

## **CALCULO DE POTENCIA ELÉCTRICA PARA UN PROTOTIPO DE AUTO ELÉCTRICO USADO EN RALLYS SOLARES**

### **ELECTRICAL POWER CALCULATION FOR AN ELECTRIC CAR PROTOTYPE USED IN SOLAR RALLYS**

\*Univ. Brayan Daniel Durán Flores

\*Ing. Miguel Ángel Castellón Medinaceli

\*\*Univ. Chumacero Llanos Jhamil Angel

\*\*Univ. Cruz Alfaro Lilian

Universidad San Francisco Xavier De Chuquisaca

dani.mctronic@gmail.com

Recibido noviembre 20, 2020; Aceptado mayo 19, 2020

#### **Resumen**

La investigación dirige su estudio al cálculo del consumo eléctrico teórico de un vehículo eléctrico liviano, operado en tramos carreteros específicos, con uso de herramientas y cálculos realizados como la obtención de datos del programa libre GOOGLE EARTH, con el que se podrá realizar el cálculo de la magnitud de potencia eléctrica necesaria para que el prototipo de auto eléctrico pueda competir en Rallys Solares que circulen en tramos carreteros, como el Grand Prix Solar Cochabamba – Bolivia, además de realizar el cálculo de parámetros mecánicos influyentes en el vehículo.

Al obtener los datos de potencia requeridos en relación a las exigencias orográficas que demanda la movilidad en un prototipo para un rally solar, se

crea un apoyo teórico que respalda la propuesta de motor eléctrico y potencia eléctrica instalada en el banco de baterías, cabe mencionar que la capacidad de almacenamiento está normada por la organización de la competencia.

El objetivo de esta investigación es lograr que vehículos eléctricos desarrollados localmente, lleguen a circular en las ciudades bolivianas, con la seguridad y velocidad suficiente para su desplazamiento. En cumplimiento a lo mencionado, se determinó que, para obtener la suficiente autonomía energética en tramos de larga distancia, el vehículo tiene que variar la velocidad en función a las exigencias orográficas de la carretera; al variar la velocidad, también se protegerá de sobreesfuerzo y posterior falla de los

componentes electrónicos (controladores), y eléctricos (motor eléctrico), del prototipo de auto solar.

**PALABRAS CLAVE:** Almacenamiento, eficiencia energética, orografía, desplazamiento.

### ABSTRACT

The research is aimed to calculate the theoretical electrical consumption of a light electric vehicle by operating in specific road sections and using tools and calculations such as: data collection from the free GOOGLE EARTH program, the magnitude of electrical power needed for the electric car prototype to compete in Solar Rallies operating in road sections, such as the Grand Prix Solar Cochabamba - Bolivia, and influencing mechanical parameters on the vehicle.

When obtaining the required power data in relation to the orographic requirements demanded by mobility in a prototype for a solar rally, a theoretical support is created to back up the electric motor proposal and the electric power installed in the battery bank, it is worth mentioning that the storage capacity is regulated by the competition organization.

In response to the stated objectives, it was determined that, in order to ensure the competition conclusion with a relevant energy autonomy, the

vehicle will need to vary the speed according to the orographic requirements of the road. By varying the speed, the electronic (controllers) and electrical (electric motor) components of the solar car prototype will also be protected from failure.

**KEY WORDS:** Storage, energy efficiency, orography, displacement.

### Introducción

El almacenamiento de energía es el mayor problema en el diseño de vehículos funcionales en la actualidad, al calcular el diseño de un prototipo de auto eléctrico que opere con eficiencia en una competencia que se desarrolle en condiciones viales normales en largas distancias, se crea una necesidad que obliga a estudiar el consumo energético, de cualquier vehículo y de este en particular, contando con todos los gastos o ganancias energéticas de los sistemas instalados en cada vehículo.

La investigación pretende resolver el problema de la insuficiencia energética de operación en un prototipo de auto eléctrico que fue diseñado para la participación en la competencia GRAND PRIX SOLAR BOLIVIA.

El objetivo planteado es lograr que vehículos eléctricos, desarrollados localmente, lleguen a circular en las ciudades bolivianas con la

seguridad y velocidad suficiente para su desplazamiento; mediante la creación de un método de evaluación de gasto y ganancia energética de un vehículo eléctrico que opere en tramos de larga distancia, en este caso, aplicado en tramos específicos pertenecientes a un Grand Prix Solar.

Esta competencia está planificada para medir la eficiencia energética y el rendimiento del vehículo en condiciones viales normales como son: velocidad máxima y mínima de desplazamiento, peso mínimo del tripulante, potencia máxima de almacenamiento de energía en baterías, radio de giro mínimo del vehículo, prueba de campo con rompemuelleres, semáforos, prioridad de paso de vía, etc.

Las diferentes etapas de la competencia tienen exigencias que van en función a la orografía del país de Bolivia, recorriendo a través de zonas urbanas y carreteras en condiciones viales normales. Las etapas de la competencia son:

- Primera etapa: Cochabamba – Aiquile
- Segunda etapa: Aiquile – Sucre
- Tercera etapa: Sucre – Potosí
- Cuarta etapa: Potosí – Sucre

El Grand Prix Solar, desafiara a los participantes

a un recorrido extenso, que exige sobrellevar aspectos técnicos y logísticos para cubrir aproximadamente 580 km de recorrido.

El desafío, promueve la generación de tecnología propia, aplicada a la construcción de prototipos de vehículos eléctricos en las Universidades, Institutos técnicos y de Investigación, así como empresas de Innovación.

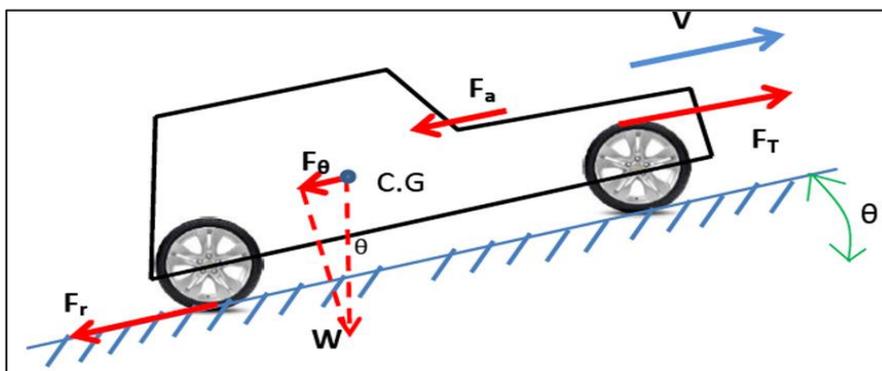
Para que la competencia unifique y/o normalice a los competidores y sus prototipos, esta plantea requerimientos técnicos definidos.

La siguiente tabla hace una comparación de las dimensiones normadas por la competencia y las dimensiones obtenidas de la construcción del prototipo.

**Tabla 1.** Dimensiones constructivas obtenidas

Dimensiones		
Detalle	Requerimiento por la Competencia	Dimensiones del Prototipo
Ancho de trocha [mm]	$1200 \leq X \leq 1600$	1500
Distancia entre ejes [mm]	$\geq 1500$	1700
Largo vehículo [mm]	$\leq 3500$	1893
Ancho vehículo [mm]	$\leq 2000$	1500
Peso del conductor [kg]	$\geq 80$	100
Altura máxima vehículo [mm]	Sin Especificar	1030
Peso máximo en uso [kg] (+ Factor de seguridad)	Sin Especificar	153
Peso del vehículo en vacío [kg]	Sin Especificar	73
Despeje suelo [mm]	Sin Especificar	305
Área Frontal vehículo [m <sup>2</sup> ]	Sin Especificar	0.99
Área Lateral vehículo [m <sup>2</sup> ]	Sin Especificar	1.95
Área total [m <sup>2</sup> ]	Sin Especificar	5.95

Fuente: Elaboración propia

**Figura 1.** Fuerzas presentes en la movilidad de un auto

Fuente: Cálculo y análisis dinámico del automóvil durante su desplazamiento en carretera.

Con esta configuración, se procedió al cálculo de potencia tomando en cuenta todas las variables obtenidas en el proceso constructivo.

Para el cálculo correspondiente, se realizó el análisis de las fuerzas a las que estará sometido el vehículo, así, se integró los datos requeridos. Para que el vehículo circule con una velocidad promedio de 30 km/h (Propuesta por la Competencia), con un peso de 73 kg, un conductor

de 80 kg y un porcentaje de pendiente mínimo a vencer de 10%.

La potencia eléctrica necesaria para mover el auto, debe ser igual a la potencia mecánica en el motor, según el documento “Cálculo y análisis dinámico del automóvil durante su desplazamiento en carretera”, la potencia eléctrica es calculada con la ecuación:

$$P_e = P_m = (F_r + F_a + F_\theta + F) V \quad \dots (1)$$

Dónde:

$P_e$  = potencia eléctrica [W]

$P_m$  = potencia mecánica [W]

$F_r$  = fuerza de rozamiento [N]

$F_a$  = fuerza aerodinámica [N]

$F_\theta$  = fuerza por pendiente [N]

$F$  = fuerza de movimiento [N]

$V$  = velocidad del auto [m/s]

Para calcular la potencia mecánica es necesario calcular las fuerzas que intervienen en está, teniendo los siguientes datos: masa del auto 73 kg, conductor 80 kg y una pendiente a vencer de 10%. La fuerza de rozamiento se calcula con la siguiente ecuación:

$$F_r = m g \text{sen}(\theta) \quad \dots (2)$$

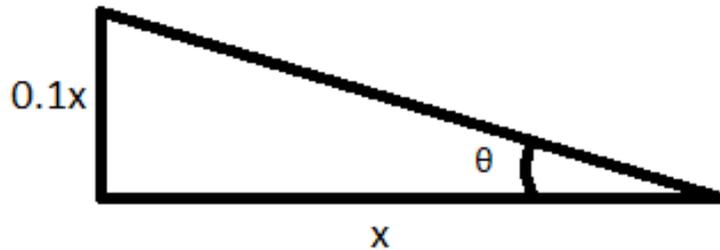
Dónde:

$m$  = Masa Del Vehículo Más Peso Del Conductor [m]

$g$  = Gravedad 9.81 [m/s]

$\theta$  = Angulo De La Carretera [Grados]

Donde el ángulo en el porcentaje de pendiente, se representa de la siguiente manera:



**Figura 2.** Ángulo de pendiente

Fuente: Elaboración Propia

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{0.1x}{x}\right)$$

$$\theta = 5.71^\circ$$

$$F_r = (73 + 80)\text{kg} \cdot 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot \text{sen}(5.71)$$

$$F_r = 149.33 \text{ [N]}$$

La fuerza aerodinámica se calcula con la siguiente ecuación:

$$F_a = \frac{1}{2} \rho S C_x V^2 \quad \dots (3)$$

Dónde:

$\rho$  = Densidad Del Aire [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]

$S$  = Superficie De Vehículo [ $\text{m}^2$ ]

$C_x$  = Coficiente De Resistencia a La Rodadura 0.0055 [adimencional]

Los siguientes datos como son: la superficie del vehículo y la densidad del aire y el coeficiente de resistencia la rodadura que es  $1.2 \text{ m}^2$ ,  $0.985 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$  y  $0.0055$  respectivamente:

$$F_a = \frac{1}{2} 0.985 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} 1.2 \text{ m}^2 0.0055 \left(8.33 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2$$

$$F_a = 0.0225 \text{ [N]}$$

La fuerza de rozamiento es:

$$F_{\phi} = C_r \times m \times g \times \cos(\theta) \quad \dots (4)$$

$$C_r = \text{Coeficiente del asfalto } 0.03 \text{ [adimensional]}$$

$$F_{\phi} = 0.0055 (73 + 80) \text{kg } 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cos (5.71)$$

$$F_{\phi} = 8.214 \text{ [N]}$$

La fuerza de movimientos se calcula con la ecuación básica de masa por aceleración.

$$F = \text{Masa X Aceleración} \quad \dots (5)$$

Para el cálculo, tomaremos la velocidad como crucero (Cte.) esto hace que la fuerza de movimiento sea igual a cero ( $F = 0$ ).

Calculadas las fuerzas se puede obtener la potencia mecánica que es igual a la potencia eléctrica con la ecuación inicial (1).

$$P_e = P_m = (149.33 + 0.225 + 8.214 + 0) \text{N } 8.33 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$P_e = P_m = 1314.215 \text{ [W]}$$



**Figura 3.** Motor Seleccionado Magic Pie 5

**Fuente:** Muestrario de ventas Golden Motor

Puesto que los motores eléctricos de esas características vienen solamente de 1000 W. y de 1500 W. **Se propuso usar el inmediato inferior** (1000 W), porque el almacenamiento es muy pequeño para usar uno más grande.

Después de hacer un análisis de los motores que se podrían usar, se seleccionó el tipo Brushless BLDC, por su bajo peso, buen torque y porque tienen la capacidad de montarse directamente a las ruedas.

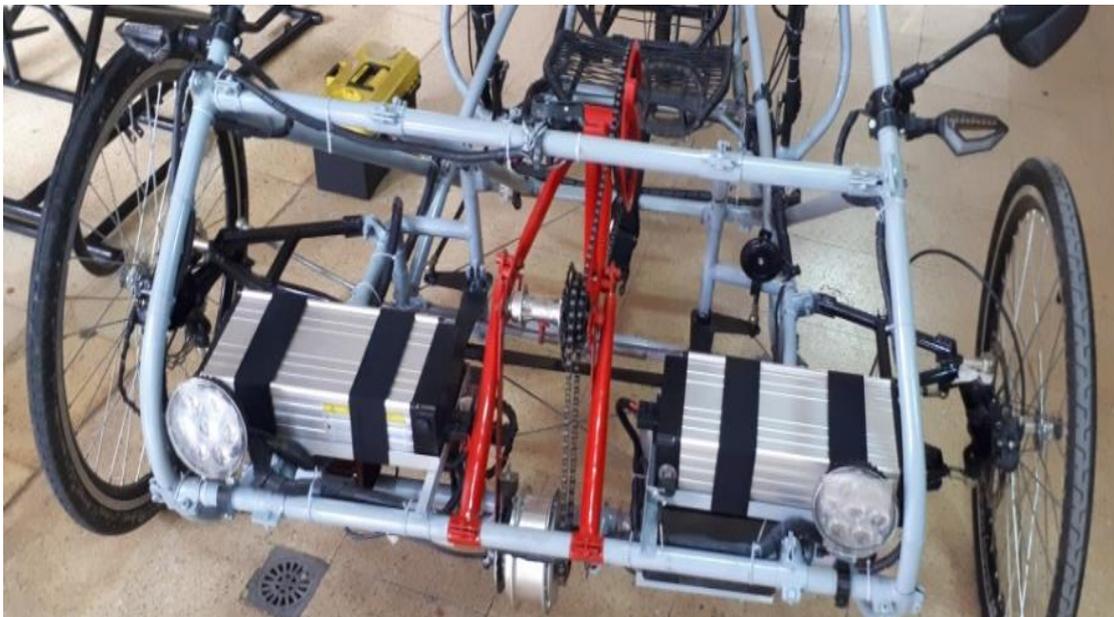
El motor que se escogió acorde al estudio realizado y los existentes en el mercado, fue el Goldem motor de 1000 W de potencia, es un kit que convierte una bicicleta a un ciclomotor eléctrico, el motor llega dentro de un aro de aluminio de 24 in.

El kit incluye:

- Motor eléctrico Magic Pie 5
- Manija de control de velocidad
- Tempomat / Cruise Control
- Palancas de freno con microcontactos

Magic Pie 5 es el último Modelo BLDC. montado en la rueda GOLDENMOTOR de 1 kW. con 48 V. y 20

A, este motor contiene su controlador electrónico incorporado dentro de la carcasa del motor.

**Figura 4.** Baterías principales de ion de litio.

**Fuente:** Elaboración propia

El peso del motor con llanta es 8.5 kg aproximado la velocidad máxima que adquiere el motor con una batería de 48 V. es de 50 km/h, el tamaño de la rueda escogida es de 24 in. integrando estos últimos datos, el peso del vehículo con el conductor es de 173 kg.

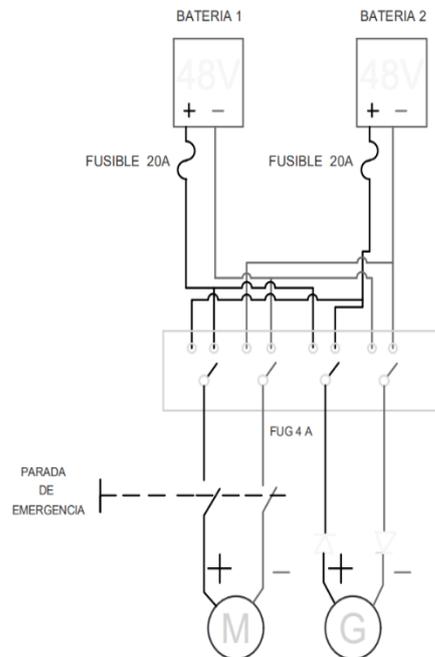
### **El Banco de baterías**

El banco de baterías de este vehículo, está conformado por dos unidades de ion litio para llegar al máximo de energía nominal establecido por la competencia de 2000 W, estas baterías, tienen las siguientes especificaciones técnicas: 4.5 kg de peso, 48 V, 20 Ah y un voltaje y corriente de carga de  $\geq 54$  V. y 2 A.

También, tienen un circuito electrónico BMS de protección incluido, el cual tuvo una modificación experimental; para que pudiera ser cargado tanto en funcionamiento como en parada (Carga por estación de paneles solares y carga generada por pedaleo). El Sistema de banco de baterías, sujeciones y acople del generador por pedaleo, se muestran en la figura 4.

Ya establecido el motor y el banco de baterías, se desarrolla un sistema de potencia, este sistema se maneja mediante dos conmutadores, uno controla el motor y el otro el generador, pero se accionan ambos a la vez, ya que están unidos a un solo interruptor gracias a un diseño en impresión 3D.

**Figura 5.** Sistema de potencia del vehículo



**Fuente:** Elaboración Propia

El diseño del sistema de potencia de este vehículo tiene como finalidad, sistematizar el consumo de las baterías y su carga. El banco de baterías se divide en dos circuitos esto permite alternar el uso de baterías.

La protección para el motor y para las baterías está compuesta por un fusible de 20 A. este no es de acción inmediata, en un futuro, se buscará proteger con disyuntores y relay de corriente continua.

### Materiales y métodos



**Figura 6.** Prototipo de construido.

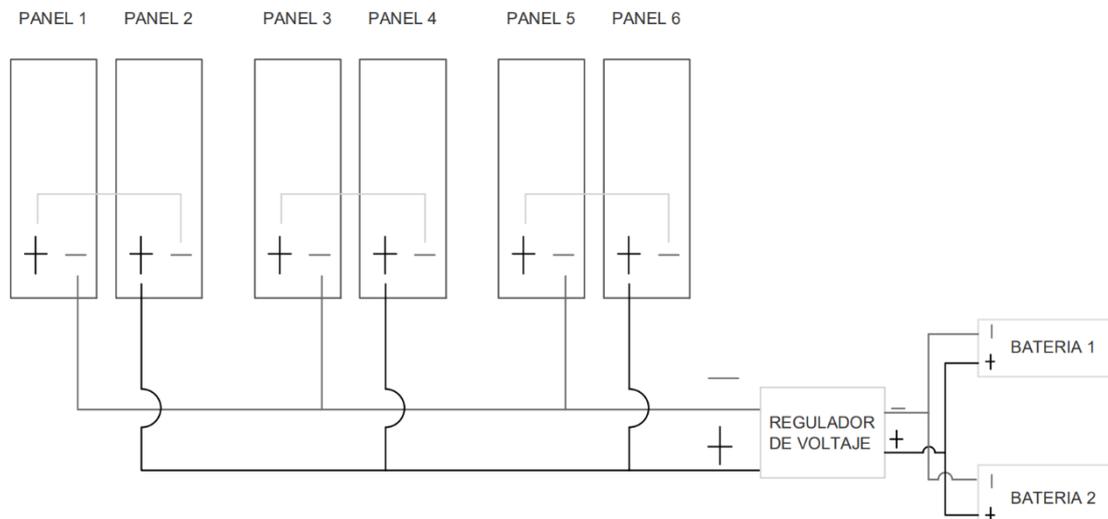
**Fuente:** Elaboración Propia

La metodología de investigación empleada en el presente trabajo tomó a la medición como principal método, porque en el proceso investigativo se midió datos teóricos, obtenidos a partir del análisis de los parámetros técnicos constructivos de un vehículo eléctrico y se los relaciono con la orografía del circuito de la competencia Grand Prix Solar. También, se usó la revisión bibliográfica, permitiendo realizar debidamente, los cálculos correspondientes que secundaron la propuesta de motor.

Al notar que el banco de baterías no sería suficiente para recorrer los 580 km de competencia a un promedio mínimo de 30 km/h, se decidió incorporar sistemas de carga de energía y regeneración de energía eléctrica. Los sistemas de regeneración de energía instalados en el auto fueron:

- Estaciones de carga de energía eléctrica Solar.
- Sistema de generación por pedaleo.
- Regeneración por el motor.

### Sistema Fotovoltaico de Carga de Baterías estacionario



**Figura 7.** Sistema fotovoltaico usado para una estación de carga.

**Fuente:** Elaboración Propia

El sistema fotovoltaico consistió en un pack de paneles solares, sujetos en un soporte de metal. Este sistema de energía limpia, tiene 6 paneles

solares, cada uno de 150 W, se encuentran conectados en conexión mixta (Serie-Paralelo), que permitió recolectar un total de 37.2 V. y 12 A.

a la salida según la irradiación solar promedio.

Con la ayuda de un regulador de voltaje obtuvo los 54 V. necesarios para cargar las baterías en paralelo. Este sistema se usó cuando el auto estaba estacionado, el tiempo de carga fue de 2 h. por cada tramo establecido en competencia.

### **Sistema de generación de energía eléctrica mediante pedaleo**

Este sistema estaba compuesto por una transmisión de pedales acoplada a un motor Brushless utilizado como generador, teniendo a la salida un rectificador de corriente alterna a continua.

La fuerza ejercida en los pedales tiene que ser de pedaleo continuo, si este varía, se podría dañar las baterías. Las revoluciones del motor generador tienen que ser altas ya que las baterías solo se pueden cargar a partir de 54 V y 2 A.

Para que la energía de entrada a las baterías sea constante en ese punto, se utilizó un regulador de voltaje a la entrada de las baterías que mantiene constante 54 V de ingreso, esto se pudo comprobar mediante un voltímetro digital ubicado a la vista del conductor como se muestra en la figura 8.

Para controlar la corriente, se colocó un medidor de velocidad controlado por un micro controlador, el cual manda una señal cuando el pedaleo está

correcto, es decir, el conductor podrá saber si pedalea más rápido o más lento de lo necesario. El conductor podrá encontrar las RPM necesarias mediante un indicador por luces led; el color verde significa correcto, amarillo precaución y el rojo peligro de sobrecarga.

Este sistema, puede ser usado mientras el auto está en operación, permitiendo que el conductor recargue las baterías mediante el pedaleo en cualquier momento.

**Figura 8.** Sistema de generación por pedaleo.



**Fuente propia**

Existe un sistema ya incorporado en el motor que es el sistema de carga de baterías por frenado regenerativo, este hace la función de generador cuando se activo desde el controlador.

En cuanto al cálculo del consumo de energía eléctrica del motor, en los tramos carreteros escogidos; se usó los parámetros técnicos obtenidos y un programa de muestreo por GPS.

El estaqueo por GPS, fue la alternativa más precisa proporcionando datos exactos, como la distancia en relación al nivel del mar, que enriqueció la investigación con resultados más precisos para el cálculo del consumo de energía eléctrica.

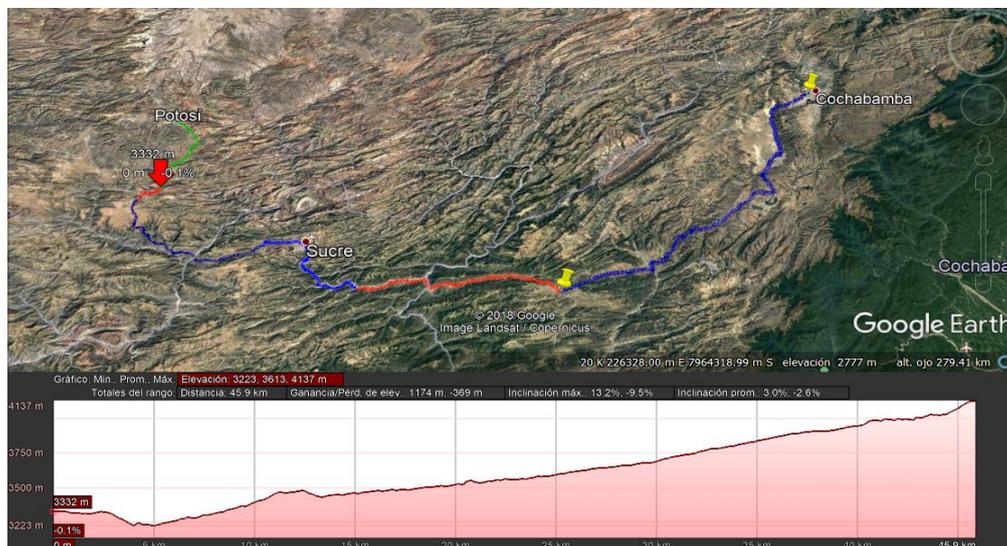
Se usó el programa Google Earth Pro para tomar

datos de distancia y altura con respecto al mar de todas las etapas del tramo carreteros de la competencia. La toma de datos fue cada 100 m aproximadamente, con estos datos precisos se pudo proceder al siguiente paso.

### **Cálculo de la energía consumida en los tramos de la competencia**

Para poder realizar los cálculos, se tomó en cuenta el total de masa del vehículo más un factor de seguridad, siendo un total de 153 kg.

El ángulo de pendiente, se extrajo de la diferencia de alturas de elevación de cada estaqueo; el estaqueo para las alturas, se midió cada 500 m de la carretera, los datos fueron tomados con el programa Google Earth como se muestra en la siguiente figura.



**Figura 9.** Recorrido de la Competencia por Tramos

**Fuente:** Elaboración propia del recorrido en el programa.

El ángulo de pendiente “ $\theta$ ” para cada tramo de muestreo, según el documento “Cálculo y análisis dinámico del automóvil durante su desplazamiento en carretera”, se extrajo de la ecuación:

$$\theta = \sin^{-1} \frac{H_2 - H_1}{x} \quad \dots (6)$$

Dónde:

$H_1$  = Altura Inicial [m]

$H_2$  = Altura Final [m]

$x$  = distancia de muestreo [m]

El siguiente ejemplo es un cálculo realizado con los primeros estaqueos del tramo Cochabamba-Aiquile, reemplazando en la ecuación se tiene (6):

$$\theta = \sin^{-1} \frac{2563 - 2564}{500}$$

$$\theta = -0.1146^\circ$$

El ángulo negativo indica que la pendiente es negativa, entonces no se consume energía eléctrica y en su lugar se aprovecha la energía cinética activando el sistema de regeneración con la que cuenta el motor.

Con este cálculo y el uso de la ecuación 1, se encontró la pendiente y la potencia eléctrica necesaria para cada punto de muestreo. El tiempo del recorrido en cada muestreo fue calculado con la velocidad promedio establecida de 30 km/h y la distancia de muestreo que en este caso fue 500 m:

$$t = \frac{x}{V} \quad \dots (7)$$

Dónde:

$t$  = Tiempo de recorrido en el tramo [s]

$$t = \frac{500\text{m}}{30\text{Km/h}} \frac{1\text{Km}}{1000\text{m}} \frac{3600\text{s}}{1\text{h}}$$

$$t = 60 \text{ s}$$

Una vez obtenida la potencia y el tiempo en la que se aplica para recorrer una distancia específica, se calculó la energía consumida en cada tramo de muestreo, y con estas la energía consumida total:

$$E_t = P_e t \quad \dots (8)$$

Dónde:

$E_t$  = Energía consumida en un tramo de muestreo medido [W]

Esta energía es la que se utiliza en el tramo de muestreo, para obtener la energía total en el recorrido se sumó estas energías con la siguiente ecuación:

$$E = \sum_{i=1}^n E_i \quad \dots (9)$$

E = Energía Total Consumida

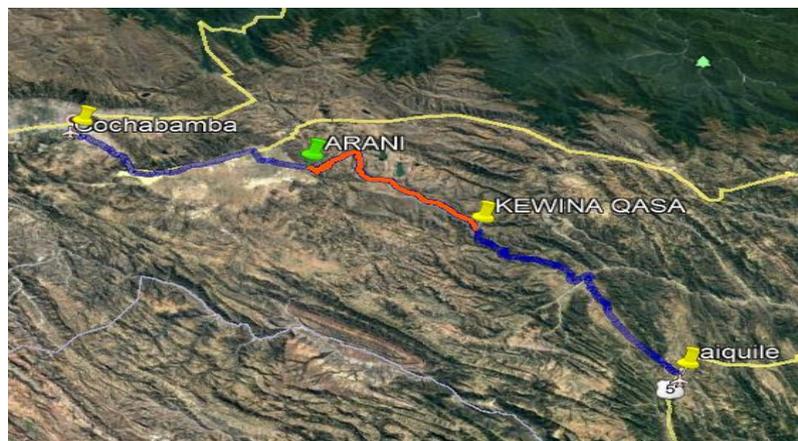
n = Número De Tramos

### Gráficas de las potencias consumidas en toda la competencia

Los gráficos 1, 2, 3 y 4 muestran la potencia consumida por trayecto para una velocidad constante de 30 km/h, la cual, permitió descubrir los diferentes requerimientos del motor y, aproximadamente, en que parte del recorrido será este.

Los puntos donde la potencia es cero en la gráfica, muestran el cambio de pendiente a una negativa o positiva según requerimiento.

- **Tramo Cochabamba-Aiquile**

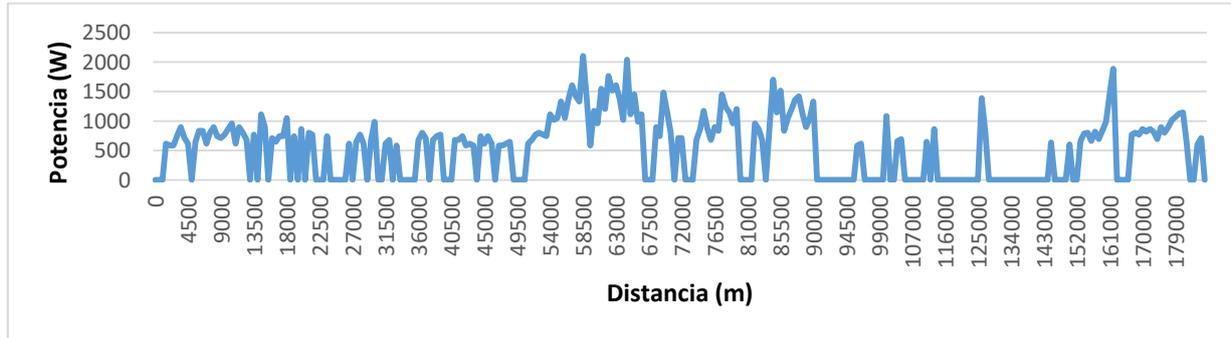


**Figura 10.** Tramo Cochabamba-Aiquile

**Fuente:** Elaboración propia del recorrido

Es primer tramo de la competencia y tiene una distancia de 180 km, el perfil de elevación máximo de 3789 msnm y un mínimo de 1976 msnm.

**Gráfico 1 . Potencia pico Cochabamba-Aiquile**

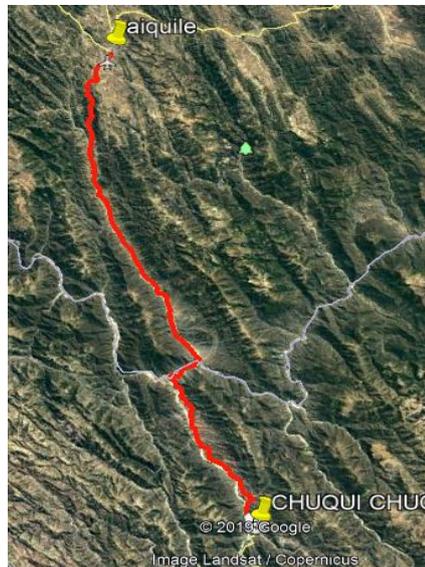


**Fuente:** Elaboración Propia.

En el gráfico 1 se muestra que la potencia máxima es un poco mayor de 2 kW, los picos de consumo eléctrico no se dan durante tiempos prolongados, por tanto, no afecta mucho en la autonomía del vehículo.

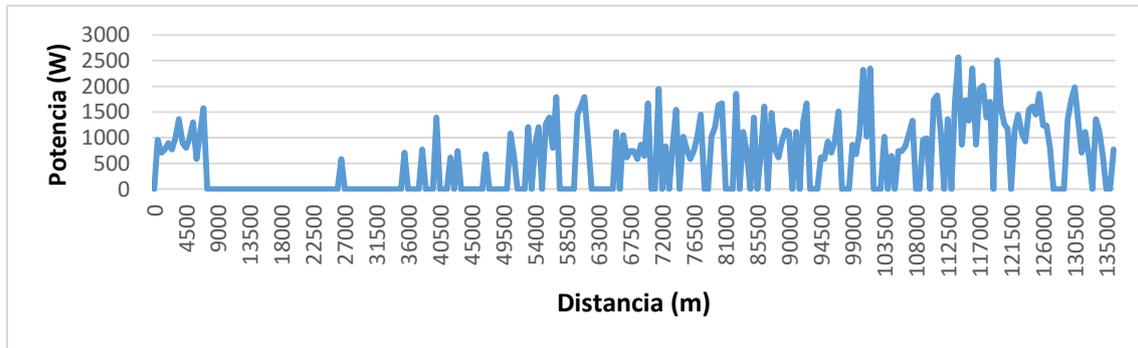
- **Tramo Aiquile-Sucre**

Este tramo tiene una distancia de 135 km, un perfil de elevación máximo de 2485 msnm y un mínimo de 1504 msnm.



**Figura 11.** Tramo Aiquile-Sucre

**Fuente:** Elaboración propia del recorrido en el programa Google Earth

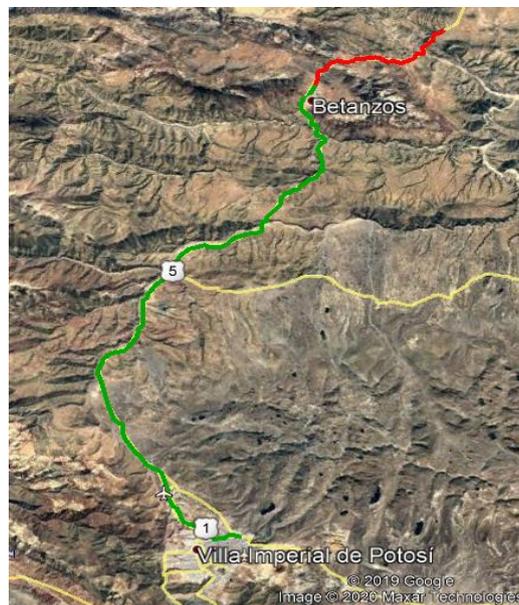
**Gráfico 2.** Potencia pico Aiquile-Sucre

**Fuente:** Elaboración Propia.

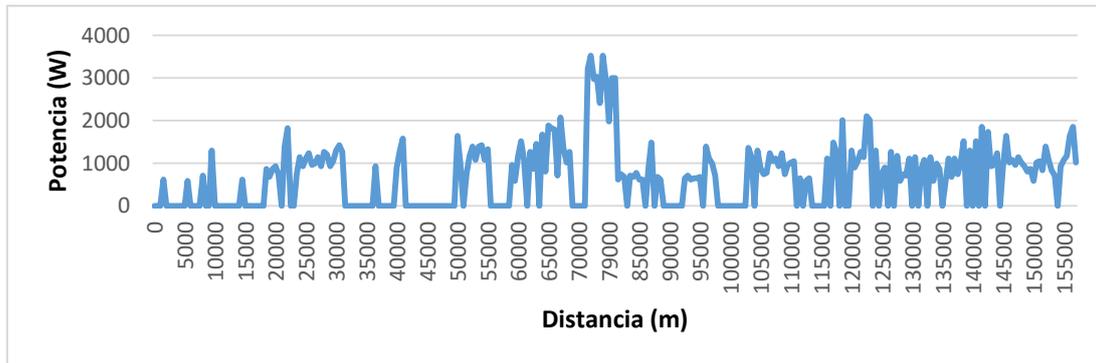
Como se observa en el gráfico 2, la potencia máxima es un poco mayor de 2.5 kW, en este caso, el tramo no es largo pero la mayor parte del recorrido excede los 1 kW de potencia requerida.

- **Tramo Sucre-Potosí**

Este tramo tiene una distancia de 155 km, un perfil de elevación máximo de 4137 msnm y un mínimo de 3223 msnm.

**Figura 12.** Tramo Sucre-Potosí

**Fuente:** Elaboración propia en el programa Google Earth

**Gráfico 3.** Potencia pico Sucre-Potosí

**Fuente:** Elaboración Propia.

En el gráfico 3 se muestra una potencia máxima de 3.5 kW, este se mantiene por un periodo de 15 km, se puede ver que hay muchos picos de consumo superiores a 1 kW.

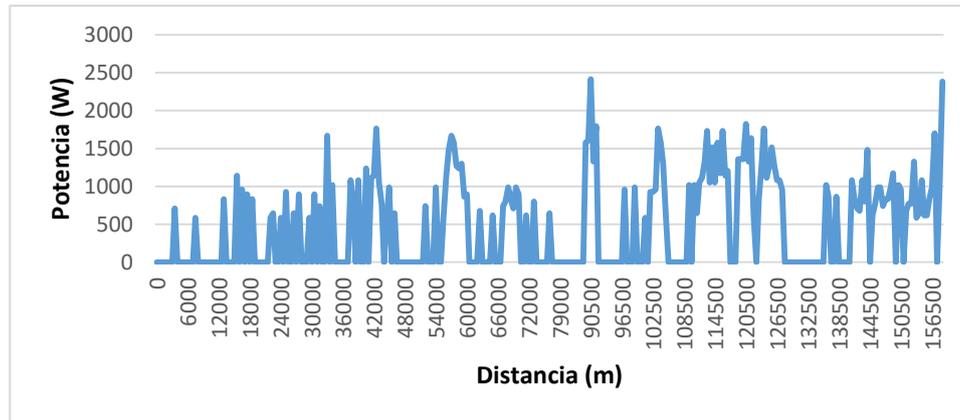
- **Tramo Potosí-Sucre:**

Es el último tramo de la competencia tiene una distancia de 155 km, este tramo también tiene un punto de elevación máximo de 4137 msnm y un mínimo de 3223 msnm.

**Figura 13.** Tramo Potosí-Sucre

**Fuente:** Elaboración propia del recorrido en el programa Google Earth

Gráfico 4. Potencia pico Potosí-Sucre



**Fuente:** Elaboración Propia.

La gráfica 4 muestra una potencia máxima que se aproxima a 2.5 kW en periodos cortos del recorrido, además de tener excedentes de 1 kW en varios puntos.

### Ajuste de la velocidad para no superar los 1 Kw de consumo eléctrico

Con el fin de poder sacar el máximo provecho al motor y al mismo tiempo protegerlo, se procedió a un recálculo de velocidades, donde la potencia necesaria no sobrepase los 1000 W. Al tener como tope dicha potencia, se realizó un cálculo para

poder saber a qué velocidad debe ir el auto sin que exceda una potencia de 950 W.

Si un tramo excede la potencia de 950 W, se ralentizó la velocidad del auto, resolviendo la ecuación cúbica 9, obteniendo así, nuevos valores de energía consumida en las baterías y reduciendo también el torque necesario.

Remplazando las ecuaciones 2, 3, 4 y 5 en 1 tenemos la ecuación general:

$$P_e = \frac{1}{2} \rho S C_x V^3 + m V (g \sin \vartheta + g C_r \cos \theta + a) \quad \dots (9)$$

Tomando como ejemplo el km 57 del tramo Cochabamba-Aiquile y, analizando el gráfico 1, se observa el pico de potencia de 1318.41 W opera con un ángulo de pendiente de 3.78°, resolviendo la ecuación 9 tenemos:

$$\frac{1}{2} 0.985 1.2 0.35 V^3 + 153 (9.8 \sin(3.78) + 9.8 C_r \cos(3.78) + 0) V - 950 = 0$$

$$0.2069V^3 + 143.84V - 950 = 0$$

$$V = 6.253 \left[ \frac{m}{s} \right]$$

$$V = -3.13 + 26.92j \left[ \frac{m}{s} \right]$$

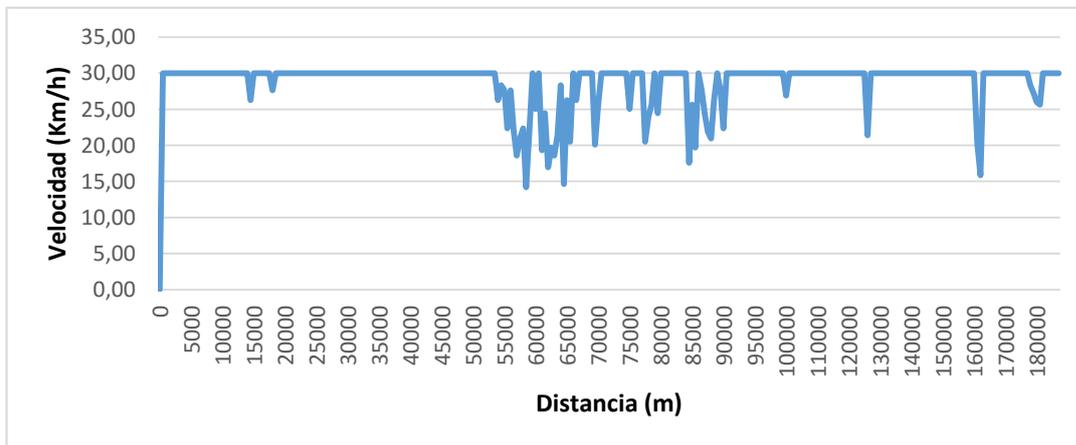
$$V = -3.13 - 26.92j \left[ \frac{m}{s} \right]$$

El valor positivo real, es de 6.253 m/s que es igual a 22.5 Km/h, este análisis, se realizó para cada tramo en los diferentes recorridos. Este cálculo se facilitó realizando un macro en Excel el cual encuentra el valor real para cada tramo con los valores de las velocidades resultantes.

### Gráficas del ajuste de la velocidad para no superar los 1 kW de consumo

Los gráficos 5, 6, 7 y 8 muestran una corrección en la velocidad para que la potencia pico consumida no exceda los 950 W.

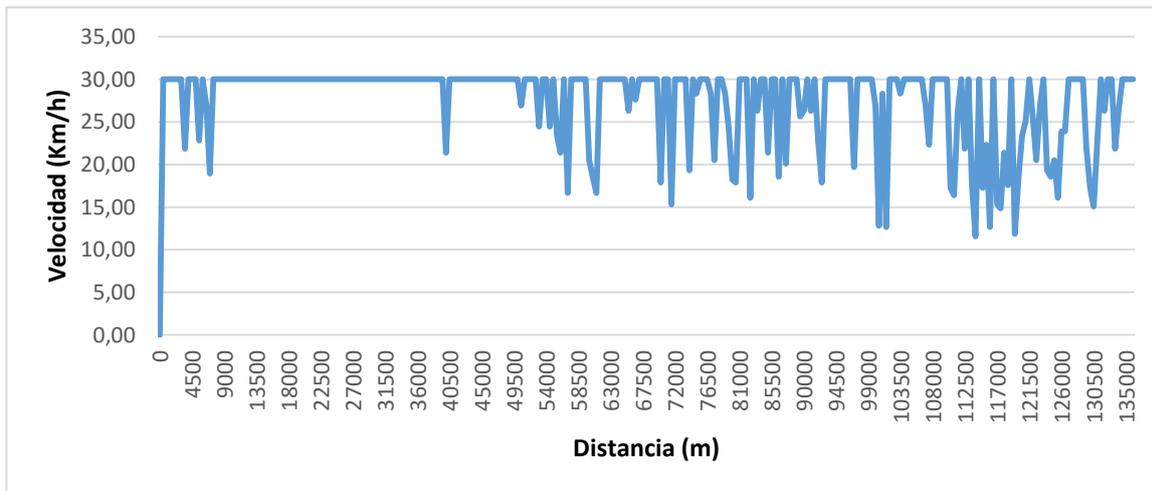
**Gráfico 5.** Velocidades para no superar 1[kW] Cochabamba-Aiquile



**Fuente:** Elaboración Propia.

La gráfica 5 muestra una estabilidad en la velocidad, solo reduce a 15 km/h por periodos cortos de distancia, no presenta un problema considerable.

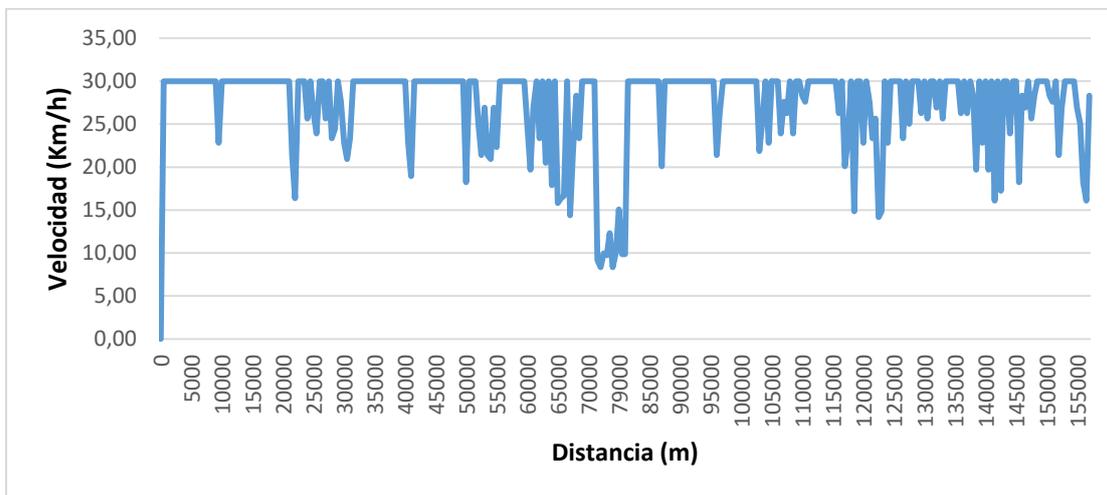
**Gráfico 6.** Velocidades para no superar 1 kW. Aiquile-Sucre



**Fuente:** Elaboración Propia.

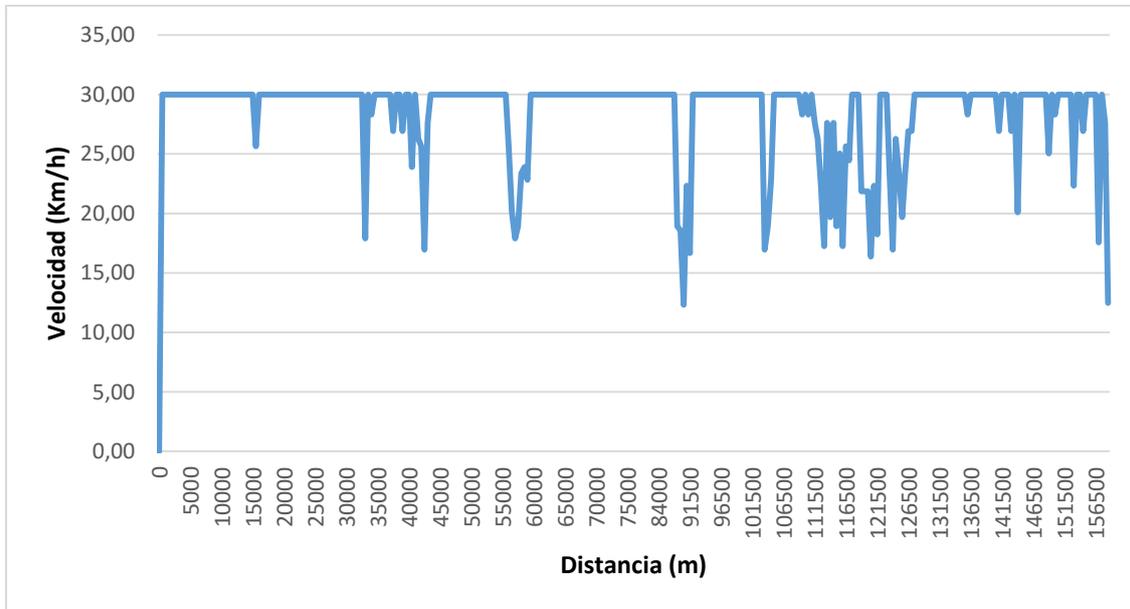
En la gráfica 6 se nota que este trayecto requiere una mayor reducción de velocidad en gran parte del recorrido.

**Gráfico 7.** Velocidades para no superar 1 kW Sucre-Potosí



**Fuente:** Elaboración Propia.

En la gráfica 7 se observa que este trayecto requiere una excesiva reducción de velocidad en la mitad del recorrido, en el cual, la velocidad tendría que reducirse a menos de 10 km/h.

**Gráfico 8.** Velocidades para no superar 1 kW Potosí-Sucre

**Fuente:** Elaboración Propia.

En la gráfica 8 se ve que en este trayecto se requiere una reducción de velocidad en pocos puntos y tramos cortos en el recorrido.

### Análisis de la energía generada y utilizada en el recorrido de la competencia

Los cálculos de energía consumida por tramo de competencia, sobrepasan la energía almacenada y generada por los sistemas complementarios, esta falta de energía debe ser equilibrada, mediante la generación por pedaleo incrementando el tiempo de trabajo. La energía faltante, fue calculada con la siguiente ecuación:

$$E_f = E - (E_b + E_p + E_{rT}) \quad \dots (10)$$

$E_f$  = Energía faltante

$E_b$  = Energía baterías

$E_p$  = Energía de los paneles

$E_{rT}$  = Energía frenado regenerativo total

La energía proporcionada por el banco de baterías no debe superar los 2 kW, el banco de baterías está compuesta por dos baterías de 48 V. y 20 Ah siendo la energía de las baterías calculada por:

$$E_{b1} = V Q \quad \dots (11)$$

$E_{b1}$  = Energía de batería individual

V = Voltaje

Q = Carga

Como se tendrá un par de baterías para el vehículo, la energía aportada por las baterías es:

$$E_b = 2 E_{b1} \quad \dots (12)$$

Remplazando la ecuación 11 en 12 y los valores de voltaje y carga de la batería se tiene:

$$E_b = 2 \cdot 48V \cdot 20Ah$$

$$E_b = 1920 \text{ Wh}$$

Los fabricantes recomiendan no consumir por completo las baterías para aumentar su ciclo de trabajo de manera que se usara el 90% de su capacidad teniendo una energía final proporcionada por las baterías de:

$$E_b = 1920 \text{ Wh} \cdot 0,9 = 1728 \text{ Wh}$$

La energía proporcionada por los paneles es de 420 W. La energía regenerada por frenado se calculó con la siguiente expresión:

$$E_{rT} = \sum_{i=1}^n E_{ri}$$

$E_{rT}$  = Energía frenado regenerativo total del recorrido

$E_r$  = Energía frenado regenerativo por tramo

Siendo esta energía la que se opone a la energía potencial y cinética que lleva el auto en pendientes considerables de ángulo negativo, se calculó con la siguiente ecuación:

$$E_r = \frac{1}{2} m v^2 + m g (H_1 - H_2) \quad \dots (13)$$

Por ejemplo, para el km 20.5 del tramo Cochabamba-Aiquile que tiene una pendiente negativa con un ángulo de  $-1.26^\circ$  una altura inicial de 2723 m.s.n.m. y altura final de 2712 m.s.n.m.

$$E_r = \frac{1}{2} 153 \text{ [Kg]} \left( 8.333 \left[ \frac{\text{m}}{\text{s}} \right] \right)^2 + 153 \text{ [Kg]} 9.8 \left[ \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right] (2723 \text{ [m]} - 2712 \text{ [m]})$$

$$E_r = 36.37 \text{ [J]} = 0.6061 \text{ [Wh]}$$

De esta manera se calculó la energía recuperable por freno regenerativo para pendientes menores a  $-0.12^\circ$ . Con los datos obtenidos se puede calcular la energía faltante que es la energía que se debe suministrar por pedaleo con la ecuación 10.

$$E_f = 2577.0 \text{ Wh} - (1728 + 400 \text{ Wh} + 67.4 \text{ Wh})$$

$$E_f = 381.6 \text{ Wh}$$

## Resultados

La siguiente tabla muestra los resultados globales del cálculo de la potencia eléctrica que, necesita el vehículo en cuestión, para operar en los diferentes

recorridos de la competencia del rally solar mencionado, fueron integrados todos los factores que influirían en un recorrido real.

**Tabla 2.** Generación y uso de energía en el recorrido Cochabamba-Sucre, Sucre Potosí y Potosí -Sucre

Resultados								
Tramo	Velocidad (Km/hr)	Energía Usada (Kw/hr)	Torque (Nm)	Tiempo de recorrido del tramo (H)	Distancia del Tramo (Km)	Energía regenerada, freno regenerativo (Wh)	Energía regenerada, paneles solares (2hr)	Energía Faltante (Wh)
Cochabamba-Aiquile	17.40	2.58	66.50	6.38	187	67.44	420	361.53
Aiquile-Sucre	15.58	2.12	73.76	4.85	136	101.78	420	-131.54
Sucre-Potosí	17.40	3.17	66.50	5.94	158	105.12	420	914.89
Potosí-Sucre	15.18	1.90	75.60	5.43	158	146.01	420	-391.05

**Fuente:** Elaboración Propia.

Como se puede observar en la tabla 2, en el tramo de Cochabamba-Aiquile existe una energía faltante de 361.53 W/h, esta tiene que ser proporcionada necesariamente por la generación de pedaleo; en cambio, en la ruta de Aiquile-Sucre existe un saldo energético, en este tramo no será necesario recargar energía eléctrica por pedaleo, siendo opcional para el piloto subir su velocidad promedio.

La ruta Sucre-Potosí es el tramo donde se necesita más energía, siendo esta de 914.88 W/h y, por lo tanto, se necesita más horas de pedaleo por parte del piloto, En el tramo de Potosí-Sucre, no es necesario la energía por pedaleo, pero se recomienda por lo menos media hora de pedaleo para más seguridad y cuidado de las baterías.

### Discusión

La investigación muestra un medio de medición, que es usado para verificar teóricamente el desempeño de un vehículo en una competencia de rally solar específica, pero, puede ser replicado para cualquier fin.

En este caso, el consumo de energía es alto, debido a la irregularidad en la orografía de los tramos analizados y por ese hecho, se tiene que recurrir a sistemas de generación y regeneración de energía, aumentando más el peso del vehículo afectando su condición de ultraliviano.

Sin contar con la complejidad de esos sistemas aplicados, se observa que los tramos carreteros seleccionados del país de Bolivia, son muy irregulares y poseen picos elevados afectando considerablemente la autonomía energética de un vehículo, incrementando con claridad la veracidad del problema planteado.

Para el diseño de vehículos funcionales, el principal problema es el almacenamiento de energía eléctrica y para minimizar este hecho, se tiene que realizar un estudio y una regulación en el uso continuo de potencia eléctrica.

### Conclusiones

- Se calculó la potencia eléctrica necesaria de un vehículo para participar en la categoría híbrido en la competencia Gran Prix Solar Cochabamba, logrando así el objetivo principal. Para esto se estudiaron los parámetros de interés como: Tipos de motores; cálculo de potencias mecánicas y eléctricas; captación de energía solar; la demanda energética; generadores eléctricos; la capacidad de energía que puede ser generada y regenerada por los sistemas implementados.
- Se demostró que el prototipo de vehículo híbrido, puede satisfacer las demandas de potencia en tramos carreteros o tramos extensos. También, que el peso se convierte en prioridad de criterio del diseño para poder

obtener mejor resultado en cuanto a eficiencia.

El diseño de todos los sistemas implementados en este vehículo, se convierten en referente tecnológico para estudiantes e investigadores de diversas áreas de la universidad, aunque puede ser mejorado.

- Se realizó el diseño de sistemas de recarga de baterías con el vehículo estacionado y en funcionamiento. Estos sistemas son necesarios para la participación del auto en la competencia. Se concluyó también que para el sistema de regeneración por pedaleo es necesario tener una buena condición física ya que las exigencias de RPM del motor Brushler son altas.

## Referencias

[1] El español . (1 de Agosto de 2019). Almacenamiento Energetico para autos. El español , págs. 1-3.

[2] Alvarado Fajardo, A. N. D. R. E. A. C... (2014). Análisis, Diseño Y Simulación De Sistema Solar Fotovoltaico Para Suministro Eléctrico En Apoyo A Programa Nutricional En La Escuela Rural El Cardonal, Tibaná. Colombia: Boyacá.

[3] Blanco, A. L. E. X. (2019, 1 Julio). El Gran Problema De Los Coches Eléctricos: Los Propios Conductores. Recuperado 15 agosto, 2019, De

[https://Www.Elespanol.Com/Omicrono/20190801/Gran-Problema-Coches-Electricos-Propios-Conductores/418208474\\_0.Html](https://Www.Elespanol.Com/Omicrono/20190801/Gran-Problema-Coches-Electricos-Propios-Conductores/418208474_0.Html)

[4] H Kindler, MATEMÁTICA APLICADA PARA LA TÉCNICA DEL AUTOMÓVIL. Versión Española 8va edición alemana, Barcelona198.

[5] D. A. Chudacok, FUNDAMENTOS DE LA TEORÍA Y EL CÁLCULO DE TRACTORES Y AUTOMÓVILES. Editorial Mir Moscú., URSS1977.

[6] Salazar Edgar, Arroyave Juan Felipe, Guevara Rojas Bryan. FACULTAD DE TECNOLOGÍA DE CANARIAS. Desarrollo de un vehículo solar híbrido “UE revolution”.