

Diseño, Construcción y Pruebas de un Vehículo Híbrido (Energía Solar – Energía Humana)

Diego Andrés Siguenza Alvarado, Santiago Isrrael Márquez Vásquez, y Marco Pazmiño Barreno.
Facultad de Ingeniería Mecánica y Ciencias de la Producción (FIMCP)
Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL)
Campus Gustavo Galindo, Km 30.5 vía Perimetral
Apartado 09-01-5863. Guayaquil-Ecuador

dieansig@espol.edu.ec, simarque@espol.edu.ec, mpazmino@espol.edu.ec

Resumen

El presente trabajo muestra el diseño de un prototipo de vehículo híbrido que aprovecha la energía solar y humana, para generar su propio movimiento, el mismo que se desarrolló para que participe en la Primera Competencia Latinoamericana de Vehículos Solares Fotovoltaicos denominada “La Ruta Solar” que se realizó en Chile en los meses de Septiembre y Octubre del 2011.

En la investigación realizada para el desarrollo del prototipo, se trabajó aplicando conceptos de ingeniería de acuerdo a las bases de la competencia.

Para la optimización del diseño, se utilizó el software SolidWorks, en el cual se realizó el modelado en tres dimensiones con sus respectivos planos de construcción, así como también, las simulaciones de esfuerzos y fuerzas aerodinámicas aplicadas al vehículo híbrido.

La construcción, se realizó en las instalaciones de la FIMCP y las pruebas en el Campus “Prosperina” de la ESPOL y en el club de campo “Las Vizcachas” en Santiago de Chile.

Abstract

The present work shows the design of a hybrid prototype car that collects energy from the sun and the pilot to generate its own movement which participated in the first Latin America Solar Car Racing denominated “La Ruta Solar” which took place in Chile during September and October of 2011.

The research for the prototype development was worked applying engineering concepts referencing in the competition rules.

For the design optimization the software SolidWorks was used in which a three-dimension model with the respective construction plans and strength structural and aerodynamics forces simulation was made.

The construction was made in the FIMCP facilities and the field tests took place in “Prosperina” Campus of ESPOL and in the country club “Las Vizcachas” in Santiago de Chile.

1. Introducción

El prototipo de vehículo híbrido fue diseñado e implementado para la participación en la competición denominada La Ruta Solar, la misma que tuvo como escenario el Desierto de Atacama, el cual cubrió un amplio recorrido entre las ciudades de Iquique, Antofagasta, Calama en el norte de Chile.

Objetivos

De acuerdo al estudio del recorrido y de las condiciones climáticas de la competencia, se diseñó un vehículo seguro y eficiente, tomando en consideración los siguientes puntos:

- Maximizar el área del arreglo fotovoltaico.
- Minimizar las fuerzas de resistencia.
- Alta relación entre la resistencia y el peso.
- Obtener sistemas eléctricos y mecánicos energéticamente eficientes.
- Considerar la confiabilidad, seguridad, ergonomía y maniobrabilidad.

2. Modelado del vehículo híbrido.

2.1. Propósito del modelado

El modelado del vehículo híbrido nos permite entender donde y como la energía del vehículo es consumida, y cuantificar esta, para el dimensionamiento de los diferentes sistemas que componen el vehículo híbrido.

2.2. Cargas aerodinámicas

El arrastre aerodinámico constituye un gran porcentaje en la fuerza total de resistencia cuando el vehículo se moviliza a altas velocidades; también está presente la fuerza de sustentación. En la figura 2.1 se muestra el comportamiento de la fuerza de arrastre y sustentación con la velocidad del vehículo.

$$\text{Carga aerodinámica} = \frac{1}{2} C_A \rho V^2$$

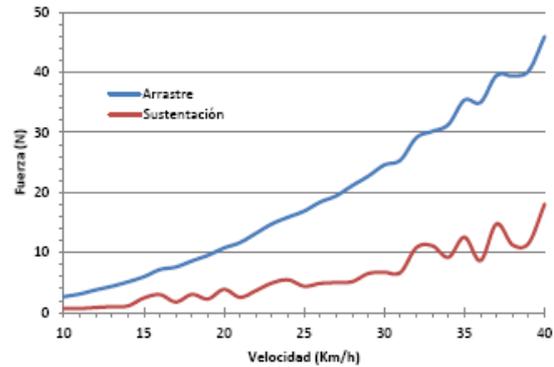


Figura 2.1 Comportamiento de las fuerzas de arrastre y sustentación

2.3. Resistencia a la rodadura

A bajas velocidades, la resistencia a la rodadura (RR) es considerada como la fuerza de resistencia predominante, la misma que, es directamente proporcional al peso del vehículo. Para minimizar esta resistencia, es necesario minimizar la energía absorbida por la flexión de las ruedas.

Existen formulas empíricas para calcular la resistencia a la rodadura (RR) con respecto a la velocidad del vehículo, como la formula desarrollada por la General Motors, que se muestra a continuación:

$$RR = C_{rr} \left(1 + \frac{V}{161} \right) W$$

2.4. Balance de fuerzas

La Fuerza de Resistencia Total (siglas FRT determinada por la suma de la resistencia a la rodadura, el arrastre aerodinámico, y la componente del peso del vehículo presente en una pendiente), actúa en dirección contraria al movimiento del vehículo, lo cual constituye la carga de tracción necesaria para mover el vehículo con velocidad constante.

$$FRT = C_{rr}W + \frac{1}{2} C_A \rho V^2 A + W \sin \theta$$

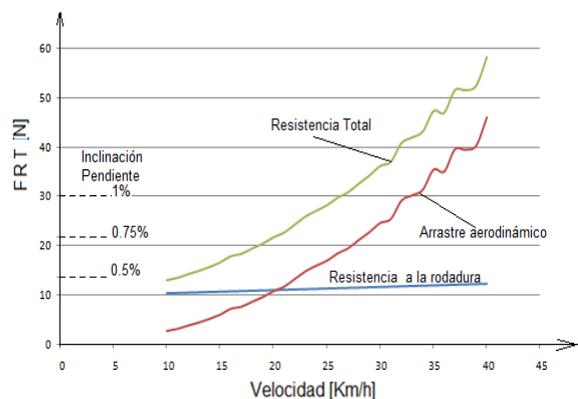


Figura 2.2 Fuerzas de resistencia en el vehículo

Potencia del vehículo

La potencia de carga requerida por el vehículo, se obtiene multiplicando la fuerza de resistencia total (FRT) por la velocidad del mismo, de esta forma superponiendo una curva de potencia de un motor eléctrico DC con un voltaje nominal de 36V, y la curva de potencia de carga, obtenemos la velocidad límite de este.

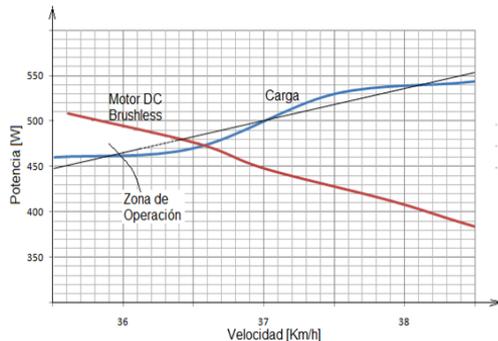


Figura 2.3 .Potencia del motor eléctrico vs la carga del vehículo

La intersección de ambas curvas muestra el punto de equilibrio teórico entre la potencia de un motor de 500W y la potencia requerida, con lo cual se determina que la velocidad máxima del mismo en condiciones de carga estable es de 36km/h

Potencia humana

La potencia máxima que puede suministrar una persona promedio por largos periodos de tiempo sin sufrir fatiga y recuperarse rápidamente es de 75W y la cadencia de pedaleo para operar en un rango optimo se encuentra entre 20 y 60 rpm de la catalina del vehículo.

3. Diseño de la estructura del vehículo híbrido

3.1 Diseño del chasis

En el desarrollo del diseño de la estructura del chasis, se consideró: la ubicación del centro de masa, elementos de acople, para los sistemas de suspensión, dirección, y frenos y el uso de material liviano, como el aluminio.

Para el análisis estructural del chasis consideramos las cargas producidas por: saltos del vehículo, giro en curvas, desaceleración en el frenado, y el efecto de la gravedad en la estructura.

El mallado se realizó con elementos tipo viga que soportan esfuerzos axiales, flexión y torsión presentes en la estructura. La malla está conformada

de 491 elementos tipo viga con 520 nodos para lograr una buena aproximación del comportamiento de la estructura con sus respectivas cargas aplicadas.

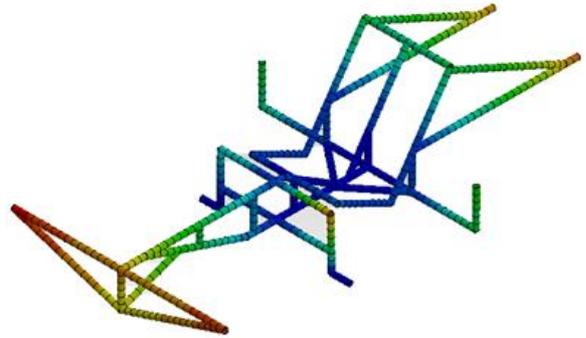


Figura 3.1 Mallado con elementos tipo viga

3.2. Diseño de la carrocería

Con la idea de tener un diseño innovador y original del vehículo, la forma del mismo, fue desarrollada tomando en cuenta a la posición del sol en el lugar y fecha de la competencia, con lo cual se aprovecha al máximo la energía solar.

Optimizamos el peso de la carrocería con una estructura de aluminio y recubrimiento con tableros de balsa reforzada con fibra de vidrio.

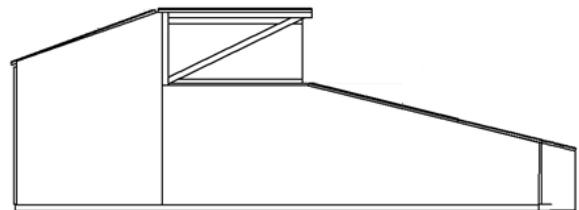


Figura 3.2 Diseño de forma del vehículo híbrido

Además se diseñaron aeroformas tipo persianas abatibles en los laterales del vehículo, para usar a favor la energía del viento, aplicándola directamente al movimiento del vehículo.

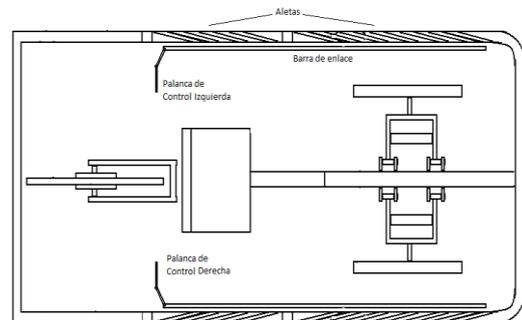


Figura 3.3 Esquema del sistema de aletas aerodinámicas

La fuerza de reacción F en cada aeroforma, perpendicular a la dirección del viento es direccionada a través de un mecanismo de barras articuladas, que permite girar simultáneamente las aeroformas

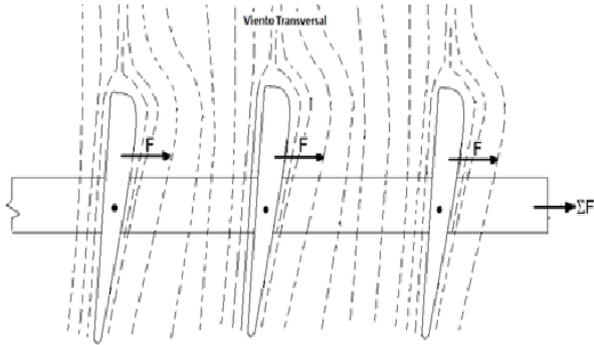


Figura 3.4 Esquema de las aeroformas tipo persiana

4. Sistemas mecánicos

4.1 Sistema de dirección

La función del sistema de dirección es responder a las acciones realizadas por el conductor, para direccionar y mantener el control del vehículo. La geometría del mecanismo de la dirección debe considerar la diferencia de los ángulos de giro de cada rueda, interior y exterior a la curva, debido a la diferencia de radios de giro que tiene cada una de estas.

La geometría Ackerman es un arreglo de los vínculos que intervienen en el sistema de dirección del vehículo, diseñada para resolver el problema de las ruedas, para trazar círculos de diferentes radios lo que permite girar la rueda interna un ángulo mayor al ángulo de giro de la rueda exterior

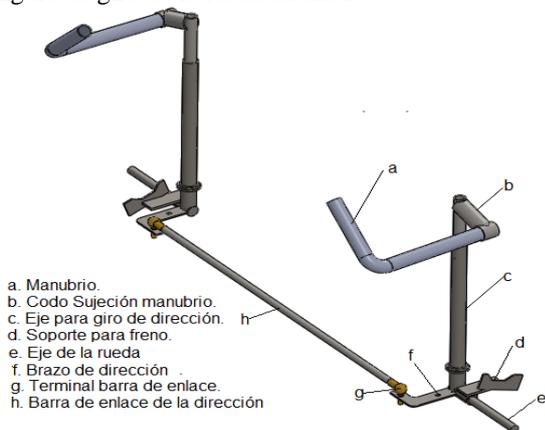


Figura 4.1 Sistema de dirección del vehículo

4.2 Sistema de suspensión

Sistema de suspensión frontal

La suspensión frontal está formada por un mecanismo de cuatro barras llamado SLA por sus siglas en inglés (short long arm), esta tiene dos brazos laterales, uno superior y otro inferior de mayor longitud que permite la aproximación del movimiento en línea recta deseable en la

configuración de la suspensión frontal para evitar el arrastre lateral de las ruedas y por ende pérdidas de energía innecesarias evitando así el desgaste excesivo de la banda de rodadura de la rueda.

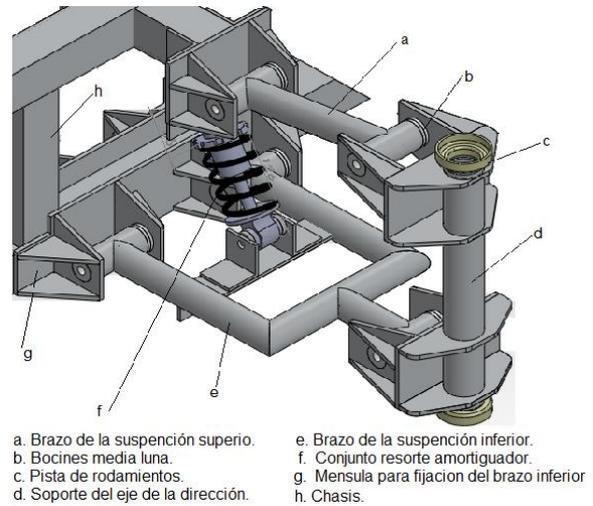


Figura 4.2.1 Sistema de suspensión frontal

Sistema de suspensión posterior

Para el diseño de suspensión posterior, usamos un mecanismo de balancín pivotado en la parte central posterior del chasis, este mecanismo, el cual se adapta a la configuración posterior de vehículo, el cual tiene una rueda posterior, evitando el uso de un mecanismo diferencial, lo cual representa pérdidas por fricción en la transmisión del movimiento.

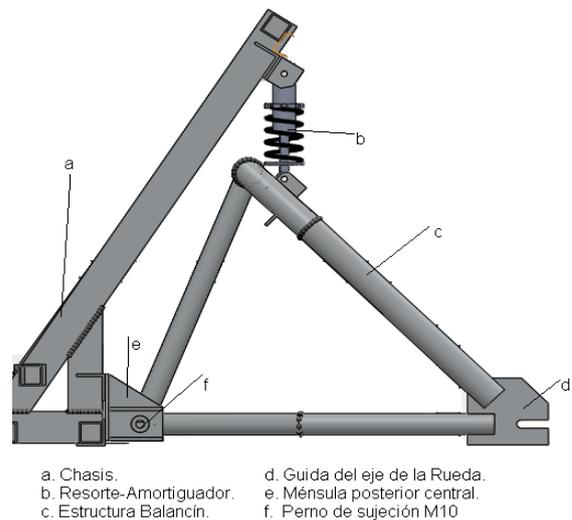


Figura 4.2.2 Sistema de suspensión posterior

4.3 Sistema de frenos

La acción de frenar es el uso de una fuerza controlada para reducir la velocidad del vehículo, detenerlo; o para mantener el vehículo inmóvil, cuando se aplica la fuerza de freno, esta desarrolla rozamiento que es la resistencia al movimiento.

En las dos ruedas delanteras se tienen frenos de disco, las cuales son accionados mecánicamente por palancas ubicadas en los manubrios, en cambio en la rueda posterior se tiene dos mordazas tipo U que rozan el aro de la llanta accionados mecánicamente, con palancas, ubicadas en la parte delantera del chasis y otra situada en el manubrio izquierdo, como se muestra en la figura siguiente.

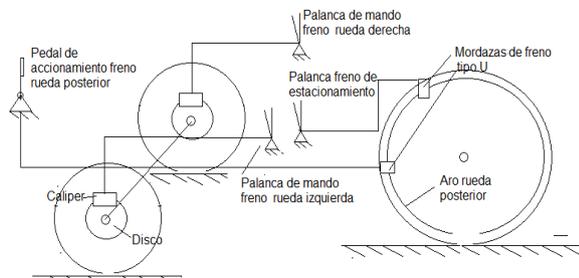


Figura 4.3 Esquema de la configuración del sistema de frenos

4.3 Sistema de transmisión de energía humana

La posición del conductor permite el uso de los pies para accionar los pedales que mediante una cadena transmite el movimiento directamente a la rueda motriz, generando la tracción necesaria para mover el vehículo. Algunas de las partes con la que cuenta nuestro sistema están ilustradas y detalladas a continuación.

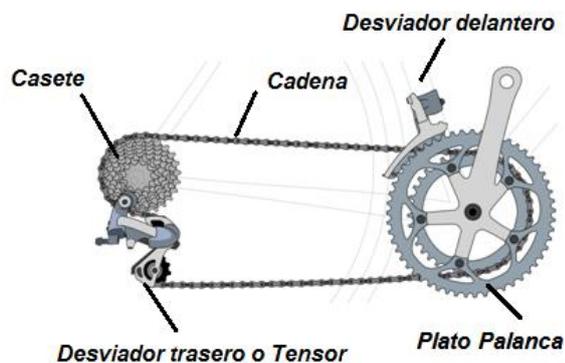


Figura 4.3 Esquema del sistema de transmisión mecánico.

5. Estimación de la energía solar

Para conocer la dirección de incidencia de los rayos solares sobre el lugar y en la fecha de la competencia, se necesitaron los datos geográficos, la posición relativa del Sol, el amanecer y la duración del día en la zona de la competencia, estos datos se encuentran tabulados en la siguiente tabla.

	Día 1	Día 2	Día 3
Fecha	30-Sep.	1-Oct.	2-Oct.
Día (D)	273	274	275
Dirección	N-S	O-E	S-N
Latitud al inicio (ϕ_0) (°)	-20,21	-23,65	-22,45
Latitud al final (ϕ_f) (°)	-23,65	-22,45	-20,22
Latitud promedio (ϕ_p) (°)	-21,93	-23,05	-21,34
Declinación Solar (δ) (°)	-3,43	-3,83	-4,22
Zenit mínimo (ϕ_{min}) (°)	-18,50	-19,22	-17,11
Amanecer (SR)	7,37	7,37	7,27
Duración del día (DL)	12,29	12,30	12,30

Tabla 5.1 Datos necesarios la estimación

Donde δ es la latitud de la Tierra, en donde los rayos del Sol inciden perpendicularmente, se calcula con la siguiente fórmula.

$$\delta = 23.5 \text{ sen } * 180(D - 82)/182.5$$

La dirección con la que inciden los rayos solares con respecto a la vertical, al medio día, viene dado por la fórmula.

$$\phi_{min} = \phi_p - \delta$$

Encontramos el ángulo de incidencia de la radiación con respecto a la vertical, dividiendo en intervalos de tiempo de 5 minutos durante la hora de inicio y fin de la carrera, y considerando el ángulo de inclinación de los paneles (θ) y el sentido de recorrido del vehículo, con la fórmula siguiente.

$$\phi = 90^\circ - (90^\circ - |\phi_{min}| \pm \theta) \text{ sen } \frac{180(T - SR)}{DL}$$

La potencia total que entrega el arreglo fotovoltaico se lo estima con la siguiente fórmula.

$$P \text{ total} = \# \text{celdas} \times P \text{ pro.} \times \cos(\phi)$$

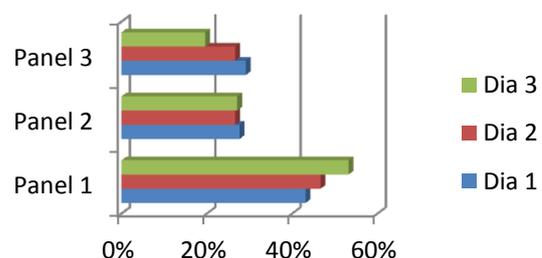


Figura 5.1 Representación de la potencia entregada por los paneles

Graficando los datos tenemos.

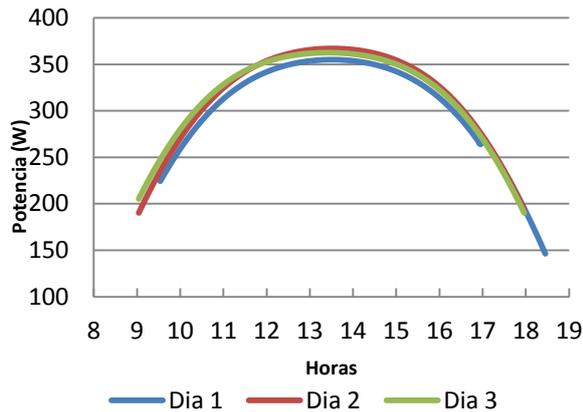


Figura 5.1 Representación de la potencia entregada por los paneles

La energía estimada la calculamos sumando las áreas bajo la curva encontramos que en los tres días podemos contar con un estimado de 8.39 KWh.

6. Diseño del sistema eléctrico

6.1. Arreglo fotovoltaico.

El arreglo fotovoltaico está conectado en serie para obtener el voltaje necesario para cargar las baterías y alimentar de energía al sistema de potencia; en la carrocería de nuestro vehículo caben 15 filas de 7 celdas cada una, una fila llamado alternativo el cual se conecta o desconecta con los paneles 1, 2, 3 dependiendo de las condiciones de radiación, para aumentar el voltaje de alimentación de la fuente. En la siguiente figura se muestra la configuración del arreglo fotovoltaico en el vehículo.

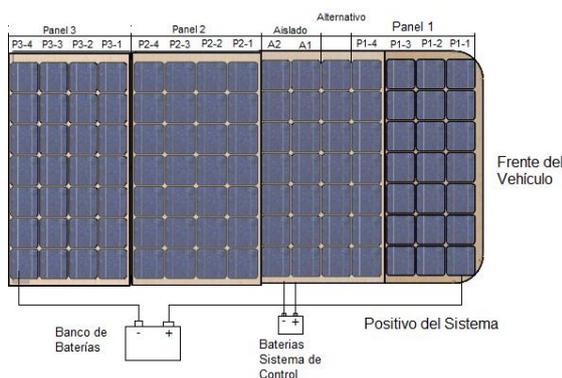


Figura 6.1 Configuración de los paneles fotovoltaicos

	Mínimo	Máximo
Potencia (W)	378	430,5
Voltaje circuito abierto (V)	64,05	62,205
Corriente de cortocircuito (A)	8,18	8,78
Voltaje de operación (V)	51,24	52,5
Corriente de operación (A)	7,51	8,14

Tabla 6.1 Características eléctricas del arreglo fotovoltaico.

6.2 Baterías

La función principal del banco de baterías es almacenar la energía obtenida del Sol y estabilizar el voltaje de operación del sistema eléctrico de potencia. Existe variedad de tipos de batería, pero una de las más eficientes son las del tipo de iones de litio, pues tienen alta eficiencia energética, las opciones que tenemos de baterías de iones de litio son las siguientes.

Voltaje (V)	Capacidad (Ah)	Energía (Wh)	Peso (Kg)	Densidad energética (Wh/Kg)
48	10	480	5,5	87,27
36	16	576	5,5	104,73
48	20	960	12	80
48	30	1440	8	80

Tabla 6.2 Características técnicas del arreglo fotovoltaico.

La batería más conveniente es la que tiene mayor densidad energética, esta decisión va de la mano con el voltaje de operación del sistema que queda definido en 36 V.

Tenemos que llegar a un equilibrio entre el peso y la energía, es por esto que decidimos ocupar 2 baterías con esta capacidad.

6.3 Distribución de la energía

En el esquema de bloques mostrado a continuación se indica de forma jerárquica el proceso de conversión de energía y su distribución en los siguientes sistemas del vehículo

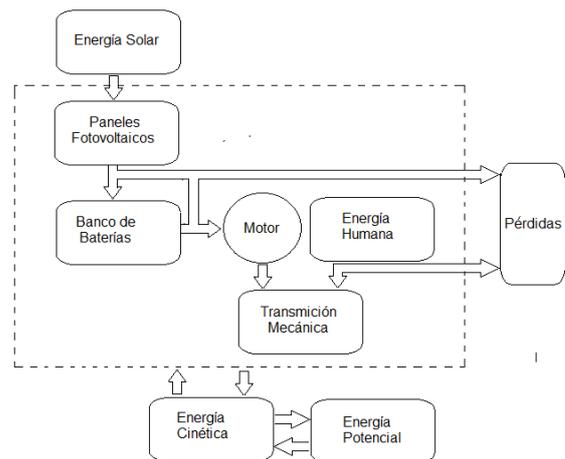


Figura 6.2 Distribución de la energía eléctrica.

La conexión eléctrica de los componentes principales del sistema de potencia del vehículo solar, el cual está configurado para un voltaje de operación de 36 voltios, se muestra en la siguiente figura.

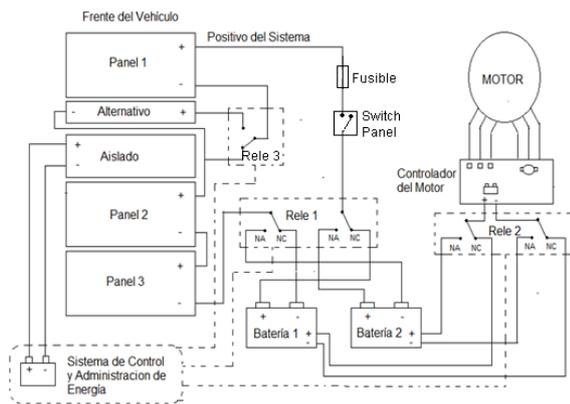


Figura 6.3 Diagrama eléctrico general.

6.3 Sistema de control

Las tareas de funcionamiento del vehículo como son el control de velocidad del motor, desconectar la alimentación eléctrica del motor al aplicar los frenos del vehículo, mantener la velocidad constante, cambiar el sentido de giro del motor eléctrico para accionar la reversa del vehículo son realizadas por el controlador del vehículo.

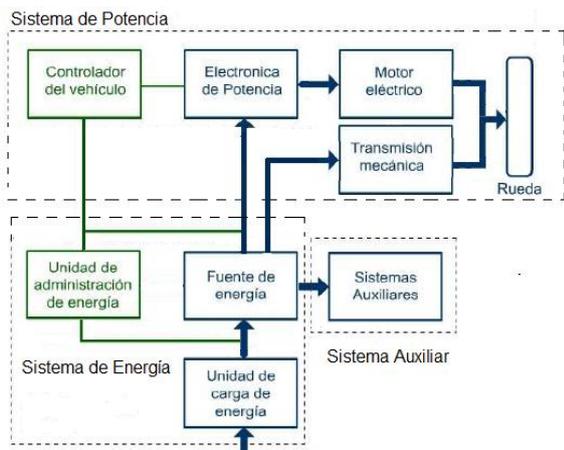


Figura 6.4 Esquema de control y administración de la energía.

La administración de la energía eléctrica es lograda con un banco de relés magneto mecánicos, que permiten realizar la conmutación para carga y descarga de las baterías.

5. Conclusiones y recomendaciones

Conclusiones

- Con este trabajo de tesis se ha logrado realizar la investigación, diseño, y construcción de un vehículo híbrido el cual utiliza la energía del sol y la energía humana para efectuar su movimiento. Este vehículo bautizado con el nombre Inti-Invictus constituye un proyecto de

investigación y desarrollo tecnológico el mismo que fue implementado en las instalaciones de la Facultad de Ingeniería Mecánica y Ciencias de la Producción de la ESPOL.

- Este proyecto desarrollado con la ayuda del equipo Inti-Invictus conformado por estudiantes de la ESPOL, profesionales politécnicos y Profesores de la Facultad de Ingeniería Mecánica y Ciencias de la Producción ha permitido desarrollar este trabajo, esto es una muestra del desarrollo a través de la disminución de las divisas, creando nuestra propia tecnología, impulsando la investigación en el campo de las energías renovables las cuales constituyen una alternativa energética limpia y útil para el desarrollo.

Recomendaciones

- Para que el proyecto se lleve a cabo de forma correcta, sin demoras o contratiempos, una vez obtenido el financiamiento, se debe realizar una metodología y planificación del mismo, evaluando todos los aspectos que intervienen en la realización del proyecto como son la investigación, diseño, construcción, implementación, pruebas, etc.
- Contar con un equipo de trabajo organizado metódico y comprometido con el desarrollo del proyecto, que trabaje en cada área del mismo de forma paralela, permitiendo esto la interacción de todas las áreas del proyecto.
- Es de mucha ayuda y representa una gran ventaja competitiva el aprovechamiento de la energía del viento, aplicándola al movimiento del vehículo. Pero las condiciones variables e incontrolables del viento representan un problema por lo que es recomendable, al usar un sistema de aletas, aumentar el grado de libertad de estas a 180° e implementar un sistema de control automatizado para aprovechar el impulso del viento.

- Para un mejor desempeño del vehículo considerando que las cargas aerodinámicas se incrementan con el cuadrado de la velocidad, y que las formas angulares presentan una mayor resistencia aerodinámica, es por esto que, se recomienda usar formas curvas para dar la forma del exterior del vehículo solar.

- Por tratarse más que todo de una competencia tecnológica, es necesario el desarrollo de la investigación en varios campos del conocimiento aplicados al desarrollo del vehículo solar, esto es el uso de materiales nuevo de gran resistencia y de bajo peso, el uso eficiente de energía.

6. Bibliografía

- [1] DOUGLAS R. CARROLL, “The winning solar car: a design guide for solar race car teams”, Editorial SAE International.
- [2] ERIC F. THACHER, “A solar car primer”, Editorial NOVA
- [3] JOSEPH EDWARD SHIGLEY, LARRY D. MITCHELL, “Diseño en ingeniería mecánica”, Editorial McGraw-Hill.
- [4] M IBAÑEZ PLANA; J. R. ROSELL POLO, J. I. ROSELL URRUTIA, “Tecnología solar”, Editorial Mundi-Prensa.
- [5] GILLESPIE T. D. “Fundamentals of Vehicle Dynamics”, Editorial SAE International.
- [6] FRANCIS M. VANEK, LOUIS D. ALBRIGHT, “Energy Systems Engineering, Evaluation & Implementation”, Editorial McGraw-Hill.
- [7] NORMAN S. NISE, “Sistemas de Control para Ingenierías”, Tercera edición, Editorial CECSA.
- [8] MARCO PAZMIÑO B., “Energía Solar, Teoría y Experimentos”, ESPOL.
- [9] M. CARLOS TOBAJAS VÁSQUEZ, “Energía Solar Fotovoltaica”, Editorial CEYSA.