

# CICLOS DE CONDUCCIÓN EN LA PERSPECTIVA DE HOMOLOGACIÓN DEL VEHÍCULO EN PENDIENTE, CIUDAD DE LA PAZ - BOLIVIA

DRIVING CYCLES IN THE HOMOLOGATION PERSPECTIVE OF THE VEHICLE IN SLOPE, CIUDAD DE LA PAZ -BOLIVIA

\* Edgar Quiroga Vilca

## RESUMEN

La investigación de campo efectuada buscó identificar un ciclo de conducción en ascenso con un vehículo de prueba RAV 4, que funciona a gasolina en condiciones reales de ruta, evaluando la emisión de gases al transitar por una ruta de ascenso de la ciudad de La Paz, siguiendo el protocolo del Centro de Revisión Técnica Vehicular (CRTV) que aplica la norma IBNORCA NB 62002, en condición acelerado y en ralentí. Prosiguiendo con el ciclo de conducción en la ruta: centro ciudad de La Paz conexión con la ceja de El Alto, según el actual Procedimiento Mundial Armonizado para Ensayos de Vehículos Ligeros (WLTP). Prueba que puede aplicarse a futuras homologaciones de vehículos eléctricos en su capacidad de ascenso por vías con pendiente pronunciada, lo mismo que para el vehículo de ensayo.

Así, en sustitución del dinamómetro de rodillo, se buscaron rutas de ascenso en la ciudad de La Paz (altura entre 3312 a 4102 m.s.n.m.) identificando dos vías de homologación: la primera en el distrito Panpahasi (Villa Salomé) con 24,9 por ciento de pendiente, y la segunda (iglesia San Antonio de Padua) distrito Villa San Antonio con 31,5 por ciento de pendiente como puntos máximos de ascenso positivo; rutas adecuadas para homologar el desempeño de vehículos híbridos y eléctricos en su tránsito por vías de la ciudad de La Paz con pendiente pronunciada.

**PALABRAS CLAVE:** Vehículos híbridos y eléctricos, altura ciudad de La Paz-Bolivia, porcentaje de pendiente vías de circulación vehicular, homologación. IBNORCA NB 62002, Procedimiento Mundial Armonizado Ensayos de Vehículos Ligeros (WLTP).

## ABSTRACT

The field investigation carried out sought to identify an uphill driving cycle with a RAV 4 test vehicle, which runs on gasoline in real road conditions, evaluating the emission of gases when traveling on an ascent route in the city of La Paz, following the protocol of the Centro de Revisión Técnica Vehicular (CRTV) that applies the IBNORCA NB 62002 standard, in accelerated and idling conditions. Continuing with the driving cycle on the route: Centro ciudad de La Paz - ceja de El Alto, according to the current World Harmonized Procedure for Light Vehicle Testing (WLTP). Test that can be applied to future approvals of electric vehicles in their ability to climb roads with steep slopes, the same as for the test vehicle.

Thus, instead of the roller dynamometer, ascent routes were sought in the ciudad de La Paz (height between 3312 and 4102 m.s.n.m.) Identifying two homologation routes: the first in the Panpahasi district (Villa Salomé) with 24.9 percent of slope, and the second (San Antonio de Padua church) Villa San Antonio district with 31.5 percent slope as maximum points of positive ascent; adequate routes to homologate the performance of hybrid and electric vehicles in their transit through roads of la ciudad de La Paz with pronounced slope.

**KEYWORDS:** Hybrid and electric vehicles, height of the city of La Paz-Bolivia, slope percentage of vehicular traffic routes, homologation. IBNORCA NB 62002, World Harmonized Light Vehicle Testing Procedure (WLTP).

## RESUMO

A investigação de campo realizada buscou identificar um ciclo de subida com um veículo de teste RAV 4, que funciona a gasolina em condições reais de estrada, avaliando a emissão de gases ao trafegar em uma rota de com declive acentuados na ciudad de La Paz, seguindo o protocolo de o Centro de Revisão Técnica Veicular (CRTV) que aplica a norma IBNORCA NB 62002, em condições aceleradas e em marcha lenta. Continuando com o ciclo de condução na rota: ligação do centro ciudad de La Paz com la ceja de El Alto, de acordo com o atual Procedimento Mundial Harmonizado para Testes de Veículos Ligeiros (WLTP). Teste que pode ser aplicado a homologações de veículos elétricos na sua capacidade de subir rotas com declives acentuados, o mesmo que para o veículo de teste.

Assim, em vez do dinamômetro de rolos, foram buscadas rotas de subida na ciudad de La Paz (cota entre 3312 e 4102 m.s.n.m.) Identificando duas rotas de homologação: a primeira no distrito de Panpahasi (Villa Salomé) com 24,9 por cento de inclinação, e a segunda (Igreja de San Antonio de Pádua) distrito Villa San Antonio com declive de 31,5 por cento como pontos máximos de subida positiva; rotas adequadas para homologar o desempenho de veículos híbridos e elétricos em seu trânsito pelas rotas da ciudad de La Paz com declives acentuados.

**PALAVRAS-CHAVE:** Veículos híbridos e elétricos, altitude da cidade de La Paz-Bolivia, percentual de declive das vias de tráfego de veículos, homologação. IBNORCA NB 62002, Procedimento Mundial Harmonizado de Testes para Veículos Leves (WLTP).

**History of the article:** Received 29/06/2023. Style review 10/07/2023. Accepted 11/07/2023.

## INTRODUCCIÓN

Un requisito medio ambiental y de seguridad usuaria para la circulación de vehículos híbridos<sup>1</sup> y eléctricos en la ciudad de La Paz (altura de 3312 a 4102 m.s.n.m.) y su conexión hacia la ciudad de El Alto; está en comparar el desempeño del motor de éstos con un motor de un vehículo común de combustión interna que se transita por un terreno de ascenso positivo (en pendiente).

En consecuencia, el objetivo de la presente investigación de campo, se orienta hacia la identificación vías de homologación para ciclos de conducción en pendiente, que reemplacen al dinamómetro de rodillo, en condiciones topográficas reales de circulación, considerando las normas de ciclos de conducción vigentes.

Para este propósito, se efectuaron pruebas dinámicas de ciclos de conducción, utilizando un vehículo (vagoneta) provisto de un motor de combustión interna como referencia de comparación, en dos rutas elegidas por el grado de pendiente que presentan, recreando escenarios topográficos de circulación de vehículos en evaluación.

<sup>1</sup> Con capacidad de funcionamiento del motor por alimentación y combustión de combustibles fósiles y energía eléctrica.

## DESARROLLO

El Municipio de La Paz está dividido en nueve macro distritos y 23 distritos, entre urbanos y rurales, donde se tienen vías de acceso vehicular con diferentes grados de inclinación (pendiente), en la tabla 1 se resumen la distribución porcentual de vías ciudad de La Paz y tipo de inclinación referenciado en el porcentaje de pendiente.

**Tabla 1**  
**Distribución porcentual de vías y tipo de inclinación referenciado en el porcentaje de pendiente**

| Distribución porcentual vías C.L.P. | Pendiente (%) |
|-------------------------------------|---------------|
| 21,57                               | Menor a 3     |
| 67,29                               | Menor a 16    |
| 6,88                                | De 16 a 19    |
| 4,26                                | De 19 a 45 *  |

\* De circulación vehicular prohibida por sus condiciones geométricas y de seguridad (Arteaga et al., 2018. pág.28). Plan de Movilidad Urbana Sostenible de la Paz

Fuente: Elaboración propia sobre información de [1]

### a) Identificación del problema

La representación topográfica de la ciudad de La Paz en cada uno de sus distritos presenta diferentes grados de

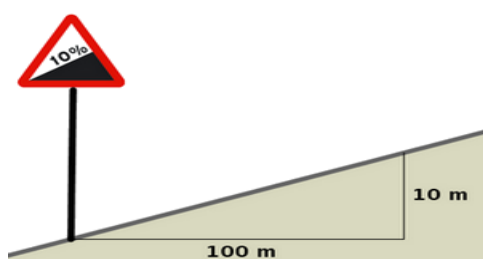
pendiente en sus vías alternas para la circulación vehicular, lugares donde los vehículos eléctricos no responden adecuadamente y necesitan certificar un buen desempeño en estas condiciones, lo mismo que los vehículos nuevos provistos con motores de combustión interna. Utilizando para este propósito el **dinamómetro de chasis**, instrumento de prueba de vehículos, colocado sobre rodillos las cuales simulan condiciones reales de operación en las calles, incluyendo pendientes, rozamiento con el pavimento y peso del automotor. Todo ello se realiza en laboratorios dinámicos utilizando sensores y analizadores de gases de escape, donde las pruebas ya son estandarizadas, siguiendo protocolos de evaluación garantizando la repetitividad de los resultados.

Por lo tanto, el **dinamómetro de chasis** es utilizado para certificar que los vehículos sometidos a estas pruebas cumplan con las normativas y rendimientos establecidos por los fabricantes.

Al respecto se tiene un dinamómetro de chasis instalado en el Campus Universitario de Cota Cota Universidad Mayor de San Andrés certificado para la altura de 3445 m.s.n.m. de la ciudad de La Paz.

Evaluación puntual que se busca homologar con una evaluación de rango que cubra intervalos de altura entre 3312 y 4102 m.s.n.m. con conexión a la ciudad de El Alto. Al no existir equipos para estas condiciones topográficas, los ingenieros de Arizona de la marca americana Ford F-Series Duty desarrollaron un dinamómetro que es capaz de simular pendientes pronunciadas, el instrumento configurado por un trineo limitador de freno que puede reproducir el efecto de la gravedad, como si uno estuviera conduciendo por una vía con 30 grados de inclinación. [2]

Esta relación del desnivel de vía, comúnmente considerada en ascenso o descenso de vehículos, se presenta en forma de señalización que indica en porcentaje (%), la inclinación de la vía respecto a la horizontal. Ver figura 1.

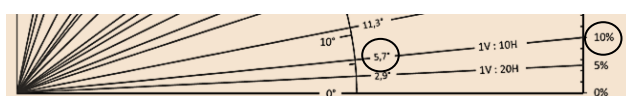


$$\begin{aligned} \text{Si } \operatorname{tg} \alpha &= (10/100), \\ \text{Porcentaje de pendiente (\%)} &= (10/100)100 = 10 \\ \text{En ángulo } \alpha &= \arctg(10/100) = 5,71^\circ \end{aligned}$$

Fuente: [3],[4]

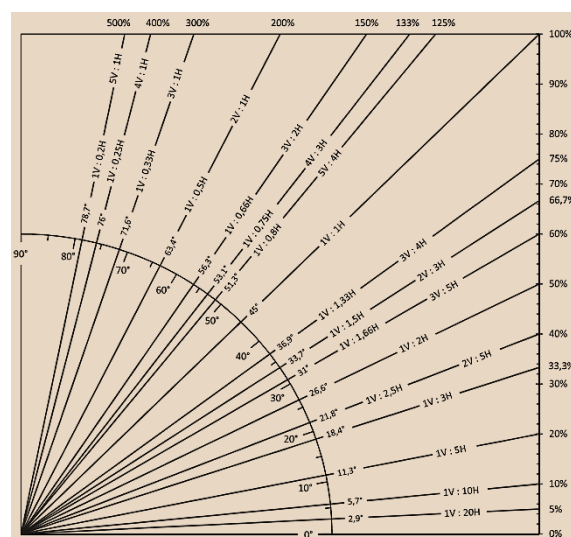
**Figura 1:** Pendiente de una carretera en porcentajes de ascenso

También se considera la equivalencia en carretera, refiriéndose a la nomenclatura de taludes, la figura 2, muestra la equivalencia entre los porcentajes de ascenso y el ángulo de inclinación, para la figura 1.



**Figura 2:** Pendiente en la nomenclatura de taludes para carreteras en grados y porcentajes.

La figura 3 representa en general la relación ángulo-porcentaje de pendiente en la nomenclatura de taludes<sup>2</sup>.



**Figura 3:** Pendiente en la nomenclatura de taludes para carreteras en grados y porcentajes. Fuente: [5]

## b) Investigación de campo

### b.1) Inspección vehículo de prueba

El Centro de Revisión Técnica Vehicular (CRTV) dependiente de la Secretaría Municipal de Gestión Ambiental y Energías Renovables como parte de la Alcaldía de la ciudad de La Paz, ubicado en la Av. Mario Mercado en Bajo Llojeta, cuenta con equipos mecánicos para la inspección técnica de vehículos livianos y pesados, donde se evalúan los parámetros mínimos requeridos de acuerdo a NB 62002 para la circulación de los vehículos en el Municipio de La Paz. La fotografía 1, registra el momento de la inspección CRTV efectuada al vehículo de prueba.



**Fotografía 1:** inspección CRTV, emisión de gases contaminantes vehículo de prueba. El procedimiento se inicia instalando los cables del sensor de temperatura en la vaina tubular del aceite y el sensor magnético de rpm en el motor. Analizador gases de escape MAHA 6.2.

Crédito: E. Quiroga V. (2023)

En la tabla 1, se reporta el resultado de la inspección en relación con la emisión de gases contaminantes, siguiendo el protocolo de evaluación en función a la norma de IBNORCA NB 62002, tanto en ralentí como

<sup>2</sup> En el mundo existen vías con pendientes muy elevadas, ejemplos: Nueva Zelanda tiene una vía con un 35 por ciento de desnivel ( $\approx 19^\circ$ ). Otra vía con una pendiente del 37,45 por ciento de pendiente ( $\approx 21^\circ$ ) está en la localidad de Harlech (Gwyned, Gales, Reino Unido de Gran Bretaña). (Camos, 2019). <https://www.motorpasion.com/otros/calle-mayor-pendiente-mundo-esta-gales-ha-ganado-record-guinness-coches-pueden-ella>.

acelerado de forma estacionaria en la emisión de gases de escape originados por el vehículo de prueba.

**Tabla 1**  
**Resultados vehículo de prueba (p) norma NB 62002**

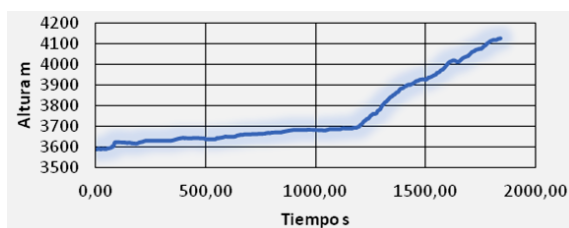
| Test                                                                                                                                                                                                                                                                               | Unidad            | VNm* | VNM <sup>1</sup> | VA <sup>2</sup> | Evaluación |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------|------|------------------|-----------------|------------|
| Temp. trabajo                                                                                                                                                                                                                                                                      | °C                | 60   | 110              | 60              | Aprobado   |
| Acelerado                                                                                                                                                                                                                                                                          |                   |      |                  |                 |            |
| Incremento rpm acelerado                                                                                                                                                                                                                                                           | Min <sup>-1</sup> | 2250 | 2750             | 2430            | Aprobado   |
| RPM                                                                                                                                                                                                                                                                                | % Vol.            |      |                  | 0,05            |            |
| CO                                                                                                                                                                                                                                                                                 | % Vol.            |      | 2,50             | 0,05            | Aprobado   |
| CO <sub>corr</sub>                                                                                                                                                                                                                                                                 | % Vol.            |      |                  | 14,47           |            |
| CO <sub>2</sub>                                                                                                                                                                                                                                                                    | ppm               |      | 450              | 4               |            |
| HC                                                                                                                                                                                                                                                                                 | ppm               |      |                  | 4,0             | Aprobado   |
| HC <sub>corr</sub>                                                                                                                                                                                                                                                                 |                   |      |                  |                 |            |
| NO <sub>x</sub>                                                                                                                                                                                                                                                                    |                   |      |                  |                 |            |
| En Ralentí                                                                                                                                                                                                                                                                         |                   |      |                  |                 |            |
| rpm en ralentí                                                                                                                                                                                                                                                                     | Min <sup>-1</sup> | 400  | 1100             | 780             | Aprobado   |
| RPM                                                                                                                                                                                                                                                                                | % Vol.            |      |                  | 0,03            |            |
| CO                                                                                                                                                                                                                                                                                 | % Vol.            |      | 2,50             | 0,03            | Aprobado   |
| CO <sub>corr</sub>                                                                                                                                                                                                                                                                 | % Vol.            |      |                  | 14,39           |            |
| CO <sub>2</sub>                                                                                                                                                                                                                                                                    | ppm               |      |                  | 5               | Aprobado   |
| HC                                                                                                                                                                                                                                                                                 | ppm               |      | 450              | 5,2             | Aprobado   |
| HC <sub>corr</sub>                                                                                                                                                                                                                                                                 | ppm               |      |                  |                 |            |
| NO <sub>x</sub>                                                                                                                                                                                                                                                                    |                   |      |                  |                 |            |
| Referencias: VNm* Valor nominal mínimo, VNM <sup>1</sup> Valor nominal máximo, VA <sup>2</sup> Valor actual. (p) Evaluación CRTV, inspección emisión gases de escape para el vehículo RAV4. En ralentí y acelerado con niveles por debajo de los estipulados en la norma NB 62002. |                   |      |                  |                 |            |

**Referencias:** VNm\* Valor nominal mínimo, VNM<sup>1</sup> Valor nominal máximo, VA<sup>2</sup> Valor actual. (p) Evaluación CRTV, Inspección emisión gases de escape para el vehículo RAV4. En ralentí y acelerado con niveles por debajo de los estipulados en la norma NB 62002.

Fuente: Elaboración propia reportando resultados inspección CRTV (2023)

## b.2) Procedimiento Mundial Armonizado para Ensayos de Vehículos Ligeros (WLTP), [6] adecuado al trabajo de campo

La actualización de la norma europea NEDC de ciclo de conducción al nuevo ciclo WLTP, cubre diferentes escenarios de conducción, desde el tráfico urbano, en autopista y hasta las carreteras. En estos casos, el procedimiento de control toma en cuenta aceleración y frenado, permitiendo así, obtener una calificación de conducción real y homologable de los vehículos de ensayo. Para el vehículo de prueba transitando por las vías de la ciudad de la Paz en horarios de mayor tráfico (hora pico), El procedimiento WLTP, consideró una ruta de ascenso, con origen en la plaza Isabel la Católica, pasando por la plaza del Estudiante, Av. 16 de julio, Av. Mariscal Sta. Cruz, Casa de la Cultura Franz Tamayo, Av. Ismael Montes y finalización en el punto de peaje de la Autopista. El registro de datos se activó a través del GPS (programa Geo Tracker, con aplicación para Android). En la figura 4, se grafica el perfil de ascenso (variación de altura), y en la figura 5 el ciclo de conducción.



Fuente: Elaboración propia

**Figura 4:** Perfil de ascenso en ruta de 3600 a 4102 m.s.n.m. considerando el ciclo de conducción WLTP, para el vehículo RAV 4.



Fuente: Elaboración propia

**Figura 5:** Ciclo de conducción WLTP en la ciudad de La Paz.

Altura de ascenso de 3600 a 4102 m.s.n.m.

vinculando a la ciudad de EL Alto.

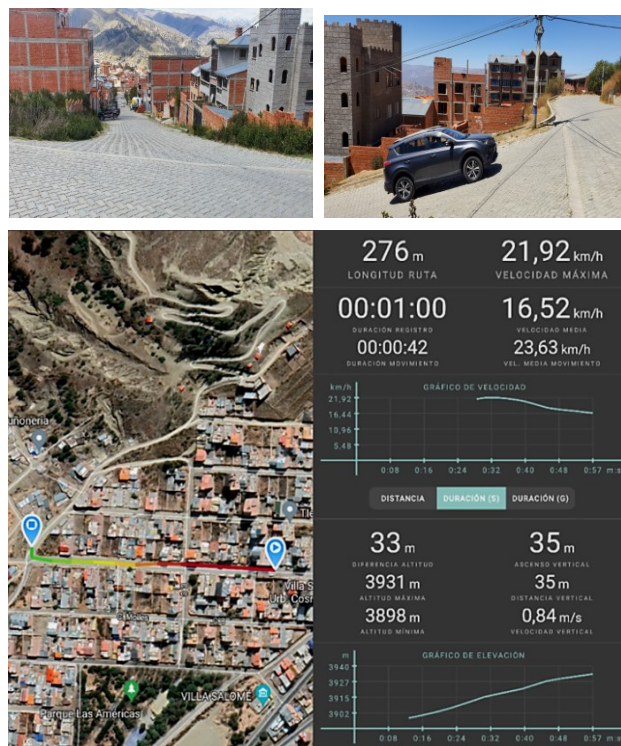
Ruta en hora pico: plaza Isabel la Católica a Ceja El Alto, Vehículo de prueba RAV 4 Toyota motor 2AR FE modelo 2018.

Distancia recorrida 13,72 Km, velocidad máxima 79 km·h<sup>-1</sup> (velocidad media 24,7 km·h<sup>-1</sup>).

## b.3) Procedimientos de homologación en ruta [7]

La determinación del lugar de homologación es muy importante, en sustitución del dinamómetro de rodillo, desarrollando varios ciclos de conducción con el vehículo de prueba tipo vagoneta Toyota RAV 4, con un motor de combustión interna y de transmisión automática, que acreditaran resultados, para que los vehículos híbridos y eléctricos respondan ascendiendo exitosamente en vías con porcentajes de pendiente significativas.

**Primera ruta:** Villa Salomé, calle Olivos, presentando en el punto más alto una pendiente de 24,9 %. Que debe ser ascendida satisfactoriamente con cada uno de los vehículos, ofreciendo dicha vía una amplia seguridad de carril de subida y bajada, con escaso flujo vehicular como se puede observar en la Figura 6.



Fuente: Elaboración propia

**Figura 6:** Primera ruta de evaluación Villa Salomé, calle Olivos

Presentando una distancia de recorrido de 276 m, en la calle los Olivos con ascenso de salida de 35 m, partiendo con el vehículo a una altura de 3898 m y alcanzando una altura máxima de 3931 m, con una velocidad máxima  $21,92 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ , logrando así en su intervalo más alto una máxima pendiente de 24,9 por ciento en referencia a un diseño de geométrico de 25 % puntual de la vía.

**Segunda ruta:** Una vez efectuada satisfactoriamente la prueba de Villa Salomé; por seguridad, se trasladó el trabajo de campo hacia un segundo lugar de certificación y homologación, ubicando en la zona de San Antonio una vía que tiene según la alcaldía 32,48 en porcentaje de pendiente. Ver figura 7.



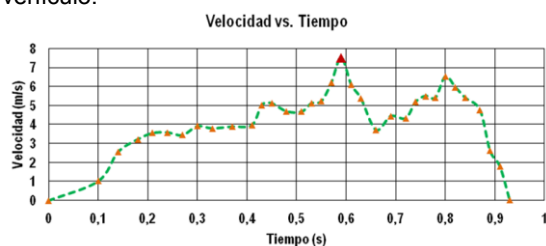
Fuente: Elaboración propia

Figura 7: Segunda ruta de evaluación zona de San Antonio, ciudad de La Paz

En esta segunda ruta el vehículo de prueba recorrió 370 m desde la Iglesia de San Antonio de Padua, ascendiendo de 3707 a 3759 m.s.n.m., con una diferencia de salida de 54 m hasta llegar a la avenida José Mujica, como se puede observar en el recorrido de la ruta.

Alcanzando una velocidad máxima  $19,43 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ , logrando así en su intervalo más alto una máxima pendiente de 31,5 por ciento en referencia a un diseño de geométrico de 32,48 por ciento puntual de la vía.

En la figura 9, se grafica la Velocidad de homologación en ruta San Antonio para vehículos de motor de combustión interna, híbridos y eléctricos, con velocidad máxima de  $7,52 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  en un cambio de primera velocidad del vehículo.



Fuente: Elaboración propia

Figura 9: Velocidad de homologación ruta San Antonio vehículos con motor de combustión interna, híbridos y eléctricos

## CONCLUSIONES

Por las evaluaciones realizadas con el vehículo de prueba y por los datos referenciales de las pendientes de las vías de la ciudad de La Paz, se establece dos lugares de evaluación, de ciclos de conducción de homologación y certificación de vehículos híbridos y eléctricos, para evaluar su desempeño en vías de ascenso con pendiente pronunciada. Encontrándose para este propósito dos lugares referenciales: uno en Villa Salomé-Calle Olivos con un porcentaje de pendiente 24,9 ( $\approx 13,9^\circ$ ) velocidad máxima  $21,92 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ , y el otro en inmediaciones de la iglesia San Antonio de Padua (zona de San Antonio) con un porcentaje de pendiente de 31,5 ( $\approx 17,4^\circ$ ) y una velocidad máxima  $19,43 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ , que no solo considera los punto de urbanismo de pendiente de la vía, sino la variación del paralelismo de la estructura de la cabina, respecto a los ejes propulsión del vehículo, siguiendo el nuevo ciclo de conducción WLTP homologable, en nuestras condiciones topográficas de la ciudad de La Paz.

## Referencias bibliográficas:

- [1] Arteaga, R., Orellana, A., Vargas, P., Huarina, N., & Oporto, M. (2018). Manual de diseño vial La Paz. 25–28. [https://www.lapaz.bo/wpcontent/uploads/2019/07/MANUAL\\_DE\\_DISEÑO\\_VIAL.pdf](https://www.lapaz.bo/wpcontent/uploads/2019/07/MANUAL_DE_DISEÑO_VIAL.pdf), Consulta: 09/06/2023,
- [2] Hernández, L. (2016). Ford Super Duty es evaluado con un dinamómetro que simula pendientes pronunciadas. <http://noticias.espanol.autocosmos.com/2016/05/11/ford-super-duty-es-evaluado-con-un-dinamometro-que-simula-pendientes-pronunciada>, Consulta: 09/06/2023,
- [3] Martínez, F. (2014). La pendiente de una carretera (Issue June, p. 11). [http://recursostic.educacion.es/gauss/web/materiales\\_didacticos/eso/actividades/geometria/trigonometria/pendiente\\_carretera/actividad.html](http://recursostic.educacion.es/gauss/web/materiales_didacticos/eso/actividades/geometria/trigonometria/pendiente_carretera/actividad.html), Consulta: 11/06/2023,
- [4] Alke. (2021). ¿Cómo calculo la pendiente máxima que puede superar un vehículo eléctrico\_ Alke'. <https://www.alke.eu/es/como-calculo-pendiente-subida#null>, Consulta: 11/06/2023,
- [5] Nomenclatura de taludes: Grado, pendiente y porcentaje – Enrique Montalar. (n.d.). <https://enriquemontalar.com/taludes-grado-pendiente-porcentaje/>, Consulta: 14/06/2023,
- [6] Nueva medida para estimar la autonomía y ahorro energético de los Vehículos Eléctricos VE <https://www.frotcom.com>2021/01>, Consulta: 14/06/2023,
- [7] Gobierno Autónomo Municipal de La Paz. (2018). Cartillas Macrodistributales - Macrodistributo Centro (p. 53). <http://sitsservicios.lapaz.bo/cartillas/centro.html>, Consulta: 09/06/2023.

(\*), MSc. Mantenimiento Industrial,  
Licenciado en Mecánica Automotriz,  
Docente investigador carrera Mecánica Automotriz  
Docente carrera de Mecánica Industrial  
Facultad de Tecnología – UMSA.