

SOLUCIÓN CONCEPTUAL DE INTERSECCIÓN A DESNIVEL SEMIDIRECCIONAL EN EL NUDO DE ENTRADA A VARADERO

**Ing. Orlando Santos Pérez¹, Ing. Homero Morciego Esquivel¹, MSc. Ing. Manuel
Pedroso Martínez¹, Arq. Vivian Villazón González².**

*1. Universidad de Matanzas “Camilo Cienfuegos”, Vía Blanca
Km.3, Matanzas, Cuba.*

*2. Empresa de Proyectos de Arquitectura e Ingeniería de
Matanzas, San Vicente Final, Pueblo Nuevo, Matanzas, Cuba.*



Resumen

La intersección a nivel canalizada semaforizada que opera actualmente en la entrada de Varadero, al haber cumplido su período de diseño, comienza a presentar rasgos de congestionamiento en su funcionamiento. Los valores del crecimiento de la economía turística actuales y previstos en el futuro, impactan en la capacidad de alojamiento del tránsito que se verá excedida por el incremento de la intensidad del mismo, por lo que se hace necesario determinar una solución eficiente a aplicar en el momento futuro crítico. Mediante un análisis previo a la investigación, se ha identificado la solución de intersección a desnivel semidireccional como una variante aplicable para solucionar los problemas de tráfico actuales y futuros. Una vez realizados los estudios de Ingeniería de Tránsito, se ha demostrado la hipótesis del colapso de la infraestructura vial en ese punto, y luego de haber reconocido los elementos del modelo de intercambio a emplear, y de haber seleccionado la variante más funcional, se ha pre-dimensionado el intercambio en su conjunto, dándole un tratamiento de imagen acorde a la fachada de Varadero al mundo. Al obtener el esquema general de la intersección a desnivel semidireccional más eficaz para el nudo de entrada a Varadero, se ha completado la fase de Solución Conceptual del proyecto, incorporando además avanzadas herramientas de modelación y representación digital que brindan una descripción detallada del modelo terminado.

Palabras claves: *intersección a desnivel semidireccional; modelo de intercambio; esquema general.*

La solución actual de intersección a nivel semaforizada en el nudo de entrada a Varadero surgió como respuesta a finales de los años 90 e inicios de los años 2000 para sustituir el diseño original creado en los años 80, que a finales de la década del 80 presentaba problemas de congestionamiento, seguridad vial, confort y comodidad de nivel de servicio adecuado para un polo turístico.

Dado que la solución actual en el nudo de entrada a Varadero fue proyectada para un período de diseño de 10 a 15 años, ya vencidos, los valores del crecimiento de la economía turística del polo actuales y previstos en el futuro, impactan en la capacidad de alojamiento del tránsito que se verá excedida por el incremento de la intensidad del mismo, de acuerdo a la política económica nacional con respecto al turismo, por lo que se hace necesario determinar una solución eficaz –en términos de funcionalidad- a aplicar en el momento futuro crítico.

El Producto Interno Bruto (PIB) representa el resultado final de la actividad de producción de las unidades residentes, correspondiente con la producción de bienes y servicios de la economía, incluyendo los impuestos netos sobre la producción y la importación



correspondientes, una vez deducido el consumo intermedio de bienes y servicios requeridos para el propio proceso de producción. Como regla general, el PIB presenta una variación en ascenso de un año natural a otro, expresándose el incremento entre períodos contiguos mediante el factor de crecimiento a precios constantes, pudiéndose evaluar el patrón de comportamiento del crecimiento de la economía nacional e inferir o pronosticar su desarrollo futuro. El PIB, junto al incremento de las capacidades hoteleras como evidencia del desarrollo del turismo, causan un progresivo crecimiento cuantitativo de las corrientes vehiculares que confluyen en el nudo de entrada a Varadero, lo que impacta de forma negativa en la movilidad por las vías conectadas, así como en la accesibilidad desde y hacia el polo turístico, que constituye el objetivo fundamental de la infraestructura vial existente.

Al ser excedida la capacidad de alojamiento del tránsito, debido al incremento de la intensidad del tráfico en las vías que confluyen en dicho nudo, será necesario realizar una evaluación del tráfico que pudiera implicar el rediseño o redimensionamiento de la solución actual, permitiendo el desenvolvimiento eficaz del turismo en este polo de alto impacto en la economía nacional. De esta forma se hace necesario definir la solución más eficaz de intersección a desnivel semidireccional para el nudo de entrada a Varadero que resuelva la fluidez, seguridad vial y confort de esta infraestructura vial, dando respuesta a la necesidad de accesibilidad y movilidad que impondrá el desarrollo futuro del turismo.

Con el objetivo de elaborar la Solución Conceptual de intersección a desnivel semidireccional más eficaz para el nudo de entrada a Varadero, inicialmente se deben caracterizar los parámetros necesarios del diseño de intersecciones a desnivel para el período de diseño en función de la movilidad y la accesibilidad de la entrada a Varadero, y luego analizar las diferentes variantes de diseño de intersección a desnivel semidireccionales.

El estudio de gabinete del presente trabajo, está previsto en dos etapas. En un primer momento, se realiza el procesamiento de datos provenientes del aforo vehicular, y luego se definen los parámetros técnicos de predimensionamiento de los elementos del intercambio. En el caso de la entrada de Varadero, se hace necesario un intercambio con la mayor compacidad posible, debido al valor que poseen los terrenos aledaños a la zona y su alto potencial para futura explotación en actividades dedicadas al turismo.

Análisis de datos resultantes del aforo vehicular.

Con el objetivo de caracterizar el desarrollo de las maniobras del tráfico en el nudo de entrada a Varadero y las vías que en él confluyen, se realizarán varios estudios basados en datos resultantes de un aforo vehicular efectuado el 14 de junio de 2012. A partir del procesamiento de dichos datos se ha de realizar la proyección del tráfico hacia el futuro en un período de 40 años, prediciéndose la cantidad de vehículos que circularán por las vías



interceptadas y arribarán al nudo, a partir de cuyos valores se determinarán la capacidad de las vías y el nivel de servicio en que se encontrarán operando como criterios para determinar el agotamiento de los accesos, así como los ciclos semafóricos necesarios para garantizar la operación como criterio de extenuación de la solución de intersección a nivel canalizada y semaforizada que se explota actualmente.

Proyección futura del tráfico.

Conociendo la cantidad de vehículos observados y contabilizados mediante el aforo vehicular, y la razón de crecimiento de la economía como marcador del desarrollo del transporte, se puede predecir el desarrollo de las corrientes vehiculares en el futuro, elaborándose flujogramas que reflejan la distribución por ramales del tráfico que arriba al nudo y su redistribución en los flujos de salida, tanto para el momento actual como para el futuro.

Determinación de la razón de crecimiento de la economía.

Dado que el desarrollo turístico en la península de Varadero constituye un caso especial en el desarrollo de la economía nacional, se ha considerado como razón de crecimiento económico el incremento constructivo en el número de habitaciones por año, lográndose establecer un patrón que refleja el aumento progresivo de las capacidades de alojamiento del polo hasta las 45000 habitaciones, según las líneas directrices establecidas en el Plan de Ordenamiento Territorial vigente. Una vez alcanzado dicho total de habitaciones en tierra firme, previsto para el año 2043, se ha decidido considerar como valor de mayor impacto en el aumento progresivo del tráfico, la razón de crecimiento de la economía nacional a partir del Producto Interno Bruto (PIB) a precios constantes, valores correspondientes a las predicciones propuestas por (Peña, 2014), intervenciones del Ministro de Finanzas y Precios y datos consultados en los sitios web de la Oficina Nacional de Estadística e Información (ONEI) y la Asociación Nacional de Economistas de Cuba (ANEC).

Determinación del Tráfico Promedio Diario Anual (TPDA).

La inferencia del número máximo de vehículos que se espera que circulen por las vías interceptadas se realiza mediante la fórmula del interés compuesto, la cual plantea que:

$$TPDA_n = TPDA_0(1 + \gamma)^{n-1}, \text{ donde:}$$

- $TPDA_0$: Tránsito Promedio Diario Anual para el presente.
- $TPDA_n$: Tránsito Promedio Diario Anual para el año futuro "n".
- γ : razón de crecimiento del tráfico de acuerdo a indicadores económicos específicos.
- n: cantidad de años desde el presente hasta el año del cual se quiere predecir el valor.



A partir de los valores considerados para el incremento económico por año, se llevan los datos del aforo vehicular del año 2012 al año 2016 que es el presente y por tanto el año cero para la predicción de los valores de las corrientes vehiculares en el período de diseño.

Tabla 1. Valores del TPDA desde el año 2012 hasta el presente.

Período de diseño	Años	Razón de crecimiento	Proveniente de Matanzas		Proveniente de Varadero		Proveniente de Cárdenas	
			Cárdenas	Varadero	Matanzas	Cárdenas	Varadero	Matanzas
1	2012	2,14	1872	3384	3414	6927	7251	1877
2	2013	2,77	1913	3457	3487	7075	7405	1917
3	2014	0,03	1965	3552	3584	7271	7611	1970
4	2015	2,28	1966	3554	3585	7274	7613	1971
5	2016	2,91	2011	3635	3667	7439	7787	2016

Una vez obtenidos los valores del $TPDA_0$ para cada corriente vehicular, se aplica el mismo procedimiento para conocer el $TPDA_n$ de cada flujo durante 40 años, es decir, hasta el año 2055. De esta forma se obtienen las curvas de desarrollo del tráfico.

Como se observa, los movimientos que por su intensidad se convierten en principales a los efectos del diseño del intercambio, son los que unen a Varadero con Cárdenas en ambos sentidos, por lo que es una variante acertada optar por mantener ambos flujos a nivel, adecuando su geometría a la colocación de los apoyos para los ramales elevados correspondientes a los giros de izquierda desde Cárdenas hacia Matanzas, y desde Matanzas hacia Varadero.

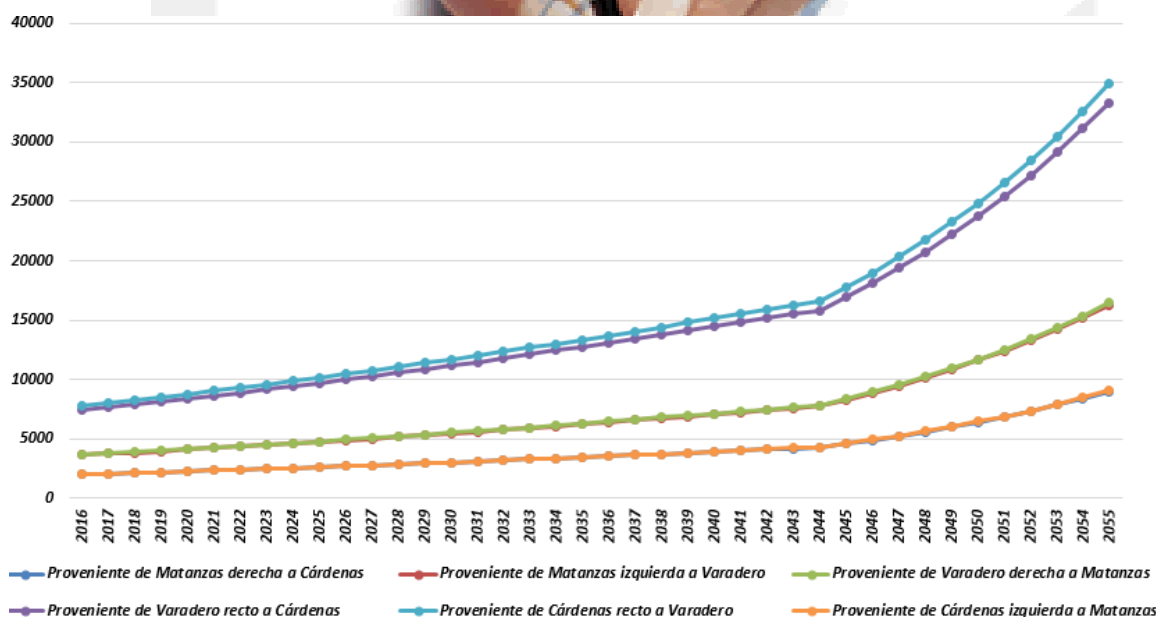


Figura 2. Curvas características del desarrollo progresivo del tráfico en cada corriente vehicular. Fuente: Elaboración propia.

Confección de flujogramas.

La descripción brindada por los flujogramas permite determinar los movimientos más importantes en función de los datos y cálculos de tránsito, lo que permite definir los ramales principales y secundarios, así como sus características geométricas en función del vehículo de diseño seleccionado para las condiciones futuras de circulación del nudo y sus accesos.

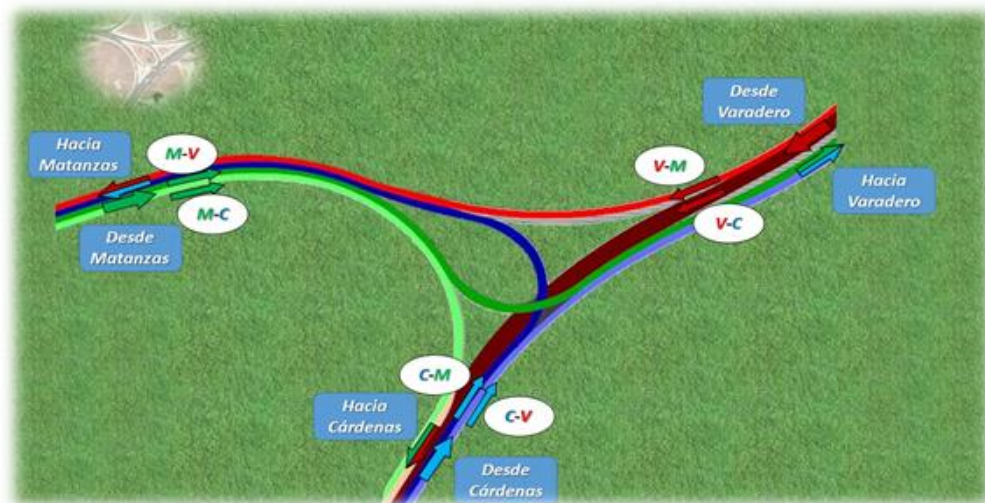


Figura 3. Flujograma de las corrientes vehiculares por ramales a la entrada y salida del nudo. Fuente: Elaboración propia.

Determinación de capacidad vial, volumen y nivel de servicio.

El proceso para la determinación de la capacidad vial, volumen y niveles de servicio se rige por los métodos de cálculo establecidos en la NC 53-109/1987, la cual basada en la metodología brindada por la AASHO en 1965, mantiene su vigencia en el territorio nacional. **Los datos de los ejemplos demostrativos para sendos cálculos corresponden a la estación orientada hacia Matanzas.** Las estaciones orientadas hacia Varadero y hacia Cárdenas, se efectuarán mediante hojas de cálculo de Microsoft Excel programadas por el autor, a partir de los datos registrados en el aforo vehicular (**Tabla 2.2**), obteniéndose los valores del TPDA expuestos en la **Tabla 2.3**.

Cálculo de la Capacidad Vial

Como el aforo vehicular se realizó durante 12 horas, el procesamiento de los datos recogidos arroja el tránsito promedio de 12 horas (TP 12 horas), por lo que es necesario convertirlo a TPDA, mediante el empleo de los coeficientes de expansión de TP 12 horas a TP mensual (1,35), y de TP mensual a TPDA (0,951), obtenidos a partir de estudios

efectuados en el año 2004 para conocer el impacto de cada día dentro del mes, y de cada mes dentro del año, sobre el desenvolvimiento del tráfico en la red vial nacional.

Corrientes vehiculares hacia Matanzas

Denominación		Autos	Camiones	Ómnibus	Motos	Rastras
C	Proveniente de Cárdenas	1134	192	101	118	84
V	Proveniente de Varadero	2191	161	367	270	3

Conversión de motos en autos

C	Proveniente de Cárdenas	$118 * 0.5 = 59$
V	Proveniente de Varadero	$270 * 0.5 = 135$

Datos ajustados

Proveniente de		Autos	Camiones	Ómnibus	Rastras	Total
C	Cárdenas	1193	192	101	84	1570
V	Varadero	2325	161	367	3	2856
Total		3518	253	468	87	4426
%		79,47	7,98	10,58	1,97	100

Cálculo del Tránsito Promedio Diario Anual (TPDA) para el año 2016.

$$TPDA_{2016} = TP_{12 \text{ horas}} (1,35) (0,951)$$

$$TPDA_{2016} = (4426) * (1,35) * (0,951)$$

$$TPDA_{2016} = 5683 \text{ veh/día.}$$

Cálculo del volumen horario de máxima demanda (VHMD) para el año 2016.

$$VHMD_{2016} = \frac{TPDA_{2016} * (K) * (D)}{100}$$

K: relación entre el VHD y el TPDA. Para el caso en estudio, al ser una vía sub-urbana, se toma $K = 0,12$.

$$VHMD_{2016} = \frac{5683 * (0,12) * (0,507)}{100}$$

D: factor de distribución por sentido. Se estima dividiendo el reparto por sentido en la vía que interese o en otra similar.

$$VHMD_{2016} = 342 \text{ veh/hora.}$$

Cálculo del volumen horario de máxima demanda (VHMD) para el año 2055

$$VHMD_{2055} = VHMD_{2016} * (1 + \gamma)^{n-1}$$

$$VHMD_{2055} = 342 * (1 + 0,0394)^{39}$$

$$VHMD_{2055} = 1543 \text{ veh/hora}$$

• γ : razón de crecimiento del tráfico. Se toma como el promedio del período de análisis.

• n : cantidad de años desde el presente hasta el año a predecir. Se calcula por años independientes para el período de análisis de 40 años.

Cálculo del factor de vehículos pesados (f_{vp})



$$f_{vp} = \frac{100}{100 + P_c(E_c - 1) + P_b(E_b - 1) + P_r(E_r - 1)}$$

$$f_{vp} = \frac{100}{100 + 7,98(1,2 - 1) + 10,58(1,2 - 1) + 1,97(1,5 - 1)}$$

$$f_{vp} = 0,96$$

- Por ciento de camiones, ómnibus y rastras de la corriente vehicular:

Pc 7,98

Pb 10,58

Pr 1,97

(Según aforo vehicular)

- Autos equivalentes de pasajeros para camiones, ómnibus y rastras:

Ec: 1,2.	Eb: 1,2.	Er: 1,5.	Según Highway Capacity Manual, AASHTO, 2001)
----------	----------	----------	--

Cálculo del factor de hora pico (f_{hp})

$$f_{hp} = \frac{VHMD}{N \times q_{max}}$$

$$f_{hp} = \frac{807 \text{ veh/hora}}{2 \times 439 \text{ veh/hora}}$$

$$f_{hp} = 0,91$$

- VHMD: Volumen horario de máxima demanda, tomado como máximo valor del aforo vehicular para una hora completa, correspondiente a la corriente Cárdenas-Varadero con 807 veh/hora.

- N: número de intervalos dentro de la hora.

Para conteos de 30 min, N=2.

- q_{max} : Tasa de flujo máxima en autos directos equivalentes, tomada como el valor mayor entre los dos intervalos de 30 minutos de la hora en que se produce el VHMD.

Cálculo de la tasa de flujo máxima en autos directos equivalentes.

$$q_{max(ADE)} = \frac{VHMD_{2016}}{f_{hp}} = \frac{242 \text{ veh/hora}}{0,91} = 266 \text{ veh/hora}$$

Tabla 2. Valores del Tránsito Promedio para 12 horas (TP_{12 horas}) para las corrientes vehiculares que se forman al salir del nudo.

	Hacia Matanzas			Hacia Varadero			Hacia Cárdenas		
	C-M	V-M	%	M-V	C-V	%	V-C	M-C	%
Autos	1193	2325	79,47	2358	4896	81,54	4615	1200	79,00
Camiones	192	161	7,98	124	485	6,84	571	207	10,58
Ómnibus	101	367	10,58	342	644	11,08	565	92	8,93
Rastras	84	3	1,97	8	40	0,53	43	67	1,49
Total	1570	2856		2831	6065		5795	1566	



Tabla 3. Valores del Tránsito Promedio Diario Anual, y Volumen Horario de Máxima Demanda por corriente vehicular al inicio y final del período de análisis.

Corriente Vehicular	Matanzas				Varadero				Cárdenas			
	M-V	M-C	V-M	C-M	V-C	V-M	C-V	M-V	C-V	C-M	V-C	M-C
TPDA (2016)	3635	2011	3667	2016	7439	3667	7787	3635	7787	2016	7439	2011
TPDA total(2016)	5646		5683		11106		11421		9803		9450	
VHMD (2016)	217	120	221	121	440	217	474	221	476	123	438	118
Total	338		342		657		695		599		557	
Futuro (2055)	1523		1543		2964		3134		2702		2511	

Tabla 4. Cálculo de la tasa de flujo máxima en autos directos equivalentes para las corrientes vehiculares que se forman al salir del nudo.

	Hacia Matanzas	Hacia Varadero	Hacia Cárdenas
TP 12 horas	4426	8896	7361
TPDA(2016)	5683	11421	9450
VHMD(2016)	342	695	557
VHMD(2055)	1543	3134	2511
qmax.ADE	1759	4078	3020

Volumen y nivel de servicio.

El volumen y nivel de servicio están muy asociados, por cuanto el volumen de servicio describe el máximo número de vehículos que pueden pasar por una sección de vía por hora, en un sentido de circulación para un nivel de servicio dado, mientras las condiciones límites de operación fijadas para cada nivel de servicio se mantengan. Por tanto, a los efectos del cálculo del volumen de servicio, se fija inicialmente el nivel de servicio en el cual se cree que se encuentre operando la vía, cuyo resultado se corrobora una vez comparados el volumen de servicio calculado con el volumen horario de máxima demanda pronosticado por vía en cada nivel de servicio.

Datos de la vía

- Número de carriles: 2.
- Ancho de calzada: 7.00m.
- Ancho de carril: 3.50m.
- Paseo: 1.20m.
- Terreno: Llano.
- Velocidad de diseño: 80km/h.
- Camiones: 17,60%
- Ómnibus: 17,96%
- Rastras: 4,52%
- n=40 años.
- VHMD₀=338 veh/hora
- VHMD₅₅=1523 veh/hora
- Estación de estudio: Matanzas.
(Carriles Matanzas-Cárdenas)

Asumiendo que se encuentra operando en el Nivel C:



Cálculo del volumen de servicio

$$VS_C = 2000 \times \left[\left(\frac{V}{C} \right) (W_L) (T_L) (B_L) \right], \text{ donde:}$$

$\left(\frac{V}{C} \right)$ Relación entre el volumen de servicio del nivel que se quiere brindar (V) y la capacidad real (C) • NC 53:118/1984.
Anexo C
Tabla 1.

$$\Rightarrow \left(\frac{V}{C} \right) = 0,18.$$

W_C Factor de corrección que toma en cuenta la anchura de carril y distancia a obstáculos laterales. • NC 53:118/1984.
Anexo C
Tabla 2.

$$\Rightarrow W_C = 0,921.$$

T_C Factor de corrección que toma en cuenta el porcentaje de camiones en la corriente vehicular.

$$T_C = \frac{100}{100 - P_t + (E_t \times P_t)}$$

- P_t : porcentaje de camiones.
- E_t : autos equivalentes de pasajeros para camiones.

$$T_C = \frac{100}{100 - 17,60 + (2,5 \times 17,60)}$$

$$\Rightarrow T_C = 0,79.$$

B_C Factor de corrección que toma en cuenta el porcentaje de ómnibus en la corriente vehicular.

$$B_C = \frac{100}{100 - P_b + (E_b \times P_b)}$$

- P_b : porcentaje de buses.
- E_b : autos equivalentes de pasajeros para ómnibus.

$$B_C = \frac{100}{100 - 17,96 + (2 \times 17,96)}$$

$$\Rightarrow B_C = 0,85.$$

Sustituyendo valores en la ecuación del volumen de servicio:

$$VS = 2000 \times [0,18(0,921)(0,79)(0,85)]$$

$$VS_C = 222 \text{ veh/hora}$$

Comparando VS_C con $VHMD_{2016}$ y $VHMD_{2055}$:

338 veh/hora > 222 veh/hora

1523 veh/hora > 222 veh/hora

$VHMD_{2016} > VS_C$

$VHMD_{2055} > VS_C$



Como el volumen horario de máxima demanda del año actual y futuro supera al volumen de servicio para las condiciones de operación del nivel C, se puede concluir que la vía no se encuentra operando en el mismo, por lo que se procede a realizar el mismo algoritmo para el siguiente nivel.

Asumiendo que se encuentra operando en el Nivel D:

Cálculo del volumen de servicio

$$VS_D = 2000 \times \left[\left(\frac{V}{C} \right) (W_D) (T_D) (B_D) \right]$$

$$\Rightarrow \left(\frac{V}{C} \right) = 0,31.$$

$$\Rightarrow W_L = 0,926.$$

$$T_D = \frac{100}{100 - P_t + (E_t \times P_t)}$$

$$B_D = \frac{100}{100 - P_b + (E_b \times P_b)}$$

$$T_D = \frac{100}{100 - 17,60 + (2 \times 17,60)}$$

$$B_D = \frac{100}{100 - 17,96 + (2 \times 17,96)}$$

$$\Rightarrow T_D = 0,85.$$

$$\Rightarrow B_D = 0,85.$$

Sustituyendo valores en la ecuación del volumen de servicio:

$$VS_D = 2000 \times [0,31(0,926)(0,85)(0,85)]$$

$$VS_D = 414 \text{ veh/hora}$$

Comparando VS_D con $VHMD_{2016}$ y $VHMD_{2055}$:

$$338 \text{ veh/hora} < 414 \text{ veh/hora}$$

$$1523 \text{ veh/hora} > 414 \text{ veh/hora}$$

$$VHMD_{2016} < VS_D$$

$$VHMD_{2055} > VS_D$$

El volumen de servicio del nivel D supera el volumen horario de máxima demanda actual, por lo que en el presente se puede afirmar que la vía opera en dicho rango, pero al finalizar el período de análisis, ya el volumen horario de máxima demanda futura habrá excedido a sobremanera el volumen de servicio, por lo que se hace necesario comprobar si la vía se encuentra operando en el siguiente nivel de servicio.

Asumiendo que se encuentra operando en el Nivel E:

Cálculo del volumen de servicio

$$VS_E = 2000 \times \left[\left(\frac{V}{C} \right) (W_E) (T_E) (B_E) \right]$$

$$\Rightarrow \left(\frac{V}{C} \right) = 1.$$

$$\Rightarrow W_E = 0,93.$$



$$T_E = \frac{100}{100 - P_t + (E_t \times P_t)}$$

$$T_E = \frac{100}{100 - 17,60 + (2 \times 17,60)}$$

$$\Rightarrow T_E = 0,85.$$

$$B_E = \frac{100}{100 - P_b + (E_b \times P_b)}$$

$$B_E = \frac{100}{100 - 17,96 + (2 \times 17,96)}$$

$$\Rightarrow B_E = 0,85.$$

Sustituyendo valores en la ecuación del volumen de servicio:

$$VS_E = 2000 \times [(0,93)(0,85)(0,85)]$$

$$VS_E = 1341 \text{ veh/hora}$$

Comparando VS_E con $VHMD_{2016}$ y $VHMD_{2055}$:

$$338 \text{ veh/hora} < 1341 \text{ veh/hora}$$

$$1523 \text{ veh/hora} > 1341 \text{ veh/hora}$$

$$VHMD_{2016} < VS_E$$

$$VHMD_{2055} > VS_E$$

Siguiendo el procedimiento anterior, a partir de los datos de las restantes vías, mostrados en la Tabla 2.4., se ha calculado la capacidad vial, y el volumen y nivel de servicio de las restantes vías, cuyos resultados se muestran en las Tablas 2.5, 2.6, y 2.7, las cuales han sido programadas en Microsoft Excel según las metodologías de cálculo de la NC 53:118/1984. "Vías con flujo ininterrumpido".

Tabla 5. Datos de las vías.

	Estación 1		Estación 2		Estación 3	
	Proveniente de Matanzas		Proveniente de Varadero		Proveniente de Cárdenas	
Número de carriles	2	2	2	2	2	2
Ancho de calzada (m)	7	7	7	7	7	7
Paseo	1,2	1,2	0	0	1,2	1,2
Separador	0	0	1,2	1,2	0	0
Terreno	llano	llano	llano	llano	llano	llano
Vd (km/h)	80	80	80	80	80	80
Vop (km/h)	50	50	50	50	50	50
Camiones (%)	17,60	17,88	15,50	12,37	20,25	23,09
Ómnibus (%)	17,96	19,29	22,61	22,69	17,05	15,65
Rastras (%)	4,52	5,45	0,85	0,92	5,99	4,99
Período de Diseño (años)	40	40	40	40	40	40
$VHMD_o$	338	342	657	695	599	557
$VHMD_{55}$	1523	1543	2964	3134	2702	2511

El volumen de servicio del nivel E supera el volumen horario de máxima demanda actual, por lo que en el presente se puede afirmar que la vía transita hacia el nivel F, pero al finalizar el período de análisis ya el volumen horario de máxima demanda futura habrá excedido el volumen de servicio E, por lo que la vía se encontrará operando en el nivel de servicio F, y su flujo será forzado, caracterizado por las muy bajas velocidades, que se reducirán sustancialmente provocando paradas largas y cortas a causa del congestionamiento, formándose colas de vehículos que impedirán la circulación.



Tabla 6. Cálculo del Nivel de servicio C.

Nivel de Servicio C						
Relación V/C	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18
W	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92
TI	0,79	0,79	0,81	0,84	0,77	0,74
Et	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
BI	0,85	0,84	0,82	0,82	0,85	0,86
Eb	2	2	2	2	2	2
VS	222	219	219	228	217	213
Comparación con VHMD ₀	Menor	Menor	Menor	Menor	Menor	Menor
Comparación con VHMD ₂₅	Menor	Menor	Menor	Menor	Menor	Menor
Comparación con VHMD ₃₅	Menor	Menor	Menor	Menor	Menor	Menor
Comparación con VHMD ₄₅	Menor	Menor	Menor	Menor	Menor	Menor
Comparación con VHMD ₅₅	Menor	Menor	Menor	Menor	Menor	Menor

Tabla 7. Cálculo del Nivel de servicio D.

Nivel de Servicio D						
Relación V/C	0,31	0,31	0,31	0,31	0,31	0,31
W	0,926	0,926	0,926	0,926	0,926	0,926
TI	0,85	0,85	0,87	0,89	0,83	0,81
Et	2	2	2	2	2	2
BI	0,85	0,84	0,82	0,82	0,85	0,86
Eb	2	2	2	2	2	2
VS	414	408	405	416	408	403
Comparación con VHMD ₀	Mayor	Mayor	Menor	Menor	Menor	Menor
Comparación con VHMD ₂₅	Menor	Menor	Menor	Menor	Menor	Menor
Comparación con VHMD ₃₅	Menor	Menor	Menor	Menor	Menor	Menor
Comparación con VHMD ₄₅	Menor	Menor	Menor	Menor	Menor	Menor
Comparación con VHMD ₅₅	Menor	Menor	Menor	Menor	Menor	Menor

Tabla 8. Cálculo del Nivel de servicio E.

Nivel de Servicio E(Capacidad de la vía)						
Relación V/C	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
W	0,930	0,930	0,930	0,930	0,930	0,930
TI	0,85	0,85	0,87	0,89	0,83	0,81
Et	2	2	2	2	2	2
BI	0,85	0,84	0,82	0,82	0,85	0,86
Eb	2	2	2	2	2	2
VS	1341	1323	1313	1349	1321	1307
Comparación con VHMD ₀	Mayor	Mayor	Mayor	Mayor	Mayor	Mayor
Comparación con VHMD ₂₅	Mayor	Mayor	Mayor	Mayor	Mayor	Mayor
Comparación con VHMD ₃₅	Mayor	Mayor	Mayor	Mayor	Mayor	Mayor
Comparación con VHMD ₄₅	Mayor	Mayor	Menor	Menor	Menor	Mayor
Comparación con VHMD ₅₅	Menor	Menor	Menor	Menor	Menor	Menor

Revisión del ciclo semafórico actual.

A partir de los valores del tránsito promedio diario anual del año actual (TPDA₂₀₁₆), se infieren los volúmenes horarios de máxima demanda actuales para los carriles implicados



en el semáforo, es decir, los giros de izquierda, con el objetivo de comprobar si el ciclo semafórico actual brinda el confort adecuado en el nudo por el método de Webster. De así no ser, se definiría el momento de agotamiento del nudo debido a la imposibilidad de evacuar los movimientos generadores de los puntos de conflicto, lo cual conllevaría al reordenamiento del tráfico y el redimensionamiento de la solución actual de nudo vial y las vías de acceso al mismo.

Tabla 9. Volumen horario de máxima demanda para las corrientes implicadas en el semáforo.

Corriente Vehicular	Matanzas	Varadero	Cárdenas
	M-V	V-C	C-M
TPDA(2016)	3635	7439	2016
TPDA total(2016)	5646	11106	9803
VHMD(2016)	217	440	123
Total	338	657	599



Fase I (Matanzas-Varadero)
Cálculo del factor de vehículos pesados (f_{vp})

$$f_{vp} = \frac{100}{100 + P_c(E_c - 1) + P_b(E_b - 1) + P_r(E_r - 1)}$$

$$f_{vp} = \frac{100}{100 + 4,36(1,5 - 1) + 12,06(1,5 - 1) + 0,27(3,5 - 1)}$$

$$f_{vp} = 0,918$$

• Por ciento de camiones, ómnibus y rastras de la corriente vehicular:

▪ Pc	4,36
▪ Pb	12,06
▪ Pr	0,27

(Según aforo vehicular)

- Autos equivalentes de pasajeros para camiones, ómnibus y rastras:

Ec : 1.5

Eb : 1.5

Er : 3.5

(Según Highway Capacity Manual, AASHTO, 2000)

Cálculo del factor de hora pico(f_{hp})

- VHMD₂₀₁₆: el mayor volumen vehicular en el horario pico extendido (de 8:00-9:00 am) con un valor de 2030 veh_{mixtos}/hora.
- q_{max}: mayor tasa de flujo correspondiente a un aforo de 30 min, correspondiente a la media hora entre 8:00-8:30 am, con 1017 veh/hora, en autos directos equivalentes.

Cálculo de la tasa de flujo máxima en autos directos equivalentes.

$$q_{\max(ADE)} = \frac{VHMD_{2016}}{f_{hp}} \times \frac{1}{f_{vp}} \times E_{VI} = \frac{217veh/hora}{0,998} \times \frac{1}{0,918} \times 1,05 = 249veh/hora$$

$E_{V(IZQUIERDA)}$: factor por movimientos de vuelta. Se introduce debido a que el vehículo que gira a la izquierda o derecha, consume mayor tiempo que el vehículo que sigue de frente. Sus valores para cada giro, según (Brockenbrough & Boedecker, 2004) son:
Hacia la izquierda ($E_{VI}=1,05$) Hacia la derecha ($E_{VD}=1,4$)

Para las corrientes implicadas en el ciclo semafórico el valor a emplear es E_{VI} , por cuanto los movimientos de derecha son libres, y los de izquierda son los que se entrecruzan en la zona de intersección.

Cálculo del intervalo de cambio de fases

$$L_1 = \left(t + \frac{v}{2a} \right) + \left(\frac{W + L}{v} \right) = \left(1s + \frac{13,88m/s}{2 \times 3,05m/s^2} \right) + \left(\frac{15m + 6,10m}{13,88m/s} \right) = 4,795seg$$



- L_i = intervalo de cambio de fases, igual al tiempo Amarillo sumado al Todo Rojo
- t = tiempo de percepción reacción del conductor (usualmente 1.00s).
- a = tasa de desaceleración, con valor de 3.05 m/s^2 .
- v = velocidad de aproximación de los vehículos (m/s). Se utiliza la velocidad límite prevaleciente de 50 km/h (13,88 m/s).
- W = ancho de la intersección, para este caso de 15 m.
- L = longitud del vehículo, con un valor típico 6.10m.

Una vez efectuados los cálculos para las dos fases restantes (Tabla 2.10) se procede a determinar el ciclo óptimo del semáforo.

Tabla 10. Procedimiento de cálculo del ciclo semafórico.

		FASE 1 (M-V)	FASE 2 (V-C)	FASE 3 (C-M)
VHMD o	(veh/h)	217	440	123
Razón de crecimiento(r)	-	variable	variable	variable
fvp	-	0,92	0,90	0,82
FHP	-	1,00	1,00	1,00
q _{máx} (ADE)	(veh/h)	249	492	159
q _{sat}	(veh/h)	1800	1800	1800
Relación (y _i)	-	0,138	0,273	0,088
Vop	(m/s)	13,89	13,89	13,89
Ancho neto efectivo(w)	(m)	15	15	15
Aceleración(a)	(m/s ²)	3,05	3,05	3,05
Tiempo (t)	(s)	1	1	1
Longitud de vehículos (L)	(m)	6,1	6,1	6,1
Longitud de intervalos (Li)	(m)	4,80	4,80	4,80

Cálculo del ciclo óptimo (C_o)

$$C_o = \frac{1,5 \times L + 5}{1 - \sum_{i=1}^{\phi} Y_i}$$

$$C_o = \frac{1,5 \times (3 \times 4,795) + 5}{1 - (0,138 + 0,273 + 0,088)}$$

$$C_o = 53 \text{ seg}$$

- C_o = tiempo óptimo de ciclo, en segundos, cuyo valor máximo para este método es de 120 segundos.
- L = tiempo total perdido por ciclo, en segundos.
- ϕ = número de fases, en este caso son 3:
 - Matanzas-Varadero.
 - Varadero-Cárdenas.



- Cárdenas-Matanzas.

- y_i = relación entre el flujo actual ($q_{\max(ADE)_i}$) y el flujo de saturación o tasa máxima de vehículos que cruzan la línea en el período de luz verde ($q_{sat} = 1800 \text{ veh/hora}$) para el acceso, movimiento o carril crítico de cada fase.

$$y_1 = \frac{q_{\max(ADE)_1}}{q_{sat}} = \frac{249 \text{ veh/hora}}{1800 \text{ veh/hora}} = 0,138$$

$$y_2 = \frac{q_{\max(ADE)_2}}{q_{sat}} = \frac{492 \text{ veh/hora}}{1800 \text{ veh/hora}} = 0,273$$

$$y_3 = \frac{q_{\max(ADE)_3}}{q_{sat}} = \frac{159 \text{ veh/hora}}{1800 \text{ veh/hora}} = 0,088$$

La Tabla 11. muestra el cálculo automatizado del ciclo óptimo por fases hasta el año 2032, observándose el aumento progresivo en los tiempos para cada fase y para el ciclo semafórico en general.

Tabla 11. Ciclo óptimo del semáforo de la entrada a Varadero.

Vop=50km/h	Fase 1	Fase 2	Fase 3	Fase 1	Fase 2	Fase 3	Fase 1	Fase 2	Fase 3	Ciclo
	VHMD	VHMD	VHMD	qmáx(ADE)	qmáx(ADE)	qmáx(ADE)	Yi1	Yi2	Yi3	Óptimo
2016	217	440	123	249	492	159	0,138	0,273	0,088	53,2
2017	224	453	127	256	507	164	0,142	0,281	0,091	55
2018	230	466	130	263	521	168	0,146	0,289	0,093	56
2019	237	481	134	272	537	174	0,151	0,299	0,096	59
2020	245	495	139	280	554	179	0,156	0,308	0,099	61
2021	252	510	143	289	571	184	0,160	0,317	0,102	63
2022	260	526	147	298	588	190	0,165	0,327	0,106	66
2023	268	542	152	307	606	196	0,170	0,337	0,109	69
2024	276	558	156	316	624	202	0,175	0,347	0,112	73
2025	284	574	161	325	642	207	0,180	0,357	0,115	76
2026	291	590	165	334	660	213	0,185	0,367	0,118	81
2027	300	608	170	344	680	219	0,191	0,378	0,122	86
2028	309	625	175	354	699	226	0,196	0,389	0,125	92
2029	317	643	180	364	719	232	0,202	0,399	0,129	99
2030	326	660	185	374	739	238	0,208	0,410	0,132	106
2031	335	678	190	383	758	245	0,213	0,421	0,136	116
2032	535	1041	949	612	1164	1224	0,340	0,647	0,680	-40

A partir de los resultados obtenidos, se puede afirmar que el ciclo semafórico actual es eficiente, puesto que su valor de ciclo óptimo de 53 segundos es inferior al límite de 90 segundos (aceptable hasta 120 segundos) que establece el Método de Webster, por lo que aún el semáforo regula de forma correcta el entrecruzamiento entre las corrientes



vehiculares que efectúan giro de izquierda en la intersección. Sin embargo, para el año 2028, el ciclo óptimo alcanza el valor de 92 segundos, superando el límite y avizorando que en poco tiempo será alcanzado el valor máximo absoluto de 120 segundos, exactamente en el año 2032, donde se comienza a obtener valores negativos que denotan la disfuncionalidad del semáforo, por lo que se hace necesario prever que para tal fecha comience la explotación de la solución de diseño propuesta en la presente investigación.

Evaluación funcional.

La intersección a nivel canalizada semaforizada del nudo de entrada a Varadero, en su configuración geométrica, refleja rasgos de una inadecuada conjunción de curvas, lo que provoca la superposición del recorrido de corrientes vehiculares que circulan por ramales contiguos, como es el caso del giro de derecha directo desde Varadero hacia Matanzas, y el giro de izquierda desde Cárdenas hacia Matanzas. (Ver **Figura 4**)

Por otra parte, las condiciones ideales del tránsito referentes a los conductores no están garantizadas, por cuanto la preparación obtenida al obtener la Licencia de Conducción es de carácter básico y debe complementarse con la autosuperación de los individuos que operan vehículos automotores.



Figura 4. Superposición de curvas.

Fuente: Archivos del autor.

De manera general, los conductores que operan la primera ruta invaden parcial o totalmente el segundo recorrido, generándose puntos de conflicto que no son normalmente visibles en intersecciones a nivel. Una vez superada la curva de inflexión izquierda que une la intersección con el tramo recto hasta la dársena, los vehículos que se encuentran en el centro de los dos carriles se bifurcan en dos corrientes independientes por sendos carriles. (Ver **Figura 5**)





Figura 5. Invasión del carril Cárdenas-Matanzas por usuarios del carril Varadero-Matanzas (Vehículo negro). Fuente: Archivos del autor.

El nudo experimenta en los horarios picos del día, dígase la mañana y la tarde, la generación de colas de vehículos en sus accesos, llegando estos a mantenerse en la fila durante varios ciclos del semáforo para su fase correspondiente, presumiblemente debido a que la cantidad de autos que circulan por la vía superen considerablemente la oferta vial para la que fue diseñada, o que los tiempos regulados por el dispositivo de control se encuentran por debajo o por encima de los períodos óptimos, efectuándose el entrecruzamiento de forma insatisfactoria en ambos casos. Esto denota que ya en el presente, el nudo está comenzando a presentar síntomas de congestión y eventos de demoras. Debido a que la mayoría del movimiento se realiza hacia Varadero en estos horarios, las colas desde la península no son notables, pudiéndose solventar por el ciclo semafórico actual, no siendo así en el futuro. Es evidente que, tanto el nudo como las vías que allí confluyen, se encuentran trabajando sobre valores muy cercanos a la capacidad vial, lo cual trae entre otras consecuencias la disminución de las velocidades, además de la generación de paradas que aumentan el tiempo de recorrido de los viajes planificados por los conductores, muestras de la incomodidad de nivel de servicio.



Figura 6. Colas de vehículos generadas en el horario de la mañana: vehículos provenientes de Matanzas (izquierda); vehículos provenientes de Cárdenas (derecha).



Fuente: Archivos del autor.

Los automóviles que circulan por la red vial nacional no poseen las características idóneas en cuanto al funcionamiento de sus partes componentes, debido a su obsolescencia tecnológica. De esta forma, se produce la mezcla en las corrientes vehiculares de automóviles de diferentes configuraciones y velocidades, lo que restringe el rendimiento de los más modernos y veloces, y sobreexplota a los de menores prestaciones, impidiendo la fluidez del desplazamiento hacia y a través del nudo.

Los puntos de recogida de pasajeros presentes en los tres troncos, provocan un alto grado de cruce de peatones sobre las vías, las cuales no están provistas de separadores o isletas divisorias que protejan al peatón durante la maniobra, además de incitar a la detención por tiempo indefinido de vehículos generalmente de tipo pesado, con el objetivo de efectuar el abordaje. Además, las altas velocidades a la que circulan los vehículos dada la categoría técnica de las vías, representa una alta peligrosidad debido a los puntos de conflicto generados con las corrientes peatonales.

Esquemas generales de soluciones de intercambio semidireccional.

Una vez analizados los datos del tránsito, se procede a confeccionar variantes de soluciones de intercambios semidireccionales, elaborando esquemas en los cuales se tienen en cuenta, además de las características del tráfico inducido y desarrollado, las características topográficas de la zona, los cultivos presentes en las cercanías, las edificaciones que pudieran limitar el espacio para el desarrollo de los ramales y las redes técnicas existentes, lo cual permite formular una evaluación preliminar de las afectaciones posibles.

Luego de proyectar y evaluar varios esquemas con disímiles configuraciones de ramales en cuanto a disposición y demás parámetros geométricos, se seleccionaron tres para realizarles un análisis más profundo, en vistas a elegir el esquema de solución más eficaz.

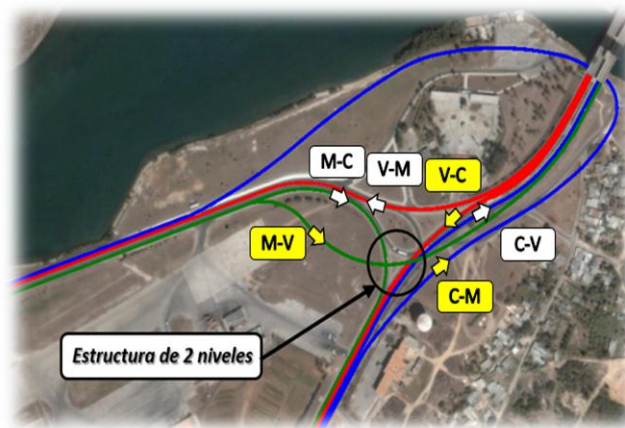


Figura 7. Variante 1. Intercambio semidireccional con una estructura de 2 niveles.
Fuente: Elaboración propia.

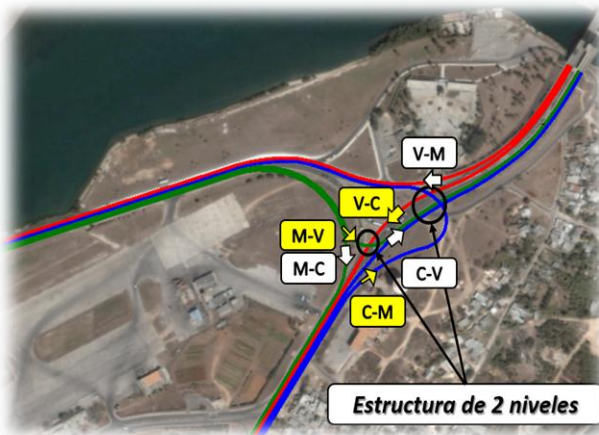


Figura 8. Variante 2. Intercambio semidireccional con dos estructuras de 2 niveles. Fuente: Elaboración propia.

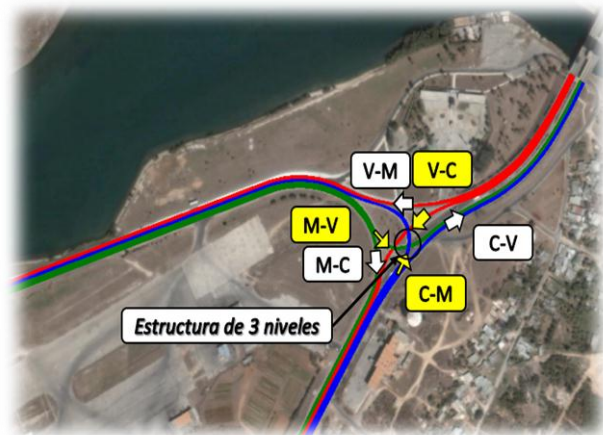


Figura 9. Variante 3. Intercambio semidireccional con una estructura de 3 niveles. Fuente: Elaboración propia.

Análisis de los esquemas de soluciones.

Una vez planteadas las variantes de solución de intersección semidireccional, se procede a su análisis respecto a los siguientes parámetros:

- Características de diseño.
- Capacidad de tomar el tránsito de modo eficaz.
- Características operacionales.
- Adaptabilidad al lugar de emplazamiento.

La capacidad de tomar el tránsito de forma eficaz es un parámetro que se ha evaluado de forma global, debido a que las tres variantes corresponden al mismo tipo de intercambio, en este caso semidireccional, por cuanto las disposiciones de diseño a cumplimentar coinciden, y la posibilidad de las tres soluciones analizadas de solventar el tráfico circulante de forma segura, es -a la escala en que se observa el proyecto en esta etapa- teóricamente igual.

Intercambio semidireccional con una estructura de 2 niveles.



- Características de diseño.

La presente solución presenta curvas suaves en los ramales destinados a las maniobras de giro de izquierda, en coordinación con pendientes suaves que permiten al conductor interactuar con los elementos geométricos del diseño de forma armoniosa y segura, aprovechando la infraestructura existente en cuanto a trazado y disposición. El puente basculante es aprovechado como estructura separadora de niveles, incorporándose además un puente en curva para elevar el giro de izquierda desde Matanzas hacia Varadero, sobre las corrientes vehiculares entre Varadero y Cárdenas en ambos sentidos. La disposición de los ramales a nivel posee la configuración necesaria para la ubicación de los apoyos de las estructuras de separación de niveles. Al optar por estructuras de hormigón para separar los niveles, el drenaje superficial en el intercambio y sus zonas aledañas es fácil de resolver, por cuanto las modificaciones altimétricas del terreno por concepto de movimiento de tierras son mínimas, a lo que se suman las condiciones hidrogeológicas del enclave. El alumbrado se dispone de forma tal que quede asegurada la visión nocturna de los usuarios, tanto en los ramales elevados, como en los que se encuentran a nivel, para lo cual se pueden emplear postes metálicos o de hormigón. Es conveniente, además, ubicar luminarias tanto en la parte inferior como en las defensas de los ramales elevados, brindando mayor seguridad al tráfico peatonal que circula en la noche, y logrando mejor iluminación en los tramos de vía a nivel que se encuentren próximas a dichas estructuras. Tanto para el interior del intercambio, como para las zonas aledañas, se propone un tratamiento paisajístico que logre integrarlo con la naturaleza circundante. De esta forma, se hace necesario la replantación del arbolado característico de la zona, así como del que se elimine por ubicarse en zonas comprometidas en la ejecución. El ramal de giro de Cárdenas hacia Matanzas, por su ubicación en las proximidades de la margen sur del canal de Paso Malo, necesita un tratamiento especial debido al mangle existente, que pudiera quedar extinto durante la ejecución.

- Características operacionales.

Los giros de derecha se realizan de forma directa, y los carriles entre Varadero y Cárdenas en ambos sentidos se mantienen a nivel, mientras el giro de izquierda desde Matanzas hacia Varadero se eleva sobre los ramales Varadero-Cárdenas, Cárdenas Varadero y sobre la propia derecha libre desde Matanzas hacia Cárdenas. El giro de izquierda desde Cárdenas hacia Matanzas se efectúa por debajo del puente basculante, sobre una vía existente cuyos parámetros geométricos deben modificarse para adecuarla a las condiciones del tráfico a circular una vez puesta en explotación.

- Adaptabilidad al lugar de emplazamiento.



Al aprovecharse el puente basculante como estructura de separación de niveles para el paso inferior de la corriente vehicular Cárdenas-Matanzas, se explota la posibilidad de segregar uno de los giros de izquierda del nudo, por cuanto los puntos de conflicto disminuyen notablemente en cantidad y peligrosidad, al quedar entrecruzadas solo dos corrientes correspondientes a los giros de izquierda restantes (Matanzas-Varadero y Varadero-Cárdenas) Geométricamente hablando, primero de estos dos ramales invade una porción considerable de la cabeza de la pista del aeropuerto, por cuanto su ejecución inutilizaría una instalación que presenta grandes potencialidades a los efectos del desarrollo turístico de Varadero.

Intercambio semidireccional con dos estructuras de 2 niveles.

- Características de diseño.

La solución que propone la incorporación de dos estructuras de 2 niveles, ocupa un área mayor a la de la intersección a nivel actual, debido a que aumenta el radio del ramal de giro de derecha desde Matanzas hacia Cárdenas, desviando su trayectoria sobre la formación rocosa ubicada a la cabeza de la pista del aeropuerto, con el objetivo de alejar la entrada al intercambio de los ramales de giro de izquierda desde Matanzas hacia Varadero, y desde Cárdenas hacia Matanzas, puesto que de confluir altimétricamente provocarían la intersección al mismo nivel entre los ramales elevados, generándose puntos de conflicto cuya solución acarrearía la imposición de señales de ceda el paso o dispositivos de control, atentando contra el principio funcional de dichos ramales: el flujo ininterrumpido. Dada la trayectoria a recorrer por los ramales, las pendientes se suavizan y las curvas aumentan sus radios para los casos anteriormente mencionados, posibilitando la sustentación de la velocidad durante el paso sobre los mismos. Al alterarse la configuración geométrica de las vías existentes, se asegura el posicionamiento de los aparatos de apoyo de las estructuras de separación. El drenaje superficial en el área se asegura al imponer muy pocas modificaciones al terreno natural, y optar por estructuras en lugar de movimiento de tierra para separar los niveles. El alumbrado se dispone de forma tal que se asegure la visión nocturna de los usuarios, tanto en los ramales elevados, como en los que se encuentran a nivel, para lo cual se pueden emplear postes metálicos o de hormigón. Es conveniente, además, ubicar luminarias tanto en la parte inferior como en las defensas de los ramales elevados, brindando mayor seguridad al tráfico peatonal que circula en la noche, y logrando mejor iluminación en los tramos de vía a nivel que se encuentren próximas a dichas estructuras. La retroiluminación de estructuras, árboles y elementos ornamentales, brindará al transeúnte una imagen nocturna agradable de la entrada de Varadero. Tanto para el interior del intercambio, como para las zonas aledañas, se propone un tratamiento paisajístico que logre integrarlo con la naturaleza circundante, a la vez que propone



elementos ornamentales artificiales como esculturas, rocas y fuentes. De esta forma, se hace necesaria la replantación del arbolado característico de la zona y de la flora en general.

- Características operacionales.

Los giros de derecha se realizan de forma directa, y los carriles entre Varadero y Cárdenas en ambos sentidos se mantienen a nivel, mientras el giro de izquierda desde Matanzas hacia Varadero se eleva sobre el ramal Varadero-Cárdenas, y el giro de izquierda desde Cárdenas hacia Matanzas se eleva sobre los ramales Cárdenas-Varadero, Varadero-Cárdenas, y Matanzas-Varadero. Aunque sería conveniente segregar el tráfico peatonal del intercambio vial, es inevitable tal flujo por la región de emplazamiento del mismo, debido a razones como la presencia de viviendas en sus cercanías, y el fuerte movimiento de peatones hacia el polo ya sea porque residen fuera y trabajan dentro, o por motivos recreacionales. Por esta razón, es necesario estudiar los puntos en que confluyen las trayectorias actuales de peatones, teniendo en cuenta además la posibilidad de una rehabilitación futura del aeropuerto de Varadero y el Anfiteatro, lo que compromete un grupo de áreas que actualmente son transitables y en ese momento no lo serán. En dichos puntos se situarían los puntos de entrada y salida a los pasos peatonales, que se pueden ejecutar elevados sobre estructuras o soterrados en túneles.

- Adaptabilidad al lugar de emplazamiento.

Esta solución logra integrarse al entorno del nudo y el trazado actual de las vías de acceso, empleando pocas áreas aledañas al emplazamiento y respetando las edificaciones existentes.

Intercambio semidireccional con una estructura de 3 niveles.

- Características de diseño.

En este caso la corriente vehicular desde Varadero hacia Cárdenas, desvía su curso actual hacia el centro de la isleta central, previendo la imposición sobre su ubicación actual de los cimientos y la estructura de 3 niveles propiamente dicha. El drenaje superficial en el área se mantiene como en la solución actual, al alterar en muy poca medida la disposición de los suelos. El alumbrado se dispone de forma tal que se asegure la visión nocturna de los usuarios, tanto en los ramales elevados, como en los que se encuentran a nivel, para lo cual se pueden emplear postes metálicos o de hormigón. Dada la altura tomada por la estructura de 3 niveles, se hace útil y necesaria la incorporación de proyectores desde el extremo superior del mismo, asegurando un cono de iluminación de gran diámetro y alcance. Tanto para el interior del intercambio, las zonas aledañas, y los alrededores de la estructura en sí, se propone un tratamiento paisajístico que logre integrarlo con la naturaleza circundante,



independientemente de su altura y la superficie que ocupa, mediante la replantación del arbolado característico de la zona y de la flora en general.

- Características operacionales.

Los giros de derecha se realizan de forma directa, y los carriles entre Varadero y Cárdenas en ambos sentidos se mantienen a nivel, mientras el giro de izquierda desde Matanzas hacia Varadero se eleva sobre los ramales Cárdenas-Matanzas y Varadero-Cárdenas, encontrándose a su vez el primero elevado sobre el segundo, formando una estructura de separación de 3 niveles. Esta solución logra un diseño compacto al aprovechar el espacio vertical en gran medida, superponiendo tres flujos vehiculares que confluyen en un área común en proyección.

- Adaptabilidad al lugar de emplazamiento.

El esquema de intercambio con una estructura de 3 niveles separados, corresponde a una variante altamente compacta, que aprovecha al máximo el terreno y se adecúa en la mayor medida posible al trazado actual del nudo. Si bien es cierto que logra la mayor compacidad posible, es considerable el nodo de conflictos que crea la ejecución de la estructura de tres niveles, así como el gran movimiento de tierra que genera su cimentación y el área que ocupa.

Elección del esquema de solución más eficaz.

Una vez evaluadas las características de las variantes a analizar, basado en las fortalezas y debilidades de cada esquema, y en la experiencia internacional de nudos de configuración similar al estudiado, el autor elige el intercambio semidireccional con dos estructuras de 2 niveles como solución más eficaz en términos de funcionalidad, por cuanto el confort y seguridad brindados a los usuarios, así como su adecuación al espacio disponible y al trazado original, pudieran, entre otros elementos, facilitar su ejecución. La solución elegida corresponde al modelo de ramales semidireccionales independientes, en el cual brinda grandes posibilidades de maniobrabilidad a todas las corrientes vehiculares, al evitar el entrecruzamiento a nivel de las mismas, asegurando así el flujo ininterrumpido.

Diseño de los ramales direccionales.

Una vez identificados los valores críticos resultantes de los estudios de tráfico, se procede a reconocer los rangos admisibles para los parámetros del diseño de los elementos componentes del intercambio vial, así como su concatenación tanto planimétrica como altimétricamente, sentando las bases para posteriores etapas del proyecto.



Las condiciones de circulación en un ramal no dependen solamente de él mismo. El tráfico que use el ramal procederá de un tronco y accederá a otro, por lo que en su trazado se deberán tener en cuenta las condiciones de circulación de estos troncos. (Nobell, 2002) Para el trazado de los ramales se deben tener en cuenta algunas variables, a partir de las cuales se determinan las características del trazado del ramal y sus conexiones:

- Tráfico previsto en el futuro para los troncos y ramales.
- Ámbito y entorno, referido a si el intercambio será urbano o rural.
- Configuración del lugar, según las posibilidades de empleo de superficie.
- Clasificación técnica, número de carriles y velocidad de diseño de las carreteras enlazadas.
- Tipología de circulación del ramal, en este caso todos los ramales son de flujo ininterrumpido.
- Tipología morfológica del ramal, clasificándose en semidirecto.

Velocidad de diseño.

La determinación de la velocidad de diseño de los ramales, depende no solo del tráfico que circula por las carreteras enlazadas, sino también de la disponibilidad de espacio para su incorporación al trazado del intercambio, la cual aumenta proporcionalmente al ángulo de giro. Según las Recomendaciones para el Proyecto de Enlaces del Ministerio de Obras Públicas de España, la velocidad de diseño en ramales semidirectos de giro de izquierda es de 50 km/h, mientras que en Polonia las normativas vigentes plantean la velocidad de diseño en los ramales semidirectos para giro de derecha entre 60-80 km/h, y para giro de izquierda de 50-70 km/h. Para el caso de estudio, la velocidad de diseño seleccionada es la de la normativa española.

Vehículo de diseño.

Para la elección del vehículo de diseño es necesario realizar un análisis de la composición de las corrientes vehiculares, en especial para el caso de los ramales elevados. Si bien es cierto que la mayor porción en todas las corrientes vehiculares es la de los vehículos ligeros, no se puede dejar pasar por alto la presencia de vehículos pesados en valores porcentuales que llegan a superar el 20%, cifra patrón de las normativas internacionales a los efectos de la influencia de los vehículos pesados en la corriente vehicular en general.

En el caso de los ramales elevados, la probabilidad de que al menos 1 vehículo pesado circule por el mismo, es condición suficiente para adecuar los parámetros geométricos a un modelo de automóvil que, si bien no puede ser el motivo de un sobredimensionamiento innecesario, tampoco debe provocar el colapso de la infraestructura por no haberse tenido en cuenta tanto para las cargas como para las condiciones de circulación. Por lo tanto,



independientemente de que la composición del tráfico apunte hacia el auto ligero como vehículo de diseño, el autor considerará a los efectos del diseño, el vehículo A-BUS para el ramal elevado Matanzas-Varadero, debido al fuerte movimiento tanto de trabajadores como de turistas que arriban al polo en este tipo de vehículo, mientras el WB-15 será el considerado en el ramal Cárdenas-Varadero, debido al alto número de rastras y pipas de combustible que circulan en esa trayectoria, debido presumiblemente al emplazamiento de la Empresa de Perforación y Extracción de Petróleo del Centro (EPEP-Centro), ubicada en las inmediaciones entre Santa Marta y Cárdenas.

Radios en planta.

Las normas francesas vigentes a los efectos del diseño de intercambios viales, establecen los radios mínimos solo para la primera curva encontrada en ramales de un carril con valor deseable de 120m y absoluto de 100 m, y fijan un valor de radio máximo de 175m.

Peraltes.

Según la normativa española vigente, el peralte máximo para autopistas, autovías, vías rápidas y convencionales con velocidad de diseño superior a los 100 km/h, es de 8%, reduciéndose hasta 7% en carreteras convencionales con velocidad de diseño inferior a 100 km/h.

Pendiente de los ramales.

Según (Ministerio de Obras Públicas, 1968), las pendientes máximas para ramales directos entre dos carreteras importantes -como es el caso de la Vía Blanca y la Vía Rápida, que unen a Varadero con La Habana y Cárdenas, respectivamente-, son de 4%. Sin embargo, en Francia y Reino Unido, las normativas establecen un valor de pendiente longitudinal máxima en accesos de autopistas de 6%, sin fijar valores límites para otros tipos de vías. Para el caso de estudio, las pendientes fijadas corresponden a las de la norma española, por cuanto es la más adecuada al tráfico circulante, además de que los accesos brindan la posibilidad por su extensión de adoptar menores valores de pendiente.

Gálibo vertical.

El área de la sección transversal de la carretera que garantiza que los vehículos circulen de forma segura y libres de obstáculos, aún al efectuar sus fluctuaciones dinámicas, se denomina gálibo. La NC 853:2012. "Carreteras rurales. Trazado directo", al igual que las normativas estadounidenses, recomiendan un gálibo vertical mínimo de 5,00 m para vías de categoría I y II, y de 4,50 m para vías de categoría III y IV. En el caso de estudio, dados los altos valores para la intensidad del tráfico, se adoptará un gálibo vertical de 5,00 metros para el paso superior de los ramales elevados sobre las vías a nivel.



Sección transversal.

- Número de carriles.

Los ramales generalmente disponen de un solo carril, previsto de las condiciones que permitan el adelantamiento a un vehículo ocasionalmente detenido. A los efectos de la norma británica, existen dos motivos para justificar la proyección de ramales de 2 carriles: la longitud, cuando esta sobrepase los 1000 m de longitud en terrenos llanos, o los 500 m en ramales con pendiente media superior al 3%; y el tráfico, cuando el Volumen Horario de Máxima Demanda (VHMD) sobrepasa los 1350 veh/h en autopistas, y los 1200 veh/h en carreteras. Los ramales de un carril con un 20% de vehículos pesados pueden llegar a solventar un tráfico de hasta 1500 veh/hora, siempre que no existan pendientes muy pronunciadas, aunque, como ya se ha mencionado, para intensidades próximas a este valor es aconsejable proveer al ramal de dos carriles, incluso cuando la situación crítica se produzca en los accesos y no en los ramales propiamente dichos.

- Ancho de carriles y arcenes.

Como ya se ha mencionado, es una consideración importante a tener en cuenta en el diseño de ramales, el hecho de que exista la posibilidad de adelantamiento ocasional en los mismos. Tomando como supuesto a tales efectos, que un vehículo pesado pueda adelantar a otro al menos a baja velocidad, se necesitarían 6,00 m de ancho de calzada, sin haber considerado aun el aumento de esta dimensión debido al sobreancho con el que se deben dotar a los ramales dadas las restricciones en sus radios.

La normativa española, vigente desde el año 2000, exige un ancho pavimentado mínimo de 6,50 m para ramales de un carril, desglosado en 4,00 m de ancho de calzada (incluido el sobreancho mínimo de 0,50 m), arcén derecho mínimo de 1,50 m, y arcén izquierdo de 1,00 m, a lo que se le suma para el caso de estudio el ancho de los pretiles con función protectora a ambos lados del ramal justo donde termina la zona pavimentada, puesto que en dichos ramales no existirán aceras para el flujo peatonal, el cual circulará por pasarelas a nivel.

Pendiente transversal. Superelevación.

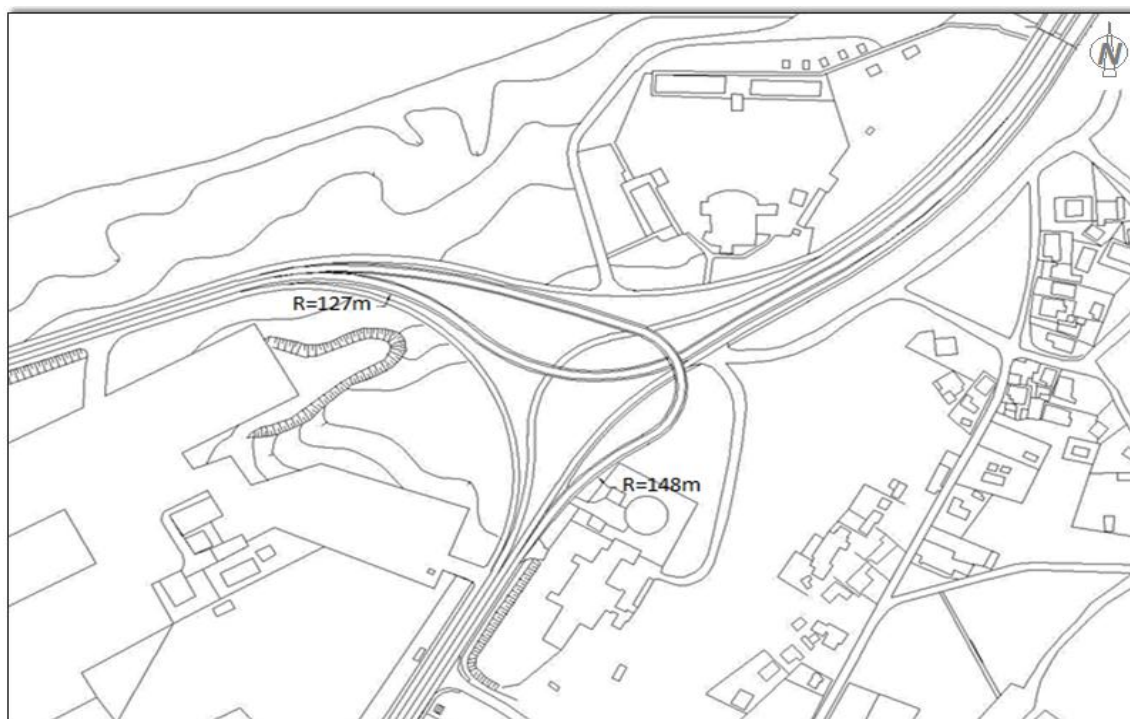
Según (AASHTO, 2001), la pendiente transversal de rampas tangentes a la vía de la que diverge se diseña en una sola dirección, con valores entre 1,5% y 2%, aplicables solamente a pavimentos de alta calidad. De esta forma, el desarrollo de la superelevación es una extensión del tronco del que parte el ramal, transitando según la inflexión, el radio y la velocidad de operación de cada ramal en específico. El ramal de giro de izquierda Matanzas-Varadero, corresponde al caso D: Sección en curva, salida paralela, en el cual la



corriente vehicular que realiza la maniobra correspondiente, diverge del flujo a través de un carril dispuesto en el extremo exterior de la franja unidireccional desde Matanzas.

Por otra parte, el ramal de giro de izquierda elevado Cárdenas-Matanzas, corresponde al caso B: Sección en tangente, salida con carril paralelo. En este caso sería conveniente introducir una adecuación al modelo brindado por la AASHTO, por cuanto se segregarían los flujos provenientes de Cárdenas según su destino en una longitud próxima a la entrada del ramal, disponiéndose en el carril del extremo exterior la corriente Cárdenas-Matanzas, y en el carril interior la corriente Cárdenas-Varadero, la cual es una derecha libre a nivel. El primer caso supliría al carril de divergencia tal y como se conoce, pues no tendría su inicio en las proximidades del intercambio, sino desde el tronco de la vía principal, en este caso Cárdenas-Varadero en ambos sentidos.

Esquema General de intersección a desnivel semidireccional en el nudo de entrada a Varadero.



Del análisis efectuado se puede arribar a las siguientes conclusiones:

Las soluciones de diseño para la entrada a Varadero deben adecuarse a la intensidad y composición del tráfico que circula por sus accesos, teniendo en cuenta su crecimiento progresivo e impacto sobre el funcionamiento del nudo en cuanto a oferta y demanda vial.



El análisis de las diferentes variantes de diseño de intersección a desnivel con ramales semidireccionales se basa fundamentalmente en las características de diseño y operación, la capacidad de alojar el tránsito de modo eficaz, y la adaptabilidad al lugar de emplazamiento.

El Esquema General de la Solución Conceptual de intersección a desnivel semidireccional con dos estructuras de 2 niveles en el nudo de entrada a Varadero, se considera la solución más eficaz debido al confort y seguridad en la circulación brindados, y su adecuación al espacio disponible y al trazado original.

Bibliografía

AASHTO. (2001). A policy on geometric design of highways and streets (4th ed.). Washington, D.C.: American Association of State Highway and Transportation Officials.

Brockenbrough, R. L., & Boedecker, K. J. (2004). Highway Engineering Handbook. Minneapolis, Minnesota: Editorial McGraw-Hill.

Cal y Mayor Reyes Spíndola, R. y James Cárdenas Grisales. (1994). Ingeniería de Tránsito. Fundamentos y Aplicaciones (7ma ed.). México, D.F.: Editorial Alfaomega.

de las Cuevas Toraya, J. (2001). 500 años de Construcciones en Cuba (1ra ed.). Madrid: DV Chavín, Servicios Gráficos y Editoriales, SL.

Mendoza Sánchez, J. F., Quesada Bermúdez, F. M., & Trejo Trejo, J. A. (17 de enero de 2016). publicaciones@imt.mx. Obtenido de <http://www.imt.mx>

Ministerio de Fomento. (2012). Guía de nudos viarios (1ra ed.). Madrid: Ministerio de Fomento.

Ministerio dos Transportes. (2005) Manual de Projeto de Interseções. (2ª Edição). Río de Janeiro: Instituto de Resquisas Rodoviaras.

Mora Castañeda, D. L. (2010). Estado del arte en el análisis del comportamiento de las intersecciones viales tipo diamante. Bucaramanga, Colombia: Editora Universidad Industrial de Santander.

Nobell, P. (2002). Nudos de carreteras. Normativas y tendencias actuales. Barcelona, España: Editorial Hermes Gráficos.

Oficina Nacional de Normalización. (2012). NC 853. Categorización técnica y características geométricas del trazado directo. La Habana: NC.



Oficina Nacional de Normalización. (1984). NC 53-118. Vías con flujo ininterrumpido. Métodos de cálculo de las capacidades, volúmenes y niveles de servicio. La Habana: NC.

Roess, R. P., Prassas, E. S., & McShane, W. R. (2004). Traffic Engineering (3ra ed.). New Jersey: Editorial Pearson Prentice Hall.

Transportation Research Board. (2000). Highway Capacity Manual. Washington, DC: National Academy of Sciences.

