{\text{Velocidad}} \rightarrow E = \frac{W}{v} \quad (46)$$

También precisan que, el esfuerzo de tracción no deberá ser mayor que el esfuerzo de adherencia rueda-carril:

$$E < E_{adh} \quad (47)$$

A su vez, el esfuerzo de adherencia será el resultado de multiplicar el peso de los ejes por un coeficiente de rozamiento/adherencia “ $\varphi$ ” que tiene su valor máximo cuando el vehículo está detenido y disminuye a medida que el vehículo aumenta su velocidad:

$$E_{adh} = P \times \varphi \quad (48)$$

De igual modo, el vehículo debe poder retomar marcha así se encuentre detenido en el sector más complicado de la vía.

Además, cabe precisar:

- Durante la marcha, cuando  $E=R$ , el tren se traslada a velocidad constante.
- Si  $E$  es mayor que  $R$ , se genera una aceleración igual a la diferencia  $E-R$  multiplicado por la masa  $M$  y que al aumentar la velocidad  $v$ , si no se aumenta  $E$  entonces  $R$  igualará a  $E$  (primer caso).
- Cuando  $E$  es menor que  $R$  ocurre lo inverso al segundo caso, y el vehículo comienza a desacelerar con  $E-R$  dividida por  $M$ , sin embargo, al disminuir la velocidad, si no disminuye la potencia,  $R$  igualará a  $E$  (primer caso).
- Cuando  $E=0$ , resultará  $F=-R$ , generando una marcha en deriva.
- en el caso del frenado, aparecerá un esfuerzo  $E'$  en dirección opuesta al movimiento que se sumará a  $R$ . (p.331-332)

#### a. Resistencia a la tracción

Resistencia global o conjunto de resistencias específicas, obtenidas de dividir las resistencias globales entre el peso del vehículo. Aparecen en tres situaciones: a velocidad constantes, en la aceleración y en el arranque.

$$R_0 = r_0 \times P \quad (49)$$

Donde:

$R_0$ : resistencia global (kN).

$r_0$ : resistencia específica global en (daN/t).

P: peso del vehículo (t).

Lichtberger, Bernhard (2011) llama a la resistencia específica global como “la suma de todas las resistencias específicas que se oponen al avance o al arranque”. (p.324)

- En velocidad constante

Esta resistencia específica, como esquematiza en la Figura 31, es el resultado de otras resistencias específicas: de rodadura, de rozamiento de las pestañas de la rueda, aerodinámica, en rampas y en curvas.

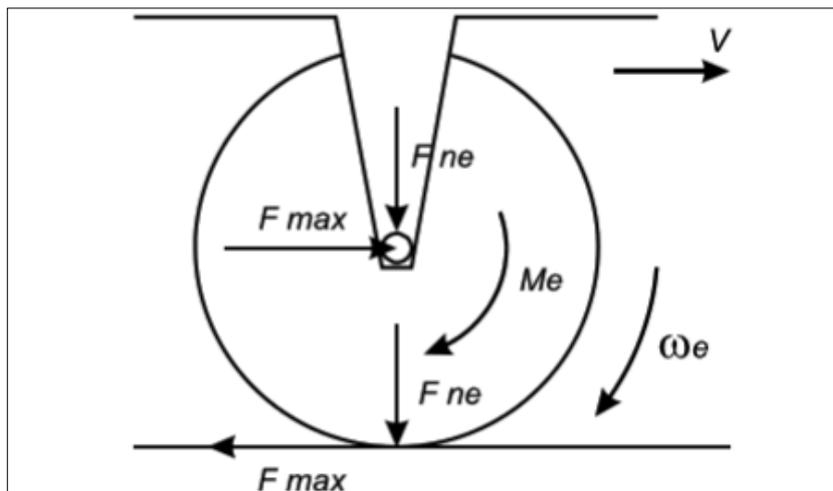


Figura 31: Resistencia a velocidad constante

Fuente: “Ingeniería ferroviaria” por González y Fuentes (2010, p.101)

• En recta y horizontal

Conformado por el grupo de resistencias específicas en la rodadura (contacto rueda-carril), en los rodamientos o caja de grasa, en los choques de la rueda con las juntas de carril, por la flexión del carril y aerodinámica.

▸ Resistencia específica de rodadura

Melis y González (2008) explican esta resistencia específica como el contacto de la rueda con el carril que forma una zona elíptica con dos áreas, que se muestran en

la Figura 32, en las que en la primera (zona de adherencia) se origina el giro de la rueda y en la segunda la rueda patina.

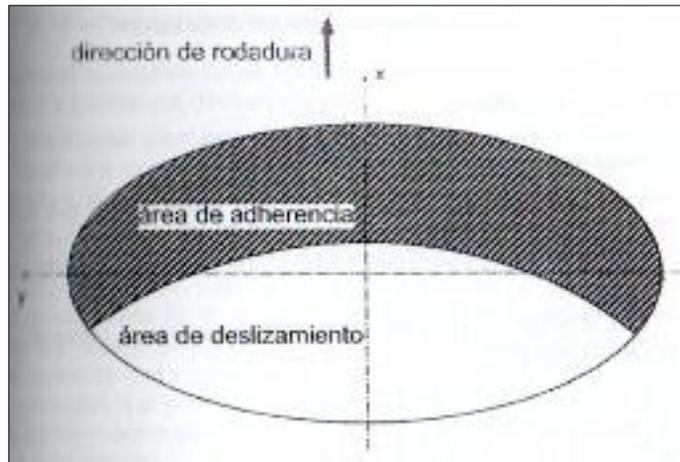


Figura 32: Superficie de contacto rueda – carril  
Fuente: “Manual de vía” por Lichtberger, Bernhard (2011, p.333)

Además, debido al gran peso del vehículo, la rueda se introduce en el carril como se muestra en la Figura 33.

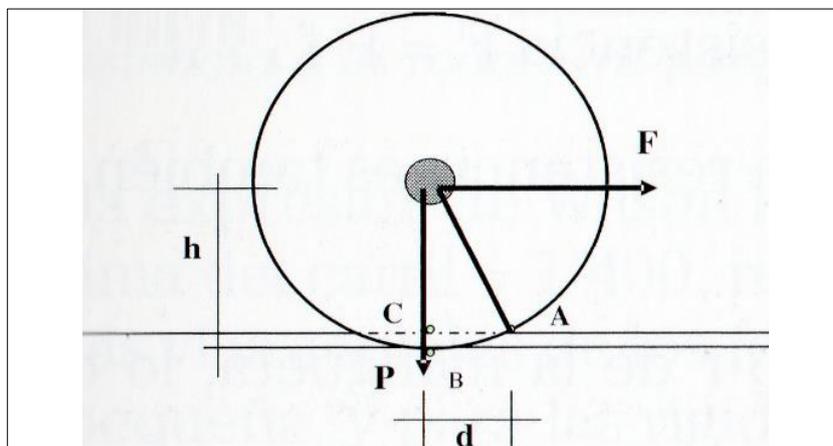


Figura 33: Resistencia de rodadura  
Fuente: “Ferrocarriles metropolitanos” por Melis y González (2008, p.333)

De la Figura 33, haciendo momentos en A obtenemos:

$$P \times d = F \times h$$

Obteniendo el esfuerzo resistente “F”:

$$F = \frac{P \times d}{h} \tag{50}$$

Siendo  $\delta$  un valor muy pequeño, del gráfico se despeja h y d:

$$h = R - \delta \approx R$$

$$d = \sqrt{(\overline{OA}^2 - \overline{OC}^2)} = \sqrt{R^2 - (R - \delta)^2} = \sqrt{2R\delta}$$

Luego, la resistencia específica a la rodadura  $r_1$  se obtiene de, la fórmula de Dupuit, dividir el esfuerzo resistente entre el peso del vehículo:

$$r_1 = \frac{F}{P} = \frac{\sqrt{2R\delta}}{R} = \sqrt{\frac{2\delta}{R}} \quad (51)$$

Donde:

$r_1$ : resistencia específica a la rodadura (daN/t).

$\delta$ : diferencial del radio de la rueda (m).

R: radio de la rueda (m). (p.333-334)

González y Fuentes (2010) mencionan que “su valor máximo se encuentra en el orden de 0.9 daN/t para trenes antiguos y 0.5 daN/t en modernos”. (p.107)

▸ Resistencia específica en rodamiento

Melis y González (2008) dicen que se da por fuera de la rueda, en la mangueta que está en el eje, dentro de la caja de grasa, como se esquematiza en la Figura 34:

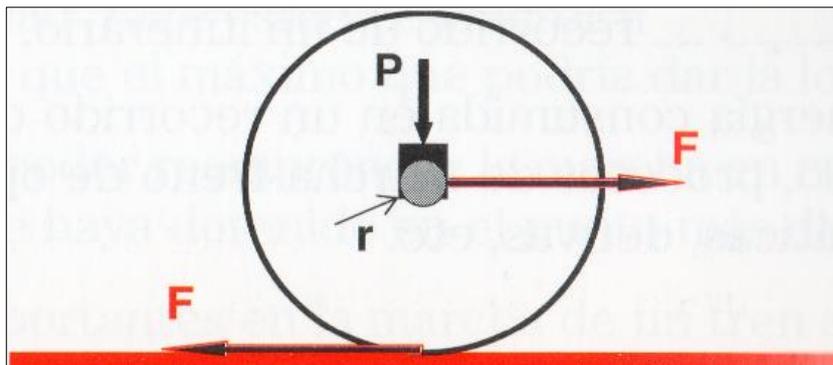


Figura 34: Resistencia en rodamiento  
Fuente: “Ferrocarriles metropolitanos” por Melis y González (2008, p.334)

Entonces, el esfuerzo resistente se obtiene mediante el cálculo del trabajo T producido en el eje y el trabajo T' producido la rueda, en una vuelta:

$$T = P \times f \times 2\pi r \quad (52)$$

$$T' = F \times 2\pi R \quad (53)$$

E igualando:

$$F = \frac{P \times f \times 2\pi r}{2\pi R} = \frac{P \times f \times r}{R} \quad (54)$$

Luego, la resistencia específica en el rodamiento  $r_2$  se obtiene de dividir el esfuerzo resistente entre el peso del vehículo:

$$r_2 = \frac{F}{P} = \frac{f \times r}{R} \quad (55)$$

Donde:

$r_2$ : resistencia específica en rodamiento (daN/t).

$f$ : coeficiente de fricción en la interacción mangueta – rueda.

$r$ : radio de la mangueta (m).

$R$ : radio de la rueda (m).

Se le da un valor normal del orden de 1 daN/t, aunque siempre se debe buscar reducirlas. (p.334-335)

Togno, Francisco (1982) muestra la Tabla 9 con valores para esta resistencia. (p.137)

Tabla 9: Resistencia específica al rodamiento

Equipo		Velocidad (km/h)									
		20	30	40	50	60	70	80	90	100	110
Locomotora de vía ancha (1.435 m)		1.3	1.6	1.9	2.4	3.0	3.7	4.4	5.2	6.1	7.1
Carros – Carga Área 90 p <sup>2</sup> 75 t	cargado	1.3	1.5	1.7	1.9	2.1	2.3	2.6	2.9	3.2	3.5
	vacío	3.2	3.4	3.7	4.0	4.3	4.6	5.1	5.7	6.3	6.9
Góndola 100 t Área 60 p <sup>2</sup>	cargado	0.9	1.1	1.4	1.6	1.8	2.0	2.2	2.4	2.6	2.8
	vacío	3.0	3.2	3.5	3.8	4.2	4.6	5.0	5.5	6.0	6.5
Coches Pollman		1.6	1.7	1.8	2.0	2.1	2.3	2.5	2.7	2.9	3.2

Fuente: “Ferrocarriles” por Togno, Francisco (1982, p.137)

▸ Resistencia específica por deformaciones en juntas de carril

Melis y González (2008) explican que “estas resistencias se dan en vías antiguas, pero con las nuevas tecnologías en longitud y soldadura de los carriles, estas resistencias dejan y deben dejar de ser consideradas”. (p.335)

▸ Resistencia específica por flexión del carril

Melis y González (2008) estiman esta resistencia específica  $r_3$  en 1.25 daN/t, usando el método pendiente-flexión de Wilson:

$$r_3 = 1020 \frac{h}{2d}; \quad \frac{h}{d} = \frac{1}{400} \quad (56)$$

Para vías antiguas, calcularon la máxima inclinación del carril h/d en 1/400, pero para los nuevos carriles este valor es casi despreciable, valores de  $1 \times 10^{-5}$ . (p.335)

▸ Resistencia específica aerodinámica

Melis y González (2008) la describen como la más importante en líneas de alta velocidad, y comprende la resistencia frontal  $r_4$  que se calcula mediante la ecuación de Newton:

$$r_4 = \frac{1}{2} \times \rho \times S \times C_w \times V_r^2 \quad (57)$$

Donde:

$r_4$ : resistencia específica aerodinámica (daN/t).

$\rho$ : densidad del aire ( $\text{kg/m}^3$ ).

S: sección del vehículo ( $\text{m}^2$ ).

$C_w$ : coeficiente de resistencia aerodinámica.

$V_r$ : velocidad relativa (km/h).

Además de existir también la resistencia lateral y la resistencia de cola. (p.336)

Lichtberger, Bernhard (2011) reformula la resistencia frontal y obtiene:

$$r_4 = 0.6361 \times \rho \times S \times C_w \times V_r^2$$

Llegando a:

$$r_4 = k_w \times \left(\frac{V}{10}\right)^2 \quad (58)$$

Donde:

$k_w$ : constante 0.025.

V: velocidad del vehículo (km/h).

Sin embargo, al agregar la resistencia de los lados y la cola, hace uso de la expresión de Strahl:

$$r_4 = 2 + (c_4 + 0.07) \times \left(\frac{V}{10}\right)^2 \quad (59)$$

Donde:

$c_4$ : coeficiente de 0.033 a 1.000 (según el uso del tren).

V: velocidad (km/h). (p.326)

- En rampa y curva

- En rampa

Melis y González (2008) la consideran la resistencia específica  $r_5$  más importante y clásica en ferrocarriles; la máquina debe vencer la fuerza gravitatoria. Esta resistencia específica será igual a la pendiente “ $i$ ” en ‰, según la Figura 35.

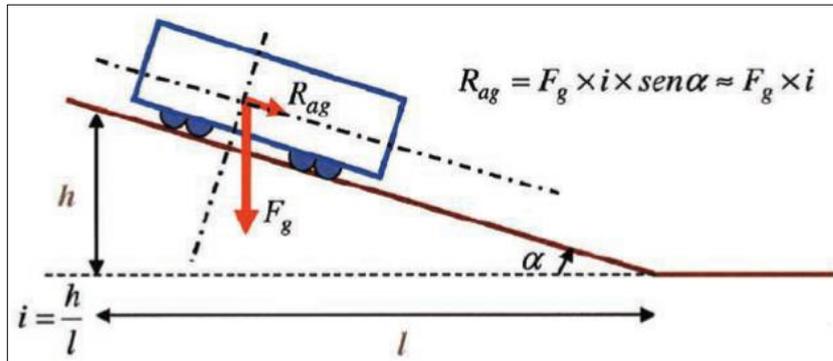


Figura 35: Resistencia en rampa

Fuente: “Ingeniería ferroviaria” por González y Fuentes (2010, p.108)

Por lo general, las inclinaciones en las ferrovías son pequeñas, se deduce:

$$i = \tan \alpha \approx \sin \alpha$$

$$F = P \times \sin \alpha \quad (60)$$

Luego, la resistencia específica se obtiene de dividir el esfuerzo resistente entre el peso del vehículo:

$$r_5 = \frac{F}{P} = \frac{P \times i}{P} = i \quad (61)$$

Entonces para  $i=1\text{‰}$ ,  $r_5=1$  daN/t y así sucesivamente. (p.338)

- En curva

Melis y González (2008) consideran a esta resistencia específica como la suma de tres componentes:

- › Eje aislado

Debido a que la rueda exterior recorre una mayor trayectoria que la interna, el esfuerzo resistente será:

$$F = \frac{P \times f \times a}{R} \quad (62)$$

Luego, la resistencia específica se obtiene de dividir el esfuerzo resistente entre el peso del vehículo:

$$r = \frac{F}{P} = \frac{f \times a}{R} \quad (63)$$

Donde:

f: coeficiente de fricción.

a: distancia entre ejes de rieles.

R: radio de la curva.

› En el *bogie*

Debido al paralelismo, esquematizado en la Figura 36, de los ejes que exige al vehículo que se deslice transversalmente para corregir la posición de la rueda en la vía, el esfuerzo resistente será:

$$F = \frac{P \times f \times \overline{AA'}}{4R} \quad (64)$$

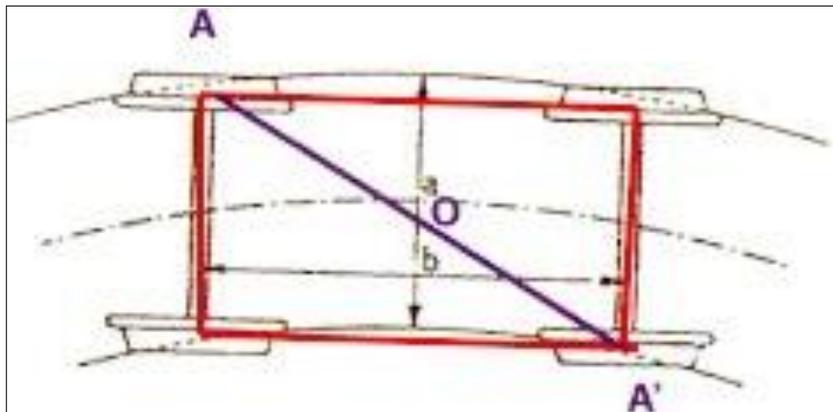


Figura 36: Resistencia del *bogie* en curva

Fuente: "Ferrocarriles metropolitanos" por Melis y González (2008, p.339)

Luego, la resistencia específica se obtiene de dividir el esfuerzo resistente entre el peso del vehículo:

$$r = \frac{F}{P} = \frac{f \times \overline{AA'}}{4R} \quad (65)$$

Donde:

f: coeficiente de fricción.

AA': distancia diagonal entre vértices del vehículo.

R: radio de la curva.

› Por fuerza centrífuga

Debido a la insuficiencia o exceso de peralte, el esfuerzo resistente será:

$$F = \frac{P \times f \times (v^2 - v_0^2)}{R \times g} \quad (66)$$

Luego, la resistencia específica se obtiene de dividir el esfuerzo resistente entre el peso del vehículo:

$$r = \frac{F}{P} = \frac{f \times (v^2 - v_0^2)}{R \times g} \quad (67)$$

Donde:

f: coeficiente de fricción.

v: velocidad del vehículo que puede ser mayor o menor que  $v_0$  (m/s).

$v_0$ : velocidad compensada por el peralte (m/s).

R: radio de la curva (m).

g: aceleración de la gravedad ( $m/s^2$ ).

Y dependiendo del signo, la resistencia se originará en el carril superior o inferior.

Estos 3 componentes se suman, dando el valor a la resistencia específica  $r_6$  en curva:

$$r_6 = \frac{f \times a}{R} + \frac{f \times \overline{AA'}}{4R} + \frac{f \times (v^2 - v_0^2)}{R \times g} \quad (68)$$

Donde:

$r_6$ : resistencia específica en curva (daN/t). (p.338-340)

González y Fuentes (2010), por métodos empíricos, dan la siguiente expresión. (p.105)

$$r_6 = \frac{800}{R} \quad \text{para vías de ancho 1668 mm.} \quad (69)$$

$$r_6 = \frac{600}{R} \quad \text{para vías de ancho 1435 mm.} \quad (70)$$

Lichtberger, Bernhard (2011), no obstante, propone la fórmula de Röckl para el cálculo de la resistencia específica en curva:

$$r_6 = \frac{c_1}{R - c_2} \quad (71)$$

Donde R es el valor del radio de la curva en metros y  $c_1$  y  $c_2$  se obtienen de la Tabla 10. (p.325)

Tabla 10: Valores de  $c_1$  y  $c_2$  para obtener la resistencia específica en curva

Radio (m)	Valor de coeficientes	
	$c_1$	$c_2$
$R > 350$	650	55
$R \approx 300$	530	35
$R < 200$	500	30

Fuente: "Manual de vía" por Lichtberger, Bernhard (2011, p.325)

- En aceleración

Melis y González (2008) explican que la masa M que debe ponerse en marcha se ve afectada por la inercia del objeto, entonces ésta se incrementa dando como resultado una masa imaginaria M' que es igual a  $M(1+\gamma)$ , donde  $\gamma$  es el factor inercial cuyo valor varía en el rango  $\langle 0.02-0.30 \rangle$  dependiendo del material transportado. Además, siendo la energía E:

$$E = \frac{1}{2} \times M \times v^2 + \frac{1}{2} \sum I \times \omega^2 \quad (72)$$

Donde:

E: energía (J).

M: masa (kg).

v: velocidad (m/s).

I: inercia ( $\text{kg/m}^2$ ).

$\omega$ : velocidad angular ( $\text{s}^{-1}$ ).

Luego aparece una resistencia R que se opone a la fuerza F necesaria para incrementar la energía E, llegando a la siguiente derivada respecto al tiempo.

(p.340-341)

$$F - R = M(1+\gamma) \frac{dv}{dt} \quad (73)$$

Lichtberger, Bernhard (2011) simplifica la operación y para obtener la resistencia específica a la aceleración  $r_7$  emplea la siguiente ecuación:

$$r_7 = 102 \times \epsilon \times a_1 \quad (74)$$

Donde:

$r_7$ : resistencia específica en curva (daN/t)

$\varepsilon$ : coeficiente de masas rodantes entre <1.0-1.1> dependiendo del material.

$a_1$ : aceleración longitudinal en dirección del tren ( $m/s^2$ ). (p.326)

- En arranque

Lichtberger, Bernhard (2011) la menciona como “la resistencia específica que se origina cuando el ferrocarril se pone en marcha y los vagones sucesivamente. Es la suma de todas las resistencias cuando velocidad  $v=0$ ”. (p.324)

Melis y González (2008), por experimentación, indican que “la resistencia específica al arranque debería ser igual a las anteriores con velocidad  $v=0$ , pero sin embargo se desarrolla un esfuerzo hasta los 10 daN/t y para lo cual dan las Tabla 11 y Tabla 12”. (p.341)

Tabla 11: Valores mínimos de aceleración de arranque

Servicio	Aceleración de arranque ( $m/s^2$ )
Trenes de mercancías	0,02 - 0,05
Trenes de pasajeros	0,08 - 0,10
Automotores	0,50 - 1,00
AVE	0,80 - 1,00
Metro	1,10 - 1,20

Fuente: “Ferrocarriles metropolitanos” por Melis y González (2008, p.341)

Tabla 12: Esfuerzo acelerador mínimo en rampa

Resistencia específica (daN/t)	Rampa (%)
7	< 1,5
8	1,5 - 2,0
9	2,1 - 2,5
10	2,6 - 2,9

Fuente: “Ferrocarriles metropolitanos” por Melis y González (2008, p.341)

Finalmente, Melis y González (2008) mencionan que, “por experiencia y ensayos empíricos, el resultado de la resistencia específica global  $r_0$  no se obtiene directamente de la suma de éstas, y tiene la siguiente forma”:

$$r_0 = k_1 + k_2 \times V + k_3 \times V^2 + i + \frac{k_4}{R} \quad (75) \quad (\text{p.342})$$

Además, González y Fuentes (2010) le dan los valores:

$k_1$ : suma de resistencias específicas a la rodadura (1.005 daN/t).

$k_2$ : constante de resistencias específicas del rozamiento (0.018).

$k_3$ : constante de resistencia específica aerodinámica (0.00136).

$k_4$ : constante de resistencia específica en curva (600 u 800).

$V$ : velocidad del vehículo (km/h).

$i$ : pendiente de la rampa (‰).

$R$ : radio de la curva (m). (p.105)

Lichtberger, Bernhard (2011) adiciona la resistencia específica a la aceleración, modifica la ecuación de la resistencia en curva y da nuevos valores a las constantes  $k$ , quedando la expresión:

$$r_0 = k_1 + k_2 \times V + k_3 \times V^2 + i + \frac{c_1}{R - c_2} + 102 \times \varepsilon \times a_1 \quad (76)$$

Donde:

$k_1$ : suma de resistencias específicas a la rodadura (2.5 daN/t).

$k_2$ : constante de resistencias específicas del rozamiento (0.0025).

$k_3$ : constante de resistencia específica aerodinámica (0.00025). (p.326)

## b. Adherencia ferroviaria

González y Fuentes (2010) lo definen como “el cociente obtenido de dividir la fuerza horizontal “F” en un eje por la masa “P” que soporta sin que la rueda patine”. (p.101)

$$\frac{F}{P} = \varphi \quad (77)$$

Melis y González (2008) explican que el movimiento del ferrocarril se da por una fuerza horizontal que por medio de las ruedas encuentra apoyo en el carril, tal y como se muestra en Figura 37. Este apoyo es la adherencia.

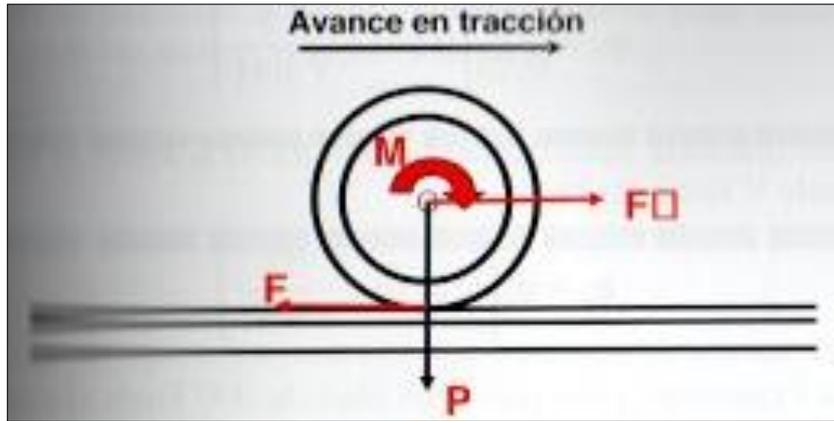


Figura 37: Adherencia rueda – carril

Fuente: “Ferrocarriles metropolitanos” por Melis y González (2008, p.345)

A medida que el peso apoyado sobre el carril se incremente, la adherencia también lo hará y existirá siempre y cuando la fuerza “F” no sea mayor que el producto del peso “P” por el coeficiente de adherencia “ $\varphi$ ”, caso contrario se produce el fenómeno del deslizamiento.

$$F < \varphi \times P \quad (78)$$

El coeficiente de adherencia disminuye a medida que la velocidad aumenta. Entonces adquiere su mayor valor cuando el ferrocarril se encuentra detenido ( $v=0$ ) y según Curtius-Kniffler este valor es  $\varphi=0.33$  en carriles secos y  $\varphi=0.10$  en carriles con grasa o húmedos. (p.344-345)

Según González y Fuentes (2010), “el valor del coeficiente de adherencia es ofrecido por los productores de carriles y están en el rango de 0.2 a 0.4, siendo estos los máximos en condición de tren parado”. (p.103)

Melis y González (2008) refieren la siguiente expresión para hallar el coeficiente de adherencia en función a una determinada velocidad:

$$\varphi_v = \frac{\varphi_0}{1 + 0.01 \times 3.6 \times v} \quad (79)$$

Donde:

$\varphi_v$ : coeficiente de adherencia a velocidad  $v$ .

$\varphi_0$ : coeficiente de adherencia con el ferrocarril detenido  $v=0$ .

$v$ : velocidad del vehículo (m/s).

Luego, el esfuerzo adherente máximo que el ferrocarril podrá realizar será:

$$E_{adh} = P_{adh} \times \varphi_v \quad (80)$$

Donde:

$E_{adh}$ : esfuerzo adherente (daN).

$P_{adh}$ : peso máximo de adherencia (daN). (p.346)

Esto significa que, sin considerar la potencia de la máquina y asumiendo valores  $\varphi_v=0.15$  y  $P_{adh}=30000$  daN (30 t), el esfuerzo adherente máximo sería  $E_{adh}=4500$  daN.

### c. Cálculo de la velocidad

Visto lo anterior, se sabe que el esfuerzo tractor  $E_{tra}$  no puede ser mayor que el esfuerzo adherente  $E_{adh}$  porque el ferrocarril patinaría.

$$E_{tra} \leq E_{adh}$$

Entonces, Melis y González (2008), para hallar la velocidad, igualan las expresiones:

$$\frac{W'}{v} = P_{adh} \times \frac{\varphi_0}{1 + 0.01 \times 3.6 \times v} \quad \rightarrow \quad v = \frac{W'}{P_{adh} \times \varphi_0 - 0.01 \times 3.6 \times W'} \quad (81)$$

Donde:

$v$ : velocidad (m/s).

$P_{adh}$ : peso máximo de adherencia (N).

$W'$ : potencia de la máquina al 90%-95% de su capacidad (W). (p.351-356)

### d. Curvas de movimiento del ferrocarril

En la Figura 38 se muestran cómo interactúan las curvas de adherencia, resistencia y potencia del motor para hacer posible el movimiento del ferrocarril.

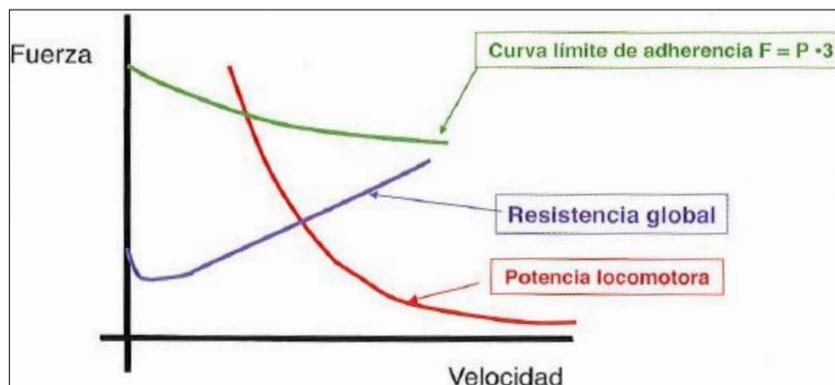


Figura 38: Curvas de adherencia, potencia y resistencia

Fuente: "Ferrocarriles metropolitanos" por Melis y González (2008, p.348)

En la Figura 39 se muestra el aumento gradual de la velocidad, partiendo del cero (0) en el punto A, debido a que la fuerza de la locomotora no puede ser mayor que la fuerza de adherencia, luego recorriendo por la curva límite de adherencia hasta llegar al punto B y seguir por la curva de potencia, para finalmente llegar al punto C, donde logrará su velocidad máxima debido a que las fuerzas resistentes son mayores a las fuerzas ejercidas por la locomotora.

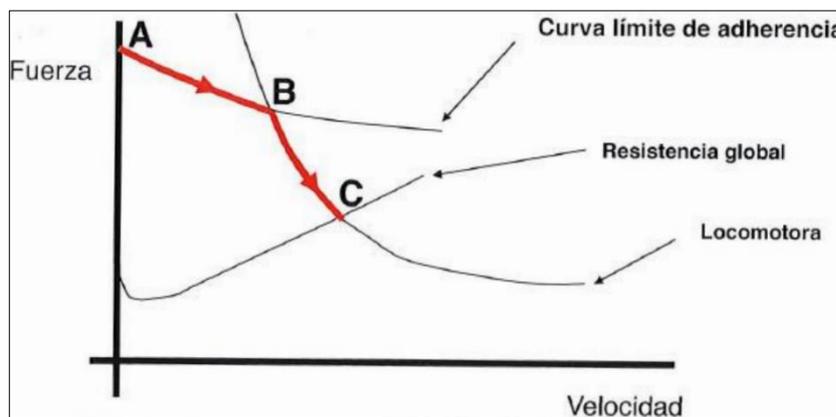


Figura 39: Movimiento del tren

Fuente: "Ferrocarriles metropolitanos" por Melis y González (2008, p.349)

La Figura 40 muestra que las características de la vía (resistencias) y la calidad de los rieles (adherencia) influirán al momento de seleccionar la potencia de la locomotora con la que se desea contar. Ante una baja adherencia y una alta resistencia, será mejor emplear una locomotora de baja potencia; todo ello afectando a la velocidad.

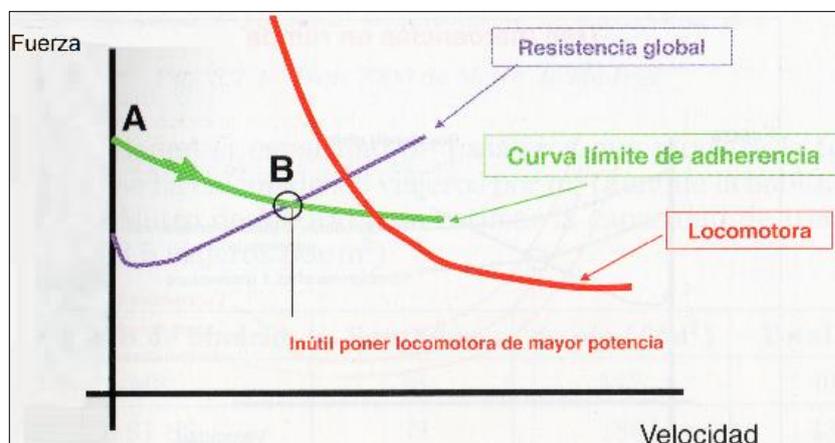


Figura 40: Baja adherencia y alta resistencia

Fuente: "Ferrocarriles metropolitanos" por Melis y González (2008, p.349)

#### e. El frenado

González y Fuentes (2010) mencionan que, el primer freno utilizable, continuo y automático como alternativa al puramente manual y puntual, fue inventado en

1872, por George Westinghouse. Kanorr, a mediados del siglo XX, mejora la idea sustituyendo el freno neumático de triple válvula por el distribuidor. También, otras empresas de prestigio han desarrollado la tecnología de los sistemas y componentes para adaptar y complementar el concepto básico a la evolución del transporte ferroviario.

Para estudiar la frenada mecánica de los vehículos ferroviarios, se suele comenzar por estudiar el movimiento angular de la rueda. Como se muestra en la Figura 41, los pares de frenada se oponen al giro de la rueda e intentan frenar su velocidad angular, mientras que la fuerza generada entre el carril y la rueda intenta acelerar su giro.

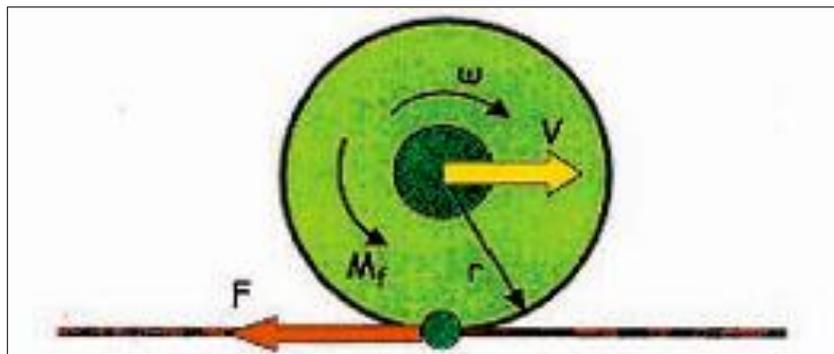


Figura 41: Frenado

Fuente: "Ingeniería ferroviaria" por González y Fuentes (2010, p.248)

Donde:

$V$ = velocidad longitudinal del eje

$\omega$ = Velocidad angular del eje

$\omega'$ = Aceleración angular del eje

$M_f$ = Par de frenada sobre el eje

$r$ = radio de la rueda

$F$ = Fuerza de frenada sobre el eje

$I$ =momento de inercia del eje

De la Figura 41 se desprende la ecuación diferencial del movimiento del eje:

$$I \times \omega' = F \times r - M_f \quad (82)$$

Por otra parte, es conocido que la fuerza  $F$  depende del pseudodeslizamiento de la rueda según curvas del tipo de la indicada en la Figura 42.

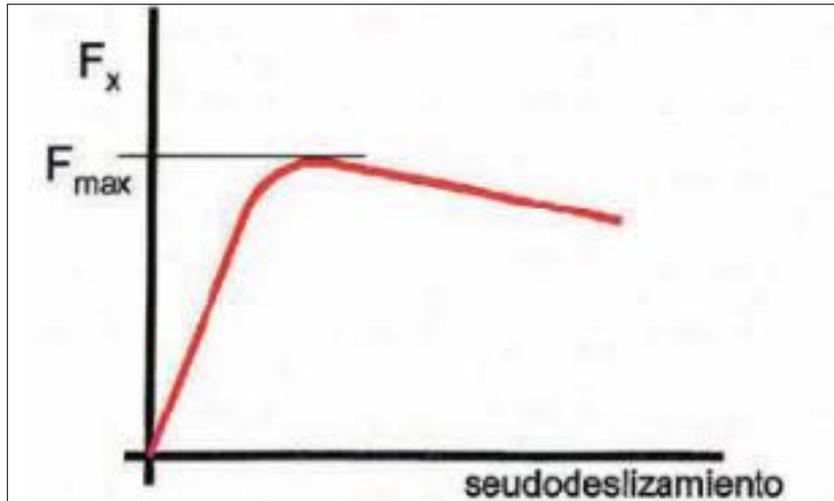


Figura 42: Seudodeslizamiento

Fuente: "Ingeniería ferroviaria" por González y Fuentes (2010, p.249)

Además, se sabe que, de la fórmula (78):

$$F_{\text{máx}} = \varphi \times P \quad (83)$$

Si se denomina  $V$  a la velocidad longitudinal de la rueda, el pseudodeslizamiento en frenada se define como:

$$\text{seudodeslizamiento} = \frac{V - \omega \times r}{V} \quad (84)$$

De tal forma que cuando la rueda está bloqueada y  $\omega$  se anula, el pseudodeslizamiento alcanza el valor 1, y sólo cuando  $V$  es igual a  $\omega r$  el pseudodeslizamiento se hace nulo.

Observando la Figura 42 y teniendo presente la fórmula (84), se deduce que para que exista esfuerzo en la rueda y el carril, es necesario que exista pseudodeslizamiento y en consecuencia  $V > \omega r$ .

Volviendo a la ecuación diferencial del eje, entendemos que una cosa es el par de frenada  $M_f$  suministrado por el sistema de frenos y otra la fuerza  $F$  que es la que realmente frena longitudinalmente al eje, y además es necesario que exista una aceleración  $\omega'$  negativa por lo tanto se tiene que cumplir que:

$$M_f > F \times r$$

El sistema mecánico de freno de los *bogies* para ferrocarriles, metros y tranvías, pueden ser de 3 tipos:

- Frenado mediante zapata

Este frenado actúa sobre la propia rueda y se efectúa a través de la aplicación de una presión entre zapata y banda de rodadura, como se muestra en la Figura 43.

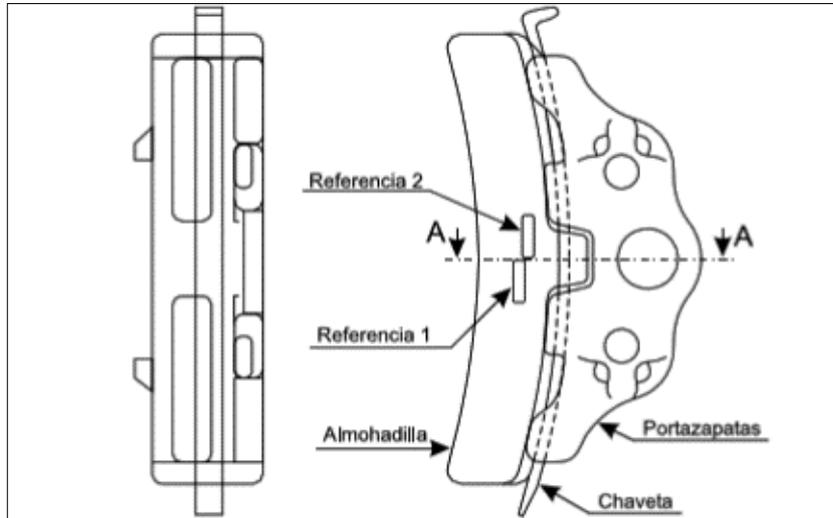


Figura 43: Frenado por zapata

Fuente: "Ingeniería ferroviaria" por González y Fuentes (2010, p.252)

En la Figura 44 podemos apreciar la representación esquemática de una rueda que se desplaza a una velocidad  $V$  y a la que se aplican unos frenos de zapata,

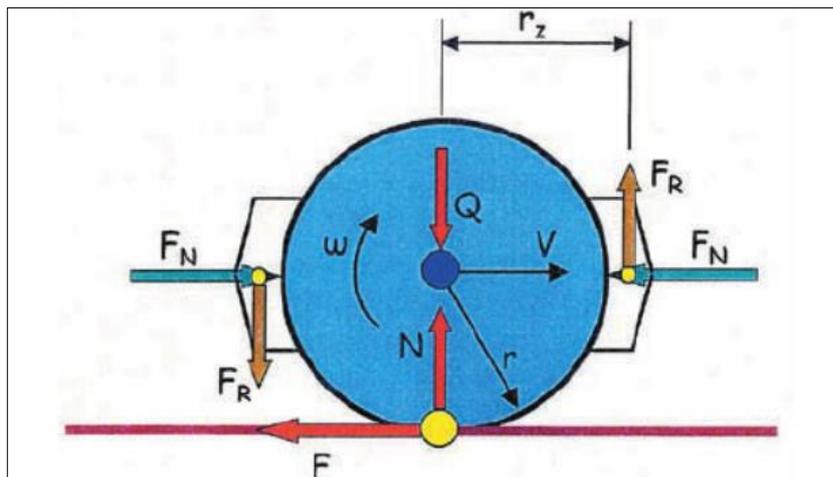


Figura 44: Freno por zapata

Fuente: "Ingeniería ferroviaria" por González y Fuentes (2010, p.253)

Inicialmente hay que señalar que, en los frenos de zapatas, el punto de aplicación de la resultante de los esfuerzos que se producen entre la rueda y la zapata, se encuentran fuera de la superficie de la rueda, de tal forma que los esfuerzos de rozamiento  $F_R$  tienen un radio de actuación  $r_z$ .

Considerando la rueda en estática e igualando pares, se tiene:

$$2 \times F_R \times r_z = F \times r \quad (85)$$

La fuerza de rozamiento entre la zapata y la rueda  $F_R$ , será igual al esfuerzo normal  $F_N$  multiplicado por el coeficiente de rozamiento  $\mu_r$ , entre la zapata y la rueda.

$$F_R = \mu_r \times F_N \quad (86)$$

Se sabe que el esfuerzo máximo de frenada, es igual al coeficiente de adherencia entre rueda y carril  $\mu$ , multiplicado por el esfuerzo normal  $N$ . Por lo tanto, se cumplirá:

$$F = \mu \times N \quad (87)$$

Por último, la carga  $Q$  es igual a la reacción normal  $N$  del carril.

$$Q = N \quad (88)$$

De la fórmula (85), y teniendo en cuenta el resto de igualdades se deduce:

$$F = \frac{2 \times F_R \times r_z}{r} \quad (89)$$

$$F = \frac{2 \times \mu_r \times F_N \times r_z}{r} \quad (90)$$

Donde se puede deducir que:

$$\mu \times Q \geq \frac{2 \times \mu_r \times F_N \times r_z}{r} \quad (91)$$

Finalmente, despejando, se obtiene:

$$\frac{F_N}{Q} \leq \frac{\mu \times r}{2 \times \mu_r \times r_z} \quad (92)$$

- Frenado mediante discos

Es el más usado en modernos trenes de alta velocidad, en los que para conseguir parar estas enormes masas a velocidades superiores a los 350 km/h es preciso equipar un importante número de discos, de forma que se repartan la energía entre ellos, llegando a soluciones de hasta cuatro discos de freno por eje.

En la Figura 45 se muestra esquemáticamente un freno de disco aplicado a una rueda de ferrocarril que se desplaza a una velocidad  $V$ .

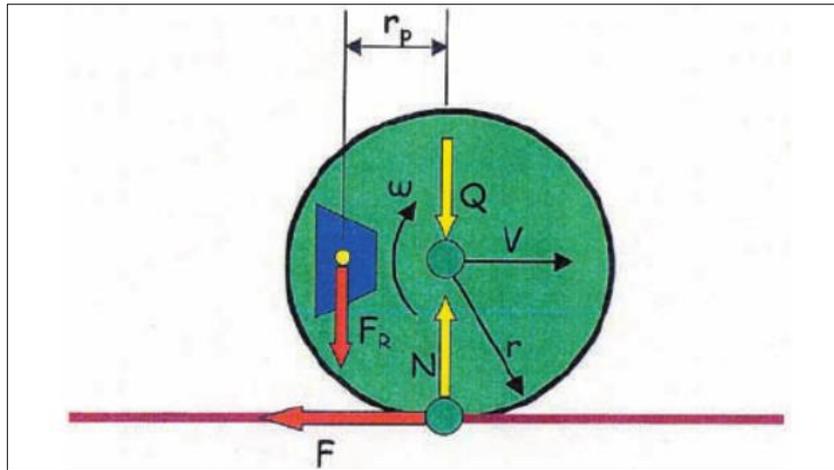


Figura 45: Frenado mediante discos  
Fuente: "Ingeniería ferroviaria" por González y Fuentes (2010, p.256)

De forma similar al frenado por zapata, se tiene que:

$$F_R = 2 \times \mu_r \times F_N \quad (93)$$

Luego, igualando pares aplicados sobre la rueda:

$$F \times r = 2 \times \mu_r \times F_N \times r_p \quad (94)$$

Siendo  $r_p$ , el radio de actuación de la resultante de los esfuerzos de rozamiento aplicados en la pastilla de freno.

Por otra parte, como el esfuerzo de frenado máximo que se puede obtener entre la rueda y el carril, está limitado por la adherencia, como se muestra en la ecuación (87):

$$F = \mu \times N$$

Y la carga  $Q$  es igual a la reacción  $N$  del carril tal como se muestra en la ecuación (88) es:

$$Q = N$$

Entonces, se deduce que:

$$F \times r = 2 \times \mu_r \times F_N \times r_p \quad (95)$$

Y de todas las anteriores expresiones, se puede deducir que:

$$2 \times \mu_r \times F_N \times r_p \leq \mu \times N \times r \quad (96)$$

Finalmente despejando, se llega a:

$$\frac{F_N}{Q} \leq \frac{\mu \times r}{2 \times \mu_r \times r_p} \quad (97)$$

A la expresión  $F_n/Q$  se le conoce como peso de freno.

- Frenado por corrientes de Foucault

Es un sistema de frenado muy usual en ferrocarriles metropolitanos, sobre todo en metros ligeros y más aún en tranvías que circulan compartiendo el viario con vehículos automóviles, lo que hace es producir un campo electromagnético que provoca fuerza de adherencia, como si de un imán frente a un cuerpo metálico se tratara y que conlleva el frenado de convoy.

- Prestaciones de los frenos

A los trenes se les exige unas prestaciones mínimas de frenado de emergencia y de servicio que están recogidas en la Tabla 13, para el caso de los trenes de alta velocidad. Así mismo, se exigen distancias máximas, como las mostradas en la Tabla 14, para que el tren pueda detenerse completamente. (p.245-261)

Tabla 13: Prestaciones mínimas de los frenos en la ETI de alta velocidad

Emergencia	Tiempo eq. Retardo	Deceler. Entre 330 y 300 km/h	Deceler. Entre 300 y 230 km/h	Deceler. Entre 230 y 170 km/h	Deceler. Entre 170 y 0 km/h
	s	m/s <sup>2</sup>	m/s <sup>2</sup>	m/s <sup>2</sup>	m/s <sup>2</sup>
Caso A	3	0,85	0,90	1,05	1,20
Caso B	3	0,65	0,70	0,80	0,90
Caso C	2	0,35	0,35	0,6	0,6

Fuente: “Ingeniería ferroviaria” por González y Fuentes (2010, p.259)

Tabla 14: Distancias máximas de frenado con freno de emergencia

Emergencia	Tiempo eq. Retardo	Dist. Máxima de 330 a 0km/h	Dist. Máxima de 300 a 0km/h	Dist. Máxima de 250 a 0km/h	Dist. Máxima de 200 a 0km/h
	s	m	m	m	m
Caso A	3	4.530	3.650	2.430	1.500
Caso B	3	5.840	4.690	3.130	1.940

Fuente: “Ingeniería ferroviaria” por González y Fuentes (2010, p.260)

#### 2.4.5 Señalización de la vía férrea

González y Fuentes (2010) mencionan de forma muy general que en el sector ferroviario se denomina señalización a los distintos sistemas de control y protección de trenes, teniendo claro conceptos como los sistemas de protección o

ATP (Automatic Train Protection) y a los sistemas de conducción semiautomática o automática ATO, CBTC, driverless; u otras siglas y terminologías que luego se explican.

La señalización ferroviaria básicamente está basada en semáforos que indican al conductor de un determinado convoy si puede avanzar o no y, en ciertos casos, con que restricciones o limitaciones. Es obvio que si la señalización o semáforo, indicaba al conductor si podía avanzar o debía detenerse, el sistema confiaba en dicho conductor toda la seguridad de la circulación.

Entonces, un error humano podía ocasionar un choque o alcance, por tanto, una catástrofe. Por ello se desarrollaron unos sistemas que controlasen acciones indebidas de los conductores, así nacieron los sistemas de protección de tren (ATP) que en sus inicios de forma independiente y superpuesta a la señalización convencional frenaran al tren en caso que el conductor se pasara el semáforo en rojo y fuese a realizar un itinerario prohibido con riesgo de colisión. En sus inicios fueron puramente mecánicos, luego eléctricos y en el último tiempo electrónicos, con una conexión de radio vía-tren.

Por último, aparecen los sistemas de conducción automática, que no son sistemas de seguridad, y su función es regular los procesos de arranque y frenado en puntos de salida y parada de estaciones, haciendo los trayectos más homogéneos y regulares al no intervenir el factor humano subjetivo en la conducción.

Los objetivos que se plantean a la hora de diseñar estos sistemas para la explotación de una línea ferroviaria son los siguientes:

- Proporcionar seguridad en la operación. Eso quiere decir que se debe garantizar que, incluso ante el fallo del propio sistema, no se produzca accidentes.
- Posibilitar una explotación flexible y eficiente. Este punto depende de las necesidades de cada línea pues se debe diseñar un sistema de control y protección que se ajuste a estas necesidades.

La pequeña adherencia entre rueda y carril hace que se tarde mucho tiempo en acelerar y, lo que es más grave, en frenar. Entonces, para estar seguros que la distancia que existe entre el primer tren y el tren que lo precede debe ser mayor a la distancia de frenado del primero, la velocidad será aceptablemente baja.

Inicialmente es conocido que el espacio recorrido en una frenada de aceleración constante es igual:

$$d=v \times t - \frac{1}{2} \times a \times t^2 \quad (98)$$

Donde:

d: distancia (m).

v: velocidad (m/s).

t: tiempo (s).

a: desaceleración (m/s<sup>2</sup>)

Si la frenada es hasta la parada definitiva del tren, la velocidad final es cero y en consecuencia se obtiene:

$$a = \frac{v}{t} \quad (99)$$

Despejando el tiempo y sustituyendo en la ecuación inicial se obtiene:

$$d = \frac{v^2}{2 \times a} \quad (100)$$

Entonces, en la Tabla 15 se muestra algunas distancias de frenado a diferentes velocidades, considerando una desaceleración de 0.5 m/s<sup>2</sup>.

Tabla 15: Distancias de frenado

Velocidad km/h	Velocidad m/s	V <sup>2</sup> /2a	Distancia en m
100	27,70	27,77 <sup>2</sup> /(2x0,5)	771,60
150	41,60	41,66 <sup>2</sup> /(2x0,5)	1735,55
200	55,55	55,55 <sup>2</sup> /(2x0,5)	3085,80
250	69,44	69,44 <sup>2</sup> /(2x0,5)	4821,91

Fuente: "ingeniería ferroviaria" por González y Fuentes (2010, p.466)

Como puede observarse, las distancias de frenado son muy elevadas y esto constituye uno de los problemas más habituales en los ferrocarriles. En consecuencia, la conducción del tren no podrá realizarse a la vista del conductor a velocidades medianamente elevadas y por ello es necesario disponer de sistemas de ayuda que vallan avisando al conductor si hay o no problemas por delante y de esta forma, se puede transitar a velocidades altas con la seguridad que cuando la vía este ocupada nos avisará con espacio suficiente para poder detener el tren. (p.463-465).

Melis y Gonzales (2008) dicen que los elementos fundamentales de la señalización se pueden representar de acuerdo a lo mostrado en la Figura 46.

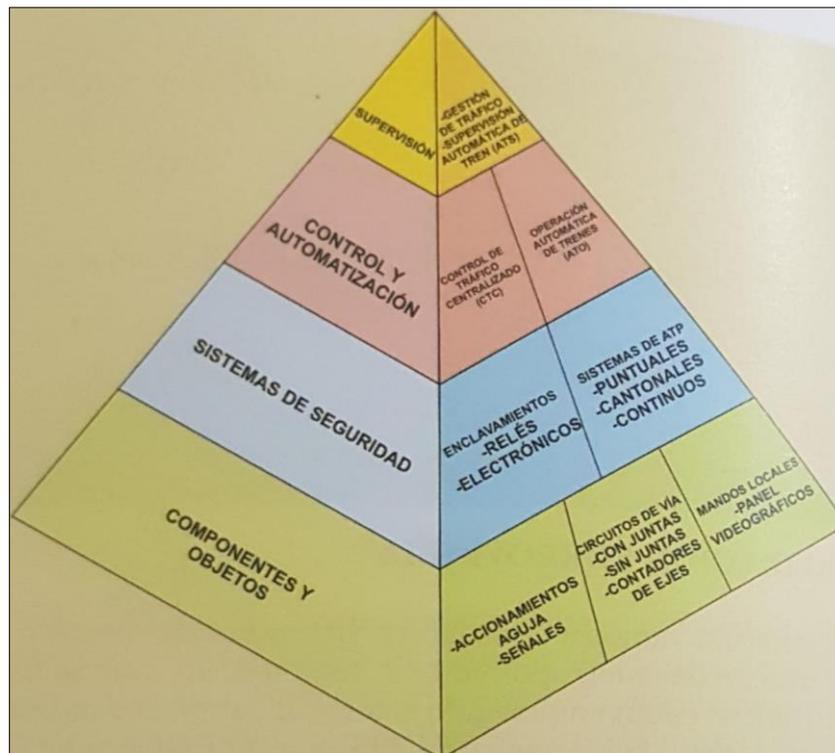


Figura 46: Señalización ferroviaria  
Fuente: “Ferrocarriles Metropolitanos” por Melis y González (2008, p.488)

Además, que la señalización tiene en la actualidad dos filosofías básicas:

- Señalización convencional: Donde las órdenes e informaciones relativas a señalización al tren se dan en puntos determinados para informar la presencia o ausencia de un tren; está basada en tecnologías eléctricas y electrónicas fundamentalmente de tipo analógico.
- Señalización continua: Aquella que mantiene una comunicación bidireccional entre una determinada zona de explotación y los trenes que existen dando servicio en la misma. En este caso cada tren informa al centro de control de la zona, su situación, velocidad y otros, y este le indica, según la situación de los demás trenes si debe acelerar o desacelerar, si debe pararse, si no debe arrancar y demás. Este tipo de señalización está basada en tecnologías de tipo digital y comunicación bidireccional tren-tierra. (p.488)

## 2.4.6 Mantenimiento ferroviario

Melis y Gonzales (2008) dicen que, en términos generales se denomina mantenimiento de infraestructura a lo correspondiente a túneles, vías, estaciones, accesos y en general, todas aquellas obras que sirven como soporte estructural a la explotación ferroviaria.

### a. Túneles

En el mercado existen diferentes metodologías predictivas que tienden a aportar rigurosidad técnica a las inspecciones a fin de que estas no sean simplemente visuales y por tanto sujetas a la especialización y experiencia del observador; es así que en la actualidad ya se dispone de sistemas de visión artificial y medición de defectologías por láser y escáner montados sobre vehículos de diagnóstico o sobre vagonetas auxiliares, permitiendo analizar la superficie del túnel mediante dichos sistemas en alta resolución (5000 píxeles por imagen) aportando criterios claros de la necesidad o no de intervenciones correctivas.

La ingeniería civil tiene otros, diversos, medios para realizar evaluaciones del estado del túnel mediante testigos, referencias topográficas y demás, que posibilitan hacer un seguimiento de estados y deformaciones.

### b. La vía

El mantenimiento de la vía es uno de los aspectos que históricamente ha conllevado un mayor coste de conservación (50% de volumen de gasto en mantenimiento de vía), ello era debido a problemas de trazado, de ataque rueda-carril y de fijación de la propia vía que originaban defectologías diversas, fallas geométricas como las que se reflejan en la Figura 47.

Luego, como se muestra en la Figura 48, los métodos de mantenimiento han ido mejorando como también las técnicas de trazado y el diseño del material móvil; hasta hace algunos años se seguían llevando a cabo inspecciones preventivas visuales rutinarias (costosas), pero recientemente se están generalizando sistemas de mantenimiento predictivo de vía basados en aceleraciones transversales normalmente y de medición geométrica del perfil del carril por láser.

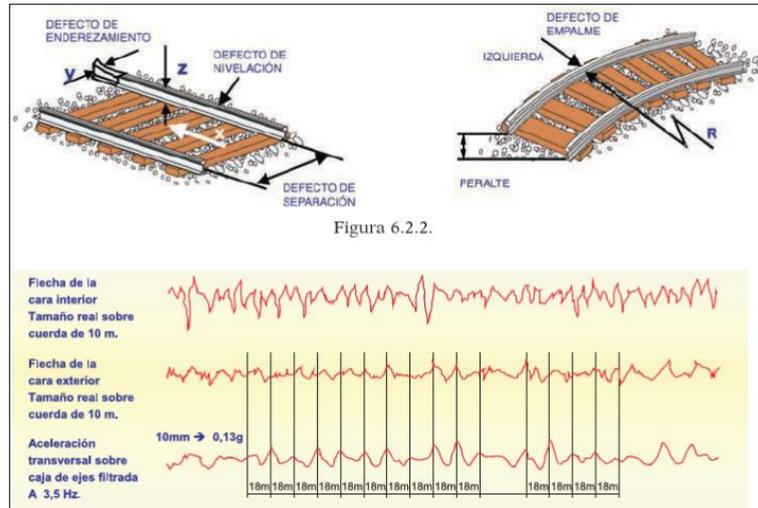


Figura 47: Defectología  
Fuente: "Ingeniería ferroviaria" por González y Fuentes (2010, p.633)

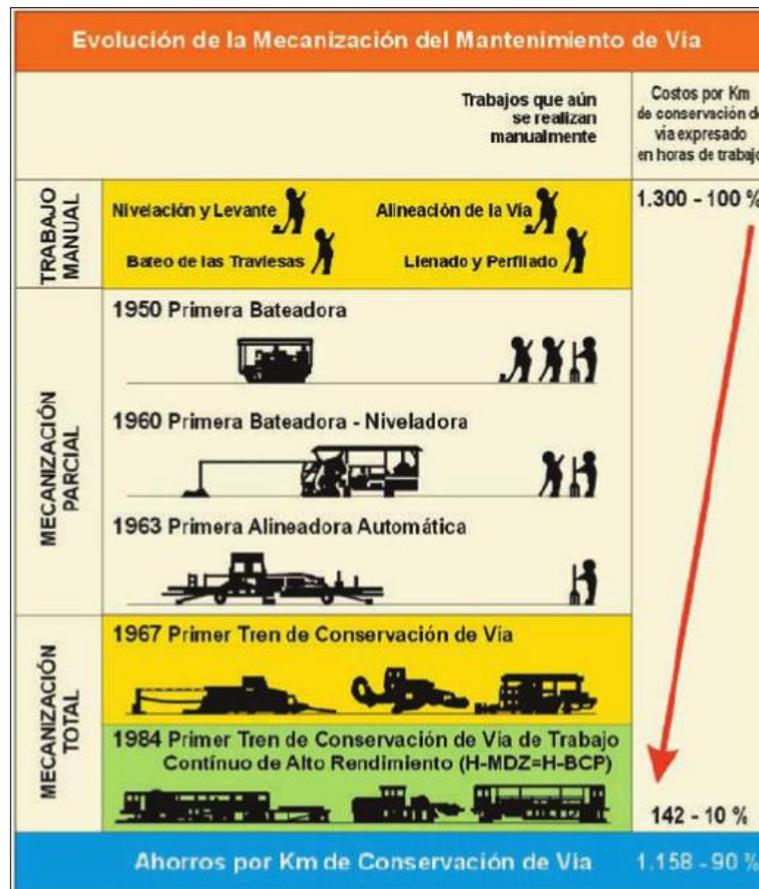


Figura 48: Evolución de la mecanización del mantenimiento  
Fuente: "Ingeniería ferroviaria" por González y Fuentes (2010, p.635)

### c. Línea aérea

El mantenimiento de los sistemas de toma de contacto, bien sean tranviarias o catenarias, históricamente se han realizado mediante vehículos auxiliares o de control en el que se llevaban, a efectos, recorridos periódicos por parte del personal especializado en mantenimiento, observando el nivel de desgaste del hilo de contacto, la ausencia o no de perlas o faltas anómalas de sección, la flexibilidad vertical del mismo y separación entre conductores para el caso de hilo de doble hilo de contacto ( $107 \text{ mm}^2$  cada uno) y por último, el estado de anclajes, fijaciones, sustentadoras, péndolas, aisladores, entre otros. Además, en estas inspecciones periódicas se efectuaban también operaciones manuales de engrase periódicos.

Los sistemas modernos de mantenimiento tienden a eliminar estas inspecciones y reengrases periódicos rutinarios por medio del método predictivo de diagnóstico, basado en el registro de determinadas variables de hilo de contacto, así como en el registro del nivel de descentramiento y del desplazamiento que origina la presión del propio pantógrafo.

Estos sistemas predictivos permiten reducir los costos de mantenimiento, programando las sustituciones del hilo de trabajo según curvas de regresión en el momento oportuno. (p.736-742).

#### 2.4.7 Ferrocarriles modernos

Ante las condiciones exigidas por el trazo al material móvil, se hizo necesaria la búsqueda de soluciones que no impliquen una modificación en la geometría de la vía existente. Es así que en la actualidad se hace uso de los trenes de caja inclinada, cuyo coeficiente de flexibilidad  $\sigma$  tiene valores menores que cero permitiendo mayores velocidades en ferrovías ya construidas y/o un mejor diseño en los proyectos futuros.

Melis y González (2008) mencionan que los trenes de caja inclinada permiten compensar la insuficiencia de peralte inclinando el vagón hacia adentro de la curva, como se muestra en la Figura 49, dándole la sensación al usuario de un mayor peralte. Pero debido a los valores negativos del coeficiente de flexibilidad,

la máquina y la vía sufren más daños por los esfuerzos horizontales producidos por la alta velocidad. (p.282)

López, Andrés (2006) expresa la nueva relación entre el radio y la velocidad para estos trenes, como:

Trenes pendulares:

$$V=5.4\times\sqrt{R} \quad (101)$$

Trenes basculantes:

$$V=5.8\times\sqrt{R} \quad (102)$$

Donde:

V: velocidad (km/h).

R: radio de la curva (m). (p.119)

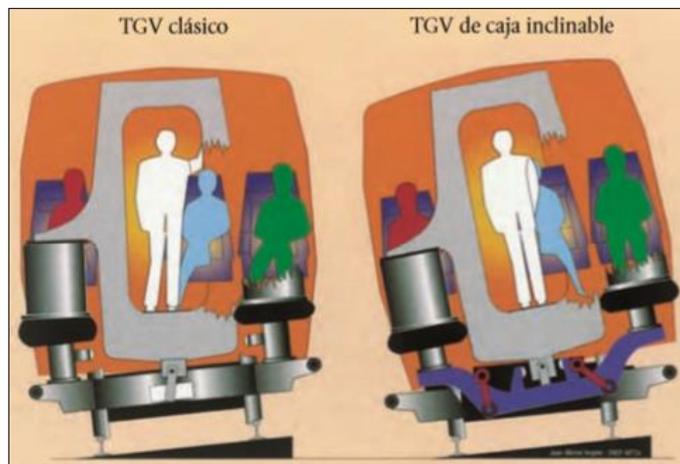


Figura 49: Trenes de caja inclinable

Fuente: “Infraestructuras Ferroviarias” por López, Andrés (2006, p.118)

Lichtberger, Bernhard (2011) dice que la inclinación de las cajas con hasta un 8%, fija la velocidad en curva que desarrollan los trenes pendulares en comparación con los de caja no inclinable hasta un 40% más o 40 km/h más y formula la velocidad máxima en curvas mediante la expresión:

$$V=\sqrt{\frac{R}{11.8}\times(z+1)} \quad (103)$$

Donde:

V: velocidad (km/h).

R: radio de la curva (m).

z: altura de peralte (mm).

I: insuficiencia de peralte hasta los 300 (mm). (p.353-354)

## 2.5 La normatividad férrea en el Perú

Ante la necesidad de contar con una norma nacional que se adaptase a las particularidades del territorio peruano (topografía, clima, suelos, entre otros), el 20 de marzo de 1978, bajo la dirección del Sector de Transportes y Comunicaciones, se forma una comisión para la elaboración de dicho documento.

Posteriormente, se publican las “Normas y especificaciones técnicas para el diseño de vías férreas del Perú” el 9 de noviembre del mismo año. Norma compuesta por 9 capítulos y 1 anexo:

1. Clasificación de ferrocarriles.
2. Derecho de vía.
3. Velocidad de régimen.
4. Características geométricas.
5. Sección transversal.
6. Drenaje.
7. Superestructura.
8. Señalización.
9. Instrucciones para la presentación del proyecto a nivel de ingeniería detallada para construcción.

Pasarían 26 años y en 2004, de acuerdo a la ley N.º 27181 que le da facultad al Ministerio de Transportes y Comunicaciones para normar en materia de transporte y tránsito terrestre, la Dirección General de Caminos y Ferrocarriles prepararía un informe técnico sustentatorio para propuesta de una nueva norma que reemplace a la de 1978.

Al año siguiente, el 5 de enero, se publica el Decreto Supremo N.º 032-2005-MTC aprobando el “Reglamento Nacional de Ferrocarriles”, compuesto por 8 disposiciones con un total de 173 artículos y 5 anexos:

1. Disposiciones generales.
2. Competencias.
3. Infraestructura ferroviaria.
4. Material rodante.

5. Operaciones ferroviarias.
6. Transporte ferroviario.
7. Registro de la actividad ferroviaria.
8. Infracciones y sanciones.

Luego se publicarían otras normas complementarias:

- Estándares Mínimos de Seguridad para Vías Férreas de Trocha de 914 mm aprobado por la Resolución Directoral N.º 049-2007- MTC/14 del 27 de julio del año 2007.
- Reglamento Nacional del Sistema Eléctrico de Transporte de Pasajeros en vías férreas que formen parte del Sistema Ferroviario Nacional, que fue aprobado mediante D.S. N.º 039-2010-MTC y publicado el 11 de agosto del año 2010.

#### 2.5.1 Normas y especificaciones técnicas para el diseño de vías férreas en el Perú

Como se menciona líneas más arriba, estas normas y especificaciones técnicas fueron derogadas y reemplazadas por el actual Reglamento Nacional de Ferrocarriles, sin embargo, en la práctica está vigente (se explica por qué en el 2.4.2.) y por tal es necesario hacer referencia a su contenido, específicamente a las partes que contienen los temas de importancia para la presente tesis, como son la velocidad de diseño, el alineamiento horizontal y el alineamiento vertical.

Los capítulos de interés son:

- Capítulo 3: Velocidad de régimen.
- Capítulo 4: Características geométricas.

##### a. Velocidad de Diseño

Las normas y especificaciones técnicas no especifican rango alguno de velocidades. La elección de parámetro o criterio dependerá de consideraciones económicas respecto al tráfico y volúmenes de pasajeros que se esperan cubrir, además también del tipo de vía y la superficie donde se desee construir, entre otros.

La geometría será condicionada por la velocidad e interactuará con las características de la curva y el peralte. La relación dada por la siguiente fórmula, permitirá optar por una velocidad segura:

$$V=0.29\sqrt{R \times (z+I)} \quad (104)$$

Donde:

V: velocidad (km/h).

R: radio (m).

z: altura de peralte (mm).

I: insuficiencia de peralte (mm).

#### b. Alineamiento Horizontal

Deberá garantizar el tránsito ininterrumpido de los ferrocarriles conservando su velocidad de operación a lo largo de los tramos de la vía donde sea posible. Para ello se enlazarán de forma armónica rectas horizontales largas con curvas circulares de grandes radios. Sin embargo, ante la imposibilidad de desarrollar curvas de grandes radios, los mínimos aceptados se muestran en la Tabla 16:

Tabla 16: Radios mínimos de la norma y especificaciones técnicas del Perú

Trocha (m)	Radio mínimo Normal	
	En vía principal (m)	En patios (m)
0.914	90	60
1.435	150	75

Fuente: Normas y especificaciones técnicas para el diseño de vías férreas en el Perú (1978)

Cuando el radio de la curva es pequeño, menor de 400 m, ésta deberá ser acondicionada con un sobreebanco no mayor a los 25 mm, tal y como se muestra en la Tabla 17.

El ensanchamiento se inicia progresivamente en el carril del lado interior de la curva de transición, hasta alcanzar el sobreebanco que le corresponde a la curva circular en el punto de empalme.

Tabla 17: Sobreebanco de la norma y especificaciones técnicas peruanas

Radio (m)	Sobreebanco (mm)
$75 \leq R < 100$	25
$100 \leq R < 134$	20
$134 \leq R < 150$	15
$150 \leq R < 172$	10
$172 \leq R < 400$	5

Fuente: Normas y especificaciones técnicas para el diseño de vías férreas en el Perú

Casos especiales como las curvas compuestas de mismo sentido y/o de sentidos contrarios deben ser evitados. Las curvas compuestas en el mismo sentido deberán estar separadas por una recta horizontal tangente no menor a 45 m o ser remplazadas por una sola curva, y las curvas compuestas en sentidos contrarios deberán estar provistas de sus respectivas curvas de transición.

Tal y como lo indica la teoría, las rectas y las curvas se enlazarán por medio de curvas de transición; la norma propone la espiral o la parábola cúbica.

La curva de transición permitirá pasar gradualmente del radio infinito de la línea recta al radio de la curva circular, suavizando la entrada y salida del material rodante en las curvas y peraltando el carril del lado exterior, progresivamente hasta alcanzar la altura del peralte que le corresponde a la curva circular en el punto de empalme.

La ecuación de la transición es la fórmula de la parábola cúbica:

$$y = \frac{x^3}{6LR} \quad (105)$$

Donde:

L: longitud de transición (m).

R: radio de la curvatura (m).

La transición contará con una longitud deseable que se obtendrá del resultado mayor entre las siguientes fórmulas:

$$L = 0.0075 \times z \times V \quad (106)$$

$$L = 0.0075 \times I \times V \quad (107)$$

Donde:

V: Velocidad (km/h).

I: Insuficiencia de sobre elevación (mm).

z: altura de peralte (mm).

L: Longitud de transición (m).

Del mismo modo que con el radio de la curva, en caso no se pueda desarrollar la longitud de transición deseable, la mínima será:

- Para velocidades mayores de 80 km/h será el resultado mayor entre las siguientes fórmulas:

$$L_{\min} = \frac{V \times (z+I)}{2 \times 198} \quad \text{ó} \quad \frac{V \times z}{198} \quad (108)$$

$$L_{\min} = \frac{V \times (z+I)}{2 \times 198} \quad \text{ó} \quad \frac{V \times I}{198} \quad (109)$$

$$L_{\min} = \frac{2 \times L}{3} \quad (110)$$

➤ Para velocidades menores de 80 km será el resultado obtenido de:

$$L_{\min} = 0.4 \times z \quad (111)$$

Donde

$L_{\min}$ : longitud mínima de la transición (m).

V: velocidad (km/h).

z: altura de peralte (mm).

I: insuficiencia de peralte (mm).

Yendo en la línea de la seguridad y el confort, a la curva circular se le dota de peralte para contrarrestar los efectos causados por la aceleración centrífuga.

Para obtener la altura del peralte se puede hacer uso de la fórmula general:

$$z = 7.87 \times \frac{a \times V^2}{R} \quad (112)$$

O de las fórmulas específicas para cada tipo de trocha:

$$z = 11.8 \times \frac{V^2}{R} \quad \text{para trocha estándar de 1435 mm.} \quad (113)$$

$$z = 7.69 \times \frac{V^2}{R} \quad \text{para trocha angosta de 914 mm.} \quad (114)$$

Donde

z: altura de peralte (mm).

a: distancia entre los ejes de los rieles (m).

V: velocidad (km/h).

R: radio de la curva (m).

El resultado obtenido no podrá ser mayor de 150 mm para trocha estándar, ni mayor de 100 mm para trocha angosta.

### c. Alineamiento Vertical

La vía se adaptará a las características topográficas del terreno. Las tangentes se

enlazarán mediante curvas o acuerdos verticales cuando las gradientes de las rectas sumen más de 2‰ y la longitud de las curvas de acuerdo verticales cóncavas hacia abajo serán la mitad de las cóncavas hacia arriba.

Además, la gradiente máxima de las rectas no será mayor al 3%.

## 2.5.2 Reglamento nacional de ferrocarriles

Respecto al reglamento vigente, el contenido de interés para la presente tesis se encuentra en los siguientes artículos:

- Artículo 6: Clasificación de las vías férreas.
- Artículo 15: Conformación de la vía férrea.
- Artículo 48: Aspectos técnicos a considerar en el estudio de ingeniería del proyecto.

El artículo 6 del reglamento nacional, como indica su título, clasifica las vías del territorio nacional: por ámbito territorial, por titularidad de la empresa y por la máxima velocidad de operación. La Tabla 18 muestra las velocidades máximas permitidas.

Tabla 18: Clasificación de la vía por su máxima velocidad de operación

Clase de vía	Máxima velocidad de operación permitida	
	Trenes de mercancías (km/h)	Trenes de pasajeros (km/h)
1	16	24
2	40	48
3	64	96
4	96	128
5	128	144

Fuente: Reglamento nacional de ferrocarriles (2006)

El artículo 15 especifica que para el diseño de la vía se debe remitirse a las “Normas y especificaciones técnicas para el diseño de vías férreas en el Perú” de 1978, yendo en contraposición al decreto que la deroga.

El artículo 48 da lineamientos básicos para el diseño de vías férreas, entre las que se rescatan: la obligatoriedad del empleo de la trocha estándar o internacional de 1435 mm para vías nuevas y el no uso de otras sin previa autorización de la entidad competente, el

radio mínimo de 150 m para curvas circulares, la distancia mínima de 5 m para la entrevía y la gradiente máxima no mayor a 3% en las rectas del perfil.

### 2.5.3 Diferencias entre el reglamento vigente y sus normas complementarias

El Reglamento Nacional del Sistema Eléctrico de Transporte de Pasajeros en vías férreas que formen parte del Sistema Ferroviario Nacional también da lineamientos básicos en su Artículo 16: “Aspectos relacionados a las vías férreas que deben ser tomados en consideración en la elaboración del proyecto”.

En la Tabla 19 se muestran las principales diferencias para los criterios mencionados en el artículo referido.

Tabla 19: Diferencias de los reglamentos nacional y del sistema eléctrico

Criterio	R.N. del Sistema Eléctrico	Reglamento Nacional de Ferrocarriles
Entrevía (m)	3,8	5
Gradiente máxima (%)	3,5	3
Radio mínimo de curva circular (m)	200	150
Peralte máximo (mm)	160	150
Radio mínimo de acuerdo vertical (m)	3000	-
Longitud de la recta horizontal (m)	Longitud del tren en su máxima composición	-

Fuente: Elaboración propia

## 2.6 Formulación de hipótesis

### 2.6.1 Hipótesis general

Hipótesis alterna: ( $H_i$ ): La actualización de criterios de diseño geométrico de vías férreas del Perú mejora el reglamento nacional de ferrocarriles.

Hipótesis nula: ( $H_0$ ): La actualización de criterios de diseño geométrico de vías férreas del Perú no mejora el reglamento nacional de ferrocarriles.

### 2.6.2 Hipótesis específicas

a) Hipótesis alterna: ( $H_{i1}$ ): La actualización del criterio de velocidad de diseño incrementa la velocidad de diseño.

Hipótesis nula: ( $H_{01}$ ): La actualización del criterio de velocidad de diseño disminuye la velocidad de diseño.

b) Hipótesis alterna: ( $H_{i2}$ ): La actualización del criterio de alineamiento horizontal complementa el alineamiento horizontal.

Hipótesis nula: ( $H_{02}$ ): La actualización del criterio de alineamiento horizontal no complementa el alineamiento horizontal.

c) Hipótesis alterna: ( $H_{i3}$ ): La actualización del criterio de alineamiento vertical mejora el alineamiento vertical.

Hipótesis nula: ( $H_{03}$ ): La actualización del criterio de alineamiento vertical no mejora el alineamiento vertical.

### 2.6.3 Variables

- Variable Independiente: Criterios de diseño geométrico.
- Variable Dependiente: Reglamento nacional de ferrocarriles.

#### 2.6.3.1 Definición conceptual de las variables

**Criterios de Diseño Geométrico:** Parámetros como la velocidad de diseño, el alineamiento horizontal y el alineamiento vertical, que se emplean en el diseño de la geometría de una línea férrea.

**Reglamento Nacional de Ferrocarriles:** Normas generales que regulan la actividad ferroviaria en el Perú y su alcance es hacia toda persona natural o jurídica que realice dicha actividad que va desde la concepción de la idea de un proyecto, pasando por el diseño de su geometría, hasta el final de su vida útil.

#### 2.6.3.2 Operacionalización de las variables

La variable independiente “Criterios de diseño geométrico”, se descompone en las dimensiones mostradas en la Tabla 20. Dimensiones que a su vez se miden por los indicadores expuestos en la misma tabla.

Tabla 20: Dimensiones e indicadores de la variable independiente

Dimensiones	Indicador	Unidad de medida
Velocidad de Diseño	Velocidad máxima	km/h
Alineamiento Horizontal	Longitud de recta horizontal	m
	Radio de curva circular	m
	Longitud de curva circular	m
	Altura de peralte	mm
	Insuficiencia de peralte	mm
Alineamiento Vertical	Longitud de transición	m
	Longitud de recta perfil	m
	Pendiente	%
	Radio de acuerdo vertical	m
	Longitud de acuerdo vertical	m

Fuente: Elaboración propia

La variable dependiente “Reglamento nacional de ferrocarriles”, sigue el mismo proceso de la variable independiente y es descompuesto en las dimensiones mostradas en la Tabla 21. Dimensiones que a su vez se miden por sus indicadores expuestos en la misma tabla.

Tabla 21: Dimensiones e indicadores de la variable dependiente

Dimensiones	Indicador	Unidad de medida
Velocidad de Diseño	Velocidad máxima	km/h
Alineamiento Horizontal	Longitud de recta horizontal	m
	Radio de curva circular	m
	Longitud de curva circular	m
	Altura de peralte	mm
	Insuficiencia de peralte	mm
Alineamiento Vertical	Longitud de transición	m
	Longitud de recta de perfil	m
	Pendiente	%
	Radio de acuerdo vertical	m
	Longitud de acuerdo vertical	m

Fuente: Elaboración propia

## **CAPÍTULO III: DISEÑO METODOLÓGICO**

### 3.1 Tipo y nivel

- Tipo de investigación: Cualitativa – Cuantitativa.

La presente investigación se basó en información bibliográfica recolectada, de diversos medios, cuyo contenido está sujeto a medición y a variación o modificación en el tiempo debido a que la realidad está en constante cambio.

- Nivel de investigación: Descriptivo - Explicativo.

Se recopiló información bibliográfica para identificar los temas de interés, para luego realizar un análisis comparativo y establecer una relación entre el tema analizado y su aplicación en la realidad peruana, fijando parámetros mínimos que se deban cumplir para su implementación y finalmente proponer la actualización de los criterios estudiados en el reglamento nacional de ferrocarriles.

### 3.2 Diseño de la investigación

- Diseño de la investigación: No experimental – Transversal.

Se recopiló información bibliográfica y se compararon de normas, reglamentos y manuales de varios países, para el diseño geométrico de ferrocarriles, que para la fecha actual se encontraban vigentes.

### 3.3 Población y muestra

- Población: Ferrocarriles de la Costa del Perú – Lima.
- Muestra: Criterios de Diseño Geométrico para el Ferrocarril Bellavista – Santa Anita.

### 3.4 Técnicas de recolección de datos

- Se adquirieron libros teóricos sobre diseño de ferrocarriles.

- Se adquirió documentación sobre la problemática del transporte ferroviario, reglamentos, tesis y artículos de investigación varios.
- Se recolectó normas, reglamentos o manuales de transporte ferroviario.

#### 3.4.1 Tipos de técnicas e instrumentos

- Técnicas: Observación documentaria.  
Debido a que la investigación es de tipo cualitativa – cuantitativa, la técnica empleada fue la de solicitud de productos, que se refiere a la solicitud y recopilación de información bibliográfica resultante de un proceso de aprendizaje, entendiéndose la actualización de normas y reglamentos para el diseño de ferrovías en el mundo.
- Instrumentos: Normas, reglamentos y manuales internacionales y nacionales.  
Base de datos de las normas, reglamentos y manuales internacionales y nacionales que sirvieron para el análisis comparativo entre ellos.

#### 3.4.2 Criterios de validez y confiabilidad de los instrumentos

- Los instrumentos utilizados fueron documentos elaborados y empleados por diversos países para el diseño de ferrocarriles dentro de sus territorios.

#### 3.4.3 Técnicas para el procesamiento y análisis de datos

- Comparación de contenidos.  
Análisis comparativo entre las normas, reglamentos y manuales para el diseño de ferrovías peruanas y extranjeras.
- Fórmulas.  
Análisis de fórmulas empleadas para el diseño geométrico de ferrovías para seleccionar las que más se ajusten a la realidad peruana.
- Figuras.  
Figuras y esquemas para ejemplificar los casos encontrados.
- Tablas.  
Empleadas para fijar los límites de los criterios analizados.

## **CAPÍTULO IV: DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN**

### 4.0 Revisión de la normativa internacional

Este capítulo se referirá a la normativa existente en otros países, abordando en cada una de ellas los temas de interés de la presente tesis, como son: la velocidad de diseño, el alineamiento horizontal y el alineamiento vertical.

En la actualidad, las normas, reglamentos o manuales de diseño geométrico de ferrocarriles producidos por diversos países hacen referencia al manual de la AREMA o al de la UIC; pudiendo ser adquiridas por un alto costo que, como es mencionado en el planteamiento del problema, es una limitante.

Entonces, la elección de las normas a revisar, de acuerdo a múltiples factores además de su disponibilidad, es:

Por sus características y proximidad geográfica:

- La norma de Canadá.
- La norma de Estados Unidos (AREMA).
- La norma de Colombia.
- La norma de Chile.

Por influencia en la región:

- La norma de España.

Por accesibilidad y otros:

- La norma de Gran Bretaña.
- La norma de Australia.

#### 4.1 Manual de la American Railway Engineering and Maintenance-of-Way Association (AREMA) – Estados Unidos de América

La AREMA, en su constitución actual, fue creada el 1 de octubre de 1997 como el resultado de la fusión de tres asociaciones de ingeniería (American Railway Bridge and Building Association, American Railway Engineering Association y Roadmaster's and Maintenance of Way Association) con más de 100 años de historia en la industria ferroviaria.

El manual se publica anualmente en el mes de abril, está elaborado para el desarrollo y avance de conocimientos técnicos y prácticos relacionados al diseño, construcción y mantenimiento de la infraestructura ferroviaria. Está conformado por 4 volúmenes:

1. Vía.
2. Estructura.
3. Infraestructura y pasajeros.
4. Gestión de sistemas.

Respecto a los temas de interés de esta tesis, el diseño de la geometría se concentra en:

- Volumen 1, capítulo 5 (vía), parte 3 (curvas).
- Volumen 3, capítulo 12 (tránsito ferroviario), parte 3 (consideraciones sobre la vía).

La velocidad se encuentra en función de las propiedades de la locomotora y su interacción con los rieles:

- Volumen 4, capítulo 16 (economía de la ingeniería y operaciones ferroviarias), parte 2 (rendimiento del tren).

La versión del manual AREMA empleada en la presente es la de 1999, para trocha estándar de 1435 mm y cuyas unidades en el Sistema Inglés serán transformadas al Sistema Internacional para una comparación adecuada.

#### 4.1.1 Velocidad de diseño

Como se menciona en la descripción del manual, la velocidad dependerá de las características del ferrocarril, conllevando a que no se fijen límites a la propuesta de una velocidad base con la cual iniciar el diseño.

A modo de guía, la Tabla 22: muestra velocidades que se pueden emplear y que por practicidad han sido transformadas del sistema inglés al sistema métrico.

#### 4.1.2 Alineamiento horizontal

El alineamiento horizontal es desarrollado en las partes del manual antes mencionados y las fórmulas descritas han sido transformadas.

##### a. Rectas horizontales

###### - Longitud mínima de la recta horizontal

La mínima longitud que permite que el vehículo se recupere de los efectos causados por las fuerzas laterales al paso de las curvas está dada por la ecuación:

$$L=0.568 \times V \quad (115)$$

Donde:

L: longitud de la recta horizontal (m).

V: velocidad de diseño (km/h).

Sin embargo, ante cualquier impedimento para cumplir con la longitud mínima, excepcionalmente se permitirá que ésta sea de la longitud del vagón más largo.

##### b. Curvas circulares

Definidas por su arco y especificadas por su ángulo y/o radio. En la Tabla 22: se muestran radios que se pueden emplear, que fueron transformadas a partir de su ángulo, por la fórmula:

$$R = \frac{360 \times 30.48}{2 \times \pi \times \theta} \quad (116)$$

Donde:

R: radio de la curva (m).

$\theta$ : ángulo de la curva en grados decimales.

c. Peralte

Este elemento puede no siempre estar presente y en curvas de gran radio se determinará mediante la fórmula:

$$h = \frac{a \times v^2}{g \times R} \quad (117)$$

Donde:

h: peralte de equilibrio (m).

a: distancia entre ejes de los rieles (m).

v: velocidad (m/s).

g: gravedad (m/s<sup>2</sup>).

R: radio de la curva (m).

O en su forma simplificada:

$$z+I = 0.007 \times \theta \times V^2 \quad (118)$$

Donde:

z+I: peralte de equilibrio (mm).

$\theta$ : ángulo de la curva en grados decimales.

V: velocidad (km/h).

En la Tabla 22: se muestran los peraltes obtenidos en función de la velocidad y el ángulo de la curva, usando la fórmula simplificada:

- Insuficiencia de peralte

Por experiencia de los autores de la norma, los viajantes y vehículos pueden transportarse cómodamente a velocidades que requieran alrededor de 75 mm más que la altura del peralte de equilibrio.

#### d. Curva de transición o espiral

Posibilita el paso gradual de la tangente a la curva previendo la distorsión del equilibrio del vehículo a causa de la fuerza producida por la aceleración centrífuga. AREMA representa la espiral como se muestra en la Figura 50.

Así mismo, AREMA menciona que se puede prescindir de la transición cuando la relación entre longitud de transición y radio de la curva de transición es menor que 0.01.

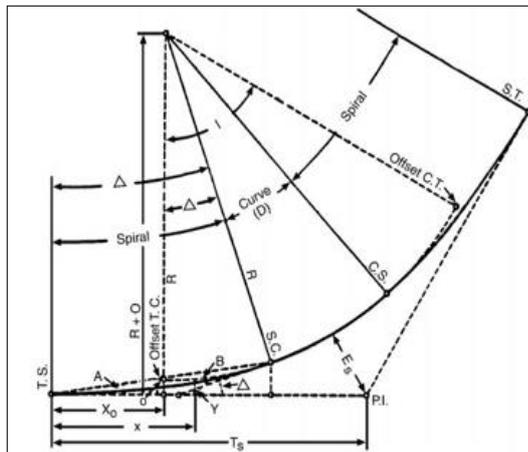


Figura 50: Espiral  
Fuente: "AREMA" (1999)

En vías peraltadas, el desarrollo del peralte será en toda la longitud de la espiral (0 en la tangente y máximo en la entrada a la curva).

- Longitud de la espiral

• La longitud de la espiral para vías reconstruidas o realineadas será

➤ Donde la variación de la aceleración sin compensar no exceda los  $0.30 \text{ m/s}^3$ :

$$L=0.012 \times I \times V \quad (119)$$

Donde:

L: longitud de la espiral (m).

I: insuficiencia de peralte (mm).

V: velocidad (km/h).

La longitud deseable de la espiral para vías sin peraltes será la máxima posible.

- Donde se limiten las fuerzas de tracción y torsión, por ende, la pendiente longitudinal del riel exterior con respecto al interior no excederá de 1/744:

$$L=0.744 \times z \quad (120)$$

Donde:

L: longitud de la espiral (m).

z: altura de peralte (mm).

- Donde la variación de la aceleración sin compensar no exceda los 0.40 m/s<sup>3</sup>, en reemplazo de la fórmula (119):

$$L=0.009 \times I \times V \quad (121)$$

- La longitud de la espiral para vías nuevas

- Para velocidades hasta los 95 km/h y velocidad de ascenso hasta 30.00 mm/s:

$$L=0.0087 \times z \times V \quad (122)$$

- Para velocidades hasta los 125 km/h y velocidad de ascenso hasta 25.00 mm/s:

$$L=0.0095 \times z \times V \quad (123)$$

e. Recta horizontal entre curvas inversas

- Curvas inversas sin curvas transición ni peralte

En caso que la proximidad de dos curvas de giros contrarios no permita el desarrollo de la espiral y que se pueda prescindir del peralte, la introducción de una recta horizontal no será necesaria si las curvas contiguas tienen radios mayores a los 290 m (ángulos menores a los 6°).

Para curvas con radios menores a los 290 m (ángulos mayores a los 6°), se recomiendan los valores de la Tabla 23. Restringiendo, además, el uso de vehículos largos en curvas con radios menores a los 170 m.

Tabla 22: Peralte, velocidad y grados de curva – AREMA

Radio (m)	Grados (°)	Velocidad (km/h)																
		15	30	45	55	60	70	80	85	95	100	110	120	125	135	140	150	160
3490	0°30'	1	3	7	11	13	17	22	25	32	35	42	50	55	64	69	79	90
1745	1°00'	2	6	14	21	25	34	45	51	63	70	85	101	109	128	137	158	179
1160	1°30'	2	9	21	32	38	51	67	76	95	105	127	151	164	191	206	236	269
870	2°00'	3	13	28	42	50	69	90	101	126	140	169	202	219	255	274	315	
695	2°30'	4	16	35	53	63	86	112	126	158	175	212	252	273				
580	3°00'	5	19	43	64	76	103	134	152	190	210	254	302					
495	3°30'	6	22	50	74	88	120	157	177	221	245							
435	4°00'	6	25	57	85	101	137	179	202	253								
345	5°00'	8	32	71	106	126	172	224	253									
290	6°00'	9	38	85	127	151	206	269										
245	7°00'	11	44	99	148	176	240											
215	8°00'	13	50	113	169	202	274											
190	9°00'	14	57	128	191	227												
170	10°00'	16	63	142	212	252												
155	11°00'	17	69	156	233													
145	12°00'	19	76	170	254													

Fuente: Adaptación de AREMA (1999)

Tabla 23: Longitud de tangente entre curvas inversas sin peralte – AREMA

Radio de las curvas inversas (m)	Grado de las curvas inversas (°)	Longitud de recta horizontal recomendado (m)
> 290	< 6°	0
290 – 245	6° - 7°	4
245 – 215	7° - 8°	7
215 – 190	8° - 9°	8
190 – 170	9° - 10°	10
170 – 155	10° - 11°	13
155 – 145	11° - 12°	16
145 – 130	12° - 13°	19

Fuente: Adaptación de AREMA (1999)

- Curvas inversas sin curvas transición ni peralte

Para este caso la longitud mínima de la recta horizontal entre espirales será la longitud del vagón o vehículo más largo que transite por dicha vía.

4.1.3 Alineamiento vertical

Del mismo modo que el alineamiento horizontal, es desarrollado en las partes del manual antes mencionados y las fórmulas descritas han sido transformadas para evitar posteriores errores de cálculo.

a. Rectas de perfil

- Longitud mínima de la recta de perfil

La longitud mínima aceptable estará dada por la fórmula (115):

$$L=0.568 \times V \quad (124)$$

Y la mínima excepcional permitida será de 30 m, pero donde la topografía no lo permita, se debe considerar la longitud del vehículo más largo que transitará en la vía.

- Gradiente o pendiente

Las pendientes de estas rectas pueden alcanzar un máximo excepcional del 4%, siendo el máximo recomendable un 3%. En el caso de trenes ligeros, alcanzan más del 7%,

siendo lo recomendado un 4%. Las pendientes estarán limitadas por la topografía y por la disposición de las estaciones.

b. Curvas de acuerdo verticales

Para líneas de alta velocidad, en curvas cóncavas hacia arriba, la variación de la pendiente cada 30.48 m no debe ser mayor al 0.5‰ y en curvas cóncavas hacia abajo, no debe ser mayor al 1.0‰. Para otras líneas, los valores pueden duplicarse.

En la Figura 51 se muestra el ejemplo de un posible desarrollo de una curva de acuerdo vertical.

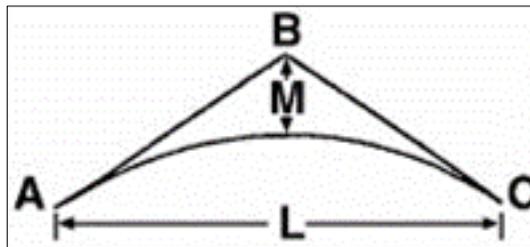


Figura 51: Curva de acuerdo vertical  
Fuente: "AREMA" (1999)

Donde:

L: longitud de la cuerda o arco (m).

$$L = \frac{\text{Diferencia de pendientes de tangentes}}{\text{Variación de la pendiente}} \quad (125)$$

M: externa (m).

Curva cóncava hacia abajo

$$M = \frac{(2 \times \text{ElevB}) - (\text{ElevA} + \text{ElevB})}{4} \quad (126)$$

Curva cóncava hacia arriba

$$M = \frac{(\text{ElevA} + \text{ElevC}) - (2 \times \text{ElevB})}{4} \quad (127)$$

- Radio de la curva de acuerdo vertical

El radio equivalente de una curva de acuerdo vertical se definirá por:

$$R = \frac{L}{D} \quad (128)$$

Donde:

L: longitud de la curva de acuerdo vertical (m).

R: radio equivalente de la curva de acuerdo vertical (m).

D: diferencia de ángulos ( $i_1-i_2$ ) de pendientes de rectas verticales (tanto por uno).

- Longitud de la curva de acuerdo vertical

La longitud mínima aceptable corresponde a 30.48 m (100 pies), aunque de preferencia se sugiere que ésta sea de 60 m.

c. Recta de perfil entre curvas inversas

La longitud mínima estará dada por la fórmula (115):

$$L=0.568 \times V$$

Donde:

L: longitud de la recta (m).

V: velocidad (km/h).

## 4.2 Recomendaciones de Diseño para Proyectos de Infraestructura Ferroviaria – Chile

A cargo del, en ese entonces, Ministerio de Planificación y Cooperación (MIDEPLAN), hoy Ministerio de Desarrollo Social, y de la Secretaria de Planificación de Transporte (SECTRA), estas recomendaciones nacen en abril de 2003 ante el avance creciente y notable de las técnicas y tecnologías ferroviarias, y por las propuestas de ejecución de nuevas líneas y/o la reconstrucción total de otras.

Para la fecha de su creación, Chile no contaba con ninguna norma ferroviaria por lo que tomó como referencia el Manual for Railway Engineering (MRE), que es producto de la AREMA, y este fue adaptado/modificado a su realidad.

El documento mencionado está conformado por 14 secciones, de las cuales, los ítems de interés para el desarrollo de esta tesis son:

- Sección 2: Características del equipo rodante.
- Sección 3: Trazados ferroviarios.

La velocidad de circulación se ubica:

- Sección 2, parte 6 (velocidad de circulación).

Respecto al diseño de la geometría, se concentra en:

- Sección 3, parte 3 (criterios básicos de diseño).
- Sección 3, parte 4 (criterios específicos de diseño).
- Sección 3, parte 5 (trazado geométrico de las vías férreas).
- Sección 3, parte 7 (mejoramiento de trazados existentes).

La versión de las Recomendaciones de Diseño empleada en la presente es la de 2003 y cabe aclarar que la trocha en la que se basan para el diseño es de 1676 mm.

### 4.2.1 Velocidad de Diseño

Al igual que la norma AREMA, este criterio está en función al vehículo o ferrocarril, pero también, en relación al tipo de uso que se le dará y a la geometría de la vía.

### a. Velocidad máxima

Dependerá de las características de la vía y su fórmula general es:

$$v = \sqrt{R \times \left( \frac{z \times g}{a} + a_{csc} \right)} \quad (129)$$

Donde:

v: velocidad (m/s).

R: radio de la curva circular (m).

z: altura de peralte (mm).

g: gravedad (m/s<sup>2</sup>).

a: distancia entre ejes de los rieles (mm).

a<sub>csc</sub>: aceleración centrífuga sin compensar (m/s<sup>2</sup>).

### b. Clasificación de las vías de circulación

La clasificación es según la velocidad máxima de circulación, tal y como se muestra en la Tabla 24:

Tabla 24: Clasificación de las vías de circulación – Chile

Clase	Velocidad máxima (km/h)	
	Trenes de carga	Trenes de pasajeros
A	20	30
B	40	50
C	65	100
D	100	130
E	130	160
F	160	180

Fuente: “Recomendaciones de diseño para proyectos de infraestructura ferroviaria” – Chile (2003)

### c. Velocidad en curvas

Para el diseño de curvas, recomienda las siguientes velocidades:

- Sistemas suburbanos 120 km/h.
- Sistemas de cercanías 160 km/h.
- Sistemas de media distancia 200 km/h.

#### 4.2.2. Alineamiento horizontal

Se mencionó antes que para la elaboración del manual chileno se tomó como referencia el MRE de la AREMA y lo modificarían de acuerdo su realidad.

En esta parte, alineamiento horizontal, se evidencia parte de esa adaptación.

##### a. Rectas horizontales

El referido manual no especifica longitud mínima alguna en este punto.

##### b. Curvas circulares

A diferencia de las normas de la AREMA, en Chile relacionan el grado D de la curva con su radio R y lo expresan con la fórmula:

$$D = \frac{1746}{R} \quad (130)$$

Sin embargo, en la práctica, obtienen el radio R por la relación entre la longitud L de la cuerda con la flecha f de la curva:

$$R = \frac{L^2}{8f} \quad (131)$$

Así mismo, se demuestra que la relación entre el grado D de la curva con su flecha f es:

$$D = 15 \times f \quad (132)$$

##### - Radio mínimo de la curva

En este punto se debe tomar en cuenta que los radios mínimos mencionados son efectivos para la trocha chilena de 1676 mm:

- En vías eclisadas 180 m.
- En vías soldadas 550 m.

Pero luego, en función al punto “c. Velocidad en curva” se señalarán los radios correspondientes a dichas velocidades.

- Ensanche de trocha o sobrealcance

La norma chilena determina que el sobrealcance deber darse en el riel interior y su variación no debe ser mayor a 1 mm/m.

Así mismo, fija valores límites para la aplicación de este elemento que se visualizan en la Tabla 25.

Tabla 25: Sobrealcance en curva – Chile

Radio (m)	Ensanche (mm)
$R \leq 180$	25
$180 < R \leq 300$	20
$300 < R \leq 350$	15
$350 < R \leq 450$	10
$450 < R \leq 550$	5
$550 < R$	0

Fuente: “Recomendaciones de diseño para proyectos de infraestructura ferroviaria” – Chile (2003)

c. Peralte

Del mismo modo que la norma americana, la fórmula para la obtención del peralte de equilibrio está dada por:

$$h = \frac{a \times v^2}{g \times R} \quad (133)$$

Donde:

h: peralte de equilibrio (m).

a: distancia entre ejes de los rieles (m).

v: velocidad (m/s).

g: gravedad (m/s<sup>2</sup>).

R: radio de la curva (m).

El ancho de trocha establecido para el caso chileno es de 1676 mm, entonces, en forma resumida, el peralte teórico  $h_T$  (mm) para dicho ancho será:

$$h_T = 13.7 \times \frac{V^2}{R} \quad (134)$$

Donde:

V: velocidad (km/h).

R: radio (m).

De igual modo, establecen el ancho de su trocha angosta en 1000 mm, para el cual, su peralte teórico  $h_t$  (mm) se obtendrá de:

$$h_t = 8.4 \times \frac{V^2}{R} \quad (135)$$

Para el beneficio de la tesis, se establece el símil y se obtiene el peralte teórico  $h_{Te}$  (mm) para trocha estándar de 1435 mm:

$$h_{Te} = 11.8 \times \frac{V^2}{R} \quad (136)$$

Chile fija para su trocha de 1676 mm, el peralte máximo  $h_{m\acute{a}x}$  permitido hasta 170 mm. Aunque aclara que, en ferrocarriles de mayor velocidad y en trocha estándar (1435 mm), este puede ser de 220 mm o menos de 1/7 de la distancia entre los ejes de los rieles.

#### - Insuficiencia de peralte

Con lo referido en el punto anterior, la norma chilena establece una aceleración sin compensar  $a_{csc}$  no mayor a  $0.4 \text{ m/s}^2$ , quedando la fórmula 14:

$$I = a_{csc} \times \frac{a}{g}$$

Donde:

I: insuficiencia de peralte (mm).

a: distancia entre los ejes de los rieles (mm).

g: gravedad ( $\text{m/s}^2$ ).

Resultando para el caso chileno, donde “a” es 1746 mm para trocha de 1676 mm y 1070 mm para trocha de 1000 mm: 71 mm para trocha 1676 mm y 44 mm para tocha 1000 mm.

De igual modo, haciendo un símil para trocha estándar de 1435 mm, “a” será 1505 mm, resultando una insuficiencia de peralte de 61 mm.

#### - Peralte mínimo

Este valor es el resultado de restar la insuficiencia de peralte máxima permitida al peralte teórico. El peralte mínimo  $h_{m\acute{i}n}$  (mm) se obtendrá de la siguiente expresión:

$$h_{\min} = 13.7 \times \frac{V^2}{R} - 71 \leq h_{\max} \quad (137)$$

Siguiendo con la dinámica, se vuelve a hacer un símil para la trocha estándar, resultando:

$$h_{\min} = 11.8 \times \frac{V^2}{R} - 61 \leq h_{\max} \quad (138)$$

Entonces, la norma chilena explica que, si el peralte empleado es el máximo, la velocidad que se puede desarrollar en la curva será:

$$V_{\max} = 4.2 \times \sqrt{R} \quad (139)$$

Nuevamente, realizando el mismo procedimiento para la trocha estándar:

$$V_{\max} = 4.4 \times \sqrt{R} \quad (140)$$

Obteniendo los siguientes radios para las velocidades recomendadas anteriormente en el punto “c. Velocidad en curva”:

- Sistemas suburbanos            850 m            (890 m trocha de 1435 mm).
- Sistemas de cercanías            1500 m            (1570 m trocha de 1435 mm).
- Sistemas de media distancia    2300 m            (2410 m trocha de 1435 mm).
- Sistemas de alta velocidad    7000 m            (7330 m trocha de 1435 mm).

#### d. Curva de transición o de acordamiento

El manual chileno dispone que se ejecutará la curva de transición si se cumple la relación:

$$R < \frac{V^2}{5.2} \quad (141)$$

Donde:

R: radio de la curva circular (m).

V: velocidad (km/h).

Una vez determinado el desarrollo de la transición, ésta se diseña con la ecuación de la de la parábola cúbica dada por la expresión:

$$y = \frac{x^3}{6RL_T} \quad (142)$$

La norma chilena acepta curvas de otro tipo además de la parábola cúbica o la clotoide, sin embargo, cuando la longitud de la transición  $L_T$  es mayor a 80 m, debe usarse la mencionada.

- Longitud de la transición

Estará limitada por la rampa de peralte que, de acuerdo a la velocidad en la curva para evitar el descarrilamiento, estará entre 0.5 mm/m y 2.5 mm/m.

Por lo anterior, fijan la longitud normal de la transición:

$$L_T = 0.009 \times V \times h \quad (143)$$

Donde:

$L_T$ : longitud de la curva de transición (m).

$V$ : velocidad (km/h).

$h$ : altura de peralte (mm).

e. Velocidades en función del peralte y el radio de la curva

La Tabla 26 da velocidades para determinados radios de curva y peraltes de equilibrio para la trocha chilena y para practicidad en la comparación, se agrega la Tabla 27 para trocha estándar con la ecuación correspondiente a la trocha estándar. Ésta será:

$$V_{\text{máx}} = \sqrt{\frac{h_{\text{mín}} + 61}{11.8} \times R} \quad (144)$$

Donde:

$V$ : velocidad (km/h).

$h_{\text{mín}}$ : peralte mínimo (mm).

$R$ : radio de la curva (m)

f. Tramos rectos entre curvas sucesivas

No se recomienda la unión directa de dos curvas con sentidos contrarios, por ello se requiere siempre de una recta intermedia. La longitud mínima de dicha recta será 30 m o el equivalente a la novena parte de la velocidad. Excepcionalmente para curvas de radio menor o igual a 300 m, la longitud mínima será 15 m.

Tabla 26: Velocidad, radio de curva y peralte para trocha de 1676 mm – Chile

Radio (m)	Peralte (mm)																	
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170
180	31	33	35	36	38	40	41	43	45	46	47	49	50	51	53	54	55	56
200	32	34	36	38	40	42	44	45	47	48	50	51	53	54	56	57	58	59
250	36	38	41	43	45	47	49	51	52	54	56	57	59	61	62	64	65	66
300	39	42	45	47	49	51	54	56	58	59	61	63	65	66	68	70	71	73
350	43	45	48	51	53	56	58	60	62	64	66	68	70	72	73	75	77	78
400	46	49	52	54	57	59	62	64	66	69	71	73	75	77	78	80	82	84
450	48	52	55	58	60	63	66	68	70	73	75	77	79	81	83	85	87	89
500	51	54	58	61	64	66	69	72	74	77	79	81	83	86	88	90	92	94
550	53	57	60	64	67	70	73	75	78	80	83	85	88	90	92	94	96	98
600	56	60	63	67	70	73	76	79	81	84	87	89	91	94	96	98	101	103
650	58	62	66	69	73	76	79	82	85	87	90	93	95	98	100	102	105	107
700	60	64	68	72	75	79	82	85	88	91	93	96	99	101	104	106	109	111
750	62	67	71	74	78	81	85	88	91	94	97	100	102	105	107	110	112	115
800	64	69	73	77	81	84	87	91	94	97	100	103	106	108	111	114	116	119
850	66	71	75	79	83	87	90	94	97	100	103	106	109	112	114	117	120	122
900	68	73	77	81	85	89	93	96	100	103	106	109	112	115	118	120	123	126
1000	72	77	82	86	90	94	98	101	105	108	112	115	118	121	124	127	130	133
1100	76	81	85	90	94	99	103	106	110	114	117	121	124	127	130	133	136	139
1200	79	84	89	94	99	103	107	111	115	119	122	126	129	133	136	139	142	145
1300	82	88	93	98	103	107	111	116	120	124	127	131	135	138	141	145	148	151
1400	85	91	96	102	107	111	116	120	124	128	132	136	140	143	147	150	154	157
1500	88	94	100	105	110	115	120	124	129	133	137	141	145	148	152	156	159	162
1600	91	97	103	109	114	119	124	128	133	137	141	145	149	153	157	161	164	168
1700	94	100	106	112	117	123	127	132	137	141	146	150	154	158	162	166	169	173

Fuente: “Recomendaciones de diseño para proyectos de infraestructura ferroviaria” – Chile (2003)

Tabla 26: Velocidad, radio de curva y peralte para trocha de 1676 mm – Chile (continuación)

Radio (m)	Peralte (mm)																	
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170
1800	97	103	109	115	121	126	131	136	141	145	150	154	158	163	167	170	174	178
1900	99	106	112	118	124	130	135	140	145	149	154	158	163	167	171	175	179	
2000	102	109	115	121	127	133	138	143	148	153	158	163	167	171	176	180		
2100	104	111	118	124	130	136	142	147	152	157	162	167	171	176	180			
2200	107	114	121	127	134	139	145	150	156	161	166	170	175	180				
2300	109	117	124	130	137	143	148	154	159	164	169	174	179					
2400	112	119	126	133	139	146	151	157	163	168	173	178						
2500	114	122	129	136	142	149	155	160	166	171	177							
2600	116	124	131	138	145	152	158	164	169	175	180							
2700	118	126	134	141	148	154	161	167	173	178								
2800	120	129	136	144	151	157	164	170	176									
2900	123	131	139	146	153	160	167	173	179									
3000	125	133	141	149	156	163	169	176										
3100	127	135	143	151	158	165	172	179										
3200	129	138	146	154	161	168	175											
3300	131	140	148	156	164	171	178											
3400	133	142	150	158	166	173	180											
3500	135	144	152	161	168	176												

$$V_{\text{máx}} = \sqrt{\frac{h_{\text{min}} + 71}{13,7}} \times R$$

Fuente: “Recomendaciones de diseño para proyectos de infraestructura ferroviaria” – Chile (2003)

Tabla 27: Velocidad, radio de curva y peralte para trocha de 1435 mm – Chile

Radio (m)	Peralte (mm)																	
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170
180	31	33	35	37	39	41	43	45	46	48	50	51	53	54	55	57	58	59
200	32	35	37	39	41	43	45	47	49	51	52	54	55	57	58	60	61	63
250	36	39	41	44	46	48	51	53	55	57	58	60	62	64	65	67	68	70
300	39	42	45	48	51	53	55	58	60	62	64	66	68	70	71	73	75	77
350	43	46	49	52	55	57	60	62	65	67	69	71	73	75	77	79	81	83
400	45	49	52	56	59	61	64	67	69	72	74	76	78	80	83	85	87	88
450	48	52	56	59	62	65	68	71	73	76	78	81	83	85	88	90	92	94
500	51	55	59	62	65	69	72	75	77	80	83	85	88	90	92	95	97	99
550	53	58	61	65	69	72	75	78	81	84	87	89	92	94	97	99	101	104
600	56	60	64	68	72	75	78	82	85	88	90	93	96	99	101	104	106	108
650	58	63	67	71	75	78	82	85	88	91	94	97	100	103	105	108	110	113
700	60	65	69	73	77	81	85	88	91	95	98	101	104	106	109	112	114	117
750	62	67	72	76	80	84	88	91	95	98	101	104	107	110	113	116	119	121
800	64	69	74	79	83	87	91	94	98	101	104	108	111	114	117	120	122	125
850	66	72	76	81	85	89	93	97	101	104	108	111	114	117	120	123	126	129
900	68	74	79	83	88	92	96	100	104	107	111	114	117	121	124	127	130	133
1000	72	78	83	88	93	97	101	105	109	113	117	120	124	127	131	134	137	140
1100	75	81	87	92	97	102	106	111	115	119	123	126	130	133	137	140	144	147
1200	79	85	91	96	101	106	111	115	120	124	128	132	136	139	143	146	150	153
1300	82	88	94	100	105	111	115	120	125	129	133	137	141	145	149	152	156	160
1400	85	92	98	104	109	115	120	125	129	134	138	142	147	151	154	158	162	166
1500	88	95	101	108	113	119	124	129	134	139	143	147	152	156	160	164	168	171
1600	91	98	105	111	117	123	128	133	138	143	148	152	157	161	165	169	173	177
1700	94	101	108	114	121	126	132	137	143	147	152	157	161	166	170	174	178	182

Fuente: Adaptación de las “Recomendaciones de diseño para proyectos de infraestructura ferroviaria” – Chile (2003)

Tabla 27: Velocidad, radio de curva y peralte para trocha de 1435 mm – Chile (continuación)

Radio (m)	Peralte (mm)																	
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170
1800	96	104	111	118	124	130	136	141	147	152	157	162	166	171	175	179	184	188
1900	99	107	114	121	128	134	140	145	151	156	161	166	171	175	180	184	189	
2000	102	110	117	124	131	137	143	149	155	160	165	170	175	180	185	189		
2100	104	112	120	127	134	141	147	153	158	164	169	174	179	184	189			
2200	107	115	123	130	137	144	150	156	162	168	173	179	184	189				
2300	109	118	126	133	140	147	154	160	166	172	177	183	188					
2400	111	120	128	136	143	150	157	163	169	175	181	186						
2500	114	123	131	139	146	153	160	167	173	179	185							
2600	116	125	134	142	149	156	163	170	176	182	188							
2700	118	127	136	144	152	159	166	173	180	186								
2800	120	130	139	147	155	162	169	176	183									
2900	122	132	141	150	158	165	172	179	186									
3000	125	134	144	152	160	168	175	182										
3100	127	137	146	155	163	171	178	186										
3200	129	139	148	157	165	173	181											
3300	131	141	151	160	168	176	184											
3400	133	143	153	162	171	179	187											
3500	135	145	155	164	173	181												

$$V_{\max} = \sqrt{\frac{h_{\min} + 61}{11,8}} \times R$$

Fuente: Adaptación de las “Recomendaciones de diseño para proyectos de infraestructura ferroviaria” – Chile (2003)

## g. Entrevía

El manual chileno muestra en la Tabla 28 las distancias mínimas de entrevía de acuerdo a su clasificación de vías.

Tabla 28: Distancia mínima de entrevía – Chile

Radio (m)	Vías				
	Clase A	Clase B y C	Clase D y E	Clase F	Desvíos
$500 \leq R$	4,60	4,60	4,60	4,70	4,00
$400 \leq R < 500$	4,60	4,60	4,65	4,80	
$300 \leq R < 400$	4,80	4,80	4,90		4,30
$R < 300$	4,80	4,90	4,90		

Fuente: “Recomendaciones de diseño para proyectos de infraestructura ferroviaria” – Chile (2003)

### 4.2.3. Alineamiento vertical

#### a. Rectas de perfil

##### - Longitud mínima de la recta de perfil

El referido manual no especifica longitud mínima alguna en este punto.

##### - Gradiente o pendiente

Se fijan los límites en vías exclusivas para pasajeros, las rampas no deben pasar el 3.0%, y en vías mixtas, el 1.5%. En general, la pendiente máxima en vías será 2.5% y en estaciones, 0.25%.

#### b. Curvas de acuerdo verticales

Se exige su uso cuando la diferencia entre las inclinaciones de rampas continuas es más del 6%. Los acuerdos verticales serán cóncavos o convexos y se relacionarán con la velocidad mediante la expresión:

$$R_V = V^2 \quad (145)$$

Donde:

$R_V$ : radio de la curva de acuerdo vertical (m).

V: velocidad (km/h).

De igual modo, en caso no se pueda cumplir con lo anterior, el radio mínimo exigido es:

$$R_v \geq \frac{V^2}{4} \geq 2000 \quad (146)$$

La Tabla 29 muestra valores mínimos que deben adoptar los proyectistas:

Tabla 29: Radios mínimos de curvas de acuerdo – Chile

Velocidad (km/h)	Radio (m)
50	2000
130	5000
180	10000

Fuente: “Recomendaciones de diseño para proyectos de infraestructura ferroviaria” – Chile (2003)

#### 4.3 Normas de la Red Nacional de Ferrocarriles Españoles o RENFE Vía (NRV) e Instrucciones Generales para los Proyectos de Plataforma (IGP) – España

39 años después de fundada la Red nacional de ferrocarriles españoles (1941), dicha entidad crea las NRV (1980) a partir de la necesidad de mejorar sus técnicas y materiales empleados en su red ferroviaria.

Posteriormente, el 1 de enero de 2005, el Ministerio de Fomento divide la RENFE en dos nuevas administraciones:

- Renfe Operadora, ahora encargada de las operaciones de los ferrocarriles.
- ADIF (Administrador de Infraestructuras Ferroviarias), como se entiende por su nombre, encargada de la infraestructura ferroviaria.

El ADIF elabora las IGP basándose en la documentación producida por la extinta RENFE. Estas instrucciones están conformadas por 5 tomos, de los cuales, para interés de esta tesis, no centraremos en el tomo III.

- Tomo III: Instrucciones y Recomendaciones para la Redacción de Proyectos de Plataforma.

A su vez, debido a las referencias hacia las NRV, también se revisarán las normas:

- N.R.V.0-2-0.0 Geometría de la vía. Parámetros geométricos. 1ra edición 31/01/1988
- N.R.V.0-2-0.1 Geometría de la vía. Parámetros geométricos de nuevas líneas en ancho internacional. 1ra edición 01/05/1989

La trocha española establecida es de 1668 mm, sin embargo, por ser parte de la Comunidad Europea y de la Unión Internacional de Ferrocarriles (UIC), también deben considerar el ancho internacional de 1435 mm al normar.

La versión de las IGP revisada es del 2011. Se exponen a continuación las tablas elaboradas por las entidades españolas responsables del transporte ferroviario.

##### 4.3.1 N.R.V.0-2-0.0 Geometría de la vía. Parámetros geométricos

Los parámetros geométricos normados para la trocha de 1668 mm adoptada por España se muestran en la Tabla 30.

Tabla 30: Parámetros geométricos para trocha de 1668 mm – España

Parámetros Geométricos				
Velocidad (km/h)	140	160	200	250
Entrevía (m) - En estaciones	3,808 – 3,920	3,92 – 40	4,0 – 4,3	4,3
	4,9 – 5,3	5,3- 6,0	6,0	6,0
Rampa (%)	2,0	1,5 – 2,0	1,25 – 1,50	1,25
Radio mínimo (m)	1000	1300	2000 – 2300	3120 – 4000
Peralte teórico (mm)	$13.7 \times \frac{V^2}{R}$			
Peralte máximo (mm)	160			
Curva de transición	Clotoide			
Insuficiencia de peralte (mm)	115			
Exceso de peralte (mm)	80	80	60	60
Velocidad mínima (km/h)	60 – 75	70 – 90	80 – 100	100 – 130
Diagrama de peralte en transición	Lineal			
Longitud de la transición (m)	Normal $7.94 \times V \times h \times 10^{-3}$ ó $9.26 \times V \times I \times 10^{-3}$			
	Mínimo $6.18 \times V \times h \times 10^{-3}$ $7.94 \times V \times I \times 10^{-3}$			
Acuerdo vertical	Circular o parabólico			
Radio mínimo de acuerdo (m)	3800 – 5100	4900 – 6600	10000 – 16000	16000 – 24000
Longitud mínima del acuerdo (m)	70	80	100	100
Distancia mínima entre acuerdos (m)	70	80	100	100
Longitud mínima entre curvas (m)	60 – 80	65 – 90	80 – 110	100 – 140

Fuente: RNV (1988)

#### 4.3.2 N.R.V.0-2-0.1 Geometría de la vía. Parámetros geométricos de nuevas líneas en ancho internacional

Los parámetros geométricos normados por las entidades españolas para la trocha estándar se muestran en la Tabla 31.

Tabla 31: Parámetros geométricos para trocha de estándar – España

Parámetros Geométricos				
Velocidad (km/h)	160	200	250	300
Entrevía (m) - En estaciones	4,0	4,3		4,8
	5,0		5,1	
Rampa (%)	2,0		2,0 – 2,5	

Fuente: NRV (1989)

Tabla 31: Parámetros geométricos para trocha de estándar – España (continuación)

Parámetros Geométricos				
Velocidad (km/h)	160	200	250	300
Radio mínimo (m)	1400	2100	3300	4700
Peralte teórico (mm)	$11,8 \times \frac{V^2}{R}$			
Peralte máximo (mm)	160			
Curva de transición	Clotoide			
Insuficiencia de peralte (mm)	80			
Exceso de peralte (mm)	60			
Velocidad mínima (km/h)	80 – 110	100 – 140	130 – 170	160 – 200
Diagrama de peralte en transición	Lineal			
Longitud de la transición (m)	Normal $4,2 \times V \times h \times 10^{-3}$ ó $18,6 \times V \times I \times 10^{-3}$			
	Mínimo $4,2 \times V \times h \times 10^{-3}$ ó $11,4 \times V \times I \times 10^{-3}$			
Acuerdo vertical	Circular			
Radio mínimo de acuerdo (m)	5000 – 8000	7000 – 125000	12000 – 195000	17400 – 28000
Longitud mínima del acuerdo (m)	80	100	125	150
Longitud mínima entre acuerdos (m)	80	100	125	150
Longitud mínima entre curvas (m)	65 – 90	80 – 110	100 – 140	120 – 170

Fuente: NRV (1989)

#### 4.3.3 Parámetros de diseño de trazado para líneas de ancho internacional

La Tabla 32 muestra los parámetros establecidos por las IGP para el de diseño geométrico para vías de trocha UIC o internacional de 1435 mm.

Tabla 32: Parámetros funcionales y geométricos para trocha estándar – España

Parámetros Geométricos					
Velocidad (km/h)	$000 \leq V < 140$	$140 \leq V < 200$	$200 \leq V < 250$	$250 \leq V < 300$	$300 \leq V < 350$
Rampa en vías de pasajeros (%)	2,5 – 3,0				
Rampa en vías mixtas (%)	1,5 – 1,8				
Longitud máxima de recta con pendiente máxima (m)	3000				
Peralte teórico (mm)	$11,85 \frac{V^2}{R}$				
Peralte máximo (mm)	140 – 160				
Insuficiencia de peralte (mm)	100	80	70	60	

Fuente: Adaptación IGP – ADIF (2011)

Tabla 32: Parámetros funcionales y geométricos para trocha estándar – España (continuación)

Parámetros Geométricos					
Velocidad (km/h)	$000 \leq V < 140$	$140 \leq V < 200$	$200 \leq V < 250$	$250 \leq V < 300$	$300 \leq V < 350$
Exceso de peralte (mm)	80				
Longitud mínima del acuerdo (m)	$\geq \frac{V_{\text{máx}}}{3}$	$\geq \frac{V_{\text{máx}}}{2}$	$\geq \frac{V_{\text{máx}}}{1.5}$		
Longitud mínima entre acuerdos (m)	$\geq \frac{V_{\text{máx}}}{3}$	$\geq \frac{V_{\text{máx}}}{2}$	$\geq \frac{V_{\text{máx}}}{1.5}$		
Longitud mínima de la curva (m)	$\geq \frac{V_{\text{máx}}}{3}$	$\geq \frac{V_{\text{máx}}}{2}$	$\geq \frac{V_{\text{máx}}}{1.5}$		
Longitud mínima entre curvas (m)	$\geq \frac{V_{\text{máx}}}{3}$	$\geq \frac{V_{\text{máx}}}{2}$	$\geq \frac{V_{\text{máx}}}{1.5}$		

Fuente: Adaptación IGP – ADIF (2011)

#### a. Geometría del trazado para distintas velocidades

Finalmente, la Tabla 33 muestra parámetros geométricos mínimos en función de distintas velocidades de operación o diseño. Aplicables para vías de trocha de 1435 mm.

Tabla 33: Geometría del trazado para distintas velocidades – España

V <sub>máx</sub> (km/h)	V <sub>mín</sub> (km/h)	Radio mínimo de curva (m)		Longitud mínima de clotoide (m)		Radio mínimo del acuerdo (m)	
		Normal	Excepcional	Normal	Excepcional	Normal	Excepcional
140	75	1000	750	190	160	7000	5000
150	80	1125	900	200	160	8000	5900
160	85	1275	1000	210	160	9000	6300
170	90	1450	1110	220	160	10000	7100
180	95	1600	1250	240	160	11500	8000
190	100	1800	1400	250	170	12500	8900
200	105	2200	1850	280	180	15000	8900
210	110	2400	2050	280	190	16000	9600
220	115	2600	2200	290	200	17000	10600
230	120	2850	2450	300	210	19000	11500
240	125	3100	2650	320	220	21000	12600
250	135	3550	3100	330	230	22000	12600
260	140	3850	3350	340	240	24000	13600
270	145	4150	3600	350	240	26000	14300
280	150	4450	3900	370	250	28000	15400
290	155	4750	4200	380	260	30000	16500
300	165	5350	4750	390	270	32000	16500
310	170	5700	5100	410	280	34000	17000
320	175	6100	5400	420	290	36000	18000
330	180	6500	5750	430	300	39000	20000
340	185	6850	6100	450	310	41000	21000
350	190	7250	6500	460	320	45000	25000

Fuente: IGP – ADIF (2011)

#### 4.4 Manual de Normatividad Férrea – Colombia

Elaborada en el año 2013, producto de los objetivos trazados por el Ministerio de Transporte de Colombia en su “Estudio para la elaboración del marco normativo férreo colombiano enfocado en factores técnicos de diseño, construcción, mantenimiento, operación, control y aspectos de seguridad” del año 2012.

El referido manual está basado en el manual de la AREMA y está dividida en 2 partes:

- Parte I: Definición de aspectos técnicos de diseño, construcción, operación, control y seguridad.
- Parte II: Definición de aspectos técnicos de mantenimiento y seguridad ferroviaria.

Y los puntos o criterios (velocidad, alineamiento horizontal y alineamiento vertical) que son de interés de esta tesis se encuentran en:

- Parte I, Capítulo 2 (especificaciones de diseño), Subcapítulo 1 (especificaciones de trazado).

Es necesario aclarar que la versión de la norma que se revisará es del 2013 y que emplea los dos sistemas de unidades (inglés e internacional), por lo que se transformarán todas las unidades que sean necesarias al Sistema Internacional.

##### 4.4.1 Velocidad de diseño

De manera similar al manual de la AREMA, no se especifican velocidades límites. Pero, se da la siguiente relación:

$$V = \sqrt{\frac{z+I}{0.007 \times \theta}} \quad (147)$$

Donde:

V: velocidad de diseño (km/h).

z: altura de peralte (mm).

I: insuficiencia de peralte (mm).

$\theta$ : ángulo de la curva (grados decimales).

En la Tabla 34 se muestran velocidades que se pueden emplear.

#### 4.4.2 Alineamiento horizontal

##### a. Rectas horizontales

El manual colombiano no hace referencia sobre longitudes mínimas de rectas horizontales en alineamiento horizontal. Sin embargo, considera que ante cualquier consulta se debe recurrir al manual de la AREMA que dictamina que la longitud mínima excepcional permitida será la longitud del vagón más largo.

##### b. Curvas circulares

Del mismo modo que el manual de la AREMA, están definidas por su arco y especificadas por su ángulo. Para su transformación se emplea la fórmula (116) ya mencionada:

$$R = \frac{360 \times 30.48}{2 \times \pi \times \theta}$$

Donde:

R: radio de la curva (m).

$\theta$ : ángulo de la curva en grados decimales.

El manual también determina que el radio mínimo de toda curva en vías ordinarias será de 160 m. En la Tabla 34 se muestran radios de curvas que se pueden emplear.

##### - Sobreancho de vía

La normativa colombiana establece la aplicación del sobreancho en las curvas:

- Para líneas donde solo circule material rodante con dos ejes:

$$S_{\text{máx}} = \frac{B^2}{2 \times R} - \eta \quad (148)$$

Donde:

S: sobreancho (m).

B: distancia máxima entre ejes del vehículo (m).

R: radio de la curva (m).

$\eta$ : movimiento tolerado entre rueda y carril (m).

➤ Para líneas donde solo circule material rodante con más de dos ejes:

$$S_{\text{máx}} = \frac{9 \times B^2}{2 \times R} - \eta \quad (149)$$

El valor máximo del sobreancho será de 25 mm para trocha estándar y de 19 mm para trocha angosta, y la disminución del sobreancho se dará gradualmente por la curva de transición.

### c. Peralte

Para el caso de este elemento, se copia lo descrito por la AREMA, entonces, el peralte de equilibrio será dado por la fórmula (117):

$$h = \frac{a \times v^2}{g \times R}$$

Donde:

h: peralte de equilibrio (m).

a: distancia entre ejes de los rieles (m).

v: velocidad (m/s).

g: gravedad (m/s<sup>2</sup>).

R: radio de la curva (m).

O en su forma simplificada mostrada en fórmula (118):

$$z+I = 0.007 \times \theta \times V^2$$

Donde:

z+I: peralte de equilibrio (mm).

θ: ángulo de la curva en grados decimales.

V: velocidad (km/h).

La Tabla 34 muestra los peraltes obtenidos en función a la velocidad y el ángulo de curvatura. Donde el peralte está expresado en múltiplos de 6.35 mm.

### - Peralte máximo

En función a su velocidad, la altura del peralte podrá ser de 50 mm y 100 mm, siendo el máximo permitido de 150 mm.

- Insuficiencia de peralte

En el manual se menciona que, por experiencia, se fija la máxima insuficiencia de peralte hasta los 75 mm.

d. Curva de transición o espiral

La norma colombiana permite el empleo de distintas transiciones, siendo las más usadas tres alternativas: la clotoide, la parábola cúbica y la espiral. La representación de la transición se muestra en la Figura 52.

➤ La clotoide:

$$A^2=R \times L \quad (150)$$

Donde:

A: constante de la clotoide (m).

R: radio de la clotoide (m).

L: longitud de la clotoide (m)

➤ La parábola cúbica:

$$y=\frac{x^2}{R \times L} \quad (151)$$

Donde:

R: radio de la curva circular (m).

L: longitud de la curva de transición (m)

➤ La espiral:

$$R=a+b \times \theta^{1/x} \quad (152)$$

Donde:

R: radio de la curva.

a, b, x: constantes de la curva espiral. Si  $x=1$ , entonces espiral de Arquímedes.

$\theta$ : ángulo en radianes.

- Longitud de la curva de transición

La expresión para obtener la longitud mínima de la transición está tomada de la AREMA, y no se hace distinción para la longitud de la transición en vías nuevas:

- Donde la variación de la aceleración sin compensar no exceda los  $0.30 \text{ m/s}^3$  mostrada en la fórmula (119):

$$L_T = 0.012 \times I \times V$$

- Donde se limiten las fuerzas de tracción y torsión, por ende, la pendiente longitudinal del riel exterior con respecto al interior no excederá de  $1/744$  mostrada en la fórmula (120):

$$L_T = 0.744 \times z$$

- Donde la variación de la aceleración sin compensar no exceda los  $0.40 \text{ m/s}^3$ , en reemplazo de la ecuación (119), como se muestra en la fórmula (121):

$$L_T = 0.009 \times I \times V$$

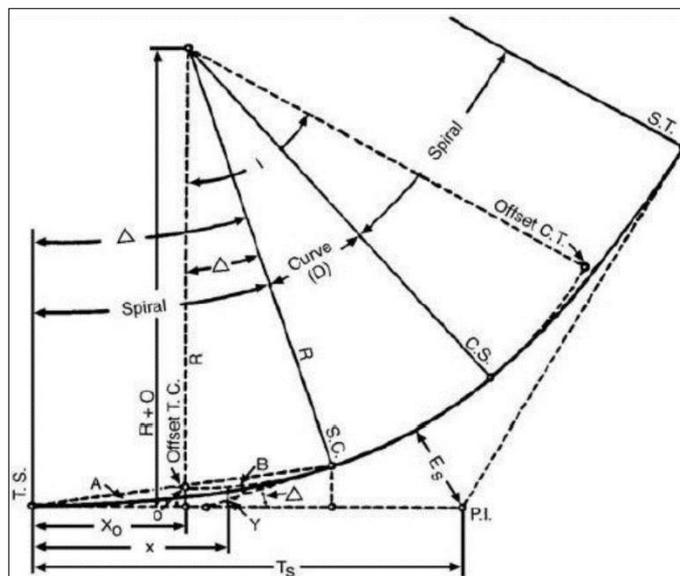


Figura 52: Curva de transición – Norma de Colombia  
Fuente: “Manual de normatividad férrea” (parte I) de Colombia

Tabla 34: Peralte, velocidad y grados de curva – Colombia

Radio (m)	Grados	Velocidad (km/h)																		
		15	20	30	40	45	55	60	70	80	85	95	100	110	120	125	135	140	150	160
3490	0°30'	6	6	6	6	13	13	13	19	25	25	32	38	44	51	57	70	70	83	95
1745	1°00'	6	6	6	13	19	25	25	38	51	51	64	76	89	102	114				
1160	1°30'	6	6	13	19	25	38	38	57	70	76	95	108							
870	2°00'	6	6	13	25	32	44	51	70	95	102									
695	2°30'	6	13	19	32	38	57	64	89	114										
580	3°00'	6	13	19	38	44	70	76	108											
495	3°30'	6	13	25	44	51	76	89	121											
435	4°00'	6	13	25	51	57	89	102												
385	4°30'	13	13	32	51	70	102													
345	5°00'	13	19	32	57	76	108													
315	5°30'	13	19	38	64	83	121													
290	6°00'	13	19	38	70	89														
265	6°30'	13	19	44	76	95														
245	7°00'	13	25	44	83	102														
230	7°30'	13	25	51	89	108														
215	8°00'	13	25	51	95															
190	9°00'	19	25	57	102															
170	10°00'	19	32	64	114															
155	11°00'	19	32	70	127															
145	12°00'	19	38	76																

$$z=0.007 \times \theta \times V^2$$

Fuente: Adaptación del “Manual de normatividad férrea” (parte I) de Colombia (2013)

#### 4.4.3 Alineamiento vertical

##### a. Rectas de perfil

###### - Longitud mínima de la recta de perfil

La normativa colombiana estipula que la longitud mínima de la recta entre acuerdos verticales no debe ser menor a 30 m.

###### - Gradiente o pendiente

Ésta dependerá del empleo que se le dé a la vía, la pendiente máxima será:

- Líneas de carga de mercancías      2.5%
- Líneas de pasajeros                      3.5%

En desvíos la máxima será de 2.5% y en estaciones, 0.3%.

##### b. Curva de acuerdo vertical

La norma específica que se hará uso de este elemento cuando se deban unir rectas con diferentes pendientes o gradientes, aún si estas diferencias son mínimas.

###### - Radio de la curva de acuerdo vertical

No se señala, dentro del documento, la obligación de radios mínimos. Mencionan que ante cualquier consulta se deberá recurrir al manual de la AREMA.

###### - Longitud de la curva de acuerdo vertical

La longitud del acuerdo estará dada en función a distintas variables y está expresada por:

$$L = \frac{D \times V^2}{a_v \times 3.6^2} \quad (153)$$

Donde:

L: longitud del acuerdo (m).

D: diferencia de pendientes (tanto por uno).

V: velocidad (km/h).

$a_v$ : aceleración vertical (m/s).

Trenes de pasajeros:  $0.03 \text{ m/s}^2$ .

Trenes de carga:  $0.18 \text{ m/s}^2$ .

La longitud mínima del acuerdo será 30.48 m (100 pies), similar a lo recomendado por la AREMA.

#### 4.5 Rules Respecting Track Safety (TC E-54) – Canadá

Con más de 41 mil kilómetros de vías férreas, Canadá cuenta con la tercera red ferroviaria más grande del mundo. Ello conlleva a que el departamento de transporte canadiense desarrolle e implemente políticas y regulaciones en la Ley de Seguridad Ferroviaria.

La legislación sobre seguridad ferroviaria ha sido revisada 4 veces desde su creación en 1989, siendo la más reciente entre los años 2017 y 2018. (Gobierno de Canadá, 2019)

El reglamento mencionado está dividido en 2 partes:

- Parte I: Generalidades.
- Parte II: Reglas de seguridad ferroviaria.

En lo que respecta para el interés de esta tesis, los ítems a revisar se encuentran en:

- Parte II, Subparte A (Clasificación de la vía).
- Parte II, Subparte C (Geometría de la vía).

Una observación importante es notar que no se encuentra información relacionada al alineamiento vertical. Por consiguiente, solo se revisan los criterios de velocidad y alineamiento horizontal.

La versión del documento revisado es del 2012 y las unidades en Sistema Inglés serán convertidas al Sistema Internacional. Además, el ancho de trocha establecido por las autoridades canadienses será el de 1435 mm (estándar).

##### 4.5.1 Velocidad de diseño

La velocidad de diseño se podrá seleccionar de la Tabla 35, donde se clasifican las vías en función a la mayor velocidad del ferrocarril que transite por ella.

###### a. Clasificación de las vías de circulación

La clasificación es según la velocidad máxima de circulación, tal y como se muestra en la Tabla 35:

Tabla 35: Clasificación de vías de circulación – Canadá

Clasificación de vía	Trenes de carga (km/h)	Trenes de pasajeros (km/h)
Clase 1	15	20
Clase 2	40	45
Clase 3	60	95
Clase 4	95	125
Clase 5	125	150

Fuente: TC E-54 – Canadá (2012, p.10)

De igual modo, la velocidad máxima está relacionada con el peralte y la curva circular y está dada por la fórmula (147):

$$V = \sqrt{\frac{z+I}{0.007 \times \theta}}$$

Donde:

V: velocidad de operación (km/h).

z: altura de peralte  $\leq 150$  (mm).

I: insuficiencia de peralte = 75 (mm).

$\theta$ : ángulo de la curva circular (grados decimales).

En la Tabla 36 se muestran velocidades obtenidas de dicha expresión.

#### 4.5.2 Alineamiento horizontal

##### a. Rectas horizontales

Las rectas horizontales tendrán una longitud mínima de 19 m (62 pies).

##### a. Curvas circulares

###### - Radio de la curva

Respecto al radio, las curvas están definidas por el ángulo de su curvatura. Entonces para identificar la longitud de sus radios se emplea la fórmula (116) ya mencionada:

$$R = \frac{360 \times 30.48}{2 \times \pi \times \theta}$$

Donde:

R: radio de la curva (m).

$\theta$ : ángulo de la curva en grados decimales.

La Tabla 36 muestra radios de curvas obtenidos mediante la fórmula descrita.

- Longitud de la curva

La longitud mínima de la curva no será menor a 47 m (155 pies).

c. Peralte

El peralte máximo recomendado es de 150 mm, excepcionalmente será de 175 mm, mientras que la insuficiencia de peralte se limita hasta los 75 mm. Los peraltes que excedan el máximo recomendando deberán ser monitoreados con la finalidad de reducirlos.

La Tabla 36 muestra las alturas de peralte permitidas.

d. Transición

Se emplearán espirales cuya longitud permitirá el desarrollo del peralte, donde su altura será 0 en la tangente y máxima en el empalme con la curva circular, siendo la rampa de peralte 2.5 mm/m. Entonces:

$$L = \frac{z}{2.5} \quad (154)$$

Donde:

L: longitud mínima de la espiral (m).

z: altura de peralte (mm).

Tabla 36: Velocidad, peralte y ángulos de curvas – Canadá

Radio (m)	Grados (°)	Peralte (mm)												
		0	10	25	35	50	60	75	85	100	110	125	135	150
3490	0°30'	146	156	169	177	189	196	207	214	224	230	239	245	254
1745	1°00'	104	110	120	125	134	139	146	151	158	163	169	173	179
1395	1°15'	93	99	107	112	120	124	131	135	141	145	151	155	160
1160	1°30'	85	90	98	102	109	113	120	123	129	133	138	141	146
995	1°45'	78	83	90	95	101	105	111	114	120	123	128	131	136
870	2°00'	73	78	85	89	94	98	104	107	112	115	120	122	127
775	2°15'	69	73	80	84	89	93	98	101	105	108	113	115	120
695	2°30'	65	70	76	79	85	88	93	96	100	103	107	110	113
635	2°45'	62	66	72	76	81	84	88	91	95	98	102	104	108
580	3°00'	60	64	69	72	77	80	85	87	91	94	98	100	104
535	3°15'	57	61	66	70	74	77	81	84	88	90	94	96	99
495	3°30'	55	59	64	67	71	74	78	81	85	87	90	93	96
465	3°45'	53	57	62	65	69	72	76	78	82	84	87	89	93
435	4°00'	52	55	60	63	67	69	73	76	79	81	85	87	90
385	4°30'	49	52	56	59	63	65	69	71	75	77	80	82	85
345	5°00'	46	49	53	56	60	62	65	68	71	73	76	77	80
315	5°30'	44	47	51	53	57	59	62	64	67	69	72	74	76
290	6°00'	42	45	49	51	55	57	60	62	65	66	69	71	73
265	6°30'	41	43	47	49	52	54	57	59	62	64	66	68	70
245	7°00'	39	42	45	47	51	52	55	57	60	61	64	65	68
215	8°00'	37	39	42	44	47	49	52	53	56	57	60	61	63
190	9°00'	35	37	40	42	45	46	49	50	53	54	56	58	60
170	10°00'	33	35	38	40	42	44	46	48	50	51	53	55	57
155	11°00'	31	33	36	38	40	42	44	46	48	49	51	52	54
145	12°00'	30	32	35	36	39	40	42	44	46	47	49	50	52

Fuente: Adaptación del TC E-54 – Canadá (2012)

#### 4.6 Track Standards Manual (GC/RT5017) y Track System Requeriments (GC/RT5021) – Gran Bretaña

En 1994 se crea la Railtrack PLC que se encargaría de administrar el sistema ferroviario británico y elaborar las Railway Group Standards, conjunto de varios documentos sobre estándares. En 1995 se publica el Track Standards Manual (RT5017) que entre las secciones que lo compondrían se incluiría la sección 8 (geometría de la vía) y que 3 años después se actualizaría, luego, el año 2000 sería sustituido por los Track System Requeriments (RT5021).

Años posteriores, debido a problema financieros la Railtrack PLC sería absorbida por la Network Rail y las Railway Group Standards se conformarían como la Rail Safety and Standards Board (RSSB).

Para los intereses de la presente tesis, las partes de las normativas a investigadas serán las siguientes:

- Track Standards Manual, Sección 8 (geometría de la vía).
- Track System Requeriments, Parte 2 (requerimientos para la geometría de la vía).

Las versiones a revisar son del 1998 (Track Standards Manual) y del 2011 (Track System Requeriments). Ambas para trocha estándar y con unidades en el Sistema Internacional.

##### 4.6.1 Velocidad de diseño

La velocidad será calculada en relación al radio y al peralte de la curva, e irá en múltiplos de 5 km/h.

$$V = \sqrt{\frac{R \times (z+1)}{11.82}} \quad (155)$$

Donde:

- V: velocidad (km/h).
- R: radio de la curva (m).
- z: altura de peralte (mm).

I: insuficiencia de peralte (mm).

#### 4.6.2 Alineamiento horizontal

##### a. Rectas horizontales

De preferencia que sean de gran longitud. Caso contrario, se especifica que la longitud mínima permitida será la apropiada para que entre el vehículo más largo que transite por determinada vía.

##### b. Curvas circulares

###### - Radio mínimo de la curva

El radio mínimo aceptable para líneas de pasajeros será de 200 m y excepcionalmente se puede permitir radios de 150 m.

###### - Longitud mínima de la curva

La longitud mínima permitida será la apropiada para que entre el vehículo más largo que transite por determinada vía.

###### - Sobreancho

En curvas de radios menores a los 200 m, la norma británica establece el empleo del sobreancho, tal y como se muestra en la Tabla 37.

Tabla 37: Sobreancho en curva – Gran Bretaña

Radio (m)	Ensanche (mm)
$R \leq 100$	19
$100 < R \leq 125$	16
$125 < R \leq 150$	13
$150 < R \leq 175$	9
$175 < R \leq 200$	6
$200 < R$	0

Fuente: "Track system requirements" – Gran Bretaña (2011)

### c. Peralte

La altura máxima del peralte será 150 mm y excepcionalmente puede ser de 180 mm. La altura excepcional se deduce de la siguiente fórmula para peraltes para curvas de radios menores a los 320 m:

$$z = \frac{R-50}{1.5} \quad (156)$$

Donde:

z: altura de peralte (mm).

R: radio de la curva (m).

Luego, su altura máxima en función a su radio de curvatura se muestra en la Tabla 38:

Tabla 38: Peralte máximo según radio de la curva – Gran Bretaña

Radio (m)	Peralte máximo (mm)
< 100	25
$100 \leq R < 150$	50
$150 \leq R < 200$	100
$200 \leq$	150

Fuente: "Track standards manual" – Gran Bretaña (1998)

### - Insuficiencia de peralte

Según la norma vigente, la insuficiencia de peralte será de máximo 90 mm y excepcionalmente se puede permitir hasta los 110 mm.

### d. Curva de transición

Siempre y cuando sea posible, se propondrá el empleo de la transición. Cuando no sea permitido, la velocidad deberá calcularse en función a una curva de transición virtual de 12.20 m de largo.

### - Longitud de la transición

El desarrollo del peralte ira en toda la longitud de la transición hasta lograr la altura para la curva circular en el punto de unión y la variación del peralte respecto a la distancia

será de 2.5mm/m y respecto al tiempo, 55 mm/s (85 mm/s excepción). Entonces se evidencia la similitud con el caso canadiense en el que se deduce en la fórmula (154):

$$L = \frac{z}{2.5}$$

Donde:

L: longitud mínima de la espiral (m).

z: altura de peralte (mm).

#### e. Tramos rectos entre curvas sucesivas

Para curvas compuestas con sentidos contrarios, el radio mínimo excepcional de ambas curvas será 160 m, caso contrario deberán enlazarse por una recta horizontal de longitud mayor a la longitud del vehículo más largo o, siendo un caso extremo, por una recta no menor a los 3 m.

### 4.6.3 Alineamiento vertical

#### a. Rectas de perfil

##### - Longitud mínima de la recta de perfil

Del mismo modo que para el alineamiento horizontal, la longitud mínima permitida será la apropiada para que entre el vehículo más largo que transite por determinada vía.

##### - Gradiente o pendiente

La gradiente normal se limita hasta 1.25%, sin embargo, excepcionalmente ésta puede aumentar de acuerdo a lo siguiente:

- 2% para tramos de hasta 3 km.
- 3.5% para tramos de hasta 500 m y donde no esté planteada una detención.
- 3.5% para líneas exclusivas de pasajeros donde la gradiente promedio cada 10 km o más sea del 2.5%.
- 3.5% para líneas exclusivas de pasajeros y tramos no mayores a los 6 km.

Se aprecia una modificación notoria en este punto, de acuerdo a la norma sustituida de 1998, la gradiente podía excepcionalmente, llegar hasta el 4% para líneas exclusivas de pasajeros. Quedando el valor en 3.5% en la actualidad.

b. Curvas de acuerdo verticales

- Radio de la curva de acuerdo vertical

El radio mínimo del acuerdo será de 1000 m, para una aceleración vertical de  $0.6 \text{ m/s}^2$  y se obtendrá mediante la expresión:

$$R = \frac{V^2}{7.628} \quad (157)$$

Donde:

V: velocidad (km/h).

R: radio de la curva (m).

Excepcionalmente, el radio mínimo para curvas convexas puede ser de 600 m y para curvas cóncavas, de 900 m.

- Longitud mínima de la curva de acuerdo vertical

La longitud mínima permitida será la apropiada para que entre el vehículo más largo que transite por determinada vía.

c. Recta de perfil entre curvas inversas

En líneas de pasajeros, cuando hay curvas de acuerdo verticales en sentido invertido se permitirán, excepcionalmente, radios menores de 1000 m, siempre y cuando estén enlazadas por una recta no menor a 30 m.

#### 4.7 Track and Civil Infrastructure 159urrícu Practice (Volumen 2): Sistema Ferroviario (CP2) – Australia Meridional

El Departamento de Planeamiento, Transporte e Infraestructura (DPTI) a cargo de las áreas mencionadas en su título, es el responsable de desarrollar políticas e instrumentos legales, y de establecer los planes, estrategias, estándares y programas para el desarrollo de los usuarios, de las comunidades y de la economía en general. En ese sentido, fue elaborado el Código de la Práctica para el sistema ferroviario.

El referido código o manual está conformado por varias partes y fue actualizado el 7 de octubre del 2008. De las partes para la elaboración de esta tesis, se repasará:

- Parte 6: Geometría de la vía.

Los parámetros de interés de los autores del presente trabajo se encuentran:

- Parte 6, capítulo 2 (diseño y clasificación de la vía).
- Parte 6, capítulo 3 (diseño y clasificación para vía de trocha estándar).

La versión del código australiano es del 2008. Las unidades están en el Sistema Internacional y la trocha establecida es de 1600 mm, aunque como se mencionó en el párrafo anterior, también consideran la trocha de 1435 mm.

##### 4.7.1 Velocidad de diseño

La velocidad se establecerá en función al radio de la curva, la altura del peralte y la insuficiencia de peralte.

###### a. Velocidad máxima

Determinada en relación al peralte y radio de la curva mostrada en la fórmula (104):

$$V=0.291\sqrt{R\times(z+I)}$$

Donde:

- V: velocidad (km/h).
- R: radio de la curva (m).
- z: altura de peralte (mm).

I: insuficiencia de peralte (mm).

#### 4.7.2 Alineamiento horizontal

##### a. Rectas horizontales

###### - Longitud mínima de la recta horizontal

Se obtendrá en función a la velocidad, mediante la expresión:

$$L = \frac{V^3}{2} \quad (158)$$

Donde:

L: longitud de la recta (m).

V: velocidad (km/h)

La longitud mínima será de 50 m para vías nuevas y de 20 m o la longitud del vagón más largo para vías reconstruidas.

##### b. Curvas circulares

###### - Radio mínimo de la curva

El radio mínimo a emplear será de 1600 m para vías nuevas, 450 m para vías mejoradas y 200 m para vías existentes (no mejoradas).

###### - Longitud de la curva

Se empleará el mismo criterio que para la longitud mínima de la recta horizontal.

###### - Sobreancho

La trocha no se ensanchará en curvas mayores o iguales a 200 m. Dado que, la norma exige curvas de radios mayores o iguales a los 200 m, entonces se desprecia la posibilidad de usar este elemento.

### c. Peralte

El peralte de equilibrio está dado por:

$$z+I=11.84 \times \frac{V^2}{R} \quad (159)$$

Donde:

$z+I$ : peralte de equilibrio (mm).

$V$ : velocidad (km/h).

$R$ : radio de la curva (m).

El código considera al peralte actual como el 55% del de equilibrio y que el peralte máximo empleable será de 145 mm.

#### - Insuficiencia de peralte

Por experimentación de los autores del código, la insuficiencia de peralte no deberá exceder los 100 mm.

### d. Curvas de transición

El código australiano establece la parábola cúbica como la curva de transición a emplear.

#### - Longitud de la transición

La longitud de la transición se hallará de acuerdo a lo siguiente:

➤ Longitud de la transición en líneas nuevas:

$$L=0.0111 \times z \times V \quad (160)$$

$$L=0.0111 \times I \times V \quad (161)$$

$$L=z \quad (162)$$

Donde:

$L$ : longitud de la transición (m).

$z$ : altura de peralte (mm).

$V$ : velocidad (km/h).

$I$ : insuficiencia de peralte (mm).

- Longitud de la transición en líneas mejoradas:

$$L=0.0079 \times z \times V \quad (163)$$

$$L=0.0079 \times I \times V \quad (164)$$

$$L=0.4 \times z \quad (165)$$

- Longitud de la transición en líneas mejoradas cuando no sea posible aplicar las anteriores:

$$L=0.005 \times z \times V \quad (166)$$

$$L=0.005 \times I \times V \quad (167)$$

$$L=0.33 \times z \quad (168)$$

Se deberá escoger la mayor sea el caso, y ésta será no menor a 20 m.

#### e. Recta entre curvas

Longitud mínima de la transición entre curva compuestas de igual o diferente sentido será:

$$L=0.0079 \times (z_1 - z_2) \times V \quad (169)$$

$$L=0.0079 \times (I_1 - I_2) \times V \quad (170)$$

$$L=0.4 \times (z_1 - z_2) \quad (171)$$

Donde:

L: longitud de la transición (m).

z: altura de peralte (mm).

V: velocidad (km/h).

I: insuficiencia de peralte (mm).

Del mismo modo que el punto anterior, ésta no deberá ser menor a los 20 m.

#### f. Casos especiales en curvas circulares

##### - Curvas circulares con peralte y sin transición

Cuando no es posible aplicar la transición, se debe considerar que cuando el vehículo ingresa su primer y segundo *bogie* a la curva, adquiere movimiento circular y la distancia entre los centros de los *bogies* del vehículo se conocerá como la transición virtual  $L_D$ .

Para tal efecto, se igualan la fórmula para hallar la velocidad con la fórmula para hallar la longitud de la transición:

$$0.291 \times \sqrt{R \times (z+I)} = \frac{L_D}{0.0079 \times I} \quad (172)$$

Donde:

R: radio de la curva circular (m).

z: altura de peralte (mm).

I: insuficiencia de peralte (mm).

$L_D$ : longitud de la transición virtual (m).

Además, haciendo:

$$z' = z - I \quad (173)$$

Luego, el nuevo peralte  $z'$ :

$$z' = 45.566 \times \sqrt[3]{\frac{L_D^2}{R}} \quad (174)$$

Quedando la velocidad máxima, para la curva sin transición, según la siguiente expresión:

$$V = 0.291 \times \sqrt{2 \times z' \times R} \quad (175)$$

- Curvas circulares sin peralte y sin transición

Similar al caso anterior, ahora también se da la ausencia del peralte. Se igualan las fórmulas en función a la velocidad:

$$0.291 \times \sqrt{R \times (z+I)} = \frac{L_D}{0.0079 \times I} \quad (176)$$

Donde:

R: radio de la curva circular (m).

z: altura de peralte (mm).

I: insuficiencia de peralte (mm).

$L_D$ : longitud de la transición virtual (m).

Además, teniendo en cuenta la falta de peralte:

$$z = 0$$

Luego, la nueva insuficiencia de peralte  $I'$ :

$$I' = 57.410 \times \sqrt[3]{\frac{L_D^2}{R}} \quad (177)$$

Quedando la velocidad máxima, para la curva sin transición ni peralte, según la siguiente expresión:

$$V = 0.291 \times \sqrt{I' \times R} \quad (178)$$

#### 4.7.3 Alineamiento vertical

##### a. Rectas de perfil

###### - Longitud mínima de la recta de perfil

Se empleará el mismo criterio que para la longitud mínima de la recta de perfil en el alineamiento horizontal.

###### - Gradiente o pendiente

La gradiente para todas las vías no deberá exceder el 2.22%.

###### - Compensación de la gradiente por curva circular

Para lograr resistencias uniformes al movimiento del tren, las gradientes se compensan a favor o en contra:

➤ Para líneas nuevas la gradiente debe ser compensada, por lo que su porcentaje disminuirá:

- Curvas no lubricadas  $-(100/R)\%$

- Curvas lubricadas  $-(50/R)\%$

➤ Para líneas existentes de gradiente no compensada, su porcentaje aumentará:

- Curvas no lubricadas  $+(100/R)\%$

- Curvas lubricadas  $+(50/R)\%$

El resultado se le aumentará o restará a la gradiente teórica.

b. Curvas de acuerdo verticales

- Radio de la curva de acuerdo vertical

Tanto como para curvas convexas como cóncavas, el radio mínimo de la curva de acuerdo vertical será 1300 m.

- Longitud de la curva de acuerdo vertical

Para obtener la longitud de la curva de acuerdo, se emplea la siguiente fórmula:

$$L=K \times (i_1 - i_2) \quad (179)$$

Donde:

L: longitud del acuerdo vertical (m).

i: gradiente de la recta (%).

K: coeficiente de la curvatura vertical.

Línea existente: 75 en cumbre y 100 en hundimiento.

Línea nueva: 200 en ambos casos.

Estaciones: 10, con velocidad de 15 km/h.

La longitud mínima de la curva de acuerdo vertical será de 20 m y aumentará en múltiplos de 20m.

#### 4.8 Resumen comparativo de las normativas evaluadas

De acuerdo a la revisión de las normativas de los países de Estados Unidos, Chile, España, Colombia, Canadá, Gran Bretaña y Australia en comparación con la norma de Perú, se obtienen los resultados mostrados en la Tabla 39.

Tabla 39: Resumen comparativo de las normas y reglamentos evaluados

Parámetros		Normativas							
		Estados Unidos (1999)	Chile (2003)	España (2011)	Colombia (2013)	Canadá (2012)	Gran Bretaña (2011)	Australia (2008)	Perú (1978-2006)
Velocidad de Diseño									
Velocidad	Fórmula Velocidad	$\sqrt{\frac{z+I}{0.007 \times \theta}}$	$\sqrt{\frac{z+I}{11.8} \times R}$	$\sqrt{\frac{z+I}{11.85} \times R}$	$\sqrt{\frac{z+I}{0.007 \times \theta}}$	$\sqrt{\frac{z+I}{0.007 \times \theta}}$	$\sqrt{\frac{z+I}{11.82} \times R}$	$0.291 \sqrt{R \times (z+I)}$	$0.29 \sqrt{R \times (z+I)}$
	Mínima (km/h)	15	30	75	15	20	-	-	24
	Máxima (km/h)	160	180	350	160	150	-	-	144
Alineamiento Horizontal									
Recta horizontal	Fórmula Recta	$0.568 \times V$	$\frac{V}{9}$	$\frac{V}{2}$	-	-	-	$\frac{V}{2}$	-
	Mínima (m)	Vagón más largo	30	65	Vagón más largo	19	Vagón más largo	50	-
Curva circular	Fórmula Radio	$12.225 \times \frac{V^2}{(z+I)}$	$11.8 \times \frac{V^2}{(z+I)}$	$11.85 \times \frac{V^2}{(z+I)}$	$12.225 \times \frac{V^2}{(z+I)}$	$12.225 \times \frac{V^2}{(z+I)}$	$11.82 \times \frac{V^2}{(z+I)}$	$\frac{V^2}{0.291^2 \times (z+I)}$	$\frac{V^2}{0.29^2 \times (z+I)}$
	Radio mínimo (m)	145	180	750	160	145	200	1600	150
	Fórmula Long. Curva	-	-	$\frac{V}{2}$	-	-	-	$\frac{V}{2}$	-
	Longitud mínima (m)	30	-	-	-	47	Vagón más largo	-	-

Fuente: Elaboración propia

Tabla 39: Resumen comparativo de las normas y reglamentos evaluados (continuación)

Parámetros		Normativas							
		Estados Unidos (1999)	Chile (2003)	España (2011)	Colombia (2013)	Canadá (2012)	Gran Bretaña (2011)	Australia (2008)	Perú (1978-2006)
<b>Alineamiento Horizontal</b>									
Peralte	Fórmula Peralte	$0.007 \times \theta \times V^2$	$11.8 \times \frac{V^2}{R}$	$11,85 \times \frac{V^2}{R}$	$0.007 \times \theta \times V^2$	$0.007 \times \theta \times V^2$	$11.82 \times \frac{V^2}{R}$	$11.84 \times \frac{V^2}{R}$	$11.8 \times \frac{V^2}{R}$
	Máximo (mm)	-	170	160	150	150	150	145	150
	Insuficiencia (mm)	75	61	100	75	75	90	100	-
Transición	Fórmula Long. Transición	$0.0095 \times z \times V$	$0.009 \times V \times z$	$0.0042 \times V \times z$	$0.744 \times z$	-	-	$0.0111 \times z \times V$	$0.0075 \times z \times V$
	Longitud mínima (m)	-	-	160	-	-	12.2	20	-
<b>Alineamiento Vertical</b>									
Recta de perfil	Fórmula Recta	$0.568 \times V$	$\frac{V}{9}$	$\frac{V}{2}$	-	-	-	$\frac{V}{2}$	-
	Mínima (m)	30	30	80	30	-	30	-	45
Pendiente	Máxima (%)	3	3	3	3.5	-	3.5	2.22	3
Acuerdos	Fórmula Radio	$\frac{L}{D}$	$\frac{V^2}{4}$	-	-	-	$\frac{V^2}{7.628}$	-	-
	Radio mínimo (m)	-	2000	5000	-	-	1000	1300	-
	Fórmula Long. Acuerdo	-	-	$\frac{V}{2}$	$\frac{D \times V^2}{0.03 \times 3.6^2}$	-	-	$200 \times (i_1 - i_2)$	-
	Longitud mínima (m)	30	-	80	30	-	Vagón más largo	20	-

Fuente: Elaboración propia

Donde:

V: velocidad de diseño o de proyecto (km/h).

R: radio de curva circular (m).

z: altura de peralte o máximo (mm).

I: insuficiencia de peralte (mm).

$\theta$ : ángulo de curvatura de la curva (decimales).

i: pendiente de la recta (%).

D: diferencia de ángulos ( $i_1 - i_2$ ) de pendientes de rectas verticales contiguas (tanto por uno).

## **CAPÍTULO V:**

### **PROPUESTA O APLICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN**

Se menciona en el plan nacional de desarrollo ferroviario la intención del Estado por desarrollar una red ferroviaria sostenible e integrada; propósito que ven posible si se cumplen ciertos requerimientos como, entre otros, la revisión de aspectos regulatorios y normativos de la actividad ferroviaria.

Resultado de la revisión de la normativa internacional en el capítulo anterior son los valores y/o fórmulas que se muestran en la Tabla 39 de resumen comparativo, que a su vez se contrastan con la información que proporciona el RNFF. Para efectos prácticos, los criterios de diseño geométrico y sus indicadores se comparan en igualdad de condiciones, para lo cual se hace indispensable evaluar la geometría de una línea férrea bajo las distintas normativas consultadas.

El caso seleccionado es el Ferrocarril Bellavista – Santa Anita (FBS), proyecto que todavía se encuentra en estudios, pero cuya geometría ya fue definida y diseñada bajo el Reglamento Nacional de Ferrocarriles. Programado para iniciar obras en el año del bicentenario, su actividad será el transporte de pasajeros y recorrerá 12 distritos uniendo el Callao (1) con Lima (11).

#### **5.1 Ferrocarril Bellavista – Santa Anita**

Propuesta/Proyecto que buscará conectar el Este de Lima con el Callao, con una extensión de más de 23.6 km y que cruzará los distritos de Bellavista, San Miguel, Magdalena, Pueblo Libre, Jesús María, San Isidro, La Victoria, San Borja, Surco, La Molina, Ate y Santa Anita. Diseñado con ancho de vía estándar, contará con doble vía y recorrerá las avenidas Elmer Faucett, La Marina, Faustino Sánchez Carrión, Javier Prado Oeste, Javier Prado Este y 22 de Julio. Las avenidas mencionadas han preestablecido la geometría y a continuación, se muestran los criterios de diseño comparados.

### 5.1.1 Velocidad de diseño

Actualmente la Línea 1 del Metro de Lima cuenta con trenes de fabricación española por la compañía Alstom con capacidad de viajar a velocidad máxima de hasta 88 km/h (Diario Gestión, 2018); la Línea 2, en construcción, ya cuenta con una flota de trenes de fabricación italiana por la compañía AnsaldoBreda con capacidad de viajar a velocidad máxima de hasta 80 km/h (Diario Gestión, 2019).

También, para el mejoramiento del Ferrocarril Huancayo – Huancavelica, cuya adjudicación se dará en el cuarto trimestre del presente año (Andina, 2019), contarán con nuevos trenes de velocidad máxima hasta 94 km/h (ProInversión, 2019).

De acuerdo a las especificaciones técnicas básicas para obras civiles, equipamiento electromecánico y adecuaciones al material rodante de la Línea 1 del Metro de Lima para el tramo Villa El Salvador – Av. Grau, la velocidad máxima es de 80 km/h (ProVías Nacional, 2009); de igual modo, el estudio de preinversión a nivel de factibilidad de la Línea 2 y tramo de la Línea 4 del Metro de Lima, fija la velocidad máxima en 80 km/h (ProInversión, 2013); y para el caso del mejoramiento del Ferrocarril Huancayo – Huancavelica, según el contrato de concesión Concurso de proyectos integrales para la entrega en concesión del proyecto “Rehabilitación integral del ferrocarril Huancayo – Huancavelica”, la velocidad máxima será de 94 km/h (ProInversión 2016).

Ante lo expuesto, la velocidad máxima propuesta para el ferrocarril proyectado fue de 80 km/h. Este valor de acuerdo a la Tabla 39, resumen comparativo, está dentro de los rangos de las normativas compradas, pero está sujeta a modificación de acuerdo a la geometría expuesta a en los alineamientos. De igual modo, existe una velocidad mínima que de acuerdo a la teoría es la velocidad que se alcanza para el peralte dispuesto o máximo y que se muestra en la Tabla 40.

Los resultados obtenidos en la Tabla 40 se ubican dentro de los rangos respectivos para cada normativa, excepto la española cuyo valor de velocidad mínima es 75 km/h. Luego, ajustando el peralte a sus valores máximos de acuerdo a cada normativa, la velocidad mínima se modifica, quedando como se muestra en la Tabla 41.

Tabla 40: Velocidad mínima para el Ferrocarril Bellavista – Santa Anita (FBS)

Elemento	Estados Unidos	Chile	España	Colombia	Canadá	Gran Bretaña	Australia*	Perú
Fórmula	$\sqrt{\frac{z}{0.007 \times \theta}}$	$\sqrt{\frac{z}{11.8} \times R}$	$\sqrt{\frac{z}{11.85} \times R}$	$\sqrt{\frac{z}{0.007 \times \theta}}$	$\sqrt{\frac{z}{0.007 \times \theta}}$	$\sqrt{\frac{z}{11.82} \times R}$	$0.291\sqrt{R \times z}$	$0.29\sqrt{R \times z}$
Radio mínimo (m)	280	280	280	280	280	280	280	280
Peralte máximo (mm)	150	150	150	150	150	150	145	150
Velocidad mínima (km/h)	59	60	60	59	59	60	59	59

Fuente: Elaboración propia.

\*El peralte máximo en la norma australiana es de 145 mm.

Tabla 41: Velocidad mínima para el FBS con el peralte máximo de las normas comparadas

Elemento	Estados Unidos*	Chile	España	Colombia	Canadá	Gran Bretaña	Australia	Perú
Fórmula	$\sqrt{\frac{z}{0.007 \times \theta}}$	$\sqrt{\frac{z}{11.8} \times R}$	$\sqrt{\frac{z}{11.85} \times R}$	$\sqrt{\frac{z}{0.007 \times \theta}}$	$\sqrt{\frac{z}{0.007 \times \theta}}$	$\sqrt{\frac{z}{11.82} \times R}$	$0.291\sqrt{R \times z}$	$0.29\sqrt{R \times z}$
Radio mínimo (m)	280	280	280	280	280	280	280	280
Peralte máximo (mm)	195	170	160	150	150	150	145	150
Velocidad mínima (km)	67	64	61	59	59	60	59	59

Fuente: Elaboración propia.

\*La AREMA no especifica un valor de peralte máximo; para su efecto, al peralte de equilibrio obtenido en el ítem 19 se le resta la insuficiencia máxima de peralte.

Nuevamente, solo quedando fuera de sus límites el valor correspondiente a la norma española.

Respecto a la velocidad máxima de operación (velocidad de diseño), como se puede ver en el Anexo 3, el diseño de la geometría se ajusta a las avenidas donde se ejecutará el proyecto. La realidad se encuentra una ciudad edificada, por lo que se hace conveniente modificar la velocidad inicial de diseño. Quedando la Tabla 42, donde se muestran las velocidades obtenidas para la geometría determinada desde el inicio empleando las fórmulas respectivas a cada norma.

Se observa que la velocidad se mantiene en el mínimo para el caso peruano debido a la ausencia de la insuficiencia de peralte, mientras que, para el caso español, es el que más se acerca a la velocidad de diseño inicial, solo debajo por 3 km/h.

Tabla 42: Velocidad máxima para el FBS aplicando normativas comparadas

Elemento	Estados Unidos	Chile	España	Colombia	Canadá	Gran Bretaña	Australia	Perú
Fórmula	$\sqrt{\frac{z+I}{0.007 \times \theta}}$	$\sqrt{\frac{z+I}{11.8} \times R}$	$\sqrt{\frac{z+I}{11.85} \times R}$		$\sqrt{\frac{z+I}{0.007 \times \theta}}$	$\sqrt{\frac{z+I}{11.82} \times R}$	$0.291 \sqrt{R \times (z+I)}$	$0.29 \sqrt{R \times (z+I)}$
Radio mínimo (m)	280	280	280	280	280	280	280	280
Insuficiencia de peralte (mm)	75	61	100	75	75	90	100	-
Peralte máximo (mm)	150	150	150	150	150	150	145	150
Velocidad máxima (km/h)	72	71	77	72	72	75	76	59

Fuente: Elaboración propia.

\*El peralte máximo en la norma australiana es de 145 mm.

Entonces, llenando el vacío de la norma peruana de la insuficiencia con 75 mm (valor recurrente para las normas americanas), la velocidad se acerca a la velocidad de diseño inicial tal y como se muestra en la Tabla 43.

Tabla 43: Velocidad máxima para el FBS con propuesta de insuficiencia de peralte en el RNFF

Elemento	Estados Unidos	Chile	España	Colombia	Canadá	Gran Bretaña	Australia	Perú
Fórmula	$\sqrt{\frac{z+I}{0.007 \times \theta}}$	$\sqrt{\frac{z+I}{11.8} \times R}$	$\sqrt{\frac{z+I}{11.85} \times R}$		$\sqrt{\frac{z+I}{0.007 \times \theta}}$	$\sqrt{\frac{z+I}{11.82} \times R}$	$0.291 \sqrt{R \times (z+I)}$	$0.29 \sqrt{R \times (z+I)}$
Radio mínimo (m)	280	280	280	280	280	280	280	280
Insuficiencia de peralte (mm)	75	61	100	75	75	90	100	75
Peralte máximo (mm)	150	150	150	150	150	150	145	150
Velocidad máxima (km/h)	72	71	77	72	72	75	76	73

Fuente: Elaboración propia.

\*El peralte máximo en la norma australiana es de 145 mm.

Luego, reajustando el peralte al máximo de cada norma e igualando el peralte máximo peruano al chileno de 170 mm, las velocidades finales para el diseño quedan como se muestra en la Tabla 44.

Aunque se aprecia una variación en los valores de velocidad, estos no logran igualar la velocidad de diseño inicial; pero entre la velocidad de diseño de 80 km/h y las obtenidas en la Tabla 44 se observan diferencias de menos de 5 km/h en la mitad de las normas comparadas. Entonces se observa la necesidad de reajustar la velocidad de diseño.

Tabla 44: Velocidad máxima para el FBS con propuesta de insuficiencia de peralte y modificación del peralte máximo en el RNFF

Elemento	Estados Unidos*	Chile	España	Colombia	Canadá	Gran Bretaña	Australia	Perú
Fórmula	$\sqrt{\frac{z+I}{0.007 \times \theta}}$	$\sqrt{\frac{z+I}{11.8} \times R}$	$\sqrt{\frac{z+I}{11.85} \times R}$	$\sqrt{\frac{z+I}{0.007 \times \theta}}$	$\sqrt{\frac{z+I}{0.007 \times \theta}}$	$\sqrt{\frac{z+I}{11.82} \times R}$	$0.291 \sqrt{R \times (z+I)}$	$0.29 \sqrt{R \times (z+I)}$
Radio mínimo (m)	280	280	280	280	280	280	280	280
Insuficiencia de peralte (mm)	75	61	100	75	75	90	100	75
Peralte máximo (mm)	195	170	160	150	150	150	145	170
Velocidad máxima (km/h)	79	74	78	72	72	75	76	76

Fuente: Elaboración propia.

\*La AREMA no especifica un valor de peralte máximo; para su efecto, al peralte de equilibrio obtenido en el ítem 19 se le resta la insuficiencia máxima de peralte.

### 5.1.2 Alineamiento horizontal

Consultando los mismos proyectos, para la Línea 1 se dispuso el radio mínimo de 250 m para vagones de 18 m de longitud; la Línea 2 adopta el mismo valor para vagones de 20 m; y para el mejoramiento del ferrocarril Huancayo – Huancavelica, el radio mínimo será de 70 m para vagones de 20 m.

Con el diseño geométrico ya definido, el ferrocarril Bellavista – Santa Anita estará compuesto por 26 rectas horizontales, 26 curvas circulares y 23 pares de espirales o curvas de transición.

La longitud de la recta más corta será de 48.49 m (tiene una recta de 3.49 m, pero no será considerada), el radio mínimo será de 280 m y el radio máximo de 4000 m y la longitud mínima de la transición será de 18 m. También, se incluirá una curva compuesta de sentidos contrarios, se prescindirá de la transición en las curvas de máximo radio y el peralte máximo de 150 mm será desarrollado en la curva de menor radio. Respecto al material rodante, y en base a los ejemplos dados, la longitud del vagón será de 20 m. Las características del alineamiento horizontal se muestran en la Tabla 45, así como el peralte de equilibrio y la insuficiencia de peralte para la velocidad de proyecto.

Tabla 45: Elementos del alineamiento horizontal del caso ferrocarril Bellavista – Santa Anita

Ítem	Descripción	PK inicio	PK final	Longitud	Radio	Peralte		Orientación
						Equilib.	Insufici.	
1	Tangente	00+000,000	00+003,493	3,49				
2	Espiral	00+003,493	00+021,493	18,00				

Fuente: Gobierno del Perú y elaboración propia.

Tabla 45: Elementos del alineamiento horizontal del caso ferrocarril Bellavista–Santa Anita (continuación)

Ítem	Descripción	PK inicio	PK final	Longitud	Radio	Peralte		Orientación
						Equilib.	Insufici.	
3	Curva	00+021,493	00+053,142	31,65	2400	31	0	Derecha
4	Espiral	00+053,142	00+071,142	18,00				
5	Tangente	00+071,142	00+474,451	403,31				
6	Espiral	00+474,451	00+492,451	18,00				
7	Curva	00+492,451	00+558,046	65,60	2000	38	0	Derecha
8	Espiral	00+558,046	00+576,046	18,00				
9	Tangente	00+576,046	00+792,150	216,10				
10	Espiral	00+792,150	00+826,150	34,00				
11	Curva	00+826,150	00+897,710	71,56	1000	76	0	Derecha
12	Espiral	00+897,710	00+931,710	34,00				
13	Tangente	00+931,710	01+214,939	283,23				
14	Espiral	01+214,939	01+273,939	59,00				
15	Curva	01+273,939	01+365,507	91,57	600	126	0	Derecha
16	Espiral	01+365,507	01+424,507	59,00				
17	Tangente	01+424,507	01+846,248	421,74				
18	Espiral	01+846,248	01+946,248	100,00				
19	Curva	01+946,248	02+242,775	296,53	280	270	120	Izquierda
20	Espiral	02+242,775	02+342,775	100,00				
21	Tangente	02+342,775	02+770,974	428,20				
22	Espiral	02+770,974	02+835,974	65,00				
23	Curva	02+835,974	03+023,121	187,15	550	137	0	Izquierda
24	Espiral	03+023,121	03+088,121	65,00				
25	Tangente	03+088,121	04+025,573	937,45				
26	Espiral	04+025,573	04+115,573	90,00				
27	Curva	04+115,573	04+151,348	35,77	350	216	66	Derecha
28	Espiral	04+151,348	04+241,348	90,00				
29	Tangente	04+241,348	05+868,154	1626,81				
30	Espiral	05+868,154	05+968,154	100,00				
31	Curva	05+968,154	06+069,309	101,16	280	270	120	Derecha
32	Espiral	06+069,309	06+169,309	100,00				
33	Espiral	06+169,309	06+269,309	100,00				
34	Curva	06+269,309	06+305,157	35,85	280	270	120	Izquierda
35	Espiral	06+305,157	06+405,157	100,00				
36	Tangente	06+405,157	07+859,258	1454,10				
37	Espiral	07+859,258	07+954,258	95,00				
38	Curva	07+954,258	08+088,222	133,96	300	252	102	Izquierda
39	Espiral	08+088,222	08+183,222	95,00				
40	Tangente	08+183,222	08+506,888	323,67				
41	Curva	08+506,888	08+831,397	324,51	4000	19	0	Derecha
42	Tangente	08+831,397	12+181,885	3350,49				
43	Curva	12+181,885	12+244,377	62,49	4000	19	0	Derecha
44	Tangente	12+244,377	12+651,189	406,81				
45	Curva	12+651,189	12+713,680	62,49	4000	19	0	Izquierda

Fuente: Gobierno del Perú y elaboración propia.

Tabla 45: Elementos del alineamiento horizontal del caso ferrocarril Bellavista–Santa Anita (continuación)

Ítem	Descripción	PK inicio	PK final	Longitud	Radio	Peralte		Orientación
						Equilib.	Insufici.	
46	Tangente	12+713,680	13+583,236	869,56				
47	Espiral	13+583,236	13+607,236	24,00				
48	Curva	13+607,236	13+671,220	63,98	1500	50	0	Derecha
49	Espiral	13+671,220	13+695,220	24,00				
50	Tangente	13+695,220	13+775,624	80,40				
51	Espiral	13+775,624	13+799,624	24,00				
52	Curva	13+799,624	13+863,613	63,99	1500	50	0	Izquierda
53	Espiral	13+863,613	13+887,613	24,00				
54	Tangente	13+887,613	14+551,724	664,11				
55	Espiral	14+551,724	14+595,724	44,00				
56	Curva	14+595,724	14+651,645	55,92	800	94	0	Izquierda
57	Espiral	14+651,645	14+695,645	44,00				
58	Tangente	14+695,645	15+157,157	461,51				
59	Espiral	15+157,157	15+228,157	71,00				
60	Curva	15+228,157	15+278,538	50,38	500	151	1	Derecha
61	Espiral	15+278,538	15+349,538	71,00				
62	Tangente	15+349,538	15+707,044	357,51				
63	Espiral	15+707,044	15+741,044	34,00				
64	Curva	15+741,044	15+817,214	76,17	1000	76	0	Izquierda
65	Espiral	15+817,214	15+851,214	34,00				
66	Tangente	15+851,214	16+717,423	866,21				
67	Espiral	16+717,423	16+800,423	83,00				
68	Curva	16+800,423	16+911,384	110,96	400	189	39	Izquierda
69	Espiral	16+911,384	16+994,384	83,00				
70	Tangente	16+994,384	17+124,100	129,72				
71	Espiral	17+124,100	17+183,100	59,00				
72	Curva	17+183,100	17+378,527	195,43	600	126	0	Izquierda
73	Espiral	17+378,527	17+437,527	59,00				
74	Tangente	17+437,527	17+935,265	497,74				
75	Espiral	17+935,265	17+994,265	59,00				
76	Curva	17+994,265	18+260,853	266,59	600	126	0	Derecha
77	Espiral	18+260,853	18+319,853	59,00				
78	Tangente	18+319,853	18+662,491	342,64				
79	Espiral	18+662,491	18+721,491	59,00				
80	Curva	18+721,491	18+774,741	53,25	600	126	0	Derecha
81	Espiral	18+774,741	18+833,741	59,00				
82	Tangente	18+833,741	19+947,483	1113,74				
83	Espiral	19+947,483	20+006,483	59,00				
84	Curva	20+006,483	20+061,974	55,49	600	126	0	Izquierda
85	Espiral	20+061,974	20+120,974	59,00				
86	Tangente	20+120,974	20+808,252	687,28				
87	Espiral	20+808,252	20+891,252	83,00				
88	Curva	20+891,252	21+213,193	321,94	400	189	39	Izquierda

Fuente: Gobierno del Perú y elaboración propia.

Tabla 45: Elementos del alineamiento horizontal del caso ferrocarril Bellavista–Santa Anita (continuación)

Ítem	Descripción	PK inicio	PK final	Longitud	Radio	Peralte		Orientación
						Equilib.	Insufici.	
89	Espiral	21+213,193	21+296,193	83,00				
90	Tangente	21+296,193	22+363,467	1067,27				
91	Espiral	22+363,467	22+422,467	59,00				
92	Curva	22+422,467	22+556,706	134,24	600	126	0	Derecha
93	Espiral	22+556,706	22+615,706	59,00				
94	Tangente	22+615,706	22+664,200	48,49				
95	Espiral	22+664,200	22+754,200	90,00				
96	Curva	22+754,200	22+930,297	176,10	350	216	66	Izquierda
97	Espiral	22+930,297	23+020,297	90,00				
98	Tangente	23+020,297	23+643,841	623,54				

Fuente: Gobierno del Perú y elaboración propia.

Se observa, de la tabla resumen, que las características que vaya adoptando el alineamiento horizontal dependen de tres elementos: la velocidad, el radio o grado de curvatura de la curva y del peralte de equilibrio. En la mayoría de las normas, será en función de ellos que los demás elementos adquirirán sus valores.

De acuerdo al RNFF, éste no especifica un valor mínimo para la longitud de las rectas ni da una fórmula que permita un valor referencial, entonces, como se puede ver en la Tabla 45, no se hallará incumplimiento en la geometría del trazado para medidas de este elemento.

En comparación con las normas estudiadas, la Tabla 46 muestra los valores mínimos para la longitud de la recta horizontal, de acuerdo a las normativas internacionales, en función de la velocidad de proyecto; en la cuales la longitud mínima de recta será el mayor para cada caso.

Tabla 46: Longitud mínima de recta horizontal para el FBS

Elemento	Estados Unidos	Chile	España	Colombia	Canadá	Gran Bretaña	Australia
Fórmula	$0.568 \times V$	$\frac{V}{9}$	$\frac{V}{2}$				$\frac{V}{2}$
Velocidad (km/h)	80	80	80	80	80	80	80
Tangente (m)	45	9	40				40
Tangente mínima (m)	Vagón más largo	30	65	Vagón más largo	19	Vagón más largo	50

Fuente: Elaboración propia.

De la Tabla 46 se obtiene que, para la geometría diseñada con una velocidad de proyecto de 80 km/h y donde transitarán vagones de 20 m, las longitudes mínimas de las rectas horizontales están de acuerdo a las normativas estadounidense, chilena, colombiana, canadiense y británica.

El RNFF tampoco especifica un valor máximo para la insuficiencia de peralte, sin embargo, ésta está contemplada en su formulación de la Norma de 1978, así mismo, tampoco se especifica un valor máximo de aceleración centrífuga no compensada que permita obtener un valor de referencia y que, como se explicó en el marco teórico, debe tener valores máximos de  $a_{cnc}$  de  $0.65 \text{ m/s}^2$  o de  $I$  de 100 mm.

Ante lo expuesto y al no contar con la información suficiente, se considera que la insuficiencia para el caso peruano es igual a 0 mm; encontrando 9 curvas con valores de  $I$  mayores a 0 mm y 4 de ellas con valores mayores a 100 mm.

Luego, en la Tabla 47 se muestran los radios mínimos obtenidos para la velocidad de diseño empleando las fórmulas respectivas a cada norma internacional y sus consideraciones respectivas.

Tabla 47: Radio mínimo de curva circular para el FBS

Elemento	Estados Unidos	Chile	España	Colombia	Canadá	Gran Bretaña	Australia*	Perú
Fórmula	$12.225 \times \frac{V^2}{(z+1)}$	$11.8 \times \frac{V^2}{(z+1)}$	$11.85 \times \frac{V^2}{(z+1)}$	$12.225 \times \frac{V^2}{(z+1)}$	$11.82 \times \frac{V^2}{(z+1)}$	$\frac{V^2}{0.291^2 \times (z+1)}$	$\frac{V^2}{0.29^2 \times (z+1)}$	
Velocidad (km/h)	80	80	80	80	80	80	80	80
Insuficiencia de peralte (mm)	75	61	100	75	75	90	100	
Peralte máximo (mm)	150	150	150	150	150	150	145	150
Radio mínimo (m)	348	358	303	348	348	315	308	507
Radio mínimo** (m)	145	180	750	160	145	200	1600	150

Fuente: Elaboración propia.

\*El peralte máximo en la norma australiana es de 145 mm.

\*\* Radio mínimo según cada norma.

De acuerdo a la Tabla 47 el radio mínimo de 280 m, de la Figura 53, no cumple para ninguna de las normas aplicadas, difiriendo de la norma británica por 35 m y de la peruana, con la que fue diseñada, por 227 m. También, sin considerar los radios mínimos de acuerdo a cada norma, 280 m es 23 y 28 metros menos que los valores obtenidos de las normas española y australiana respectivamente.

Siendo conservadores, por proximidad geográfica, se aprecia que la insuficiencia de peralte recurrente en las normas americanas es de 75 mm. Entonces, adoptando dicho valor para el caso peruano, su radio mínimo disminuirá y quedarían según la Tabla 48.



Figura 53: Radio mínimo de curva del Ferrocarril Bellavista – Santa Anita  
Fuente: Gobierno del Perú

Tabla 48: Radio mínimo de curva circular para el FBS con propuesta de insuficiencia de peralte en el RNFF

Elemento	Estados Unidos	Chile	España	Colombia	Canadá	Gran Bretaña	Australia*	Perú
Fórmula	$12.225 \times \frac{V^2}{(z+1)}$	$11.8 \times \frac{V^2}{(z+1)}$	$11.85 \times \frac{V^2}{(z+1)}$	$12.225 \times \frac{V^2}{(z+1)}$	$11.82 \times \frac{V^2}{(z+1)}$	$\frac{V^2}{0.291^2 \times (z+1)}$	$\frac{V^2}{0.29^2 \times (z+1)}$	
Velocidad (km/h)	80	80	80	80	80	80	80	80
Insuficiencia de peralte (mm)	75	61	100	75	75	90	100	75
Peralte máximo (mm)	150	150	150	150	150	150	145	150
Radio mínimo (m)	348	358	303	348	348	315	308	338

Fuente: Elaboración propia.

\*El peralte máximo en la norma australiana es de 145 mm.

Otra posibilidad para ajustar o disminuir el radio es modificar la altura máxima de peralte. Pudiendo actuar sobre él, la Tabla 49 muestra los radios mínimos según el peralte máximo e insuficiencia máxima de cada normativa.

La modificación de los peraltes máximos según cada reglamento reduce el radio mínimo, pero estos valores no llegan a igualar los 280 m del radio mínimo trazado, acercándose según la AREMA a 10 m.

Tabla 49: Radio mínimo de curva circular para el FBS aplicando el peralte máximo permitido por las normas

Elemento	Estados Unidos*	Chile	España	Colombia	Canadá	Gran Bretaña	Australia	Perú
Fórmula	$12.225 \times \frac{V^2}{(z+1)}$	$11.8 \times \frac{V^2}{(z+1)}$	$11.85 \times \frac{V^2}{(z+1)}$	$12.225 \times \frac{V^2}{(z+1)}$	$11.82 \times \frac{V^2}{(z+1)}$	$\frac{V^2}{0.291^2 \times (z+1)}$	$\frac{V^2}{0.29^2 \times (z+1)}$	
Velocidad (km/h)	80	80	80	80	80	80	80	80
Insuficiencia de peralte (mm)	75	61	100	75	75	90	100	
Peralte máximo (mm)	195	170	160	150	150	150	145	150
Radio mínimo (m)	290	327	292	348	348	315	308	507

Fuente: Elaboración propia.

\*La AREMA no especifica un valor de peralte máximo; para su efecto, al peralte de equilibrio obtenido en el ítem 19 se le resta la insuficiencia máxima de peralte.

Proponiendo una nueva modificación, por proximidad geográfica, además de la insuficiencia de peralte de 75 mm sugerida, se asume un valor de peralte máximo de 170 mm (de la norma chilena). Si bien la norma de la AREMA da valores mayores que los demás, ésta no fija un límite y sugiere que el peralte máximo sea la diferencia entre el peralte de equilibrio y la insuficiencia de peralte. Entonces, para el caso peruano, su radio mínimo sufrirá otra reducción y quedarían según la Tabla 50.

Tabla 50: Radio mínimo de curva circular para el FBS con propuesta de insuficiencia de peralte y modificación del peralte máximo en el RNFF

Elemento	Estados Unidos*	Chile	España	Colombia	Canadá	Gran Bretaña	Australia	Perú
Fórmula	$12.225 \times \frac{V^2}{(z+1)}$	$11.8 \times \frac{V^2}{(z+1)}$	$11.85 \times \frac{V^2}{(z+1)}$	$12.225 \times \frac{V^2}{(z+1)}$	$11.82 \times \frac{V^2}{(z+1)}$	$\frac{V^2}{0.291^2 \times (z+1)}$	$\frac{V^2}{0.29^2 \times (z+1)}$	
Velocidad (km/h)	80	80	80	80	80	80	80	80
Insuficiencia de peralte (mm)	75	61	100	75	75	90	100	75
Peralte máximo (mm)	195	170	160	150	150	150	145	170
Radio mínimo (m)	290	327	292	348	348	315	308	311

Fuente: Elaboración propia.

\*La AREMA no especifica un valor de peralte máximo; para su efecto, al peralte de equilibrio obtenido en el ítem 19 se le resta la insuficiencia máxima de peralte.

Además del radio, la curva también dispone de una longitud que, si bien el RNFF no fija un mínimo, internacionalmente sí. Para la geometría establecida, la Tabla 51 muestra los valores mínimos de acuerdo a cada norma comparada.

De acuerdo a los resultados de la Tabla 51, la longitud mínima de radio mostrada de 31.65 m, ítem 3, está dentro de los límites permitidos en las normas estadounidenses y británicas.

Tabla 51: Longitud mínima de curva circular para el FBS

Elemento	Estados Unidos	España	Canadá	Gran Bretaña	Australia
Fórmula		$\frac{V}{2}$			$\frac{V}{2}$
Velocidad (km/h)	80	80	80	80	80
Longitud de curva (m)		40			40
Longitud mínima de curva (m)	30		47	Vagón más largo	

Fuente: Elaboración propia.

En relación al peralte de equilibrio, para la velocidad de 80 km/h y el radio mínimo de 280 m, en la Tabla 52 se muestran los valores obtenidos empleando las normas a comparar.

Tabla 52: Peralte máximo e insuficiencia máxima de peralte para el FBS

Elemento	Estados Unidos*	Chile	España	Colombia	Canadá	Gran Bretaña	Australia	Perú
Fórmula	$0.007 \times \theta \times V^2$	$11.8 \times \frac{V^2}{R}$	$11.85 \times \frac{V^2}{R}$	$0.007 \times \theta \times V^2$	$0.007 \times \theta \times V^2$	$11.82 \times \frac{V^2}{R}$	$11.84 \times \frac{V^2}{R}$	$11.8 \times \frac{V^2}{R}$
Radio mínimo (m)	280	280	280	280	280	280	280	280
Peralte de equilibrio (mm)	279	270	271	279	279	270	271	270
Peralte de equilibrio máximo (mm)	279	231	260	225	225	240	245	150
- Peralte máximo	(204)	(170)	(160)	(150)	(150)	(150)	(145)	(150)
- Insuficiencia máxima de peralte	(75)	(61)	(100)	(75)	(75)	(90)	(100)	(--)
Diferencia (mm)	0	39	11	54	54	30	26	120

Fuente: Elaboración propia.

\*La AREMA no especifica un valor de peralte máximo; para su efecto, al peralte de equilibrio obtenido en el ítem 19 se le resta la insuficiencia máxima de peralte.

Como resultado, y no considerando la AREMA porque no da valores de peralte máximo, la Tabla 52 muestra que la insuficiencia de peralte obtenida es mayor a la permitida por sus respectivas normas; estando más aproximada el resultado en la norma española.

Respecto a las curvas de transición, el RNFF tampoco especifica una longitud mínima, pero se observa que en la mayoría de las normas su valor se encuentra en función de la altura de peralte (llega hasta el valor máximo) y la velocidad de diseño. La Tabla 53 muestra los valores obtenidos para las transiciones en las curvas de menor radio, con



Nuevamente actuando sobre el peralte máximo, ajustándolo a su máximo de acuerdo a cada norma e igualando el peruano al chileno de 170 mm; la Tabla 54 muestra lo nuevos valores que adoptarían las longitudes mínimas de las transiciones.

Tabla 54: Longitud de curva de transición para el FBS aplicando el peralte máximo permitido por las normas internacionales y modificando el peralte máximo en el RNFF

Elemento	Estados Unidos*	Chile	España	Colombia	Australia	Perú
Fórmula	$0.0095 \times z \times V$	$0.009 \times z \times V$	$0.0042 \times z \times V$	$0.744 \times z$	$0.0111 \times z \times V$	$0.0075 \times z \times V$
Velocidad (km/h)	80	80	80	80	80	80
Peralte máximo (mm)	195	170	160	150	145	170
Longitud de transición (m)	148,20	122,40	53,76	111,60	128,76	102,00
Longitud mínima de transición (m)			160,00		20,00	

Fuente: Elaboración propia.

\*La AREMA no especifica un valor de peralte máximo; para su efecto, al peralte de equilibrio obtenido en el ítem 19 se le resta la insuficiencia máxima de peralte.

Debido a que la relación entre la longitud de la transición y la altura de peralte es directa, al aumentar el segundo también lo hará el primero y viceversa. Por ende, se ve el aumento de la longitud mínima requerida y el no cumplimiento de las normativas respectivas en cuanto a longitud mínima del criterio evaluado. Sin embargo, para el caso peruano la longitud de la transición evaluada (100 m) se sitúa solo 2 metros por debajo del nuevo límite propuesto (102 m).

### 5.1.3 Alineamiento vertical

Así mismo, para la Línea 1 se dispuso el radio mínimo del acuerdo vertical en 3000 m y la gradiente máxima de 3.5%; la Línea 2 adopta los mismos valores; y para el mejoramiento del ferrocarril Huancayo – Huancavelica, la pendiente máxima será de 3.5%.

El ferrocarril Bellavista – Santa Anita estará compuesto por 47 rectas de perfil, 46 acuerdos verticales.

La longitud de la tangente más corta será de 136.32 m (tiene una tangente de 1.69 m, pero no será considerada), el radio mínimo de acuerdo será de 2632 m y el radio máximo de 16667 m y la pendiente máxima será de 3.5%. Las características del alineamiento vertical se muestran en la Tabla 55.

Tabla 55: Elementos del alineamiento vertical para el caso ferrocarril Bellavista – Santa Anita

Ítem	Descripción	PK inicio	PK final	Longitud	Pendiente	Radio	Orientación
99	Tangente	00+000,000	00+001,689	1,69	0,00%		
100	Curva	00+001,689	00+051,689	50,00		3268	Hundimiento
101	Tangente	00+051,689	00+516,656	464,97	1,53%		
102	Curva	00+516,656	00+566,656	50,00		3268	Cumbre
103	Tangente	00+566,656	00+812,000	245,34	0,00%		
104	Curva	00+812,000	00+862,000	50,00		11364	Hundimiento
105	Tangente	00+862,000	01+391,545	529,55	0,44%		
106	Curva	01+391,545	01+441,545	50,00		11364	Cumbre
107	Tangente	01+441,545	01+841,400	399,86	0,00%		
108	Curva	01+841,400	01+891,400	50,00		10730	Hundimiento
109	Tangente	01+891,400	02+536,730	645,33	0,47%		
110	Curva	02+536,730	02+586,730	50,00		10730	Cumbre
111	Tangente	02+586,730	02+813,647	226,92	0,00%		
112	Curva	02+813,647	02+863,647	50,00		3808	Hundimiento
113	Tangente	02+863,647	03+755,000	891,35	1,31%		
114	Curva	03+755,000	03+805,000	50,00		3808	Cumbre
115	Tangente	03+805,000	04+067,411	262,41	0,00%		
116	Curva	04+067,411	04+117,411	50,00		4075	Hundimiento
117	Tangente	04+117,411	05+474,909	1357,50	1,23%		
118	Curva	05+474,909	05+524,909	50,00		4075	Cumbre
119	Tangente	05+524,909	05+785,207	260,30	0,00%		
120	Curva	05+785,207	05+835,207	50,00		8929	Cumbre
121	Tangente	05+835,207	06+306,636	471,43	-0,56%		
122	Curva	06+306,636	06+356,636	50,00		8929	Hundimiento
123	Tangente	06+356,636	06+949,447	592,81	0,00%		
124	Curva	06+949,447	07+019,447	70,00		3182	Hundimiento
125	Tangente	07+019,447	07+392,629	373,18	2,20%		
126	Curva	07+392,629	07+462,629	70,00		3182	Cumbre
127	Tangente	07+462,629	07+671,733	209,10	0,00%		
128	Curva	07+671,733	07+721,733	50,00		10000	Cumbre
129	Tangente	07+721,733	08+199,890	478,16	-0,50%		
130	Curva	08+199,890	08+249,890	50,00		10000	Hundimiento
131	Tangente	08+249,890	08+463,613	213,72	0,00%		
132	Curva	08+463,613	08+523,613	60,00		3000	Hundimiento
133	Tangente	08+523,613	09+135,807	612,19	2,00%		
134	Curva	09+135,807	09+195,807	60,00		3000	Cumbre
135	Tangente	09+195,807	09+391,575	195,77	0,00%		
136	Curva	09+391,575	09+451,575	60,00		3529	Cumbre
137	Tangente	09+451,575	09+747,101	295,53	-1,70%		
138	Curva	09+747,101	09+807,101	60,00		3529	Hundimiento
139	Tangente	09+807,101	10+070,586	263,48	0,00%		
140	Curva	10+070,586	10+175,586	105,00		3000	Hundimiento
141	Tangente	10+175,586	10+510,366	334,78	3,50%		
142	Curva	10+510,366	10+615,366	105,00		3000	Cumbre

Fuente: Gobierno del Perú y elaboración propia.

Tabla 55: Elementos del alineamiento vertical para el caso ferrocarril Bellavista–Santa Anita (continuación)

Ítem	Descripción	PK inicio	PK final	Longitud	Pendiente	Radio	Orientación
143	Tangente	10+615,366	10+770,586	155,22	0,00%		
144	Curva	10+770,586	10+875,586	105,00		3000	Hundimiento
145	Tangente	10+875,586	11+334,537	458,95	3,50%		
146	Curva	11+334,537	11+439,537	105,00		3000	Cumbre
147	Tangente	11+439,537	11+602,628	163,09	0,00%		
148	Curva	11+602,628	11+662,628	60,00		3243	Hundimiento
149	Tangente	11+662,628	12+838,316	1175,69	1,85%		
150	Curva	12+838,316	12+898,316	60,00		3243	Cumbre
151	Tangente	12+898,316	13+543,864	645,55	0,00%		
152	Curva	13+543,864	13+648,864	105,00		3000	Hundimiento
153	Tangente	13+648,864	13+813,261	164,40	3,50%		
154	Curva	13+813,261	13+918,261	105,00		3000	Cumbre
155	Tangente	13+918,261	14+085,278	167,02	0,00%		
156	Curva	14+085,278	14+165,278	80,00		3333	Hundimiento
157	Tangente	14+165,278	15+276,349	1111,07	2,40%		
158	Curva	15+276,349	15+356,349	80,00		3333	Cumbre
159	Tangente	15+356,349	15+509,868	153,52	0,00%		
160	Curva	15+509,868	15+529,868	20,00		5714	Hundimiento
161	Tangente	15+529,868	15+679,340	149,47	0,35%		
162	Curva	15+679,340	15+729,340	50,00		3226	Hundimiento
163	Tangente	15+729,340	16+300,750	571,41	1,90%		
164	Curva	16+300,750	16+350,750	50,00		2632	Cumbre
165	Tangente	16+350,750	16+569,335	218,58	0,00%		
166	Curva	16+569,335	16+644,335	75,00		3034	Hundimiento
167	Tangente	16+644,335	17+676,280	1031,95	2,47%		
168	Curva	17+676,280	17+751,280	75,00		3034	Cumbre
169	Tangente	17+751,280	17+976,712	225,43	0,00%		
170	Curva	17+976,712	18+026,712	50,00		3083	Hundimiento
171	Tangente	18+026,712	18+771,534	744,82	1,62%		
172	Curva	18+771,534	18+821,534	50,00		3083	Cumbre
173	Tangente	18+821,534	19+253,098	431,56	0,00%		
174	Curva	19+253,098	19+358,098	105,00		3000	Hundimiento
175	Tangente	19+358,098	19+538,812	180,71	3,50%		
176	Curva	19+538,812	19+643,812	105,00		3000	Cumbre
177	Tangente	19+643,812	19+780,136	136,32	0,00%		
178	Curva	19+780,136	19+885,136	105,00		3000	Hundimiento
179	Tangente	19+885,136	20+065,851	180,72	3,50%		
180	Curva	20+065,851	20+170,851	105,00		3000	Cumbre
181	Tangente	20+170,851	20+589,582	418,73	0,00%		
182	Curva	20+589,582	20+659,582	70,00		3125	Hundimiento
183	Tangente	20+659,582	21+340,000	680,42	2,24%		
184	Curva	21+340,000	21+407,200	67,20		3000	Cumbre
185	Tangente	21+407,200	21+615,000	207,80	0,00%		
186	Curva	21+615,000	21+665,000	50,00		16667	Hundimiento

Fuente: Gobierno del Perú y elaboración propia.

Tabla 55: Elementos del alineamiento vertical para el caso ferrocarril Bellavista–Santa Anita (continuación)

Ítem	Descripción	PK inicio	PK final	Longitud	Pendiente	Radio	Orientación
187	Tangente	21+665,000	22+410,323	745,32	0,30%		
188	Curva	22+410,323	22+461,323	51,00		3000	Hundimiento
189	Tangente	22+461,323	22+935,364	474,04	2,00%		
190	Curva	22+935,364	22+995,364	60,00		3000	Cumbre
191	Tangente	22+995,364	23+643,841	648,48	0,00%		

Fuente: Gobierno del Perú y elaboración propia.

De la tabla resumen, se ve que las características que vaya adoptando el alineamiento vertical dependen de dos elementos: la velocidad y de la gradiente o pendiente de las rectas. En función de ellos los demás elementos adquirirán sus valores en la mayoría de las normas. Así mismo, como se explica en el marco teórico, la aceleración vertical, que es la relación entre la velocidad y el radio de acuerdo, se limita hasta los  $0.4 \text{ m/s}^2$ .

En el RNFF se menciona un valor mínimo de 45 m para la longitud de las rectas entre acuerdos verticales, entonces no se observa incumplimiento en la geometría del trazado.

Para efectos de la comparación de normativas, la Tabla 56 muestra los valores mínimos de las tangentes bajo las normas internacionales para la velocidad de proyecto.

Tabla 56: Longitud mínima de recta de perfil para el FBS

Elemento	Estados Unidos	Chile	España	Colombia	Gran Bretaña	Australia	Perú
Fórmula	$0.568 \times V$	$\frac{V}{9}$	$\frac{V}{2}$			$\frac{V}{2}$	
Velocidad (km/h)	80	80	80	80	80	80	80
Tangente (m)	45,44	8,89	40,00			40,00	
Tangente mínima (m)	30,00	30,00	80,00	30,00	30,00		45,00

Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo a la Tabla 56, los valores mínimos elegibles son los mayores para cada norma en particular. Entonces, para un tránsito de vagones de 20 m y velocidad máxima de 80 km/h, los resultados hallados son menores que la longitud de la recta más corta del perfil longitudinal; solo no estando conforme a lo que estipula la normativa española.

En el RNFF no se especifica un valor mínimo para el radio del acuerdo vertical ni expresión alguna que permita obtener un valor referencial. Para el trazado propuesto, el menor radio de acuerdo es 2632 m en el ítem 164. En la Tabla 57 se muestran los valores

obtenidos empleando las normas internacionales para los mismos valores del acuerdo en mención.

En la Tabla 57 se observa que, para el acuerdo de evaluado, sus valores concuerdan con los obtenidos por las normas internacionales a excepción de la española, pero es el mismo resultado que se consigue con la norma estadounidense (AREMA).

Tabla 57: Radio mínimo de acuerdo vertical para el FBS

Elemento	Estados Unidos	Chile	España	Gran Bretaña	Australia
Fórmula	$\frac{L}{D}$	$\frac{V^2}{4}$		$\frac{V^2}{7.628}$	
Velocidad (km/h)	80	80	80	80	80
Longitud de acuerdo (m)	50	50	50	50	50
Pendiente (%)	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9
Radio de acuerdo (m)	2632	1600		839	
Radio mínimo de acuerdo (m)		2000	5000	1000	1300

Fuente: Elaboración propia.

En relación a la pendiente máxima empleada en el perfil, es de 3.5%, como se muestra en la Figura 55; siendo superior a la máxima estipulada en el RNFF y solo cumpliendo para las normas colombiana y británica.

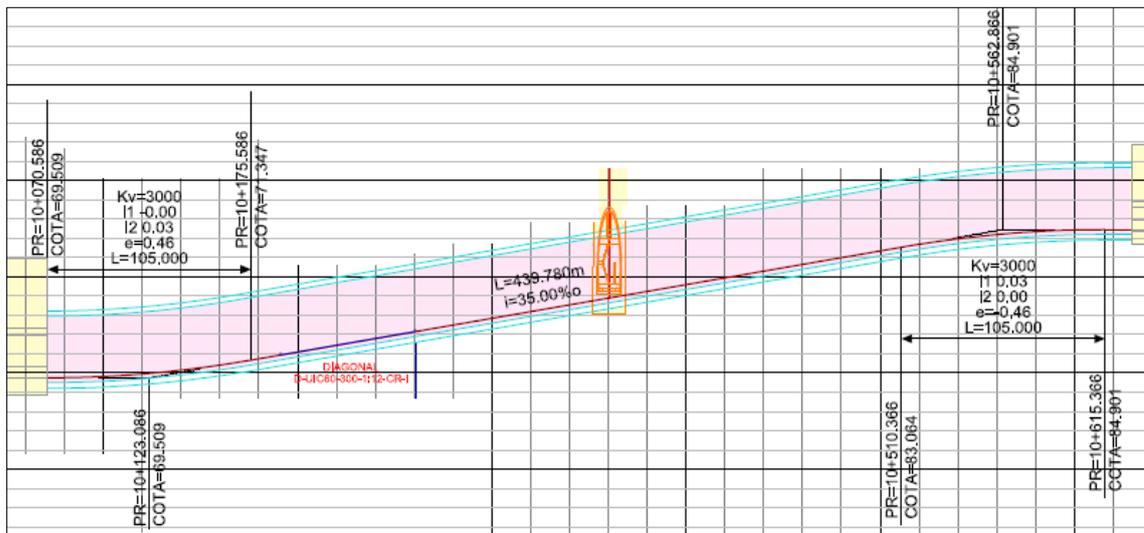


Figura 55: Pendiente máxima del Ferrocarril Bellavista – Santa Anita

Fuente: Gobierno del Perú.

La Tabla 58 muestra los radios mínimos de acuerdo para cada norma evaluada bajo sus criterios respectivos en el trazado propuesto.

Tabla 58: Radio mínimo de acuerdo vertical para el FBS con pendiente máxima

Elemento	Estados Unidos*	Chile*	España*	Gran Bretaña	Australia**
Fórmula	$\frac{L}{D}$	$\frac{v^2}{4}$		$\frac{v^2}{7.628}$	
Velocidad (km/h)	80	80	80	80	80
Longitud de acuerdo (m)	105	105	105	105	105
Pendiente (%)	3,0	3,0	3,0	3,5	2,2
Radio de acuerdo (m)	3500	1600		839	
Radio mínimo de acuerdo (m)		2000	5000	1000	1300

Fuente: Elaboración propia.

\*Pendiente máxima de 3%

\*\*Pendiente máxima de 2.2%

En la Tabla 58 se observa que el mayor de los radios mínimos del acuerdo vertical bajo mismas condiciones (3.5% en la norma británica) es inferior. Sin embargo, haciendo caso omiso de la restricción de máximo 3% y aceptando la pendiente propuesta de 3.5%, los radios diseñados bajo la norma peruana cumplen empleando la fórmula (128),  $R = \frac{L}{D}$ , de la AREMA. Entonces, aplicando la máxima pendiente de la recta y la longitud del acuerdo, como en la Figura 55, la Tabla 59 expone los radios de acuerdo obtenidos para cada norma sin considerar la limitante de la pendiente.

Tabla 59: Radio mínimo de acuerdo vertical para el FBS con propuesta de modificación de pendiente máxima en el RNFF

Elemento	Estados Unidos	Chile	España	Gran Bretaña	Australia
Fórmula	$\frac{L}{D}$	$\frac{v^2}{4}$		$\frac{v^2}{7.628}$	
Velocidad (km/h)	80	80	80	80	80
Longitud de acuerdo (m)	105	105	105	105	105
Pendiente (%)	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5
Radio de acuerdo (m)	3000	1600		839	
Radio mínimo de acuerdo (m)		2000	5000	1000	1300

Fuente: Elaboración propia.

Debido a que en el RNFF tampoco se menciona una longitud mínima para los acuerdos verticales, no se encuentra incumplimiento con la norma. Entonces, para la comparación respectiva, la Tabla 60 muestra los valores mínimos obtenidos de las normas internacionales para una longitud de 20 m y una pendiente de 0.35%.

Siendo 20 m la longitud mínima del acuerdo registrado en el trazado propuesto, ítem 160, este no cumple con lo requerido en las normas internacionales, exceptuando la británica (vagón más largo de 20 m).

Tabla 60: Longitud mínima de acuerdo vertical para el FBS

Elemento	Estados Unidos*	España*	Colombia	Gran Bretaña	Australia**
Fórmula		$\frac{V}{2}$	$\frac{D \times V^2 \times 0.077}{0.03}$		$200 \times (i_1 - i_2)$
Velocidad (km/h)	80	80	80	80	80
Pendiente (%)	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35
Longitud de acuerdo (m)		40	57.5		70
Longitud mínima de acuerdo (m)	30	80	30	Vagón más largo	20

Fuente: Elaboración propia.

\*Pendiente máxima de 3%

\*\*Pendiente máxima de 2.2%

Finalmente, sin considerar las inclinaciones máximas permitidas por cada norma y admitiendo una máxima de 3.5%, la Tabla 61 muestra los valores para las longitudes mínimas de acuerdos.

Tabla 61: Longitud mínima de acuerdo vertical para el FBS con propuesta de modificación de pendiente máxima en el RNFF

Elemento	Estados Unidos	España	Colombia	Gran Bretaña	Australia
Fórmula		$\frac{V}{2}$	$\frac{D \times V^2 \times 0.077}{0.03}$		$200 \times (i_1 - i_2)$
Velocidad (km/h)	80	80	80	80	80
Pendiente (%)	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5
Longitud de acuerdo (m)		40	57.5		700
Longitud mínima de acuerdo (m)	30	80	30	Vagón más largo	20

Fuente: Elaboración propia.

En la geometría propuesta, la longitud de acuerdos verticales, seguidas de rectas con pendiente máxima de 3.5%, es de 105 m. Ubicándose este valor muy por debajo de lo obtenido en las normas colombiana y australiana, pero cumpliendo para las demás.

## **CAPÍTULO VI:**

### **PRESENTACIÓN DE RESULTADOS**

El Ferrocarril Bellavista – Santa Anita, diseñado bajo el RNFF, planteó una geometría en función a una velocidad de diseño de 80 km/h y, además, se trazó alineada a las avenidas que recorrerá, luego, en el capítulo anterior, los criterios geométricos fueron evaluados bajo normas de otros países con el propósito de verificar si sus características cumplen o están de acuerdo a lo establecido por dichas normativas. Así mismo los resultados obtenidos de la evaluación permiten saber que tan desarrollada se encontraba la normativa nacional en comparación con las demás.

#### 6.1 Resultado de la investigación

Considerando que la geometría fue establecida para una velocidad máxima de 80 km/h, para los cálculos respectivos se asumió que el valor determinado era inamovible y se procedió con las operaciones para los alineamientos horizontal y vertical.

A continuación, se desarrollan los resultados de las variables:

- Velocidad de diseño.
- Alineamiento horizontal.
- Alineamiento vertical.

##### 6.1.1 Velocidad de diseño

Si bien se ha aclarado que la velocidad de 80 km/h ya fue establecida, existe una velocidad mínima que los ferrocarriles de pasajeros deben cumplir mínimamente, de acuerdo a la teoría. La Tabla 40 muestra este valor mínimo que varía de 59 a 60 kilómetros por hora, de acuerdo a cada norma, para la geometría establecida y un peralte máximo para la curva de menor radio. También, modificando el peralte al máximo permitido por cada norma, la Tabla 41 presentó las nuevas velocidades mínimas en un rango de 59 a 67 kilómetros por hora. Aunque, se debe precisar que el valor máximo se halló en la norma estadounidense (AREMA) que no limita el peralte máximo.

Insistiendo en que la velocidad de 80 km/h no se modificaría puesto que es la de diseño, en el capítulo anterior se pudo observar que de la Tabla 43, dotando de insuficiencia de peralte al RNFF y en función de la geometría establecida, se obtuvieron las velocidades máximas, para cada norma, con las que el ferrocarril mantendría los estándares de seguridad y confort, y que van de 71 a 77 kilómetros por hora. Luego, empleando los peraltes máximos para cada norma y modificando al peruano, hasta igualar al chileno, se calcularon las velocidades máximas resultando, de la Tabla 44, valores que varían de 72 a 79 kilómetros por hora, aunque cabe la misma precisión respecto a la estadounidense mencionada para el cálculo de la velocidad mínima.

### 6.1.2 Alineamiento horizontal

#### - Longitud de la recta horizontal

Según lo expuesto en la Tabla 46, las siete normas y/o reglamentos internacionales dieron valores mínimos para la longitud de la recta, que van de 19 a 65 metros en comparación con la peruana que no establece longitud mínima.

#### - Radio de curva circular

En una primera evaluación, bajo las mismas condiciones geométricas, la Tabla 47 mostró que los radios mínimos obtenidos, empleando sus fórmulas respectivas, varían entre 303 y 507 metros; siendo el rango para las normas internacionales de 303 a 358 metros, en comparación de los 507 m para la peruana. Luego, modificando el RNFF y dotándolo de insuficiencia de peralte de 75 mm, como se muestra en la Tabla 48, su radio se ajustó y el nuevo rango se redujo de 303 a 358 metros.

Para la siguiente comparación, se admitió el peralte y la insuficiencia de peralte a los máximos permitidos según cada normativa, resultando, como se ve en la Tabla 49, nuevos radios mínimos que van de 290 a 507 metros; nuevamente el valor para la peruana es 507 m, a diferencia del rango de 290 a 348 metros en las internacionales. Entonces, asignando el valor de la insuficiencia de peralte antes mencionado y modificando el peralte máximo permitido en el RNFF hasta igualar el máximo chileno, como se presenta en la Tabla 50,

el radio mínimo para el caso peruano se volvió a ajustar, quedando los valores mínimos de 290 a 348 metros.

- Longitud de la curva circular

Del mismo modo que para la longitud de la recta, cinco normas internacionales dieron valores mínimos para el elemento en mención, que se muestran en la Tabla 51 con valores desde los 20 m (vagón más largo) hasta los 47 m.

- Altura de peralte

Los peraltes encontrados para las distintas normas comparadas tienen máximos que se pueden ver en la Tabla 52 y van desde los 145 hasta los 170 milímetros; excluyendo a la norma estadounidense que no fija un valor límite para su altura de peralte máxima. En lo relacionado al RNFF, fija su peralte máximo en 150 mm.

Entonces, establecida la velocidad y la geometría, también correspondió evaluar el peralte de equilibrio que se descompone en la altura de peralte y la insuficiencia de peralte, tal y como se ve en la tabla antes mencionada y que presentó los valores de 270 a 279 milímetros en la curva de menor radio.

- Insuficiencia de peralte

Los valores para insuficiencia de peralte encontrados para las distintas normas comparadas tienen máximos que se pueden ver en la Tabla 52 y van desde los 61 hasta los 100 milímetros. En lo relacionado al RNFF, no existe valor para este elemento.

Luego, continuando con lo mencionado en altura de peralte respecto al peralte de equilibrio, para su descomposición en altura máxima e insuficiencia primero cabe aclarar que:

- La norma estadounidense establece que la altura máxima de peralte es la de equilibrio menos su valor de insuficiencia máxima.
- El RNFF no fija un valor para la insuficiencia, quedándose con el peralte de equilibrio igual a la altura máxima.
- Las seis normas restantes consideran el peralte de equilibrio de 225 a 260, la altura máxima de 145 a 160 y la insuficiencia de 61 a 100 milímetros.

Entonces, el peralte de equilibrio calculado, de valores de 270 a 279 milímetros, se encontró por encima de los aceptados por las normas consultadas (225 a 260 milímetros).

#### - Longitud de la curva de transición

Seis de las normas consultadas, incluyendo la peruana, arrojaron valores mínimos o fórmulas para hallar la longitud mínima de la transición, obteniendo, como se muestra en la Tabla 53, resultados de 90 a 160 metros bajo las condiciones establecidas. Luego, aumentando los peraltes hasta sus máximos posibles y modificando el peruano hasta igualar el peralte máximo chileno, el rango de longitud de la transición se redujo de 102 a 160 metros.

### 6.1.3 Alineamiento vertical

#### - Longitud de la recta de perfil

Según lo expuesto en la Tabla 56, siete normas y/o reglamentos, incluyendo la peruana, otorgaron valores mínimos para la longitud de la recta en perfil que van desde los 30 hasta los 80 metros.

#### - Pendiente

Respecto a la pendiente o gradiente máxima, siete de las normas dieron valores que van de 2.22 a 3.50%.

#### - Radio de acuerdo vertical

Cinco de las normas internacionales dieron fórmulas o valores de radios mínimos. La Tabla 57 muestra los productos obtenidos, que varían de 1000 a 5000 metros, considerando las características del acuerdo de menor radio presente en el alineamiento vertical. Si se descarta la dimensión obtenida de la norma española, el rango se modificaría de 1000 a 2632 metros.

Luego, en la sección con mayor pendiente y admitiendo una máxima de 3.5% en cada una de las cinco normas comparadas, como en la Tabla 59, el rango de radio mínimo de acuerdo fue de 1000 a 3000 metros para el sector en mención.

#### - Longitud de acuerdo vertical

Son cinco normas internacionales que otorgaron valores mínimos o fórmulas para hallar este valor en función a las restricciones de cada una y a la velocidad de diseño. La Tabla 60 muestra las longitudes mínimas de acuerdo vertical que varían de 20 a 80 metros comparadas bajo las mismas condiciones que la longitud mínima de acuerdo vertical de 20 m establecida en la geometría. Luego, permitiendo una pendiente máxima de 3.5%, como en la Tabla 61, el rango se modificó de 20 a 700 metros comparadas bajo las mismas condiciones que la longitud de acuerdo vertical de 105 m establecida en la geometría.

## 6.2 Análisis e interpretación de los resultados

Luego de realizados los cálculos y presentados los resultados, se procedió con el análisis para cada elemento comparado de los criterios de diseño geométrico.

### 6.2.1 Velocidad de diseño

De acuerdo a cada norma, la velocidad dependerá de factores como la geometría (radio de curva circular y peralte de equilibrio), el uso de la vía y las características del ferrocarril (material rodante). Como se aprecia en la Tabla 62, el 100% de las normas proponen la velocidad en función de la geometría.

Tabla 62 Factores que inciden en la elección de la velocidad de diseño

		Países								%
		Estados Unidos	Chile	España	Colombia	Canadá	Gran Bretaña	Australia	Perú	
Geometría	Radio	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	100
	Peralte	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	100
Uso			✓	✓		✓			✓	50
Ferrocarril		✓	✓			✓				38

Fuente: Elaboración propia.

Y en las fórmulas empleadas, la velocidad es directamente proporcional al peralte de equilibrio ( $z+I$ ) y al radio de la curva  $\odot$ , entonces se entiende que al aumentar la cantidad de  $z$ ,  $I$  o  $R$  la velocidad también se incrementará.

Como se mencionó en la teoría, la velocidad de diseño es la máxima que permite a los usuarios viajar de forma segura y confortable, sin embargo, los resultados obtenidos en la Tabla 42 de los cálculos para cada norma, en función a la geometría, e incluyendo la nacional, dieron valores de velocidad máxima, de 59 a 76 km/h, menores a la velocidad de diseño propuesta de 80 km/h. Siendo el resultado obtenido para la norma peruana de 59 km/h, debido a la falta de suficiencia de peralte y similar a las velocidades mínimas de la Tabla 40 (59 – 60 kilómetros por hora), y el de la española (77 km/h) la que más se acerca al valor de diseño.

En relación a la velocidad mínima, ésta es la que se logra para la curva de menor radio con peralte máximo e insuficiencia de peralte igual a cero; resultando, en todos los casos, velocidades cercanas entre sí (59 a 60 kilómetros por hora). Después, respecto a la velocidad máxima, en la Tabla 43, dotando al RNFF de suficiencia de peralte de 75 mm se logró alcanzar los 73 km/h, 7 menos que el valor inicial. Así también, en la Tabla 44 se modificó el peralte hasta el máximo permitido de acuerdo a cada norma y, además de dotar de suficiencia al RNFF, se le modificó el peralte máximo hasta igualar a la chilena de 170 mm, resultando un nuevo incremento hasta los 76 km/h; también, de la misma tabla, los resultados obtenidos de la española (78 km/h) y de la estadounidense (79 km/h) son lo que más se aproximan a la velocidad de diseño, con la salvedad que en la estadounidense, como ya se explicó, no existe un valor límite de peralte máximo.

Ante lo analizado para la velocidad, en función de la geometría y de acuerdo a todas las normas comparadas, se observó que la velocidad de diseño de 80 km/h es mayor que la velocidad máxima que puede operar el tren, a pesar que deberían coincidir y en el caso peruano ser iguales. Luego, al dotar al RNFF de suficiencia máxima de peralte, de igual valor a la mayoría de la región, permitió un incremento sustancial de la velocidad máxima, aún sin lograr equiparar a la de diseño; otra modificación ahora aumentando el valor del peralte máximo posibilitó que la velocidad máxima sufra un nuevo incremento acercándose a la del proyecto.

Además de lo planteado, también cabe notar que son seis las fórmulas de velocidad, similares en estructura, pero no iguales. Para hallar la velocidad máxima se compararon bajo las mismas condiciones resultando los valores a continuación mencionados. La Tabla 63 y la Tabla 64 muestran las velocidades máximas obtenidas con las fórmulas internacionales para los cambios propuestos para el RNFF.

Tabla 63: Velocidades máximas empleando las fórmulas de normativas internacionales y propuesta de insuficiencia de peralte en el RNFF

Elemento	Estados Unidos*	Chile	España	Gran Bretaña	Australia	Perú
Fórmula	$\sqrt{\frac{z+I}{0.007 \times \theta}}$	$\sqrt{\frac{z+I}{11.8} \times R}$	$\sqrt{\frac{z+I}{11.85} \times R}$	$\sqrt{\frac{z+I}{11.82} \times R}$	$0.291 \sqrt{R \times (z+I)}$	$0.29 \sqrt{R \times (z+I)}$
Radio mínimo (m)	280	280	280	280	280	280
Insuficiencia de peralte (mm)	75	75	75	75	75	75
Peralte máximo (mm)	150	150	150	150	150	150
Velocidad máxima (km/h)	72	73	73	73	73	73

Fuente: Elaboración propia.

\*Colombia y Canadá

Tabla 64: Velocidades máximas empleando las fórmulas de normativas internacionales, propuesta de insuficiencia de peralte y de modificación del peralte máximo en el RNFF

Elemento	Estados Unidos*	Chile	España	Gran Bretaña	Australia	Perú
Fórmula	$\sqrt{\frac{z+I}{0.007 \times \theta}}$	$\sqrt{\frac{z+I}{11.8} \times R}$	$\sqrt{\frac{z+I}{11.85} \times R}$	$\sqrt{\frac{z+I}{11.82} \times R}$	$0.291 \sqrt{R \times (z+I)}$	$0.29 \sqrt{R \times (z+I)}$
Radio mínimo (m)	280	280	280	280	280	280
Insuficiencia de peralte (mm)	75	75	75	75	75	75
Peralte máximo (mm)	170	170	170	170	170	170
Velocidad máxima (km/h)	75	76	76	76	76	76

Fuente: Elaboración propia.

\*Colombia y Canadá

De las tablas arriba, en primer lugar, no se logra igualar la velocidad de diseño, lo que indica que para el modelo se emplearon criterios diferentes; y una vez hallada la velocidad máxima, si bien las diferencias entre los resultados obtenidos con cada norma son mínimas, los resultados son similares, evidenciando que no se recomienda un cambio en la fórmula peruana, en comparación con las modificaciones en los peraltes, que si permiten que se mejore la velocidad.

### 6.2.2 Alineamiento horizontal

#### - Longitud de la recta horizontal

En el diseño de la geometría de vías ferroviarias la teoría expresa que siempre se debe buscar que sea lo más recto posible o que en su defecto cuente con la menor cantidad de curvas necesarias. Ello con el propósito de desarrollar velocidades mayores y acortar el tiempo de viaje. Sin embargo, muchas veces las condiciones no lo permiten; entonces surge la necesidad de contar con una longitud mínima de recta horizontal.

De las normas comparadas, el 50% (Estados Unidos, Chile, España y Australia) expresan que la longitud de la recta horizontal es directamente proporcional a la velocidad de diseño, mientras que en general todas (excepto la peruana) muestran valores mínimos en función de la longitud de los vagones que usan.

Luego de ser comparados los resultados obtenidos en la Tabla 46 (19 – 65 metros), se encontró que la longitud mínima de la recta horizontal del proyecto (48.49 m) estaba por encima de los valores mínimos calculados, exceptuando los valores mínimos de España y Australia que están de 50 m para arriba. También, de los valores calculados por medio de las fórmulas presentes, el resultado de la norma estadounidense es el que más se acercó y acomodó a los 48.49 m mencionados.

Entonces, se propone que la longitud mínima sea la longitud del vagón o coche de pasajeros más largo, y además se complementa condicionándola también en función a la velocidad, para lo cual se recomienda la norma estadounidense donde  $L=0.568 \times V$ .

#### - Radio de curva circular

Respecto a las curvas, se mostró la relación directa de su radio con la velocidad y la relación indirecta con el peralte de equilibrio, indicando que un aumento en la velocidad o en el peralte lo incrementará o reducirá respectivamente. Nuevamente se mostró la influencia del peralte y el valor que adquiere para la situación más desfavorable.

Entonces, la Tabla 47 muestra que, de los radios mínimos obtenidos (303 – 507 metros), el resultado bajo la norma peruana (507 m) fue casi el doble de la curva con menor radio proyectado (280 m); esto en parte por la falta de la insuficiencia de peralte, pero también se obtuvo que el valor más próximo (303 m) fue resultado de usar la española que permite la mayor insuficiencia de peralte (100 mm). Seguido, de similar

modo que con la velocidad, en la Tabla 48, como resultado de dotar al RNFF de insuficiencia, el radio de la curva disminuyó hasta los 338 m. Continuando, como se muestra en la Tabla 50, con el posterior incrementó del peralte máximo hasta el límite chileno de 170 mm, el radio sufrió una nueva reducción hasta los 311 m; aunque empleando los valores de la española éste se podría reducir hasta los 292 m, tan solo 12 m más que del menor proyectado.

Afectar la velocidad también influye en el radio de la curva, que como ya se mencionó, para el caso en particular, dependiendo de los valores que adopten el peralte máximo y la insuficiencia, este puede adquirir valores de 59 a 76 kilómetros por hora. De igual modo, aumentar la velocidad obligaría a aumentar el peralte de equilibrio para mantener constante el radio mínimo de la curva circular.

La relación entre el radio de la curva con la velocidad y el peralte exige rigurosidad en el diseño. Para mantener el radio mínimo en 280 m a la velocidad de 80 km/h, el peralte de equilibrio, usando la norma nacional, debería ser 270 mm que son 25 mm más de lo que se permitiría con las actualizaciones mencionadas; e incluso empleando la norma española que permite mayores valores, el peralte de equilibrio resultaría 271 mm que son 11 mm más que la suma de su peralte máximo con su insuficiencia máxima. Lo que se traduce en la necesidad de replantear algunos criterios de diseño geométrico.

#### - Longitud de curva circular

Continuando con las curvas circulares, en el RNFF no se contempla una longitud mínima que se deba emplear a diferencia de las normas que se muestran en la Tabla 51 (20 – 47 metros en función de la longitud del vagón más largo), donde además para las normas española y australiana existe una relación directa con la velocidad de diseño. Para el estudio de caso realizado, la longitud mínima de curva (31.65 m) solo cumpliría para los valores de las normas estadounidense (30.00 m) y británica (20.00 m).

Entonces, se propone que el RNFF adopte la propuesta de longitud mínima de curva igual a la longitud del vagón más largo y condicionar el resultado en relación a la velocidad; para lo cual se recomienda la norma española donde  $L = \frac{V}{2}$ .

- Altura de peralte

Excluyendo a la norma estadounidense porque no establece un valor máximo para su altura de peralte; de las demás normas, el 57.14% fija su altura máxima en 150 mm y el 28.57% en más. Por lo que, siendo conservadores, se recomienda mantener el valor actual y posteriormente evaluar los beneficios de incrementarla.

- Insuficiencia de peralte

De la Tabla 52 se obtuvo que el peralte de equilibrio obtenido de acuerdo a cada normativa (270 – 279 milímetros), la diferencia menos desfavorable se obtuvo de la española (11 mm), que tiene como altura máxima de peralte 160 mm e insuficiencia máxima de peralte 100 mm.

Luego, siguiendo el ejemplo planteado en el punto de velocidad, en la Tabla 65 se muestran los resultados de fijar el valor de la insuficiencia de peralte máxima y en la Tabla 66 se muestran resultados de, además, modificar la altura máxima de peralte en el RNFF empleando las fórmulas internacionales.

Tabla 65: Peralte de equilibrio empleando las fórmulas de normativas internacionales y propuesta de insuficiencia de peralte en el RNFF

Elemento	Estados Unidos*	Chile	España	Gran Bretaña	Australia	Perú
Fórmula	$0.007 \times 0 \times V^2$	$11.8 \times \frac{V^2}{R}$	$11,85 \frac{V^2}{R}$	$11.82 \times \frac{V^2}{R}$	$11.84 \times \frac{V^2}{R}$	$11.8 \times \frac{V^2}{R}$
Velocidad de diseño (km/h)	80	80	80	80	80	80
Radio mínimo (m)	280	280	280	280	280	280
Peralte de equilibrio (mm)	279	270	271	270	271	270
Peralte de equilibrio máximo (mm)	225	225	225	225	225	225
- Peralte máximo	(150)	(150)	(150)	(150)	(150)	(150)
- Insuficiencia de peralte	(75)	(75)	(75)	(75)	(75)	(75)
Diferencia (mm)	54	45	46	45	46	45

Fuente: Elaboración propia.

\*Colombia y Canadá

Tabla 66: Peralte de equilibrio empleando las fórmulas de normativas internacionales, propuesta de insuficiencia de peralte y de modificación del peralte máximo en el RNFF

Elemento	Estados Unidos*	Chile	España	Gran Bretaña	Australia	Perú
Fórmula	$0.007 \times v \times v^2$	$11.8 \times \frac{V^2}{R}$	$11,85 \frac{V^2}{R}$	$11.82 \times \frac{V^2}{R}$	$11.84 \times \frac{V^2}{R}$	$11.8 \times \frac{V^2}{R}$
Velocidad de diseño (km/h)	80	80	80	80	80	80
Radio mínimo (m)	280	280	280	280	280	280
Peralte de equilibrio (mm)	279	270	271	270	271	270
Peralte de equilibrio máximo (mm)	245	245	245	245	245	245
- Peralte máximo	(170)	(170)	(170)	(170)	(170)	(170)
- Insuficiencia de peralte	(75)	(75)	(75)	(75)	(75)	(75)
Diferencia (mm)	34	25	26	25	26	25

Fuente: Elaboración propia.

\*Colombia y Canadá

Entonces, por lo mostrado, se propone en una primera instancia darle un valor de 75 mm a la insuficiencia de peralte y eventualmente, previa evaluación, aumentar el peralte máximo.

Como se ha señalado, el peralte de equilibrio es el elemento cuya modificación ha permitido, hasta ahora, que tanto el radio de curva circular como la velocidad puedan mejorar. De igual forma, de las tablas arriba, en todos los casos el peralte de equilibrio es mucho mayor que lo que puede cubrir la altura máxima más la insuficiencia máxima, resultando una diferencia no permitida bajo ninguna circunstancia.

Tabla 67: Peralte de equilibrio a máxima velocidad de operación

Elemento	Estados Unidos*	Chile	España	Gran Bretaña	Australia	Perú
Fórmula	$0.007 \times v \times v^2$	$11.8 \times \frac{V^2}{R}$	$11,85 \frac{V^2}{R}$	$11.82 \times \frac{V^2}{R}$	$11.84 \times \frac{V^2}{R}$	$11.8 \times \frac{V^2}{R}$
Velocidad de diseño (km/h)	72	73	73	73	73	73
Radio mínimo (m)	280	280	280	280	280	280
Peralte de equilibrio (mm)	226	225	226	225	225	225
Peralte de equilibrio máximo (mm)	225	225	225	225	225	225
- Peralte máximo	(150)	(150)	(150)	(150)	(150)	(150)
- Insuficiencia de peralte	(75)	(75)	(75)	(75)	(75)	(75)
Diferencia (mm)	1	0	1	0	0	0

Fuente: Elaboración propia.

\*Colombia y Canadá

Sin embargo, en la Tabla 67 se muestran los valores de peralte para la velocidad máxima de operación obtenida de la Tabla 63 (72 – 73 kilómetros por hora). Dando como principal resultado que, además de las modificaciones propuestas, se deba reducir la velocidad.

#### - Longitud de la curva de transición

La importancia de la curva de transición, como se explica en la teoría, es permitir el cambio de recta a curva sin perturbar el confort y la seguridad del pasajero; es por ello que su longitud debe ser calculada. Dicha longitud es directamente proporcional con la altura de peralte (o máximo) de la curva circular y con la velocidad de diseño.

Para el estudio de caso, el peralte de equilibrio para la curva circular de menor radio es 270 mm, por lo que obligatoriamente fue dotada con peralte máximo de 150 mm, consintiendo una insuficiencia de 120 mm, así mismo la longitud de las transiciones que la acompañan fueron diseñadas con 100 m de longitud.

Luego la longitud mínima, calculada aplicando la norma peruana, de la curva de transición correspondiente a la curva circular en mención resultó 90.00 m, como se muestra en la Tabla 53. Sin embargo, en comparación con los resultados obtenidos de la aplicación de las demás, los valores obtenidos fueron superiores e incluso mayores a los 100 m propuestos. También, yendo en correlación con la propuesta de modificar el peralte máximo del RNFF, ello implicaría también una modificación en el resultado final de la longitud de la transición, resultando, según la Tabla 54, un valor de 102.00 m en comparación a los 100.00 m propuestos; por lo que se infiere que al reducir la altura de peralte o máximo, la longitud del elemento mencionado se acorta.

Entonces, por lo expuesto, se propone mantener la fórmula actual que relaciona la longitud de la transición con la altura de peralte y la velocidad de diseño.

#### 6.2.3 Alineamiento vertical

##### - Longitud de la recta de perfil

De forma análoga a las rectas horizontales, de las normas comparadas, el 50% (Estados Unidos, Chile, España y Australia) expresan que la longitud de la recta de perfil es

directamente proporcional a la velocidad de diseño, mientras que en general todas (excepto la canadiense) muestran valores mínimos.

A diferencia del alineamiento horizontal, la norma peruana fija un valor de longitud mínima de recta de perfil de 45.00 m que es 15 m mayor que la de sus pares en el continente y que se muestran en la Tabla 56 (30 metros) y que están en función a la longitud de sus vagones. Luego, la longitud mínima de la recta de perfil proyectada en el caso estudiado fue de 136.32 m, que, después de ser comparada con los resultados obtenidos en, se observó que el valor se encontró por encima de los valores mínimos calculados. También, de los valores calculados por medio de las fórmulas presentes, el resultado de la norma estadounidense (45.44 m) fue el mayor.

Entonces, se recomienda mantener el valor mínimo de 45 m y complementarla condicionándola también en función a la velocidad; para lo cual se recomienda la norma estadounidense donde  $L=0.568 \times V$ .

#### - Pendiente

En relación a las inclinaciones (gradientes o pendientes), se observó que, salvo la norma australiana (2.22%), las demás sitúan su máxima pendiente de 3% a 3.5%.

Si bien la norma peruana limita la pendiente hasta 3.0%, de acuerdo a la teoría las inclinaciones pueden lograr hasta un máximo excepcional de 4%.

Entonces, se propone incrementar la pendiente hasta un máximo de 3.5%, coincidiendo con las normas colombiana y británica y con la pendiente del estudio de caso.

#### - Radio de acuerdo vertical

En el caso de las normas chilena y británica existe una relación directa entre el radio del acuerdo vertical y la velocidad de diseño, cuya estructura se asemeja a lo recomendado en la teoría y la fórmula (40):

$$a_v = \frac{v^2}{R_v} = 0.4 \text{ m/s}^2 \quad \rightarrow \quad R_v = \frac{V^2}{5.184} \quad (180)$$

Donde:

$R_v$ : radio de acuerdo vertical (m).

$V$ : velocidad (km/h).

Luego, considerando inclinaciones similares hasta 3.5%, como en la Tabla 57 y la Tabla 59, al calcular empleando la norma estadounidense se halló igualdad en los resultados obtenidos con los radios de acuerdo vertical mostrados en el alineamiento vertical o de perfil proyectado.

Entonces, se propone emplear la fórmula (180) para el cálculo del radio mínimo y aplicar la norma estadounidense, donde  $R = \frac{L}{D}$ , para hallar el valor real.

- Longitud de acuerdo vertical

Finalmente, de forma similar a la curva circular, los acuerdos verticales cuentan con una longitud que según cada normativa debe tener un límite mínimo o no. El 37.5% (España, Colombia y Australia) proponen relaciones directas de la longitud del acuerdo vertical con la velocidad y/o con la pendiente de las rectas de perfil. Además de las mencionadas, las normas estadounidense y británica dan valores mínimos, 30 m y 20 m (longitud del vagón más largo) respectivamente.

Se observó que debido a que en la norma española la longitud mínima depende de la velocidad, el valor será siempre el mismo, a diferencia de los valores obtenidos en las normas colombiana y australiana que aumentan a medida que la pendiente crece, resultando en longitudes muy grandes para casos extremos, como se mostró en la comparación de los resultados de la Tabla 60 (20 – 80 metros) con los de la Tabla 61 (20 – 700 metros).

Entonces, las propuestas para que la longitud mínima sea de 20 m o la longitud del coche de pasajeros más largo, se acepta y además se sugiere complementarla condicionándola también en función a la velocidad; para lo cual se recomienda la norma española donde  $L = \frac{V}{2}$ .

### 6.3 Contrastación de hipótesis

En contrastación de la hipótesis se procederá por medio de la comparación de la hipótesis planteada y de los resultados conseguidos, para lo cual se resolverá primero la contrastación de las hipótesis específicas y luego la hipótesis general.

#### 6.3.1 Contrastación de las hipótesis específicas

Para la hipótesis específica formulada en el ítem 2.6.2 (a):

Hipótesis alterna: ( $H_{i1}$ ): La actualización del criterio de velocidad de diseño incrementa la velocidad de diseño.

Hipótesis nula: ( $H_{01}$ ): La actualización del criterio de velocidad de diseño disminuye la velocidad de diseño.

El criterio de velocidad de diseño es influenciado por la geometría del alineamiento horizontal (radios de curva y peralte de equilibrio) y como consecuencia de la investigación se ha podido demostrar que, modificando las características de dichos elementos de la geometría se puede permitir diseñar en base a mayores velocidades, sin embargo, no se estaría actuando directamente sobre la velocidad, sino sobre elementos que hacen posible su incremento o disminución, tal y como se demuestra en las fórmulas que aplican:

- Los países de Chile, España, Gran Bretaña, Australia y Perú emplean fórmulas similares para el cálculo de la velocidad de diseño,  $\sqrt{\frac{(z+1)}{(11.80 \text{ a } 11.89)}} \times R$ , y los países de Estados Unidos, Colombia y Canadá emplean la misma fórmula para el cálculo de la velocidad de diseño,  $\sqrt{\frac{(z+1)}{0.007 \times \theta}}$  que deriva en  $\sqrt{\frac{(z+1)}{12.22}} \times R$ .
- Usando las fórmulas de velocidad de diseño dadas en las normas, aplicando el radio y peralte de equilibrio, del proyecto evaluado, se obtuvo una nueva velocidad de diseño (máxima de operación) con un valor 9.22% menor a la inicial de 80 km/h.
- De la nueva velocidad de diseño, aplicando el radio y peralte de equilibrio, del proyecto evaluado, al modelo de todas las normas internacionales, el valor de la nueva velocidad de diseño se redujo un 0.59% en promedio en comparación de la velocidad obtenida utilizando el RNF.

- También, aplicando el radio mínimo, del proyecto evaluado, al modelo de todas las normas internacionales el valor de la nueva velocidad de diseño se incrementó un 0.78% en promedio en comparación de la velocidad obtenida utilizando el RNF.

Debido a la similitud en las fórmulas en la primera premisa, los valores resultantes de las dos últimas premisas significan una variación de  $\pm 0.50$  km/h; por lo tanto, se rechaza la hipótesis alterna y se valida la hipótesis nula.

Para la hipótesis específica formulada en el ítem 2.6.2 (b):

Hipótesis alterna: ( $H_{12}$ ): La actualización del criterio de alineamiento horizontal complementa el alineamiento horizontal.

Hipótesis nula: ( $H_{02}$ ): La actualización del criterio de alineamiento horizontal no complementa el alineamiento horizontal.

El criterio de alineamiento horizontal está conformado por la longitud de la recta horizontal, el radio y la longitud de curva circular, la altura de peralte, la insuficiencia de peralte y la longitud de transición. Entonces, de la presente investigación se ha logrado obtener que la altura de peralte, la longitud de transición y el radio de curva circular no necesitan ser modificados, teniendo una incidencia nula en el alineamiento horizontal. La longitud de la recta horizontal y la longitud de la curva circular tienen una incidencia baja, debido a que efectivamente se diseña en función a la longitud del vagón más largo. Sin embargo, respecto a la insuficiencia de peralte, se encontró omisión en el RNFF, no especificando valor alguno ni formulación para su obtención, por lo que su incidencia en el alineamiento horizontal es alta, por lo siguiente:

- Las normas internacionales emplean una insuficiencia de peralte máxima de 61 a 100 milímetros.
- La insuficiencia de peralte más recurrente en los países de la región (Estados Unidos, Colombia y Canadá) adopta un valor de hasta 75 mm.
- La insuficiencia máxima de peralte de 75 mm permite reducir el radio de curva circular un 33.33% o reducir la altura de peralte en la curva circular:

$$\text{Altura de peralte} = \text{Peralte de equilibrio} - \text{Insuficiencia de peralte.}$$

- La reducción de la altura de peralte reduce la longitud de la curva de transición debido a su relación directa.

- La insuficiencia máxima de peralte de 75 mm permite aumentar el peralte de equilibrio un 50.00%, lo que permite el aumento de la velocidad en un 22.47%.

Por lo tanto, podemos indicar que se acepta la hipótesis alterna.

Para la hipótesis específica formulada en el ítem 2.6.2 (c):

Hipótesis alterna: ( $H_{i3}$ ): La actualización del criterio de alineamiento vertical mejora el alineamiento vertical.

Hipótesis nula: ( $H_{03}$ ): La actualización del criterio de alineamiento vertical no mejora el alineamiento vertical.

El criterio de alineamiento vertical está conformado por la longitud de la recta de perfil, la pendiente, el radio de acuerdo vertical y la longitud de acuerdo vertical.

De la presente investigación se ha logrado obtener que la longitud de la recta de perfil y la longitud de acuerdo vertical tienen una incidencia baja en el alineamiento vertical, debido a que efectivamente se diseña en función a la longitud del vagón más largo. El radio del acuerdo vertical tiene incidencia media en el alineamiento vertical, debido a que se debería normar para que se diseñen en función a un mínimo. Sin embargo, respecto a la pendiente, se le encontró incidencia alta en el alineamiento horizontal, por lo siguiente:

- La pendiente máxima en Colombia y Gran Bretaña adopta un valor de hasta 3.5%.
- Díaz (2013), en su tesis “Análisis de las alternativas de trazo del proyecto del tren interurbano México – Toluca”, recomienda pendientes hasta 3.5%.
- Green y otros (2015), en su presentación “Ingeniería y economía de estándares ferroviarios de alta velocidad internacionales y estadounidenses”, mencionan que en Estados Unidos trabajan con pendientes máximas hasta 4%, en Europa hasta 3.5%.
- El proyecto evaluado fue diseñado con pendientes máximas de 3.5%.
- La pendiente máxima se aumenta 16.67%.
- La modificación de la pendiente permite el diseño de acuerdos verticales de menores radios.

En consecuencia, podemos indicar que se acepta la hipótesis alterna.

### 6.3.2 Contratación de la hipótesis general

Para la hipótesis general formulada en el ítem 2.6.1:

Hipótesis alterna: ( $H_i$ ): La actualización de criterios de diseño geométrico de vías férreas del Perú mejora el reglamento nacional de ferrocarriles.

Hipótesis nula: ( $H_0$ ): La actualización de criterios de diseño geométrico de vías férreas del Perú no mejora el reglamento nacional de ferrocarriles.

Se puede señalar que, de acuerdo a los resultados obtenidos y expuestos en contrastación de hipótesis específicas:

- Incorporarle la cantidad a la insuficiencia de peralte, permite incrementar la velocidad un mínimo de 22.47%.
- Incorporarle la cantidad a la insuficiencia de peralte, permite reducir el radio de curva circular un mínimo de 33.33% o incrementar el peralte de equilibrio un mínimo de 50.00%.
- La modificación de la pendiente permite un aumento del 16.67% en comparación a la cantidad máxima establecida en el RNFF y la posibilidad de diseñar acuerdos verticales de menor radio.

En consecuencia, podemos indicar que se acepta la hipótesis alterna.

### 6.4 Propuesta de mejora

En lo referente a lo obtenido en los resultados, análisis y contrastación de hipótesis, se muestra, en la Tabla 68, la propuesta de las siguientes actualizaciones y la mejora que causan.

Tabla 68: Propuesta de actualización y mejoras en el RNFF

Actualizaciones	Mejoras
Insuficiencia de Peralte (75 mm)	Reducción del radio de curva circular (33,33%)
	Aumento del peralte de equilibrio (50,00%)
	Aumento de la velocidad (22,47%)
Pendiente (3.5%)	Aumento de pendiente máxima (16,67%)
	Acuerdos verticales de menor radio

Fuente: Elaboración propia.

## CONCLUSIONES

- 1) Los criterios de diseño geométrico de vías férreas están conformados por la velocidad de diseño, el alineamiento horizontal y el alineamiento vertical, que comparando el Reglamento Nacional de Ferrocarriles (RNFF) del Perú con las normas de Estados Unidos, Chile, España, Colombia, Canadá, Gran Bretaña y Australia, se encontró criterios, como la insuficiencia de peralte del alineamiento horizontal y la pendiente máxima del alineamiento vertical, mostrados en la Tabla 69, que permiten actualizarlos y consecuentemente mejorar el RNFF.

Tabla 69 Propuestas de actualización en el RNFF

Artículo	Criterio	Elemento	Dice	Debe decir
48	Alineamiento horizontal	Insuficiencia de peralte	-	75 mm
48	Alineamiento vertical	Pendiente	3,00%	3,50%

Fuente: Elaboración propia.

- 2) El criterio de velocidad de diseño está en función al uso que se le dará a la vía, al tipo de ferrocarril a emplear, pero principalmente a las características de la geometría; luego, en una primera instancia, las fórmulas empleadas por normas internacionales arrojaban valores para la velocidad mayores a la obtenidas usando el RNFF y ello se debía a que no se establecían valores para la insuficiencia de peralte, elemento que, junto a la altura de peralte y al radio de curva circular del alineamiento horizontal, tiene una relación directa con la velocidad de diseño; entonces, una vez cubierta la insuficiencia de peralte, las velocidades obtenidas al utilizar las fórmulas de las normas internacionales resultaron similares al valor conseguido de usar el RNFF; por lo que se determina que la fórmula empleada en la actualidad se mantenga.
- 3) El criterio de alineamiento horizontal está conformado por la longitud de la recta horizontal, la longitud y el radio de la curva circular, la altura de peralte, la insuficiencia de peralte y la longitud de la curva de transición; de lo cuales, al modificar y otorgarle valores a la insuficiencia de peralte se permitió reducir los radios de las curvas para tener trazos más cerrados y aumentar el peralte de equilibrio, que permite incrementar la velocidad, o reducir la altura de peralte, quitándole al peralte de equilibrio la insuficiencia de peralte, y esta acción

conllevando a la modificación de la longitud de la curva de transición; por lo que se muestra que la actualización del criterio de alineamiento horizontal complementa al alineamiento horizontal, como se muestra en los ejemplos de la Tabla 70 y la Tabla 71.

Tabla 70 Reducción del radio de curva circular resultado de la actualización del criterio de alineamiento horizontal

Ítem 31			
Antes de propuesta de actualización		Después de propuesta de actualización	
Velocidad de diseño (km/h)	80	Nueva velocidad de diseño (km/h)	80
Altura de peralte (mm)	150	Altura de peralte (mm)	150
Insuficiencia de peralte (mm)	0	Insuficiencia de peralte propuesta (mm)	75
Radio de curva circular calculado (m)	507	Radio de curva circular calculado (m)	338
Longitud de transición calculada (m)	90	Longitud de transición calculada (m)	90

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 71 Reducción de la longitud de la curva de transición resultado de la actualización del criterio de alineamiento horizontal

Ítem 15			
Antes de propuesta de actualización		Después de propuesta de actualización	
Velocidad de diseño (km/h)	80	Velocidad de diseño (km/h)	80
Altura de peralte (mm)	126	Altura de peralte calculado (mm)	51
Insuficiencia de peralte (mm)	0	Insuficiencia de peralte propuesta (mm)	75
Radio de curva circular calculado (m)	604	Radio de curva circular calculado (m)	604
Longitud de transición calculada (m)	76	Longitud de transición calculada (m)	31

Fuente: Elaboración propia.

- 4) El criterio de alineamiento vertical está conformado por la longitud de la recta de perfil, la pendiente y la longitud y el radio de acuerdo vertical; de donde se pudo evidenciar que, si bien el 25% de las normas comparadas emplean pendientes hasta 3.5%, en la actualidad se diseñan y construyen vías férreas con tramos o sectores con pendientes por encima de dicho valor y que a su vez permiten el diseño de acuerdos verticales con radios menores para un trazo de perfil ajustado al terreno; por lo que se indica que la actualización del criterio de alineamiento horizontal mejora al alineamiento horizontal.
- 5) Las mejoras planteadas restringen los criterios para el diseño geométrico de vías férreas y no dejan posibilidad abierta a los proyectistas de utilizar valores a su

conveniencia, respetando la relación existente entre velocidad, peralte y radio de curva.

- 6) Del estudio, queda demostrado que, a nivel internacional, los valores mínimos empleados para las longitudes mínimas de recta (horizontal y perfil) y de curva (circulares y acuerdos) se basan en la longitud del vagón más largo que transite según cada vía; para lo cual en el caso peruano sigue la misma fórmula.
- 7) Finalmente, se evidenció la falta de producción bibliográfica y textos académicos en el ámbito nacional para temas relacionados al sector ferrocarriles; lo que significó, para los autores de la presente tesis, un mayor esfuerzo en su realización.

## RECOMENDACIONES

- 1) La presente tesis aborda temas netamente técnicos de geometría y se considera que la seguridad y el confort del pasajero son temas muy importantes que se toman en cuenta en las normas, por lo que se recomienda nuevas investigaciones profundizando en los aspectos de seguridad y confort.
- 2) Continuar investigando sobre el sistema ferroviario y generar documentación que en un futuro pueda servir de punto de partida para la elaboración de un manual de diseño geométrico para vías férreas del Perú que complemente al Reglamento Nacional de Ferrocarriles y que sirva de punto de partida para futuros proyectos, teniendo en consideración nuestra geografía de costa, sierra y selva.
- 3) En ocasiones, se encontró que dentro de un mismo libro de consulta y/o norma estudiada las dimensiones de las fórmulas que empleaban diferían, obligando la necesidad de homogeneizar su sistema de unidades; por lo que se recomienda investigar para estandarizar las unidades al Sistema Internacional de Unidades.
- 4) El impulso del sector ferroviario viene acompañado de la creación y/o del mejoramiento de tecnologías, como trenes y materiales, que se prevé mejorarán el sistema férreo; por ende, se hace importante investigar los beneficios de implementarlos en el sistema ferroviario peruano en desarrollo, teniendo en cuenta la geografía.
- 5) Dictar en la Universidad Ricardo Palma cursos para el diseño de vías ferroviarias, ya sea de forma libre o en la currícula.
- 6) La información bibliográfica en español es escasa y los libros existentes comparten autorías, por lo que es necesario recurrir a documentos, por lo general, en el idioma inglés; por lo que se recomienda incentivar el idioma inglés.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Administración de Infraestructura Ferroviaria. (2011). *Instrucciones generales para los proyectos de plataforma (IGP)*. Madrid: Gobierno de España.
- Altamirano León, B. (2016). *Propuesta metodológica para la valoración de precios referenciales por kilómetro de vía férrea*. (Tesis para obtener el título de magister en ingeniería del transporte). Quito: Pontificia Universidad Católica del Ecuador.
- Álvarez Mántaras, D., & Luque Rodríguez, P. (2003). *Ingeniería e infraestructura de los transportes: ferrocarriles*. Oviedo: Universidad de Oviedo.
- American Railway Engineering and Maintenance-of-Way Association. (1999). *AREMA manual for railway engineering*. Maryland: American Railway Engineering and Maintenance-of-Way Association.
- Andina. (19 de junio de 2016). *MTC aprueba plan nacional de desarrollo ferroviario*. Recuperado el 12 de Junio de 2019, de Andina: <https://andina.pe/agencia/noticia-mtc-aprueba-plan-nacional-desarrollo-ferroviario-617845.aspx>
- Andina. (11 de Junio de 2019). *Ferrocarril Huancayo - Huancavelica se adjudicará en cuarto trimestre de 2019*. Recuperado el 20 de Agosto de 2019, de andina.pe: <https://andina.pe/agencia/noticia-ferrocarril-huancayo-huancavelica-se-adjudicara-cuarto-trimestre-755200.aspx>
- Arrizaga Urdániz, C. (1980). *Desarrollo del transporte ferroviario en Chile*. Santiago, Chile: Universidad de Chile.
- Bazán Andía, J. A. (2016). *Proyecto red ferroviaria de cercanías para el transporte sostenible en la ciudad de Lima Metropolitana*. (Tesis para optar el título de ingeniero civil). Lima: Pontificia Universidad Católica del Perú.
- Berardo, M. G., Baruzzi, A. G., Dapás, O. M., Freire, R. G., Tartabini, M. I., & Vanoli, G. D. (2017). *Manual de diseño geométrico vial (Vol. II)*. Cordoba, Argentina: Brujas.
- Brito, E. (2005). *Arquitectura ferroviaria: el papel del ferrocarril en la forma de desarrollo de las ciudades mineras del norte de Chile*. Santiago: Universidad de Chile.
- Congreso de la Republica. (2011). *El Sistema Ferroviario Peruano y sus Planes*. Lima: Departamento de Investigación y Documentación Parlamentaria.

- CurioSfera. (s.f.). *La historia del tren: origen, inventor y evolución*. Recuperado el 09 de Junio de 2019, de curiosfera.com: <https://www.curiosfera.com/historia-del-tren/>
- Diario Gestión. (18 de Febrero de 2018). *Nuevos vagones para el Metro de Lima - Línea 1*. Recuperado el 20 de Agosto de 2019, de gestion.pe: <https://gestion.pe/peru/nuevos-vagones-metro-lima-linea-1-227541-noticia/?foto=1>
- Diario Gestión. (17 de Febrero de 2019). *Flota de 25 trenes está lista para la primera etapa de la Línea 2 del Metro de Lima*. Recuperado el 20 de Agosto de 2019, de gestion.pe: <https://gestion.pe/economia/flota-25-trenes-lista-primera-etapa-linea-2-metro-lima-258933-noticia/>
- Díaz González, D. R. (2013). *Análisis de las alternativas de trazo del proyecto del tren interurbano México - Toluca*. (Tesina para optar por el grado de especialista en vías terrestres). México: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Díaz, I. (2015). *Proyecto Vial I*. Recuperado el 12 de Junio de 2019, de slideshare: <https://es.slideshare.net/IsaulDiaz/clase-2-alineamientos-horizontales>
- Esponda, A., Palvacini, J., Navarrete, G., Cuentas, R., Castellanos, G., Esparza, M. A., & Peñalva, G. (2001). *Hacia una Calidad Más Robusta con ISO 9000 : 2000*. México, México: Panorama.
- Federación Castellano Manchega de Amigos del Ferrocarril. (06 de Mayo de 2000). *Diccionario ferroviario*. Recuperado el 01 de Julio de 2019, de fcmaf.es: [www.fcmaf.es/diccionario.htm](http://www.fcmaf.es/diccionario.htm)
- Franco Porto, M., Chamas Falcao, P., Queiroz Franco, J. R., Baracho Porto, R., & Ramos Nunes, N. T. (2015). Systemics, Cybernetics and Informatics. *Automatic analysis of standards in rail projects*, 13(4), 39-44.
- González Fernández, F. J., & Fuentes Losa, J. (2010). *Ingeniería Ferroviaria* (Segunda ed.). Madrid, España: Universidad Nacional de Educación a Distancia.
- Green, J. G., Miller, F., & Teng, H. (2015). Arema 2015 annual conference. *Comparative research on engineering and economics of US and international HSR standards* (pág. 16). Minneapolis: AREMA.
- Guerrero Fernández, J. A. (2017). *Ingeniería de Vías Férreas*. México, México: Lulu.com.
- Hodas, S. (2014). Procedia Engineering. *Design of railway track for speed and high-speed railways*(91), 256-261.

- INACAL. (2016). *Diferencias entre NTP y Reglamento Técnico*. Recuperado el 10 de Junio de 2019, de [inacal.gob.pe](http://inacal.gob.pe):  
<https://www.inacal.gob.pe/principal/categoria/diferencias-entre-ntp-y-reglamento-tecnico>
- INACAL. (s.f.). *Normalización*. Recuperado el 10 de Junio de 2019, de [inacal.gob.pe](http://inacal.gob.pe):  
<https://www.inacal.gob.pe/repositorioaps/data/1/1/6/jer/reglamentos-y-procedimientos-de-normalizacion/files/Presentacion%20Normalizacion%20FINAL.pdf>
- Insa Franco, R., Salvador Zuriaga, P., Martínez Fernández, P., Villalba Sanchis, I., García Román, C., & Pallarol Simón, J. (2016). *Una introducción al ferrocarril* (Vol. II: Elementos constituyentes de la infraestructura). Valencia, España: Universidad Politécnica de Valencia.
- Lichtberger, B. (2011). *Manual de vía* (Segunda ed.). Hamburgo, Alemania: DW Media Group GmbH / Eurailpress.
- López Pita, A. (2006). *Infraestructuras ferroviarias* (Segunda ed.). Barcelona, España: Universidad Politécnica de Catalunya.
- Machado Sánchez, M. E. (2017). *Diagnóstico situación actual de la red férrea Bogotá - Belencito, tramo Suesc - Villapinzón - Tunja*. (Tesis para optar al título de magíster en ingeniería civil). Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.
- Márquez, L. (2017). *El ferrocarril colombiano: 4 temas recurrentes en la literatura*. Tunja, Colombia: Universidad ICESI.
- Melis Maynar, M., & González Fernández, F. J. (2008). *Ferrocarriles Metropolitanos* (Tercera ed.). Madrid, España: Colegio de Ingenieros de caminos, canales y puertos.
- Ministerio de Planificación y Cooperación. (2003). *Recomendaciones de diseño para proyectos de infraestructura ferroviaria*. Santiago: Gobierno de Chile.
- Ministerio de Transporte. (2013). *Manual de normatividad férrea*. Bogotá: Gobierno de Colombia.
- Ministerio de Transportes. (2012). *Track safety rules*. Ottawa: Gobierno de Canadá.
- Ministerio de Transportes y Comunicaciones. (2006). *Reglamento nacional de ferrocarriles*. Lima: Gobierno del Perú.

- Ministerio de Transportes y Comunicaciones. (2016). *Plan Nacional de Desarrollo Ferroviario*. Recuperado el 12 de Junio de 2019, de Diario Oficial El Peruano: <https://busquedas.elperuano.pe/normaslegales/aprueban-el-plan-nacional-de-desarrollo-ferroviario-resolucion-ministerial-no-396-2016-mtc0102-1392428-1/>
- Ministerio de Transportes y Comunicaciones. (2018). *Manual de carreteras: diseño geométrico DG-2018*. Lima: Gobierno del Perú. Obtenido de Diario Oficial El Peruano.
- Ministerio de Transportes y Comunicaciones. (2018). *Resolución Directoral N.º 09-2018-MTC/14*.
- Mora Barón, M. d. (2014). *Evaluación técnica de los anchos de trocha angosta y estándar como parámetro para la actualización del diseño de líneas férreas para el transporte de mercancías en Colombia*. (Trabajo final para optar por el título de maestría en ingeniería transporte). Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.
- ProInversión. (2013). *Estudio de preinversión a nivel de factibilidad de la Línea 2 y tramo de la Línea 4 del Metro de Lima*. Lima: Gobierno del Perú.
- ProInversión. (2016). *Concurso de proyectos integrales para la entrega en consecución del proyecto "rehabilitación integral del ferrocarril Huancayo - Huancavelica"*. Lima: Gobierno del Perú.
- ProInversión. (20 de Agosto de 2019). *Memoria informativa Ferrocarril Huancayo - Huancavelica*. Obtenido de <http://www.proinversion.gob.pe: http://www.proinversion.gob.pe/fhh/docs/MEMORIA-INFORMATIVA-FHH-ESP.pdf>
- Provías Nacional. (2009). *Especificaciones técnicas básicas de la Línea 1: tramo Villa el Salvador- Av. Grau*. Lima: Gobierno del Perú.
- Railway Group Standard. (1998). *Track standards manual*. Safety and Standards Directorate. Londres: Gobierno Británico.
- Red Nacional de los Ferrocarriles Españoles. (1989). *Mantenimiento e infraestructura RENFE*. Madrid: Gobierno de España.
- República Oriental del Uruguay; The World Bank. (2014). *Oriental Republic of Uruguay - Designing the Uruguay rail sector regulator*. Montevideo: Ministerio de Transporte y Obras Públicas.
- Sector Transportes y Comunicaciones. (1978). *Normas y especificaciones técnicas para el diseño de vías férreas en el Perú*. Lima: Gobierno del Perú.

- Soto Canto, H. N. (2015). *Proceso constructivo de la vía férrea de patio de maniobras hasta la estación Los Jardines - proyecto tren eléctrico tramo 2*. (Tesis para optar por el título profesional de ingeniero civil). Lima: Universidad Nacional de Ingeniería.
- Soto, A. (2018). *Pasado, Presente y Futuro de la Industria Ferroviaria en el Perú*. Lima: Colegio de Ingenieros del Perú. Obtenido de Colegio de Ingenieros del Perú.
- Togno, F. (1982). *Ferrocarriles* (Segunda ed.). México: Representaciones y Servicios de Ingeniería S.A.
- Villalás, C. (2002). *Vías de Comunicación: Caminos, Ferrocarriles, Aeropuertos, Puentes y Puertos* (tercera ed.). México, México : Limusa.

## ANEXOS

### Anexo 1: Matriz de consistencia

TEMA: ACTUALIZACIÓN DE CRITERIOS DE DISEÑO GEOMÉTRICO DE VIAS FÉRREAS DEL PERÚ PARA MEJORAR EL REGLAMENTO NACIONAL DE FERROCARRILES													
Planteamiento del problema	Objetivos	Hipótesis	Variables	Dimensiones	Indicadores	Medición	Metodología						
Problema principal	Objetivo principal	Hipótesis general	X: variable independiente	D1-X			Tipo y nivel	Diseño de la investigación					
¿Cómo influye la actualización de criterios de diseño geométrico comparándolo con reglamentos internacionales en el reglamento nacional de ferrocarriles?	Actualizar criterios de diseño geométrico de vías férreas del Perú para mejorar el reglamento nacional de ferrocarriles comparando con los reglamentos internacionales.	La actualización de criterios de diseño geométrico de vías férreas el Perú mejora el reglamento nacional de ferrocarriles.	Criterios de Diseño Geométrico	Velocidad de Diseño	Velocidad máxima	km/h	Tipo de investigación: Cualitativa - Cuantitativa (mixta).						
				D2-X					Longitud de recta horizontal	Radio de curva circular	m	Investigación de información bibliográfica con contenido sujeto a medición y a variación o modificación en el tiempo.	Investigación no experimental.
				Alineamiento Horizontal			Longitud de curva circular	Altura de peralte	m	Nivel de investigación: Descriptivo - Explicativo.	Recopilación de información bibliográfica y comparación de normas, reglamentos y manuales de varios países.		
							Insuficiencia de peralte	Longitud de transición	mm				
				D3-X						Identificación de temas de interés para su análisis comparativo; establecer una relación entre el tema analizado y su aplicación en la realidad peruana; y finalmente proponer la actualización de los criterios estudiados en el reglamento nacional de ferrocarriles.	Transversal.		
				Alineamiento Vertical			Longitud de recta de perfil	Pendiente	m			Documentación recopilada vigente en el periodo en que se realizó la investigación.	
							Radio de acuerdo vertical	Longitud de acuerdo vertical	%				m

Fuente: Elaboración propia

Anexo 1: Matriz de consistencia (continuación)

TEMA: ACTUALIZACIÓN DE CRITERIOS DE DISEÑO GEOMÉTRICO DE VIAS FÉRREAS DEL PERÚ PARA MEJORAR EL REGLAMENTO NACIONAL DE FERROCARRILES								
Planteamiento del problema	Objetivos	Hipótesis	Variables	Dimensiones	Indicadores	Medición	Metodología	
Problemas secundarios	Objetivos secundarios	Hipótesis específicas	Y: variable dependiente	D1-Y			Población y muestra	Técnicas de recolección de datos
¿De qué manera influye la actualización del criterio de velocidad de diseño comparándolo con reglamentos internacionales en la velocidad de diseño?	Actualizar el criterio de velocidad de diseño en el reglamento nacional de ferrocarriles para incrementar la velocidad de diseño, comparando con normas internacionales.	La actualización del criterio de velocidad de diseño incrementa la velocidad de diseño.		Velocidad de Diseño	Velocidad máxima	km/h		Técnicas: Observación documental.
				D2-Y				Recopilación de información bibliográfica.
¿De qué manera influye la actualización del criterio de alineamiento horizontal comparándolo con reglamentos internacionales en el alineamiento horizontal?	Actualizar el criterio de alineamiento horizontal en el reglamento nacional de ferrocarriles a fin de complementar el alineamiento horizontal, comparando con normas internacionales.	La actualización del criterio de alineamiento horizontal complementa el alineamiento horizontal.	Reglamento Nacional de Ferrocarriles	Alineamiento Horizontal	Longitud de recta horizontal Radio de curva circular Longitud de curva circular Altura de peralte Insuficiencia de peralte Longitud de transición	m m m mm mm m	Población: Ferrocarriles de la costa del Perú - Lima.  Muestra: Criterio de diseño geométrico para el ferrocarril Bellavista - Santa Anita.	Instrumentos: Normas, reglamentos y manuales internacionales y nacionales.  Normas, reglamentos y manuales para el diseño geométrico de ferrovías.
				D3-Y				Procesamiento y análisis de datos: Comparación de contenidos, figuras, tablas y fórmulas.
¿De qué manera influye la actualización del criterio de alineamiento vertical comparándolo con reglamentos internacionales en el alineamiento vertical?	Actualizar el criterio de alineamiento vertical en el reglamento nacional de ferrocarriles a fin de mejorar el alineamiento vertical, comparando con normas internacionales.	La actualización del criterio de alineamiento vertical mejora el alineamiento vertical.		Alineamiento Vertical	Longitud de recta de perfil Pendiente Radio de acuerdo vertical Longitud de acuerdo vertical	m % m m		

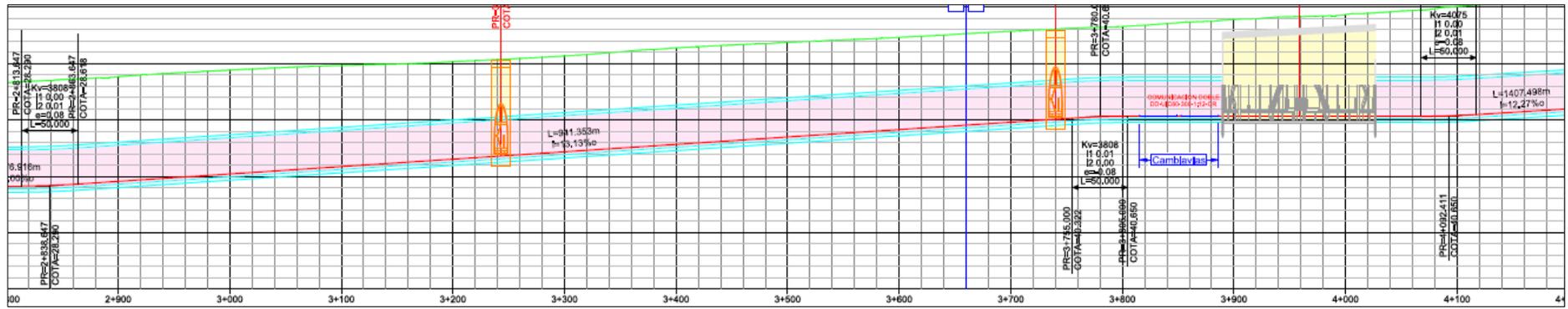
Fuente: Elaboración propia

Anexo 2: Operacionalización de las variables

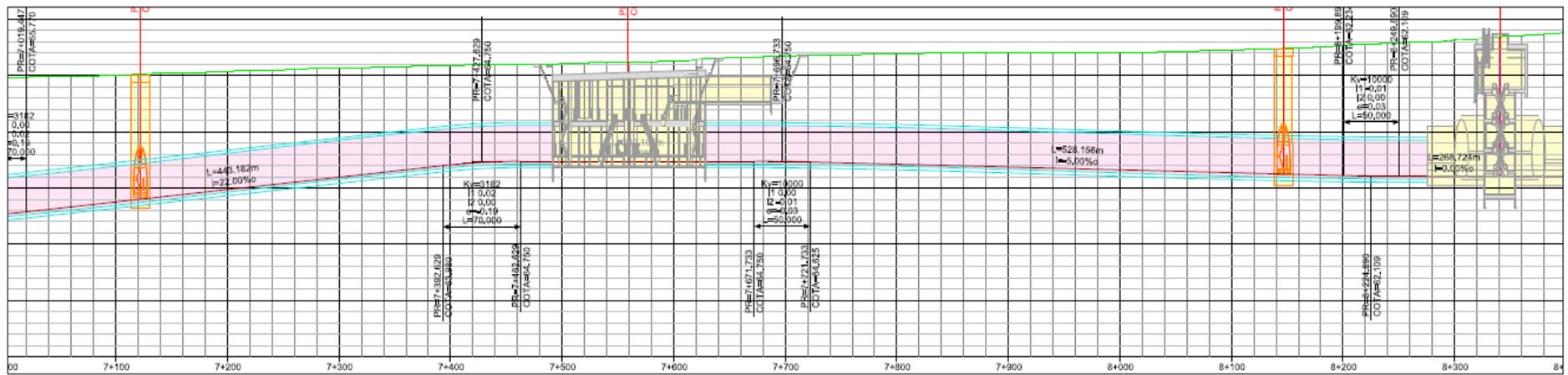
VARIABLES	DEFINICIÓN	DIMENSIONES	DEFINICIÓN	INDICADORES	MEDICIÓN
Criterios de diseño geométrico	Parámetros para el diseño de una vía férrea.	Velocidad de diseño	Velocidad de proyecto o velocidad máxima en la que se mantienen los estándares de seguridad y confort.	Velocidad máxima	km/h
		Alineamiento horizontal	Proyección del eje de la vía sobre un plano horizontal y está constituido por rectas horizontales y curvas circulares.	Longitud de recta horizontal	m
				Radio de curva circular	m
				Longitud de curva circular	m
				Altura de peralte	mm
		Alineamiento vertical	Proyección del eje de la vía sobre un plano vertical y está constituido por rectas de perfil y curvas de acuerdo. También conocido como el perfil longitudinal del proyecto.	Insuficiencia de peralte	mm
Longitud de transición	m				
Reglamento nacional de ferrocarriles	Conjunto de criterios, normas y procedimientos para la construcción de una vía férrea.	Velocidad de diseño	Velocidad de proyecto o velocidad máxima en la que se mantienen los estándares de seguridad y confort.	Velocidad máxima	km/h
		Alineamiento horizontal	Proyección del eje de la vía sobre un plano horizontal y está constituido por rectas horizontales y curvas circulares.	Longitud de recta horizontal	m
				Radio de curva circular	m
				Longitud de curva circular	m
				Altura de peralte	mm
		Alineamiento vertical	Proyección del eje de la vía sobre un plano vertical y está constituido por rectas de perfil y curvas de acuerdo. También conocido como el perfil longitudinal del proyecto.	Insuficiencia de peralte	mm
Longitud de transición	m				
Alineamiento vertical	Proyección del eje de la vía sobre un plano vertical y está constituido por rectas de perfil y curvas de acuerdo. También conocido como el perfil longitudinal del proyecto.	Longitud de recta de perfil	m		
		Pendiente	%		
Alineamiento vertical	Proyección del eje de la vía sobre un plano vertical y está constituido por rectas de perfil y curvas de acuerdo. También conocido como el perfil longitudinal del proyecto.	Radio de acuerdo vertical	m		
		Longitud de acuerdo vertical	m		

Fuente: Elaboración propia





Fuente: Gobierno del Perú.



Fuente: Gobierno del Perú.