

308917

6  
zey



**UNIVERSIDAD PANAMERICANA**

**ESCUELA DE INGENIERÍA**  
Con Estudios Incorporados a la  
Universidad Nacional Autónoma de México

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN  
DE UN PANEL SOLAR FOTOVOLTAICO  
PARA VEHÍCULOS DE COMPETENCIA**

**T E S I S**

Que para Obtener el Título de:

**INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA**

Área: Ingeniería Mecánica

Presenta:

**DANIEL AMADOR ORTEGA**

Director: Fis. Mariano Romero Valenzuela



## **UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso**

### **DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

## **DEDICATORIA**

**A DANIEL AMADOR JIMÉNEZ  
Y GEORGINA ORTEGA DE AMADOR.**

A esas dos hermosas personas que me trajeron al mundo y que sacrificaron tanto de su vida para hacer feliz la mía. No existen palabras para expresarles todo el agradecimiento, la admiración, el cariño y el respeto que siento por ustedes. Los amo.

**A Mis Hermanas: GEORGINA Y CLAUDIA.**

Por todo lo que hemos vivido juntos y lo mucho que he aprendido de ustedes. Las quiero mucho y les debo gran parte de lo que soy.

**A ti ROCÍO:**

Por el inmenso amor que siento por ti. Soy feliz de estar a tu lado, eres la fuerza que me inspira a ser mejor cada día.

Te adoro flaca.

## *AGRADECIMIENTOS*

**Al Dr. Jaime Gómez de Silva.** Por todo el tiempo y los conocimientos que me brindó en la realización de esta tesis. Eres un buen amigo.

**A Beatriz Padilla y a la Escudería Tonatiuh.** Por todo lo que pasamos juntos en este increíble proyecto.

**A León IV Aillaud González.** Por toda la lata que te di en la impresión de la tesis. Gracias amigo.

**Al Fis. Mariano Romero Valenzuela.** Por su ayuda en la parte final de esta tesis.

**A Maestros, Compañeros, Familiares y Amigos.** Por que todos en conjunto me ayudaron a formar mi educación y mi carácter.

**¡ MIL GRACIAS !**

# ÍNDICE

<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	1
<b>1.- EL SISTEMA ELÉCTRICO PRIMARIO DE UN AUTOMÓVIL SOLAR DE COMPETENCIAS</b> .....	21
1.1.- EL SUBSISTEMA PROPULSOR.....	21
1.1.1.- EL MOTOR ELÉCTRICO.....	21
1.1.2.- EL CONTROLADOR.....	30
1.2.- EL SUBSISTEMA DE ALMACENAMIENTO.....	32
1.2.1.- BATERÍA PLOMO-ÁCIDO.....	38
1.2.2.- BATERÍA NÍQUEL-CADMIO.....	42
1.2.3.- BATERÍA NÍQUEL-HIERRO.....	43
1.2.4.- BATERÍA PLATA-ZINC.....	45
1.2.5.- BATERÍA SODIO-AZUFRE.....	46
1.2.6.- BATERÍA ZINC-BROMO.....	47
1.2.7.- BATERÍA NÍQUEL-ZINC.....	48
1.2.8.- BATERÍA NÍQUEL-HIDRURO DE METAL.....	48
1.2.9.- BATERÍA ZINC-AIRE.....	48
1.2.10.- BATERÍA LITIO.....	49
1.2.11.- VOLANTES DE INERCIA.....	49
1.2.12.- CELDAS DE COMBUSTIBLE.....	52
1.3.- SUBSISTEMA DE SUMINISTRO.....	55
1.4.- ARNÉS DE INTERCONEXIÓN.....	55
1.4.1.- CONDUCCIÓN.....	56
1.4.2.- SUJECIÓN.....	56
1.4.3.- INTERRUPCIÓN Y PROTECCIÓN.....	56
<b>2.- EL PANEL SOLAR, ANÁLISIS</b> .....	58
2.1.- LA FOTOCELDA.....	58
2.1.1.- HISTORIA.....	58
2.1.2.- FUNCIONAMIENTO.....	60
2.1.3.- MANUFACTURA.....	74
2.1.4.- SELECCIÓN.....	79
2.2.- INTERCONEXIÓN.....	80
2.3.- OPTIMIZACIÓN Y RASTREADORES DE POTENCIA PICO.....	82
<b>3.- EL PANEL SOLAR, DISEÑO</b> .....	86

3.1.- CONDICIONES DE CARGA Y OPERACIÓN .....	86
3.2.- CÁLCULO DEL ARREGLO.....	102
<b>4.- EL PANEL SOLAR, CONSTRUCCIÓN.....</b>	<b>105</b>
4.1.- SUBSTRATO.....	105
4.2.- ADHESIÓN .....	108
4.3.- RECUBRIMIENTO.....	109
4.4.- ENSAMBLE.....	110
4.5.- RESULTADOS.....	114
<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>115</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>121</b>
<b>ANEXO .....</b>	<b>124</b>

"Los seres humanos y la naturaleza se encuentran en un curso de colisión. Las actividades humanas ahora amenazan sistemas biológicos y geofísicos de los que dependemos para obtener comida, energía y un ambiente tolerable. Estas actividades, si siguen siendo llevadas sin cuidado, pondrán en un serio riesgo al futuro que deseamos para nosotros y para las próximas generaciones".

Dr. Henry W. Kendall  
Premio Nobel de física  
Conferencia "*Solar and Electric Vehicles*"  
Octubre de 1992, Boston, MA.

## INTRODUCCIÓN

La evolución de la humanidad ha estado indisolublemente ligada a la utilización de la energía en sus distintas formas. La búsqueda de fuentes de energía que optimicen el trabajo, ha sido lo que, desde un principio, ha movido a la humanidad hacia el progreso. Cada vez que el hombre ha encontrado alguna nueva fuente de energía o creado un procedimiento distinto para aprovecharla, se han experimentado grandes avances.

El descubrimiento del fuego, su control y producción marcan el primer acontecimiento importante en la historia de la sociedad. El aprovechamiento de la fuerza de tracción de los animales permitió el desarrollo de la agricultura; fue así como algunos pueblos nómadas se asentaron y establecieron las bases para el surgimiento de las antiguas culturas. La utilización de la energía del viento mediante la invención de la vela dio un fuerte impulso a la navegación, al comercio y al intercambio de ideas y conocimientos entre los pueblos de la antigüedad. El empleo de la energía cinética de las corrientes de agua, gracias a la rueda hidráulica, liberó al hombre de una gran cantidad de tareas que requerían de un gran esfuerzo físico y dio lugar a la creación de los primeros talleres y fábricas, remotos antecedentes de la modernas plantas industriales.

Pero seguramente cuando el hombre descubrió el fuego, o cuando en 1767, James Watt, inventó el primer motor de vapor que desató la revolución industrial, y aún más tarde, cuando el petróleo y los combustibles fósiles tomaron su lugar como las fuentes de energía más importantes, nadie imaginaba las repercusiones ambientales que el desarrollo tecnológico tendría en nuestros días.

Claro está que a la era actual podría llamarse "la era del petróleo", aunque algunos consideran que debería llamarse "la era de la electrónica", o "la era atómica", sin embargo los hechos son que el 88 % de la energía comercial que se consume en el planeta se deriva de combustibles fósiles<sup>1</sup>, y en México, esta cifra

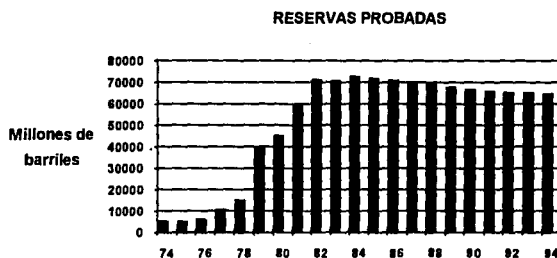
---

<sup>1</sup>MEADOWS D.L., MEADOWS D.H., RANDERS J., Beyond the limits, U.S.A. Chelsea Green Publishing Co., 1992.



asciende al 90 %<sup>2</sup>. En sólo 20 años, de 1970 a 1990, la economía mundial quemó 450 mil millones de barriles de petróleo, 90 mil millones de toneladas de carbón y 1100 billones de metros cúbicos de gas natural<sup>3</sup>. La conferencia mundial de energía, proyectó en 1989 que, a la tasa contemporánea de crecimiento poblacional y de capital, las demandas energéticas mundiales aumentarían en un 75 % para el año 2020. Todo esto parecería no ser un asunto de qué preocuparse si no es porque, a la tasa actual de consumo, se ha estimado que el petróleo durará unos 40 años más, el gas natural 50 años y el carbón, menos de 200 años.

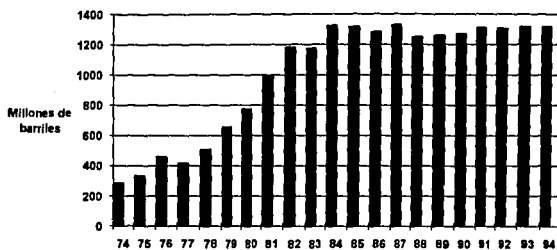
Si se estudia el caso de México, según datos proporcionados en el anuario estadístico de Pemex correspondiente a 1994, se notará que el problema es similar y quizá más grave tomando en cuenta que el petróleo ocupa un lugar primordial en la economía del país.



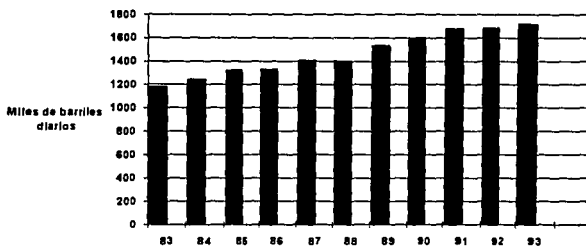
<sup>2</sup>FIGUEROA N.L., Discurso Inaugural XIII Seminario Nacional de la Asociación de Técnicos y Profesionistas en Aplicación Energética, México, 1992.

<sup>3</sup>MEADOWS, op. cit. 1.

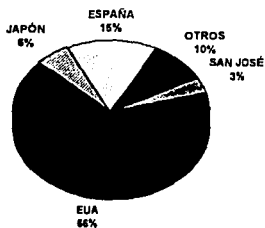
### PRODUCCIÓN DE HIDROCARBUROS



### CONSUMO NACIONAL APARENTE DE PRODUCTOS PETROLÍFEROS



### EXPORTACIONES DE PETRÓLEO



De aquí se derivan dos grandes problemas de la humanidad: La contaminación ambiental y la exagerada dependencia de la economía mundial en estos energéticos no renovables.

Respecto a la dependencia en los combustibles fósiles, basta con imaginar lo que sería de un país si en este momento se agotara la última gota de petróleo. Si bien el mundo no sufre de una carestía de combustibles fósiles actualmente, sí se debe prever, que esta futura carestía, producirá un alza en el precio de los hidrocarburos, causando un fuerte impacto económico a nivel mundial, por lo tanto es de vital importancia que se utilicen los combustibles fósiles en el desarrollo de nuevas fuentes de energía renovables.

En cuanto a la contaminación ambiental, un panorama aún más preocupante, es ya una realidad en nuestros días.

Desde 1860, cuando se hicieron estadísticas confiables, hasta 1984, cerca de 333 mil millones de toneladas de gases se han arrojado a la atmósfera, y actualmente se arrojan 6 mil millones de toneladas por año<sup>4</sup>. El bióxido de carbono está a un nivel de 353 ppm<sup>5</sup>. La contaminación del aire es muy grave y es el causante de serios problemas.

El primero de ellos es la lluvia ácida. Ésta ocurre cuando el bióxido de azufre y el óxido de nitrógeno, que son emitidos cuando se queman combustibles fósiles, sufren una transformación química al combinarse con formaldehídos en la atmósfera, produciendo diversos ácidos. Éstos caen a la tierra al ser absorbidos por el agua de la lluvia, la nieve, e incluso la niebla. La lluvia ácida tiene graves efectos en la agricultura y en la pesca, contamina el agua afectando los suelos y un sinnúmero de ecosistemas; también es responsable de daños materiales por corrosión en edificios, monumentos, autos, etcétera. Se calcula que sólo en Europa, la lluvia ácida produce daños por 20,000 millones de dólares<sup>6</sup>.

El segundo, recientemente revelado por la NASA, es el alarmante crecimiento del hoyo en la capa estratosférica de ozono, que es ya, 4 veces el tamaño del territorio de los Estados Unidos y que cubre parte del territorio de

<sup>4</sup>SHAFFER John, *Alternative Source Book, U.S.A., Real Goods, 1992, (7a ed.)*, p. 9.

<sup>5</sup>Ibidem.

<sup>6</sup>DADD Debra, *Nontoxic, Natural & Earthwise, U.S.A., Tarcher/Perigee, 1990*, p. 29.

Sudamérica, específicamente el puerto chileno de Punta Arenas con una población de 115, 000 habitantes<sup>7</sup>. La capa de ozono está siendo destruida por químicos hechos por el hombre, cuya base son cloro y bromo. Se calcula que sólo una molécula de algún cloruro puede destruir 100 000 moléculas de ozono. El ozono representa el 0.0005% de nuestra atmósfera; si todo el ozono que rodea a la tierra se pudiera poner en una sola capa, ésta sería de aproximadamente 7mm de espesor<sup>8</sup>, y sin embargo, este delgado escudo es nuestra única protección contra radiaciones que podrían acabar con gran parte de la vida en el planeta. Este hoyo deja pasar las muy peligrosas radiaciones B de los rayos ultravioleta, contra las cuales la mayoría de los seres vivos tienen muy poca, si no es que nula, protección.

Un tercer problema son los efectos en la salud de los seres humanos por la respiración de contaminantes, que incluyen: numerosas enfermedades respiratorias, como enfisemas, bronquitis y asma; cambios bioquímicos importantes en los niños, cáncer, reducción en la cantidad de oxígeno que llega a los tejidos del cuerpo, debilidad en las contracciones del corazón, efectos sobre la función mental, la agudeza visual, los reflejos y la capacidad de aprendizaje, efectos en el sistema nervioso y hematológico, jaquecas, enfermedades en los ojos y se cree que el síndrome de muerte repentina en niños recién nacidos está altamente relacionado también.

Otro problema más, y quizá el más grave de todos, es el calentamiento global producido por el efecto invernadero. En un invernadero, la energía del sol que pasa por el cristal, queda atrapada, provocando que el clima dentro del invernadero sea más caliente y que las delicadas semillas germinen. En la tierra, el enorme invernadero, no está hecho de cristal, sino de gases como son los óxidos de carbono, el metano, los óxidos de nitrógeno y azufre, los clorofluorcarbonos, el vapor de agua y partículas suspendidas en el aire, entre las que se encuentra el plomo. El calentamiento mundial pone en peligro a una gran parte de los sistemas biológicos, produce sequías en algunas regiones y aumento de precipitación en otras, afectando seriamente la agricultura; y es muy probable que produzca grandes inundaciones. En este siglo la temperatura de la tierra aumentó 1 grado centígrado, lo que incrementó el nivel de los océanos

---

<sup>7</sup>SHAEFFER, op.cit. 4, p. 6.

<sup>8</sup>DADD, op. cit. 6, p 27.

por 15 cm. Se espera que dentro de los siguientes 40 años la tierra aumente su temperatura 2 grados más, lo que provocaría 30 cm. de incremento en el nivel del mar<sup>9</sup>. Con esto muchos puertos quedarían bajo las aguas.

A estos problemas se suman muchos otros que agravan la situación: la explotación desmesurada de los recursos naturales, el agotamiento del suelo, reduciendo su productividad, el peligro de extinción de un tercio de las especies que habitan en la tierra, la deforestación que avanza con un ritmo alarmante, y que de continuar así representará la desaparición de las selvas tropicales y los bosques antes del final del próximo siglo<sup>10</sup>, los derrames de petróleo en los mares y la destrucción de los ecosistemas acuáticos, la contaminación de los mantos acuíferos subterráneos, los desastres nucleares ocurridos en *Chernobyl* y en *Three Mile Island* y las guerras por intereses petroleros como la de Irak, en la que se incendiaron los pozos kuwáticos arrojando grandes cantidades de gases a la atmósfera.

Este cuadro que parece propio de un pasaje del Apocalipsis, desgraciadamente no se lee en la Biblia sino en los periódicos, pero existen ya dos soluciones tecnológicamente viables para estos problemas: La utilización de fuentes alternativas de energía, y la eficiencia en el uso de la energía.

Por eficiencia se entiende producir los mismos bienes y servicios con la menor cantidad de energía posible, o bien, producir la mayor cantidad posible de bienes y servicios para una cantidad determinada de energía. La eficiencia es inversamente proporcional a las pérdidas en un sistema, es decir, que en un sistema donde las pérdidas tienden a ser pequeñas, la eficiencia tiende a ser mayor y viceversa.

Es una pena que la cultura actual no esté familiarizada con este concepto, sin embargo, y sobre todo en lo que se conoce como el primer mundo, está despertando el interés por la eficiencia de una manera efervescente. Algunos piensan que Japón y Alemania, son países mágicos, por la manera en que se levantaron después de la devastación sufrida en la Segunda Guerra Mundial, hasta llegar a ser dos de las economías más fuertes del mundo actual en menos

<sup>9</sup>Union of Concerned Scientists, "The Global Warming Debate, answers to controversial questions", U.S.A, 1990.

<sup>10</sup>NorthEast Sustainable Energy Association, Solar and Electric Vehicles 92, U.S.A. US Department of Energy, 1992, Volumen I.

de 45 años, pues resulta ser que su magia no es otra cosa que la eficiencia. Si Estados Unidos, que es el mercado de consumo más grande del planeta, utilizara la energía tan eficientemente como Japón o Alemania, ahorraría ¡200 mil millones de dólares anualmente!<sup>11</sup>. Se debe imaginar lo que la eficiencia podría hacer por los países en vías de desarrollo, y en concreto, por México.

Existen ya en el mercado una variedad enorme de productos de uso común que tienen alta eficiencia, amigables ecológicamente hablando, que de ninguna manera representan un sacrificio en el *modus vivendi* de la cultura moderna, y que de usarse, representarían un ahorro del 75 % en el consumo de la energía<sup>12</sup>. Cambiar los ineficientes focos incandescentes por los super eficientes focos compactos fluorescentes; el excusado, las regaderas y las diferentes tomas de agua convencionales de alto gasto, por las de bajo gasto; reciclar vidrio, papel, plástico y los metales; usar jabones y limpiadores no tóxicos y biodegradables; usar aparatos electrodomésticos de bajo consumo de energía, como refrigeradores, bombas de agua, etcétera.

Se calcula que el 50% de la basura que se tira en una ciudad es reciclable; reciclar papel, usa 60 % menos energía que fabricarlo, si se reciclara todo el papel que se usa, se salvarían unos 500,000 árboles de ser cortados cada semana<sup>13</sup>.

Por donde se vea, la eficiencia lo único que produce es bienestar. En México, es de suma importancia que se adopte y se difunda entre la población, la industria y las instituciones de educación, e incluso que se tome como política económica del Gobierno.

Respecto a las fuentes alternativas de energía, hay también mucho de que hablar. El sol, el agua y el aire, representan enormes fuentes de energía gratuita, no contaminante, disponible para todos y eterna; digo eterna, puesto que el día que se acabe alguna de ellas, también se acabará la humanidad.

El agua se ha utilizado ya desde tiempo atrás para la generación de electricidad en las plantas hidroeléctricas, la idea de utilizar molinos movidos

---

<sup>11</sup>SHAEFFER, op. cit. 4, p. 9.

<sup>12</sup> *Ibidem*.

<sup>13</sup>SHAEFFER, op. cit. 4, p. 107.

por el agua ha existido por siglos, pero el desarrollo de la turbina hidráulica por Lester Pelton en 1880 impulsó aún más la utilización de las caídas de agua para la generación de electricidad.

El viento, es una de las fuentes alternativas de energía más antiguas y más benignas para el ambiente. Desde tiempos remotos se usó la fuerza del viento para mover embarcaciones. En Holanda por ejemplo, se usó para mover los enormes molinos que bombeaban el agua para ganarle terreno al mar. La energía del viento ha tomado un gran auge en los últimos 10 años para la generación de electricidad, entre 1981 y 1988 cerca de 1 500 MW se han instalado en California, donde la mayor parte del aprovechamiento de la energía eólica ha tenido lugar<sup>14</sup>. Este tipo de energía está dentro de las más económicas en la generación de electricidad y es ideal para lugares remotos de difícil acceso para las líneas de transmisión, costas, montañas y grandes planicies.

Existen otros tipos de energía como la geotérmica, que es la energía calorífica que se encuentra atrapada en los substratos de la tierra, sin embargo, es el sol la fuente alternativa de energía más importante que hay, por lo que a continuación explicaré:

El consumo actual de energéticos produce 5 Terawatts (5 billones de watts) diariamente, con lo que se satisfacen las necesidades de la humanidad hasta el momento<sup>15</sup>. La potencia total del sol es de  $2.81 \times 10^{23}$  KW, es decir, que en un segundo, suficiente energía es liberada para satisfacer las necesidades energéticas de la humanidad por 2000 años<sup>16</sup>. La tierra recibe menos de una millonésima parte de esta energía,  $1.52 \times 10^{18}$  KWh/año, y aún así las necesidades energéticas de la humanidad son menos del 0.1 % de esta cantidad<sup>17</sup>. Cada metro cuadrado de la tierra recibe alrededor de 1 KW, a medio día, totalmente gratis, ¿por qué no se aprovecha?, el hecho es que algunos países empiezan a tomar conciencia de este potencial, pero aún falta mucho por hacer.

---

<sup>14</sup>UCS, "Cool Energy, the renewable solution to global warming", U.S.A, 1992.

<sup>15</sup>MEADOWS, op. cit. 1.

<sup>16</sup>SOLAREX, "Discover the Newest World Power", U.S.A., 72021-1, 1992.

<sup>17</sup>Ibidem.

El sol, siempre ha sido algo muy importante para todas las culturas e incluso muchas llegaron a considerarlo como un dios. Resulta difícil saber exactamente cuándo fue que el hombre comenzó a utilizar la energía que emana del gran astro para aplicaciones específicas.

Los antiguos griegos y chinos incorporaron diseños solares pasivos en sus construcciones 500 años A.C.. Leonardo Da Vinci, propuso el uso de la energía solar para propósitos industriales, en 1515 D.C.. Sin embargo, fue hasta 1839 que se descubrió el primer fenómeno fotovoltaico por el físico francés Alexandre Edmond Becquerel. De este descubrimiento y de la historia de las celdas fotovoltaicas se hablará en capítulos posteriores, pero gracias a este descubrimiento, hoy se utiliza la energía solar en un gran número de aplicaciones: satélites, barcos, plantas generadoras de electricidad, en casas autosuficientes, en lugares remotos donde es difícil que lleguen las líneas de transmisión, y en una variedad enorme de aplicaciones pequeñas como calculadoras, relojes, lámparas de mano, recargadores, etcétera.

Hasta ahora se ha hablado de dos grandes problemas de la humanidad, derivados del consumo de combustibles fósiles, y de dos alternativas de solución: la optimización de los recursos energéticos, mediante su uso racional y eficiente, y el empleo de fuentes alternativas de energía; pero ¿qué relación tiene todo esto con el desarrollo de un panel fotovoltaico para un auto solar de competencias?

Para responder a esta pregunta se debe entender muy bien el papel de un automóvil solar de competencias.

Si se entiende un automóvil solar como aquel vehículo que es impulsado únicamente por celdas fotovoltaicas, entonces los automóviles solares no son los que se estarán conduciendo en un futuro, ya que en realidad no son nada prácticos, son excesivamente caros, complicados, frágiles y aún en el caso de que se lograran obtener celdas solares con 100 % de eficiencia, la energía que podría captar un vehículo de tamaño regular sería muy poca para cubrir las necesidades de transporte actuales, además de que la luz solar no siempre está presente.

La verdadera importancia de un automóvil solar no radica pues en un futuro transporte comercial, sino en lo siguiente:



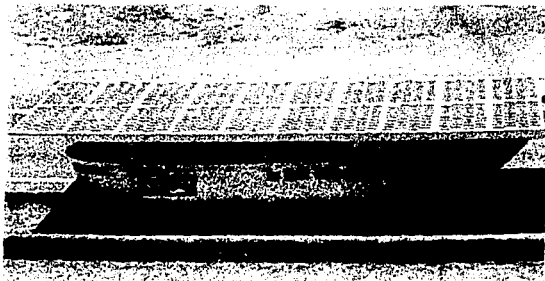
⊙ Un automóvil solar es un verdadero proyecto de investigación y desarrollo de adelantos tecnológicos en aerodinámica, materiales, fotoceldas, electrónica, motores, baterías y llantas, que pueden ser posteriormente aplicados a los vehículos eléctricos para hacerlos competitivos frente a los vehículos de combustión interna y acelerar así, su aceptación en el mercado. Se debe recordar que una gran parte de los avances tecnológicos incorporados hoy en los vehículos de combustión interna, que nos transportan cotidianamente, fueron desarrollados en prototipos para competencias automovilísticas.

⊙ Un automóvil solar, resalta los términos "eficiencia" y "energía solar" de una manera por demás atractiva, lo que ha provocado un efervescente interés por estos términos entre los ingenieros. El automóvil solar, es capaz de recorrer enormes distancias y viajar a una velocidad promedio de 70 km/h con una potencia menor a 1 kw, potencia equiparable a aquella que se podría encontrar en cualquier aparato electrodoméstico, como un secador de pelo. La idea de realizar grandes cantidades de trabajo utilizando muy poca potencia, es exactamente lo que se entiende por eficiencia. Esto se logra, gracias a que el auto solar utiliza en su construcción materiales super ligeros y resistentes como lo son el Kevlar y la fibra de carbono a manera de *sandwich* con panal de abeja de fibra de aramida, logrando así obtener el menor peso para una estructura con una resistencia que cumple con los requisitos de seguridad, también, se reducen al máximo las pérdidas mecánicas por fricción en rodamientos, y en la transmisión, se tiene una forma aerodinámica de muy bajo coeficiente de arrastre, se reducen también las pérdidas en la electrónica usando componentes de calidad y diseñando circuitos que manejen una adecuada relación voltaje-corriente y se utilizan llantas especiales para reducir la resistencia al rodamiento. El intentar reducir el peso, las pérdidas aerodinámicas, las mecánicas y las electrónicas es lo que hacen de este "laboratorio" un hervidero de tecnología.

⊙ Por último, un auto solar no solamente es una excelente propaganda para la eficiencia y el uso de la energía solar, sino también para la ingeniería como una verdadera opción para los estudiantes de preparatoria, y esto es muy importante, ya que el ingeniero es un recurso humano fundamental para el desarrollo industrial y económico de México.

La historia de los autos solares se remonta a 1982, cuando un visionario aventurero australiano, de origen danés, Hans Tholstrup, y el piloto de carreras

Larry Perkins, construyeron y manejaron el primer auto solar, el "*BP Quiet Achiever*" desde Perth hasta Sidney. Cruzar Australia de oeste a este por un total de 4058 Km. tomó 20 días con un promedio de velocidad de 23 km/h.



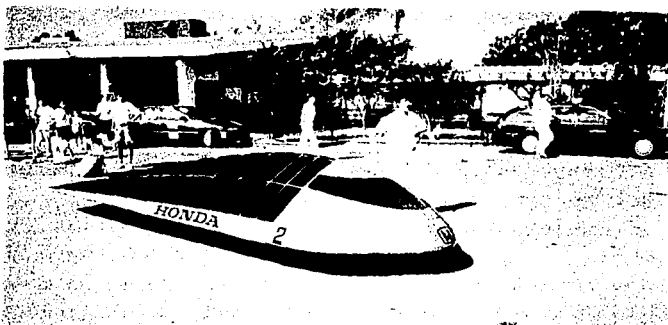
El propósito de este primer auto, fue el de mostrar al mundo tres cosas básicamente, que la energía solar era una fuente muy importante y suficientemente desarrollada para sustituir a los combustibles fósiles, que el transporte terrestre tiene alternativas no contaminantes como el vehículo eléctrico, y crear el interés en el mundo científico por el desarrollo de ambas.

El primer fruto de este propósito se dio en 1985, cuando el suizo Urs Muntwyler creó la primera competencia mundial de autos solares el "*Tour de Sol*", misma que creó una gran expectación y atrajo la mirada del mundo. Desde entonces esta carrera se celebra anualmente en Europa.

Posteriormente en 1987, el mismo Hans Tholstrup inició en Australia el "*World Solar Challenge*", competencia que se lleva a cabo cada tres años y en la que se recorre Australia de norte a sur, desde Darwin, latitud 12.5° sur, hasta Adelaide, latitud 35° sur, a través del desierto, por un total de 3000 km. Rápidamente esta competencia se convirtió en la más importante de todas, con la participación de un sinnúmero de universidades y empresas de todo el mundo, pero sobre todo de las principales compañías constructoras de autos, General Motors, Ford, Nissan, Honda, y Toyota.

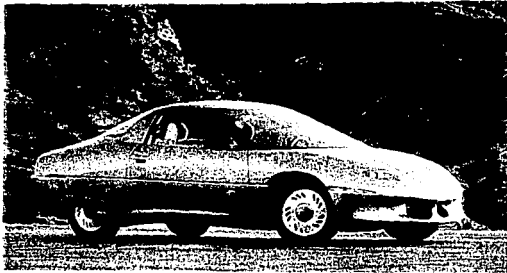
Inmediatamente después, en todo el mundo se empezaron a desarrollar competencias de autos tanto solares como eléctricos. Destacan el "Solar Cup USA" en 1988, el "Tour de Sol USA" en 1989, el "Sunrayce" en 1990 que es otra de las carreras que se ha vuelto muy importante, pues reúne a las principales universidades de Estados Unidos y está patrocinada por la General Motors, y por último y no menos importante la carrera "Solar & Electric 500" que es la primera carrera de vehículos eléctricos y se lleva a cabo anualmente en Phoenix, Arizona desde 1991.

Después del "BP Quiet Achiever" se han construido en el mundo cerca de 200 prototipos, con la participación de más de 20 países, promediando velocidades de 85 km/h y desarrollando velocidades pico de hasta 140 km/h, con presupuestos que llegan a los 10 millones de dólares por un sólo auto. Con estas cifras se puede obtener una idea del progreso que han tenido estos vehículos y del interés tan fuerte que hay en el desarrollo de estos "laboratorios".



A pesar de que la historia del automóvil eléctrico es más antigua que la de los automóviles solares, es evidente el gran auge que ha tomado la idea del vehículo eléctrico a partir de este tipo de competencias que definitivamente han logrado captar el interés del mundo científico, afocándolo al desarrollo del vehículo eléctrico.

La General Motors, después de haber ganado el *World Solar Challenge* en 1987 con su extraordinario automóvil solar, el "*Sunracer*", decidió diseñar y construir con miras comerciales, uno de los autos eléctricos más prometedores; el "*Impact*". Este automóvil es capaz de desarrollar velocidades de 160 km/h y tiene una autonomía de 190 km a un velocidad de 90 km/h.

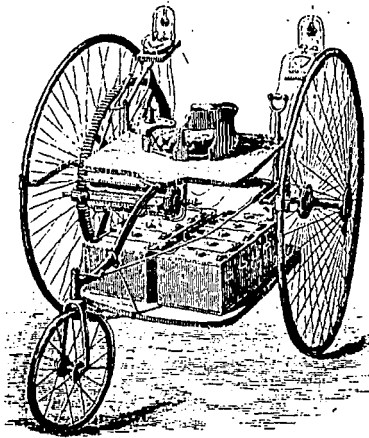


Actualmente casi todas las grandes constructoras de autos tienen prototipos de autos eléctricos que piensan lanzar al mercado próximamente si es que no lo han hecho ya.

El automóvil eléctrico se empezó a desarrollar casi un siglo después que el automóvil de vapor. Francia e Inglaterra fueron las primeras naciones en desarrollar el vehículo eléctrico. Aún que Davenport, en EUA, usó por primera vez un rudimentario e imperfecto motor eléctrico para operar un torno en 1835, y Mortiz Jacobi usó un primitivo motor eléctrico para impulsar un bote en 1838, en ambos casos la fuente de poder fue una batería primaria que acabaría su vida útil sin posibilidades de recarga.

Fue M. Gustave Trouvé de Francia quien por primera vez aplicó la batería secundaria recargable de plomo-ácido inventada por Gaston Planté en 1859, y el motor eléctrico de corriente directa mejorado, para una aplicación de transporte terrestre. En 1881, en una exhibición internacional de electricidad, Trouvé mostró un bote, un triciclo y un dirigible impulsados por motores eléctricos.

Posteriormente en 1882, los profesores Ayrton y Perry, en Inglaterra, mostraron un triciclo impulsado por baterías plomo-ácido similar al de Trouvé.



El primer norteamericano que construyó un auto eléctrico fue Andrew Riker en 1890; le siguió William Morrison en 1891. Rápidamente en el mundo circulaba la idea del surgimiento de lo que entonces llamaban "*The Horseless Age*" o la era sin caballo.

El desarrollo del vehículo eléctrico era prometedor para entonces, incluso en 1899 el francés Camille Jenatzy estableció el récord mundial de velocidad de 110.7 km/h en su automóvil "*La Jamais Contente*". Otro récord más se estableció en 1901 cuando el auto francés "*Krieger*", logró recorrer 309 km con una sola carga de baterías, posteriormente en 1904, Baker, con el "*Torpedo Kid*", logró una velocidad de 167 km/h en Daytona Beach, Florida. A pesar de estas cifras tan impresionantes, considerando la época, el automóvil eléctrico tenía un alto costo relativo y necesitaba de recargas frecuentes de batería, que tomaban mucho tiempo.

El golpe final que acabaría con los sueños de muchos entusiastas de los vehículos eléctricos fue el desarrollo del motor de combustión interna a finales del siglo XIX. La alta energía específica y la alta potencia específica de los combustibles fósiles, como la gasolina que llega a tener hasta 12 KWh/kg<sup>18</sup>, hizo de los ineficientes motores de combustión interna de fácil y rápida recarga, la mejor opción dejando a los demás en el olvido.

Hoy, 500 millones de automóviles de combustión interna circulan en el planeta y millones se suman anualmente, al mismo tiempo que se ha creado toda una infraestructura de servicios y estaciones de recarga de tal modo que se puede encontrar una, prácticamente en cada esquina. Solamente en México se cuentan 3268 gasolineras, 241 de éstas en el D.F.<sup>19</sup>

De no ser por los problemas ecológicos derivados de este crecimiento sin control, los autos eléctricos seguirían en el olvido, sin embargo este nuevo entusiasmo por los vehículos eléctricos parece ser definitivo. En California, en noviembre de 1990, se aprobó una ley emitida por el CARB (*California Air Resources Board*), en la que se ordena que el 2% de los vehículos de menos de 1700 kg, que se vendan de cada compañía en 1998, sean vehículos de emisión cero. Este porcentaje se incrementará a 5% en el año 2001 y a 10% en el año 2003.

---

<sup>18</sup>RIEZENMAN Michel, "Electric Vehicles", IEEE Spectrum, U.S.A., 0018-9235. noviembre 1992, p 20.

<sup>19</sup>PEMEX, "Anuario Estadístico 1994", México 1994, p. 19.

*Clasificación de vehículos por emisiones según CARB*

	MONÓXIDO DE CARBONO	HIDROCARBUROS	ÓXIDOS DE NITRÓGENO	DESCRIPCIÓN
VEBI	3.4	0.4	0.125	Vehículo de Emisión Baja Transitorio
VEB	3.4	0.2	0.075	Vehículo de Emisión Baja
VEUB	1.7	0.2	0.04	Vehículo de Emisión Ultra Baja
VFC	0	0	0	Vehículo de Emisión Cero

Nota: Todas las cantidades están dadas en gramos por milla

*Porcentaje de vehículos según CARB*

AÑO	% VEBI	% VEB	% VEUB	% VFC
1994	10			
1995	15			
1996	20			
1997		25	2	
1998		48	2	2
1999		73	2	2
2000	0	96	2	2
2001	0	90	5	5
2002	0	85	10	5
2003	0	75	15	10

Esta ley tiene como uno de sus objetivos principales, reducir la cantidad de petróleo que Estados Unidos importa. Esto es algo que nos debe preocupar a todos los mexicanos, si se considera que Estados Unidos representa el 66 % de las exportaciones del petróleo mexicano<sup>20</sup>.

La mayoría de los estados en Estados Unidos están adoptando esta misma ley con lo que se demuestra la seriedad del movimiento en favor del auto eléctrico, sin embargo los vehículos eléctricos para poder sustituir a los vehículos de combustión interna, deberán sobreponerse a los siguientes problemas:

⊗ Un vehículo eléctrico no puede recorrer la misma distancia con una sola carga de baterías, como un vehículo de combustión interna con un tanque de gasolina.

⊗ Toma cerca de 8 horas recargar un banco de baterías, mientras que llenar un tanque de gasolina toma sólo 5 minutos.

<sup>20</sup>Ibidem.

⊗ Los vehículos eléctricos cuestan más que los vehículos de combustión interna. Actualmente un vehículo eléctrico de tipo sedan, puede alcanzar un precio similar al de un automóvil de lujo de combustión interna.

⊗ Los vehículos eléctricos no cuentan con una infraestructura de servicios, ni de estaciones de recarga como los vehículos de combustión interna.

En contra de estos argumentos, se puede decir lo siguiente:

⊗ Es cierto que un automóvil eléctrico no puede recorrer la misma distancia que su contraparte de combustión interna, pero se han hecho estudios en los que se demuestra que en una ciudad como los Ángeles, la gente maneja un promedio de 40 km por día<sup>21</sup>, rango que puede ser perfectamente cubierto por un vehículo eléctrico. La mayoría de los viajes que se hacen en una ciudad, como ir de la casa al trabajo y del trabajo a la casa, llevar a los niños a la escuela, ir de compras o de paseo, etcétera. podrían ser cubiertos por un vehículo eléctrico, como primer auto, y tener un segundo auto de combustión interna para viajes largos en carretera.

⊗ También es cierto el segundo argumento, sin embargo, si se tomara el tiempo que un vehículo en particular circula, se notaría que la mayor parte del tiempo está estacionado. Un vehículo eléctrico podría ser recargado en casa durante toda la noche, en el trabajo mientras esté estacionado, en las escuelas, en los centros comerciales, e incluso en la calle en estaciones de recarga cuando se tenga la infraestructura, con esto, prácticamente no se sacrificaría tiempo productivo para recargar el auto. Hablando sobre la recarga, muchas personas piensan que usando automóviles eléctricos, sólo se transporta el smog, de las grandes ciudades a los lugares donde se encuentra la planta generadora de electricidad. Sin embargo, esta acusación no puede estar más alejada de la realidad, ya que mientras que todos los vehículos de combustión interna son impulsados por combustibles fósiles, un porcentaje de las plantas generadoras de electricidad utilizan otras fuentes de energía que no contaminan el aire, como las hidroeléctricas, además, las plantas termoeléctricas, queman el combustible de manera más eficiente y limpia que los autos, también es más sencillo afinar y

---

<sup>21</sup>NESEA, op. cit. 10.



rastrear una fuente fija de emisiones, como lo es una planta, y no los millones de automóviles que circulan diariamente, muchos de ellos, en muy mal estado.

⊗ El costo es uno de los temas más difíciles, ya que debido al bajo valor de la energía específica y de la potencia específica de las baterías, los autos eléctricos se han visto en la necesidad de ser diseñados y construidos para ser altamente eficientes. Deben ser ligeros, sin sacrificar la seguridad de sus pasajeros, deben tener forma aerodinámica de bajo coeficiente de arrastre, y baja resistencia al rodamiento, aparte de estar dotados de electrónica costosa. Si a todo esto se le suma un bajo volumen de producción, se obtiene sin lugar a dudas un automóvil caro. Conforme la tecnología en baterías avanza y los volúmenes de producción de los autos aumente, los costos se abatirán, mientras tanto, tendrá que ser el gobierno quien mediante subsidios o incentivos fiscales, haga del vehículo eléctrico una opción atractiva para el consumidor. En este punto se debe considerar un costo que es difícil de medir, pero que es muy tangible y es el costo de salud, que es bastante alto, por lo que definitivamente es mejor pagar unos pesos más por un auto eléctrico, si con esto se logra tener un mejor ambiente.

⊗ Sobre la infraestructura, sólo se puede decir que es una cuestión de tiempo, donde nuevamente el gobierno juega un papel muy importante. Es verdad que existe toda una infraestructura para los vehículos de combustión interna, pero ésta no se hizo en un día, tuvo que pasar más de un siglo.

Además, un vehículo eléctrico es mucho menos complicado que un vehículo de combustión interna, y por lo tanto, requiere de menos mantenimiento y servicios. No hay comparación entre la simplicidad de un motor controlado por electrónica y la complejidad del motor de combustión interna con sus inyectores de combustible, compresores, bombas, radiador, mangueras, filtros, bandas, carburador, mofles, aceite, etcétera.

En Estados Unidos, se ha formado un comité por el EPRI (*Electric Power Research Institute*), integrado por las tres grandes constructoras de autos americanos, Ford, General Motors y Chrysler, por la SAE (*Society of Automotive Engineers*), la *Electric Vehicle Association of the Americas* y el *Edison Electric Institute*, con el fin de estudiar las posibilidades para la creación de una infraestructura para vehículos eléctricos.

De los países interesados en el desarrollo de los autos solares, del tercer mundo, solamente Brasil figuraba en la lista, sin embargo desde diciembre de 1992, un grupo multidisciplinario de estudiantes de diferentes universidades del país entre las que se encuentran la UNAM, la UIA, la UAM, la ULSA, el ITESM, la UNUM y la UP, construyen el primer auto solar de carreras TONATIUH, asesorados por profesionales.

TONATIUH fue ideado, diseñado y es construido totalmente en México, por mexicanos y es financiado por importantes compañías mexicanas entre las que se encuentran, Industrias Unidas S.A., la CONAE, y Nacional Financiera S.A. y trabaja bajo el marco académico e institucional del Instituto de Ingeniería de la UNAM.

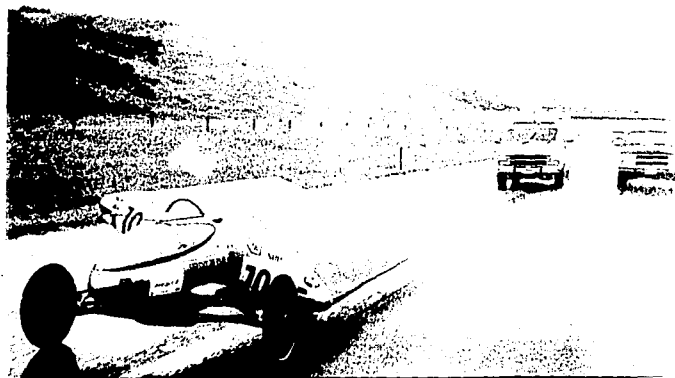
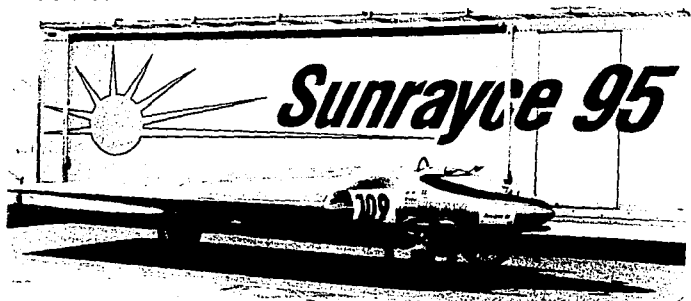
TONATIUH, tiene las siguientes especificaciones:

Longitud.....	5.90 m:	Cámbi:	..... 0°
Ancho:.....	2.12 m	Cáster:.....	0°
Altura:.....	1 m	Convergencia.....	0°
Distancia entre ejes:.....	3.10 m	Dirección:.....	Piñon y cremallera.
Distancia entre ruedas:.....	1.95 m	Transmisión:.....	Cadena
Distancia al piso:.....	12 cm	Motor.....	C.D. de imán
Peso sin piloto:.....	480 Kg	permanente sin escobillas. Uniq Mobility	
Chasis y Carena:.....	Tipo monocasco	DR086s. 3.5 Kw, 100 V, 5500 RPM máximas sin	
hechos de Kevlar pre-impregnado a manera		carga. 4 Kg	
de sandwich con panel de abeja de fibra de		Controlador:.....	Unique Mobility CR10-
aramida y reforzados con fibra de carbono		100 con freno regenerativo. 12 Kg	
pre-impregnado. La carena puede rotar con		Baterías:.....	7 baterías Delco Remy
respecto al chasis.		de plomo ácido de 19 Kg, 56 Ah y 12 V c/u,	conectadas en serie.
Parabrisas:.....	Policarbonato	Panel solar:.....	852 celdas Kyocera de
termoformado		silicio policristalino, grado terrestre de 13% de	eficiencia y 100 cm <sup>2</sup> c/u. Substrato curvo
Rin delantero:.....	Aluminio de 26" x 1.5"	orientable de 4 m de largo por 2.12 de ancho	con un área total de 8.5 m <sup>2</sup> . Adhesivo y
Rin trasero:.....	Acero de 17" x 2"	recubrimiento: silicón Dow Corning. Diodos	de paso ECG580. Arreglo: 4 módulos
Llantas delanteras:.....	Avocet de 26" x 1.5",	conectados en paralelo de 213 celdas en serie	c/u. Vca=130, Icc=12 A, potencia máxima=900
sin dibujo a 90 psi		W	
Llanta trasera:.....	Pirelli de 17" x 2", sin	Rastreadores de potencia.....	Advanced Energy
dibujo a 90 psi		Systems, tipo boost, 98% eficiencia. 1Kg de	peso.
Frenos:.....	Hidráulicos de disco		
en las tres ruedas.			
Suspensión delantera:.....	Doble brazo en A.		
Amortiguamiento por epoxifibra.			
Suspensión trasera:.....	Brazo y amortiguador.		

Con TONATIUH, como con los demás autos solares, se busca difundir en México, el interés por el transporte limpio y motivar a los jóvenes para el estudio de carreras ingenieriles.

En esta tesis se presenta una metodología para diseñar y construir un panel solar fotovoltaico para automóviles solares de competencias, basado en la experiencia que se obtuvo con la participación dentro del proyecto TONATIUH, como responsable del sistema eléctrico primario.

Se confía sinceramente que este trabajo sea de gran utilidad para aquellos que estén involucrados con el transporte eléctrico, o para los que decidan participar en un proyecto tan didáctico e interesante como lo fue para mí TONATIUH.



## CAPÍTULO 1

### *EL SISTEMA ELÉCTRICO PRIMARIO DE UN AUTOMÓVIL SOLAR DE COMPETENCIAS.*

El sistema eléctrico primario de un vehículo solar de competencias, está compuesto de 5 elementos, que se agrupan en tres subsistemas:

- a) El subsistema propulsor, compuesto por el motor y el controlador.
- b) El subsistema de almacenamiento, o banco de baterías.
- c) El subsistema de suministro, compuesto por el panel solar y los rastreadores de potencia pico.

Existe un elemento más que tiene una gran importancia dentro del sistema eléctrico y es el arnés de interconexión. Éste se analiza al final del capítulo.

#### *1.1 EL SUBSISTEMA PROPULSOR.*

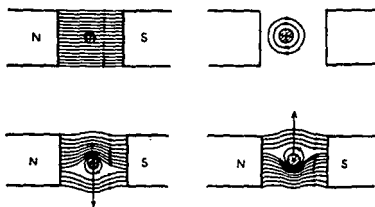
##### 1.1.1.- EL MOTOR ELÉCTRICO.

El motor eléctrico, es una máquina que convierte la energía eléctrica en energía mecánica. Existe una gran variedad de tipos, tamaños y formas de motores eléctricos, pero todos se componen únicamente de dos partes básicas; una móvil, o rotor, y una fija, o estator.

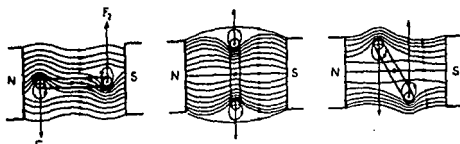
Fue Michael Faraday quien, en 1821, consiguió por primera vez fuerzas rotacionales utilizando las propiedades del magnetismo y la electricidad. Este descubrimiento condujo finalmente a la construcción del primer motor eléctrico.

El principio de funcionamiento de todo motor eléctrico se basa en el hecho de que en todo conductor, por el que circula una corriente, se genera un campo magnético en el espacio que lo rodea, en el sentido definido por la regla de la mano derecha. Si dicho conductor se encuentra en un campo magnético perpendicular a él, se genera una fuerza en dirección normal a las líneas de flujo del campo y a la dirección de la corriente que circula por el conductor, siguiendo la regla de la mano izquierda de Fleming.

La fuerza aplicada al conductor, es directamente proporcional a la intensidad del campo magnético, a la intensidad de la corriente y a la longitud del conductor que queda dentro del campo.



Suponiendo que en lugar de un simple conductor, se tiene una bobina rectangular de una sola espira, cuyo plano es paralelo a la dirección del campo magnético. Si la corriente circula hacia adentro por un conductor y en sentido opuesto por el otro, sobre los conductores se ejercerán dos fuerzas de igual magnitud pero de sentido opuesto, que producirán un par que hará girar a la espira. Para la posición inicial de la espira, se da el par máximo, este par irá disminuyendo conforme gira la espira hasta que se hace nulo, cuando el plano de ésta se encuentra perpendicular a la dirección del campo magnético.



Si se logra invertir la dirección de la corriente en la espira, cada vez que ésta llega a la posición de par nulo y se logra rebasar la posición perpendicular a la dirección del campo magnético, se podrá desarrollar un par que hará girar la espira los 360°. Sin embargo al tener una sola espira, el par que se produce es intermitente, por lo que es necesario tener una gran cantidad de espiras para obtener un par más homogéneo.

La función de invertir la corriente en la posición de par nulo, es precisamente la que desempeñan las escobillas y el conmutador en los motores de corriente directa.

Cuando los conductores del rotor, que conducen una corriente dentro del campo magnético, giran como producto del efecto antes explicado, cortan un flujo magnético e inducen una corriente en ellos, en sentido opuesto a la que ellos mismos conducen, (ley de Lenz). Esta corriente produce una fuerza que se denomina fuerza contra electromotriz. Dicha fuerza, es directamente proporcional a la velocidad angular del motor e inversamente proporcional a la intensidad del campo magnético.

Además del par y la velocidad, otro concepto clave para la selección de los motores es la eficiencia, y ésta es la relación entre la potencia de salida (mecánica) y la potencia de entrada (eléctrica). Una parte de la potencia de entrada se pierde en calentar el inducido, estas pérdidas son proporcionales al cuadrado de la corriente del inducido,  $I^2R$ . Existen además pérdidas mecánicas por rozamiento y resistencia del aire, pérdidas por histéresis en el hierro, pérdidas por corrientes parásitas (corrientes de Eddy) en la armadura y por corto circuito en la conmutación.

En los motores de corriente alterna (C.A.) se alimentan en el estator corrientes con un desfaseamiento eléctrico entre ellas que producen un campo magnético giratorio.

Existen dos tipos de motores de C.A. los motores de inducción o asíncronos y los motores síncronos. En los motores de inducción este campo al girar corta los conductores del devanado del rotor induciendo en ellos una corriente, que reacciona con los polos del estator y produce un par que hace que el rotor gire. Existe una diferencia en la velocidad de giro entre el campo magnético giratorio

(velocidad síncrona) y el rotor, a esta diferencia se le llama deslizamiento. En los motores síncronos, esta diferencia no existe, el rotor gira a la misma velocidad que el campo magnético, y esto se debe a que el campo magnético giratorio no induce corriente en los conductores del rotor sino que a éste se le suministra, por medio de unos anillos rozantes, corriente directa para formar un electroimán, o bien, se utiliza un rotor de imán permanente. Los motores conocidos como motores de corriente directa sin escobillas, son en realidad motores síncronos. Los motores síncronos no pueden arrancar solos, pues carecen de par de arranque, el arranque se logra con circuitos electrónicos, y esto es lo que comúnmente se conoce como conmutación electrónica.

La selección de un motor eléctrico depende totalmente de las necesidades específicas de la aplicación. Dependiendo de cuál sea la característica más importante, se determina qué tipo de motor puede ser adecuado. Gracias a la versatilidad del motor eléctrico, se puede encontrar un tipo de motor para cada aplicación, así que el primer paso en la selección de un motor es definir las características requeridas. Mientras que para un automóvil eléctrico, con miras comerciales, el costo puede ser el parámetro más importante, para los vehículos solares se necesita contar con una alta eficiencia en un ancho rango de operación y una muy buena relación potencia/peso y potencia/volumen.

Tomando en cuenta los tipos de motores existentes en el mercado, se seguirá un proceso de eliminación de motores que no sean adecuados para la aplicación.

Los motores que comúnmente se conocen como motores de corriente alterna, son motores diseñados para operar a 60 Hz con energía obtenida de la planta generadora de luz. Estos motores son óptimos para operarse a una velocidad constante y son diseñados para la industria donde el tamaño estándar, el costo y el torque inicial a 60 Hz son los puntos principales en su diseño. Este tipo de motores, no es adecuado para la aplicación.

Los motores de corriente directa tienen, normalmente, escobillas, conmutadores, y un devanado girando. Todo esto se traduce en un decremento de la eficiencia, a un mayor costo de mantenimiento, y a limitaciones en la velocidad del rotor según el diseño de la armadura y el conmutador. Más adelante se analizará este tipo de motores.

El motor de fase síncrona de malla cerrada, junto con su controlador, son diseñados para aplicaciones que requieren un control muy preciso de la velocidad como en los lectores de disco de una computadora, esta precisión no es requerida en los autos eléctricos e impondrían un costo innecesario al motor.

Los motores incrementales (*stepper*), son diseñados especialmente para aplicaciones que requieren movimientos de posicionamiento y no para propulsión.

Finalmente, este proceso de eliminación deja dos opciones, los motores de corriente alterna de frecuencia variable, y los motores de corriente directa sin escobillas. A continuación se analizan más a fondo los motores de corriente directa, pues por razones que se mencionarán más adelante, son los mejores para la aplicación.

Los motores eléctricos pueden ser clasificados de cuatro formas:

- 1.-Por el tipo de corriente: corriente directa o alterna.
- 2.-Por el tipo de desplazamiento: lineal o rotatorio.
- 3.-Por el tipo de conmutación: mecánica o electrónica.
- 4.-Por la forma de generar el campo magnético: de imán permanente o electroimán.

Motores de corriente directa.

Estos motores pueden tener conmutación mecánica, es decir con escobillas (MCDCE), o pueden tener conmutación electrónica, es decir sin escobillas (MCDSE). Los MCDCE pueden ser de dos formas, según la manera en que generan el campo magnético, de imán permanente o de electroimán. En el segundo caso este electroimán puede estar conectado de tres formas; en derivación (*shunt*), serie o combinado (*compound*).

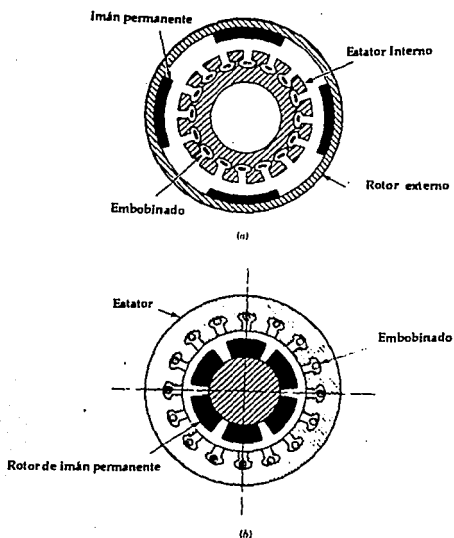
Los motores en derivación tienen un par de arranque bajo y producen una velocidad casi constante. Los motores serie trabajan a velocidad variable y tienen un par de arranque elevado. El motor combinado tiene alto par de arranque y trabaja a velocidad constante.

Los MCDSE de imán permanente tienen una mejor eficiencia, son más compactos y generan menos calor que los motores que producen el campo



magnético por devanado. Éstos tienen una construcción básica tal, que eliminan la conmutación mecánica. La conmutación se hace electrónicamente sin contactos móviles, por lo tanto todos los problemas asociados con la conmutación mecánica, como el desgaste de las escobillas, la creación de arcos, chisporroteo y fricción se eliminan.

Normalmente los MCDSE tienen el rotor en el interior y el estator en el exterior, sin embargo también es posible tener el rotor en el exterior y el estator en el interior.



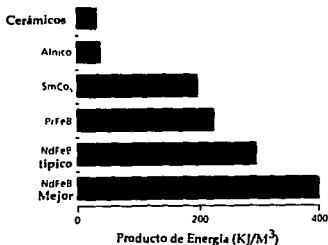
Tener el estator en el exterior, permite excelentes características de disipación térmica, ya que el devanado se encuentra en el exterior y por lo tanto

el calor producido por las pérdidas en el hierro y en el cobre están mejor expuestas al ambiente para tener una transferencia convectiva de calor. Esto permite que los motores trabajen a una gran velocidad y que suministren una mejor relación potencia/peso.

Los MCDSE, se encuentran en diámetros que varían desde unos 25 mm hasta un metro y capacidades de torque desde  $4.3 \times 10^{-3}$  kg-m hasta 230 kg-m, y tienen sus aplicaciones básicas en videocaseteras, lectores de discos en computadoras y aplicaciones en las que se manejan un cierto riesgo de explosión, como en las bombas de combustible.

El rotor está constituido por imanes permanentes hechos de compuestos de hierro, materiales cerámicos como el AlNiCo (aluminio-níquel cobalto), o de tierras raras como el samario-cobalto y el neodimio-boro

Los imanes cerámicos, como la ferrita cerámica, son baratos y se utilizan en aplicaciones donde el costo es importante. El imán permanente de AlNiCo tiene una alta densidad de flujo pero es muy inconstante, se podría decir que tiene un costo medio y que tiene propiedades magnéticas medias. Los imanes permanentes de tierras raras son los más caros pero tienen propiedades magnéticas excelentes.



La General Motors antes de participar en el *World Solar Challenge* había desarrollado un nuevo material magnético, con él que se fabricó el motor de corriente directa de imán permanente sin escobillas que se usó en el excelente

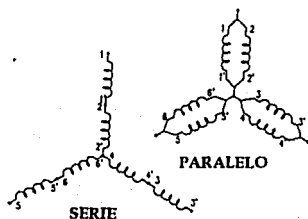
automóvil solar, el *Sunraycer*. Este material es una combinación de neodimio, hierro y boro y fue sometido a un rápido proceso de templado enfriando el material fundido a una razón de millones de grados centígrados por segundo, obteniendo así excelentes propiedades magnéticas. A este tipo de imán permanente se le denominó *Magnequench*. El *Magnequench* probó tener mayor densidad de energía que cualquier otro material, es decir que se puede conseguir el mismo campo magnético con un menor tamaño de imán y por lo tanto una mejor relación potencia/peso.

Los MCDSE operan generando un campo magnético rotatorio que está 90° eléctricos desfasado del campo del rotor. Se utilizan sensores de posición para determinar la posición del rotor en todo momento. Se pueden usar tres tipos diferentes de sensores de posición: ópticos, electromagnéticos y de efecto Hall. Estos sensores alimentan la información al controlador para que haga la conmutación electrónicamente. Cuando esta conmutación se realiza apropiadamente un motor de corriente directa sin escobillas puede igualar las características par-velocidad de un motor con conmutación mecánica.

Existen muchas ventajas de los MCDSE sobre los que tienen conmutación mecánica, que los hacen mejores para los vehículos solares:

- ⊗ Más eficiencia.
- ⊗ Mejor relación potencia/peso.
- ⊗ Mejor disipación de calor.
- ⊗ Mejor utilización del espacio por lo tanto más compactos.
- ⊗ Hay menos caída de voltaje en los transistores que en las escobillas.
- ⊗ No hay fricción por escobillas.
- ⊗ No hay chisporroteo.
- ⊗ Menor costo de mantenimiento.

Una ventaja que merece mención aparte es la posibilidad de adaptar un interruptor al devanado del estator, que permita cambiar la conexión del devanado como se muestra en la figura:



Al conectarse en serie, la constante de par del motor se duplica y la velocidad máxima se reduce a la mitad. En paralelo, la constante de par se reduce a la mitad y la velocidad máxima se duplica. Esto es útil pues funciona como una transmisión electrónica variable que permite aprovechar al máximo la energía que recibe el subsistema propulsor en las diferentes condiciones del terreno. Durante la aceleración o durante las cuestas se puede conectar en serie, al alcanzar velocidad o al estar en terreno nivelado se puede usar la conexión en paralelo.

Hasta ahora los MCDCE han sido los motores que se han usado en los vehículos eléctricos, y esto se debe básicamente a su bajo costo y a la larga experiencia en su uso. Sin embargo conforme la tecnología ha ido avanzando nuevos adelantos en la electrónica han hecho atractivos otros tipos de motores como los motores de inducción de frecuencia variable y los motores de corriente directa sin escobillas.

Actualmente muchos de los autos eléctricos prototipo de las grandes constructoras de autos, Ford, General Motors, Toyota, VW y Nissan utilizan motores de inducción. Sin embargo para vehículos solares se han utilizado, motores de corriente directa sin escobillas, con objeto de eliminar el inversor requerido por los motores de inducción. Por otra parte un auto solar generalmente trabaja a velocidades constantes, y los MCDSE son más eficientes, que los motores de inducción, cuando trabajan en su punto óptimo de operación, alrededor de su potencia máxima (par bajo y velocidad angular elevada).

### 1.1.2.- EL CONTROLADOR

Todos los motores eléctricos de un tamaño regular, necesitan un control de corriente para arrancar. Este control evita que corrientes muy grandes circulen por los devanados del motor.

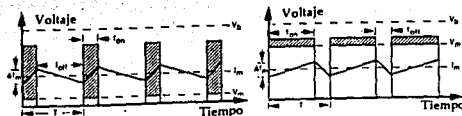
Mientras el motor acelera y vence poco a poco la inercia, comienza a aparecer la fuerza contraelectromotriz. Ésta se irá incrementando con la velocidad del rotor produciendo un balance en el voltaje y un autocontrol en la corriente.

En los primeros vehículos eléctricos, esto se conseguía mediante la técnica llamada conmutación del voltaje aplicado. Ésta consistía en un sistema de interruptores que conectaba un número diferente de baterías en serie produciendo así una curva de voltaje en escalera según se necesitaba para acelerar el motor. Este sistema era sumamente barato y simple, sin embargo producía una respuesta, en la aceleración, de tipo escalón.

Con la aparición de los semiconductores, como los SCR (*silicon controlled rectifier*), los TRIACS (*triode alternating current*), los MOSFET (*metal oxide semiconductor field effect transistor*) y los más nuevos y mejores IGBT (*insulated gate bipolar transistor*), se crearon controladores de estado sólido que superaron por mucho a la técnica anterior. Estos conductores, son capaces de interrumpir el voltaje a muy altas frecuencias, produciendo de esta manera una respuesta continua.

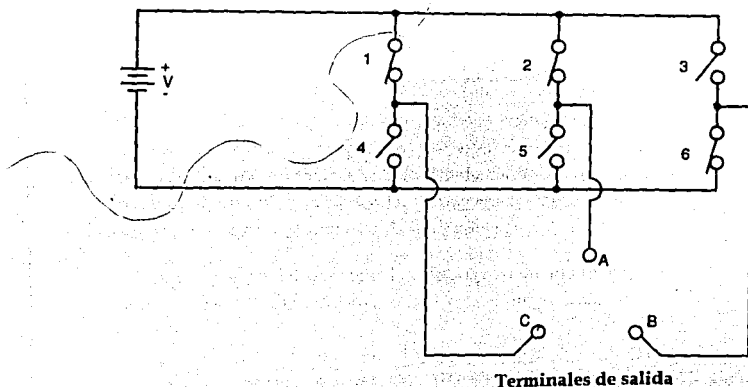
$$V_{\text{motor}} = \frac{T_{\text{conducción}}}{T_{\text{conducción}} + T_{\text{cese}}} V_{\text{batería}}$$

Si se varía el tiempo que el semiconductor, que actúa como interruptor, conduce, manteniendo el tiempo total constante, se obtiene el principio de modulación del ancho de pulso (*pulse-width-modulation*, PWM), y si se varía el tiempo total mientras se mantiene constante el tiempo que el semiconductor conduce, se obtiene el principio de modulación de frecuencia de pulsos (*pulse-frequency-modulation* PFM).



Como el motor que se seleccionó, como la mejor opción para autos solares fue el motor de corriente directa sin escobillas de imán permanente, se explicará únicamente el funcionamiento del controlador respectivo.

Una de las funciones del controlador es recibir la energía eléctrica de un banco de baterías que proporcionan corriente directa y convertirla en tres corrientes de comportamiento senoidal, con un desfaseamiento eléctrico entre ellas de  $120^\circ$ . Esto se logra utilizando un circuito que tenga una configuración básica como el de la figura. Debido a que el costo del controlador depende directamente del número de semiconductores para la conmutación de potencia, existe la tendencia de mantener el mínimo de fases, ya que cada fase requiere de 2 semiconductores. Generalmente motorés con tres fases y 6 interruptores son utilizados.



Utilizando un patrón cíclico adecuado de conmutación se puede lograr una aproximación de las ondas requeridas. De esta manera el controlador convierte la corriente directa en corriente alterna, para producir el campo magnético

giratorio en el estator, y convierte también la corriente alterna a directa cuando se utiliza el freno regenerativo, es decir cuando el motor funciona como generador, regresando la corriente generada a las baterías en la forma que éstas la pueden aprovechar para su recarga.

Además de la función de inversor, el controlador recibe la información de la posición angular del rotor de los sensores, y realiza la conmutación electrónicamente. La conmutación electrónica es en realidad una excitación controlada del devanado del estator según la posición del rotor. Esto se hace ya que en un motor síncrono no existe par inicial, y por lo tanto, un motor síncrono no puede arrancar por sí solo.

Para controlar la velocidad del motor, el controlador varía la frecuencia de excitación del devanado del estator según la posición del acelerador (potenciómetro). El controlador también regula la dirección de giro del motor y por último, el controlador desempeña la función de protección para el motor, limitando la corriente que recibe el motor en caso de que la temperatura se acerque a los valores máximos de operación permitidos.

A pesar de que el motor de corriente directa sin escobillas de imán permanente y su controlador ofrecen mayores ventajas sobre los demás para la utilización en vehículos solares, nuevos avances en la electrónica, materiales magnéticos, diseño de motores o métodos de control pueden inclinar la balanza a favor de algún otro tipo de motor. El diseñador de un subsistema propulsor debe estar al día para seleccionar el motor adecuado.

El futuro éxito de los vehículos eléctricos depende en gran medida de las continuas mejoras en la tecnología de motores y sus controladores.

## **1.2 SUBSISTEMA DE ALMACENAMIENTO.**

Es más fácil explicar para qué sirve la energía que tratar de definir su esencia. Quizás ésa sea la causa por la cual la definición más breve y común establezca que la energía es todo aquello capaz de producir o realizar algún trabajo, lo cual en última instancia no es sino la expresión de una relación física.

La energía se puede encontrar en diferentes formas: térmica, eléctrica, química, cinética, potencial, atómica, solar, etcétera.

Es sabido que la energía no se crea ni se destruye, sólo se transforma, por lo tanto, cualquier tipo de energía puede ser almacenada en la forma que se encuentra, o puede ser transformada en alguna de las otras formas, para ser almacenada de ese modo, y ser transformada nuevamente para su aprovechamiento. En todos los procesos de transformación y almacenamiento de energía, existen pérdidas que disipan parte de la energía.

Una vez que el hombre aprendió a aprovechar la energía para realizar tareas difíciles, se vio con la necesidad de conservar la energía. Ésto en un principio lo consiguió por medios mecánicos, levantando cuerpos pesados y utilizando resortes. Conforme evolucionaba la ciencia, nuevas formas fueron ideadas.

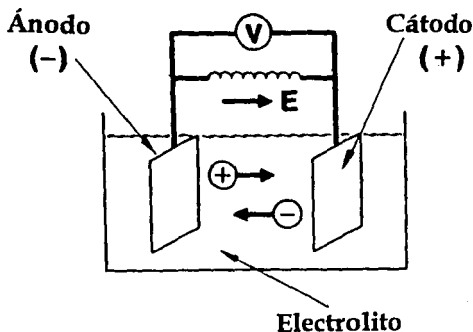
Una parte fundamental de los vehículos eléctricos o solares es el subsistema de almacenamiento de energía. Existen muchas formas de almacenar energía eléctrica, pero dentro de las más utilizadas se encuentran las baterías electroquímicas, los capacitores, los volantes de inercia (*flywheels*), el aire comprimido, y hasta la electrólisis del agua separando el hidrógeno del oxígeno. Constantemente se desarrollan nuevas formas de almacenamiento, por lo que sería tema de otra tesis el intentar analizar todos y cada uno de los sistemas conocidos. Se enfocará la atención en aquellas tecnologías disponibles en el mercado, de sencillo manejo, y bajo costo, como son las baterías electroquímicas, y únicamente se comentarán algunas características de tecnologías nuevas, más prometedoras, como los volantes de inercia y las celdas de combustible (*fuel cells*).

Una batería electroquímica, convierte la energía química en electricidad, por medio de una reacción de oxidación-reducción. Este tipo de reacciones químicas, involucran una transferencia de electrones.

Alessandro Volta construyó, en 1800, la primera batería electroquímica, utilizando 2 materiales metálicos distintos, cobre y zinc, y poniendo entre ellos un cartón grueso empapado con una solución salina.



En la batería electroquímica existen dos partes, el ánodo, que es donde se lleva a cabo la oxidación y se considera como el electrodo negativo, y el cátodo donde se lleva a cabo la reducción y funciona como el electrodo positivo. Cuando el ánodo y el cátodo se conectan externamente con una carga, el cátodo cede electrones al circuito externo y al ánodo los recibe; al mismo tiempo que los iones fluyen, a través del electrolito, del ánodo hacia el cátodo. Al recargar, se invierte este proceso, convirtiéndose el electrodo negativo en el cátodo, y el electrodo positivo en el ánodo. La polaridad de la batería siempre se mantiene constante.



Existen dos tipos de baterías electroquímicas, las primarias y las secundarias. En las primarias el proceso anteriormente descrito no es reversible, es decir, no son recargables y consumirán sus materiales durante su vida operacional hasta quedar inservibles. En las secundarias este proceso sí se puede invertir y pueden ser recargadas varias veces antes de que sus componentes se deterioren, y es esta característica la que las hace ideales para la aplicación.

Nuevamente en este punto existe un problema, ya que cualquier reacción oxidación-reducción es capaz de producir electricidad y por lo tanto hay un gran

número de baterías secundarias y conforme pasa el tiempo se desarrollan más. A continuación se mencionan algunas de las más conocidas:

Plomo-ácido, níquel-cadmio, níquel-hierro, plata-zinc, plata-cadmio, níquel-zinc, sodio-azufre, litio-monosulfato de hierro, litio-bisulfato de hierro, litio-aluminio-bisulfato de hierro, níquel-hidruro de metal, manganeso-zinc, mercurio-zinc, mercurio-cadmio, zinc-aire, sodio-cloruro de níquel, zinc-bromo, etcétera.

Muchas de estas tecnologías están apenas siendo desarrolladas o tienen un costo muy elevado, por lo que solamente se considerarán como posibles candidatos a las de plomo-ácido, níquel-cadmio, níquel-hierro y plata-zinc. Sin embargo, se harán algunos comentarios sobre otras tecnologías.

No existe ningún proceso de conversión de energía que sea 100% eficiente, es decir, que no tenga pérdidas internas, y las baterías electroquímicas, no son la excepción. Existen muchos factores que afectan el desempeño y la capacidad de almacenamiento de una batería. Enumero los más representativos:

1) La profundidad de descarga.- Este factor tiene un fuerte efecto en la capacidad de almacenamiento y en la vida de una batería. En cada tipo de batería, según su fabricante, se proporcionan límites para la profundidad de descarga diaria o constante, y para la profundidad de descarga pico. Si se exceden alguno de estos límites, se producirá una importante pérdida en la capacidad de almacenamiento y se reducirá la vida útil de la batería.

2) Ciclos de carga y descarga.- Todas las baterías secundarias, son sometidas a un continuo proceso de carga y descarga. Existen corrientes determinadas de carga y descarga, según el tipo de batería y su fabricante, que optimizan la conversión de energía química a eléctrica. Cuando estas corrientes son excedidas, la eficiencia en la conversión de la energía de las baterías se afectará y las pérdidas internas se incrementarán, obteniendo como resultado una menor cantidad de energía eléctrica entregada. Cuando se recarga una batería incorrectamente por varios ciclos, se puede acortar la vida de ésta.

3) Autodescarga.- Todas las baterías pierden continuamente algo de su energía almacenada debido a reacciones internas, aunque no hayan sido conectadas a una carga externa. La autodescarga se incrementa con la

temperatura y la edad de la batería.

4) El tiempo que permanece una batería totalmente descargada, afecta considerablemente la vida de las baterías. Si una batería se deja por un largo período de tiempo en un bajo nivel de carga, ésta no recuperará su capacidad total o no podrá ser recargada nuevamente.

5) Temperatura de operación.- Cada tipo de batería tiene una temperatura de operación a la cual funciona mejor, pero en la mayoría de ellas, ésta deberá ser lo más cercano posible a la temperatura ambiente, es decir, 25°C, ya que a medida que la temperatura sube, aumenta también la eficiencia de la batería, pero se reduce considerablemente su vida útil. Las temperaturas de operación muy por debajo de la temperatura ambiente, ocasionan una muy baja eficiencia de las baterías, y se corre el riesgo de que se congele el electrolito.

6) Edad e historia.- Durante su vida útil, todas las baterías pierden gradualmente su habilidad para almacenar energía. Una batería se considera inservible cuando su capacidad de almacenamiento se reduce hasta un 80% de su capacidad original.

Todas las baterías se especifican en términos de su capacidad nominal, generalmente expresada en amperes-hora o watts-hora, y depende de la cantidad de material en el ánodo y el cátodo. Esta capacidad es la que se espera que la batería tenga a lo largo de su vida útil. Es muy importante conocer la corriente de descarga a la cual se determinó la capacidad nominal, ya que la capacidad depende de la corriente de descarga. Generalmente se especifica el número de horas al final de las cuales se descargará completamente la batería, por ejemplo, una batería con una capacidad de 100 Ah, determinada en base C/20, se descargará completamente, si se extrae de ella una corriente de 5 A durante 20 horas. Si se utiliza una corriente mayor que 5 A en la descarga, quizá se obtenga al final, una menor capacidad de la batería.

El voltaje de corte, es aquél en el que se debe parar la descarga, ya que después de este punto el voltaje cae rápidamente. Cualquier descarga pasando este punto producirá un daño permanente en las celdas de las baterías.

La polarización, se refiere a la diferencia entre el voltaje de circuito abierto, y el voltaje que proporciona la batería a una determinada corriente de descarga. A mayor corriente de descarga, mayor será la polarización.

Dentro de las características que debe tener una batería para ser usada en un automóvil eléctrico o solar, se encuentran las siguientes:

Alta energía específica.

Alta potencia específica.

El mayor número de ciclos de vida, con bajo mantenimiento.

Bajo costo.

La energía específica, se refiere a la cantidad de watt-horas de electricidad que la batería puede almacenar por kilogramo de su masa. Teóricamente la energía específica se calcula multiplicando el voltaje de la celda, que depende de la naturaleza química de los materiales del ánodo y el cátodo, por el número de electrones involucrados en la reacción y la carga electrónica, todo esto dividido entre la suma de los pesos de las moles de los reactivos, sin embargo, el valor real práctico de la energía específica es mucho menor, y esto se debe a que hay materiales que no intervienen en la reacción productora de electricidad que suman peso, tales como, colectores de corriente, separadores, conectores, terminales y el contenedor. Por ejemplo, en una batería de plomo-ácido convencional, la energía específica práctica tiene un valor de 35 Wh/kg, mientras que el valor teórico es de 171 Wh/kg<sup>22</sup>.

La potencia específica es el número máximo de watts por kilogramo que la batería puede entregar a una determinada profundidad de descarga, generalmente 80 %. Al parecer la energía específica, tiende a tener una relación inversa con la potencia específica y esto se debe principalmente a tres factores:

El primero de ellos es la resistencia interna de la batería, que causa una caída del voltaje de salida, según la corriente, es decir, que los ampere-hora que se extraen de la batería a alta corriente, salen de la batería a un menor voltaje que los extraídos a baja corriente. El segundo es la electroquímica de ciertas baterías que cambia cuando se manejan altas corrientes, y que modifica el valor teórico de la energía específica y por último, diseñar una batería para manejar altas

<sup>22</sup> RIEZENMAN, op. cit. 18, p 97.

corrientes, requiere de grandes colectores de corriente que desplaza material activo del electrodo y se reduce nuevamente la energía específica.

El ciclo de vida, se refiere al número de veces que una batería puede ser descargada hasta un 80 % de profundidad y cargada totalmente de nuevo. Una batería común está entre el rango de 500 a 1000 ciclos.

Finalmente, el costo es uno de los factores decisivos y es determinado por los materiales usados en la batería y por el proceso de fabricación.

### 1.2.1.- BATERÍA PLOMO-ÁCIDO

Se empezará el estudio de las baterías electroquímicas secundarias, con las baterías de plomo-ácido.

Las baterías de plomo-ácido son las más usadas para el almacenamiento de energía eléctrica, y esto se debe más que nada a su buena retención de carga por muy bajo costo.

Gracias a la versatilidad en su diseño, se ha utilizado como acumulador para los automóviles de combustión interna, en carros eléctricos pequeños como los que se usan en el golf, en grúas pequeñas, y como baterías de respaldo en teléfonos y otras aplicaciones que requieren una fuente continua de electricidad sin interrupciones. Sin embargo, una batería de plomo-ácido diseñada para una aplicación específica, no necesariamente servirá para otra.

Las baterías que se usan en los automóviles de combustión interna, están diseñadas para suministrar una corriente muy alta en un período de tiempo muy corto. Esto es con el objeto de poder hacer funcionar la marcha y así arrancar el motor. Este diseño especial, les permite suministrar corrientes de 200 amperes, o más, por pocos segundos, sin que la batería se dañe. Las baterías de este tipo no sufren, normalmente, una descarga profunda, ya que una vez arrancado el motor, el alternador supe todas las necesidades eléctricas del automóvil, además de recargar la batería para el siguiente arranque. Cada vez que por alguna razón, se descarga profundamente la batería, se puede recargar nuevamente, pero cierta cantidad de daño permanente se produce. Estas baterías están

diseñadas para soportar cerca de 20 ciclos de descarga profunda, después de los cuales, quedarán inservibles.

Para los vehículos eléctricos, este tipo de baterías no funcionan. Como se vio antes, para los vehículos eléctricos, se necesitan baterías de gran capacidad, que soporten ciclos de descarga profunda. Numerosos diseños que buscan maximizar la energía específica y la potencia específica, conservando el bajo precio de las baterías plomo-ácido se han propuesto con nuevas tecnologías que están siendo desarrolladas como resultado de una extensa investigación para la creación de nuevas baterías ideales para automóviles eléctricos. Esta investigación es encabezada por el Departamento de Energía de los Estados Unidos (DoE), y el Consorcio de Baterías Avanzadas de los Estados Unidos (USABC), constituido principalmente por las tres grandes constructoras de autos, Ford, General Motors y Chrysler.

El funcionamiento de una batería plomo-ácido, es el siguiente:

El material activo del electrodo positivo, es el bióxido de plomo, y el material del electrodo negativo es plomo esponjoso, altamente reactivo. Los electrodos son aislados eléctricamente entre sí por separadores, estos separadores pueden estar hechos de materiales celulósicos con resina impregnada, hule microporoso o plástico microporoso, que generalmente es cloruro de polivinilo o PVC.

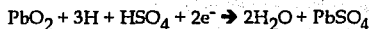
Tanto el material del electrodo positivo, como el del electrodo negativo, están soportados en una estructura de plomo en forma de red, la función de esta red, es la de recolección de corriente y de soporte. En algunas ocasiones, tanto los materiales de los electrodos, como el material de la red, contiene algunas aleaciones, que proporcionan ciertas cualidades favorables, según la aplicación. Estas aleaciones son plomo-calcio, plomo-antimonio, y plomo-calcio-antimonio. El antimonio permite descargas profundas y una buena respuesta de las baterías en los ciclos de carga y descarga. sin embargo, también se tiene una mayor autodescarga que otras baterías y esto se incrementa con la vida de la batería, también se produce mucho vapor de agua cuando se está cargando, por lo que se pierde mucha agua y hay que darle mantenimiento a la batería constantemente. El calcio, proporciona una baja autodescarga y una baja gasificación durante la recarga, por lo que requiere de muy bajo mantenimiento, sin embargo no

soporta muchos ciclos de descarga profunda. La combinación plomo-calcio-antimonio, reúne las propiedades positivas de ambas aleaciones, pero tiene un alto costo.

El electrolito en una batería plomo ácido es generalmente una solución de ácido sulfúrico diluido en agua, que posee una gravedad específica que va de 1.215 a 1.3, según la aplicación.

En el estado de carga completa de una batería, los materiales de los electrodos negativo y positivo se encuentran en forma de plomo y bióxido de plomo respectivamente, y el electrolito se encuentra en su máxima concentración. Cuando una carga externa se conecta a la batería, se producen las siguientes reacciones:

Conforme se descarga la batería, el electrodo positivo reacciona con el electrolito para reducirse de bióxido de plomo a sulfato de plomo como sigue:



El electrodo negativo, también reacciona con el electrolito y también produce sulfato de plomo:



La reacción total es:



Durante esta reacción de descarga, se cambia la concentración del ácido sulfúrico, produciéndose agua, y es por esta característica, que el nivel de descarga de una batería plomo-ácido, puede ser medido con un higrómetro.

Dependiendo del voltaje que se requiera, se conecta un número determinado de celdas en serie. Una celda tiene un voltaje nominal de 2 volts y está compuesta de un grupo de placas positivas conectadas en paralelo, dispuestas alternadamente con las placas negativas, que también están conectadas en paralelo, intercalando un separador entre cada una de ellas.

La batería de plomo-ácido tienen las siguientes ventajas, que la hacen ser la batería más adecuada para ser utilizada en los vehículos eléctricos, al menos al corto plazo: es la batería que ofrece el menor costo por unidad de energía almacenada, es reciclable, está disponible en el mercado y cuenta con una gran infraestructura, desde la producción del metal, hasta la producción de la batería y los servicios que ésta pueda necesitar, producto de la larga experiencia en el uso de esta batería, es menos tóxica o peligrosa en caso de accidente que otros tipos de batería, y tiene, como se mencionó anteriormente, enormes posibilidades de mejora, con nuevas tecnologías.

Dentro de las desventajas que la batería plomo-ácido puede tener, figura en primer término, el peso. Estas baterías son sumamente pesadas y es por esto que tanto la energía específica, como la potencia específica tienen un valor bajo. La mayoría de las baterías plomo ácido tienen una energía específica práctica de 25 a 35 Wh/kg, y una potencia específica de alrededor de 95 W/kg.

Otra desventaja importante es la producción de gases durante la recarga, estos gases, son una combinación altamente explosiva de hidrógeno y oxígeno, por lo que las baterías plomo-ácido deben ser instaladas en un lugar perfectamente ventilado para evitar concentraciones peligrosas. La gasificación, obliga a realizar un mantenimiento constante en este tipo de baterías, chequeando el nivel de agua, y limpiando las terminales, que muestran cierta corrosión después de un tiempo.

La temperatura es un factor que afecta considerablemente el desempeño de las baterías plomo-ácido, tanto el voltaje de salida como la capacidad, presentan variaciones importantes con los cambios de temperatura.

Las descargas profundas, más allá del voltaje de corte producen un daño permanente en las celdas, y a la larga dejarán inservible a la batería.

Dejar descargada la batería por un largo período de tiempo provoca la indeseable sulfatización, durante la cual, crecen largos cristales de sulfato de plomo en las placas, que hacen prácticamente imposible la recarga. En algunas ocasiones, dependiendo del grado de sulfatización, se puede recargar una



batería siguiendo un cuidadoso proceso, pero en otros casos la batería queda totalmente inservible.

Por último, el efecto memoria, esto es las baterías se "acostumbran" a un uso determinado después de ser usadas de la misma manera por un número determinado de ciclos. Una vez que se ha establecido la memoria, cualquier desviación en el uso de las baterías afectará su capacidad, actuando como si estuviera descargada, cuando en realidad puede estar al 75% de su capacidad. El efecto memoria puede ser borrado siguiendo un proceso de carga y descarga controlado.

### 1.2.2.- BATERÍA NÍQUEL-CADMIO

La batería níquel-cadmio es una batería alcalina; se le denomina así debido a que el electrolito que utiliza: hidróxido de potasio diluido en agua, es una solución alcalina. A diferencia de las baterías de plomo-ácido, en las baterías alcalinas, el electrolito no cambia de composición química conforme se carga o descarga la batería. Únicamente sirve como un medio de transporte de electrones, entre las placas positivas y negativas.

Normalmente, el material activo de la placa positiva es hidróxido de níquel con un porcentaje de grafito, y, en la placa negativa, hidróxido u óxido de cadmio, con polvo de hierro.

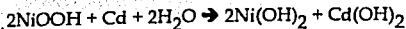
Conforme se descarga la batería, el cadmio se oxida de la siguiente manera:



El níquel, por su parte, se reduce así:



La reacción total queda:



Existen en el mercado dos tipos de baterías níquel-cadmio; las selladas y las ventiladas. Las selladas tienen una válvula de presión que se acciona para evitar una explosión, en caso de que la batería se sobrecargue, calentándose y produciendo gasificación. Las ventiladas, tienen pequeñas válvulas que se abren y se cierran con pequeños cambios de presión. Dentro de las ventiladas existen dos tipos diferentes: aquéllas con placas tipo bolsa (*pocket*) y las que tienen placas sinterizadas.

Las baterías níquel-cadmio ventiladas con placas tipo bolsa, son bastante robustas y son usadas en aplicaciones que requieren una cierta resistencia a impactos y vibraciones. Las baterías con placas sinterizadas, tienen una resistencia interna mucho menor, y por lo tanto se usan en aplicaciones que requieren de corrientes de descarga altas.

Las baterías níquel-cadmio en general, tienen un voltaje por celda de 1.2 volts, y varía muy poco, hasta que la batería está casi completamente descargada, después cae rápidamente. Un voltaje de corte de 1 volt es usado generalmente como indicador de que la batería está totalmente descargada.

Como ventajas principales se tienen: robustez, es decir, soportan el abuso eléctrico, como la sobrecarga, la sobredescarga, y dejarla largo tiempo en reposo descargada. Soportan también el abuso mecánico, impactos y vibraciones; tiene una baja resistencia interna, por lo que soporta altas corrientes de carga y descarga, y tiene una rápida recarga, sin embargo la resistencia interna aumenta conforme disminuyen el estado de carga y la temperatura; tiene una larga vida y soporta ciclos de descarga profunda; no son afectadas por la temperatura, de la manera en que se afecta la batería plomo-ácido. Incluso si se llegase a congelar el electrolito, la batería seguirá funcionando normalmente cuando se restablezcan las condiciones de operación; tienen una muy baja gasificación en la sobrecarga y por lo tanto requieren de poco mantenimiento; es reciclable y tiene una baja autodescarga, aunque ésta aumenta conforme aumenta la temperatura.

Dentro de las desventajas se tienen: costo muy alto; tienen un menor voltaje que las baterías plomo-ácido; tienen una energía específica igual o en algunos casos menor que las plomo-ácido; sufren de efecto memoria y el cadmio es un material altamente tóxico.

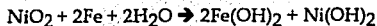
### 1.2.3.- BATERÍA NÍQUEL-HIERRO.

Estas baterías fueron desarrolladas por Tomás A. Edison, a finales del siglo XIX. También son baterías alcalinas, y han sido usadas tradicionalmente en aplicaciones que requieren de ciclos constantes de carga y descarga, aunque también son usadas en sistemas de no interrupción.

Son extremadamente robustas, puede soportar abusos eléctricos y mecánicos que destruirían cualquier otro tipo de batería, pero tiene desventajas eléctricas, pues su voltaje de salida es bajo entre 1.1 y 1.2 volts por celda, y éste cae rápidamente conforme se descarga la batería; tiene mayor peso y volumen para la misma capacidad de una batería plomo-ácido, pero tiene un gran potencial para mejorar su energía específica.

Generalmente se utilizan en condiciones de descarga moderada, ya que el valor de la corriente de descarga, pone de manifiesto la resistencia interna relativamente elevada del sistema, resistencia que aumentará conforme disminuyen el estado de carga y la temperatura. El sistema níquel-hierro es más sensible en general a las bajas temperaturas, que el sistema níquel-cadmio.

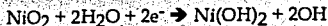
La reacción del sistema níquel-hierro es como sigue:



La reacción en el ánodo es:



La reacción en el cátodo es:



El electrolito es generalmente una solución de agua con hidróxido de potasio, y una pequeña cantidad de hidróxido de litio.

Las baterías níquel-hierro, pierden diariamente 1.5% de su carga en circuito abierto, y esta, relativamente alta, autodescarga se debe principalmente a que la placa de hierro se corroe en el electrolito. Tienen una muy larga vida, su vida cíclica es mejor que cualquier otro tipo de batería.

Las baterías níquel-hierro tienen un alto costo, no por sus componentes sino por su proceso de fabricación. Las placas de níquel son producto de una larga e intensa labor que puede tomar bastante tiempo, ya que requiere sinterizar los electrodos e impregnarlos con hidróxido de níquel.

Son consideradas benignas ecológicamente, despiden hidrógeno durante la carga por lo que tienen que ser rellenadas constantemente con agua destilada y no pueden ser selladas.

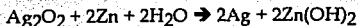
#### 1.2.4.- BATERÍA PLATA-ZINC

Estas baterías comenzaron a fabricarse comercialmente en 1940, y desde entonces han encontrado su mayor aplicación, en el campo militar.

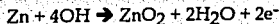
La placa positiva es generalmente de plata sinterizada, y puede contener óxido de plata preparado químicamente. La placa negativa de zinc, se fabrica de diferentes maneras, aunque a menudo se emplean técnicas de polvo comprimido, mezclado con óxido de zinc y óxido de mercurio, para minimizar la gasificación.

El electrolito, es 40% hidróxido de potasio en agua, y el separador es de celofán y alcohol de polivinilo. Tiene un voltaje de circuito abierto de 1.6 volts.

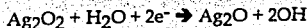
las reacciones de este sistema son:



en el ánodo,



y en el cátodo,



La batería plata-zinc, tiene como principal característica, una excepcionalmente alta densidad de energía: cerca de 140 Wh/kg. Tiene una muy baja resistencia interna, aún para corrientes de descarga altas. Tiene una

muy baja autodescarga, puede retener del 80% al 95% de su capacidad en 12 meses a temperatura ambiente. Tiene buena resistencia a los esfuerzos mecánicos, vibraciones, choques y aceleraciones.

Las bajas temperaturas afectan desfavorablemente las propiedades de descarga de las celdas, no soporta ciclos de descarga profunda, tiene un muy alto costo, uno de los más altos, y su vida es muy limitada, cerca de 15 ciclos.

Si se tienen los recursos, ésta es la mejor opción, en cuanto a baterías electroquímicas se refiere, para vehículos solares, mas no así para vehículos eléctricos.

#### 1.2.5.- BATERÍA SODIO-AZUFRE.

El desarrollo de este tipo de baterías empezó en 1963, con el descubrimiento, en Ford, que el material cerámico de beta-alúmina, aislante electrónico a temperatura ambiente, conducía iones con bajas pérdidas por resistencia a elevadas temperaturas. De este material está hecho el electrolito de la batería, que conduce perfectamente los iones, pero no así los electrones, desempeñando así, no solamente la tarea de medio de transporte de los iones entre las placas, sino que también es su separador. De esta manera, también se evita, por completo, la autodescarga. El electrolito cerámico está compuesto de placas extremadamente delgadas para mantener baja la resistencia interna, esto provoca que esta batería no sea apropiada para soportar vibraciones o impactos, pues se corre el riesgo de que se rompa la frágil capa cerámica.

La batería de sodio-azufre tiene electrodos en estado líquido, pues opera a más de 300°C. Los iones de sodio fluyen a través del electrolito hasta donde se encuentra el azufre, formándose polisulfatos de sodio. Los electrones fluyen a través del circuito externo del azufre al sodio.

La temperatura se mantiene, gracias a un calentador interno, y a su buen aislamiento térmico, con una cámara de vacío, separada del exterior por una doble pared de acero inoxidable, que en medio tienen un material altamente adiabático. En raras ocasiones llega a bajar la temperatura, ocasionando la solidificación de los electrodos, pero una vez restablecida la temperatura de

operación la batería puede seguir funcionando normalmente. Estos ciclos de fundición, solidificación, de los electrodos, no afecta eléctricamente a la batería, pero sí la afecta mecánicamente, ya que los esfuerzos térmicos de contracción y expansión pueden romper el frágil electrolito.

Durante la carga no presenta gasificación, y el voltaje asociado a la reacción química varía de 1.78 a 2.08 volts, dependiendo del estado de carga. Es de los sistemas con mejor potencia específica, cerca de 160 W/kg, y también una muy buena energía específica, 80 Wh/kg, esto se debe a que utiliza materiales ligeros.

El alto precio actual, similar al de las baterías de níquel-cadmio, se debe al bajo volumen de producción.

Otra de las grandes desventajas, es que tanto el sodio como el azufre fundidos, son altamente peligrosos. Si el sodio se pone en contacto con el agua se produce una reacción sumamente violenta y el azufre al ser quemado libera humos muy tóxicos.

Las baterías sodio-azufre, aún están en perfeccionamiento, pero es una de las mejores opciones futuras para automóviles eléctricos.

#### 1.2.6.- BATERÍA ZINC-BROMO

Esta batería, es otra de las mejores opciones para vehículos eléctricos, a largo plazo. Al igual que las sodio-azufre, éstas tienen electrodos en estado líquido. Estos electrodos usan carbón inerte y soluciones de bromuro de zinc acuoso por un lado, y bromuro de zinc y bromo por el otro. El zinc en solución se adhiere a uno de los electrodos durante la carga y regresa a ser solución durante la descarga.

Esta batería opera a temperatura ambiente y no tiene materiales cerámicos delicados en su interior, sin embargo, requiere del uso de dos depósitos y dos bombas, para hacer circular los dos fluidos, con objeto de mantener la adhesión del zinc uniforme, y la celda fría. Las bombas, las válvulas y los depósitos, añaden peso al sistema que disminuye su energía y potencias específicas. Ambos circuitos se completan en las placas de carbón inerte.

El bromo es un material nocivo y altamente reactivo, que puede ser difícil de contener en bombas y tuberías, sin embargo se considera a esta batería como benigna ecológicamente, y es reciclable.

Los materiales de construcción no son caros, por lo que a grandes volúmenes de producción, pueden igualar el costo de las baterías plomo-ácido, pero las baterías zinc-bromo, tienen de 2 a 3 veces su energía específica.

#### 1.2.7.- BATERÍA NÍQUEL-ZINC

Esta batería tiene valores altos tanto en energía específica, cerca de 90 Wh/kg, como en potencia específica 140 W/kg. Tiene un voltaje de circuito abierto de 1.8 volts, y soporta un amplio rango de temperaturas, desde -40°C hasta 50°C.

Tiene como electrodos al zinc en el ánodo, e hidróxido de níquel en el cátodo. Contiene una solución de 30% hidróxido de potasio y 70% agua, como electrolito.

Tiene una buena resistencia mecánica y soporta altas corrientes de descarga. Pierde 30% de su capacidad al estar un mes en reposo a temperatura ambiente, y tiene una vida bastante corta de 200 ciclos de descarga relativamente profunda.

#### 1.2.8.- BATERÍA DE NÍQUEL-HIDRURO DE METAL

Esta batería tiene un electrodo hecho de hidróxido de níquel, y el otro de una aleación policristalina capaz de almacenar hidrógeno en estado sólido. Esta aleación está compuesta de níquel, vanadio, zinc, titanio y cromo.

Se dice que es benigna ecológicamente. Es una batería sellada, libre de mantenimiento y no tiene efecto memoria. En el laboratorio, ha demostrado que puede suministrar energías específicas del orden de los 80 Wh/kg, y tiene una muy baja resistencia interna.

### 1.2.9.- BATERÍA ZINC-AIRE

Ésta es otra de las baterías en experimentación. Hasta ahora se sabe que es benigna ecológicamente, que tiene una alta energía específica de 100 Wh/kg, pero también que tiene, sin embargo, una bajísima potencia específica de 10 a 20 W/kg, y severos problemas en su vida cíclica.

Quizá su ventaja más notoria es que a grandes volúmenes puede ser producida a menos de la mitad del costo de una batería plomo ácido.

### 1.2.10.- BATERÍAS DE LITIO.

Existen una serie de baterías, cuyo elemento negativo es el litio, cuyo electrolito es un polímero, y que pueden tener diferentes combinaciones de elementos, como electrodo positivo. Ahora se encuentran en investigación las baterías de litio-aluminio, litio-bisulfato de hierro, y la de litio-aluminio-bisulfato de hierro.

Estas baterías son capaces de operar desde la temperatura ambiente hasta los 120°C y puede ser manufacturada fácilmente en diversas formas. El mayor problema que presentan estas baterías es el de encontrar la manera de disipar el calor generado durante la carga y descarga, ya que la temperatura puede dañar al electrolito, y además, el litio es un material todavía más reactivo que el sodio, por lo que tiene que ser perfectamente aislado de la humedad.

Las baterías de litio, son consideradas como una de las opciones más atractivas en el largo plazo para vehículos eléctricos. Actualmente se han logrado energías específicas de 100 a 200 Wh/kg, y potencias específicas de hasta 1600 W/kg. También se han conseguido de entre 500 a 1000 ciclos de descarga al 100%.

### 1.2.11.- VOLANTES DE INERCIA (FLYWHEELS).

Los volantes de inercia, convierten la energía eléctrica en energía cinética y la almacenan de esta forma, para reconvertirla a energía eléctrica para su



utilización. Es por esto, que también se les conoce, como baterías electromecánicas.

Originalmente, el volante de inercia era un rotor de acero con una gran masa que giraba a cientos de radianes por segundo. Sin embargo, el tipo de volante de inercia que se considera para una aplicación, como los vehículos eléctricos o solares, es pequeño, hecho de materiales ultraligeros, y con una gran resistencia mecánica, como las fibras compuestas, en especial la fibra de carbono, y gira a velocidades del orden de los 10,000 rad/s, alcanzando velocidades tangenciales en su periferia de Mach 2 hasta Mach 3<sup>23</sup>.

Este tipo de volantes de inercia, almacenan muchísima más energía, que aquéllos de acero que tienen una gran masa. La razón de que esto suceda, se debe a que la energía almacenada aumenta linealmente con la masa del rotor, pero también se incrementa proporcionalmente al cuadrado de la velocidad angular. Como un rotor hecho de un material ligero y de alta resistencia mecánica, puede girar miles de veces más rápido que uno de acero, antes que la fuerza centrífuga amenace con romperlo, éste puede almacenar más energía y de una manera mucho más segura, ya que mientras los masivos rotores de acero fallan de una manera espectacular y peligrosa, los rotores de fibra de carbono al fallar se asemejan a una madeja de estambre que se deshilvana a una gran velocidad, o se comportan como un dulce de algodón.

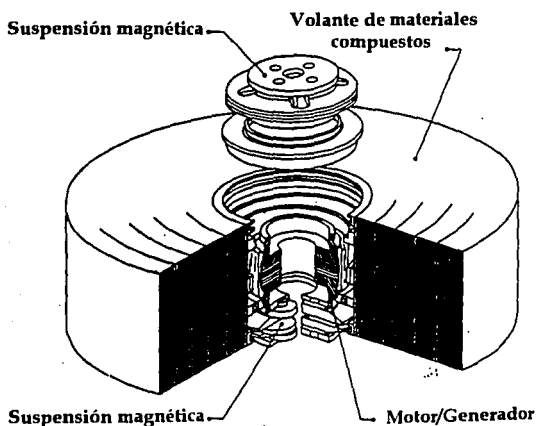
Se están llevando a cabo investigaciones para determinar la mejor manera de construir estas baterías electromecánicas. Hasta ahora la mejor opción parece ser un rotor de fibra de carbono tridimensional, es decir, que sus fibras de alta resistencia corren en las tres direcciones, con poderosos imanes permanentes unidos a él. Este rotor, estará dentro de una cámara de vacío y montado sobre una suspensión magnética, ambas medidas con el objeto de minimizar pérdidas por fricción y resistencia al aire, evitando al mismo tiempo el desgaste del rotor. Por fuera de la cámara de vacío, y rodeando al motor, se coloca un devanado con el objeto de hacer un sistema motor/generador y evitar al mismo tiempo el problema de enfriar una bobina en el vacío. Todo esto estará contenido en una caja de fibra de carbono tridimensional, para evitar la propagación de posibles

---

<sup>23</sup> NESEA, op. cit 10.

grietas, que permita al mismo tiempo un perfecto sellado que mantenga la presión de vacío.

La batería funcionará como generador al ser descargada, y como motor al ser cargada, teniendo una muy alta eficiencia, una muy baja autodescarga y una vida extraordinariamente larga de 10 a 15 años. Se pueden tolerar altas corrientes de carga y descarga sin degradar al sistema, puede ser recargado rápidamente, y puede soportar cualquier cantidad de ciclos de descarga profunda.



Usando sistemas como éste, se han calculado energías específicas del orden de entre 90 a 150 Wh/kg. Únicamente el rotor, es capaz de arrojar 753 Wh/kg<sup>24</sup>, pero de igual manera que en las baterías electroquímicas, existen muchos factores que disminuyen ese valor teórico: el peso de la suspensión magnética, de los componentes del sistema motor-generador, y de la caja que los contiene. Además se debe considerar, que el rotor no siempre estará girando a su

<sup>24</sup>Ibidem.

velocidad óptima, sino que operará cíclicamente variando su velocidad angular de un 26.7% hasta un 80% de su velocidad máxima.

A pesar de tener una muy buena energía específica, lo que realmente llama la atención de la batería electromecánica, es su potencia específica. Mientras las mejores baterías electroquímicas dan potencias específicas del orden de los 200 a 400 W/kg, y el motor de combustión interna de entre 600 a 800 W/kg (el motor de un auto fórmula uno puede dar hasta 3500 W/kg), la batería electromecánica proporciona potencias específicas de hasta 5000 a 10 000 W/kg.

Aunque los volantes de inercia, de este tipo, podrían ser la mejor opción para un vehículo eléctrico o solar, tienen un problema que los aleja de serlo: un muy alto costo, producto del costo de sus materiales, y del alto nivel de ingeniería requerido en su construcción.

#### 1.2.12.- CELDAS DE COMBUSTIBLE (FUEL CELLS).

Las celdas de combustible, son básicamente baterías electroquímicas cuyos componentes son electrodos activados catalíticamente, teniendo en el ánodo un combustible como el metanol, el etanol, gas natural, hidrógeno líquido o gaseoso, o combustibles derivados del carbón, y en el cátodo, un oxidante, que generalmente es oxígeno, junto con un electrolito que conduce los iones entre ellos. Como en las baterías electroquímicas, el electrolito puede ser una solución ácida, o una alcalina.

Las celdas de combustible funcionan de manera inversa a la electrólisis del agua. Aunque la reacción electroquímica varía, dependiendo de los materiales usados para el ánodo, el cátodo, y el electrolito, todas las celdas combustibles combinan iones de hidrógeno y oxígeno para formar agua, produciendo un flujo de electrones en el proceso, del ánodo al cátodo.

Actualmente se está investigando en 5 tipos de celdas; la alcalina (AFC); la de polímero como electrolito (PEFC); la de ácido fosfórico (PAFC); la de carbonato fundido (MCFC); y la de óxido sólido (SOFC).

La principal diferencia entre estas cinco celdas combustible es el electrolito y la temperatura de operación.

TIPO	ELECTROLITO	TEMP.	APLICACIÓN
AFC	Hidróxido de potasio	100°C	Transbordador espacial
PEFC	Membrana Conductoras Iónica	80°C	Transporte
PAFC	Ácido fosfórico	200°C	Plantas generadoras
MCFC	Litio y carbonato de potasio fundidos	650°C	Plantas generadoras
SOFC	Óxido de circonio	1000°C	Plantas generadoras

A pesar de que las celdas de combustible arrojan gases a la atmósfera, producto de la conversión electroquímica del combustible en el ánodo, esta conversión se produce a una mucho mayor eficiencia que los motores de combustión interna eliminando prácticamente partículas, óxidos de nitrógeno (NOx), óxidos de azufre (SOx), y reduciendo significativamente los hidrocarburos y el monóxido de carbono.

Todas las celdas de combustible necesitan de un sistema auxiliar para controlar la temperatura y disipar el calor generado en los compartimientos del combustible, ya que el voltaje de salida decrece con el incremento de la temperatura. El voltaje teórico de operación de una celda combustible típica, de hidrógeno y oxígeno puros como electrodos, a una atmósfera y a 25°C, es de 1.23 volts.

La diferencia importante, y al mismo tiempo, su mayor ventaja en comparación con las baterías electroquímicas convencionales, es que para recargar una celda de combustible, no se invierte el proceso electroquímico, pues en ella los electrodos se consumen. Lo que se hace es recargar la celda, de combustible y oxidante, tal y como se recarga un tanque de gasolina, tomando este proceso de recarga, aproximadamente el mismo tiempo y proporcionando un rango comparable al que se obtiene en un automóvil de combustión interna.

Las celdas de combustible, se han utilizado con mucho éxito en las naves espaciales, pero éstas son demasiado grandes y costosas para tener una aplicación terrestre, comercial. Se está trabajando en la posibilidad de hacer celdas combustibles más apropiadas para una aplicación como los vehículos eléctricos.

A continuación se presenta una tabla, en la que se comparan los diversos sistemas de almacenamiento aquí presentados. Los valores que se muestran, son valores comunes para los diferentes tipos de baterías, estos valores pueden cambiar según el fabricante y las condiciones de operación.

*Tabla comparativa de las diversas tecnologías en baterías*

Tipo de batería	Anodo	Cátodo	Electrolito	Voltaje celda (voltage)	Densidad energética (Wh/Kg)	Densidad de potencia (W/Kg)	de Vida (ciclos)	Costo (US \$ /KWh)
Plomo ácido	Plomo	Bióxido de plomo	Acido sulfúrico	2.1	25 a 40	100 a 200	400 a 1000	100 a 150
Níquel cadmio	Cadmio	Hidróxido de níquel	Hidróxido de potasio	1.3	40 a 55	150 a 250	500 a 2000	400 a 800
Níquel hierro	Hierro	Hidróxido de níquel	Hidróxido de potasio	1.3	50 a 60	90 a 120	800 a 2000	600 a 800
Plata zinc	Zinc	Óxido de plata	Hidróxido de potasio	1.6	130 a 160	160	20 a 50	
Sodio azufre	Sodio	Azufre	Beta-alúmina	2.08	90 a 120	120 a 160	350 a 1000	300 a 800
Zinc bromo	carbón inerte	Carbón inerte	Doble sistema de electrolitos: Bromuro de zinc y bromo	1.8	70 a 80	90 a 100	700 a 1000	200 a 400
Níquel zinc	Zinc	Hidróxido de níquel	Hidróxido de potasio	1.7	50 a 60	130 a 180	200 a 500	300 a 600
Níquel hidruro de metal	Aleación	Hidróxido de níquel	Hidróxido de potasio	1.4	70 a 80	150 a 300	500 a 1000	400 a 1000
Zinc aire	Zinc		Hidróxido de potasio	1.62	100 a 180	< 50	50 a 70	20 a 50
Litio	Litio	Bisulfato de hierro-aluminio	Polímero	1.6 a 3	90 a 200	80 a 1600	50 a 1800	800 a 1600
Volantes inercia de	Ninguno	Ninguno	Ninguno	rpm	100 a 150	5000 a 10000	100,000	300 a 1000
Celdas combustible	Hidrógeno en combustible	Oxígeno	Varios	1.23	?	?	1000 a 2000	?

Nota: Algunos valores de las celdas combustibles no se han determinado.

### **1.3.- SUBSISTEMA DE SUMINISTRO**

Este subsistema es el más importante en el vehículo solar, pues es el que proporciona la energía eléctrica necesaria para que el vehículo se mueva. Este subsistema se analizará más a fondo en el siguiente capítulo, sólo haré algunos comentarios generales.

Por panel solar se entiende el conjunto de todos los componentes que desempeñan un papel importante en la conversión de energía solar a energía eléctrica, y aquéllos que proporcionan estructura y protección. Básicamente esos componentes son: el sustrato, el adhesivo, el arreglo, y el recubrimiento. Tanto el sustrato como el adhesivo y el recubrimiento se estudian en el capítulo IV.

Por arreglo se entiende al conjunto de elementos necesarios para convertir la luz del sol en electricidad; esto es, las celdas solares, los conductores, los diodos de paso y los diodos de bloqueo.

El arreglo está generalmente diseñado de forma modular, esto es, el arreglo se compone de un grupo de módulos conectados entre sí. A su vez los módulos están integrados por submódulos y éstos por series de celdas solares, llegando así a la unidad básica: la celda solar.

Los rastreadores de potencia pico, son circuitos electrónicos cuya función es forzar al módulo a operar en el punto de máxima potencia en todo momento.

La manera en que se ensamblan el sustrato, el arreglo y se conectan los rastreadores de potencia pico se analiza en el capítulo IV.

### **1.4.- ARNÉS DE INTERCONEXIÓN:**

El arnés de interconexión es el conjunto de todos los dispositivos de conducción, sujeción, interrupción y seguridad, que interconectan a los diferentes elementos del sistema eléctrico primario.

#### 1.4.1.- CONDUCCIÓN.

Todos los cables deberán estar dimensionados adecuadamente para soportar la corriente que circulará por ellas, sin calentamiento excesivo, deberán ser de la menor longitud posible. Existen muchos tipos de cables, y se deberá escoger aquél de diámetro y peso menores pero buscando al mismo tiempo que tenga la menor resistencia posible a la conducción.

En un auto solar las corrientes pueden ser hasta de 120 amperes según las condiciones de operación.

#### 1.4.2.- SUJECIÓN.

Dentro de los elementos de sujeción están todas las terminales, conectores, tornillos, tuercas, abrazaderas, rondanas, etcétera, que se requieran para evitar que las conexiones estén flojas, presenten altas resistencias o puedan safarse, o bien que los conductores se muevan y puedan causar un corto circuito. Al igual que los elementos de conducción, los elementos de sujeción deben concordar con el principio que rige el diseño total del auto, la seguridad y la eficiencia, es decir, tendrán que minimizar pérdidas eléctricas y minimizar peso, al mismo tiempo que cumplen eficazmente con su función.

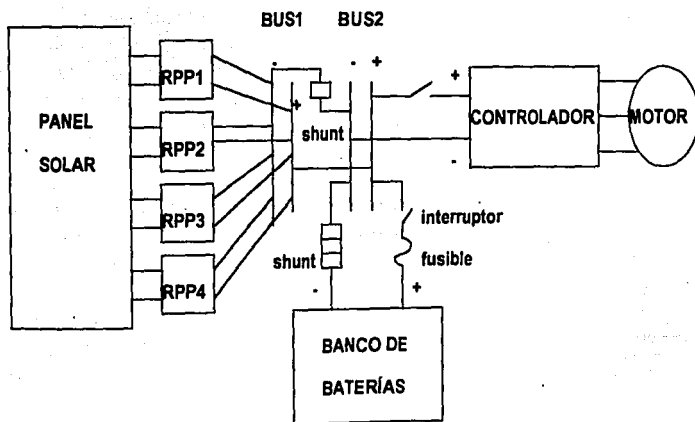
#### 1.4.3.- INTERRUPCIÓN Y PROTECCIÓN.

Debido a que cada interruptor representa una pequeña pérdida eléctrica, se trata de mantener un número mínimo de interruptores. El reglamento de la competencia Sunrayce 95, ordena el uso de dos interruptores básicamente; un interruptor que desconecte al motor de toda posible fuente de energía, y que además tenga la capacidad de desconectar el motor cuando se encuentra a plena carga, y un segundo interruptor que desconecte las baterías del resto de los elementos del sistema, éste último deberá también ser capaz de desconectar a plena carga. Ambos interruptores deberán estar visibles, y podrán ser

accionados tanto por el conductor como por alguna persona desde el exterior del vehículo.

En cuanto a los fusibles, el reglamento sólo indica que se debe utilizar un fusible principal que proteja al controlador en caso de sobrecarga y que éste no sea de una capacidad mayor al 200% de la corriente nominal de operación, sin embargo es muy aconsejable que cada uno de los componentes electrónicos (como los rastreadores de potencia pico), se protejan en caso de que no cuenten con una protección propia en su circuito.

El siguiente diagrama muestra *a grosso modo* el arnés de interconexión de un auto solar como Tonatiuh.





## CAPÍTULO 2

### EL PANEL SOLAR, ANÁLISIS.

#### 2.1.- LA FOTOCELDA.

##### 2.1.1.- HISTORIA:

El físico francés Alexandre Edmond Becquerel, a los 20 años de edad, descubrió que la luz podía producir electricidad (fenómeno fotovoltaico) en 1839. Fue el hijo de Antoine César Becquerel, un científico prominente que hizo profundas investigaciones en la generación de electricidad a través de reacciones químicas. Por la influencia de su padre, y como muchos de los científicos de la época, Becquerel dedicó mucho de su estudio a la electricidad. Como parte de una serie de experimentos eléctricos, introdujo dos placas de metal en una solución ácida conductora. Notó que al exponer el aparato a la luz solar se incrementaba la corriente que éste producía. Becquerel publicó este descubrimiento, sin embargo, para ese entonces, no había un uso práctico para las pequeñas corrientes generadas y la idea se quedó en los estantes de las librerías científicas.

Treinta y cuatro años después, en 1873, Willoughby Smith, un ingeniero de la *Telegraph Construction Company* en la Gran Bretaña, estaba probando diferentes metales en búsqueda de alguno que fuese adecuado para usarse como cable de telégrafo submarino. Trabajando con barras de selenio metálico, Smith

descubrió que en la ausencia de luz, el selenio tenía una cierta resistencia eléctrica, pero cuando éste se exponía a la luz, rápidamente perdía su resistencia y se convertía en un buen conductor eléctrico. Con el uso de diversos filtros de luz, notó que la conductibilidad del selenio tenía un incremento directamente proporcional al incremento en la intensidad de luz.

Tres años después, Adams y Day, observaron este fenómeno fotovoltaico en el selenio sólido, lo que en 1883 se convirtió en la primera celda solar fotovoltaica de selenio en manos de Charles Fritts. Nuevamente a pesar del entusiasmo de su inventor y del apoyo del importante industrial alemán, el ingeniero Werner Siemens esta idea no tuvo éxito comercial; primero, porque el selenio no es un elemento muy común, se considera que ocupa el lugar 69 en orden de abundancia en la tierra y por lo tanto es caro y segundo, solamente era capaz de convertir el 1% de la luz que recibía en electricidad, lo que producía muy poca corriente para tener un uso práctico. A estos dos argumentos se sumaba el hecho de que la forma en que una celda solar produce electricidad era poco comprendida, ya que la explicación del fenómeno superaba el marco de la física clásica y los conocimientos de la época. No fue sino hasta la aparición de la física cuántica que éste se comprendió.

En 1905, Hallwachs, encontró que la combinación cobre-óxido de cobre, era fotosensitiva, sin embargo, esta combinación resultó ser aún más ineficiente que el selenio.

Fue hasta 1950, que un grupo de investigadores del *AT&T Bell Laboratories*, encabezados por Cal Fuller y Gordon Pearson, buscando la manera de hacer del silicio un mejor rectificador, encontraron que al agregar impurezas al silicio, éste incrementaba su eficiencia, sin embargo, y por pura casualidad, el descubrimiento más importante fue que al exponer este silicio con impurezas a la luz del sol, éste generó electricidad.

Al mismo tiempo, en estos mismos laboratorios, Darryl Chapin buscaba la manera de hacer una celda solar más eficiente que la del selenio para aplicaciones en estaciones de comunicación remotas. Al conocer el descubrimiento de Fuller y Pearson, se formó un nuevo equipo para fabricar una nueva celda solar fotovoltaica de silicio, con estos tres científicos. El equipo

logró hacer una celda solar con 4% de eficiencia y posteriormente en mayo de 1954 una celda con 6% de eficiencia.

A pesar de este gran incremento en la eficiencia con respecto a las celdas de selenio, y que en 1958 se lograron celdas con eficiencias de hasta 14 % en laboratorios, un análisis económico revelaba que esta nueva forma de obtener electricidad no era competitiva con las fuentes convencionales, por lo que nuevamente esta idea estuvo a punto de ser archivada en los anaqueles de las librerías, de no ser por la carrera espacial entre los Estados Unidos y la URSS.

En el espacio, las fotoceldas resultaron ser la fuente de energía más conveniente, por lo que los programas espaciales fueron los encargados de desarrollar la industria de las celdas solares. Prácticamente todos los satélites han obtenido su energía de las celdas solares.

Con el desarrollo de la industria fotovoltaica conseguido por la carrera espacial, se empezaron a utilizar las celdas solares para aplicaciones terrestres, la mayor parte de ellas en lugares remotos, teléfonos rurales, transmisiones de radio en repetidoras, irrigación, iluminación, desalinadoras de agua, como fuente de energía en casas y edificios, e incluso se han construido ya plantas generadoras de electricidad.

Definitivamente, y a pesar de que aún el precio de la energía solar es mayor que el de las plantas generadoras de electricidad convencionales, la energía solar ha encontrado un mercado en el que difícilmente podrá ser substituida, y este mercado se ampliará conforme los precios disminuyan y la eficiencia aumente.

#### 2.1.2.- FUNCIONAMIENTO.

Para entender plenamente el fenómeno fotovoltaico, hay que entender primero la naturaleza de la luz.

Aunque en alguna ocasión en el siglo XVIII, Isaac Newton hizo una descripción corpuscular de la luz, durante mucho tiempo hasta finales del siglo XIX la luz se había considerado como ondas electromagnéticas. Sin embargo, una serie de experimentos pusieron de manifiesto que la superficie de un metal emite electrones cuando incide sobre él, una luz de frecuencia suficientemente

elevada. Este fenómeno se conoce como el efecto fotoeléctrico. Este fenómeno presenta ciertas características que no pueden ser explicadas partiendo de la teoría electromagnética de la luz: primero, la energía del fotoelectrón emitido, dependía de la frecuencia de la luz empleada y no de la intensidad; segundo, la cantidad de fotoelectrones emitidos era directamente proporcional a la intensidad de luz; y por último, no hay retraso de tiempo entre la llegada de la luz a la superficie metálica y la emisión de fotoelectrones.

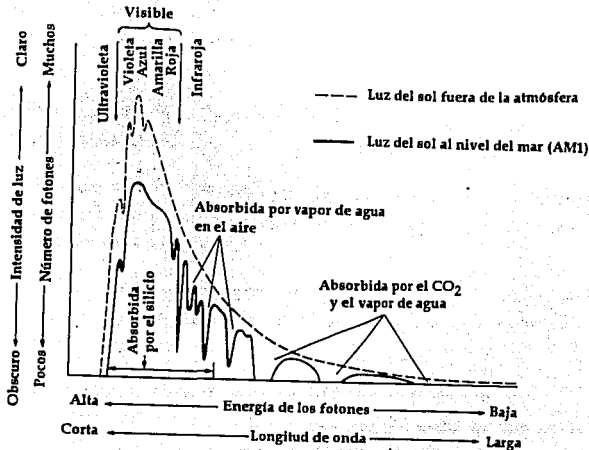
La teoría electromagnética de la luz explica tal cantidad de fenómenos ópticos, entre ellos la difracción y la interferencia, que es una de las teorías más firmemente establecidas en la física clásica, sin embargo, esta teoría está en completa oposición al efecto fotoeléctrico.

En 1905, Albert Einstein encontró que la paradoja que presenta el efecto fotoeléctrico, podía resolverse únicamente si se tenía en cuenta una idea propuesta cinco años antes por el físico alemán Max Planck. Planck intentó explicar las características de la radiación que emiten los cuerpos a temperaturas suficientemente elevadas para ser luminosos. Supuso que la radiación se emitía discontinuamente en forma de pequeños paquetes de energía a los que llamó cuantos.

Einstein propuso que la luz no solamente se emitía en forma de cuantos, sino que también se propagaba en forma de cuantos a los que llamó fotones.

La Teoría Cuántica de la luz probó ser satisfactoria para explicar el efecto fotoeléctrico.

El sol, con sus 1,390,000 Km de diámetro, y sus 1,370 trillones de  $m^3$  de gases que se encuentran a millones de grados centígrados, emite una enorme cantidad de fotones con diferentes frecuencias, y por lo tanto, de diferente energía, que conforman el espectro solar. Los fotones de menor frecuencia son los infrarrojos, seguidos por aquellas frecuencias visibles por el ojo humano que van del rojo al violeta, y por último por los fotones de más alta frecuencia, los ultravioleta.



De toda la energía que llega del sol en forma de fotones, cerca del 30 % es reflejada instantáneamente por la atmósfera, otro 47 % es absorbido por la atmósfera y se convierte directamente en calor y sólo un 23 % de ésta, llega a la superficie de la tierra como luz.

Se sabe que el sol en un día claro a nivel del mar, cuando se encuentra en el cenit es capaz de producir alrededor de  $1 \text{ KW/m}^2$ , o bien,  $750 \text{ calorías/m}^2$ , cada hora.

Los fotones que llegan del sol, dependiendo de su energía son capaces de golpear los átomos de los diferentes elementos, liberando electrones que pueden producir una corriente eléctrica.

Cada uno de los elementos de la tabla periódica se caracterizan por una estructura atómica diferente. El átomo tiene dos partes: el núcleo, compuesto por protones y neutrones; y un número determinado de electrones que orbitan en diferentes niveles de energía alrededor del núcleo. El nivel de energía más

alejado del núcleo se conoce como Banda de Valencia y en ella se encuentran los electrones que son capaces de ser liberados para formar parte de una corriente eléctrica.

En términos de la conductividad eléctrica, los elementos pueden ser divididos en tres grupos básicos: conductores, semiconductores y aislantes.

Los conductores son elementos cuyos átomos sólo tienen uno o dos electrones en su Banda de Valencia, que pueden ser fácilmente liberados para transmitir una corriente eléctrica.

Los aislantes son los elementos cuyos átomos tienen seis o siete electrones en su Banda de Valencia, estos electrones están más fuertemente integrados y no pueden ser liberados fácilmente.

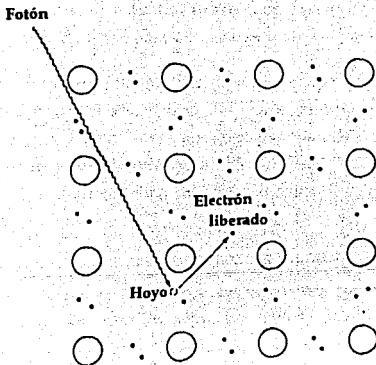
Los semiconductores son aquellos elementos cuyos átomos tienen tres, cuatro o cinco electrones en su Banda de Valencia y estos elementos tienen la propiedad de ser conductores o aislantes, dependiendo del estímulo externo.

El silicio es un elemento semiconductor, con cuatro electrones en su Banda de Valencia. El silicio es un elemento similar al carbón en sus propiedades químicas. Fue descubierto en 1823 por J.J. Berzelius y es el segundo elemento en orden de abundancia en la tierra después del oxígeno. Casi el 27.7% de la corteza terrestre está compuesta de silicio, sin embargo éste solamente se presenta en combinación con otros elementos.

El silicio es un buen material fotovoltaico, simplemente por que la mayor parte de los fotones del espectro solar, son capaces de liberar electrones. Cualquier fotón con una energía mayor a 1.08 electrón-volts, que corresponde a una longitud de onda de 11,500 amstrongs propia del infrarrojo, será absorbido por el átomo y liberará un electrón. Con esto, casi tres cuartas partes de las frecuencias en el espectro solar pueden liberar electrones en el silicio, sin embargo, cualquier fotón que tenga más energía que la mínima necesaria para liberar un electrón, convertirá su energía restante en calor, elevando la temperatura del silicio. Esto a la larga representa una desventaja, ya que como se verá después, las celdas de silicio bajan su eficiencia conforme aumenta la temperatura.

Las reacciones fotovoltáicas o de semiconducción se llevan a cabo de una manera más eficiente cuando el material tiene una estructura cristalina o policristalina. En un cristal, todos los átomos y moléculas están dispuestos conforme un patrón definido constante y repetido. En el estado amorfo o no cristalino, también se llevan a cabo estas reacciones pero con una menor eficiencia.

Cuando un fotón golpea al silicio cristalino, éste penetra hasta que es absorbido por un átomo. Inmediatamente, la energía del fotón es transferida a uno de los cuatro electrones en la Banda de Valencia, que se libera del átomo abandonando la celda en la que se encontraba y dejando un hoyo en su lugar. Este proceso se repite para millones de electrones en el silicio cristalino, que son liberados dejando un número equivalente de hoyos en las celdas donde se encontraban. Cualquier electrón que pase sobre alguno del los hoyos se colocará en éste liberando una pequeña cantidad de calor en el proceso. Cuando la luz deja de incidir en el silicio, todos los electrones liberados son rápidamente absorbidos por los hoyos, el cristal regresa a su estado original con una pequeña elevación en su temperatura.



Todo este proceso se lleva a cabo internamente sin poder producir un flujo de electrones hacia un circuito externo.

Para poder lograr este flujo de electrones hacia el exterior los científicos desarrollaron la técnica que denominaron como "contaminación" (*doping*). En esta técnica, se agregan impurezas especiales en pequeñas cantidades (cerca de una parte por millón) al silicio, para desbalancear su estructura cristalina interna.

Generalmente son dos, los elementos utilizados para este propósito: el boro, que tiene tres electrones de valencia, y el fósforo, que tiene 5.

Cuando el silicio es contaminado con boro, su estructura atómica se altera por la deficiencia de electrones que el boro introduce. En lugar de tener las series regulares de silicio puro con cuatro electrones de valencia, la estructura cristalina del silicio contaminado con boro presenta ocasionalmente un hoyo extra que no es llenado. Como los electrones tienen carga negativa, esta deficiencia de electrones provoca que todo el cristal de silicio-boro presente carga positiva y se le denomina tipo p.

Al contaminar el silicio con fósforo, se produce el efecto contrario. El fósforo con sus 5 electrones de valencia, provoca un exceso de electrones en la estructura cristalina por lo que presenta carga negativa y se denomina tipo n.

Una celda fotovoltaica de silicio, consiste en una capa de silicio tipo p, en íntima unión con una capa de silicio tipo n. La capa tipo n es mucho más delgada que la tipo p y es la que generalmente se expone a la luz. La capa tipo n, generalmente tiene un espesor de cerca de  $0.5 \times 10^{-6}$  m, mientras que la celda entera llega a tener un espesor máximo de  $250 \times 10^{-6}$  m. Cerca de tres veces el espesor de un cabello humano.

Cuando la luz incide sobre la capa tipo n, se empieza a llevar a cabo el proceso antes descrito y se podría pensar que los electrones que hay en exceso en la capa negativa tratarían de llenar los hoyos en la parte positiva hasta llegar a un equilibrio. Afortunadamente esto no sucede ya que en el área de contacto entre las capas positiva y negativa, se forma una capa de carga electrostática de pocos átomos de espesor, y que por ser los electrones partículas cargadas



encuentran cierta dificultad al tratar de pasar a través de ella. A esta capa se le ha llamado barrera de potencial.

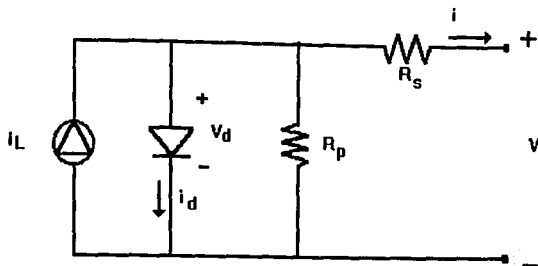
Esta barrera se forma instantáneamente cuando la fotocelda es fabricada, se mantiene a lo largo de la vida de la celda, nunca pierde sus propiedades y ninguna celda solar serviría sin ella. La gran utilidad de esta barrera de la celda, radica en el hecho de que deja pasar a través de ella únicamente a los electrones con alta energía. Como en la capa positiva existe una mayor cantidad de hoyos que electrones, los electrones liberados por la luz tienen una mayor movilidad y por lo tanto una mayor energía, logrando pasar con relativa facilidad la barrera. Por otro lado, en la parte negativa, el exceso de electrones reduce la movilidad, provocando que estos electrones tengan una menor energía y no puedan pasar la barrera.

Este fenómeno provoca, tarde o temprano, una acumulación de electrones en la capa negativa, dando lugar a la aparición de un voltaje. Al conectar una resistencia externa entre las capas negativa y positiva, se produce un flujo de electrones que puede ser usado para elaborar un trabajo. Este proceso continuará mientras incida luz, sin que exista consumo alguno en la masa del silicio o cambios en las propiedades físicas o en la estructura molecular, ya que los átomos no cambian su posición.

La cantidad de corriente producida por una celda es proporcional a la cantidad de luz (al número de fotones) que incide en la celda, por lo que la corriente aumenta cuando se incrementan el área de la celda y/o la intensidad de luz.

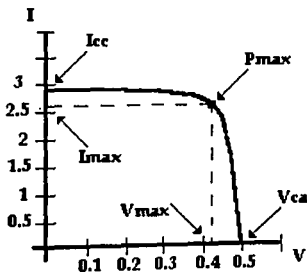
El voltaje, por otro lado, depende de los materiales usados, es decir de la constitución física de la celda. Una celda de silicio, con un área de 10 cm X 10 cm, producirá aproximadamente 0.5 volts y unos 3 amperes.

La celda se puede modelar mediante el siguiente circuito:



Es decir, se le puede considerar como una fuente de corriente en paralelo con un diodo ideal.  $R_p$  representa en realidad una conductancia y  $R_s$  representa la resistencia interna de la fotocelda

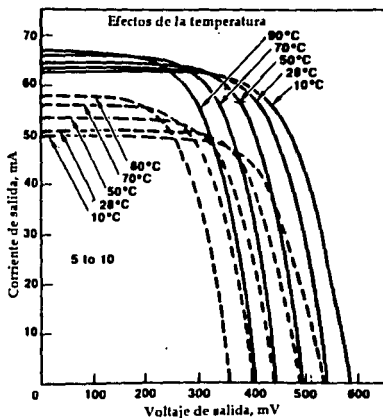
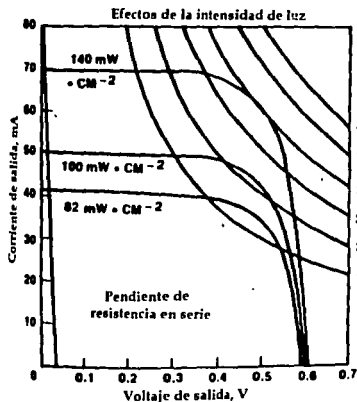
Cuando la resistencia externa, que se conecta entre las capas p y n es despreciable o tiende a cero, la corriente que fluye a través de ella se conoce como corriente de corto circuito. Si no hay un circuito externo conectado entre ellas, los fotones seguirán liberando electrones hasta que se llega a un equilibrio. El voltaje que se alcanza en ese equilibrio se conoce como voltaje de circuito abierto. Si la resistencia externa pudiera variarse desde cero hasta un valor muy grande, podrá obtenerse la curva característica de esa celda, que también se conoce como curva voltaje-corriente.



La potencia que puede entregar una celda solar es el producto de la corriente suministrada, por el voltaje entre sus terminales. En vista de esto, si se representa cualquier punto sobre la curva voltaje-corriente por un radio vector, cuyas componentes son la corriente y el voltaje suministrados por la celda a una determinada carga, la potencia máxima ocurre en la rodilla de la curva cuando la resistencia del circuito externo es igual a la resistencia interna de la celda.

La potencia obtenida de una celda solar depende de muchos factores, pero los dos más importantes son: la intensidad de luz y la temperatura de operación de las celdas.

Como se vio anteriormente, la corriente varía proporcionalmente a la intensidad de luz, pero el voltaje varía muy poco con los cambios en la intensidad de luz. Sin embargo, los cambios en la temperatura de operación de la celda afectan más al voltaje que a la corriente. Conforme la temperatura de operación de la celda aumenta, la corriente experimenta un muy pequeño aumento mientras que el voltaje baja considerablemente.



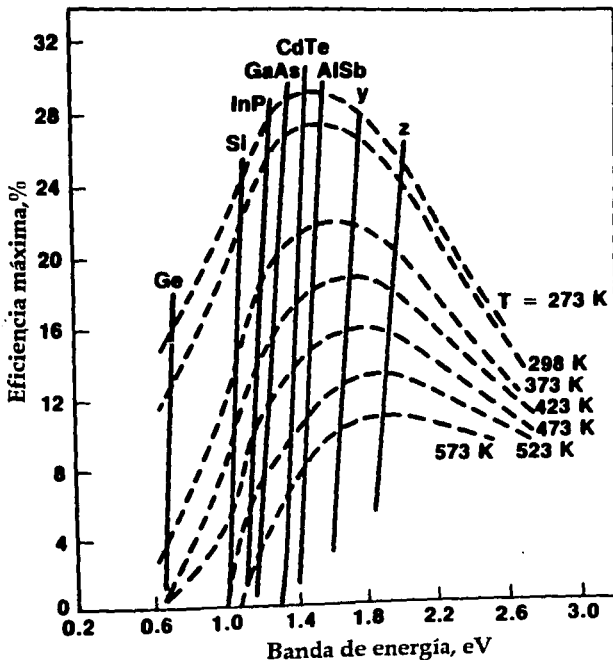
Debido a esta variabilidad en la potencia de salida y para poder comparar el funcionamiento entre diferentes tipos y marcas de celdas solares, fue necesaria la creación de una norma. Se determinó que a 25 °C, al nivel del mar, con una atmósfera seca y limpia en el ecuador y con el sol en el cenit, se tienen las condiciones ideales, a las cuales, se deben obtener las características eléctricas de una celda. A esta norma se le denominó AM 1 (*air mass 1*), que significa el efecto que provoca, en las condiciones de iluminación, una atmósfera. En el espacio, por ejemplo, se utiliza la norma AM 0, pues no existe atmósfera.

En las condiciones AM 1, el sol es capaz de arrojar 1 KW/m<sup>2</sup>, o como posteriormente se definió como unidad, en el Sistema Internacional, 1 Sun. Desgraciadamente, rara vez se encuentran estas condiciones, por lo que, para cuestiones prácticas y de operación se considera que el sol arroja 800 W/m<sup>2</sup>, equivalente a una norma AM 2.

Cuando se estudia la historia de las celdas solares, se nota que poco a poco, conforme transcurría el tiempo, se incrementaba la eficiencia de las celdas solares, sin embargo para el silicio, esta eficiencia nunca podrá llegar a ser del 100 % y esto se debe a diversos factores: primero, una parte de la luz que llega a la celda, cerca del 35%, no es absorbida por los átomos sino que es reflejada. Generalmente se utilizan recubrimientos antirreflejantes que reducen este porcentaje hasta tener solamente un 3% de luz reflejada. Segundo, la delgada red de hilos que se coloca arriba de las celdas solares para recoger los electrones liberados, bloquean otro 3% de luz. Tercero, dependiendo de la pureza del silicio y lo refinado de su estructura cristalina, existen pérdidas internas de energía, esto sucede porque cuando se libera un electrón, éste no siempre llega hasta los contactos metálicos, sino que se encuentra un hoyo a su paso y lo llena produciendo únicamente calor. Esto generalmente pasa en las impurezas o defectos de la estructura cristalina. Las pérdidas internas son responsables del desperdicio de aproximadamente un 21% de la luz, que no llega a convertirse en flujo de electrones. Por último, el factor que más afecta la eficiencia es la banda de energía. Cada material semiconductor tiene una banda de energía que es responsable de que solamente los fotones con energías capaces de superar esa banda podrán liberar un electrón. Por lo tanto, un cierto porcentaje del espectro solar, correspondiente a aquellos fotones que no son capaces de superar dicha

banda nunca producirán corriente, y por otro lado, otro porcentaje del espectro, correspondiente a los fotones de alta energía, si liberarán electrones, pues tienen la energía mínima necesaria para hacerlo, pero el resto de su energía no se aprovecha, y solamente eleva la temperatura del material. Este factor limita la eficiencia por un 54%.

A continuación se presenta una tabla en la que se muestran diversos materiales semiconductores con sus diferentes valores de banda de energía y su máxima eficiencia teórica.



Las celdas solares se pueden obtener de diversos materiales aparte del silicio y pueden estar hechas de diversas formas. Las celdas se pueden clasificar por el material o por el tipo de unión o junta que utilizan. La junta es la barrera de la celda que se forma entre las capas positiva y negativa. Existen 5 tipos diferentes de juntas: en el silicio, tanto la parte positiva como la negativa son del mismo material por lo que a su unión se le llama homojunta, sin embargo las celdas solares pueden contener diferentes materiales, como por ejemplo, la celda de sulfuro de cadmio/sulfuro de cobre, a este tipo de junta, se le denomina heterojunta. Una celda solar también puede ser de la unión de un material semiconductor y un metal y a la junta se le denomina barrera de Schottky, en honor a su descubridor. Existen otros dos tipos de juntas que son muy similares entre sí, y son la junta metal-aislante-semiconductor o MIS por sus siglas en inglés y la junta semiconductor-aislante-semiconductor o SIS. Cada uno de estos tipos de junta ofrecen ventajas y desventajas.

Dentro de las homojuntas, definitivamente el material más común es el silicio. Éste se puede presentar en tres formas, monocristalina, policristalina y amorfo, siendo, como se había mencionado anteriormente, el estado monocristalino el más eficiente, seguido por el policristalino y por último el amorfo.

Una celda solar con junta tipo heterojunta, funciona de la misma manera que un material con homojunta, pero el uso de dos diferentes semiconductores da una gran flexibilidad en el diseño de celdas. Si el material en la parte superior tiene una banda de energía ancha, puede funcionar como ventana dejando pasar la luz hasta la segunda capa, la cual se selecciona según su eficiencia para absorber la luz del sol. Con una selección apropiada de materiales, la celda solar puede tener un potencial mayor, y por lo tanto un voltaje más elevado de circuito abierto que una homojunta hecha de un material con una banda de energía angosta.

Ejemplos de este tipo de junta son el sulfuro de cadmio con el sulfuro de cobre, compuestos hechos por los semiconductores de los grupos II y VI de la tabla periódica como el selenuro de cadmio y el telurio de cadmio, y compuestos hecho por los grupos III y V, como el fosfuro de galio, fosfuro de indio y

arsenuro de galio, que es la más conocida de estas substancias. La banda de energía del arsenuro de galio es casi ideal para construir celdas solares de alta eficiencia, pues capta una mayor parte del espectro solar en comparación con otros materiales y no se ve afectada su eficiencia con altas temperaturas como con el silicio. Este tipo de material con su casi 25% de eficiencia representa la mayor eficiencia alcanzada hasta el momento en una celda solar.

Todos los compuestos de los grupos III y V usados hasta ahora en la fabricación de celdas solares, contienen galio o indio; ambos, elementos extremadamente raros. La única razón por la cual sus precios no son astronómicos es por que no había un uso comercial para ellos. Estos elementos eran obtenidos como subproducto en la fundición de otros metales como el aluminio y el zinc.

La junta tipo Schottky, o metal-semiconductor, se da entre un metal con baja función de trabajo, como el aluminio, que se junta con un semiconductor tipo p, o cuando un metal con alta función de trabajo, como el oro, se junta con un semiconductor tipo n. Solamente estas dos combinaciones son capaces de producir una barrera tipo Schottky, ya que de otra manera, sólo se produciría un contacto óhmico y por lo tanto no funcionaría la celda solar.

Las celdas solares de selenio y las de óxido cuproso, son ejemplos de este tipo de junta. Hasta ahora sólo se han construido celdas solares con barrera de Schottky muy ineficientes y baratas.

Los otros dos tipos de junta, MIS y SIS, son variantes de las juntas tipo Schottky o MS y de la homojunta o heterojunta entre semiconductor y semiconductor, respectivamente. La diferencia radica básicamente en una delgada capa de un material aislante que se coloca entre las capas positiva y negativa, esta capa, de tener el grosor adecuado, cerca de 20 amstrongs, el voltaje de circuito abierto puede ser incrementado sin tener una pérdida considerable en la corriente de corto circuito.

Se mencionarán rápidamente algunos de los desarrollos tecnológicos más nuevos en celdas solares, como lo son: Las celdas fotoelectroquímicas, los semiconductores orgánicos, la celda tipo cascada, la celda solar termofotovoltaica.

⊗ Las celdas fotoelectroquímicas usan un semiconductor sólido y una solución electrolítica. La junta correspondiente se forma entre estos dos elementos. Esta celda abre la puerta a aplicaciones únicas, ya que pueden ser diseñadas para producir electricidad o hidrógeno o algún otro subproducto. Las investigaciones en estas celdas se han enfocado al estudio de diferentes materiales semiconductores, en sus diferentes formas: monocristalina, policristalina y amorfa, en combinación con diferentes electrolitos. Se han alcanzado eficiencias de hasta 11.5%.

⊗ Los semiconductores orgánicos se han usado para celdas experimentales fotovoltaicas de dos maneras: como fotosensibilizadores, y directamente como un elemento semiconductor en una celda solar.

Se ha sabido por mucho tiempo que cierto tipo de pigmentos, si son depositados como una capa delgada sobre un material base, pueden hacer a este material fotosensible a la luz que este pigmento absorbe. Esta técnica ha sido usada, por casi un siglo, por la industria fotográfica. Se han logrado hacer celdas fotoelectroquímicas que pueden producir tanto hidrógeno como electricidad, agregando al bióxido de titanio un pigmento orgánico conocido como ftalocianina. La eficiencia de esta celda es baja, y son caras de producir, aunque han mostrado ser bastante estables.

Los semiconductores orgánicos, también se han usado directamente en celdas fotovoltaicas con barrera de Schottky, sin embargo, de la misma manera, sólo se han obtenido eficiencias muy bajas.

Los pigmentos orgánicos, todos semejantes en estructura a la clorofila, podrían producir una celda solar extremadamente barata que se pintara, literalmente, en algún sustrato.

⊗ La celda tipo cascada fue por primera vez propuesta en 1953, y consiste en un arreglo de diferentes celdas solares, puestas una detrás de la otra. Cada una de ellas absorbe una parte del espectro solar y deja pasar el resto a las otras celdas en el arreglo.

La primera celda del arreglo, la que se pone hasta arriba, es aquella con la banda de energía más ancha, por lo que sólo absorberá aquellos fotones con alta energía, dejando pasar a los demás. Éstos a su vez, pueden ser utilizados por



un semiconductor con una banda de energía más angosta, que se coloca atrás de la primera. Es posible poner una tercera o incluso más celdas de esta forma y así usar el espectro solar de una manera eficiente, desde el ultravioleta hasta el infrarrojo.

La celda tipo cascada, tendrá un voltaje de salida igual a la suma de los voltajes individuales de cada celda. La corriente de salida es menor que la de la celda con la banda de energía más angosta, pero la eficiencia total es muy grande. Teóricamente se pueden alcanzar eficiencias del 40% al 60%, pero las eficiencias experimentales actuales son únicamente del 23%.

⊗ La celda solar termofotovoltaica tiene un funcionamiento muy particular. Cuando un espejo parabólico de gran tamaño dirige y concentra, la luz solar, al interior de una cavidad negra perfectamente aislada, se pueden alcanzar temperaturas bastante altas, cerca de 1500 °C. Esta temperatura provoca que las paredes de la cavidad comiencen a emitir radiación infrarroja, por lo que si una celda solar con banda de energía angosta, como el germanio o el silicio, se coloca de tal manera dentro de esta cavidad, que capte todas estas radiaciones, se producirá electricidad. Eficiencias teóricas de cerca del 30% se han calculado con este tipo de celdas.

### 2.1.3.- MANUFACTURA.

El primer paso en la fabricación de las celdas fotovoltaicas, así como de la mayoría de los semiconductores, es la obtención del silicio puro. Existen diferentes métodos, según el compuesto de silicio del que se parte, para obtener un silicio con un cierto grado de pureza.

Cuando se parte de la arena, o bióxido de silicio, el silicio se separa del oxígeno, utilizando un horno de arco eléctrico. En este horno el carbón reacciona con el oxígeno produciendo bióxido de carbono y silicio puro. Este proceso produce el conocido silicio de grado metalúrgico con aproximadamente 1% de impurezas. Este grado de impurezas descartan el uso de este tipo de silicio para la fabricación de celdas solares, sin embargo, éste puede purificarse aún más para obtener un silicio apropiado. El silicio que se ha utilizado hasta ahora para la fabricación de celdas solares, es el mismo silicio que se utiliza en la

industria de la electrónica conocido como silicio de grado semiconductor. Este silicio es extremadamente puro y por consiguiente extremadamente caro. En realidad, para hacer celdas solares se necesitaría un silicio de grado intermedio, pero actualmente no se produce.

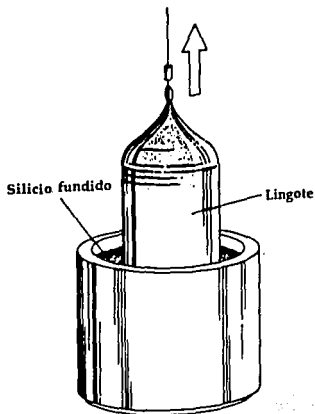
Existen procesos en los que se puede obtener directamente el silicio de grado semiconductor partiendo del silano o compuestos gaseosos del silicio. En estos procesos, se calienta una barra a alta temperatura en presencia del compuesto gaseoso del silicio, el silicio se separa de este compuesto y se deposita en la barra, una vez que se obtienen el grosor deseado se retira la barra. Este proceso es bastante caro.

Una vez que se tiene el silicio lo suficientemente puro, el siguiente paso será hacer silicio monocristalino. Esto se logra fundiendo el silicio en un crisol, una vez fundido, se introduce en el crisol un cristal patrón que después es jalado muy lentamente. Las temperaturas arriba de la superficie del silicio fundido son controladas, produciendo la solidificación del silicio, siguiendo la estructura del cristal patrón que se introduce. Un control distinto de velocidad y temperaturas, formará silicio policristalino. Como resultado se obtiene una barra de silicio monocristalino que después será cortada en rebanadas para producir las obleas de donde se formarán las celdas. En el proceso de corte se desperdicia el 50% del silicio en forma de polvo o viruta. Este proceso fue el primero que se usó en la fabricación de celdas solares y es conocido como proceso Czochralski, pero debido a el gran desperdicio que éste representa, y a la necesidad de bajar los costos de las celdas, la industria solar creó dos nuevos procesos de fabricación que evitan este problema.

El primero de ellos es conocido como el proceso cinta y consiste en un molde de grafito o cerámica que posee una delgada ranura en el centro, al sumergir este molde dentro del silicio fundido, la acción capilar obliga al silicio a subir por esta ranura. Un cristal patrón se pone en contacto en este punto y se jala al igual que en el proceso Czochralski, con velocidad y temperaturas controladas de forma que la solidificación se logre siguiendo la estructura cristalina del cristal patrón. Al final se obtiene una cinta de 10 cm a 13 cm de ancho y con espesor semejante al que tendrá la celda finalmente.

Posteriormente se corta esta cinta con láser a la longitud deseada. Una gran ventaja de este proceso, aparte de evitar el gran desperdicio del proceso Czochralski, es que se obtienen celdas rectangulares, que permiten un mejor aprovechamiento del espacio en un panel.

El otro proceso, es el conocido como el proceso de dendrita. En él, dos dendritas, o dos cristales patrón especiales son sumergidos en el silicio fundido. Al momento de sacarlas, una capa de silicio monocristalino se forma entre ellas, de la misma manera en que se forma una capa de jabón en el aro de un niño que hace pompas de jabón. La capa de silicio monocristalino que se formó es separada de las dendritas con rayo láser. Con este proceso se logran celdas solares de muy alta calidad, que convierten cerca del 16% de la luz.



Una vez que se ha obtenido la celda de silicio monocristalino con las dimensiones deseadas, se siguen cuatro procesos finales.

Primero la superficie de la celda debe ser especialmente preparada para asegurar propiedades eléctricas, ópticas y mecánicas adecuadas. Originalmente las celdas, eran pulidas mecánicamente y químicamente para obtener una

superficie con acabado tipo espejo, que permite una buena unión entre el silicio y los metales usados para los contactos eléctricos. Recientemente se ha encontrado que las superficies texturizadas absorben de una manera más eficiente la luz. Por esto se ha utilizado rayo láser para hacer pequeños canales en la superficie de la celda.

En segundo lugar, se deberá formar la junta P-N. El silicio contaminado con boro, tipo P, es la materia prima para formar la celda. Para formar la homojunta, algunas micras de la parte superior, deberán hacerse tipo N; esto se logra incorporando más átomos de fósforo que los que hay de boro, y físicamente este proceso se puede llevar a cabo de dos maneras. La primera es metiendo en un horno de difusión un grupo de celdas tipo P y calentarlas a una temperatura alta, pero mucho menor a la temperatura de fusión del silicio, en presencia de un gas que contenga fósforo. A esta temperatura, los átomos de la estructura cristalina del silicio, vibran y se mueven, permitiendo que los átomos del gas que golpean la superficie se difundan en ella. Si la temperatura y el tiempo de exposición al gas, es controlado apropiadamente, una junta uniforme se puede formar a una distancia conocida dentro de la celda.

La segunda manera de crear la capa tipo N en la parte superior de la celda es mediante la implantación de iones. La máquina de implantación de iones, es similar a un pequeño acelerador de partículas que dispara átomos que golpean la superficie de la celda. La profundidad a la que los átomos penetran en la celda, puede ser controlada variando su velocidad. Con este proceso se puede controlar muy bien, el grosor y la profundidad de la junta, produciendo celdas de gran calidad.

Ya que se formó la junta P-N, y que se preparó la superficie, se deben colocar los contactos eléctricos. Estos contactos nos permitirán conectar la celda a un circuito externo y deberán tener las siguientes características:

Tanto el contacto en la parte superior, como el contacto en la parte inferior, deberán tener una muy baja resistencia eléctrica en sí y en la interfase con la celda, esto con el objeto de mantener las pérdidas interna a un nivel mínimo. En segundo lugar el material usado, para los contactos eléctricos, deberá tener una muy buena adhesión al silicio y deberá soportar la soldadura. Por último los contactos en la parte superior, deberán ser diseñados de tal forma que bloqueen

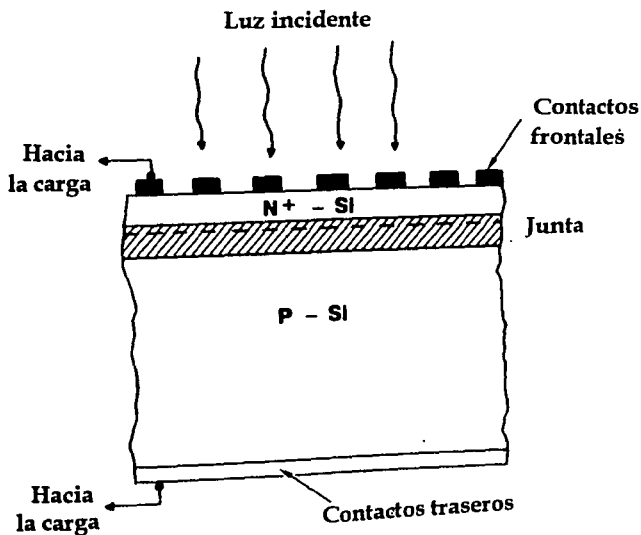
el mínimo de luz posible, al mismo tiempo que recojan la corriente eficientemente. En la parte inferior, el contacto puede ser una delgada placa de metal que cubra la superficie entera de la celda.

Hasta ahora se han usado como materiales para los contactos eléctricos, paladio-plata y níquel estañado.

Como último proceso en la fabricación de celdas, se pone un recubrimiento antirreflejante.

El silicio es un material con apariencia gris metálica que refleja 35% de la luz que cae sobre él. Esta luz reflejada, pudo haber generado electricidad, por lo que se usan diversas sustancias, que reducen el porcentaje de la luz reflejada, como son: el monóxido de silicio, el bióxido de titanio y el nitruro de silicio.

Estas capas usadas con espesores de 0.1 micras, reducen las pérdidas por reflexión del silicio, del 35% al 3%.



#### 2.1.4.- SELECCIÓN.

Ahora que se ha estudiado el funcionamiento y los diferentes tipos de celdas solares, se debe establecer un criterio de selección que satisfaga la aplicación específica, que en este caso es un panel solar fotovoltaico para un automóvil de carreras.

Como se comentará en el próximo capítulo, en las competencias de automóviles solares, se recorren distancias considerables con autos que pesan de 150 kg hasta 600 kg, con un tamaño de panel regulado, por lo que para esta aplicación se necesitará obtener la máxima potencia de salida posible, con el tamaño de panel permitido. Esto sólo se logra utilizando las celdas solares más eficientes, como lo son la celda tipo cascada, la de arsenuro de galio, o algunas celdas de silicio de alta eficiencia. Sin embargo, estas celdas tienen un costo altísimo, por lo que el factor decisivo para la selección de celdas solares es un compromiso entre costo y eficiencia.

Al construir un automóvil solar, se debe destinar una parte importante del presupuesto (cerca del 15% del costo total del vehículo) para la compra de celdas solares, y se podría pensar que se deben comprar las celdas solares más eficientes que este presupuesto pueda pagar, sin embargo se debe considerar dentro de este presupuesto el costo de manufactura del panel, que añade una razón más para que las celdas solares no sean excesivamente caras.

La fabricación de un panel solar, involucra la selección de un sustrato firme pero a la vez ligero, un adhesivo que mantenga firme y perfectamente sostenidas a las celdas, pero que al mismo tiempo amortigüe vibraciones, y permita la pequeña contracción o expansión que puedan sufrir éstas con la temperatura. Se necesita también un recubrimiento, no conductor, con un muy bajo índice de reflexión, que las aisle bien eléctricamente y las proteja de la humedad, del polvo, y otros factores corrosivos del medio ambiente, sin que sufra un deterioro. También se debe considerar que las celdas serán soldadas entre sí, por lo que se debe conocer un método de soldadura adecuado según el material de la celda, que sea resistente mecánicamente, pero de muy baja

resistencia eléctrica. Por último se debe tener en cuenta la fragilidad de las celdas, ya que un manejo ligeramente brusco puede producir la fractura irremediable de éstas. Por todos estos factores y otros que se estudiarán en capítulos posteriores, no se deben comprar celdas solares caras, a menos que se cuente con la experiencia y los recursos necesarios para construir un panel solar de este tipo.

Por todo lo anterior, se concluye que si se cuenta con la experiencia y los recursos, tanto económicos como de instalaciones, la mejor opción será la celda más eficiente que el presupuesto pueda pagar, pero de no tener ni la experiencia ni los recursos, se deberán comprar celdas comerciales con la relación eficiencia-costo más alta. Estas pueden ser celdas de silicio monocristalino o policristalino con eficiencias del 13% al 17% que se utilizan en la fabricación de módulos solares terrestres, que se encuentran fácilmente en el mercado. De esta manera se podrá aprender el difícil arte de la construcción de un panel solar, sin que esto represente una experiencia traumática económicamente hablando.

Ya que se ha explicado todo lo referente a las celdas solares, se explicará ahora cómo se interconectan para formar arreglos.

## 2.2.- INTERCONEXIÓN.

Se sabe que una celda solar produce aproximadamente 0.5 volts y unos 3 A. Como virtualmente cualquier carga que se quiera usar requiere de niveles más altos, tanto de corriente como de voltaje, se hace necesaria la conexión en serie, para incrementar el voltaje y en paralelo para incrementar la corriente.

Una celda solar tiene sus polos en la parte posterior y en la anterior, es decir, toda el área de la celda que recibe la luz es uno de los polos (generalmente el polo negativo), y la parte posterior es el otro (positivo).

Para interconectar celdas en serie, por lo tanto se debe unir la parte posterior de una, con la parte anterior de la siguiente y así sucesivamente hasta alcanzar el voltaje deseado para la aplicación.

Las celdas conectadas en serie, suman su voltaje, pero proporcionan la misma corriente que proporciona la peor celda de la serie. Es en este punto donde los diodos de paso tienen su importancia. Cuando una celda solar falle o se rompa, quedando en circuito abierto, el diodo de paso ofrecerá una ruta de paso alternativa para la corriente, evitando así que se pierda toda la serie.

Típicamente los diodos de paso se conectan en paralelo con el número de celdas en serie, que se esté dispuesto a perder en el caso de que una falle, con el ánodo del diodo en la terminal negativa de la serie y con el cátodo a la terminal positiva.

En el caso de que una celda, de la serie que está conectada con el diodo falle, el submódulo perderá esa serie pero seguirá suministrando potencia. El voltaje que perderá el submódulo será equivalente al voltaje que producirían todas las celdas conectadas al diodo más la caída de voltaje en el diodo que típicamente es de 0.7 volts.

Existe otro diodo importante para que nuestro arreglo funcione bien: el diodo de bloqueo. El diodo de bloqueo, ayuda a controlar la dirección en la que fluye la corriente en los sistemas fotovoltaicos. Cuando el arreglo está generando un voltaje menor al voltaje del banco de las baterías, como cuando está muy nublado, la energía eléctrica almacenada en las baterías fluirá de regreso al arreglo para ser disipada como calor. Lo mismo ocurrirá entre módulo y módulo, si éstos están conectados en paralelo, cuando uno de éstos esté funcionando a un menor voltaje. Si se permite que esto ocurra, no sólo se estarán drenando importantes cantidades de energía de las baterías, sino que también se puede dañar el arreglo.

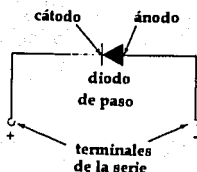
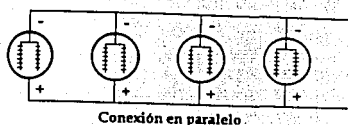
Los diodos de bloqueo obligan a la corriente a fluir en un solo sentido, del arreglo a las baterías, o del arreglo al controlador del motor. Se instalan en serie con la terminal positiva de cada módulo. El ánodo se orienta hacia el arreglo y el cátodo hacia la carga.

Algunos reguladores de voltaje, como por ejemplo los rastreadores de potencia pico, contienen los diodos de bloqueo como parte de su electrónica. Los diodos de bloqueo disipan en su operación aproximadamente 0.75 a 1 watt/ampere, si éste es de silicio, 0.5 watt/ampere, si es un diodo de Schottky.



Los diodos de Schottky son de 2 a 3 veces más caros que un diodo de silicio común. Algunas veces se necesita un disipador de calor por cada diodo de bloqueo.

Para conectar celdas o submódulos en paralelo se debe conectar la parte posterior de una celda con la parte posterior de la siguiente y la parte anterior con la parte anterior.



De esta forma se puede jugar un poco entre conexiones serie-paralelo para tener los niveles de voltaje y corriente que nuestra carga necesite.

### 2.3.- OPTIMIZACIÓN Y RASTREADORES DE POTENCIA PICO

Como se vio anteriormente en el análisis de la celda solar ésta tiene una relación voltaje-corriente que gráficamente se muestra en su curva característica, lo mismo se puede decir para un grupo de celdas conectadas en serie o en paralelo. Esta gráfica muestra los valores de la corriente para el rango de valores desde cero hasta el voltaje de circuito abierto.

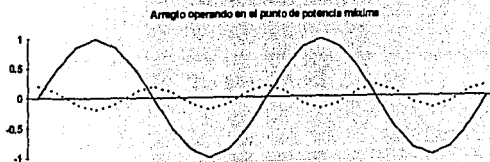
En toda curva característica de una celda solar o de un módulo, existe un punto en la rodilla de la curva, en el cual el producto de la corriente y el voltaje es máximo. A este punto se le conoce como punto de potencia máxima o punto de potencia pico. En este punto es donde se quisiera que el panel operara en todo momento. Sin embargo, debido a que las condiciones atmosféricas varían

todo el tiempo y que si además se tiene un panel curvo en el que el nivel de irradiación no es constante para todas las celdas ni tampoco las temperaturas, resulta prácticamente imposible operar en el punto de potencia pico.

Es precisamente aquí donde los rastreadores de potencia pico (RPP) tienen su función. Estos son circuitos electrónicos de control que tienen la habilidad de localizar y operar a un voltaje en el que el módulo maximiza su potencia de salida, en todo momento y bajo cualquier tipo de condiciones.

La manera más común en que un RPP localiza este voltaje es, mediante un oscilador que provoca una oscilación de voltaje y por consiguiente una ondulación de la potencia. El defasamiento y la magnitud entre ambas determina si el arreglo está trabajando por encima, por abajo o exactamente en el punto de potencia pico.

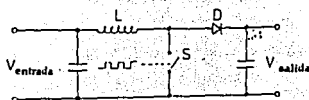
Si se observan las tres gráficas siguientes se podrá tener una mejor idea de este procedimiento:



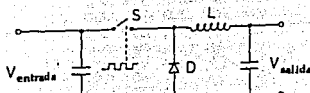
Un defasamiento similar al de la gráfica 1, en el cual, cuando el voltaje es máximo, la potencia es mínima y viceversa, indica una operación por encima del punto óptimo y por lo tanto el voltaje debe disminuir. En la gráfica 2, se muestra un arreglo operando en su punto de potencia pico, el voltaje dobla en frecuencia a la potencia. En la gráfica 3 se muestra un arreglo operando por debajo del punto de potencia pico, en donde la potencia y el voltaje están en fase. El voltaje se corregirá iterativamente hasta llegar al punto óptimo.

Otra función importante de los rastreadores es la de un convertidor CD-CD. Existen dos tipos de circuitos: uno cuyo voltaje de salida es menor que el voltaje de entrada (*buck circuit*) y otro en el que el voltaje de salida es mayor que el de entrada (*boost circuit*).

La elección entre un circuito y otro, depende de la relación de voltajes entre el panel solar y la del banco de baterías. Si el voltaje del panel es inferior al voltaje del banco, se requerirá de un circuito tipo *boost* para que se puedan recargar de una manera eficiente las baterías, en cambio, si el voltaje del panel es mucho mayor, se necesita un convertidor tipo *buck*.



Circuito tipo *boost*



Circuito tipo *buck*

En ambos circuitos se tienen los siguientes componentes; un interruptor semiconductor, un inductor, 2 capacitores y un diodo. En estado estable el voltaje de salida es igual al voltaje de entrada multiplicado por el porcentaje de tiempo que el interruptor está cerrado.

Lo anterior es una explicación básica del funcionamiento, sin embargo el circuito es más complejo. Generalmente los RPP tienen microprocesadores basados en la tecnología RISC, que controla numerosas funciones, entre ellas:

- ⊗ Determina el voltaje ideal de recarga para las baterías, según la temperatura de éstas. Si las baterías son selladas utiliza un mismo voltaje todo el tiempo, pero si las baterías no son selladas, las carga a un voltaje un poco más alto, una vez por día por aproximadamente una hora con el fin de equilibrar los voltajes de las celdas y reducir la estratificación.

- ⊗ Limita la corriente de entrada, en caso de que ésta sea muy grande y pueda dañar la electrónica.

- ⊗ Si la corriente de entrada es demasiado baja, el rastreador no podrá hacer operar al panel en su punto de eficiencia máxima pero tratará de regular el voltaje de cada módulo para que éste sea máximo.

Los RPP junto con el controlador, representan el cerebro del auto solar, sus funciones de control y distribución de corrientes, son básicas para el funcionamiento óptimo de todo el auto. Al ser ambos, módulos electrónicos, y al ser la electrónica una de las ciencias que más rápido evolucionan, el ingeniero debe estar al día para poder escoger el mejor equipo.

## CAPÍTULO 3

### EL PANEL SOLAR, DISEÑO.

#### 3.1.- CONSIDERACIONES DE CARGA Y OPERACIÓN.

Al diseñar un auto solar se busca maximizar la eficiencia ( $\eta$ ) global del vehículo, lo cual implica establecer un compromiso óptimo entre los términos de la siguiente ecuación:

$$E_{\text{útil}} = E_{\text{entrada}} - E_{\text{perdida}}$$

donde:

$$E_{\text{entrada}} = E_{\text{recibida}} \times \eta_{\text{panel}}$$

y

$$E_{\text{perdida}} = E_{\text{aerodinámica}} + E_{\text{mecánica}} + E_{\text{eléctrica}}$$

Se estudiará en primer lugar lo referente a las pérdidas. Las pérdidas que existen en un vehículo solar son básicamente de tres tipos: Aerodinámicas, mecánicas y eléctricas:

Las aerodinámicas son de dos tipos: Por arrastre y por fricción viscosa:

Las pérdidas aerodinámicas por arrastre se deben a la resistencia que experimenta un cuerpo de una determinada área frontal al moverse a través de

un fluido como el aire. Esa resistencia se puede expresar de la siguiente manera:

$$F_A = 1/2 \rho v^2 S C_d$$

En donde:

$F_A$  = Fuerza que se opone al movimiento del cuerpo en el fluido.

$\rho$  = Densidad del fluido.

$v$  = Velocidad relativa del cuerpo respecto al fluido.

$S$  = Área frontal del cuerpo, normal al flujo.

$C_d$  = Coeficiente de arrastre aerodinámico.

Para el caso de Tonatiuh, se tienen los siguientes valores:

$\rho_{\text{aire}} \approx 1.2 \text{ Kg/m}^3$  @ condiciones estándar a nivel del mar

$S \approx 1 \text{ m}^2$

$C_d \approx .15$

Suponiendo aire estático, la ecuación anterior queda, en función de la velocidad:

$$F_A = 1/2 (1.2 [\text{Kg/m}^3]) (v [\text{m/s}])^2 (1 [\text{m}^2]) (.15)$$

$$F_A = .09 v^2 [\text{Kg.m/s}^2]$$

Las pérdidas aerodinámicas por fricción viscosa, se deben a los esfuerzos cortantes que existen entre la superficie del cuerpo que se mueve en el fluido y el fluido, y entre las diferentes capas del fluido. Estas se pueden expresar como:

$$F_V = \mu A dv/dz$$

En donde:

$F_V$  = Fuerza resultante por rozamiento.

$\mu$  = Coeficiente de viscosidad del aire.

$A$  = Área sobre la que se aplican los esfuerzos cortantes.

$dv/dz$  = gradiente de velocidad.

Para Tonatiuh se tienen:

$$\mu_{\text{aire}} \approx 1.83 \times 10^{-5} \text{ [Kg/m.s]} @ \text{ condiciones estándar al nivel del mar}$$

$$A \approx 25 \text{ m}^2$$

$$dv/dz \approx (0.35) \text{ [1/s]}$$

Al substituir los valores en la ecuación queda en función del gradiente de velocidad:

$$F_v = (1.83 \times 10^{-5} \text{ [Kg/m.s]})(25 \text{ [m}^2\text{]})(dv/dz \text{ [1/s]})$$

$$F_v = 0.004575 (dv/dz) \text{ [Kg.m/s}^2\text{]}$$

El valor de esta fuerza es despreciable para los posibles valores del gradiente de velocidad.

El sistema mecánico de un automóvil solar se compone básicamente de suspensión, dirección, frenos y transmisión. Cuando este sistema está bien diseñado, esto es, cuando el camber, el caster y el toe son cero y la fricción en los frenos cuando éstos no son accionados es cero, se puede decir que las únicas pérdidas representativas son las originadas por resistencia al rodamiento y a la transmisión.

Las pérdidas en una transmisión tipo cadena de bicicleta, bien lubricada, son de aproximadamente un 5%.

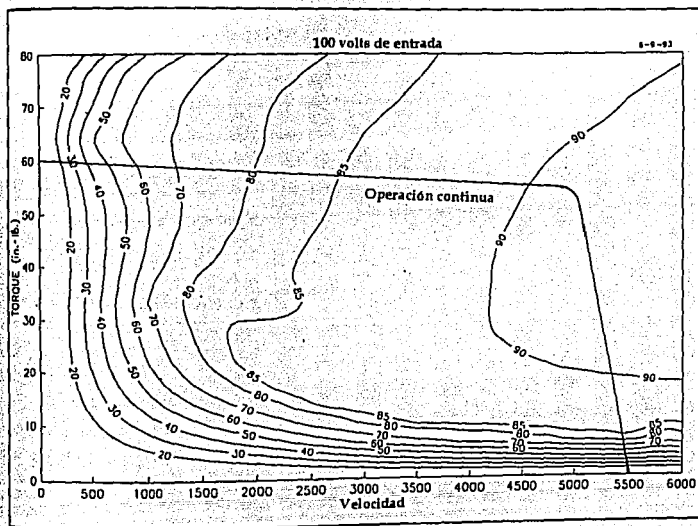
Las pérdidas por resistencia al rodamiento son debidas a la energía que utiliza la llanta al contraerse y expandirse al contacto con el suelo y por fricción en los rodamientos. En Tonatiuh se utilizan llantas de bicicleta de 26 pulgadas de diámetro con un coeficiente de resistencia al rodamiento  $C_{rr} \approx .006$ . Este coeficiente cuando se multiplica por el peso total del auto y por el número de llantas, nos da el valor de la fuerza ( $F_{rr}$ ) que se opone al giro de la llanta:

$$F_{rr} = (crr)(Wt)(\# \text{llantas})$$

$$F_{rr} = (.006)(1588.67N)(3)$$

$$F_{rr} = 28.6 \text{ N}$$

Las pérdidas eléctricas, son básicamente por resistencia. Estas pérdidas se ven reflejadas en la eficiencia de cada componente del sistema eléctrico. La eficiencia del panel solar que incluye la eficiencia de los rastreadores de potencia pico se analizará más adelante. La eficiencia de las baterías influye sobre la recarga de éstas, y la eficiencia del subsistema propulsor tiene un comportamiento como se muestra en la figura:



En este mapa se puede observar que para 100 Volts, se logran eficiencias arriba del 90% cuando se está a más de 4300 rpm y cerca de 2.5 N.m de par. En operación continua y con carga estas velocidades angulares difícilmente se



alcanzan. Normalmente éstas están entre 3500 y 4000 rpm, a velocidades terminales. Se debe procurar que el vehículo funcione la mayor parte del tiempo en su punto óptimo de operación, es decir alta velocidad angular y bajo par, ya que la eficiencia del subsistema propulsor afecta en gran manera la potencia mecánica sobre la rueda necesaria para mover el auto, esto es:

$$P_{\text{mecánica}} = (\eta_{\text{subsistema propulsor}})(\eta_{\text{transmisión}})(P_{\text{eléctrica}})$$

A continuación se hará una tabla de análisis en la que se relacionan las pérdidas con el desempeño del auto, para diferentes relaciones de transmisión. Para elaborar esta tabla se tomará consideración los siguientes parámetros:

Voltaje del sistema:	100 Volts
Capacidad Banco de baterías:	56 Ah
Corriente promedio suministrada por el panel solar:	7.5 A
Diámetro de la rueda trasera:	20 in
Peso del vehículo:	490 Kg
Constante de par del motor:	.165 N.m/A
Terreno nivelado	
Distancia máxima por día de carrera (Sunrayce 95)	320 Km

Esta tabla, muestra claramente la importancia de reducir las pérdidas para mejorar el desempeño del automóvil. Una pequeña reducción en las pérdidas puede tener un fuerte impacto en el rango y velocidad del auto.

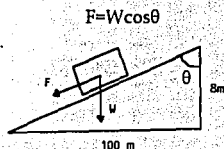
Relación de transmisión	Velocidad angular del motor [rpm]	Velocidad terminal [Km/hr]	Pérdidas totales [N]	Torque requerido del motor [N.m]	Amperaje del motor [A]	Potencia eléctrica [W]	Eficiencia Sistema propulsor	Duración del banco de baterías [Hrs]	Distancia máxima recorrida [Km]	SOC del banco para una distancia de 320 Km [%]
4:1	3500	83.79	77.35	5.17	36.86	3686	85%	1.91	159.78	-100
4:1	4500	107.73	109.19	7.30	52.04	5204	85%	1.26	135.45	-136
5:1	3500	67.03	59.80	3.20	22.80	2280	85%	3.66	245.33	-30
5:1	4500	86.18	80.18	4.29	30.57	3057	85%	2.43	209.20	-53
6:1	3500	55.86	50.27	2.24	15.97	1597	85%	6.61	369.25	13
6:1	4500	71.82	64.42	2.87	20.47	2047	85%	4.32	310.15	-3
7:1	3500	47.88	44.52	1.70	12.12	1212	85%	12.11	579.82	45
7:1	4500	61.56	54.91	2.10	14.96	1496	85%	7.51	462.38	31
8:1	3500	41.89	40.79	1.36	9.72	972	85%	25.23	1056.97	70
8:1	4500	53.86	48.75	1.63	11.62	1162	85%	13.60	732.78	56
9:1	3500	37.24	38.23	1.14	8.10	810	85%	93.68	3488.37	91
9:1	4500	47.88	44.52	1.32	9.43	943	85%	29.02	1389.27	77

Existe una componente de pérdidas más, que puede ser de gran importancia, según el terreno donde se lleva a cabo la carrera: el peso.

El peso afecta de diferentes formas el desempeño de un auto: disminuye la capacidad de aceleración del vehículo por tener mayor masa e incrementa la resistencia al rodamiento por mayor deformación en las llantas y mayor carga sobre los baleros. Pero el mayor impacto que el peso puede tener se refleja en las pendientes.

En un terreno relativamente plano, como Australia, controlar el peso es importante pero no es tan crítico como controlar las pérdidas aerodinámicas. Se calcula que por cada kilogramo extra de peso, es necesario alrededor de un watt más en poder mecánico a velocidades de entre 70 y 80 Km/h. Sin embargo en terrenos montañosos, el peso se convierte en el factor principal de pérdidas.

En carreras como Sunrayce 95, se pueden encontrar pendientes de hasta el 8%, con longitudes de 8 Km. Vencer la componente del peso en esa dirección, puede ser la prueba más dura para un auto solar. Suponiendo un peso promedio, para un auto solar con baterías plomo ácido, de 440 Kg, la fuerza en oposición puede tener un valor de:



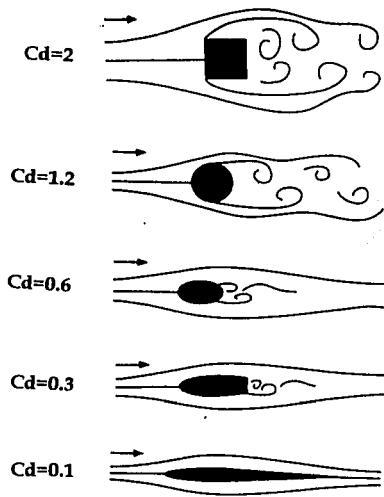
$$F = 440 [\text{Kg}] \cos(85.426)$$

$$F \approx 35.1 [\text{Kg}] \approx 344.21 [\text{N}]$$

El amperaje necesario para subir una cuesta así, con una relación 7:1, es de 80A.

En conclusión, el desempeño de un auto solar es inversamente proporcional a las pérdidas. Para lograr el mínimo de pérdidas un vehículo solar deberá tener:

1.- Un muy bajo arrastre aerodinámico.- Esto se consigue, reduciendo el área frontal del vehículo y dándole a éste una forma adecuada. Llantas sin cubrir, barras de suspensión expuestas, espejos exteriores, antenas verticales, esquinas y superficies planas en contra del viento, representan en conjunto un freno para el auto.



2.- Bajo peso.- Utilizar materiales con mayor resistencia y menor peso (Materiales compuestos, aluminio, titanio, etcétera.)

3.- Baja resistencia al rodamiento.- Llantas duras, sin dibujo, angostas, ligeras, y baleros muy bien lubricados.

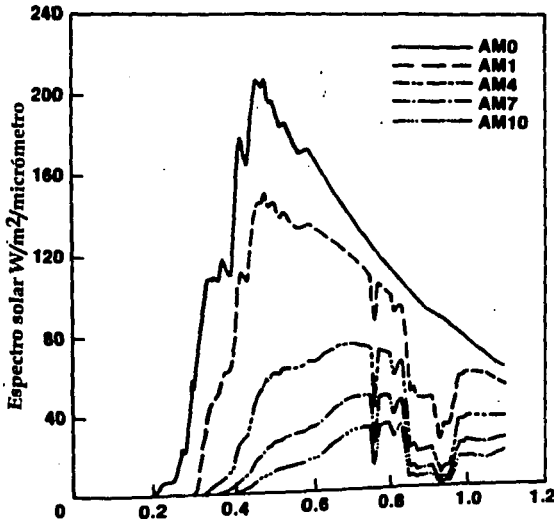
4.- Alta eficiencia en los componentes eléctricos, procurar que el subsistema propulsor trabaje la mayor parte del tiempo en su punto óptimo.

La energía de entrada, como se dijo anteriormente, es igual a la energía recibida por la eficiencia del panel solar. Se estudiará en primer término, la energía recibida:

Existen una cantidad enorme de variables que afectan la cantidad de energía que se recibe del sol; la latitud, la altitud, el día del año, la hora del día, y las condiciones atmosféricas.

La latitud, en grados, es el lugar geométrico de los puntos de intersección de un cono imaginario y la superficie terrestre. Dicho cono tiene su vértice en el centro geométrico de la tierra, su bisectriz alineada con el eje de rotación de la tierra y su apertura es igual a  $180^\circ$ . Esta variable afecta la cantidad de luz solar que se recibe, de dos maneras: primero aumenta el AM de AM1 hasta AM1.5, segundo, si se considera una superficie horizontal, fija, el ángulo de incidencia con el que la luz llega a la superficie aumenta conforme a la lejanía con el ecuador. El ángulo de incidencia es el ángulo entre la dirección al sol y la normal a la superficie horizontal de referencia.

Para latitudes mayores a los  $23^\circ 27'$ , correspondientes a los trópicos de cáncer y capricornio, el sol nunca está en el cenit. La latitud también influye en la duración del día.



La altitud, o sea la altura de un punto de la superficie terrestre respecto al nivel medio del mar, influye también de dos maneras: primero afecta el valor AM y segundo, influye en forma notable sobre la temperatura. La temperatura afecta directamente la operación de las celdas solares. Se sabe que por cada 1000 m de latitud, la temperatura disminuye  $6.4^{\circ}$  aproximadamente.

El día del año determina la cantidad de horas de sol que se pueden obtener según la latitud. Por ejemplo, para latitudes entre  $50^{\circ}$  y  $60^{\circ}$ , como en Londres, la cantidad de horas de luz solar varía de 7 hrs. en invierno hasta 16 hrs. en verano. Para la Ciudad de México, la variación es menor, desde 10.5 hrs. en invierno hasta 13.5 hrs. en verano.

Las carreras de autos solares, se efectúan generalmente a finales de la primavera, y se corren de las 8:00 a las 17:00 hrs. por un total de 9 horas para el WSC, y 8.5 horas, de las 10:00 hasta las 18:30 hrs. para el Sunrayce. En el WSC se va desde una latitud de  $12.5^{\circ}$  sur hasta  $36^{\circ}$  sur, con una altitud casi constante, unos cuantos metros arriba del nivel del mar. En el Sunrayce se corre a una latitud casi constante, cercana a los  $38^{\circ}$  norte, a altitudes variables.

La hora del día es una de las variables críticas. Durante el transcurso del día, el sol cambia de posición, limitando la cantidad instantánea de energía que se puede obtener.

Las condiciones atmosféricas, por último, pueden afectar tanto negativamente como positivamente la cantidad de luz que se recibe. Días densamente nublados, la niebla o incluso el *smog* pueden reducir la cantidad de luz, sin embargo, superficies claras, como la arena, la nieve y ciertas condiciones de nubosidad, pueden aumentar la cantidad de luz por reflexión.

Como se puede observar, la insolación es muy variable por lo que normalmente se utiliza, el valor promedio de la energía solar recibida cada día sobre una superficie con orientación óptima, durante el mes con la menor radiación solar sobre esa superficie. Este valor promedio es el valor más bajo durante el año, por lo que se utiliza para determinar el tamaño máximo del arreglo necesario para cierta carga en cierto lugar del planeta. A este valor de insolación se le denomina insolación de diseño. La industria fotovoltaica a creado mapas de insolación de diseño como el que a continuación se muestra:

The data for this map was obtained from the National Oceanic and Atmospheric Administration, Washington, D.C. The data was obtained from the National Oceanic and Atmospheric Administration, Washington, D.C. The data was obtained from the National Oceanic and Atmospheric Administration, Washington, D.C.

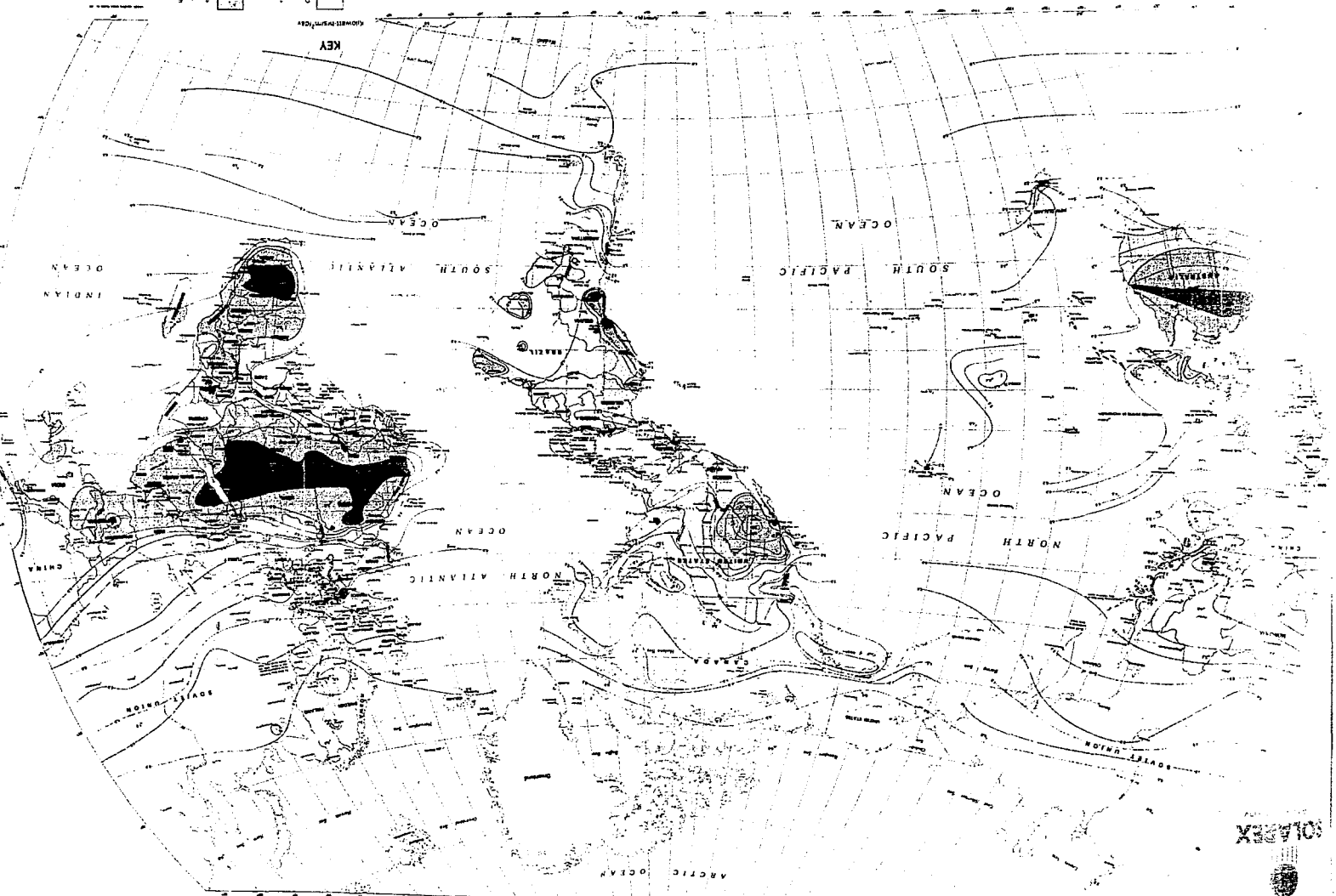
SOLAREX CORPORATION  
 An Amoco Company

**WORLD DESIGN INSOLATION**  
 by The

0 - 1	
1 - 2	
2 - 3	
3 - 4	
4 - 5	

HOURS PER DAY  
 0 - 5

KEY  
 KILOMETERS PER DAY



**SOLAREX**

Se tomará en consideración a Australia y a los Estados Unidos. En Australia la insolación de diseño promedio para el recorrido de Darwin a Adelaide es de aproximadamente 5.5 KWh/m<sup>2</sup>-día, y para el recorrido de Indianápolis a Golden en Estados Unidos este valor es de 4 KWh/m<sup>2</sup>-día.

Sin embargo se debe recordar que esta insolación de diseño representa el peor de los casos. Mediciones en los primeros 5 días de competencia en Australia, arrojan un promedio de 7.3 KWh/m<sup>2</sup>-día con máximos de 8.9 KWh/m<sup>2</sup>-día.

Como los autos solares son diseñados exclusivamente para las carreras y éstas se efectúan en primavera o verano, cuando los días son más largos y el valor de insolación promedio excede ampliamente el valor de la insolación de diseño, se considerará, para efecto de estos cálculos un valor intermedio de 6.5 KWh/m<sup>2</sup>-día.



De esta energía que se recibe durante el día, sólo una parte es aprovechada por el auto solar. Esto se debe a los siguientes factores que engloban en la eficiencia global del panel:

- ☼ Eficiencia de las celdas solares.
- ☼ Forma y dimensiones del panel solar
- ☼ Factor de montaje.



⚙️ Eficiencia de los rastreadores de potencia pico, y pérdidas en conducción y diodos de paso.

La eficiencia de las celdas solares, se expresa normalmente como un porcentaje, pero en realidad es la cantidad de miliwatts por centímetro cuadrado que puede proporcionar la celda en condiciones estándar.

Para una celda de silicio policristalino de grado terrestre, como las que se usaron en Tonatiuh, la eficiencia se calcula, tomando en consideración su voltaje y su corriente de operación, para obtener la potencia en miliwatts.

$$I_{op} = 2.5 \text{ A}$$

$$V_{op} = 0.484 \text{ V}$$

$$P_{op} = 1.21 \text{ W} = 1.21 \times 10^3 \text{ mW}$$

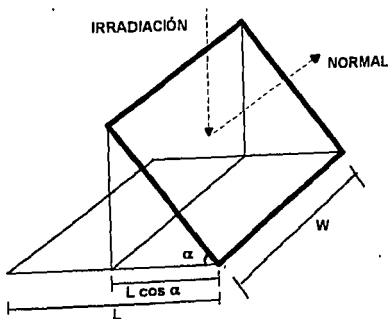
$$\text{Área celda} = 10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm} = 100 \text{ cm}^2$$

Dividiendo la potencia entre el área se obtiene:

$$\eta_{\text{celda}} = P_{op} \times A_{\text{celda}} = (1.21 \times 10^3 \text{ mW}) / (100 \text{ cm}^2) = 12 \text{ mW/cm}^2$$

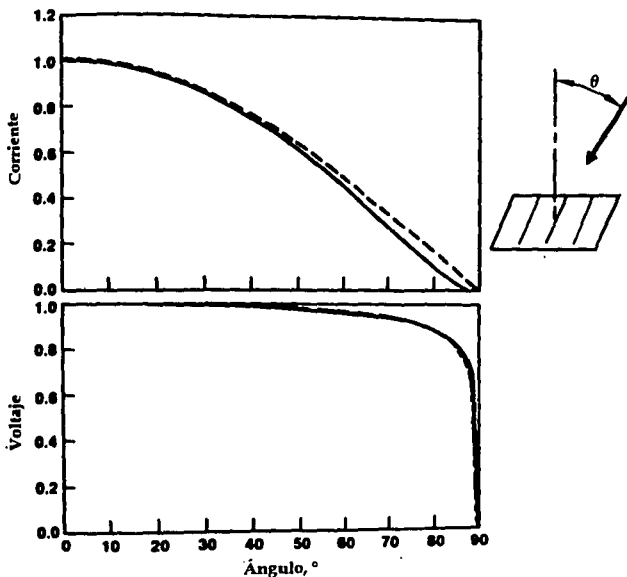
$$\eta_{\text{celda}} = 12\%$$

La orientación de las celdas solares afecta al igual que el día del año, la hora del día, y la latitud, el ángulo de incidencia. Este ángulo reduce el área que recibe radiación y aumenta la reflexión.



$$A_{\text{efectiva}} = L \cdot W \cdot \cos \alpha$$

Dentro de un panel solar curvo, se tienen diferentes orientaciones para cada una de las celdas solares. Existen más de 800 celdas solares en un panel y cada una tiene dos ángulos de incidencia respecto a la dirección de la radiación, por lo que calcular el área efectiva para cada celda resultaría tedioso. Para efecto de cálculos se considerará esta área efectiva como  $8\text{m}^2$ .

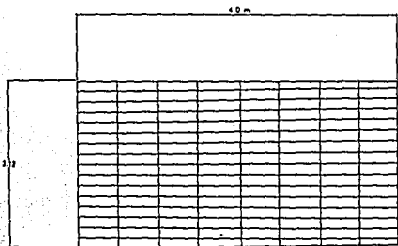
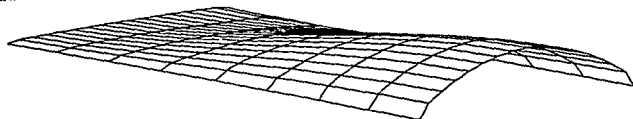


Respecto a la forma y dimensiones del panel solar, en los reglamentos de las competencias se estipula que el panel solar deberá tener dimensiones tales que quepa dentro de un paralelepípedo rectangular de 4.4 m de largo, por 2 m de ancho y 1.6 m de alto; pero además el área proyectada verticalmente al piso no debe ser mayor a  $8\text{m}^2$ .

Aunque esta limitación en las dimensiones permite jugar un poco con la forma del panel, la eficiencia ordena que esta forma sea el resultado de un

compromiso entre la aerodinámica y el área de captación. Esto se analiza más a fondo en el capítulo 4.

Para Tonatiuh se eligió el panel curvo y las dimensiones de 2.12 m de ancho por 4 m de largo, sin embargo el panel siempre estará inclinado con un ángulo tal que su área proyectada al piso sea de  $8 \text{ m}^2$  y el máximo ancho del auto será de 2 m.



El factor de montaje es el porcentaje del área de substrato que está cubierta por celdas solares. Generalmente en los arreglos solares se deja un pequeño espacio entre celda y celda y entre módulos, para efectos de dilatación. Esto evita que el factor de montaje sea 1. Utilizando la técnica denominada "shingling", en la que una celda, se encima sobre la siguiente cerca de 1 mm, se logran factores de montaje de hasta 0.98. El factor de montaje disminuye, el área efectiva.

Por último se considerará la eficiencia de los rastreadores de potencia pico y las pérdidas por conducción y diodos de paso.

$$\eta_{RPP} \approx 98 \%$$

$$\eta_{cond} \approx 99 \%$$

$$\eta_{diodos} \approx 99 \%$$

Considerando todos los factores anteriores, la eficiencia global del panel solar es:

$$\eta_{panel} = (\eta_{celda})(A_{efectiva})(\text{Factor de montaje})(\eta_{RPP})(\eta_{cond})(\eta_{diodos})$$

$$\eta_{panel} = (.12)(8m^2)(.98)(.98)(.99)(.99)$$

$$\eta_{panel} = 0.9031 m^2$$

Por lo tanto, la energía de entrada que se puede esperar durante un día de carrera es:

$$E_{entrada} = E_{recibida} \cdot \eta_{panel}$$

$$E_{entrada} = (6.5 \text{ KWh}/m^2 \cdot \text{día})(.9031 m^2)$$

$$E_{entrada} = 5.8 \text{ KWh}/\text{día}$$

Con esta cantidad de energía se deberá lograr un desempeño adecuado del subsistema propulsor sin provocar una descarga profunda de las baterías. Nuevamente este valor al ser muy limitado, resalta la importancia de reducir las pérdidas para lograr un buen desempeño del auto.

Para mejorar la eficiencia del panel se deberán utilizar celdas solares de la mayor eficiencia posible, altos factores de montaje, el mayor tamaño de área efectiva y minimizar las pérdidas por conducción, diodos de paso, y recubrimiento.

La eficiencia del panel y las pérdidas son las dos variables de control sobre la velocidad, aceleración y rango del automóvil. Existen en el mundo una gran cantidad de autos solares muy diferentes entre sí en diseño, esto confirma que no hay nada completamente determinado todavía, el ingeniero puede seguir usando su creatividad e imaginación para mejorar el desempeño de un auto solar.

### 3.2.- CÁLCULO DEL ARREGLO.

Quizás uno de los principales problemas que han sufrido muchos equipos de autos solares, es el no haber acoplado de manera correcta el panel solar, las baterías y el subsistema propulsor. Al diseñar el sistema eléctrico de un auto solar se debe tener en mente la compatibilidad de estos tres elementos.

La función primordial del panel solar es la de recargar eficientemente al banco de baterías, éste a su vez, deberá tener la capacidad y el voltaje adecuados para lograr un buen desempeño del subsistema propulsor.

Los sistemas motor-controlador, normalmente, funcionan entre un rango de voltajes, sin embargo, es deseado que este voltaje sea el mayor permitido para poder lograr altas velocidades angulares y por lo tanto alta velocidad del vehículo. Por lo tanto, el voltaje del banco de baterías deberá ser tal, que se logren las más altas velocidades angulares que el subsistema propulsor permita.

La capacidad y el peso del banco de baterías tiene limitaciones impuestas en los reglamentos de carreras de autos solares. Para Sunrayce 95, el banco de baterías deberá ser de plomo ácido comercial, con un peso no mayor de 140 Kg. Para Australia, el banco de baterías puede ser de cualquier electroquímica, exceptuando las celdas de combustible, pero la capacidad no puede exceder los 5 KWh.

Estas reglas restringen el número de baterías que se pueden conectar en serie o paralelo y por lo tanto restringe también la potencia del subsistema propulsor. Sistemas motor-controlador que trabajan a 100 Volts o menos son comúnmente usados en los autos solares.

En el caso de Tonatiuh se utiliza un banco de 7 baterías conectadas en serie, de plomo ácido de 12 V y 56 Ah cada una. Esto equivale a 84 V y una capacidad de 4.7 KWh para todo el banco.

El voltaje de carga de las baterías es de 15 V por batería, esto es, 105 V para el banco. Las baterías utilizadas tienen una eficiencia coulombica de 91 %, lo que significa que por cada ampere hora que sale del banco, hay que meter 1.1 ampere hora para recargarla. Por lo tanto para un banco de baterías con 56 Ah habrá que recargar:

$$Ah_{\text{recarga}} = Ah_{\text{nominales}} / \eta_{\text{coulombica}}$$

$$Ah_{\text{recarga}} = 56 \text{ Ah} / .91$$

$$Ah_{\text{recarga}} = 61.5 \text{ Ah}$$

El panel solar deberá pues ser capaz de proporcionar 105 V al ser conectado al banco de baterías y dar el amperaje suficiente que pueda recargar el banco en eficientemente. Para lograr un voltaje de 105 V, considerando que cada celda proporciona 0.5 V en circuito abierto se deberán conectar en serie:

$$\# \text{celdas en serie} = \text{voltaje deseado} / \text{voltaje celda}$$

$$\# \text{celdas en serie} = 105 / 0.5$$

$$\# \text{celdas en serie} = 210 \text{ celdas}$$

El área y la forma del substrato además de estar restringidos por el reglamento deberán ser tales que puedan contener el mayor número posible de módulos, esto con el objeto de conectar en paralelo más módulos y aumentar la corriente de suministro. Entiéndase módulo como la serie de celdas que proporcionan el voltaje de recarga.

El substrato de Tonatiuh fue diseñado para tener cuatro módulos, de 213 celdas en serie, para un total de 852 celdas con un área de 100 cm<sup>2</sup> cada una. Cada serie puede entregar hasta 3 A en corto circuito.

$$V_{ca} = 106.5 \text{ V}$$

$$I_{cc} = 12 \text{ A}$$

$$A_{total}=8.52 \text{ m}^2$$

Los valores de la corriente y el voltaje de operación del panel son menores al conectarse a la carga. Es por esta razón que se eligió un circuito tipo *boost* en los rastreadores de potencia pico. Los rastreadores elevan el voltaje para que sea lo suficientemente alto para recargar las baterías.

Utilizar un arreglo de celdas con alto voltaje y utilizar un circuito tipo *buck* en los RPP, se cree que es una solución más confiable. Sin embargo para lograr un arreglo de mayor voltaje con la misma área de substrato, se deben conectar en serie más celdas, y por lo tanto se tendrá menos amperaje, o bien, utilizando cortadoras de diamante o láser, cortar las celdas. Cada trozo de celda, producirá 0.5 V pero una corriente proporcional a su área.

El panel solar de Tonatiuh es capaz de entregar 5.8 KWh al día. Esto equivale a un promedio de 6.9 A por 8 horas, a 105V. El tiempo que toma recargar el banco de baterías con esa corriente es:

$$t_{recarga} = \text{capacidad banco} / \text{Corriente promedio panel}$$

$$t_{recarga} = 61.5 \text{ Ah} / 6.9 \text{ A}$$

$$t_{recarga} = 8.91 \text{ hrs.}$$

Esto parece ser demasiado tiempo, pero si un vehículo solar tiene pérdidas muy bajas, seguramente la sola corriente proveniente del panel sea suficiente para lograr un buen desempeño del auto, logrando una muy baja descarga de las baterías. Siendo ése el caso ésta podrían ser recargadas en un par de horas.

Cómo conectar las celdas solares entre sí, y que tipo de circuito usar en los RPP, es la decisión que debe tomar el diseñador del sistema eléctrico teniendo en mente la recarga de las baterías. Para tomar la decisión correcta y lograr un sistema eléctrico bien acoplado, se deberá estudiar cuidadosamente la electroquímica de las baterías; se deberán obtener las curvas de carga y descarga del banco, pero sobre todo se deberán hacer muchas, pero muchas, pruebas.

## CAPÍTULO 4

### *EL PANEL SOLAR CONSTRUCCIÓN.*

En este capítulo, se analiza la construcción del panel, y se mencionan las características que deben tener las partes que lo integran.

Antes que nada se deberá hacer la selección de tres componentes importantes del panel: el substrato, el adhesivo y el recubrimiento.

#### *4.1.- EL SUBSTRATO.*

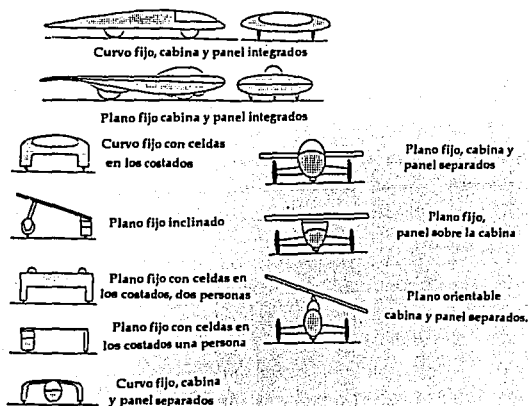
El substrato es el material donde estarán sustentadas las celdas solares. Por lo general, el substrato es una parte integral de la carrocería del automóvil, por lo que sus características físicas de forma y peso son acordes a la filosofía de diseño para máxima eficiencia.

La forma del substrato se determina en base a un compromiso entre la forma que permita una máxima captación solar y aquella que proporcione una mejor aerodinámica respetando, claro está, las limitaciones de tamaño que los reglamentos impongan. En base a estos dos parámetros se han ideado diferentes soluciones, que se pueden generalizar en cuatro:

- ◊ Panel plano, fijo.
- ◊ Panel plano, orientable.
- ◊ Panel curvo, fijo.
- ◊ Panel curvo, orientable.



Desde el punto de vista de la aerodinámica, el panel curvo fijo es el más adecuado, permitiendo una mayor área de captación solar. Sin embargo, éste es más difícil de construir y provocará la existencia de áreas con diferentes niveles de radiación y temperatura, lo que añade problemas al momento de conectar las celdas. Si éstas se conectan en serie, aquellas celdas que reciban la menor cantidad de luz, limitarán la corriente de las demás y si se conectan en paralelo, aquellas con mayor temperatura, tendrán un menor voltaje que las que están frías limitando el voltaje. Este problema se puede solucionar dividiendo el arreglo en módulos que tengan una temperatura y un nivel de radiación similar, y utilizando los rastreadores de potencia pico, para mantener cada segmento en su punto de operación óptimo.



Por lo tanto si se tiene un panel curvo fijo, se gana en aerodinámica y en captación solar, pero se pierde en peso, dificultad de construcción y pérdidas de energía por imperfecciones en la electrónica durante el rastreo.

El panel curvo orientable, tiene las mismas ventajas y desventajas que el panel curvo fijo, pero además, éste tiene una mejor captación solar, pues puede

rastrear al sol, pero también, el mecanismo de giro agrega peso, y las propiedades aerodinámicas se ven un poco disminuidas, sobretodo en vientos laterales.

El panel plano fijo, es el más fácil de construir, y no presenta mayor problema en la conexión de celdas, ya que éstas tendrán el mismo nivel de radiación y la misma temperatura. No tiene tan buena aerodinámica como el panel curvo fijo, y esto se acentúa cuando el panel plano es orientable, pues se genera una gran turbulencia que aumenta considerablemente el arrastre. El panel plano orientable, puede incluso llegar a ser peligroso en caso de fuertes vientos laterales.

En los diferentes automóviles solares que hay en el mundo, se han implementado todas estas posibles soluciones, y por el momento el panel curvo fijo es el que ha mostrado un mejor desempeño, sin embargo, no existe mucha diferencia con el panel plano fijo, y éste es mucho más fácil de construir, por lo que es recomendable que se elija un panel plano si no se tienen la experiencia e infraestructura para construir un panel curvo.

El panel plano orientable ha sido utilizado por una gran número de vehículos, pero su desempeño deja mucho que desear. Son muy pocos los automóviles solares que han usado panel curvo orientable, pero han obtenido buenos resultados.

Existen algunos otros autos que utilizan un sustrato que no forma parte integral de la carrocería, con objeto de hacer submódulos intercambiables, de esta manera, si se rompe una celda o si algún submódulo deja de funcionar por alguna razón, se reemplaza rápidamente por uno nuevo. Esta solución, tampoco ha demostrado ser una de las mejores, ya que se añade peso y se corre el riesgo de romper más celdas al momento de remover el sustrato. Los diodos de paso actúan suficientemente bien en el caso de ruptura de una celda.

En cuanto al peso, se busca, como en toda la carrocería, que éste sea el menor, pero al mismo tiempo proporcionando una estructura suficientemente rígida que no se flexione o se torsione, exponiendo las celdas a una posible ruptura. Por todo esto, generalmente se utilizan fibras compuestas como el

Kevlar o la fibra de carbono, que por sus características físicas, proporcionan una muy alta resistencia y un muy bajo peso, aunque a un muy alto costo.

Aunque la fibra de carbono es más rígida que el Kevlar, ésta tiene una desventaja; es conductora de la electricidad, por lo que añade una gran dificultad en la construcción del panel pues hay que aislar perfectamente el sustrato y las celdas. Esto también añade peso. Una solución a este problema, es el de utilizar Kevlar reforzado con costillas de fibra de carbono, que den la rigidez necesaria, al mismo tiempo de que se evita el aislamiento, pues el Kevlar no es conductor.

A modo de aumentar la ligereza del sustrato y al mismo tiempo permitir una mayor ventilación de las celdas, algunos autos solares, con muy buenos resultados, en lugar de tener un sustrato continuo, tienen un sustrato en forma de red.

El sustrato debe además tener, maquinabilidad, es decir, que sea fácilmente perforable para permitir el paso de cables a través de él, y debe también permitir una buena adhesión, es decir debe tener un cierto acabado rugoso.

Tonatiuh utiliza un panel curvo orientable hecho de Kevlar reforzado con fibra de carbono, en forma de red.

#### *4.2.- ADHESIÓN*

En la selección del adhesivo, se deben tomar en cuenta los materiales del sustrato y de las celdas. Cualquier material que se adhiera bien en ambos será adecuado. Sin embargo se debe cuidar que éste no sea conductor, que sea lo más ligero posible, ya que el área del panel es muy grande y por lo tanto se deberá usar una gran cantidad de él. El costo es otro factor importante que se ve agravado por la cantidad de adhesivo que se usa. Debe ser de fácil aplicación y no debe ser demasiado rígido, sino que debe permitir ciertos movimientos térmicos de expansión y contracción del sustrato y de las celdas. También debe amortiguar las vibraciones provenientes de la carrocería, para evitar que las celdas se rompan.

Por las características arriba mencionadas, son dos los adhesivos más utilizados, el silicón y la cinta de doble adherencia. Ambos tienen características semejantes pero básicamente difieren en tres: la cinta de doble adherencia, tiene un menor peso y se aplica de una manera más sencilla, pero tiene un mayor costo. El silicón tiene una densidad similar a la del agua (1.2 g/cm), por ser líquido viscoso puede ser aplicado con brocha o por aspersión y siguiendo un procedimiento adecuado se pueden evitar escurrimientos en superficies curvas. El silicón tiene un tiempo de fraguado de aproximadamente 6 hrs.

#### 4.3.- RECUBRIMIENTO.

El recubrimiento, es definitivamente una parte vital para el buen funcionamiento de un panel solar. Este debe tener propiedades ópticas tales, que no existan pérdidas en la luz que reciben las celdas solares, además, estas propiedades no se deberán perder con la temperatura, con el tiempo o con las diferentes condiciones atmosféricas a las que se exponga el recubrimiento. La función más importante del recubrimiento es la de aislar y proteger a las celdas solares de agua, del polvo, y cualquier otro factor del medio ambiente que pueda romperlas, erosionarlas o afectarlas eléctricamente.

Además de cumplir con estas dos funciones, el recubrimiento debe tener características similares a las del adhesivo en cuanto no ser conductor, ser ligero, de fácil aplicación, de bajo costo y que permita movimientos térmicos.

A continuación se presentan las pruebas realizadas a una serie de recubrimientos que se consideraron adecuados:

CELDA 1			
Recubrimiento	Aire	Vidrio/Aire	Vidrio/Silicón
Icc (Amp)	1.213	1.11	1.19
Vca (mV)	585	584	596
Potencia (mW)	480	435	470
Temperatura. (°c)	27	27	25
Degradación pot.		10%	2%

<i>CELDA 2</i>			
Recubrimiento	Aire	Acetato/Aire	Acetato/Silicón
Icc (Amp)	1.24	1.11	1.21
Vca (mV)	597	588	587
Potencia (mW)	459	409	453
Temperatura. (°c)	29	30	29
Degradación pot.		11%	1.30%

<i>CELDA 3</i>			
Recubrimiento	Aire	Mylar/Aire	Mylar/Silicón
Icc (Amp)	1.23	1.02	1.19
Vca (mV)	591	585	583
Potencia (mW)	461	372	443
Temperatura. (°c)	27	28	25
Degradación pot.		19%	4%

<i>CELDA 4</i>			
Recubrimiento	Aire	Silicón	
Icc (Amp)	1.23	1.22	
Vca (mV)	597	578	
Potencia (mW)	463	461	
Temperatura. (°c)	28	27	
Degradación pot.		0.40%	

#### 4.4.- ENSAMBLE

Una vez que se han seleccionado y obtenido el sustrato, el adhesivo, el recubrimiento, las celdas solares y los diodos de paso, se puede comenzar a ensamblar el panel. Para esta delicada tarea se requiere de mucha paciencia y dedicación.

El primer paso en la construcción o ensamble del panel, es hacer, como se hizo en el capítulo 3 el cálculo y diseño del arreglo, tomando en consideración, el área disponible, las condiciones de carga y operación y reglamentos de competencia. Es muy recomendable que en el diseño se considere el sistema modular, es decir, el arreglo final como resultado de la unión de un conjunto de módulos, los módulos, como resultado de la unión de un conjunto de submódulos, y así sucesivamente hasta llegar a la unidad básica que es la celda

solar. De esta manera se puede empezar la construcción por pasos de lo particular a lo general.

El segundo paso es la unión de las celdas solares para hacer submódulos. Para realizar esta tarea es recomendable utilizar soldadura ordinaria para electrónica de 60% estaño y 40% plomo. Aunque también se puede usar soldadura especial con 2% de plata y 38% de plomo. Este tipo de soldadura es mucho más cara pero también es mejor, porque mantendrá a la soldadura caliente sin disolverse y así evita el debilitamiento de la unión con los delgados hilos de plata. Se debe contar también con un caudín tipo lápiz de 40 a 60 Watts con punta en forma de cono o bien en forma de pequeño desarmador, ya que estas formas son las que pueden dar una precisa cantidad de calor a un área pequeña.

La mayoría de las celdas solares comerciales vienen ya con terminales estañadas que facilitan su conexión. Sin embargo, en caso de que no tengan terminales, se pueden usar tiras de cobre delgadas de 2 ó 3 mm de ancho para unirlos.

En un panel solar fotovoltaico para este tipo de autos se trata Siempre de aprovechar al máximo el área, pues se restringe por reglamento. Por lo tanto se debe procurar que las celdas solares cubran toda el área disponible en el substrato de la mejor manera. Para lograr esto se debe tener cuidado en alinear las celdas perfectamente para soldarlas y evitar que exista espacio entre ellas, incluso se pueden empalmar ligeramente una con otra ocupando cuando mucho 1 mm de la orilla superior de la siguiente. Para lograr esta perfecta alineación es conveniente construir unas guías de referencia.

Es importante también limpiar las superficies que se van a soldar; se puede usar alcohol isopropílico para tal efecto. Por último es recomendable usar mascarilla con filtro de gases tóxicos para no respirar los gases emitidos por la soldadura pues contienen plomo.

En el proceso de soldadura se deberá ir de lo particular a lo general, desde la unión de celdas para formar series, hasta la unión de esas series para crear submódulos. En este proceso se deberán soldar los diodos de paso, como se indicó en capítulos anteriores.

Cuando se haya terminado el proceso de soldadura y se tengan ya soldados el número de submódulos que el diseño del arreglo ordene, se deberá probar el perfecto funcionamiento de éstos antes de conectarlos en módulos. Para esto se puede construir un simulador solar, que no necesariamente dé la cantidad de luz que podría dar el sol, sino que sólo sirva de iluminación constante que permita identificar diferencias entre submódulos y posibles fallas. Una vez que se haya probado que los submódulos están libres de falla, se puede iniciar la conexión de ellos para formar módulos.

Al formar los módulos sólo se debe tener cuidado de hacer una conexión adecuada tomando en cuenta la corriente y la temperatura máxima para calcular un diámetro apropiado de cable. Si los submódulos son muy grandes, la interconexión de ellos se puede hacer directamente en el sustrato durante el ensamble final.

Para poder hacer el ensamble de las celdas al sustrato hay que prepararlo bien, de tal manera que ya tenga todos los mecanismos, insertos o perforaciones ya hechos. Esto con el fin de evitar un manejo excesivo o maquinados que puedan ser peligrosos, una vez que las celdas estén ensambladas.

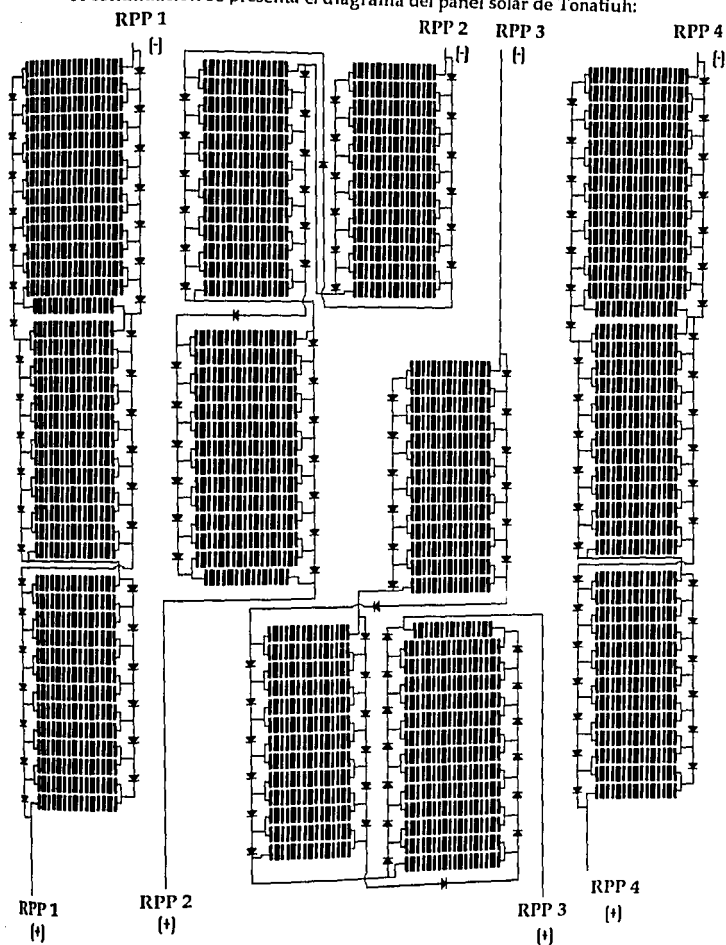
Antes de aplicar el adhesivo se deberá limpiar el sustrato. Si el adhesivo es silicón, éste se deberá aplicar por zonas para evitar el escurrimiento o posibles desperdicios.

Una vez aplicado el adhesivo se hará la colocación de los submódulos cuidando que haya una buena interconexión entre ellos. Cuando se hayan colocado todos los módulos se procederá a la interconexión de módulos. Ésta se hará utilizando los diodos de bloqueo. Durante la interconexión de módulos se deben dejar listas las terminales para la conexión de cada módulo con los rastreadores de potencia pico. Después de esto se pondrá el recubrimiento.

El recubrimiento tendrá que aplicarse cuidando cubrir toda la superficie, de ser necesario se deberán aplicar varias capas. El aislamiento y la protección son una parte fundamental para el buen funcionamiento del panel. En el caso del silicón, como el utilizado en Tonatiuh, el fraguado es de aproximadamente 6 hrs., pero sea cual fuere la substancia que se utilice, es importante que se respete el tiempo de fraguado.

Al final de este ensamble se deben hacer pruebas para corroborar el buen funcionamiento del panel, después de lo cual se podrán conectar el resto de los elementos del sistema eléctrico primario.

A continuación se presenta el diagrama del panel solar de Tonatiuh:





#### 4.5.- RESULTADOS

A continuación se presentan datos del desempeño real del panel solar, obtenidos el día 19 de junio de 1995 en Indianápolis, E.U.A. a las doce horas:

$V_{caRPP1}=138 \text{ V}$	$C_{ccRPP1}=2.4 \text{ A}$
$V_{caRPP2}=135 \text{ V}$	$C_{ccRPP2}=2.5 \text{ A}$
$V_{caRPP3}=127 \text{ V}$	$C_{ccRPP3}=1.9 \text{ A}$
$V_{caRPP4}=120 \text{ V}$	$C_{ccRPP4}=1.3 \text{ A}$
$V_{caPanel}=132 \text{ V}$	$C_{ccPanel}=8.4 \text{ A}$

El voltaje del panel varía al conectarse a la carga, en este caso, el banco de baterías de 84 volts, según el estado de carga de éstas. Durante la carrera el voltaje fluctuó entre 60 y 95 volts.

La corriente del panel fue sumamente variable a lo largo del día debido a cambios en el ángulo de incidencia y por las variaciones del clima. Ésta fluctuó entre 0 y 11 amperes.

Durante la carrera, también se experimentaron situaciones que pusieron a prueba los diferentes componentes del panel:

El recubrimiento aisló perfectamente a las celdas durante la lluvia, sin embargo, éste necesitó de limpiezas constantes debido a que al material se le adhería el polvo con facilidad.

No se presentaron problemas con el adhesivo o con el substrato, ambos cumplieron su función perfectamente.

Hubo celdas que se rompieron, como consecuencia del manejo excesivo del panel y por la grava del camino que llegaba a golpearlas. Los diodos de paso funcionaron correctamente. Sin embargo, las vibraciones constantes provocaron la ruptura por fatiga de las uniones de los diodos con las celdas solares.

El panel solar tuvo un funcionamiento adecuado en general, sin embargo este se puede mejorar aún más. Las fallas durante la carrera y la retroalimentación con miembros de los otros equipos fueron esenciales para el aprendizaje.

## CONCLUSIONES

Los sueños pueden convertirse en realidad y los conceptos pueden llegar a ser productos. La imaginación y los pensamientos creativos, han sido y son la fuente de todas las cosas que ha creado el ser humano y de las que todavía no.

Llevar a cabo cualquier tipo de proyecto, involucra la vivencia de un cúmulo de experiencias que van desde la frustración hasta el éxito, pero que finalmente ayudan a desarrollar tu creatividad y te transmiten sabiduría y conocimientos.

La construcción de un auto solar, es un proyecto que requiere la reunión de un número de personas de diferentes disciplinas que tienen que aprender a trabajar en equipo, aceptar el papel de maestro y aprendiz al mismo tiempo, renunciando muchas veces al ego, para poder cumplir el objetivo común.

La comunicación y el intercambio de información entre los miembros de un equipo produce, además de una cohesión, un grupo de personas con una capacitación y un entendimiento básico del proyecto tal, que una persona puede ser especialista en su área y brindar un apoyo importante en las demás. Tener un equipo que entienda las diferentes fases del proyecto es una herramienta muy poderosa.

Una de las cosas que se aprende al finalizar cualquier proyecto y que yo considero dentro de las más importantes, es que, de tener la oportunidad de hacerlo de nuevo lo haría de una manera totalmente diferente, optimizando tiempos y movimientos y mejorando la calidad de muchas de las cosas que se hicieron. Conforme uno va avanzando en la construcción del proyecto, se da cuenta de que eso que hizo lo pudo haber hecho mejor, si hubiera tenido los conocimientos y la experiencia que ahora tiene.

Un auto solar es un sistema bastante complejo que agrupa diversos elementos de muy distinta naturaleza, partes mecánicas, partes eléctricas, chasis, carrocería, instrumentación y control; para lograr el funcionamiento óptimo del auto hay que optimizar todo el sistema y no sus partes. Por lo tanto, el diseño y construcción del panel solar, así como todo el sistema eléctrico primario, está estrictamente ligado al diseño total.

Antes de comenzar a diseñar, se deben tener muy claros los objetivos finales, es decir, se va a construir un auto que se desempeñe mejor que cualquier otro auto en el mundo, o se va a construir un auto competente cuyo objetivo, más que ganar competencias, sea el de demostrar que en México se pueden realizar proyectos de esta naturaleza, provocar el interés del público en general, y que el transporte eléctrico y las fuentes alternativas de energía son una realidad en nuestros días. Estos objetivos son muy importantes, pues definirán formas, materiales, presupuestos, componentes, tiempos, movimientos, personal, etcétera.

Si el vehículo va a ser construido para una competencia, se deberá estudiar a fondo el reglamento de la misma con el fin de hacer compatibles los objetivos con las exigencias propias de la o las competencias.

Para generar ideas creativas respecto al diseño, se puede utilizar la lluvia de ideas; se anotan todas las ideas sin importar que tan tontas o fantasiosas puedan sonar, no se pueden criticar. Después de esto se sigue con un proceso de eliminación teniendo siempre en mente el objetivo final y la reglamentación. Con las ideas finales, se trabaja el plan inicial.

Es crítico considerar el presupuesto, la infraestructura y la mano de obra que vaya a ser necesaria en el proyecto, pues deficiencias en cualquiera de estos tres elementos, puede alterar gravemente el desarrollo del plan inicial.

Documentación técnica y dibujos, desde simples bocetos hasta dibujos escala 1:1 son vitales para evitar errores de manufactura, pérdidas de tiempo y confusiones.

Una vez que se han definido los objetivos, que se ha conjuntado un equipo de trabajo competente, y que se cuenta con documentación técnica suficiente y planos de un diseño compatible con presupuesto (calculado), infraestructura y

mano de obra, el primer paso para la construcción debe ser conseguir ese presupuesto. Éste se consigue con una propuesta bien presentada que debe convencer al lector de que se cuenta con la seriedad y la capacidad técnica para llevar a cabo ese proyecto, además de ofrecer al posible patrocinador, visibilidad en competencias, eventos y exposiciones. Nunca se debe subestimar a los patrocinadores que aportan cantidades pequeñas, muchos equipos se han financiado de esta manera, pues resulta muy difícil encontrar un patrocinador grande.

El sistema eléctrico primario, es más que nada un sistema de integración. El motor, el controlador, las baterías, las celdas y los rastreadores de potencia pico, son elementos que generalmente se compran y no se piensa en fabricarlos.

Si se intentaran fabricar estos elementos, muy probablemente éstos no serían confiables, no tendrían un desempeño eficiente o compatible con los comerciales, además que para fabricarlos se necesita un cierto nivel técnico y una cierta infraestructura que difícilmente se encuentra en las universidades o en los estudiantes. Probablemente resulte más caro incluso, en tiempo y dinero fabricarlos que adquirirlos directamente de las empresas especialistas en ellos, que cuentan con toda la infraestructura y la experiencia.

Para poder conformar un sistema eléctrico primario con un buen desempeño, se deben seguir los siguientes pasos:

- 1.- Se debe hacer un estudio de las características, tipos, funcionamiento y costos de los diferentes elementos, para poder lograr el entendimiento necesario de cada componente.

- 2.- Determinar qué componentes funcionan mejor al ser relacionados con los demás, con el fin de optimizar al sistema, no sus partes. Esto significa que no siempre los mejores componentes producen el mejor sistema. El motor y el controlador deben ser tales, que proporcionen la potencia necesaria para tener una buena aceleración, pero al mismo tiempo deben drenar poca corriente de las baterías para evitar descargarlas muy rápidamente. La elección de las baterías y la manera en que éstas se conectan, puede ser un factor clave para el desempeño total del sistema, de poco nos serviría tener una gran capacidad instalada de baterías si el panel no puede proporcionar la energía suficiente para recargarlas,

y el motor no puede obtener la potencia necesaria de ellas para mover su peso. En resumen, se tiene que hacer un análisis de sensibilidad entre las diferentes variables de los diferentes componentes.

3.- Identificar a los fabricantes de estos componentes, a nivel nacional e internacional, procurando obtener de ellos toda la información y las especificaciones que se tengan.

4.- Adquirir los componentes y probarlos, en muchas ocasiones el funcionamiento real difiere del señalado en las especificaciones o en la propaganda del producto. Hacer pruebas de cada componente produce al final un sistema más confiable y predecible.

5.- Por último se deben interconectar estos elementos y hacer pruebas de todo el sistema. La única forma en que se puede conseguir un sistema confiable y con un buen desempeño, es sometiéndolo a un largo y variado proceso de pruebas. Para poder tener un periodo intensivo de pruebas, es necesario que el proyecto se termine con tiempo suficiente antes de la carrera.

Quizás no haya cosa más difícil de determinar y de cumplir que el tiempo que debe tomar, llevar a cabo una tarea o la suma de tareas de un proyecto. Frecuentemente ocurre que problemas imprevistos, errores, descuidos o circunstancias varias, nos impiden concluir a tiempo. Para poder determinar una fecha objetiva de conclusión, se debe utilizar la ayuda de todo el equipo, se deben de determinar metas intermedias que obliguen a cumplir el objetivo final, y se debe poner un encargado de presionar a todo el equipo para que se cumplan esas metas, de no ser así, muy probablemente se termine el proyecto mucho después de lo planeado o quizá jamás se termine.

Es muy importante que la cabeza del proyecto sea una persona con la capacidad de tomar decisiones rápidas y prácticas, para las muchas y muy diversas dificultades que se presenten. En varias ocasiones el querer ahorrar un poco de dinero y hacer una pieza difícil por nosotros mismos, en lugar de mandarla a hacer, representó a la larga una pérdida de tiempo y un desgaste físico y anímico importantes, que afectan todo el desarrollo del proyecto. Estas situaciones, son las más peligrosas y se presentan, por desgracia, con mucha frecuencia. Tomar soluciones que en ese momento puedan no parecer las

óptimas desde el punto de vista ingenieril, puede ahorrar mucho tiempo y permite el avance continuo del proyecto. Posteriormente durante el periodo de pruebas se podrán hacer las mejoras correspondientes, para poner a punto el sistema.

El panel solar fotovoltaico es el único componente del sistema eléctrico primario de un auto solar de competencias, que se construye, sin embargo éste se compone de diversos elementos que también deben ser adquiridos de empresas comerciales, siguiendo los 5 pasos antes mencionados; el substrato, las celdas, el adhesivo, el recubrimiento, los diodos y la soldadura. Se deberán escoger aquéllos que realicen su función con una máxima eficiencia, y sean compatibles con los demás elementos.

La electrónica y los motores eléctricos, son mucho más eficientes y fáciles de entender, mantener y usar que los motores de combustión interna y la termodinámica. La energía eléctrica producida por celdas solares puede ser la solución para una infinidad de problemas actuales del hombre, sobre todo relacionados al medio ambiente.

La naturaleza a empezado a reclamar todo aquello que se le ha quitado. Los inconscientes abusos de los seres humanos se han puesto en nuestra contra. No se le puede pedir al ser humano que abandone totalmente todas sus comodidades y que regrese a vivir, como en sus primeros días, en perfecta armonía con la naturaleza.

La ingeniería debe buscar la manera de conciliar el modo de vida actual del ser humano con el cuidado de la naturaleza. Para lograr esto, nuevas maneras de pensar y producir tendrán que ser adoptadas. La eficiencia tendrá que ser el principio que rijan todo proceso en el mundo.

De la misma manera en que la naturaleza trabaja, el hombre tendrá que trabajar, es decir, los desechos de un proceso deberán servir de materia prima para otro y así sucesivamente hasta completar el círculo, pero además todos estos procesos deberán consumir un mínimo de materiales, y un mínimo de energía, por lo tanto deberán ser altamente eficientes. Se deberá minimizar la producción de materiales contaminantes.

Las fuentes alternativas de energía, provenientes de recursos renovables deben ser implementadas cuanto antes. En el mundo industrializado se están haciendo enormes esfuerzos en este sentido y es primordial que en los países del tercer mundo, como México, se comience.

La energía solar es la mejor opción dentro de las fuentes alternativas de energía. La creación de proyectos como el auto solar, aumentan el interés de las personas por la eficiencia, el transporte limpio y la energía solar.

México necesita adoptar esta mentalidad. Desde un punto de vista optimista, México, al no tener la misma industria que los países del primer mundo, está en una posición más cómoda para el cambio, pues no necesita invertir tanto dinero en cambiar toda su infraestructura. Si México y los países del tercer mundo logran ese cambio, esto representaría un gran salto para las economías y un gran avance en contra del rezago industrial.

El final del siglo XX marcará una dolorosa transición hacia un futuro mejor para muchos países. México es un país de jóvenes; jóvenes creativos e ingeniosos que cada vez se preparan mejor. El futuro que los mexicanos queremos para nosotros y para nuestros hijos es alcanzable, pero se debe actuar ahora. Nosotros los jóvenes ingenieros mexicanos, tenemos esa gran responsabilidad, no podemos defraudarnos.

## BIBLIOGRAFÍA

Advanced Energy Systems PTY. LTD., Maximum Power Point Tracker boost converter battery charger, Instruction Manual, Australia 1993.

APS Solar and Electric 500, "A chronology of Electric Vehicle Milestones", E.U.A., 1992.

BEISER Arthur, Conceptos de Física Moderna, (Arturo Nava J.), México, McGraw Hill, 1977, (2a Ed.).

BRANT Bob, Build your own Electric Vehicle, Mc Graw Hill, U.S.A., 1994.

CHEN C.P., Fracture Strength of Silicon Solar Cells, E.U.A., U.S.DoF, NASA, & Jet Propulsion Laboratory, Octubre 1979.

CLARIOND REYES José, "Tratado de las Baterías para Almacenamiento y uso de Energías Fotovoltaica y Eólica", México, 1992.

Comisión Federal de Electricidad, "Del Fuego a la Energía Nuclear", México, Julio de 1989, Cronográfica S.A. de C.V.

CURTIS, Battery Book One, lead acid traction batteries, Curtis Instruments Inc., U.S.A, 1981, (3a ed.).

DADD Debra, Nontoxic, Natural & Earthwise, Tarcher Perigee, U.S.A, 1990.

DAWES Chester, Tratado de la Electricidad, corriente continua, (Santiago Rubió), México, Ediciones G. Gili, S.A. de C.V., 1986, tomo I.

Eagle Picher Industries Inc., "Metal Hydride Systems", Electronic Division, E.U.A., 1993.

Equipo Editorial McGraw Hill (com), Electrónica Práctica, (Agustín Contin Sanz y Caupolicán Muñoz Gamboa), México, McGraw Hill/Interamericana, 1990, tomo I.

FORBES Christian & PIERRE Joseph, " The Solid Fuel-Cell Future", IEEE Spectrum, E.U.A, octubre 1993, 0018-9235.

HALLIDAY David & RESNICK Robert, Fundamentos de Física, versión ampliada, (Alejandro Félix Estrada), México, Compañía Editorial Continental S.A. de C.V., 1987.



HAYT William H., Teoría Electromagnética, (Ing. Herbert Russell), México, McGraw Hill/ Interamericana, 1988.

International Solar Energy Society, Solar Energy Solutions for an Environmentally Sustainable World, United Nations Conference on Environment and Development, U.S.A, 1992.

KALYAN Jana, Battery Application Handbook, Hawker Energy Products Inc., U.S.A., 1994.

KOMP Richard, Practical Photovoltaics, electricity from solar cells, E.U.A., Aatec Publications, 1989, (2a Ed.).

KREUTZFELDT Richard, OHNACKER, "Maintenance of Electrical Equipment", E.U.A., 1993.

MARSH Douglas, "The Phoenix 500, a touch of panic in the battle of batteries, Solar Mind, E.U.A., junio-julio 1992.

MAYCOCK Paul & STIREWALT Edward, A Guide to the Fotovoltaic Revolution, sunlight to electricity in one step, E.U.A., Rodale Press, 1985.

NESEA, Sustainable Transportation, Solar and Electric Vehicles 94, DoE, U.S.A, 1994.

NESEA, Transpotation Alternatives 92, alternative fueled vehicles, E.U.A., U.S. Department of Energy, 1992, volumen II.

NorthEast Sustainable Energy Association (NESEA), S/EV 92 Solar and Electric Vehicles, E.U.A., U.S. Department of Energy, 1992, volumen I.

PEMEX, Anuario estadístico 1994, México, 1994.

PEMEX, Memoria de Labores 1993, México, Marzo de 1994.

RAMIREZ PARRA Jorge, "Criterios de Selección de Baterías Alcalinas para Instalaciones Eléctricas", Revista Mexicana del Petróleo, México, marzo-abril, 1992.

RIEZENMAN Michael, "Electric Vehicles", IEEE Spectrum, E.U.A., 0018-9235, 1992, Noviembre 1992.

SAE, GM Sunraycer Case History, E.U.A., SAE, 1992 (2a Ed.).

SAE, U.S. DoE & USABC, "Battery and Electric Vehicle Update", Automotive Engineering, E.U.A, septiembre 1992, 0098-2571, volumen 100, número 9.

SAE, U.S. DoF, "Fuel Cells: an Overview", Automotive Engineering, E.U.A, abril 1992, volumen 100, número 4.

SHAEFFER Jhon, Alternative Energy Sourcebook, E.U.A., Real Goods, 1992, (7a Ed.).

SOLAREX, "Discover the World Newest Power", E.U.A., 7202-1, enero 1992.

STRONG Steven & SCHELLER William, *The Solar Electric House, energy for the environmentally-responsive home*, E.U.A., Sustainability Press, 1991.

TAPLEY Byron, *Eshbach's Handbook of Engineering Fundamentals*, E.U.A., Wiley Interscience, 1990, (4a Ed.)

UCS, "Alternative Transportation Fuels", E.U.A., julio 1990.

UCS, "Cool Energy the Renewable Solution to Global Warming", E.U.A., Mayo 1991.

UCS, "Energy on the Road, Transportaton and the Environment", E.U.A., diciembre 1990.

UCS, "How you can fight Global Warming", E.U.A., julio 1992.

UCS, "Motro Vehicle Fuel Efficiency and Global Warming", E.U.A., mayo 1991.

UCS, "Nuclear Power, Past and Future", E.U.A., octubre 1990.

UCS, "The Global Warming Debate, Answers to Contorversial Questions", E.U.A., marzo 1990.

Union of Concerned Scientists (UCS), "Solar Power for Today and Tomorrow", E.U.A., mayo 1992.

Unique Mobility Inc., "DR086s/CR10-100 Installation and Operating Instructions", E.U.A. 1992.

WAKEFIELD Ernest, *History of the Electric Automobile*, SAE, U.S.A. 1994.

WILSON G. Howard, McCREADY Paul & KYLE Chester, "Lessons of Sunraycer", *Scientific American*, E.U.A., Marzo 1989.

ANEXO



---

***Sunrayce 95***

***The Race for the Future***

***Sunrayce 95 Regulations***

**April 1995**

**Sunrayce 95 Board of Governors**

Richard King, *Chairperson*  
U. S. Department of Energy

Paul MacCready, *Honorary*  
AeroVironment Inc.

Byron Stafford, *Project Manager*  
National Renewable Energy Lab

Paul Basore  
Sandia National Laboratories

Coleen McKenna  
Electronic Data Systems, Inc.

Hans Tholstrup, *Honorary*  
World Solar Challenge

Art Boyt  
Crowder College

Erik Nelsen  
National Renewable Energy Lab

Jerry Williams  
General Motors

Bill Dye  
Electronic Data Systems, Inc.

J. Ward Phillips  
President, J. Ward Phillips Co.

Jim Williamson  
Midwest Research Institute

Dan Eberle  
Contractor and Consultant

Tom Sheffler  
General Motors

Howard Wilson  
Retired, Hughes Corporation

**Sunrayce 95 Regulations Committee**

Paul Basore  
Sandia National Laboratories  
*Regulations Manager*

Scott McBroom  
Southwest Research Institute  
*Mechanical*

Ray Sutula  
U. S. Department of Energy  
*Electrical*

Art Boyt  
Crowder College  
*Racing*

Erik Nelsen  
National Renewable Energy Lab  
*Entries*

**Sponsors**

**U.S. Department of Energy**

**General Motors**

Electronic Data Systems, Inc.

Delphi Automotive Systems

Chevrolet Motor Division

Delco Electronics

GMC Truck Division

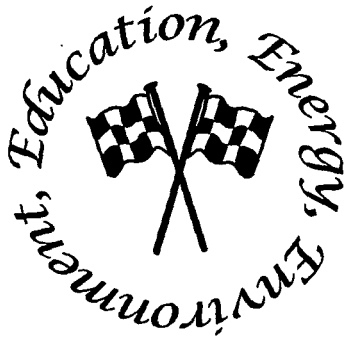
Hughes Network Systems

Midwest Research Institute

National Renewable Energy Laboratory

## Table of Contents

Title	Page
<b>1. Purpose .....</b>	<b>1</b>
<b>2. Administration .....</b>	<b>1</b>
2.1 Application of Regulations	2.6 Sunrayce 95 Headquarters
2.2 Supplemental Documents	2.7 Rayce Headquarters
2.3 Acceptance of Regulations	2.8 Officials
2.4 Right to Revise Regulations	2.9 Jury
2.5 Interpretation of Regulations	2.10 Advertising, Promotion, and Publicity
<b>3. Entries .....</b>	<b>2</b>
3.1 Entry Registration	3.8 Rayce Registration
3.2 Number of Entries	3.9 Scrutineering
3.3 Selection of Entries	3.10 Qualifier
3.4 Teams	3.11 The Rayce
3.5 Faculty Advisor	3.12 Safety
3.6 Technical Documents	3.13 Withdrawals
3.7 Team Data	3.14 Awards
<b>4. Solar Car Regulations - Electrical .....</b>	<b>6</b>
4.1 Power	4.8 Motor Switch
4.2 Solar Array	4.9 Supplemental Batteries
4.3 Solar Cell Technology Limitation	4.10 Cable Sizing
4.4 Storage Batteries	4.11 Electrical Shock Hazards
4.5 Battery Technology Limitation	4.12 Lighting
4.6 Main Fuse	4.13 Horn
4.7 Battery Switch	4.14 Accelerator
<b>5. Solar Car Regulations - Mechanical .....</b>	<b>8</b>
5.1 Solar Car Dimensions	5.8 Ballast Carrier
5.2 Driver Cockpit	5.9 Brakes
5.3 Visibility	5.10 Braking Performance
5.4 Fasteners	5.11 Handling Performance
5.5 Covers and Shields	5.12 Turning Radius
5.6 Steering Stops	5.13 Graphics
5.7 Clearance	
<b>6. Racing Regulations .....</b>	<b>11</b>
6.1 Traffic Laws	6.9 Drafting
6.2 Rayce Time	6.10 Pushing
6.3 Drivers	6.11 Accidents and Reinspection
6.4 Drivers' Meeting	6.12 Timing
6.5 Starting Line	6.13 Overnight Stops
6.6 Rayce Route	6.14 Observers
6.7 Support Vehicles	6.15 Penalties
6.8 Passing on Two-Lane Roads	6.16 Protests



## Sunrayce 95

### Regulations

#### 1. Purpose

*Sunrayce* is dedicated to the educational development of post-secondary engineering and science students across North America. On a broader scale, the objectives are to stimulate interest in technical education and careers among students; promote energy efficiency and the use of renewable sources of energy; and raise confidence in alternatives that make fewer demands on the environment. *Sunrayce* culminates every two years with a cross-country race for single-passenger solar-powered electric vehicles ("solar cars").

#### 2. Administration

**2.1 Application of Regulations** - These *Regulations* will apply to *Sunrayce 95* (the "Event"), which includes the selection of teams, registration of teams, the inspection of solar cars ("Scrutineering"), the qualification of solar cars (the "Qualifier"), the cross-country competition (the "Rayce"), and the awards banquet.

**2.2 Supplemental Documents** - Additional documents may be distributed to all teams entered in the Event to supplement these *Regulations*. These documents will clearly state that they are a supplement to the *Regulations*, and they will have the same force and effect as these *Regulations*. If there is a conflict between a supplemental document and these *Regulations*, the document having the latter date shall take precedence. Supplemental documents specifically referenced in these *Regulations* include the *Request for Proposals*, the *Sunrayce 95 Dateline*, *Instructions for Structural Reports*, *Instructions for the Qualifier*, and the *Route Book*.

**2.3 Acceptance of Regulations** - All persons or groups selected to participate in the Event are assumed to know these *Regulations*. Their participation in the Event will constitute acceptance of them.

**2.4 Right to Revise Regulations** - The Board of Governors, identified on page ii, is the only group authorized to revise these *Regulations*. The Board of Governors reserves the right to revise these *Regulations* at any time.

**2.5 Interpretation of Regulations** - The only group authorized to officially interpret these *Regulations* is the Regulations Committee, identified on page ii. Prior to the Qualifier, all such interpretations must be published in the *Sunrayce 95 Dateline* to become official. During the Qualifier and Rayce, all official interpretations will be announced at a Drivers' Meeting and posted at Rayce Headquarters.

**2.6 Sunrayce 95 Headquarters** - The Event is managed by the National Renewable Energy Laboratory. The mailing address is: Sunrayce 95 Headquarters, National Renewable Energy Laboratory, 1617 Cole Boulevard, Golden, CO 80401-3393. Telephone 303-384-NREL (384-6735). Fax 303-384-6490. Internet sunrayce@nrel.gov.

**2.7 Rayce Headquarters** - During Scrutineering and the Qualifier, a Rayce Headquarters will be established near these activities and will assume most of the management functions for the Event. During the Rayce, the Rayce Headquarters will be located close to each day's start line until one hour before the scheduled start of the race for that day, at which time it will be moved to the finish line for that day.

**2.8 Officials** - A Director will be selected by the Board of Governors. A team of Officials to conduct Registration, Scrutineering, the Qualifier, and the Rayce will be selected by *Sunrayce 95* Headquarters and approved by the Director. Officials having specific duties referenced in these *Regulations* include the Rayce Headquarters staff, Inspectors, Observers, Start-Line Officials, Finish-Line Officials, Pit-Stop Officials, Timing Officials, and Event Security.



**2.9 Jury** - A Jury will be formed by the Board of Governors, made up of not more than five and not less than three members. It will consist of at least one chairman, one vice-chairman, and one recorder. Three members will constitute a quorum and the decision by a majority will govern. The Jury will judge protests on conformity with these *Regulations*, team disputes, and penalties. In addition, the Jury is empowered to decide cases not specifically covered by these *Regulations*. During Scrutineering, the Qualifier, and Rayce, the Jury will meet at a posted location each day.

**2.10 Advertising, Promotion, and Publicity** - All advertising, sales promotion, and publicity material produced by the teams or their sponsors concerning or referring to the Event will refer prominently to the Event as *Sunrayce 95*. All teams, by entering the Event, specifically agree to abide by this regulation. By entering the Event, all teams agree to the use of their names and photographs in any publicity materials that may be issued by the Event's sponsors.

### 3. Entries

**3.1 Entry Registration** - The Event is open to colleges, universities, trade schools and other post-secondary educational institutions in North America ("Institutions"). Each Institution wishing to participate in the Event must submit a proposal describing how they will organize and train a team to design, build, and race their solar car. The proposal must be signed by an official of the Institution (College Dean or equivalent). Proposals from multiple Institutions are permitted, provided the proposal is signed by an official from each of the Institutions represented. No Institution may support more than one team's proposal. The proposals are used to select seeded entries as well as to officially register teams for the Event. Deadline for receipt of proposals at *Sunrayce 95* Headquarters is January 3, 1995.

**3.2 Number of Entries** - There is no limit to the number of Institutions which may submit proposals and thus become registered for the Event. However, in the interest of safety, the number of solar cars entered in the Rayce will be limited to 40.

**3.3 Selection of Entries** - Entries will be selected from the pool of officially registered teams. Some entries will be selected through the proposal process. These "seeded" teams need only comply with the requirements of these *Regulations* to ensure their entry in the Rayce. All other officially registered teams are "Challengers" who must compete for entry into the Rayce based on the performance of their solar cars.

**3.3.1 Seeded Teams** - All proposals received by February 22, 1994 will be evaluated and ranked based on criteria stated in the *Sunrayce 95 Request for Proposals* issued in January 1994. Based on the quantity and quality of the proposals received, up to 30 teams with the highest scores will be selected and notified of their seeded status. The top three finishers in *Sunrayce 95* will be awarded seeded status in *Sunrayce 97* provided they register for *Sunrayce 97* prior to the deadline for receipt of proposals for that event.

**3.3.2 Challengers** - Additional entries will be selected based on the performance of their solar cars at the Qualifier. Based on the number and performance of the solar cars entered, additional entries will be selected to increase the field to a maximum of 40.

**3.4 Teams** - Team members shall be credit-earning undergraduate or graduate students having good academic standing at the sponsoring Institution(s). Each team must have at least four members.

**3.5 Faculty Advisor** - Each team must have at least one faculty advisor who will provide guidance as needed throughout the solar car design, build and test process. However, the faculty advisor may not perform the role of team leader, as this is a student competition.

**3.6 Technical Documents** - Technical documents describing the solar car's structure, batteries, and solar cells must be submitted to *Sunrayce 95* Headquarters by January 16, 1995. Early submissions will receive prompt review by *Sunrayce 95* Headquarters. Should changes be necessary, amended submissions will be accepted through May 1, 1995. The technical information provided in these documents will not be made public. The information contained in each team's final submission must match the solar car presented at Scrutineering.

**3.6.1 Structural Report** - Safety is the sponsors' primary concern with regard to the structural development and fabrication of the solar cars. All teams are required to document, by calculation or testing, the structural protection provided for the driver with regard to front, rear, rollover, and side impact. A specific case that must be addressed is a frontal collision with another vehicle's bumper. This report must be approved by *Sunrayce 95* Headquarters. Detailed *Instructions for Structural Reports* will be distributed to all registered teams.

**3.6.2 Battery Approval** - All storage batteries used in the solar car must be approved by *Sunrayce 95* Headquarters. Each team must provide a copy of the manufacturer's battery specification sheet, the MSDS (Material Safety Data Sheet) obtained from the battery manufacturer, and the following battery information:

- Manufacturer's name
- Stock number, type, or description
- Module voltage (e.g., 6, 12, or 24 V)
- Number of modules to be used in the solar car
- Manufacturer's specifications, including capacity (kWh), weight (kg), and cost (US\$).

**3.6.3 Solar Cell Approval** - All solar cells must be approved by *Sunrayce 95* Headquarters. Each team must provide the following solar cell information:

- Manufacturer's name
- Stock number, type, or description
- Manufacturer's quote for cell area (cm<sup>2</sup>), performance, and cost (US\$)
- Cell area (cm<sup>2</sup>) after trimming or cutting for placement on the solar car

**3.7 Team Data** - Each team must submit team photos and data sheets to *Sunrayce 95* Headquarters no later than May 1, 1995. The photo and data will be publicly released and used in event brochures. Late submissions will be omitted. Early submissions will not be made public before May 1, 1995.

**3.7.1 Team Photo** - The team photo shall be submitted as a color print measuring approximately 20 by 25 cm. The photo must clearly show the solar car and at least four team members. Team members in the photo must be identified by name, and by their Institution when there is more than one Institutional sponsor.

**3.7.2 Data Sheet** - The data sheet must include solar car weight (with battery but no driver), solar car dimensions, motor type and rating, solar cell type and manufacturer, estimated peak solar array power in both racing and charging configuration (overhead sun, clear sky), battery weight and estimated capacity, chassis description, braking system, and wheel type and size. All specifications must be provided in both metric (SI) and English units. The team leader, crew members, designated drivers, and faculty advisor(s) must also be listed.

**3.7.3 Team Data Changes** - Teams may change specifications of the solar car and crew up to the scheduled time of Scrutineering, with the exception that solar cell and battery specifications may not change after May 1, 1995 without specific approval from *Sunrayce 95* Headquarters. Any changes after May 1, 1995 may not be timely enough to appear in printed lists and/or brochures.

**3.8 Rayce Registration** - Any person taking part in the Rayce must be registered at Rayce Headquarters. This includes team members, sponsors, officials, guests, and the media. Badges will be issued and used to obtain access to restricted areas. These badges must be visible at all times.

**3.8.1 Registration Time and Location** - For *Sunrayce 95*, Rayce Headquarters will open for Registration on Monday, June 12, 1995, in or near Indianapolis, Indiana.

**3.8.2 Crew Requirements** - All team members involved in the Rayce ("crew") must present themselves at Registration to complete all required forms. A letter from the Institution's Registrar must be presented that verifies that all members of the crew were credit-earning students with good academic standing throughout the 1994-1995 academic year, or graduated from the Institution no earlier than December 1994.

**3.8.3 Driver Requirements** - Up to four members of each team may be designated as solar car drivers. Only registered solar car drivers will be allowed to drive solar cars in the Rayce. In addition to meeting the crew requirements, solar car drivers must present a valid driver's license and must supply their own ballast bag and ballast (sand or metal shot only). The official weight of each driver, including driving clothes, helmet, and shoes, will be 80 kg. If the driver weighs less than 80 kg, ballast will be added to make up the difference. If the driver weighs more than 80 kg, no credit will be given.

**3.9 Scrutineering** - Each team registered for the Rayce must submit their solar car for inspection prior to the Qualifier to verify compliance with these *Regulations*. In addition, spot checks for regulation compliance may take place during and immediately after the Qualifier and Rayce, and the top five overall finishing cars will be impounded following the Rayce for a final inspection.

**3.9.1 Scrutineering Time and Location** - Scrutineering for *Sunrayce 95* will be conducted from 9:00 a.m. until noon and 12:30 p.m. until 5:00 p.m. on June 14-16, 1995 in or near Indianapolis, Indiana. Order of inspection, at 15-minute intervals, will be determined by a drawing at an all-team meeting on the evening preceding the first day of Scrutineering. Teams that fail to present their solar car at their designated time will drop to the back of the queue, and will risk not having enough time to complete the Scrutineering process.

**3.9.2 Scrutineering Format** - Scrutineering will involve inspection stations for sizing, body, electrical, and mechanical; plus outdoor dynamic tests to verify handling and braking performance. A detailed description of the Scrutineering tests will be distributed in advance to all registered teams.

**3.10 Qualifier** - Each team must successfully participate in the Qualifier before they will be allowed to compete in the Rayce. The Qualifier will be held before the Rayce on a closed track. The qualifying track will be open for a six-hour period on three consecutive days, from 9:00 a.m. to noon and from 12:30 p.m. to 3:30 p.m. The first day will be for qualification of Seeded teams only and the second day will be for Challengers only. Seeded teams that fail to qualify on the first day and Challengers that fail to qualify on the second day will compete against each other on the third day, as Competitors, for any race positions not yet filled.

**3.10.1 Qualifier Time and Location** - The Qualifier for *Sunrayce 95* will be held in or near Indianapolis, Indiana on June 16-18, 1995.

**3.10.2 Qualifier Regulations** - Solar cars must qualify in the same configuration submitted to Scrutineering. Penalties may be assessed for failure to comply with the requirements of these *Regulations* during the Qualifier. Prior to entering the qualifying track for the first time on a given day, solar-car batteries may be charged from any source. Upon entering the track, however, solar power as permitted in these *Regulations* is the only additional source of energy allowed until the end of that day's Qualifier. Teams that charge their batteries from any other source will forfeit any prior laps completed. Additional *Instructions for the Qualifier* will be distributed in advance to all registered teams.

**3.10.3 Minimum Qualifying Requirements** - Only those solar cars that pass all Scrutineering tests will be permitted onto the qualifying track. As a minimum requirement for obtaining a position in the Rayce ("qualifying"), a team's solar car must complete laps totaling at least 80 km (50 miles) during any 2 hours of time on the track, with no structural failures or instability that would indicate a serious design deficiency.

**3.10.4 Seeded Teams** - Seeded teams need only meet the minimum qualifying requirements on the first day of the Qualifier to secure a position in the Rayce. Seeded teams that fail to qualify on the first day lose their seeded status but may compete for a position on the third day of the Qualifier. Seeded teams may fill at most 30 of the 40 race positions on the first day of the Qualifier. If a Seeded team officially withdraws from the Event, its race position will be opened for any Challengers to fill on the second day of the Qualifier.

**3.10.5 Challengers** - In addition to meeting the minimum qualifying requirements, Challengers must compete against one another on the second day of the Qualifier to obtain a position in the Rayce. Challengers will be awarded race positions based on the total number of laps completed during the six hours of track operation. Challengers that fail to qualify on the second day can try again on the third day of the Qualifier as Competitors, if any race positions remain unfilled. Challengers may fill at most 10 of the 40 race positions, plus any positions opened because a Seeded team officially withdrew.

**3.10.6 Competitors** - Teams that pass all Scrutineering tests but fail to obtain a position in the Rayce during the first two days of the Qualifier must compete against one another as Competitors on the third day to fill any remaining race positions available. Race positions will be available if any Seeded teams fail to qualify on the first day or if the Challengers fail to fill the positions available to them on the second day. Competitors meeting the minimum qualifying requirements will be awarded race positions based on the total number of laps completed during the six hours of track operation.

**3.10.7 Grid Position Determination** - The Qualifier will also determine grid positions for the start of the Rayce. Positions will be assigned to teams based on the number of laps completed by their solar cars during the first two days of the Qualifier, without regard to whether the team was Seeded or a Challenger. The team from this group credited with the most laps will win the pole position and lead the start of the Rayce. Competitors will be assigned positions behind the teams that qualified during the first two days, with their order based on the number of laps completed on the third day of the Qualifier.

**3.11 The Rayce** - A maximum of 40 qualified teams will be permitted to participate in the Rayce, a staged cross-country road race for solar cars. Solar cars must race in the same configuration used at the Qualifier. The Rayce will span ten days: nine days of racing plus a day of rest (and recharge, solar only) after the fourth day. Each day of racing will cover a course with specific start and finish lines. The team with the shortest cumulative Official Elapsed Time over the entire course will be declared the winner. Key dates and locations for *Sunrayce 95* are:

Tuesday, June 20, 1995	Start	Indianapolis, Indiana
Saturday, June 24, 1995	Rest Day	Kansas City, Missouri
Thursday, June 29, 1995	Finish	Golden, Colorado

**3.12 Safety** - Each team is responsible for the road-worthiness of its solar car. Passing Scrutineering does not relieve the team of any liability. All solar cars and support vehicles must be maintained in a safe, road-worthy condition and be operated safely at all times. A team may be disqualified and withdrawn from the Event at any time if it is judged to be operating their solar car in an unsafe manner.

**3.13 Withdrawals** - Any team wishing to withdraw must notify *Sunrayce 95* Headquarters in writing. If the withdrawal occurs during the Qualifier or Rayce, that team must first notify Rayce Headquarters. All written withdrawals signed by an official of the Institution are final.

**3.14 Awards** - The sponsors will recognize all teams that participate in the Event.

**3.14.1 Daily Awards** - On each evening during the Rayce, a ceremony will be held to give awards to the three teams with the shortest Daily Elapsed Times.

**3.14.2 Sunrayce 95 Trophies** - The team with the shortest cumulative Official Elapsed Time over the entire Rayce will receive the *Sunrayce 95* trophy and a cash award. The teams with the second and third shortest cumulative Official Elapsed Time over the entire Rayce will receive second and third place *Sunrayce 95* trophies and cash awards.

**3.14.3 Achievement Awards** - The sponsors will give several monetary awards to recognize creativity and effort. First, second, and third place awards will be given for Technical Innovation, Teamwork, Sportsmanship, Best Video, Artistic Design, and Safety.

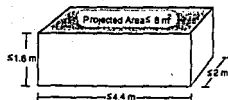
**3.14.4 Awards Banquet** - A victory awards ceremony will take place on Friday, June 30, 1995, in or near Colorado Springs, Colorado. Each team will be given a limited number of free tickets. Additional tickets may be purchased in advance, space permitting.

#### 4. Solar Car Regulations - Electrical

**4.1 Power** - Global solar radiation received by the solar car without artificial external augmentation is the only source of energy that can be used for propulsion, except for energy stored in the solar car's battery system at the beginning of the first day of racing. [Dateline February 1995]

**4.2 Solar Array** - At any given moment, the solar array comprises all components that are involved in the conversion of solar energy into electricity. In addition to direct energy conversion components (such as photovoltaic cells), the solar array includes any reflective surfaces, refractive lenses, or thermal cooling systems employed to increase electrical output. Components that carry or process the energy after it is in electric form are not considered part of the solar array, nor are structural members whose sole function is to support the solar array. The entire solar array must fit within an imaginary right rectangular parallelepiped ("box") of limited size whenever the solar array is electrically connected to the solar car's motor or battery. The length of the box may not exceed 4.4 meters, the width may not exceed 2 meters, and the height may not exceed 1.6 meters. Furthermore, the product of the length and width may not exceed  $8 \text{ m}^2$ . [Dateline August 1994, February 1995]

**4.2.1 Racing Configuration** - Whenever the solar car is moving under its own power, the solar array must be in its racing configuration. In racing configuration, the box must be defined such that the length and width lie parallel to the ground. Furthermore, all portions of the solar array must remain fixed with respect to the solar car chassis, in the same orientation and configuration used when the solar car was inspected during Scrutineering.



**4.2.2 Charging Configuration** - Whenever the solar car is stationary, the solar array may be reconfigured within the box to maximize solar exposure for charging, provided that every illuminated surface in the reconfigured solar array was mounted fully visible on the outside of the solar car when the array was in racing configuration. In charging configuration, the box can have any orientation relative to the ground. [Dateline February 1995]



**4.2.3 Electrical Connection** - All electrical connections between the solar array and the solar car must be carried by the solar car.

**4.2.4 Water Spray** - Ambient-temperature water from an external source may be applied to the solar array using hand-pumped sprayers if the water is applied while the solar car is stationary and the application does not present a shock hazard. This is a unique exception to the general requirement that cooling systems must be considered part of the solar array.

**4.3 Solar Cell Technology Limitation** - If photovoltaic technology is used, only solar cells manufactured in North America and that are available to all registered teams at a price not exceeding US\$10/watt will be allowed. The price limit corresponds to bare cells; teams may pay extra for cutting, tabbing, or lamination of the cells. A cell will be considered manufactured in North America if the crystal growth, junction formation, and metallization are performed within the physical boundaries of North America. Substantial modification of the crystal structure, junction, or metallization constitutes manufacture of a new cell. [Dateline August 1994, October 1994]

**4.4 Storage Batteries** - All solar cars are allowed to store solar-generated energy in a battery system composed of individual modules having a combined weight not to exceed 140 kg, based on the manufacturer's published specification. No other energy storage system will be approved. Here, the word "module" denotes an individual, self-contained unit (usually thought of as a battery); the term "battery system" denotes the full solar car battery. There is no separate limit applied to system voltage or number of modules. The solar car must travel along the entire Rayce with the same make and number of battery modules that were used at the Qualifier and at the Rayce start. Battery modules may be replaced after the start of the Rayce, however a penalty will be incurred. Replacement battery modules may have been charged by any means prior to installation in the solar car.

**4.4.1 Battery Enclosures** - All battery modules must be fully contained in enclosures that are electrically isolated from the solar car. The enclosures must be constructed from non-conductive, acid-resistant material. The minimum resistivity of the battery enclosure material shall be 100 M $\Omega$ cm. The battery enclosure covers must provide an air-tight seal and be constructed from the same material used in the fabrication of the rest of the enclosure. The cover must be firmly secured using standard fasteners. The resistance measured between the battery terminals and any portion of the solar car chassis shall be greater than 1 M $\Omega$  for applied potentials up to 500 V. The battery enclosures must be secured to the solar car chassis so as to prevent them or the modules within from coming loose in the event of an accident or rollover. Velcro fasteners/straps will not be approved. All sides of each battery enclosure, including top, must be marked using 10-mm-high letters with "Caution: Corrosive Acid" and "High Voltage." [Dateline December 1994]

**4.4.2 Battery Stacking** - Stacking the batteries is discouraged. If it is necessary to stack the batteries, a battery rack must be used. The rack must be made of non-conductive, acid-resistant material that is strong enough to support the weight of the entire battery system. The minimum electrical resistivity of the material shall be 100 M $\Omega$ cm.

**4.4.3 Battery Ventilation** - Battery enclosures must be equipped with a forced ventilation system rated to flow at least 280 liters per minute. It must operate whenever the battery system is electrically connected to the solar car or to the solar array. Such ventilation systems must exhaust to the exterior of the solar car.

**4.5 Battery Technology Limitation** - The solar car's storage battery may be composed only of rechargeable, commercial-production, lead-acid modules for which a specification sheet is publicly available. The battery modules may not be modified in any manner, including the addition of electrolyte additives; case modification; or plate addition, removal, or modification. [Dateline August 1994, April 1995]

**4.6 Main Fuse** - A separate fuse (not a circuit breaker) must be placed in series with the battery system and the rating must not exceed 200% of the maximum expected current draw. All low-voltage taps from the battery system must be separately fused. All fuses must be placed first in series with the battery starting at the positive connection.

**4.7 Battery Switch** - The battery system must be equipped with a manually operated, high-current switch to quickly disconnect the battery from the electrical system. This switch must be capable of interrupting the full load current. The switch must be located within easy reach of the driver. The switch must be plainly marked in letters at least 10-mm high as the "Battery Switch" with "ON" and "OFF" designations. These markings must be clearly visible to the driver inside the solar car and to rescue personnel outside the solar car (canopy removed); use two sets of markings if necessary. [Dateline October 1994]

**4.8 Motor Switch** - All solar cars must have a motor switch wired to disconnect all power to the motor from either the battery or the solar array. The switch must be able to interrupt full load current, and it must be separate from the battery switch. It must be within easy reach from the driver's position and clearly marked in letters at least 10-mm high as the "Motor Switch" with "ON" and "OFF" designations. These markings must be clearly visible to the driver inside the solar car and to rescue personnel outside the solar car (canopy removed); use two sets of markings if necessary. [Dateline October 1994]

**4.9 Supplemental Batteries** - Supplemental, replaceable batteries carried in the solar car may be used to power only the following accessories: radios, electronic panel meters, and data telemetry.

**4.10 Cable Sizing** - All electrical cables must be properly sized to expected system currents.

**4.11 Electrical Shock Hazards** - All exposed or easily exposed conductors, junction boxes, solar cells, etc., operating at greater than 36 volts must be protected from inadvertent human contact and must be marked "High Voltage" in letters at least 10-mm high.

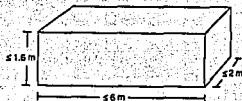
**4.12 Lighting** - Solar cars must have brake lights and both front and rear turn indicators, visible from 30 meters away in full sunlight. The geometric visibility of each light shall be 45 degrees from center, and 15 degrees up and down. The brake lights must be red colored. The turn signals must be either red or amber colored.

**4.13 Horn** - All solar cars must be equipped with a horn that can be heard at a sound power level between 82 and 102 decibels at a distance of 15 meters in front of the solar car. The horn must be permanently mounted, electrically powered, and must be acoustically coupled to the air outside the solar car.

**4.14 Accelerator** - Accelerator mechanisms on solar cars must be free moving, and when released, must return to the zero current position. If the solar car is equipped with cruise control, it must be designed with an automatic shut-off when the brake is activated.

## 5. Solar Car Regulations - Mechanical

**5.1 Solar Car Dimensions** - The solar car (including solar array) will have the following maximum dimensions when moving under its own power: height=1.6 meters, width=2 meters, length=6 meters. When turning corners, wheels and wheel fairings may exceed these dimensions.

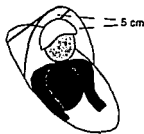


**5.2 Driver Cockpit** - The driver's cockpit may not subject the driver to excessive strain during normal operation, and must be designed to protect the driver from injury in the event of an accident.

**5.2.1 Seating Position** - The normal driving position must place the driver's entire head higher than the highest point of his or her legs. No head-first positioning is allowed for the driver.

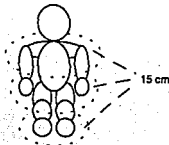
**5.2.2 Belly Pan** - The cockpit must be equipped with a full belly pan to isolate the driver from the road. The belly pan must be strong enough to support the full weight of an 80-kg driver.

**5.2.3 Roll Cage** - All solar cars must be equipped with a roll cage that encompasses the driver's torso and head. The roll cage shall be a permanent, integral part of the solar-car structure. The protection provided for the driver in a collision must be documented in the team's Structural Report. There must be 5 cm of clearance between the roll cage and the helmet of the driver seated in the normal driving position. The roll cage must be of steel tubing having a minimum carbon content of 0.18 percent. The roll cage tubing must have a minimum outside diameter of 2.5 cm and minimum wall thickness of 2 mm. Alternate materials which afford equivalent protection for the driver are permitted, provided they are fully documented in the team's Structural Report.



**5.2.4 Padding** - The roll cage must be padded with energy-absorbing material wherever it may come into contact with the driver's helmet. This energy-absorbing material may be included within the required 5 cm of clearance. In addition, a headrest of at least 2-cm-thick resilient material must be mounted behind the driver's head.

**5.2.5 Crush Space** - The driver, when seated, must have a minimum of 15 cm of horizontal distance between his or her shoulders, hips, and feet and the car's outer body surface. [Dateline August 1994]



**5.2.6 Safety Belts** - All solar cars must be equipped with a minimum of a five-point lap and shoulder belt (harness system). The use of safety belts is mandatory. The safety belts must be attached securely, as recommended by the manufacturer, to a strong component connected to a main frame member, or to a main frame member itself in the solar car. If a hammock-type seat is used, the safety belts must remain functional in the event of a structural failure in the driver's seat. Only commercially manufactured safety belts are allowed. They must bear the manufacturer's emblem, and they must not be modified in any way from the condition in which they were received from the manufacturer.

**5.2.7 Fresh Air Circulation** - Fresh intake air from vents or wheel openings must be provided for the solar car's driver.

**5.2.8 Egress** - The driver's cockpit must provide for the driver's unassisted exit within 7 seconds. Driver's doors and/or canopies may not be taped shut at any time.

**5.3 Visibility** - In the normal driving position with ballast on board, the driver's eyes must be at least 75 cm above the ground.

**5.3.1 Windshield** - All solar cars must have a windshield, and it must be made of shatter-resistant material. All solar cars must have a method to clear at least 0.1 m<sup>2</sup> of the windshield of rain. The method must be in use when it becomes necessary to use the windshield wipers on the team's support vehicles. If a mechanical wiper is used, it need not be physically carried by the solar car in fair weather.

**5.3.2 Forward Vision** - From the normal driving position, the driver must be able to see at all times without artificial assistance: 1) a point on the ground 8 meters in front of the solar car, 2) a minimum of 17 degrees above the horizon on level ground, and 3) 100 degrees to either side of center. This view must be essentially unobstructed by the solar car structure so the driver can easily see the road and all oncoming traffic.



**5.3.3 Rear Vision** - All solar cars must be equipped with a rear view mirror that will allow the driver to at all times see a vehicle 15 meters directly behind the solar car and up to 30 degrees off center. Fiber optics and/or electronic rear vision systems are not allowed.

**5.4 Fasteners** - All fasteners must be of suitable type, strength, and durability for their application, with the following minimum requirements:

**5.4.1 Bolts** - Bolts used in the steering, braking, suspension, seat mounts, safety harness, drive train, and battery box systems must at minimum meet SAE grade 5, metric grade M 8.8 and/or AN/MS specifications. Bolts must be of the correct length, and extend at least two threads beyond the nut. Bolts in tension must not have shaved or cut heads.

**5.4.2 Securing of Bolts** - The bolts described above must be secured from unintentional loosening by safety wire or cotter pins. In difficult areas only, Inspectors may allow nylon lock nuts, Loctite, or other means deemed appropriate. Excessive use of Loctite is not permitted. Lockwashers should not be used in critical areas. If lockwashers are supplied by the manufacturer (such as brake/suspension assemblies), Loctite, or something similar, should also be used.

**5.4.3 Rod Ends** - Rod ends on the steering or suspension must be a high-strength alloy with a minimum spherical-bearing hole diameter of 9 mm.

**5.4.4 Hose Clamps** - Hose clamps must not be used to secure any structural or critical members of the car. Their use to secure ducting or wire cables is allowable.

**5.5 Covers and Shields** - All moving parts must be suitably covered to prevent accidental human contact when the solar car is fully assembled. All steering linkage must be shielded from contact by the driver.

**5.6 Steering Stops** - The steering system must include steering stops to prevent dangerous or damaging steering travel during evasive maneuvers or when a wheel strikes a roadway obstruction.

**5.7 Clearance** - Interference or rubbing of the wheels with the solar car's body, wheelwell, or structure at full steering lock or suspension travel is not permitted. Movement of rod-end bearings may not be obstructed in any axis throughout the full travel of suspension and steering. Other moving parts, such as the motor shaft, must not contact stationary parts except through properly designed bearings.

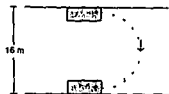
**5.8 Ballast Carrier** - If any solar-car drivers on a team require ballast to increase their weight to 80 kg, that team's solar car must have provisions for carrying and securing the bag(s) containing ballast. The ballast must be contained in such a way that it cannot come loose in the event of an accident or rollover. The ballast bag and its identification markings must be visually accessible during driver changes.

**5.9 Brakes** - Solar cars must have a balanced, dual braking system so that if one system should fail, the solar car can still be stopped. The two systems must be operationally independent and may be either front/rear or redundant front or redundant rear (one sided systems left or right are not permitted). Hydraulic systems must have separate master cylinders. Regenerative brakes may not be considered as one of the braking systems. [Dateline February 1995]

**5.10 Braking Performance** - Solar cars must be able to stop from speeds of 50 kph or greater with an average deceleration on level pavement exceeding 17 kph per second. The time interval over which the deceleration is averaged shall be from the first indication that the driver should stop until the solar car comes to a complete halt. When braking, the solar car must not veer excessively to the left or right, or exhibit structural instability.

**5.11 Handling Performance** - Solar cars must be able to negotiate a slalom course of cones spaced 15 meters apart at a velocity (measured in the direction of the line of cones) of 20 kph or greater, without knocking over any of the cones or exhibiting signs of structural instability.

**5.12 Turning Radius** - Solar cars must be able to make a U-turn in either direction, without backing up, such that all wheels remain within a 16-meter-wide lane.



**5.13 Graphics** - Solar cars must prominently display their assigned number, Institution name, and the Event logo such that they are clearly visible from a roadside vantage point. Additional graphics related to the team's Institution(s) or sponsors are permitted, provided they are neither offensive nor disruptive.

**5.13.1 Solar Car Numbers** - Each team registered for the Event will have a unique number approved by Sunrayce 95 Headquarters (positive integer, 3 digits maximum). This number must be clearly displayed on both sides of the solar car. Each number must have a minimum of 5 cm of unobstructed background color on all sides. These colors can be black on white, white on black, or another high-contrast color approved by Sunrayce 95 Headquarters. The numerals themselves must be a minimum of 25 cm high, 12 cm wide (except the numeral one), and have a minimum brush stroke of 4 cm. Numbers containing more than one digit must have a minimum of 2.5 cm spacing between them.

**5.13.2 Institution Name** - The name of the Institution(s) sponsoring the team must be clearly displayed on the solar car. The use of abbreviations or initials must be approved by Sunrayce 95 Headquarters.

**5.13.3 Event Logo** - The Event logo must be applied on both sides of the solar car. The logo will be provided by Sunrayce 95 Headquarters and will measure no more than 22 cm in height by 32 cm in width. The logo must be mounted with 5 cm of unobstructed background color on all sides.

## 6. Racing Regulations

**6.1 Traffic Laws** - During the course of the Rayce, all state and local traffic laws must be obeyed, with the exception of those that are uniquely inapplicable to solar-car caravans. [Dateline February 1995]

**6.2 Rayce Time** - Official clock time for each day of the Rayce will be based on the local time at that day's start line, as displayed by the Timing Officials. The same official time ("Rayce Time") will remain in effect for the entire day (until midnight), even though that day's route may cross into a different time zone.

**6.3 Drivers** - Only a single person, the authorized driver, may ride in the solar car. The driver must have complete control over the operation of the solar car, including the ability to manually override all automatic features.

**6.3.1 Driver Helmets** - Drivers must wear a helmet in the solar car. The helmet must have a minimum ANSI Z90.4 or Snell B90 (bicycle-type) rating.

**6.3.2 Driver Shoes** - Drivers must wear closed-toed tennis shoes in the solar car. Sandals are not permitted.

**6.3.3 Driver Ballast** - Drivers and ballast will be identified with unique identification tags. The ballast carried by the solar car must match the driver in the solar car at all times.

**6.4 Drivers' Meeting** - A Drivers' Meeting will be held at 8:15 a.m. each race day. Due to limited space, attendance is limited to two members per team. All official statements, including starting order, rule interpretations, and race-route revisions, are made at this time.

**6.5 Starting Line** - The solar cars will be released from the official starting line at 60-second intervals beginning at 10:00 a.m. All solar cars must report to their starting position by 9:45 a.m. Each team's lead and chase vehicles must merge with their solar car after it leaves the starting line. The movement of all vehicles in the start-line area is under the control of the Start-Line Officials.

**6.5.1 Starting Order** - The starting order for the first day of the Rayce will be determined at the Qualifier. On all other days, the order is based on the solar cars' Official Elapsed Time of the previous day, from shortest to longest. In case of a tie, the first of the two teams to cross the previous day's finish line will precede the other in the starting line-up.

**6.5.2 Teams Not Ready** - If a team's solar car, lead, and chase vehicles are not in their assigned starting positions at 9:45 a.m., the Start-Line Officials may, at their discretion, move all of the following cars up one slot, and the tardy team must move to the end of the starting queue.

**6.5.3 Delayed Start** - The Start Line Officials may delay the start of the race if inclement weather or other hazardous conditions appear likely to pose a threat to the solar cars or their drivers. The starting time on the last day of racing may be adjusted by Rayce Headquarters to accommodate finish-line logistics.

**6.6 Rayce Route** - A *Sunrayce 95 Route Book* will be distributed to each team that qualifies for the Rayce. The *Route Book* will contain information to direct the team along the official route. It will specify days, dates, distances, directions, route numbers, maps, and points of reference. For a team to receive official time, they must follow the official Rayce Route.

**6.6.1 Route Revisions** - *Sunrayce 95* Headquarters will make every effort to be as accurate as possible in the *Route Book*, but due to unforeseen events it may be necessary to detour. When advance warning is available, Rayce Headquarters will correct the official route accordingly and provide revisions to the *Route Book* to all teams registered for the Rayce, or provide written revisions at the morning Drivers' Meeting.

**6.6.2 Teams Departing from the Rayce Route** - Any team leaving the Rayce Route must rejoin the route at the same intersection where they left the route, or they will receive no credit for distance driven beyond the point where they departed from the route.

**6.6.3 Checkpoints** - Checkpoints will be established each day at the discretion of Rayce Headquarters to ensure the solar cars are following the Rayce Route. It is not necessary to stop at the checkpoints. Failure to pass a checkpoint station will result in no credit for distance driven beyond that point.

**6.6.4 Pit Stops** - A Pit Stop is a mandatory stop during the race day. Each day, one Pit Stop may be designated and detailed in the *Route Book*. These Pit Stops are for 15 minutes and are mandatory for all solar cars reaching the Pit Stop before 3:00 p.m. Failure to stop for the required time will result in no credit for distance driven beyond that point. After 3:00 p.m., teams are not required to stop. Within the Pit Stop area, the movement of all team vehicles shall be under the control of Pit Stop Officials. Solar charging of solar car batteries and solar car maintenance are allowed during the 15-minute Pit Stop. However, teams must not interfere with or block any other team's passage through the Pit Stop. Teams unable to leave the Pit Stop area after 15 minutes must move their solar car and support vehicles to an open area designated by the Pit Stop Officials.

**6.7 Support Vehicles** - All vehicles and trailers associated with a team (including friends and family), other than the solar car itself, are support vehicles. These vehicles must be registered with Rayce Headquarters. If support vehicles authorized by Sunrayce Headquarters are supplied to all teams entered in the Rayce, then each team shall use the vehicle supplied as either their lead or chase vehicle, in accordance with the terms of the agreement under which the vehicle is provided.

**6.7.1 Support Vehicle Graphics** - All support vehicles, including trailers, must be marked with the team's solar car number (at least 15-cm tall) on both sides and the rear. The name of the team's sponsoring Institution(s) must also be displayed prominently on each vehicle. Additional graphics are permitted provided they are neither offensive nor disruptive.

**6.7.2 Lead Vehicle** - Each team must provide a support vehicle meeting US Federal Motor Vehicle Safety Standards to alert oncoming traffic to the presence of the solar car. This "lead" vehicle must travel within 500 meters ahead of the solar car, with its headlights on and with roof-mounted flashing amber lights. The lead vehicle may not tow a trailer. The lead vehicle must display the team's solar car number on its front windshield (at least 15-cm tall), in addition to both sides and the rear.

**6.7.3 Chase Vehicle** - Each team must provide a support vehicle meeting US Federal Motor Vehicle Safety Standards to protect the solar car from the rear. This "chase" vehicle must follow directly behind the solar car, with roof-mounted, flashing amber lights. If necessary, the chase vehicle may tow a trailer, but this is discouraged. A sign provided by *Sunrayce 95 Headquarters* must appear on the rear of the chase vehicle or its trailer to warn overtaking traffic of the solar car.

**6.7.4 Scout Vehicle** - A "scout" vehicle is also allowed on the Rayce Route, but is not required. In addition to the graphical markings required on all support vehicles, the scout vehicle must be marked on both sides and the rear with the word "SCOUT" in letters at least 15-cm tall. The scout vehicle may tow a trailer. The scout vehicle must not impede the progress of any other team's solar car in any way.

**6.7.5 Radios** - The chase vehicle must be equipped for two-way radio communications with the solar car. All two-way radio channels must be registered with *Sunrayce 95 Headquarters*. All teams must also have a continuously monitored CB radio in the chase vehicle tuned to a designated channel to communicate with other nearby teams and Officials.

**6.7.6 Other Support Vehicles** - All other support vehicles (except the lead, chase, and scout) must not travel on the Rayce Route. The only exception is to assist the team with a repair, accident, or to trailer the solar car. A suggested alternate route will be identified in the *Route Book*.

**6.8 Passing on Two-Lane Roads** - Because the Rayce Route will include two-lane roads, there will be times when solar cars and their lead and chase vehicles will need to pull over while being overtaken. Teams need not disrupt their own progress to permit other vehicles to pass when they themselves are trapped behind other traffic.

**6.8.1 Passing Traffic** - When six or more vehicles are lined up behind a team's chase vehicle, the team must pull over as soon as safely possible to allow the traffic to pass.

**6.8.2 Passing Teams** - In the event that one team is overtaken by another, the overtaking team can signal their intention to pass by flashing the headlights of their lead vehicle between high and low beam. The overtaking team must also attempt to make CB radio contact with the team being passed to coordinate the pass. Once the overtaking team has signaled their intention to pass, the team being passed must facilitate the pass at the first available safe opportunity, either by slowing down by at least 5 mph (8 kph) in a zone where passing is permitted and feasible, or by pulling completely out of the traffic lane.

**6.9 Drafting** - Drafting by a solar car is prohibited. A solar car will be considered to be drafting if it continuously follows behind another vehicle at less than a three-second interval. The only exception to this is in congested traffic at speeds of 25 mph (40 kph) or less.

**6.10 Pushing** - Except for the following situations, solar cars may not be pushed or pulled from the time they are moved into their starting position for the daily start until they reach the finish line later that day. In no case shall regenerative braking be engaged while pushing or pulling the solar car.

**6.10.1 Pit Stop** - Solar cars may be pushed within the confined area of the Pit Stop.

**6.10.2 Emergency** - In an emergency or breakdown situation, the solar car may be pushed off the roadway. The solar car may then be pushed back onto the roadway at the same location where it left the roadway.

**6.10.3 Weather** - The solar car may be pushed onto and off of a trailer to protect it from the weather, provided the solar car is moved back to its original location after it is unloaded from the trailer.

**6.10.4 Trailering** - Should it become necessary to load the solar car onto a trailer for transport to the finish line, it may be pushed onto the trailer.

**6.11 Accidents and Reinspection** - All accidents involving either solar cars or support vehicles must be reported immediately to Rayce Headquarters. In the case of an accident involving personal injury, notification of the appropriate emergency medical services and public safety officials shall take priority. If a solar car is involved in an accident resulting in structural damage, it must be checked by an Inspector to understand the cause of the accident and to verify structural integrity before racing is resumed. The Inspector may require repairs prior to resuming the race.

**6.12 Timing** - Timing and distance determinations for the Event will be the responsibility of *Sunrayce 95* Timing Officials. No other timing or distance information will be recognized by Rayce Headquarters.

**6.12.1 Official Start Time** - Each team will be assigned a start time each day, which will be distributed to the teams at the morning Driver's Meeting. If the start of the race is delayed, then all assigned start times for that day will be adjusted accordingly. If the team leaves the starting line at their assigned time, then that becomes their Official Start Time for that day. If the team leaves before their assigned time because they were moved forward in the queue by the Start Line Officials, then the team's Official Start Time is their actual start time. If the team leaves after their assigned time because they weren't ready, then the team's Official Start Time is still their assigned time.

**6.12.2 Racing Hours** - All teams have 8½ hours to reach the daily finish line. Teams that have not reached the finish line must stop promptly 8½ hours after their Official Start Time. Assuming 40 cars start at one-minute intervals beginning at 10:00 a.m., the first car will have until 6:30 p.m. to reach the finish line and the last car will have until 7:09 p.m.

**6.12.3 Teams Completing the Day's Route** - Teams completing the day's route within their 8½-hour allotment will have their Daily Elapsed Time based on the actual time that elapsed from their Official Start Time until the team's solar car crosses the official finish line for that day.

**6.12.4 Teams Not Completing the Day's Route** - Teams that do not complete the day's entire route within their 8½-hour allotment will have their Daily Elapsed Time calculated based on their distance traveled along the route. After noting and recording the time and route distance covered, the team may load their solar car onto a trailer for transport to the finish line. Battery charging from the solar array while trailering is allowed. Teams not completing the day's route will have their Daily Elapsed Time calculated as the allowed driving time for the day (normally 8½ hours) plus three minutes per mile of distance not covered on that day's official route (3 minutes/mile = 1.86 minutes/kilometer).

Example (based on 8½-hour day and 35 miles not completed):

Daily Elapsed Time = 8½ hours + (3 minutes/mile × 35 miles) = 10 hours, 15 minutes

**6.12.5 Teams Off Course** - If a team departs from the Rayce Route but then returns properly to the route and continues, their Daily Elapsed Time will be determined in the normal manner; no credit will be given for the time the team was off-course.

**6.12.6 Pit Stop Credit** - All teams that reach the Pit Stop before 3:00 p.m. and wait the required time will receive a 15-minute Pit Stop Credit.

**6.12.7 Official Elapsed Time** - Each team's Official Elapsed Time for each day will be that team's Daily Elapsed Time minus their Pit Stop Credit (if any) plus any penalties for that day plus any protest filing fees for that day. Note that protest filing fees are counted against the day on which the protest is filed, whereas penalties are counted against the day on which the infraction occurred. Thus, the Official Elapsed Time for a given day is not final until after the end of the Rayce.

Official Elapsed Time = Daily Elapsed Time - Pit Stop Credit + Penalties + Protest Filing Fees

**6.13 Overnight Stops** - Once a team's solar car arrives in the vicinity of the finish line each day, the movement of that team's vehicles shall be under the control of Finish Line Officials. Specific areas will be designated for solar charging, Impound, support vehicle parking, Rayce Headquarters, and food service. These areas will become the staging area for the start of racing the following morning. Solar cars may be pushed within and between these areas, but regenerative braking may not be used during such times.

**6.13.1 Support Vehicle Parking** - All support vehicles must be parked in designated areas. Support vehicles will not be allowed into the charging areas.

**6.13.2 Impound** - The Impound is a designated area (building or tent) where all solar cars are secured under the direction of Event Security. The solar car must be complete with no parts missing when placed in Impound. There will be no maintenance allowed on the solar cars while impounded and no team members are allowed in the impound area except for placement and removal of their solar car. All solar cars must be impounded by 9:00 p.m. each race day. Teams are responsible for delivering their solar car to the Impound entrance early enough to ensure that it is impounded before this deadline. Teams may start removing their solar cars from Impound beginning at 6:00 a.m. the next day.

**6.13.3 Accommodations and Lodging** - All teams are responsible for team accommodations and food during the Rayce. Food concessions will be available at each overnight stop. Provisions will be made for camping at or near most overnight stops. Teams are responsible for their own reservations.

**6.14 Observers** - Trained Observers, selected and sponsored by Sunrayce 95 Headquarters, will travel with each team to alert the Inspectors to possible infractions of these *Regulations*, and to help teams deal with unforeseen events. The Observer has the authority to warn teams when they believe that a rule infraction is imminent. Observers may not interpret these *Regulations* or give advice on race strategy. Observers will be rotated in their team assignments at least daily.

**6.14.1 Observer Accommodation** - Teams must allow the Observer the seat of his or her choice behind the driver in the chase vehicle. The Observer must be able to see the solar car and read the chase vehicle's speedometer from this location, and must also be able to determine, at least periodically, how many vehicles are following behind the team.

**6.14.2 Observer Record of Performance** - The details of the activities of a team will be recorded in a log book carried by the Observer. The team leader will be permitted to review the book each day; however, failure to do so does not make any record invalid. The records kept by the Observer include the Official Start Time, stopping times (including Pit Stop), the distances traveled, and any apparent rule infractions either by their assigned team or by any other team.

**6.14.3 Observer Access for Inspection** - Observers will be assigned to keep each solar car in sight from the start line to the finish line each day. The Observers shall witness any and all work done on the solar cars during this period. The Observers must be allowed access to the solar cars for inspection of ballast during all driver changes.

**6.15 Penalties** - Any team failing to comply with these *Regulations* during the Rayce will be penalized. Penalties range from official warnings to disqualification from the Event. It is the responsibility of the Chief Inspector, with input from the other Inspectors and the Observers, to determine whether an infraction occurred, the severity of the incident, and the appropriate penalty. All time penalties will be submitted by the Chief Inspector to Rayce Headquarters for subsequent posting. Disqualification of a team from the Event requires concurrence of the Director.

**6.15.1 Posting of Penalties** - Except for the last day, all time penalties will be posted at Rayce Headquarters by 8:00 a.m. the following morning and penalized time will be added to the Official Elapsed Time of the day the penalized incident occurred. On the last day of racing, time penalties will be posted no later than 30 minutes after the finish of the Rayce.

**6.15.2 Conduct** - Penalties, including disqualification from the Event, may be imposed for improper conduct or the use of alcohol or illegal substances. Improper conduct may include, but is not limited to, improper language, unsportsmanlike conduct, unsafe behavior, or cheating.

**6.15.3 Non-Solar Charging of Batteries** - After the start of the Rayce until the official finish, teams will be disqualified from the Event for charging their solar car's storage batteries from any source of energy other than the solar car's solar array.

**6.15.4 Replacement of Batteries** - Decisions to exchange all or part of a battery must be communicated formally to the team's Observer or an Inspector. The penalty will be computed as follows:

Time penalty (minutes) =  $480 \times (n+S)/N$ , where:

n	=	number of replacement modules
S	=	sum of all modules previously replaced
N	=	total number of modules in solar car battery pack

**6.15.5 Disturbing Official Battery Seals** - Solar-car batteries will be marked with an official seal. Disturbing these seals in a manner that prevents proper identification by Inspectors will be penalized as though all of the battery modules affected had been replaced.

**6.15.6 Traffic Violations** - Any solar car committing a traffic violation will be penalized up to 15 minutes for each violation. Any solar car driver who commits three traffic violations over the course of the Rayce will be individually disqualified from the Event.

**6.15.7 Failure to Allow Other Traffic to Pass** - Any team failing to properly facilitate passing by traffic or other teams will be penalized up to 15 minutes for each offense.

**6.15.8 Drafting** - A penalty of up to 1 minute will be assessed for each minute that a solar car drafts behind another vehicle.

**6.15.9 Pushing** - A penalty of up to 30 minutes will be assessed each time it is necessary for a team to push or pull their solar car in order to advance along the Rayce Route. Teams pushing or pulling their solar car along the Rayce Route for more than 15 seconds will be assessed a time penalty up to that which would have the same effect on their Official Elapsed Time as if the team had made no further progress beyond that point on that day.

**6.15.10 Improper Ballast** - A penalty of up to 60 minutes will be assessed each time a team operates their solar car with ballast that does not match the solar car driver.

**6.15.11 Failure to Impound** - A penalty of up to 3 minutes will be assessed for every minute between 9:00 p.m. and 6:00 a.m. that a solar car is not in Impound.

**6.15.12 Unauthorized Vehicle on Rayce Route** - A penalty of up to 10 minutes will be assessed to a team each time an unauthorized support vehicle associated with that team drives on the Rayce Route without justification.

**6.15.13 Exceeding Size Specifications** - Oversized solar arrays, in either racing or charging configuration, will be penalized up to 10 minutes per day per excess centimeter in each dimension beyond the allowed size specification. Oversized solar cars will be penalized up to 5 minutes per day per excess centimeter in each dimension. If both the array and car are oversized, both penalties will be applied.

**6.16 Protests** - Any team desiring to file a protest must do so by submitting an official protest form to Rayce Headquarters. Protests may be filed for any reason, including disputing a penalty levied against any team, correcting timing errors, or protesting the actions of another team. A "filing fee" of 10 minutes will be assessed against the team's Official Elapsed Time for the day on which the protest is filed. All protests will be heard by the Jury, whose decision is final.

**6.16.1 Time Limit** - Except for the last day, all protests against penalties must be filed by 8:30 p.m. the day the penalty is posted. Protests that do not directly relate to a penalty must be filed by 8:30 p.m. on the day after the offense occurred. On the last day of racing, protests for any purpose must be filed within 60 minutes after the finish of the Rayce.

**6.16.2 Opportunity to Be Heard** - Protests will normally be heard by the jury at the earliest possible jury sitting. It may be necessary in some instances for the jury to postpone the hearing on a protest.

**6.16.3 Protest Judgments** - The decision of the Jury is final and no further appeals are allowed. The Jury will notify Rayce Headquarters of their decision, and Rayce Headquarters will then inform the affected teams. The Jury may refund some or all of the filing fee.