



BUAP

BENEMÉRITA **U**NIVERSIDAD **A**UTÓNOMA DE **P**UEBLA

Facultad de Ingeniería

Secretaría de Investigación y Estudios de Posgrado

**PROYECTO GEOMÉTRICO EN CIRCUITOS DE ALTA
VELOCIDAD**

TESIS

Que para obtener el grado de

**MAESTRO EN INGENIERÍA
DE TRÁNSITO Y TRANSPORTE**

Presenta:

CÉSAR ADRIÁN VELARDE SALAS

Director de tesis:

M.I. Ángel Cecilio Guerrero Zamora

Co-asesor de tesis:

M.I. Sergio Efren León Tenorio



BUAP

OFICIO SIEP No. 1102/ 2016

ING. CÉSAR ADRIÁN VELARDE SALAS

Maestría en Ingeniería, opción terminal

Tránsito y Transporte

Presente.

El suscrito M.I. Edgar Iram Villagrán Arroyo, Director de la Facultad de Ingeniería, de acuerdo a su solicitud de aprobación de tema de tesis, le autoriza desarrollar el tema intitulado: **“Proyecto geométrico en circuitos de alta velocidad”**. Para obtener el grado de Maestro en Ingeniería con opción terminal Tránsito y Transporte. Asignándose como Director de tesis al M.I. Ángel Cecilio Guerrero Zamora y Co-Asesor externo al M.I. Sergio Efrén León Tenorio.

Sin otro particular, reciba un cordial saludo.

ATENTAMENTE

“Pensar bien, para vivir mejor”

Puebla, Pue., a 10 de marzo de 2016

M.I. EDGAR IRAM VILLAGRÁN ARROYO

Director de la Facultad de Ingeniería



C.c.p. M.I. Ángel Cecilio Guerrero Zamora. Director de tesis.

C.c.p. M.I. Sergio Efrén León Tenorio. Co-asesor externo.

C.c.p. Archivo

GJS/JCI/dsm.

60
AÑOS DE
AUTONOMÍA
UNIVERSITARIA

Facultad
de Ingeniería

Bvd. Valsequillo y Av. San Claudio
s/n, edif. ING 4, Col. San Manuel,
Ciudad Universitaria,
Puebla, Pue. C.P. 72570
01 (222) 229 55 00 Ext. 7610

ASUNTO: AUTORIZACIÓN DE IMPRESIÓN

M.I. FERNANDO DANIEL LAZCANO HERNÁNDEZ
DIRECTOR DE LA FACULTAD DE
INGENIERÍA DE LA B.U.A.P.

PRESENTE:

El suscrito: M.I. ANGEL CECILIO GUERRERO ZAMORA, Asesor de la Tema de Tesis denominado:

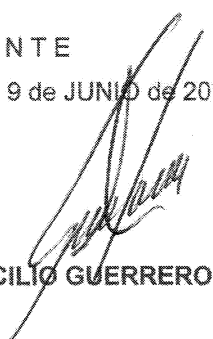
“PROYECTO GEOMÉTRICO EN CIRCUITOS DE ALTA VELOCIDAD”

Presentado por el **C. CÉSAR ADRIÁN VELARDE SALAS**, Pasante de la **MAESTRIA EN INGENIERÍA CON OPCIÓN TERMINAL EN TRÁNSITO Y TRANSPORTE**, me permito informar a Usted que **después de haber revisado cuidadosamente** el contenido temático, la metodología, la redacción y la ortografía de la Tesis correspondiente, no tengo inconveniente **autorizar la impresión** de la misma.

Lo que hago de su conocimiento para los efectos legales a que haya lugar.

ATENTAMENTE

H. Puebla de Z., 9 de JUNIO de 2016



M.I. ANGEL CECILIO GUERRERO ZAMORA
ASESOR

C.c.p.- Interesado
Expediente

Agradezco el apoyo y comprensión de mi familia para la realización de esta tesis. Mi esposa y mi hijo han sabido darme el tiempo necesario para cumplir este reto, sin ese aporte esto no hubiese sido posible.

Índice

Introducción.....	1
1. Protocolo de Investigación	3
1.1. Justificación	3
1.2. Objetivo.....	5
1.3. Hipótesis	5
1.4. Variables	5
1.5. Alcance	5
2. Aspectos generales de proyecto geométrico en carreteras de altas especificaciones	6
2.1. Diseño geométrico en planta para carreteras de altas especificaciones	6
2.2. Diseño geométrico en perfil longitudinal para carreteras de altas especificaciones	10
2.3. Sección transversal para carreteras de altas especificaciones.....	13
3. Características de los vehículos.....	15
3.1. Características de los vehículos comerciales	16
3.2. Características de los vehículos de competición	17
4. Criterios de diseño, aspectos normativos y consideraciones generales en proyectos de circuitos de competición	18
4.1. Alineamiento horizontal en circuitos de competición.....	19
4.1.1. Criterios de diseño en el alineamiento horizontal	19
4.1.2. Aspectos normativos del alineamiento horizontal	21
4.1.3. Consideraciones generales de las buenas prácticas del diseño en alineamiento horizontal	32
4.2. Aspectos generales de la trayectoria del vehículo en circuitos de competición.....	34
4.3. Alineamiento vertical en circuitos de competición.....	48
4.3.1. Criterios de diseño en el alineamiento vertical.....	48
4.3.2. Aspectos normativos del alineamiento vertical	48
4.3.3. Consideraciones generales de las buenas prácticas del diseño del alineamiento vertical	49

4.4.	Sección transversal en circuitos de competición.....	53
4.4.1.	Criterios de definición de la sección transversal	53
4.4.2.	Aspectos normativos de la sección transversal	53
4.4.3.	Consideraciones generales de las buenas prácticas en la sección transversal	55
5.	Elementos de seguridad e instalaciones	57
5.1.	Elementos de seguridad	58
5.2.	Instalaciones	64
5.2.1.	Pits.....	65
5.2.2.	Torre de control	65
5.2.3.	Oficina de control de carrera.....	66
5.2.4.	Centro de cronometraje	67
5.2.5.	Edificio de prensa	67
5.2.6.	Hospital.....	67
5.2.7.	Gradas.....	68
5.2.8.	Paddock.....	69
5.2.9.	Pódium.....	71
5.2.10.	Helipuerto	72
	Conclusiones.....	73
	Bibliografía	75
	Índice de Imágenes.....	76

Introducción

El auge actual de las competiciones vehiculares en circuitos de alta velocidad, en sus diferentes categorías, ha fomentado que la infraestructura para estos eventos deportivos se vea beneficiada, de tal forma, que en últimos años se han desarrollado diversos proyectos para albergar este tipo de eventos, no solo en nuestro país, sino alrededor del mundo. La aplicación de una normatividad no siempre otorgara una satisfacción total de un cliente, en este sentido el objeto de estudio de esta tesis serán los elementos que constituyen a un proyecto de esta índole en el ámbito geométrico basándonos en la normativa internacional pero aportando los criterios de aplicación que enriquecen y otorgan de espectacularidad un circuito de alta velocidad, utilizando diversas formas o criterios de diseño para fomentar una carrera con más zonas de posibles adelantamientos y un circuito que desafié las capacidades máximas de un piloto y del vehículo que conduce.

El proceso de introducción de estas carreras de alta velocidad en México se dio en los años 50's con la carrera Panamericana, dicha competencia recorría más de 3 mil km, cruzando por nuestro país desde la frontera con Estados Unidos y hasta la frontera con Guatemala, en esta competición por primera vez en la historia se vieron vehículos de avanzada tecnología para la época, fabricados en Europa y Estados Unidos, este evento que recorría el continente entero desde Alaska y hasta la tierra del fuego se desarrolló en México 5 años consecutivos, pero después de un accidente en Francia en 1955 se suspendió (JSolana, 2016).

En nuestro país, la familia Rodriguez de la Vega dio a la luz a dos varones que conquistaron diversos premios nacionales e internacionales, Pedro y Ricardo Rodriguez, que en honor a la destacada trayectoria deportiva de estos dos hermanos, en los años 70's, fue nombrado el autódromo de los Hermanos Rodríguez, éste se construyó en el auge del automovilismo en México en los

inicios de la década de los 60's. A la par en nuestro país el interés por este tipo de eventos deportivos dio lugar a la formación de la Asociación Mexicana de Automovilismo que comenzó a fomentar el deporte a lo largo del país. Muchas competencias se llevaron a cabo en diversos circuitos, los cuales en su momento contaban con la infraestructura general para realizar eventos deportivos de esa índole. Desde mediados del siglo pasado el deporte está presente en México y la fuerza que va cobrando día con día va en aumento.

Como se mencionó anteriormente la carrera Panamericana fue suspendida por temas de seguridad debido a un grave accidente en las 24 horas de Le Mans en Francia en donde murieron 83 personas, esta situación catártica, fue el parteaguas para que en este país se haya desarrollado la mayoría de la normatividad de esta materia, los franceses han trabajado para poder realizar estudios y ensayos que les permiten sancionar o validar competencias más seguras. En este sentido la FIA (Federación Internacional de Automovilismo) limita la participación para eventos avalados por ellos, solo en el caso de que los circuitos se encuentren bajo su homologación, de tal forma que dichos escenarios sean seguros tanto para los competidores como para los asistentes.

Un tema importante de seguridad es el trazado geométrico de la pista, en la cual se lleva a cabo la competición, en dicho elemento se deben de tener en cuenta diversos aspectos geométricos que precisamente será el tema a desarrollar en las siguientes páginas y en la correcta aplicación de los criterios para que los proyectos presenten un grado de dificultad aceptable y las competencias sean más vistosas para los espectadores.

1. Protocolo de Investigación

1.1. Justificación

En el año de 2015 regresaron las competencias de Formula 1 a México, después una ausencia de 23 años debido a que no existía un circuito de competición que cumpliera con los estándares que solicita la FIA para desarrollaron un evento de esta magnitud. En este sentido los grandes inversionistas se dieron cuenta que el público mexicano es un asiduo seguidor de este deporte y que estaban ansiosos de volver a ver la prueba máster del automovilismo de nuevo en territorio mexicano.

En nuestro país se iniciaron los trabajos de anteproyectos para la remodelación del circuito Hermanos Rodríguez, ubicado en la zona deportiva de la Magdalena Mixhuca en el Distrito Federal, ahora Ciudad de México. Dichos estudios preliminares arrojaron la viabilidad de una posible homologación del circuito siempre y cuando se atendieran diversos puntos críticos en materia de seguridad para que se iniciara el proceso de homologación ante la FIA.

Después de 2 años, entre el periodo de diseño y la puesta en obra, se concluyeron con los trabajos de remodelación y homologación del circuito, el cual fue habilitado para albergar competencias de Formula 1 y en el mes de octubre del 2015 regreso esta prueba propiedad de Bernie Ecclestone a México, “la Cámara Nacional de Comercio, Servicios y Turismo (Canaco-Servytur) de la Ciudad de México calculó una derrama económica de unos 3,200 millones de pesos durante toda esta semana en la que se celebra el Gran Premio de México 2015 de la Fórmula 1” (CNN, 2015). Además no se puede dejar de lado los 520 millones de telespectadores (CNN, 2015) que estuvieron al pendiente de dicho evento alrededor del mundo y a los cuales se les transmitió la imagen de nuestro país y propiamente de nuestra ciudad como un destino al que podrían visitar en sus próximas vacaciones. Esta derrama

económica que se desato en nuestro país en materia de bienes y servicios, es el claro ejemplo de que el automovilismo en México tiene un futuro prometedor y los dueños del capital económico no dejaran pasar esta oportunidad de negocio que está asomándose a la puerta, inyectando así un atractivo para futuros inversores extranjeros aumentando la derrama del ingreso que genera el turismo, además del impacto positivo que se genera en el mundo debido a la imagen televisiva transmitida por el evento. Esto es sin duda una punta de lanza para el desarrollo económico de nuestro país, ofertando estímulos a los extranjeros y creando una atracción hacia nuestro país, de tal forma ven a México como su próximo destino de viaje.

El desarrollo de más proyectos de este tipo, estará en función de los costos y rentabilidad que estos mismos generen, es evidente que es más económico que un proyecto de este tipo sea desarrollado y construido por gente local, en estricto sentido ingenieros mexicanos que sean capaces de implementar proyectos de esta índole. La justificación de este trabajo se ve sustentada bajo este esquema, el cual alentará a la técnica mexicana y a la especialización de nuestros ingenieros para que muchos proyectos más de este ámbito sean desarrollados en nuestro país.

El primer paso a seguir es dar a conocer la información a nuestros colegas ingenieros y la definición de los documentos especializados que rigen el diseño geométrico en esta materia, haciendo mención propiamente de la documentación de la FIA, siendo esta la máxima autoridad referente al presente trabajo.

Como se mencionó en párrafos anteriores el documento que se utiliza en este trabajo es “Internal Guidelines Motor racing course construction and safety 2012” (FIA, 2012) que actualmente es utilizado a nivel mundial para realizar diseño geométrico en proyectos de circuitos de alta velocidad y con lo cual se promueve una homologación por parte de la FIA.

1.2. Objetivo

Elaborar una guía en referencia al proyecto geométrico para su aplicación en circuitos de alta velocidad, el cual este basado en la normatividad FIA para la homologación de dichas instalaciones en donde el aporte sustancial se incluirá en los criterios que sean potencializadores de la incrementación del grado de espectacularidad del evento.

1.3. Hipótesis

La aplicación de diversos criterios de diseño y buenas prácticas profesionales, bajo los lineamientos de la normatividad de proyecto geométrico para circuitos de alta velocidad de la FIA, fomentará un aumento en el grado de espectacularidad de los circuitos de competición.

1.4. Variables

Las variables dentro de la hipótesis son las siguientes:

- X.- Aplicación de diversos criterios de diseño bajo la normativa FIA.
- Y.- Aumento en el grado de espectacularidad del proyecto de un circuito.

1.5. Alcance

El alcance se delimita a la implantación de una metodología general de diseño para incrementar el grado de espectacularidad de un circuito de competición bajo los lineamientos normativos de la FIA.

2. Aspectos generales de proyecto geométrico en carreteras de altas especificaciones

En este capítulo se describirán los parámetros de diseño geométrico de una carretera de altas especificaciones así como los elementos que lo constituyen dentro de la fase de los trabajos de gabinete al momento de realizar un proyecto de este tipo, esta información servirá como sustento geométrico y matemático para su proyección hacia la parte correspondiente o aplicable de los circuitos de competición.

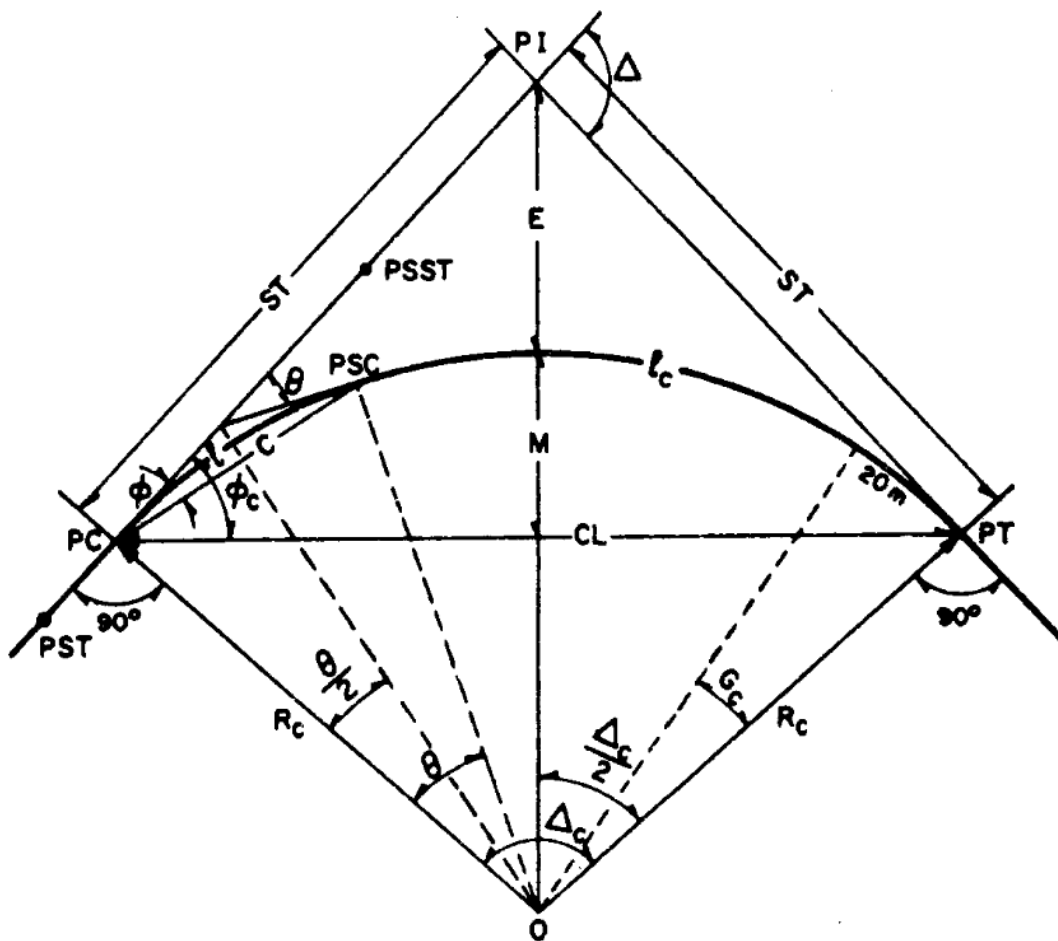
En este caso en particular se especificaran las características propias de una carretera tipo A2, siendo este el límite inferior de las autopistas que en nuestro país se estipula para los caminos de altas especificaciones, la información recabada en este capítulo será extraída de la Norma de Servicios Técnicos de la SCT en su tomo de "Proyecto Geométrico" (SCT, 1984), en el cual se especifican y delimitan todos los parámetros y requerimientos de esta materia para los caminos generales.

2.1. Diseño geométrico en planta para carreteras de altas especificaciones

Los elementos que integran el alineamiento horizontal son las tangentes, las curvas circulares y las curvas de transición.

Las tangentes son la proyección sobre un plano horizontal de las rectas que unen las curvas, la intersección de dos tangentes consecutivas se le representa como PI (Punto de inflexión), y al ángulo formado complementario entre ellas es denominado deflexión Δ . La longitud de una tangente está definida a la distancia contenida entre el inicio y final de una curva. Cualquier punto sobre el alineamiento horizontal se le puede denominar como punto sobre tangente y se le representa por PST.

Las Curvas circulares simples se presentan cuando por medio de una curva circular se unen dos tangentes. En el sentido del cadenamamiento, las curvas simples pueden ser hacia la izquierda o hacia la derecha en función de la dirección hacia dónde giren. Los elementos geométricos característicos de una curva simple se muestran en la figura siguiente:



1Imagen esquemática de curva circular simple (SCT, 1984)

PI Punto de intersección de la prolongación de las tangentes
PC Punto en donde comienza la curva circular simple
PT Punto en donde termina la curva circular simple
PST Punto sobre la tangente
PSST Punto sobre subtangente
PSC Punto sobre la curva circular.
O Centro de la curva circular
 Δ Angulo de deflexión de la tangente
 Δ_c Angulo central de la curva circular
 Θ Angulo de deflexión a un PSC
 Φ Angulo de una cuerda cualquiera
 Φ_c Angulo de la cuerda larga
Gc Grado de curvatura de la curva circular ($G_c=1145.92/R_c$)
ST Subtangente
E Externa
M Ordenada media
C Cuerda.
CL Cuerda larga
l Longitud de un arco
Lc Longitud de la curva circular

Al momento de realizar un proyecto carretero en su alineamiento horizontal cuando ya se tienen trazadas las tangentes de PI a PI, se plantea la introducción de una curva la cual estará definida por un Gc y en función de dicho grado de curvatura y de la velocidad del proyecto a la que se pretenda realizar el camino en cuestión, será posible obtener si la solución geometría estará dada por una curva circular simple o será necesaria la introducción de curvas de transición.

El grado máximo de curvatura que puede tener una curva, es el que permite a un vehículo recorrer con seguridad la curva con la sobreelevación máxima a la velocidad de proyecto, así pues en la Norma de Servicios Técnicos en la tabla 004-07 de dicho documento mencionado se presenta la tabulación de los diferentes grados de curvatura y la velocidad del proyecto para definir en primera instancia si se requiere curva simple o curva espiral.

VELOCIDAD		50			60			70			80			90			100			110		
Gc	Rc	Ac	Sc	Le	Ac	Sc	Le	Ac	Sc	Le	Ac	Sc	Le	Ac	Sc	Le	Ac	Sc	Le	Ac	Sc	Le
0° 15' 00"	4583.68	0	2.0	28	0	2.0	34	0	2.0	39	0	2.0	45	0	2.0	50	0	2	56	0	2	62
0° 30' 00"	2291.84	0	2.0	28	0	2.0	34	20	2.0	39	20	2.0	45	20	2.0	50	20	2.3	56	20	2.7	62
0° 45' 00"	1527.89	20	2.0	28	20	2.0	34	20	2.0	39	20	2.3	45	30	2.8	50	30	3.4	56	30	4	62
1° 00' 00"	1145.92	20	2.0	28	20	2.0	34	20	2.5	39	30	3.0	45	30	3.6	50	30	4.5	56	30	5.2	62
1° 15' 00"	916.74	20	2.0	28	20	2.3	34	30	3.0	39	30	3.7	45	40	4.5	50	40	5.5	56	40	6.3	62
1° 30' 00"	763.95	20	2.0	28	30	2.8	34	30	3.0	39	30	4.4	45	40	5.3	50	40	6.4	56	40	7.3	62
1° 45' 00"	654.81	30	2.2	28	30	3.2	34	30	4.1	39	40	5.0	45	40	6.1	50	40	7.3	58	50	8.1	71
2° 00' 00"	572.96	30	2.5	28	30	3.6	34	30	4.6	39	40	5.7	45	40	6.7	50	50	8.1	65	50	8.9	78
2° 15' 00"	509.30	30	2.8	28	40	4.0	34	40	5.1	39	40	6.2	45	50	7.3	53	50	9.7	70	60	9.4	83
2° 30' 00"	458.37	30	3.1	28	40	4.4	34	40	5.5	39	50	6.8	45	50	7.9	57	60	9.2	74	60	9.8	86
2° 45' 00"	416.70	30	3.4	28	40	4.7	34	40	6.0	39	50	7.3	47	50	8.4	60	60	9.6	77	60	10.0	88
3° 00' 00"	381.97	40	3.7	28	40	5.1	34	50	6.4	39	50	7.7	49	60	8.8	63	60	9.9	79			
3° 15' 00"	352.59	40	3.9	28	40	5.4	34	50	6.7	39	50	8.1	52	60	9.2	66	60	10.0	80			
3° 30' 00"	327.41	40	4.2	28	50	5.7	34	50	7.1	40	60	8.5	54	60	9.6	69						
3° 45' 00"	305.58	40	4.4	28	50	6.0	34	50	7.5	42	60	8.8	56	60	9.8	71						
4° 00' 00"	286.48	40	4.7	28	50	6.3	34	50	7.8	44	60	9.1	58	70	9.9	71						
4° 15' 00"	269.63	50	4.9	28	50	6.6	34	60	8.1	45	60	9.4	60	70	10.0	72						
4° 30' 00"	254.65	50	5.1	28	50	6.9	34	60	8.4	47	70	9.6	61									
4° 45' 00"	241.25	50	5.4	28	60	7.1	34	60	8.7	49	70	9.7	62									
5° 00' 00"	229.18	50	5.6	28	60	7.4	36	60	8.9	50	70	9.9	63									
5° 15' 00"	218.27	60	6.0	28	60	7.8	37	70	9.3	52	80	10.0	64									
6° 00' 00"	190.99	60	6.3	28	70	8.2	39	70	9.6	54												
6° 30' 00"	176.30	60	6.7	28	70	8.6	41	80	9.8	55												
7° 00' 00"	163.70	60	7.0	28	70	8.9	43	80	9.9	55												
7° 30' 00"	152.79	70	7.3	29	80	9.1	44	80	10.0	56												
8° 00' 00"	143.24	70	7.6	30	80	9.4	45															
8° 30' 00"	134.81	70	7.9	32	80	9.6	46															
9° 00' 00"	127.32	80	8.2	33	90	9.7	47															
9° 30' 00"	120.62	80	8.4	34	90	9.8	47															
10° 00' 00"	114.59	80	8.6	34	90	9.9	48															
10° 30' 00"	109.14	90	8.8	35	100	10.0	48															
11° 00' 00"	104.17	90	9.0	36	100	10.0	48															
11° 30' 00"	99.65	90	9.2	37																		
12° 00' 00"	95.49	100	9.3	37																		
12° 30' 00"	91.67	100	9.5	38																		
13° 00' 00"	88.15	100	9.6	38																		
13° 30' 00"	84.88	110	9.7	39																		
14° 00' 00"	81.85	110	9.8	39																		
14° 30' 00"	79.03	110	9.8	39																		
15° 00' 00"	76.39	110	9.9	40																		
15° 30' 00"	73.93	120	9.9	40																		
16° 00' 00"	71.62	120	10.0	40																		
16° 30' 00"	69.45	120	10.0	40																		
17° 00' 00"	67.41	130	10.0	40																		

Ac Ampliación de la calzada y la corona en cm.
Sc Sobreelevación, en porcentaje
Le Longitud de transición mixta, en metros.
(Debajo de la línea gruesa se emplearán espirales de transición y ambas se usarán mixtas)

NOTA: Para grados intermedios no previstos en la tabla, Ac, Sc y Le se obtienen por interpolación lineal

2Tabla de ampliaciones y sobreelevaciones de una carretera tipo A2 (SCT, 1984)

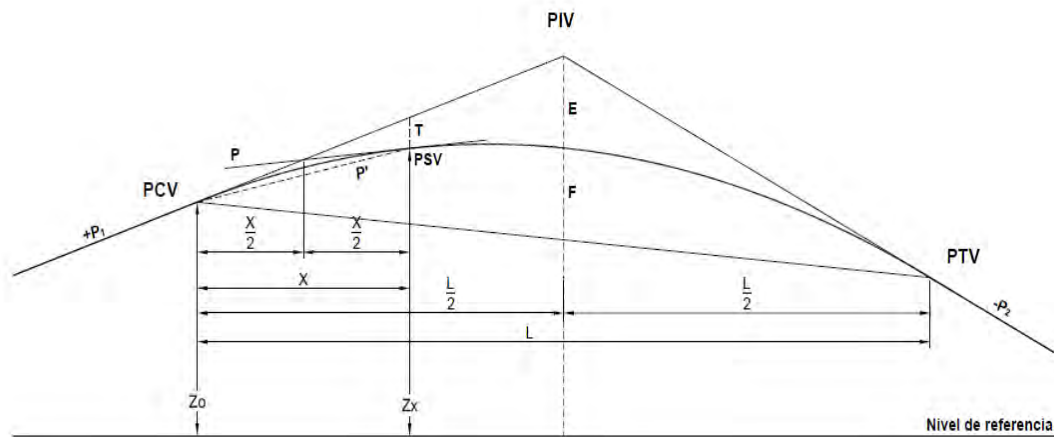
En la tabla anterior podemos ver que el grado de curvatura máximo en el cual se acepta una solución de una curva simple es de $1^{\circ}15''$ (o un Radio de 916.74 m) para una velocidad de proyecto de 110 km/h, a partir de grados mayores será necesario proyectar una curva con espirales de transición o disminuir la velocidad del proyecto.

Para el caso de los circuitos de carreras las curvas espirales no son necesarias en ningún caso, debido a que los vehículos y los pilotos son altamente especializados en el manejo y no es necesario brindarles la comodidad o seguridad que una transición otorga a la conducción, por lo anterior no describiremos el tema de las espirales de transición en este trabajo.

2.2. Diseño geométrico en perfil longitudinal para carreteras de altas especificaciones

Para el caso de la geometría que define un perfil longitudinal de una carretera, se deben de tener en consideración diversos aspectos, como son. La pendiente gobernadora, la pendiente máxima y además se deberá definir el tipo de terreno por el cual el tramo carretero está cruzando, plano, lomerío o montañoso.

Los elementos geométricos que definen un perfil longitudinal están descritos en la siguiente imagen:



3Imagen esquemática de una curva vertical (SCT, 1984)

PIV Punto de intersección de las tangentes verticales

PCV Punto en donde comienza la curva vertical

PTV Punto donde termina la curva vertical

PSV Punto cualquiera sobre la curva vertical

P1 Pendiente de la tangente de entrada, en m/m

P2 Pendiente de la tangente de salida, en m/m

A Diferencia algebraica de pendientes $A = P1 - (-P2)$

L Longitud de la curva vertical, en metros

K Variación de longitud por unidad de pendiente (parámetro) $K = L/A$

X Distancia del PCV a un PSV, en metros

P Pendiente en un PSV, en m/m $P = P1 - A(X/L)$

P' Pendiente de una cuerda, en m/m $P' = 1/2(P1 + P)$

E Externa, en metros $E = (AL)/8$

F Flecha, en metros $F = E$

T Desviación de un PSV a la tangente de entrada, en metros $T = 4E(X/L)^2$

Z0 Elevación del PCV, en metros

Zx Elevación de un PSV, en metros $Zx = Z0 + (P1 - (AX/2L))X$

La forma de trazar un perfil longitudinal en carreteras de altas especificaciones limita las pendientes con valores máximos y mínimos, el máximo para una carretera tipo A2 en un terreno montañoso es del 6% según la imagen 6 de este documento y del 4% en un terreno plano, la pendiente mínima en corte será del 0.5% para garantizar el drenaje.

El trazo del perfil longitudinal es similar al alineamiento horizontal pero en este caso se trazan las tangentes del PIV al PIV (Punto de inflexión vertical) y posteriormente en función de las pendientes de entrada y de salida y del tipo de curva, cresta o columpio, se deberá aplicar la fórmula siguiente:

$$L=K*A$$

Donde

L: longitud de la curva vertical

K: parámetro K extraído de la tabla 4

A: diferencia algebraica de las pendientes

VELOCIDAD DE PROYECTO (Km/h)	VALORES DEL PARAMETRO K (m/%)			
	CURVAS EN CRESTA		CURVAS EN COLUMPIO	LONGITUD MININA ACEPTABLE (m)
	CARRETERA TIPO		CARRETERA TIPO	
E	D,C,B,A	E,D,C,B,A		
30	4	3	4	20
40	7	4	7	30
50	12	8	10	30
60	23	14	15	40
70	36	20	20	40
80	-	31	25	50
90	-	43	31	50
100	-	57	37	60
110	-	72	43	60

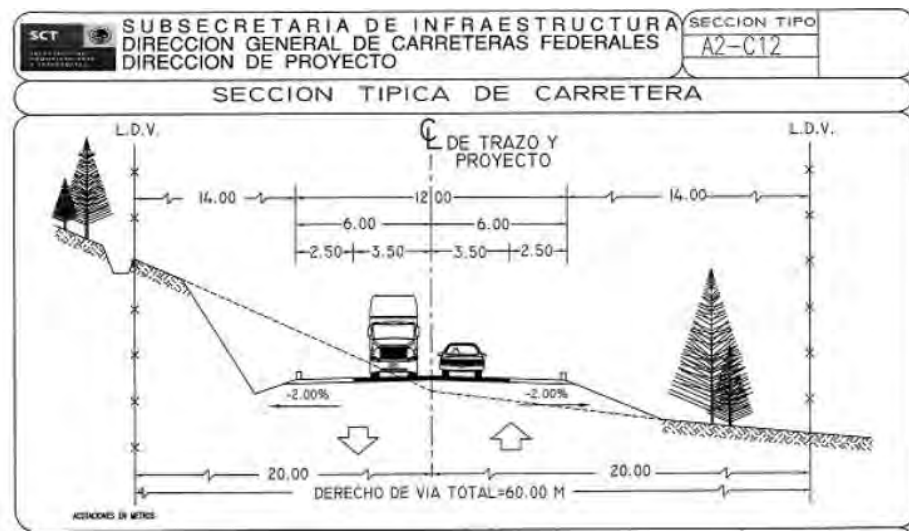
4Tabla para determinar el valor K (SCT, 1984)

Por ejemplo en el caso de que se tenga una carretera tipo A2 con una velocidad de proyecto de 110 km/h y en el perfil se trazaran dos tangentes una con una pendiente de entrada de 2% y la segunda con una pendiente del -3%, la diferencia algebraica seria de 5%, a sabiendas de que es una curva en cresta debemos de utilizar la tabla anterior y determinamos la longitud de la curva vertical realizando la multiplicación de 5 por 72 dando así una longitud de 360 metros como valor mínimo.

Para el caso de los circuitos el cálculo de la longitud de las curvas verticales es diferente y se especificara en el capítulo que compete a este tema.

2.3. Sección transversal para carreteras de altas especificaciones

La sección transversal de una carretera deberá de ser capaz de albergar todos los elementos que garanticen que el nivel de servicio que se dará en dicho tramo carretero sea el ofertado, por ejemplo si es un camino de altas especificaciones del tipo A2 debemos de considerar una sección transversal tal como se muestra en la figura siguiente.



5Sección transversal, carretera tipo A2

En este corte transversal del camino es posible observar la calzada de 12 metros, compuesta por dos carriles de 3.5 metros cada uno y un acotamiento externos de 2.5 a cada lado, además es posible observar el drenaje que se deberá de proyectar, como lo son las cunetas y contracunetas, siendo esta sección la primera de los caminos de altas especificaciones que se tienen en nuestro país. A manera de resumen se anexa una tabla en la cual se especifica el ancho de la sección transversal y el tipo de camino según la configuración establecida por la SCT.

CONCEPTO		UNIDAD	A						
TDPA	EN EL HORIZONTE DE PROYECTO	Veh/día	MAS DE 3000						
TERRENO	MONTAÑOSO								
	LOMERIO								
	PLANO								
VELOCIDAD DE PROYECTO		Km/h	60	70	80	90	100	110	
DISTANCIA DE VISIBILIDAD DE PARADA		m	75	95	115	135	155	175	
DISTANCIA DE VISIBILIDAD DE REBASE		m	270	315	360	405	450	495	
GRADO MÁXIMO DE CURVATURA		°	11	7.5	5.5	4.25	3.25	2.75	
CURVAS VERTICALES	K	CRESTA	m/%	14	20	31	43	57	72
		COLUMPIO	m/%	15	20	25	31	37	43
	LONGITUD MINIMA		m	40	40	50	50	60	60
PENDIENTE GOBERNADORA		m	4 3						
PENDIENTE MAXIMA		m	6 5 4						
LONGITUD CRÍTICA		m	VER FIG. NO. 004.4						
ANCHO DE CALZADA		m	A2 7.00 2 CARRILES	A4 2 X 7.0 4 CARRILES		A4S 2 X 7.0 4 CARRILES			
ANCHO DE CORONA		m	12.00 UN CUERPO	≥ 22.0 UN CUERPO		2 X 11.0 CUERPOS SEPARADOS			
ANCHO DE ACOTAMIENTOS		m	2.50	3.0 EXTERIOR 0.5 INTERIOR		3.0 EXTERIOR 1.0 INTERIOR			
ANCHO DE FAJA SEPARADORA CENTRAL		m	-	≥ 1.0		≥ 8.0			
BOMBEO		%	2						
SOBREELEVACIÓN MAXIMA		%	10						
SOBREELEVACIONES PARA GRADOS MENORES AL MÁXIMO		%	VER TABLA NO. 004-8						
AMPLIACIONES Y LONGITUDES MINIMAS DE TRANSICIÓN		m							

6Características de los caminos de altas especificaciones (SCT, 1984)

Otros elementos muy importantes que se deben de tener en cuenta al momento de las consideraciones de la sección transversal, son las ampliaciones y sobreelevaciones, las cuales estarán en función de la tabla 2 de este documento en el cual en función del grado de la curva y de la velocidad se deberá de incluir una ampliación en la parte interna de la curva y se deberá de realizar una transición en el peralte del camino para ajustarlo al que dicha tabla establezca.

En la tabla 2 con un grado de curvatura de $1^{\circ}15''$ y una velocidad de 110 km/h es necesaria una ampliación de la sección de 0.40 m en la parte interna de la curva y una variación del peralte hasta llegar a 6.3% esto con una longitud de la transición de 62 metros. En el caso de los circuitos de competición como se verá más adelante no existen este tipo de limitantes que obliguen a incluir un sobreelevación o realizar una variación del peralte debido a las características de los vehículos y a la pericia propia de los pilotos.

3. Características de los vehículos

Es evidente que las características entre un vehículo comercial y un auto de carreras son extremadamente diferentes, sin embargo históricamente los hallazgos y nuevas tecnologías utilizadas en los autos de competición varios años después son implementadas por las armadoras en los vehículos comerciales, esto debido a que optimizan el funcionamiento de las máquinas y son aportes tecnológicos para la mejora de dichos transportes.

En el presente capítulo se realiza un análisis de dos vehículos típicos en el ramo de los autos comerciales y los de competición, exaltando las características de ellos para poder tener un panorama de la abismal diferencia que se tiene entre ellos y que debido a estas grandes diferencias pueden conducirse de una forma diferente.

3.1. Características de los vehículos comerciales

Los vehículos comerciales están destinados al transporte eficiente de personas y materiales, debido a esta función sus características se ajustan a dichas necesidades, en el caso del vehículo comercial más vendido según Forbes en el 2015 en México, el Chevrolet Aveo (FORBES, 2016), es un vehículo utilitario de 5 plazas destinado al transporte de personas, a continuación se presentan algunas de sus características físicas y mecánicas (Chevrolet, 2016).

- Altura total 1.5 m
- Ancho total 1.7 m
- Largo total 4.3 m
- Peso bruto 1535 kg
- Numero de cilindros 4
- Cilindrada 3.75 litros
- Numero de válvulas 16
- Potencia 103 HP
- Revoluciones 6000 rpm

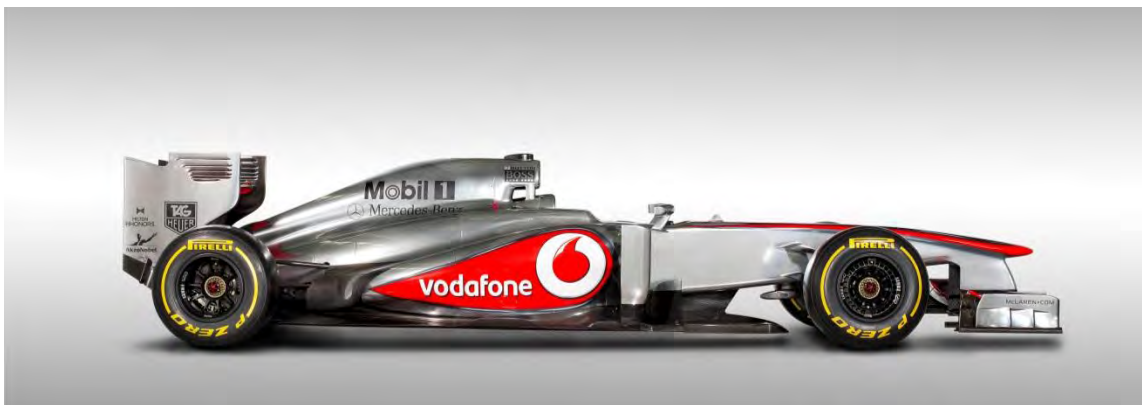


7Chevrolet Aveo extraído de: <http://www.chevrolet.com.pa/images/aveo/chevrolet-aveo-2015-auto-sedan-familiar-exterior-estilo-980x428-05.jpg>

3.2. Características de los vehículos de competición

Como ejemplo de un vehículo de carreras se introducen las características de la ficha técnica de un vehículo de Fórmula 1, en específico del McLaren MP4-28, el monoplaza para la Fórmula 1 del año 2013 de la escudería británica (MOTORZOOM, 2016).

- Chasis: Monocasco de la firma británica, diseñado en fibra de carbono con estructura de impacto frontal y lateral
- Ancho alerón delantero 1.8 m
- Motor: Mercedes-Benz FO 108F
- Cilindrada: 8 cilindros con 2,4 litros
- Máxima de 18.000 rpm
- Número de válvulas: 32
- Peso motor: 95kg
- KERS: Tipo de Mercedes-Benz con motor eléctrico y generador integrado de células de energía. Potencia 60 kW.
- Siete velocidades hacia adelante y marcha atrás
- Peso bruto máximo permitido 702 kg
- Potencia máxima 702 HP



8McLaren MP4-28 extraído de: <https://joesaward.files.wordpress.com/2013/01/profile-3.jpg>

4. Criterios de diseño, aspectos normativos y consideraciones generales en proyectos de circuitos de competición

En los siguientes capítulos se desarrollará de manera sistemática la tesis planteada en el protocolo anterior, la forma como se presentará tendrá un esquema bien establecido el cual se ilustra en los siguientes puntos.

- Criterios de diseño
- Aspectos normativos
- Consideraciones generales

Los criterios de diseño será una breve introducción al tema en desarrollo de ese capítulo en específico y se describirán aspectos muy generales del diseño de un circuito de competiciones y posibles símiles con la forma de realizar proyectos geométricos con caminos o autopistas.

Los aspectos normativos serán un compendio de las diferentes condicionantes establecidas por la normatividad de FIA y se enumeraran diferentes parámetros que limiten o que estén estipulados en la bibliografía utilizada.

Las consideraciones generales serán la parte medular de la comprobación de la hipótesis de este trabajo y del aporte que deja como una innovación en el diseño, a través de diversos criterios y la utilización de diferentes variantes de formas de utilización de la normas establecidas para lograr realizar un proyecto geométrico de un circuito de competición de alta velocidad con un grado alto de espectacularidad el momento de la realización de los eventos deportivos.

Estos tres puntos que se mencionan se replicaran por tres veces tres ya que dichos desarrollos se aplicaran tanto para el diseño en planta, perfil longitudinal y la sección transversal del proyecto. Además se incluyen otros aspectos que

afectan el diseño o que se ven influenciados por él mismo como son las diversas instalaciones requeridas para una homologación ante la FIA o los sistemas de seguridad que se implantan paralelos al circuito para prever alguna colisión o la retención de los vehículos que llegasen a perder el control como son las barreras de concreto o las mallas metálicas.

4.1. Alineamiento horizontal en circuitos de competición

4.1.1. Criterios de diseño en el alineamiento horizontal

El proyecto geométrico de un camino, en general, para su definición en planta está compuesto de tres elementos:

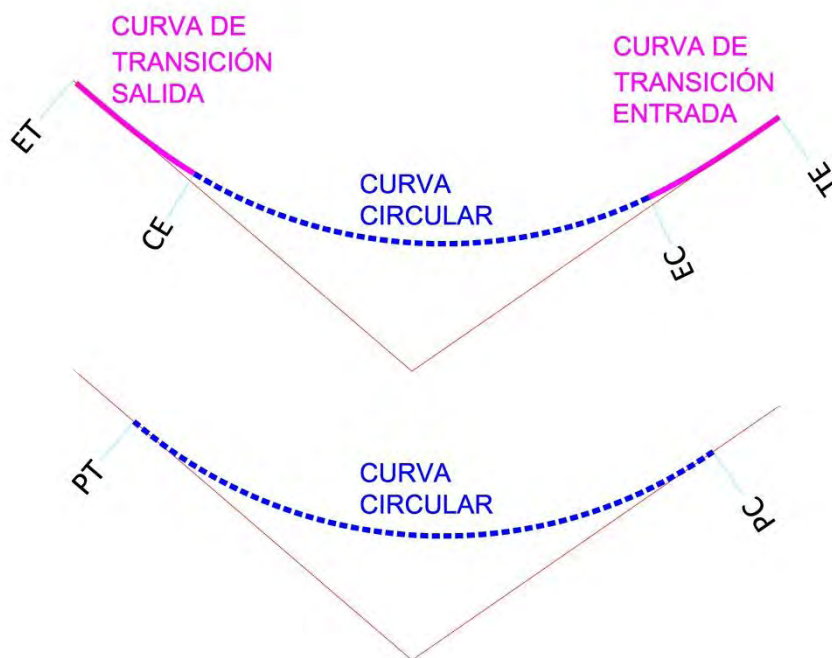
1. Recta (sucesión de puntos)
2. Circunferencia (la define un radio tangente a dos rectas)
3. Curva espiral (transición desde un radio infinito hasta un radio igual al de la curva con la que conecta)

Para el caso de un circuito de carreras en el cual los pilotos son en demasía experimentados y los vehículos presentan un diseño específico que facilita la maniobrabilidad de estos, la definición de la planta geoméricamente solo está limitada a dos elementos.

1. Recta (sucesión de puntos)
2. Circunferencia (la define un radio tangente a dos rectas)

Como sabemos la curva espiral es el elemento de transición entre una recta y una curva lo que hace que el conductor realice un cambio de dirección suavemente y que las diferencias entre las aceleraciones centrífuga y centrípeta no lo saquen de control en su manejo.

A continuación se presenta un esquema de un trazo del eje de un proyecto, en el cual se tienen los dos ejemplos de cambio de dirección de dos tangentes, la primera usando las curvas de transición en la entrada y en la salida y la segunda utilizando solo una curva circular simple. Para el caso de la solución que utiliza curvas de transición es posible apreciar en dicho esquema el cambio gradual de dirección que experimentará el vehículo al circular por ella en comparativa con el caso de la curva circular simple.



9 Esquema de curvas horizontales

Para el caso de la geometría, en particular los elementos que componen a dichas curvas simples, serán los mismos que en las carreteras de altas especificaciones tal como se ha descrito en el capítulo 2 del presente trabajo, en específico del numeral 2.1 y la imagen 1 de este documento.

4.1.2. Aspectos normativos del alineamiento horizontal

Como se mencionó en los párrafos anteriores los parámetros que debemos delimitar y observar en la implantación de un proyecto geométrico, en su parte del alineamiento horizontal, son la definición de las rectas y las curvas que componen un circuito. Existen dos tipos de circuitos permanentes y no permanentes sin embargo las limitantes en materia geométrica del alineamiento horizontal para ambos casos son las mismas.

Circuitos permanentes: Los circuitos permanentes son instalaciones las cuales están destinadas para la realización de competiciones en materia de automovilismo, dichos escenarios se preparan y desarrollan pensando en la temática principal del deporte. No con esto son independientes de poder utilizarse para otros fines en los días que no existan eventos, pero su fin último es el de albergar carreras de alta velocidad.

A continuación se presentan algunos de los circuitos mas emblemáticos a nivel internacional para la prueba master de la Formula 1 en circuitos permanentes.

Nombre	País	Categoría
Autódromo Hermanos Rodriguez	México	F1
Circuito de Melbourne	Australia	F1
Circuito de Shanghái	China	F1
Circuito Gilles Villeneuve	Canadá	F1
Circuito de Suzuka	Japón	F1
Circuito de las Américas	Estado Unidos	F1

Como un claro ejemplo de este menester tenemos el circuito de competencias deportivas de los Hermanos Rodriguez, el cual a pesar de estar destinado para la práctica del deporte del automovilismo no deja de lado su

carácter ambivalente y muchas veces se organizan otro tipo de eventos culturales, recreativos y deportivos.



10Circuito Hermanos Rodríguez

Circuitos no permanentes: son instalaciones destinadas a una o más carreras, pero al final de estas, se desmontarán todas las instalaciones propias del circuito para dar paso a alguna otra actividad.

A continuación se presentan algunos de los circuitos más emblemáticos a nivel internacional para la prueba master de la Formula 1 en circuitos no permanentes.

Nombre	País	Categoría
Circuito urbano de Valencia	España	F1
Circuito urbano de Baku	Azerbaiyán	F1
Circuito de Mónaco	Mónaco	F1
Circuito Marina Bay	Singapur	F1
Circuito urbano Miami	Estados Unidos	FE (formula eléctrica)
Circuito urbano de Londres	Reino Unido	FE (formula eléctrica)
Circuito urbano de Buenos Aires	Argentina	FE (formula eléctrica)

Como ejemplo tenemos el circuito urbano de Miami en el estado de Florida en Estados Unidos de Norteamérica el cual está implantado en la zona costera de dicha ciudad y todos los elementos que se utilizan para una competencia en esa zona son desmontables pues después de las competiciones las calles por las que se realiza la carrera son utilizadas como vías de comunicación principal para dicha ciudad.

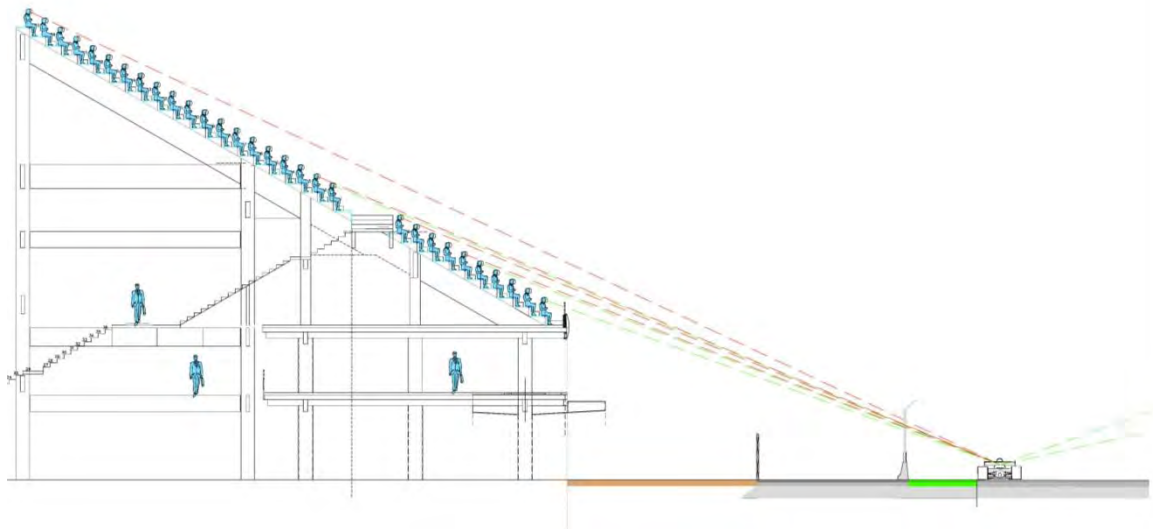


11 Circuito temporal, Miami Florida (extraído de <http://fiaformulae.com/en/media/photo-galleries/formula-e-miami-ePrix>)

Las limitantes geométricas establecidas en la normativa para circuitos de carreras están definidas en las rectas y en las curvas del trazado de una pista, para el caso de las rectas se tiene una definición de longitud máxima establecida por la FIA de 2 km (FIA, 2012) esta longitud máxima va encaminada a que los vehículos después de alcanzar velocidades mayores a los 300 km/h se estancan en una limitante física de velocidad y una longitud mayor de recta lo único que propicia es que se gaste más combustible y no aporta ningún tipo de reto ni de emoción al espectador, sino todo lo contrario pues el piloto es susceptible a calcular mal la entrada a la curva y podría salir por la zona de escape (zona de seguridad en caso de perder el control) debido a este mal cálculo.

Aunado a estos problemas se presenta una complicación mucho mayor por rectas tan largas, pues la colocación de las gradas se complica ya que las isopticas (líneas de visión entre un espectador y un objeto) no son óptimas y es prácticamente imposible a dicho asistente al evento poder seguir el paso de un vehículo frente a él a tal velocidad.

A continuación se muestra un corte transversal de una sección de pista en recta (recta de meta) en la cual se aprecia la proyección de las isopticas de los espectadores sentados en las gradas, como se puede observar el vehículo colocado del lado derecho de la imagen es observado a plenitud por los asistentes al evento, pero solo en el instante en el que dicho auto pasa frente a ellos pues debido a la rapidez del mismo muy pronto queda fuera del campo de visión de los asistentes, haciendo muy común que los lugares para estos eventos colocados en recta sean los menos costosos.



12Sección transversal de recta de meta con isopticas

Actualmente el auge de la formula E (formula eléctrica) está influenciando en la proyección de circuitos de carreras que puedan albergar dicha competición de una manera adecuada, los vehículos eléctricos por sus componentes y forma de funcionamiento tienden a perder potencia en rectas largas, su

aceleración es potente pero en los casos de longitudes sostenidas dicha potencia se ve mermada, con lo cual no podemos olvidar este factor que se debe de tomar en consideración al momento de plantear una recta en un circuito.

También en el Apéndice O (APPENDIX O, 2016) de la normatividad FIA se recomienda que los circuitos tengan longitudes menores a los 7 km, esto va encaminado a la duración de los eventos, la longitud promedio en función del tipo de evento es la que se muestra en la siguiente tabla extraída de la referencia anterior.

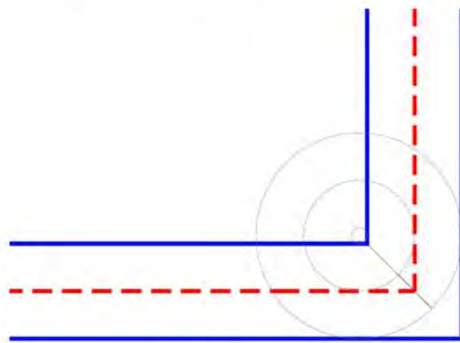
TIPO DE COMPETENCIA	LONGITUD OPTIMA EN KILOMETROS
Sport cars	3.5
GT	3.5
F1	3.5
Touring Cars (Turismo)	3
F3	2

La longitud mínima de un circuito será de 2 km según lo establecido en el Apéndice O (APPENDIX O, 2016) de la normatividad FIA sin embargo esta limitación solo es recomendable cuando no existe mayor área para desarrollar el circuito ya que dentro de esta longitud una competencia se lleva a cabo de una manera más rápida y no oferta el mismo espectáculo a los seguidores de las carreras.

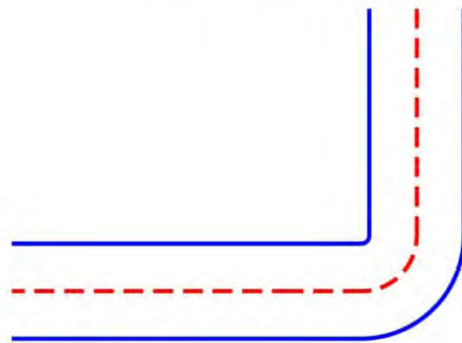
El siguiente punto que la normatividad FIA hace mención en su capítulo 2 de la referencia (FIA, 2012) es el tema de las curvas horizontales, las cuales como ya vimos en un inicio, no deberán de incluir las transiciones de curvas espirales. En este sentido la FIA no especifica un radio mínimo o máximo para la curvas

horizontales, pues los circuitos, a diferencia de las vialidades urbanas o carreteras, presentan una variabilidad extrema en la velocidad de operación, por este motivo podemos determinar que el radio mínimo que se puede usar estará, en función del ancho del camino para que la parte interna de la curva no presente un punto anguloso, tal como se muestra en la siguiente imagen.

CON PUNTOS ANGULOSOS



SIN PUNTOS ANGULOSOS



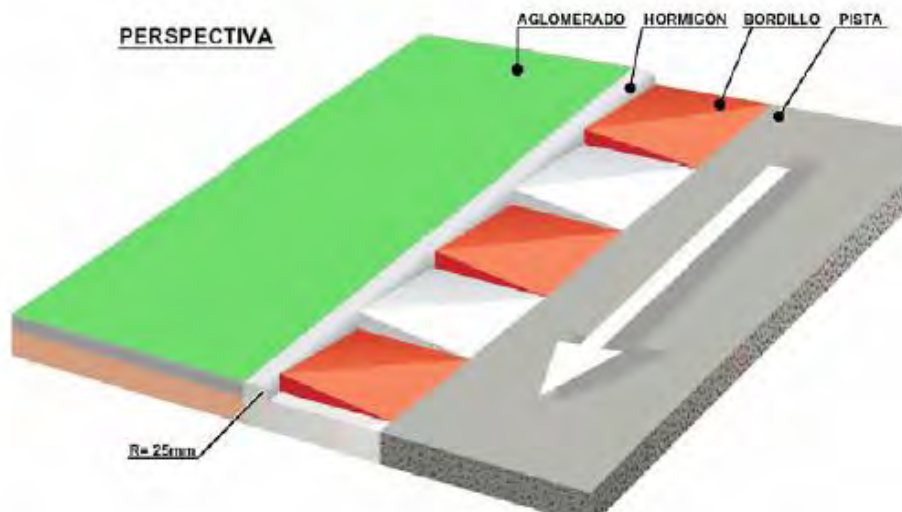
13Esquema de curva horizontal

Aunado a esto en el capítulo mencionado de la normatividad se especifica que en el caso de que existan curvas consecutivas se deberá de aplicar la regla en la cual los radios siempre deberán de ir aumentando, esto con la filosofía de seguridad pues cuando se presentan estos casos es muy común que se pierda el control y se introduzcan los vehículos a las zonas de escape o se monten de manera significativa sobre los pianos (elementos que penalizan la velocidad del vehículo al montarse sobre ellos) como ejemplo el que se muestra en la figura siguiente extraída de (FIA, 2012) y corresponde a un piano negativo que tiene la función de alertar al piloto cuando este ha salido de la pista y afecta la tracción de las ruedas haciendo que el piloto tenga que frenar para retomar el camino a la zona correcta de circulación.

Los pianos están dispuestos en aquellas zonas del circuito donde la trayectoria de los vehículos coincide con el borde de la pista en el vértice o en la salida de una curva. Por norma general no es necesario colocar este piano en la entrada de la curva a menos que ésta sea el vértice de una curva previa a una combinación de curvas. Además, y como regla general en este tipo de diseños, es deseable minimizar la longitud total de pianos a disponer, ejecutando única y exclusivamente los imprescindibles.

A continuación se describen los cuatro tipos de pianos estipulados y homologados por la FIA:

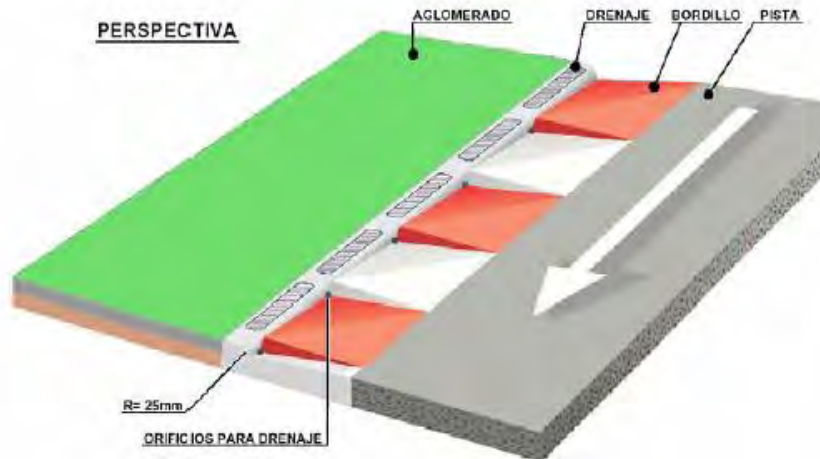
Piano tipo “Vallelunga”: es un tipo de piano que se emplea para los vértices de curvas lentas, curvas de velocidad moderada o combinaciones de curvas. Este piano presenta unas hendiduras a lo ancho cada 80 cm de forma que cada pieza se eleva progresivamente desde la pista hasta una altura “H” que puede variar entre 5 y 10 cm. Esta elevación también se produce en sentido longitudinal.



14Piano Vallelunga (FIA, 2012)

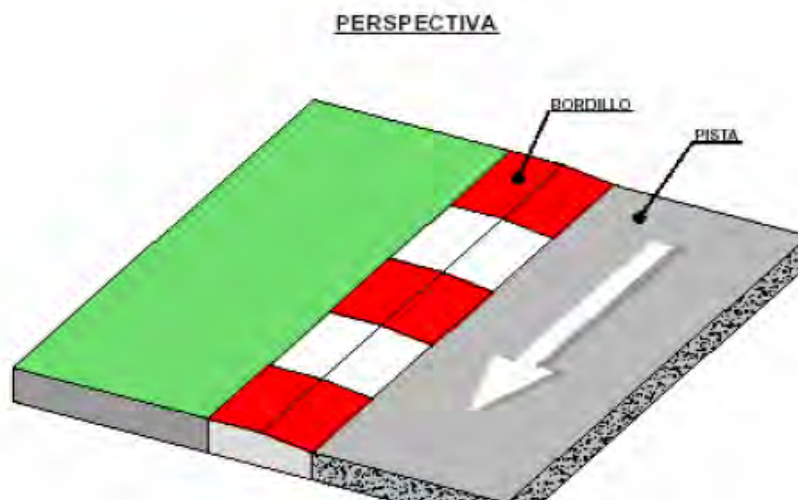
Piano tipo “Melbourne o Negativo”: es un tipo de piano que se emplea para las salidas de todo tipo de curvas. Al igual que el piano Vallelunga, presenta unas hendiduras a lo ancho cada 80 cm pero con la diferencia de que ahora la

pendiente del piano es negativa, es decir, desde el borde de la pista el plano va descendiendo progresivamente hasta una profundidad “H” que puede variar entre 2,5 y 5 cm.



15 Piano Melbourne o negativo (FIA, 2012)

Piano “Biselado”: es el más simple de los cuatro ya que consiste en un piano liso inclinado que se eleva 5 cm desde la pista. Se usa para los vértices de curvas rápidas y de velocidad moderada.



16 Piano Biselado (FIA, 2012)

Piano “Combinado”: es un piano de perfil suave de 80 cm de ancho que se eleva 12 cm sobre el nivel de la pista. Se debe colocar a continuación de un piano tipo Vallelunga de 5 cm o a continuación de un piano tipo Biselado. Por tanto el espesor total de este tipo de piano es de 1,60 m.



17Piano Vallelunga (FIA, 2012)

Basados en esas tipologías se deberán de respetar los tipos y las zonas de recomendación que presenta la FIA para la colocación de cada tipo de piano además de las diferentes previsiones de drenaje especialmente en zonas de curva pues debido al bombeo la parte interna de la curva puede llegar a presentar encharcamientos si no se aplica un buen esquema de diseño para este tema en particular.

A continuación podemos observar una curva del circuito Hermanos Rodriguez la cual presenta este problema que describimos anteriormente, en el cual al estar el piano en la parte interna de la curva y no haberse previsto el drenaje óptimo para desaguar rápidamente se presentan encharcamientos en esta zona.



18Encharcamiento en curva circuito Hermanos Rodriguez

En circuitos permanentes los pianos son construidos por elementos monolíticos reforzados, es bueno resaltar que dependiendo del tipo de competición los pianos requeridos son diferentes, por ejemplo para competencia de motociclismo los pianos requeridos son diferentes en comparación para una competencia de Fórmula 1, sin embargo existen preparaciones que se pueden dejar en el sitio para que en función del tipo de evento se puedan montar o desmontar los pianos, estas técnicas son muy usadas en circuito urbanos por ejemplo en el circuito de Miami en EUA los pianos que se colocan para las competencias de Formula E quedan sobre el arroyo vial, lo cual para el uso común de las calles no es permisible, en este sentido se realizan diversas preparaciones en el asfalto de las vialidades para que se puedan recibir las piezas de los pianos y sean montadas y desmontadas durante y después del evento celebrado.

En la siguiente imagen podemos ver un piano que está colocado sobre el asfalto de una vialidad urbana el cual es atornillado y desatornillado en función de los requerimientos que se tengan.



19Piano desmontable circuito de Miami extraído de <https://www.qualcomm.com/news/onq/2015/03/10/formula-e-comes-land-muscle-cars>

A continuación se presentan las tablas para determinar la ubicación y el tipo de Pianos de competición que establece la FIA para cada caso.

TIPOS DE BORDILLO PARA CADA PARTE DE LAS CURVAS		
TIPO DE CURVA	VERTICE	SALIDA
Rápida (>200 km/h en vértice)	Ninguno o Biselado de 5 cm.	Negativo Melbourne de 5 cm.
Moderada (entre 120 y 200 km/h en vértice)	Biselado de 5 cm.	Negativo Melbourne de 5 cm.
Lenta (<120 km/h en vértice)	Positivo Vallelunga de 10 cm.	Negativo Melbourne de 5 cm.
Combinación Rápida (>200 km/h en primer vértice)	Positivo Vallelunga de 5 cm.	Negativo Melbourne de 5 cm.
Combinación Moderada (entre 120 y 200 km/h en primer vértice)	Positivo Vallelunga de 5 cm.	Negativo Melbourne de 5 cm.
Combinación Lenta (<120 km/h en primer vértice)	Positivo Vallelunga de 10 cm.	Negativo Melbourne de 5 cm.

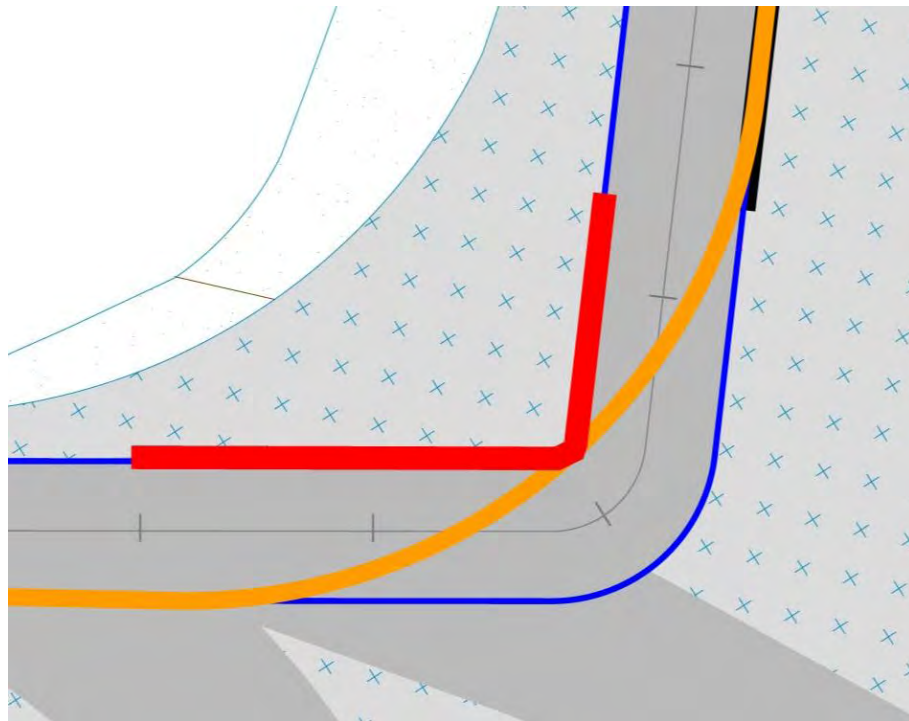
20Tipo de pianos en función de su ubicación (FIA, 2012)

4.1.3. Consideraciones generales de las buenas prácticas del diseño en alineamiento horizontal

Referente a las longitudes de tramo recto como se comentó la norma restringe dicha longitud a 2 km como máximo, bajo esta misma línea de diseño y en referencia a los diversos proyectos implantados a nivel nacional e internacional, la recomendación es la de limitar los tramos rectos única y exclusivamente a la zona de la recta de meta. Dicho tramo debe de cumplir con ciertas características que solo son posibles de cumplirse en un tramo con dichas cualidades, como lo es la ubicación de la parrilla de salida y el acceso a la zona de pits, así pues las rectas largas en algún otro sitio del circuito no son indispensables y al contrario no favorecen los elementos que generan mayor atractivo a los espectadores ni enriquecen con un grado de dificultad a los pilotos. Sin embargo estas consideraciones son aplicables cuando el proyecto a realizar es nuevo y será considerado del tipo permanente ya que en el caso de los circuitos no permanentes y las remodelaciones de circuitos antiguos cumplir o seguir estas recomendaciones son complicadas ya que la infraestructura existente es una gran limitante en el aspecto económico y puede ser detonante para que el trazado de la pista siga cierta forma particular en la que pueden existir tramos rectos en las zonas intermedias del circuito, sin embargo este tipo de situación no son impedimento para que un proyecto sea homologado ante la FIA para ser sancionado por dicha institución en competiciones de carácter internacional pues la propia normatividad que ellos publican no toma como una consideración de incumplimiento estos casos mencionados.

El trazado de las curvas horizontales de un circuito puede ser engañoso y la lógica de un técnico que ha dedicado su vida a la proyección de caminos urbanos, suburbanos o autopistas, podría pensar que una curva con un radio tan pequeño se debería de circular a una velocidad muy pequeña, sin embargo en las pistas o circuitos de competencia se debe de incluir, un aspecto de diseño muy importante, que es la trayectoria que el piloto seguirá por dicho elemento.

El funcionamiento de los vehículos en una carrera presenta una variabilidad en cuanto a la velocidad de operación, otro punto que se ve influenciado por el desarrollo propio de la competencia, es el carril por el que circularan dichos vehículos, pues en teoría no hay carril y cada piloto deberá de optimizar su trayectoria para recorrer la mínima cantidad de kilómetros a una velocidad mayor, si los radios son tan pequeños entonces ¿cómo se logran estas altas velocidades? Precisamente la trayectoria del vehículo deberá describir curvas con radios grandes para que la velocidad sea mayor además de intentar dificultar el paso de otros vehículos por la pista, en la siguiente imagen se muestra una curva en la cual se tiene un radio muy pequeño en el eje de la pista, sin embargo podemos apreciar en la línea color naranja, que representa el vehículo de competición circulando por la pista, trazando una circunferencia de radio muy amplia favoreciendo así que el vehículo pueda tomar dicha curva a una velocidad alta.



21Curva con trayectoria del vehículo

La definición de la trayectoria del vehículo es parte del conocimiento y experiencia que el diseñador tenga en la materia y es crucial una correcta definición de dicha trayectoria tanto para el diseño de la pista geoméricamente como para la implantación de la infraestructura adyacente, como es el caso de la determinación de las zonas de escape, los pianos y la implantación de las barreras de seguridad.

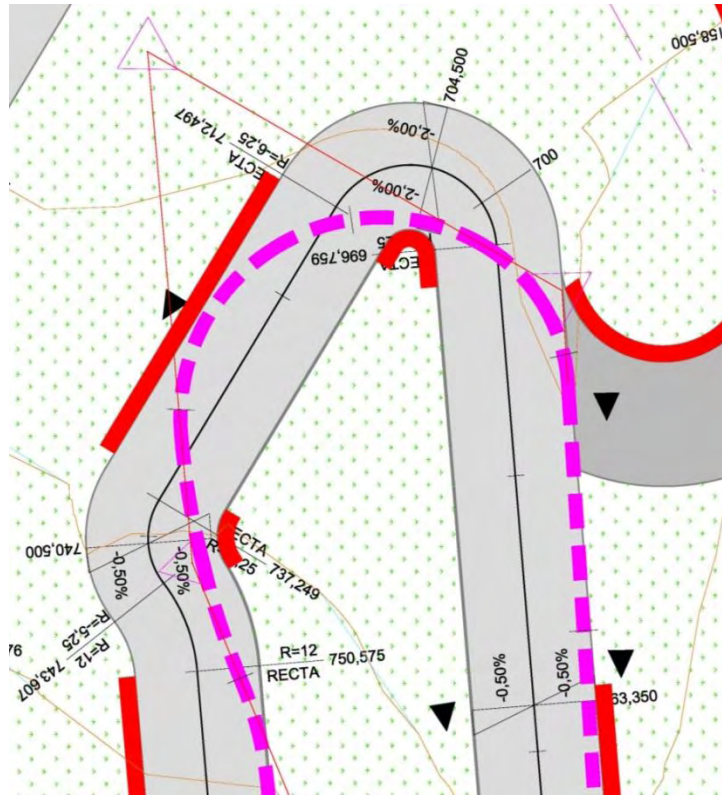
Además de todo lo mencionado la trayectoria del vehículo es la principal generadora de espectacularidad en una competencia pues en función de un buen trazado se pueden crear zonas de adelantamiento que beneficien al espectáculo en general. Para conseguir esto el circuito deberá de tener un numero de curvas máximo siempre dentro de la medida de lo razonable como recomendación particular se pueden utilizar entre 14 a 20 curvas pero esto en casos peculiares pues no se puede aplicar como una regla general debido a la variabilidad de los proyectos así que cada uno tendrá el número de curvas necesarias. Aunque la normativa establezca que con 4 curvas son suficientes no debemos seguir esa línea de diseño pues un ovalo está bien para una competencia tipo NASCAR pero para las competencias avaladas por la FIA no repercute positivamente un diseño de esta tipología.

4.2. Aspectos generales de la trayectoria del vehículo en circuitos de competición

Como se ha adelantado en párrafos anteriores la trayectoria del vehículo en competencia es un factor imprescindible en el diseño geométrico de una pista de carreras. Entonces debemos de introducir esta materia de conocimiento en este documento para demostrar que las buenas consideraciones y prácticas correctas en el trazado de una trayectoria, traen consigo buenos resultados para el proyecto general en materia del diseño geométrico y la espectacularidad que éste le brinda a una competencia.

El trazado de un circuito de competición generalmente esta influenciado por la infraestructura existente o por el proyecto arquitectónico del entorno, en función de varios elementos el trazado de la pista debe de cumplir todos los parámetros normados por la FIA sin embargo el trazado de la trayectoria de los vehículos no se encuentra estipulado en ninguna parte de la documentación mencionada, esto es por que dicha trayectoria del vehículo es determinada por la experiencia del proyectista y precisamente esta proyección está basada en dos líneas que se mencionan a continuación: la trayectoria deberá de tocar todos los vértices de las curvas de la pista y en tramos rectos el vehículo deberá de circular por el extremo externo a la curva. Estas dos limitantes favorecen que el vehículo en una competencia pueda recorrer la menor cantidad de kilómetros y circule por las curvas trazando un radio más amplio haciendo así viable que la velocidad que puede desarrollar en dichas curvas sea mayor.

La imagen que se muestra a continuación ejemplifica de una manera sencilla la forma en la que se traza una trayectoria de un vehículo en una competencia, es posible observar que el vehículo (definido por la línea magenta discontinua) circula por el lado externo de la curva para posteriormente realizar un giro de radio amplio y tocar el vértice de la curva para salir en el lado contrario de la misma, favoreciendo así que el vehículo circule por esa zona a una mayor velocidad en comparativa del hipotético caso de que circulara por el eje de trazo de la pista (línea negra al centro de la pista) ya que en ese caso el radio que debería de describir sería de 6.25 metros en comparativa con el radio de 14.5 que dibuja la trayectoria de color magenta.



22 Trazado de la trayectoria del vehículo

Así pues el elemento más importante para brindar espectacularidad en un circuito es la influencia de la trayectoria en el trazo de una pista, esto se logra proponiendo curvas y contracurvas de radios pequeños los cuales favorezcan la aceleración y frenado de los vehículos creando así zonas de posibles adelantamientos y fomentando que la pericia del conductor sean una de las detonantes de la obtención de un título en una carrera.

A continuación se presenta una imagen en la cual se pueden ver dos variantes de una pista de competición, la primera que se encuentra de un color gris oscuro es una recta en la cual el vehículo permanece en una trayectoria fija y la segunda variante del trazado está compuesta por 3 curvas las cuales como se puede observar presentan un grado de dificultad mayor para los pilotos pues existen varias zonas en las cuales, en el caso de no seguirse la trayectoria optima por falta de pericia del conductor, se pueden llegar a perder centésimas de segundo en el recorrido e incluso en el caso de no girar adecuadamente el

La F1 vuelve a la pista del Hermanos Rodríguez en 2015 y ante ello, el inmueble se transformará para adecuarse a los lineamientos del serial; estrenarán torre de control y tendrán más gradas

ASÍ SERÁ EL NUEVO AUTÓDROMO

Reconstrucción del Puro Sal, el cual está incluido en el circuito, habrá cuatro curvas en el actual terreno de juego.

Se construirá una nueva torre de control, al lado del área de servicios médicos, equipada para terapia intensiva.

Reparación de 33 guardas según necesidades de la Federación Internacional de Automóviles (FIA).

INVERSIÓN DE 72 MILLONES DE DÓLARES en la primera etapa, que deberá ser completada en cinco años a través de un esquema de participación público-privada.

2,000 MILLONES DE DÓLARES en la segunda etapa, que deberá ser completada en cinco años a través de un esquema de participación público-privada.

120 MIL ESPECTADORES en la primera etapa, más de 30 mil en la segunda etapa en administración general.

18 MIL espectadores generados.

75 MIL espectadores en gradas temporales.

42 MIL espectadores en gradas permanentes.

4,580 METROS Longitud del circuito.

3 Nuevos puentes peatonales.

Los trabajos de remodelación ya empezaron en el Autódromo Hermanos Rodríguez que se ve en su cuenta oficial de Facebook compartiendo imágenes de los trabajos que se realizan.

De momento, los trabajadores están comenzando a remodelar el Pit Building, una de las zonas que más cambios tendrá durante la remodelación del Autódromo.

Otras remodelaciones:

- Remodelación de 22 mil 720 metros cuadrados en las áreas de stands.
- Remodelación del Pitstop club y "hospitalidad".
- Servicio médico de emergencia, centro de prensa, cafetería.
- Creación de 3 mil empleos.

Pitstop club para 5 mil espectadores; será un nuevo edificio de suites con mejor capacidad y confort.

Nueva alfombra modificada con polímeros sin juntas téjiles, instalada en zona de "race" (en imagen).

Reconstrucción de 48 mil metros cuadrados de pista.

Se hará una renovación y construcción de nuevas gradas temporales.

HERMANN TILKE
Ingeniero a Cargo de la remodelación

El ingeniero alemán Hermann Tilke es el responsable de la remodelación del Autódromo Hermanos Rodríguez. Él es el responsable de la remodelación del Autódromo Hermanos Rodríguez y de la construcción del nuevo Autódromo de México. Tilke es el responsable de la remodelación del Autódromo Hermanos Rodríguez y de la construcción del nuevo Autódromo de México. Tilke es el responsable de la remodelación del Autódromo Hermanos Rodríguez y de la construcción del nuevo Autódromo de México.

24Circuito Hnos. Rodríguez extraído de <http://revistamiled.com.mx/revistamiled/2015/01/22/la-pista-para-la-formula-1-en-mexico-estara-lista-en-agosto/>

El caso particular que comento es la recta tangente de la última curva (curva peraltada) del autódromo Hermanos Rodríguez, dicha zona presentaba muchos problemas en las competencias previas a las remodelaciones realizadas ya que dicha zona está compuesta por una curva de radio muy grande y además tiene un peralte mayor al 2%, de ahí que sea nombrada “la peraltada”. Esta curva en su zona final era la más insegura del circuito para competencias de Formula, ya que las grandes velocidades a las que un vehículo se pudiese impactar sometidos los vehículos a la salida de esta zona es generadora de accidentes de impacto contra la barrera de concreto.

La imagen que se muestra a continuación es un análisis de las velocidades de impacto que un vehículo tendría en el caso hipotético de que perdiera el control en la curva, dichas velocidades de impacto se calculan con la fórmula establecida en la norma “Internal Guidelines Motor racing course construction and safety 2012” (FIA, 2012) en la figura 6 de la página 72, bajo esta línea de cálculo se obtuvieron velocidades de impacto de 150 km/h lo cual es

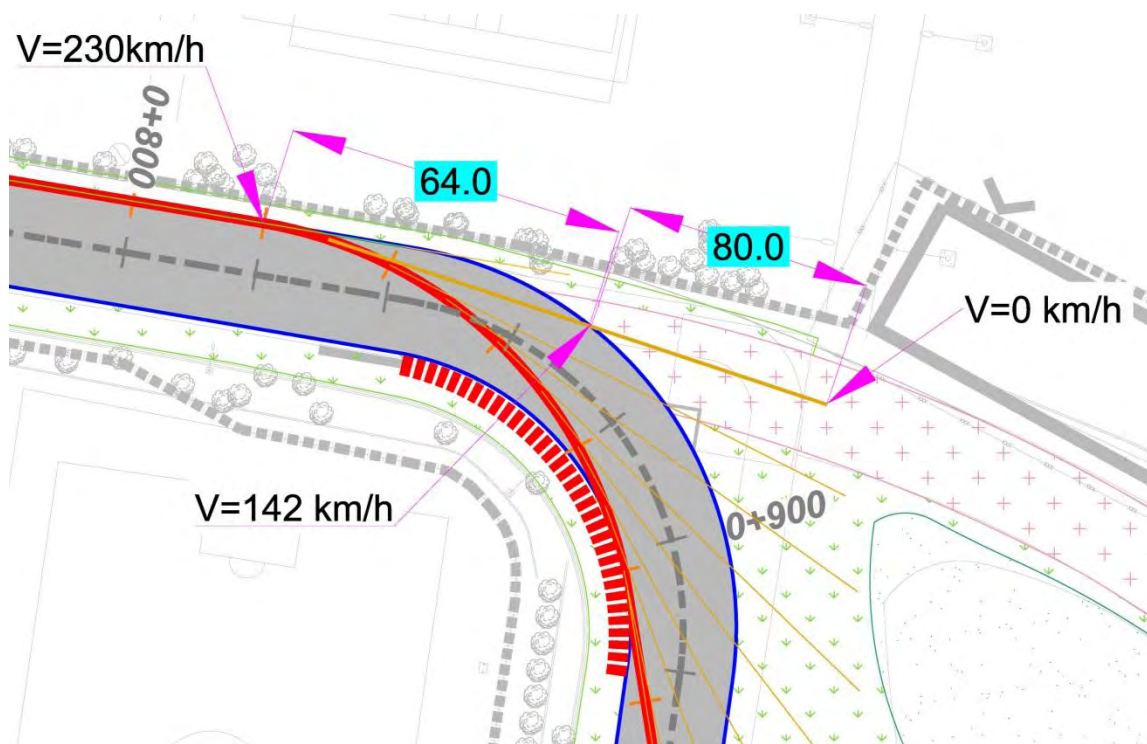
inadmisible para un proyecto que espere ser avalado por la FIA, pues según los criterios de diseño se deben de utilizar medios que minimicen las velocidades de impacto de los vehículos como son las zonas de escape cubierta de grava que reducen significativamente la velocidad de los vehículos antes de llegar a la zona de la barrera de concreto pero lamentablemente en esta zona de la curva se encuentra una zona de gradas y es imposible implantar dichas zonas de escape las cuales deberías de ser tan grandes como la envolvente que abarcara todas las líneas de color rojo que representan la velocidad de impacto del vehículo.



25Curva peraltada Circuito Hnos. Rodriguez

Para calcular las zonas necesarias de escape que por parámetros de seguridad se deberán de implantar en las curvas realizaremos el ejemplo contenido en “Internal Guidelines Motor racing course construction and safety 2012” (FIA, 2012)

Para comenzar con el ejemplo tomaremos en función de la aceleración del vehículo y con la distancia en la tangente el cálculo de una velocidad puntual de 230 km/h justo antes de entrar en la curva, en dicho punto supondremos que el vehículo pierde el control y continuara recto siguiendo la línea de escape de color amarillo mostrada en la imagen.



26Cálculo de las distancias de frenado

Como segundo paso calcularemos la deceleración en la pista por causa de la aplicación de los frenos del vehículo en una distancia de 64 m, marcado en la imagen.

Se procede por métodos numéricos a resolver la siguiente ecuación igualando la D_{track} con la siguiente relación, siendo el valor medido en el dibujo de 64 metros:

$$D_{\text{track}} = \left(\frac{V_{\text{track}} - 230}{-0.0057 * g * k^2} + \frac{0.89}{0.0057^2 * g * k^2} \right) * \ln \left(\frac{0.0057 * V_{\text{track}} + 0.89}{0.0057 * 230 + 0.89} \right)$$

Dónde:

D_{track} = distancia de frenado sobre la pista

V_{track} = velocidad del vehículo sobre la pista

g = aceleración de la gravedad

$k = 3.6$

A partir de esta resolución se obtiene un valor de 142 km/h, que es la velocidad puntual del vehículo justo donde termina la pista. Es entonces cuando se calculó el valor de D_{offtrack} que definirá el punto en el cual la velocidad del vehículo es cero y será entonces el punto donde es óptima la colocación de la barrera de concreto. El cálculo de dicha distancia se da por la ecuación siguiente:

$$D_{\text{offtrack}} = \left(\frac{142}{0.003 * g * k^2} + \frac{0.70}{0.0030^2 * g * k^2} \right) * \ln \left(\frac{0.70}{0.0030 * 142 + 0.70} \right)$$

Dónde:

D_{offtrack} = distancia de frenado fuera de la pista

g = aceleración de la gravedad

$k = 3.6$

Obteniéndose así un valor D_{offtrack} de 80 metros tal como lo vemos representado gráficamente en la imagen anterior. Este cálculo de las distancias de parada, digámoslo así, se realiza iterativamente en varios puntos de la curva para poder así describir la envolvente de la zona de escape y brindar un nivel más alto de seguridad para el piloto y para el espectador.

Después de obtener este análisis de las zonas de escape nos encontramos ya con los elementos para poder definir si un trazado es viable o inviable, como

se comentó anteriormente la curva peralta del circuito Hermanos Rodríguez era una zona roja para una competición de Fórmula 1, esto basado en el análisis de las zonas de escape necesarias en la salida de la curva, con lo cual fue necesario encontrar una forma de limitar la velocidad en dicha área. La opción óptima fue la introducción del trazado en el Foro Sol de tal forma que los vehículos solo toman la mitad de la curva peraltada y lo hacen siguiendo una trayectoria diferente de tal suerte que las velocidades de impacto en la salida de la curva no se ven comprometidas para los pilotos. Así pues podemos ver que un trazado de una pista incluye todos los aspectos de seguridad para la competición y para los pilotos haciendo que el trazado de una pista bajo estas condicionantes ofrezca un espectáculo seguro.

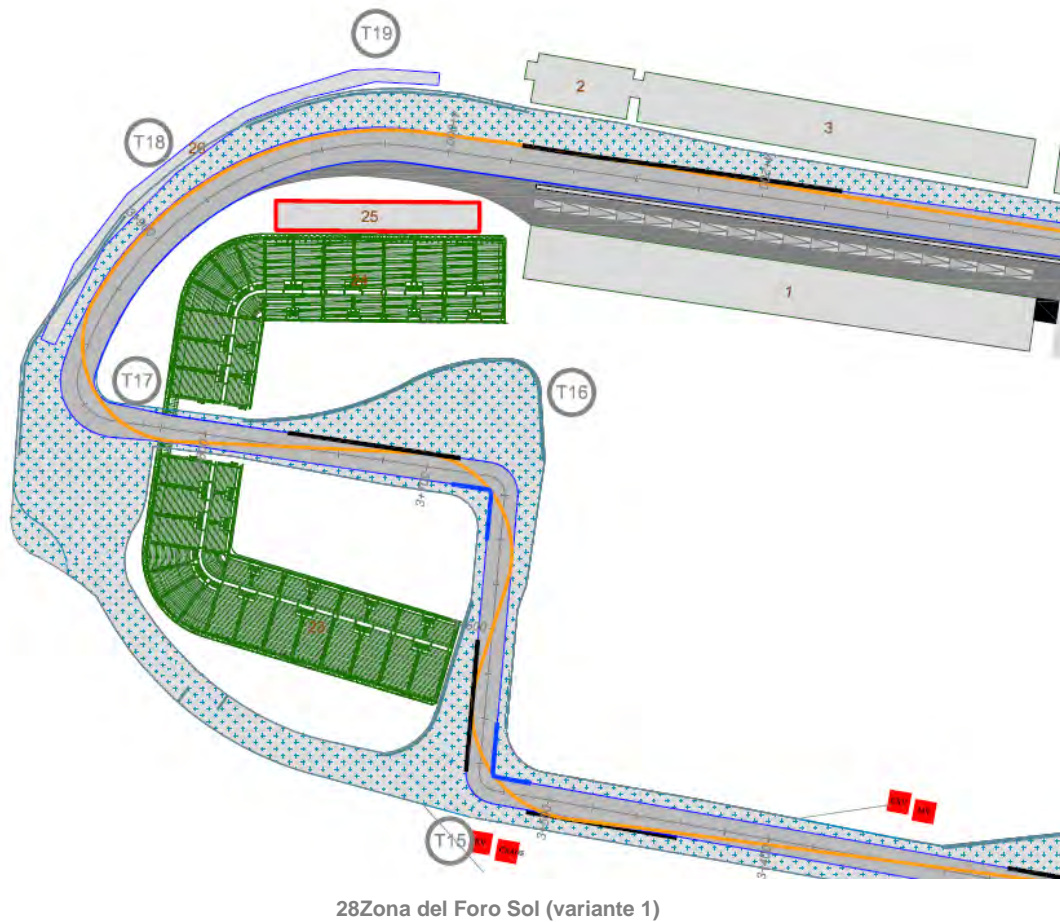
Basado en este cálculo, la FIA en su anexo 5 del normativa que estamos utilizando (FIA, 2012) se ha realizado una tabulación de los valores propios para el cálculo de las distancia de frenado, dicha tabla se adjunta a continuación para tenerla como referencia del cálculo matemático que realizamos con antelación.

Vitesse lors de la perte de contrôle (km/h) Loss of control speed (kph)	Longueur de décélération jusqu'au bord de la piste (m) Length of deceleration up to the track edge (m)																												
	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100	105	110	115	120	125	130		
	60	17	10	3																									
65	20	13	6																										
70	23	15	8	2																									
75	26	19	12	5																									
80	29	22	15	8	1																								
85	32	25	18	11	4																								
90	36	28	21	14	8	1																							
95	39	32	25	18	11	4																							
100	43	36	29	21	14	8	1																						
105	47	40	33	25	18	11	5																						
110	51	44	37	29	22	15	8	2																					
115	55	48	41	33	26	19	12	5																					
120	60	52	45	38	30	23	16	9	3																				
125	64	57	49	42	35	28	20	14	7																				
130	69	61	54	46	39	32	25	18	11	4																			
135	73	66	58	51	44	36	29	22	15	8	1																		
140	78	70	63	56	48	41	34	27	19	13	6																		
145	83	75	68	61	53	46	38	31	24	17	10	3																	
150	88	80	73	65	58	50	43	36	29	22	15	8	1																
155	93	85	78	70	63	55	48	41	34	26	19	12	6																
160	98	90	83	76	68	61	53	46	38	31	24	17	10	3															
165	103	96	88	80	73	65	58	51	44	36	29	22	15	8	1														
170	109	101	94	86	79	71	63	56	49	41	34	27	20	13	6														
175	114	107	99	91	84	76	69	61	54	46	39	32	25	18	11	4													
180	120	112	105	97	89	81	74	67	59	52	44	37	30	23	16	9	2												
185	125	118	110	102	95	87	80	72	65	57	50	42	35	28	21	14	7												
190	131	123	116	108	100	92	85	78	70	63	55	48	41	33	26	19	12	5											
195	137	130	122	114	106	99	91	83	76	68	61	53	46	39	31	24	17	10	4										
200	143	135	127	120	112	104	97	89	81	74	66	59	52	44	37	30	23	16	9	2									
205	149	141	134	126	118	110	102	95	87	80	72	65	57	50	42	35	28	21	14	7									
210	155	147	139	132	124	116	108	101	93	85	78	70	63	55	48	41	34	27	19	12	6								
215	161	153	145	138	130	122	114	107	99	91	84	76	69	61	54	47	39	32	25	18	11	4							
220	167	160	151	143	136	128	120	113	105	98	90	82	75	67	60	52	45	38	31	23	16	9	3						
225	174	165	158	150	142	134	127	119	111	103	96	88	80	73	65	58	51	44	36	29	22	15	8	1					
230	180	172	164	156	148	140	132	125	117	110	102	95	87	79	72	64	57	49	42	35	28	21	13	7					
235	186	179	170	163	155	147	139	131	124	116	108	100	93	85	78	70	63	55	48	41	33	26	19	12	5				
240	193	185	177	169	161	153	145	138	130	122	114	107	99	91	84	76	69	61	54	47	39	32	25	18	11	4			
245	199	192	184	175	168	160	152	144	136	128	121	113	106	98	90	82	75	67	60	53	45	38	31	24	17	10	3		
250	206	198	190	182	174	166	159	151	143	135	127	119	112	104	97	89	81	74	66	59	51	44	37	29	22	15	9		
255	213	205	197	189	180	173	165	157	149	142	133	126	118	110	103	95	88	80	73	65	58	50	43	36	28	21	14		
260	219	211	203	195	188	179	172	163	156	148	140	132	125	117	109	102	94	87	79	71	64	57	49	42	35	27	20		
265	226	218	210	202	194	186	179	170	162	155	147	139	131	124	116	108	100	93	85	77	70	63	55	48	41	33	26		
270	233	225	217	209	201	193	185	177	169	162	154	146	138	130	123	115	107	99	92	84	77	70	62	54	47	40	32		
275	240	232	224	216	208	200	192	184	176	169	160	152	145	137	129	121	114	106	98	91	83	76	68	60	53	46	39		
280	247	239	231	223	215	207	199	191	183	175	167	159	151	143	136	128	120	113	105	97	90	82	75	67	60	52	45		
285	254	246	238	230	222	214	206	198	190	182	174	166	158	151	143	135	127	119	111	104	96	89	81	74	66	59	51		
290	261	253	245	237	229	221	213	205	197	189	181	173	165	157	149	142	134	126	118	111	103	96	88	81	73	65	57		
295	268	260	252	244	236	228	220	212	204	196	188	180	172	164	156	149	140	133	125	118	110	102	94	87	80	72	64		
300	275	268	259	251	243	235	227	219	211	203	195	187	179	171	163	155	148	140	132	124	116	110	101	94	86	78	71		
305	283	275	267	258	250	242	234	226	218	210	202	194	186	179	170	162	155	147	139	131	124	116	108	100	93	85	78		
310	290	282	274	265	258	250	241	233	225	217	209	201	193	186	177	170	162	154	146	138	131	123	115	107	100	92	84		
315	297	289	281	273	265	257	248	241	232	225	217	209	201	193	184	177	169	161	153	145	138	130	122	114	107	99	91		

27Distancia de frenado (Zonas de escape) (FIA, 2012)

Siendo el objetivo primigenio de este estudio, los diversos aportes en materia de criterios de diseño, podemos observar que un cambio en un trazado de una pista por medio de más curvas las cuales limiten la velocidad de un vehículo, fomentan la eliminación de puntos críticos, en materia de seguridad, siempre y cuando a cada curva se le realice sus estudio de velocidades de impacto y se determinen las zonas de escape necesarias, aunado a un aumento del espectáculo que la competencia puede brindar a los espectadores.

A continuación se muestra el detalle de esta mejora en la pista de los Hermanos Rodríguez, en la cual se puede observar que existen zonas las cuales son puntos medulares para la carrera ya que la viabilidad de un adelantamiento es latente, aunado a que los vehículos en dicha zona circulan a 150 o 170 km/h recorriendo la zona de una forma que resulta más sencillo para los espectadores poder observarlos.



Como podemos observar la inclusión de las curvas 15, 16, 17 y 18 tienen un trazo el cual es mucho más largo que el actual y es más vistoso para el circuito, fomentando que se utilicen las gradas del Foro Sol para que los aficionados aprecien con mayor esplendor el evento, sin embargo de la versión primigenia del proyecto se realizaron en obra variantes, las cuales podemos observar en la siguiente fotografía, principalmente en esta zona se incluyeron dos curvas más

de radios pequeños los cuales fuerzan a los vehículos a circular más lento y a realizar un trazado de su trayectoria diferente.



29 Fotografía extraída de http://www.f1fanatic.co.uk/wp-content/uploads/2015/10/P-20151030-00874_HiRes-JPEG-24bit-RGB.jpg

En la fotografía anterior es posible visualizar la perspectiva de un asistente al evento la cual muestra todo el rango de visión que se tiene en esta zona pues al tener las gradas a alturas considerables mezclado con un circuito que tiene curvas en la parte central de estas gradas la impresión de observar el evento “desde el aire” es muy vivida dando una mejor percepción de las diferencias en la conducción de los diferentes pilotos al momento de circular por la zona. A manera de ejercicio se traza la trayectoria óptima de los vehículos por esta zona montándolo en la misma fotografía de tal forma que podamos tener una percepción directa del momento en el que los vehículos circularon en la competición y así poder visualizar los puntos medulares de esta área.



30 Fotografía extraída de http://www.f1fanatic.co.uk/wp-content/uploads/2015/10/P-20151030-00874_HiRes-JPEG-24bit-RGB.jpg

En un análisis meticuloso de esta pequeña parte del circuito podemos enumerar las curvas de esta zona como se muestra en la siguiente imagen:



31 Foro sol (trazado definitivo)

Curva 1.- esta curva no presenta varias complicaciones, al venir los vehículos después de la zona de las “ese” y de una recta muy larga en la cual se alcanzas velocidades casi de 300 km/h esta curva 1 deberá de estar preparada para resguardar o minimizar la velocidad de los vehículos que no alcancen a realizar la maniobra del giro, para esto existe una solución muy sencilla la cual es dejar abierto el trazo de la pista en su antiguo trazado y los vehículos que no alcances a girar pueden continuar recto hasta frenar.

Curva 2.- esta es una de las curvas claves para poder realizar un adelantamiento en esta zona pues en función de que tan dentro de circule por la misma será motivo de poder provocar el adelantamiento, siempre teniendo la idea clara de poder cruzar por delante del adversaria en las siguientes dos curvas para tomar la última por la parte interna.

Curva 3 y 4.- en estas curvas los vehículos que pretendan realizar un adelantamiento deberá de cruzar por enfrente de su adversario.

Curva 5.- esta curva es vital pues al tomarla por la parte interna y sacar un poco de ventaja sobre los otros competidores es muy probable que en la recta de salida ya no sea alcanzado por el oponente rebasado.

Tal como se ha narrado el movimiento de los vehículos que se describen en esta zona, así podríamos realizar un recorrido de diferentes trazados de pistas de competición a los cuales se les ha implantado esta misma filosofía de diseño, como hemos podido ver dichas variaciones en rectas y curvas horizontales favorecen los adelantamientos y así la espectacularidad de los eventos que en dichos escenarios se llevan a cabo.

4.3. Alineamiento vertical en circuitos de competición

4.3.1. Criterios de diseño en el alineamiento vertical

Los parámetros de diseño de un camino en el área del alineamiento vertical están limitados al tipo de vehículo que circula por la zona y a la velocidad del proyecto para brindar la comodidad necesaria al usuario del camino, además de ciertas limitantes que disminuyen los grados de accidentabilidad como por ejemplo la limitación en las pendientes prolongadas. Para el caso particular de los circuitos de competición existe normada la longitud de las curvas verticales y la pendiente en ciertas zonas del circuito que debido a las condiciones que prevalecen durante la competencia en ciertas zonas se ve limitada esta variable.

4.3.2. Aspectos normativos del alineamiento vertical

El artículo 2.3 de la normatividad FIA (FIA, 2012) establece que las curvas verticales mínimas a utilizar se determinaran en función a la siguiente ecuación:

$$R = \frac{v^2}{K}$$

En donde:

v.-velocidad del vehículo en km/h

K.- constante de valor 15 para curvas convexas y 20 para curvas cóncavas

R.-radio de la curva en metros

Bajo este esquema de diseño se tienen curvas verticales de radio de entre 700 y 2500 metros esto como bien se describe en la formulación anterior estará en función de la velocidad a la que se circule en dicha zona del circuito.

Una limitante más que se presenta en cuanto a la normatividad es la pendiente longitudinal en la zona de la recta de salida, la cual esta limita a un valor máximo del 2% esto básicamente está en función de las actividades que se realizan en dicha zona como son la premiación y la formación del pole position, esta segunda debe de garantizar que los vehículos se encuentren detenidos sin necesidad de la aplicación de ningún freno o la utilización de algún tipo de elemento que genere una trabazón entre las llantas del vehículo y la superficie de la pista.

Para el caso de la geometría, en particular los elementos que componen a las curvas verticales que definen al perfil longitudinal, se deberán de considerar los mismos elementos geométricos definidos en la imagen 3 del numeral 2.2 de este documento, a excepción del parámetro k que en el caso de los circuitos de competición solo está definido por dos valores ya establecidos y descritos.

4.3.3. Consideraciones generales de las buenas prácticas del diseño del alineamiento vertical

La buena aplicación de la norma en materia de perfil longitudinal traerá consigo zonas inesperadas y complicaciones para el piloto, esto se crea con una combinación entre el alineamiento vertical y el alineamiento horizontal, es muy común en caminos urbanos y carreteras la limitante de no colocar una cresta justo antes de una curva horizontal, pero en circuitos de carreras este recurso se puede utilizar, el piloto al salir de la curva vertical se puede encontrar súbitamente con una curva horizontal, lo cual hace que tenga una frenada inesperada y se le complique aún más el tomar la curva correctamente, esta simple combinación de curvas verticales y horizontales aumenta el grado de dificultad para la conducción lo que ocasionara que los pilotos realicen diversos cambios en la trayectoria de sus vehículos en estas zonas fomentando que la pericia y buen manejo de algunos aumento la espectacularidad del evento, pues esta variante detona una ganancia en centésimas de segundo o una perdida

por una frenada excesiva a la entrada de la curva debido a la sorpresa de dicho singularidad geométrica.

Un ejemplo claro de la correcta aplicación de la conjunción entre la definición geométrica horizontal y vertical es el circuito de Montecarlo en Mónaco. En la siguiente imagen podemos ver una curva posterior al casino en donde se ve claramente la diferencia de pendientes que se presentan en este circuito y su combinación con la definición geométrica horizontal, la ubicación en la *pole position* es primordial para obtener un buen resultado en la competición ya que debido a la baja velocidad a la que se pueden circular estas zonas de posible adelantamiento, dicha acción está casi imposibilitada por esos mismo factores al momento de la competencia, sin embargo el buen manejo en estas zonas y entrar a las curvas en una trayectoria ideal serán factores que reduzcan los tiempos en centésimas de segundo para aspirar al gran premio.



32Circuito de Mónaco extraído de <http://www.formulaf1.es/wp-content/uploads/2008/05/f1-2011-06-monaco-loews-trencito.jpg>

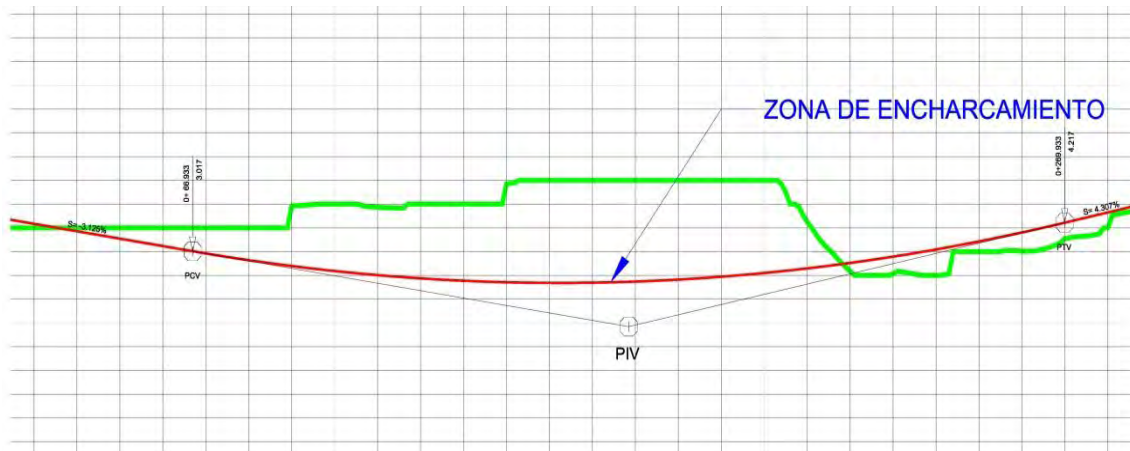
Es evidente que este tipo de definiciones geométricas en circuitos, solo es posible cuando el entorno es urbano y la misma topografía del lugar es una limitante para el diseño, sin embargo debemos de ser capaces de sacar el mayor provecho a este tipo de situaciones como se hizo en Mónaco de tal forma que este circuito a lo largo de más de 60 años sigue siendo reconocido por la FIA como un circuito de grado 1 (avalado para competencia de fórmula 1, que toma su nombre del ratio entre peso y potencia de los vehículos 1kg/hp).

Categoría ante la FIA	Características de los vehículos
Categoría I	1 kg/hp (incluye Formula E)
Categoría II	1 a 2 kg/hp excepto Formula 1
Categoría III	2 a 3 kg/hp
Categoría IV	Hasta 3 kg/hp
Categoría V	Energías alternativas Excepto Formula E
Categoría VI	Off-Road (todo terreno)

Debemos resaltar que el número 7.4 del Apéndice O (APPENDIX O, 2016) de la normatividad FIA recomienda que no se incluyan cambios de pendiente en curva pero no limita que antes de una curva horizontal se coloque una curva vertical, que propiamente es de lo que hemos estado hablando en párrafos anteriores, esta limitación la recomienda la FIA debido a que en las curvas la aceleración de los vehículos va en aumento y puede causar pérdidas de control creando así una zona de posibles accidentes en competencia.

La buena implantación de un perfil longitudinal adecuado, garantizara en primera instancia que la competencia se lleve a cabo con seguridad, que ofrezca retos a los pilotos en la competencia, que favorezca los puntos de visibilidad para los espectadores y que el drenaje funcione de una manera adecuada, pues es evidente que no podemos crear zonas bajas en las cuales

se presenten encharcamientos, el acuaplaneo a estas velocidades ocasionaría una catástrofe en la carrera. Este tipo de consideraciones son iguales que en un camino convencional en el cual una curva en columpio no debe de quedar dentro de un corte del terreno natural tal como se muestra en la imagen siguiente.



33Perfil longitudinal con problemas de drenaje

En el caso de que sea inevitable esta configuración debemos de ser cuidadosos en implantar un proyecto adecuado de drenaje, el cual garantice el desalojo del agua en esta zona, como por ejemplo que el bombeo distribuya el agua hacia una zona que contenga una canalización para desaguar rápidamente la pista. Aunado a un buen proyecto de subdrenaje el cual conduzco el agua que se incorpora al terreno en las zonas sin pavimentar.

4.4. Sección transversal en circuitos de competición

4.4.1. Criterios de definición de la sección transversal

La sección transversal de una pista de carreras tiene variaciones en función del tipo de circuito al que se esté haciendo referencia y además presenta un ancho cambiante en función de las actividades que puedan desarrollarse en ciertas zonas del circuito. Estas variaciones están establecidas en la normatividad de la FIA y se desarrollarán en el punto siguiente.

4.4.2. Aspectos normativos de la sección transversal

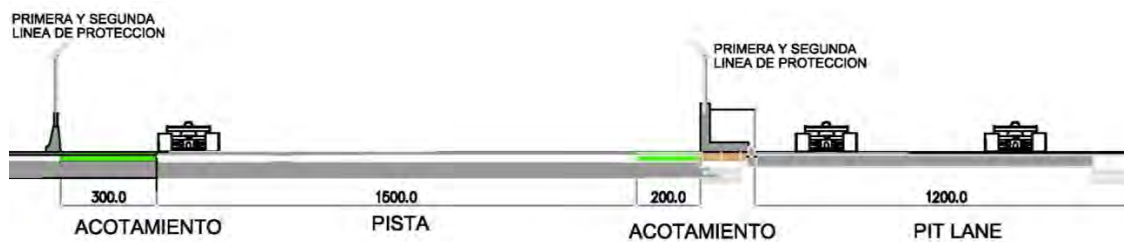
El numeral 2.2.3 de la normatividad FIA (FIA, 2012) establece que el ancho mínimo de una pista de competición para Formula 1 deberá de ser de 12 metros y el numeral de 2.3.2 del mismo documento limita el bombeo dentro de la pista en recta entre 1.5% y 3%. Los valores mínimos del bombeo son para garantizar una rápida expulsión del agua en caso de lluvia y evitar encharcamientos y el valor máximo está en función de la sensación causada por el peralte para los pilotos.



34Circuito Hermanos Rodriguez, problemas de drenaje (2011)

Para el caso del peralte en curva el apéndice O de la FIA (APPENDIX O, 2016) establece que no deberá de ser mayor al 10% y se deberá de considerar, como en el caso de una carretera, el valor negativo en el interior de la curva y el positivo en el exterior de la misma, el caso de contraperalte en curvas no es aceptado cuando la velocidad de dicha curva es superior a los 125 km/h, en el caso de que las velocidades de la curva sea menores será viable realizar un estudio particular de dicha curva para establecer si es viable la utilización del contraperalte.

Para el caso de la zona de la parrilla de salida (el grid) el ancho de la pista deberá de ser de 15 metros y esta sección deberá de continuar hasta la primera curva del circuito, este ancho está limitado por el acomodo de los vehículos en esa zona al momento del arranque de la competición y para que se logren definir algunas posiciones antes de la primer curva del circuito.



35Sección de la recta de meta Autódromo Hermanos Rodriguez

Cuando sea necesario realizar cambios de ancho en la pista la normatividad FIA (FIA, 2012) establece que se deberá de realizar una transición de cambio con la relación 1:20 lo cual indica que por cada metro que queramos ampliar o reducir la pista debemos de hacerlo en 20 metros lineales de pista, esto va encaminado a que la variación en el ancho no sea abrupta, se eliminen puntos angulosos y el cambio no sea agresivo para los pilotos.

Dentro de las limitantes del proyecto en sus aspectos de sección transversal tenemos el uso de los acotamientos en pista, estos son usados como zona de

seguridad para que los vehículos no salgan del camino en el caso de que se pierda ligeramente el control del vehículo, en el aspecto normativo la FIA establece en su numeral 2.4.1 de la normatividad que dichos acotamientos deberán de ser como mínimo de 10 cm pero se recomienda un ideal de entre 1 a 5 metros, sin embargo en la zona de pits se deberá dejar un acotamiento mínimo de 3 metros del lado opuesto a los pits. Estos acotamientos usualmente son recubiertos de pasto sintético el cual desalienta a los pilotos a circular sobre él, pues reduce la fricción en los neumáticos y afecta en su recorrido. Antiguamente se utilizaba pasto natural pero cuando los vehículos salían hacia el acotamiento y regresaban a la pista traían consigo tierra y piedras lo que fomentaba algún tipo de daño a los autos en competencia.

Dentro de los criterios normativos que tiene la FIA para la sección tipo existen diversos elementos los cuales no se tocarán en el presente numeral sin embargo más adelante se incluirán como elementos de seguridad dentro de una sección tipo de un circuito como son, los pianos, las zonas de escape, la primera y segunda línea de seguridad, estos elementos definen en concreto la sección transversal de una pista, sin embargo no son limitativos para el proyecto geométrico de la misma, sino todo lo contrario, estos elementos son resultados de un proyecto geométrico y serán implementados en función de los diferentes requerimientos de seguridad tanto de los espectadores como de los pilotos para llevar a cabo una competición dentro de los márgenes normativos que establece la FIA.

4.4.3. Consideraciones generales de las buenas prácticas en la sección transversal

Para el caso de la sección transversal el proyecto geométrico es muy ceñido a la parte normativa de la FIA, no existen muchos aspectos que se puedan utilizar para fomentar la espectacularidad del evento, únicamente lo que se puede aportar en este aspecto es la limitación del peralte en las curvas.

Un vehículo que circula a cierta velocidad sobre una curva experimenta por la inercia del movimiento la sensación de salirse del camino, el peralte de una curva o sobreelevación contrarresta esta sensación y hace más comfortable para el conductor el circular por una curva pues el peso del vehículo y dicha sobreelevación contrarrestan la fuerza centrífuga que experimenta el vehículo al cambiar de dirección, esto está estudiado por la física y todas las normativas internacionales del proyecto geométrico de caminos y carreteras lo tienen incluido en sus aspectos normativos y limitativos, sin embargo para el caso de los circuitos de competición debemos de poner un contexto muy importante, el conductor no es típico, es un piloto profesional el cual está especializado en realizar este trabajo, por este motivo no es recomendable incluir una sobreelevación en las curvas para que los conductores demuestren su valía en dichas curvas, siendo más audaces en su manejo para obtener una ventaja con respecto de sus adversarios, esto aumenta la espectacularidad del evento para los asistentes a dichas carreras, sin embargo otro aspecto que no debemos de dejar de lado son las fuerzas g que experimentan los pilotos en las curvas las cuales provocan que la adrenalina fluya en mayor cantidad por sus cuerpos y aporten esa chispa de entusiasmo extra a su carrera.

Otro elemento que la sección tipo puede aportar a la espectacularidad del evento, pero que ya no va encaminado con el diseño, es el estado actual de la pista y de los elementos que la rodean, esto que se mencionado no se abundara, pero es importante nombrarlo pues un buen mantenimiento y un excelente estado de la infraestructura brindaran una mejor imagen del circuito y del evento en sí.

A continuación se presenta una comparación entre dos fotografías del circuito Hermanos Rodríguez antes de la remodelación para el premio de la F1 del 2015, como podemos ver la imagen del lado izquierdo presenta una pista la cual no es tan vistosa en comparación con la imagen de la derecha la cual tiene

colores que llaman la atención del espectador y toda la infraestructura que lo rodea da una mejor perspectiva del circuito.



36Comparativa circuito Hermanos Rodriguez

(Derecha fotografía tomada en 2011) (Izquierda fotografía extraída de http://www.f1fanatic.co.uk/wp-content/uploads/2015/10/P-20151030-00874_HiRes-JPEG-24bit-RGB.jpg)

Así pues un buen mantenimiento y conservación de toda la infraestructura de un circuito serán un elemento independiente al diseño que impacte en la percepción del espectador del evento.

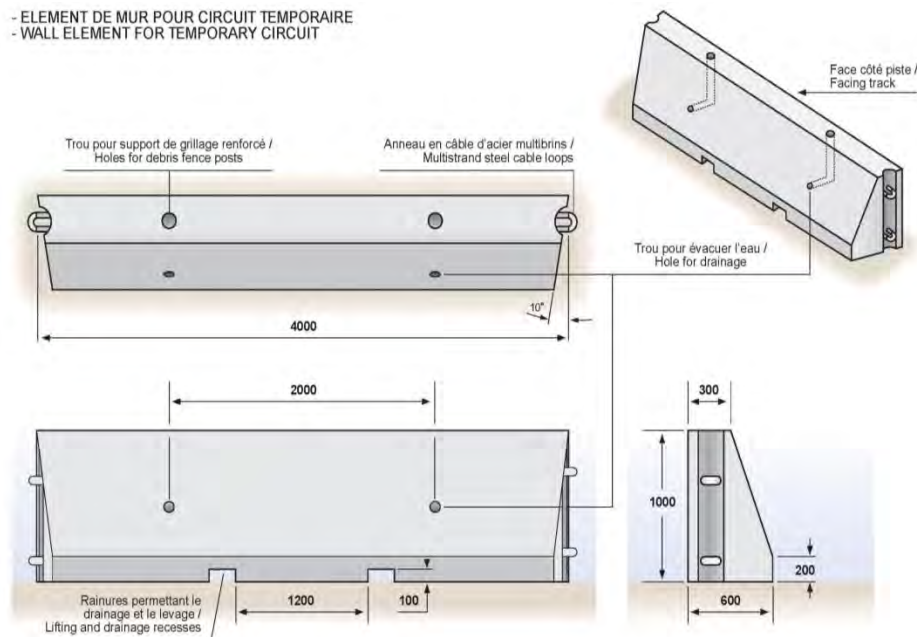
5. Elementos de seguridad e instalaciones

Dentro de un proyecto de un circuito de competición que pretenda obtener una licencia avalada por la FIA para celebrar carreras sancionadas por dicha federación, se deben de tener en cuenta diversas consideraciones de seguridad y se contemplarán varias instalaciones que son necesarias para el buen desarrollo de dichas competencias. Estas instalaciones y elementos de seguridad están estipulados en la normatividad de la FIA y su ubicación impacta de cierta forma al proyecto geométrico del que estamos tratando en este trabajo.

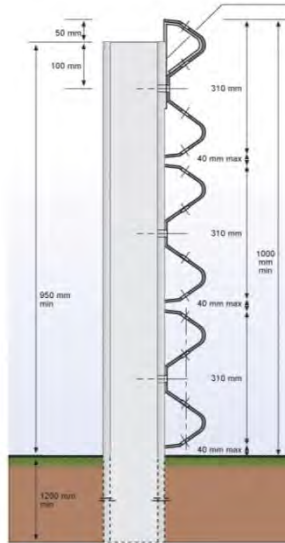
5.1. Elementos de seguridad

Existen diversos elementos de seguridad en un circuito, básicamente están constituidos por 3 líneas de protección. De esta forma las 2 primeras líneas de protección son para impedir que un accidente pueda dirigir a algún vehículo o alguna de sus partes hacia las zonas donde los espectadores se encuentran o para que los vehículos que se vean impactados con dichas líneas de protección no salgan tan afectados y por consiguiente repercuta menos en el daño que los pilotos se puedan causar.

La primera línea de seguridad está compuesta por barreras de concreto, barreras metálicas, barreras de neumáticos y barreras para altas velocidades denominadas Tecpro. Las primeras de estas, las barreras de concreto son del tipo NewJersey y se colocan como usualmente se hace en carreteras de altas especificaciones, para el caso de las barreras metálicas se aplica el mismo diseño que en carreteras pero con la diferencia que no existe ese espacio entre las crestas y el suelo.

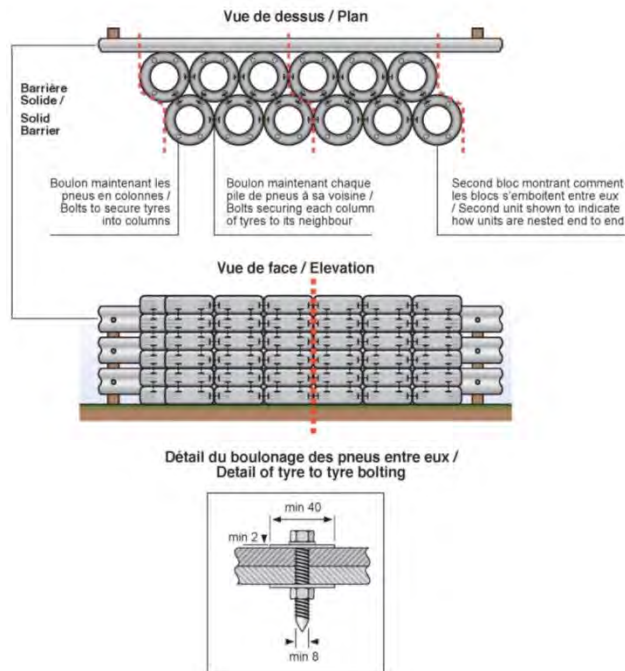


37Detalle de la barrera de concreto (FIA, 2012)



38Detalle de la barrera metálica (FIA, 2012)

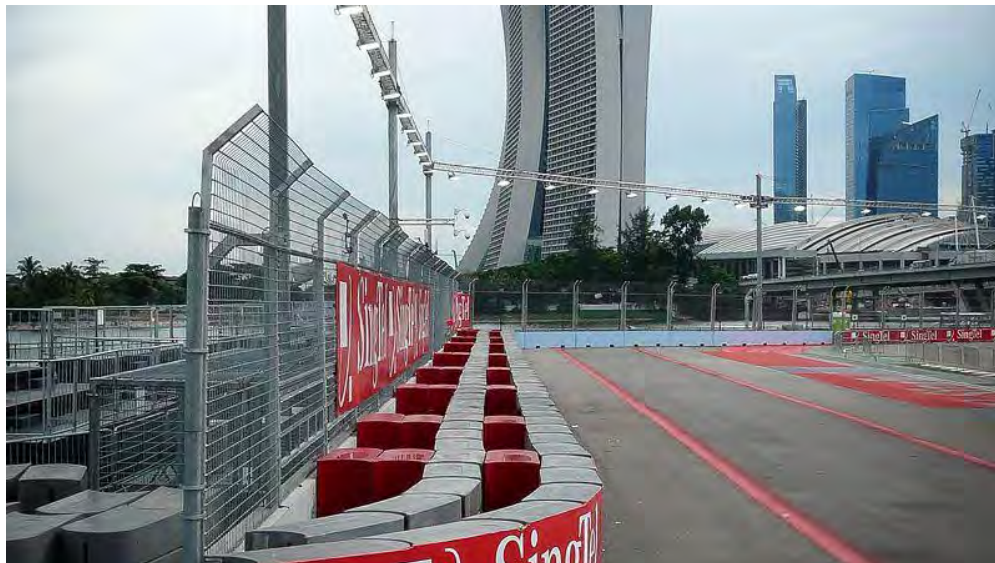
En referencia a las barreras de neumáticos estas funcionan como un atenuador del impacto antes de llegar a las barreras de concreto o metálicas, la disposición y armado de las barreras de neumáticos están especificados en la normatividad FIA (FIA, 2012) y el esquema de cómo se arman se presenta a continuación.



39Detalle de la barrera de neumáticos (FIA, 2012)

La determinación del número de neumáticos están en función del impacto que pueda esperarse en la zona donde se ubicara dicha barrera, existen barreras de 2, 3 y 4 filas de neumáticos en función de dicha velocidad de impacto. Como se vio en el tema 3.3 del presente documento la atenuación de la velocidad de los vehículos que pierden el control es de esperarse se realice en la zona de escape pero mucha de la velocidad no puede ser controlada o simplemente los frenos pueden llegar a no responder de la manera adecuada y es ahí donde las barreras para impactos entran en juego y pueden llegar a salvar una vida.

Las barreras Tecpro están diseñadas para absorber la energía de un impacto cuando un vehículo pierde el control y se dirige hacia un impacto inminente, la ubicación de este tipo de barreras se ha puesto en auge debido a los diferentes ensayos que ha realizado la FIA y debido a su comportamiento en colisiones ha otorgado buenos resultados, a continuación se presenta un esquema de este tipo de barreras para impactos de alta velocidad.



40Barrera Tecpro extraído de <https://www.tecprobarriers.com/#/auto>

La ubicación de estas barreras de protección estará en función de los cálculos de las velocidades de impacto en las curvas, se debe de tener especial cuidado en la ubicación de las barreras de neumáticos y las Tecpro siempre cuidado que la trayectoria del vehículo y la ubicación de las barreras no sea menor a 30° debido a que a grados menores el vehículo corre el riesgo de salir más perjudicado de lo que podría solucionar dicho elemento.

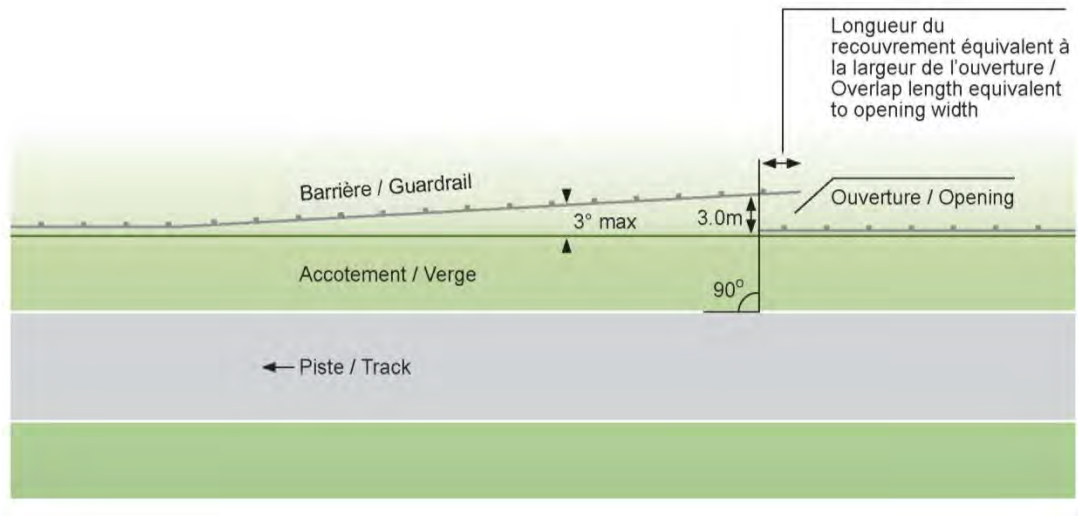
Las barreras no son limitantes del proyecto geométrico son embargo son una consecuencia del trazado que se plantee del circuito, en función de las diversas curvas que se planteen y de la trayectoria que el vehículo siga en el circuito será la ubicación de los diferentes tipos de barreras en función de las necesidades que el proyecto requiera. Así pues estos elementos son el complemento de los temas planteados en materia de geometría, pues su utilización es consecuencia directa del planteamiento geométrico que se proponga por esto se deberá de tener especial cuidado en el trazado de una manera iterativa para poder corregir posibles zonas que se planteen y que representen un peligro para los pilotos o para los espectadores.

La segunda línea de protección con que cuenta un circuito que está avalado ante la FIA es una barrera compuesta por cables de acero de un calibre determinado en función de las velocidades a las que se vayan a realizar las competencias, los detalles de la segunda línea de protección se ejemplifican en la siguiente imagen.

La tercera línea de protección es un cercado el cual garantiza que ninguna persona ajena al evento puede estar dentro de las instalaciones propias de la competición esto por seguridad de la misma carrera, de los pilotos y de las personas que intentasen acceder a alguna zona prohibida.

Otro elemento que estará en función del trazado de la pista es la ubicación de los caminos laterales de acceso los cuales circundaran en todo momento la pista y darán accesibilidad a los vehículos de emergencia en caso de un percance, el diseño de estos caminos debe de tener en consideración la finalidad del mismo que está reflejada en el transporte de grúas o ambulancias de un punto a otro dentro de todas las instalaciones de una manera rápida y eficaz. Muchas veces los proyectos de circuitos de competición tienen limitantes de espacio y la ubicación de estos caminos, que pareciese no sirven para nada, se complican en demasía sin embargo es un requerimiento por parte de la FIA para poder otorgarle un grado 1 a un circuito que este cuente con un vial de acceso el cual pueda ser ocupado para los menesteres que estamos explicando, así pues después de haber planteado la geometría de la pista se deberá de pensar la solución de conectividad interna y externa de cualquier punto del circuito para cubrir una eventualidad.

Otro elemento muy importante son los accesos a la pista y los Marshalpost, siendo estos últimos los lugares donde se encuentran los oficiales que vigilan la pista y son los responsables de informar los accidentes o inconvenientes que en el tramo que supervisan se susciten, en este sentido ningún punto de la pista deberá de quedar sin la supervisión de un Marshalpost. Estos oficiales ubicados en dichos puntos son capaces de activar a los cuerpos de emergencia los cuales se deberán de dirigir a la zona afectada de la pista por las entradas que se designen en función del proyecto geométrico de la misma.



43 Zona de entrada a pista (FIA, 2012)

Dichos accesos a pista deberán de tener una apertura menor a 3° y un ancho mínimo de 3 metros, además el acceso deberá de ser en el sentido de la circulación de los vehículos para que la zona de entrada no se presente a los pilotos como un punto anguloso contra el cual pudiesen impactar.

5.2. Instalaciones

Para el proceso de homologación ante la FIA es necesario contar con diversas instalaciones las cuales se deberán de colocar dentro del predio donde se emplace el circuito, estas instalaciones son recintos, oficinas o lugares particulares que deberán de incluirse en el Dossier FIA, documento presentado ante la FIA para solicitar una homologación, mismas que deberán de cumplir lo estipulado en los requerimientos que establece dicha Federación, a continuación a manera de resumen se incluyen las áreas más importantes que deberán de tomarse en consideración para el proyecto, pues su ubicación deberá de ser funcional y en compaginación con el desarrollo de la carrera o el evento que se realice.

5.2.1. Pits

Es la zona en la cual los autos realizan la recarga de combustible, aceite y cambio de neumáticos, en algunos casos el piloto puede cambiar de vehículo en caso de que sea necesario por algún fallo que se presente, se deben de considerar 24 áreas delimitadas para los diferentes equipos y dos para la FIA y la FOM (Formula One Management).



44Zona de pits autódromo Hermanos Rodríguez

5.2.2. Torre de control

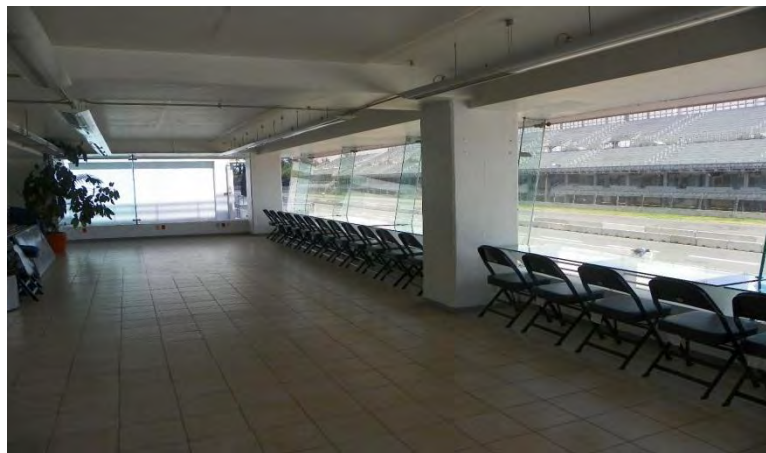
La torre de control es el centro de transmisiones de todas las ordenes que se reciben por medio de los oficiales que se encuentran en pista, antiguamente la torre de control era un edificio alto desde el cual era posible visualizar todo el circuito, en la actualidad solo se construye en forma de torre por meras costumbres pues el monitoreo de la carrera ahora se realiza digitalmente en monitores.



45Torre de control autódromo Hermanos Rodríguez

5.2.3. Oficina de control de carrera

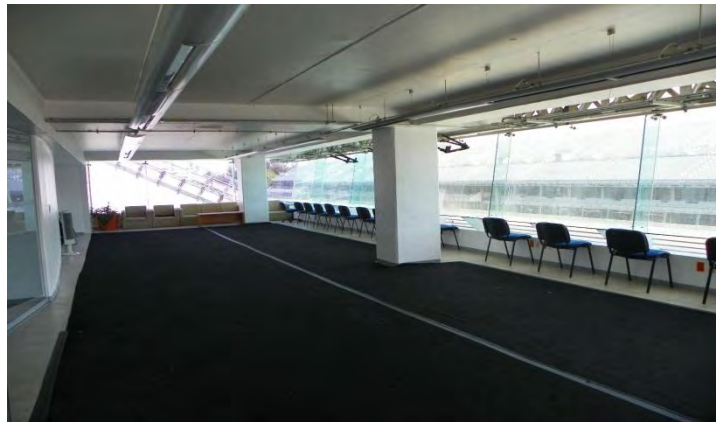
Dentro de esta oficina se lleva el control general de la carrera y es donde se van tomando las medidas necesarias en función de algún percance. Normalmente esta oficina es parte de la torre de control siempre y cuando la infraestructura lo permita.



46Control de carrera autódromo Hermanos Rodríguez

5.2.4. Centro de cronometraje

En este cuarto se realizan los cronometrajes de la carrera por cada competidor y por cada vuelta. Normalmente esta oficina es parte de la torre de control siempre y cuando la infraestructura lo permita.



47Centro de cronometraje autódromo Hermanos Rodríguez

5.2.5. Edificio de prensa

En esta instalación se ubican los diferentes medios de prensa, cuenta con zonas para transmisiones y sala de reuniones.

5.2.6. Hospital

Dentro de las regulaciones de la FIA y FOM, esta contar dentro del circuito con una unidad hospitalaria, que de atención de primera instancia, a los pilotos y personal de pits en caso de presentarse algún accidente. Como regla general el hospital deberá de estar ubicado en una zona con comunicación inmediata a la pista para que el traslado lleve el menor tiempo posible y además el helipuerto deberá de estar aledaño a esta instalación por si llegase a complicarse un caso y fuese necesario el traslado a un hospital externo con especialidades más avanzadas.



48Hospital autódromo Hermanos Rodriguez

Como se observa en la imagen anterior, el hospital del autódromo Hermanos Rodriguez antes de las remodelaciones para su homologación ante la FIA no cumplía con los requerimientos establecidos por dicha Federación así que se debieron de realizar las adecuaciones necesarias en esta área para cumplir con los lineamientos y poder atender cualquier imprevisto que no fuese de terapia intensiva o para estabilizar a algún accidentado, que básicamente es la funcionalidad de este.

5.2.7. Gradas

Las gradas son una parte fundamental en un proyecto de un circuito de alta velocidad pues los asistentes pagaran altas cifras monetarias para poder asistir al evento, el número de gradas establecidas no está normalizado pero es un requerimiento establecido por la FIA de manera extraoficial para obtener los costos de recuperación de la logística de la carrera.



49Gradas frente a pits autódromo Hermanos Rodríguez

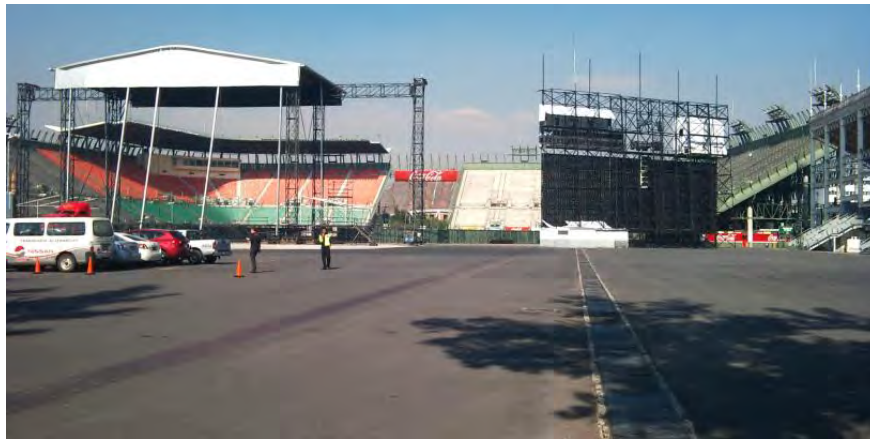
A pesar de que existe una normatividad FIA para el dimensionamiento de las gradas, para el caso de autódromo Hermanos Rodríguez y en especial por ubicarse en nuestro país, donde existen normales locales para estos temas, se debieron de seguir los parámetros de diseño establecidos en los códigos y reglamentos de construcción del Distrito Federal (Ahora Ciudad de México).

5.2.8. Paddock

En general el Paddock es una superficie adecuadamente habilitada donde se instalan los patrocinadores, servicios técnicos, escuderías, camiones de recambios y suministros y motorhomes (casas rodantes) de los equipos participantes de una carrera automovilística, el área recomendada para este menester debe de estar entre los 15 y 20 m².



50Paddock autódromo Hermanos Rodríguez



51Paddock autódromo Hermanos Rodríguez

Dentro del Paddock del circuito se deberán de tomar las previsiones para la ubicación de las siguientes áreas:

1. Parque de camiones
2. Zona de ventas
3. Estacionamiento Red bull
4. Estacionamiento VIP
5. Parque cerrado
6. Centro de transmisiones
7. Recinto de TV's locales

5.2.9. Pódium

Es la zona en la cual se lleva a cabo la premiación del evento. A continuación se presenta una imagen comparativa del pódium antes del premio de México y después.



52Pódium autódromo Hermanos Rodríguez 2013



53Pódium autódromo Hermanos Rodríguez 2015 extraído de <http://cdn-7.motorsport.com>

5.2.10. Helipuerto

Dentro de un circuito de competición es necesaria la ubicación de un helipuerto el cual esté conectado por los viales de servicio hacia la pista, esto con la finalidad de poder atender algún percance en el cual se tenga que trasladar a algún herido. También en algunos casos de considerar un helipuerto para los personajes VIP que puedan asistir al evento y que deciden llegar por ese medio de transporte.

De forma general, el área de seguridad necesaria para los helipuertos será un cuadrado de 18x18 m, no pudiendo encontrarse ningún objeto dentro de dicha área durante las operaciones de aterrizaje y despegue. La normativa internacional del Anexo 14 de OACI Organización de Aviación Civil Internacional volumen II establece dichas dimensiones en función del diámetro de las hélices de la aeronave que pudiese llegar a aterrizar en dicho helipuerto, para este caso en particular se emplea una aeronave tipo Eurocopter con un diámetro máximo de sus aspas del rotor principal de 10.2 metros (OACI, 2009).

Conclusiones

La tesis que se presenta en este documento está encaminada a las diferentes aportaciones que se van sumando en la materia del diseño geométrico para agregar un plus de espectacularidad a los eventos deportivos del automovilismo, en este sentido la hipótesis es comprobada ya que a lo largo de este trabajo hemos ido analizando la normatividad actual y los diversos aportes que se pueden realizar a dichos esquemas o parámetros normados para fomentar un mejor desarrollo de una carrera.

En el diseño geométrico de las curvas horizontales el aporte realizado implica la inclusión de curvas y contracurvas las cuales como se mencionó aumentan la expectativa de un posible rebase y hacen más entretenido el espectáculo.

Para el caso del perfil longitudinal la buena aplicación de la combinación entre las curvas verticales y las horizontales pueden implementar zonas en las cuales los pilotos deben de realizar hazañas deportivas más espectaculares dando así un mejor nivel en la competición.

La sección transversal como se comentó en el capítulo de referencia no es una parte del proyecto que impacte sobre manera o que pudiese aportar significativamente para poder aumentar la espectacularidad del evento, sin embargo las buenas prácticas de mantenimiento y conservación pueden ser decisivas para que los espectadores reciban lo mejor por el pago de su entrada al evento incluyendo a todos los telespectadores que siguen los eventos por este medio.

Con estos tres puntos que componen el proyecto geométrico a grandes rasgos de un circuito de competencia, podemos dar por concluido el trabajo afirmando la comprobación de la hipótesis planteada y dejando un aporte

puntual de las buenas prácticas de aplicación en materia del diseño para en los circuitos de automovilismo, abriendo una brecha de estudio que posiblemente sea una punta de lanza para que en nuestro país exista más desarrollo de nuestro técnicos y especialistas en esta materia de proyectos de infraestructura.

Bibliografía

APPENDIX O, F., 2016. *APPENDIX O TO THE INTERNATIONAL SPORTING CODE*. Paris Francia: FIA.

Chevrolet, 2016. *Chevrolet*. [En línea]
Available at: https://www.chevrolet.com.mx/content/dam/Chevrolet/lat-am/Mexico/nscwebsite/es/home/Cars/Aveo%202016/Model%20overview/02_pdf/Hoja%20Especificaciones%20Aveo%202016.pdf
[Último acceso: 11 06 2016].

CNN, 2015. *CNN noticias*. [En línea]
Available at: <http://www.cnnexpansion.com/economia/2015/10/28/la-formula-1-dejara-ganancias-de-3200-mdp-canaco-df>
[Último acceso: 06 03 2016].

FIA, 2012. *Internal Guidelines Motor racing course construction and safety 2012*. Paris: FIA.

FIA-WEB, 2016. *FIA*. [En línea]
Available at: <http://www.fia.com>
[Último acceso: 06 03 2016].

FORBES, 2016. *FORBES*. [En línea]
Available at: <http://www.forbes.com.mx/los-10-autos-mas-vendidos-del-2015/>
[Último acceso: 11 06 2016].

JSolana, 2016. *Automovilismo Deportivo*. [En línea]
Available at: <http://www.jsolana.com.mx/panamericana.html>
[Último acceso: 9/06/2016 06 2016].

MOTORZOOM, 2016. *MOTORZOOM*. [En línea]
Available at: http://www.motorzoom.es/mundo-auto/articulo/mclaren-mp4-28-ficha-tecnica-del-monoplaza-para-la-f1-video/59723/#refresh_ce
[Último acceso: 11 06 2016].

OACI, 2009. Aeródromos. En: *Helipuertos*. Canada: OACI, p. 100.

SCT, S. T., 1984. *Norma de Servicios Técnicos*. Mexico DF: SCT.

Índice de Imágenes

1Imagen esquemática de curva circular simple (SCT, 1984).....	7
2Tabla de ampliaciones y sobreelevaciones de una carretera tipo A2 (SCT, 1984).....	9
3Imagen esquemática de una curva vertical (SCT, 1984)	11
4Tabla para determinar el valor K (SCT, 1984).....	12
5Sección transversal, carretera tipo A2	13
6Características de los caminos de altas especificaciones (SCT, 1984)	14
7Chevrolet Aveo extraído de: http://www.chevrolet.com.pa/images/aveo/chevrolet-aveo-2015-auto-sedan-familiar-exterior-estilo-980x428-05.jpg	16
8McLaren MP4-28 extraído de: https://joesaward.files.wordpress.com/2013/01/profile-3.jpg	17
9 Esquema de curvas horizontales	20
10Circuito Hermanos Rodriguez	22
11Circuito temporal, Miami Florida (extraído de http://fiaformulae.com/en/media/photo-galleries/formula-e-miami-ePrix).....	23
12Sección transversal de recta de meta con isopticas	24
13Esquema de curva horizontal.....	26
14Piano Vallelunga (FIA, 2012)	27
15Piano Melbourne o negativo (FIA, 2012).....	28
16Piano Biselado (FIA, 2012)	28
17Piano Vallelunga (FIA, 2012)	29
18Encharcamiento en curva circuito Hermanos Rodriguez	30
19Piano desmontable circuito de Miami extraido de https://www.qualcomm.com/news/onq/2015/03/10/formula-e-comes-land-muscle-cars	31
20Tipo de pianos en función de su ubicación (FIA, 2012)	31
21Curva con trayectoria del vehículo	33
22Trazado de la trayectoria del vehiculo.....	36
23Modificación de trazado	37
24Circuito Hnos. Rodriguez extraído de http://revistamiled.com.mx/revistamiled/2015/01/22/la-pista-para-la-formula-1-en-mexico-estara-lista-en-agosto/	38
25Curva peraltada Circuito Hnos. Rodriguez.....	39
26Cálculo de las distancias de frenado.....	40
27Distancia de frenado (Zonas de escape) (FIA, 2012).....	43
28Zona del Foro Sol (variante 1).....	44

29Fotografía extraída de http://www.f1fanatic.co.uk/wp-content/uploads/2015/10/P-20151030-00874_HiRes-JPEG-24bit-RGB.jpg	45
30Fotografía extraída de http://www.f1fanatic.co.uk/wp-content/uploads/2015/10/P-20151030-00874_HiRes-JPEG-24bit-RGB.jpg	46
31Foro sol (trazado definitivo).....	46
32Circuito de Mónaco extraído de http://www.formulaf1.es/wp-content/uploads/2008/05/f1-2011-06-monaco-loews-treecito.jpg	50
33Perfil longitudinal con problemas de drenaje.....	52
34Circuito Hermanos Rodriguez, problemas de drenaje (2011)	53
35Sección de la recta de meta Autódromo Hermanos Rodriguez.....	54
36Comparativa circuito Hermanos Rodriguez.....	57
37Detalle de la barrera de concreto (FIA, 2012)	58
38Detalle de la barrera metálica (FIA, 2012).....	59
39Detalle de la barrera de neumáticos (FIA, 2012).....	59
40Barrera Tecpro extraído de https://www.tecprobarriers.com/#/auto	60
41Detalle de la segunda línea de protección (FIA, 2012)	62
42Primera y Segunda línea de protección autódromo Hermanos Rodriguez ...	62
43Zona de entrada a pista (FIA, 2012)	64
44Zona de pits autódromo Hermanos Rodríguez	65
45Torre de control autódromo Hermanos Rodriguez	66
46Control de carrera autódromo Hermanos Rodriguez	66
47Centro de cronometraje autódromo Hermanos Rodriguez.....	67
48Hospital autódromo Hermanos Rodriguez	68
49Gradas frente a pits autódromo Hermanos Rodriguez.....	69
50Paddock autódromo Hermanos Rodriguez	70
51Paddock autódromo Hermanos Rodriguez	70
52Pódium autódromo Hermanos Rodriguez 2013	71
53Pódium autódromo Hermanos Rodriguez 2015 extraído de http://cdn-7.motorsport.com	71

