



# Universidad Austral de Chile

Facultad de Ciencias de la Ingeniería  
Escuela de Ingeniería Civil Electrónica

## “ESTUDIO EXPERIMENTAL SOBRE EL APROVECHAMIENTO DE LA RADIACIÓN ULTRAVIOLETA EN CELDAS FOTOVOLTAICAS”

Trabajo para optar al título de:  
Ingeniero Electrónico.

Profesor Patrocinante:  
Sr. Fredy Ríos Martínez.  
Ingeniero Electrónico,  
Licenciado en Ciencias de la Ingeniería,  
Diplomado en Ciencias de la Ingeniería

RAÚL EDUARDO OYANEDEL WESTERMEYER  
VALDIVIA - CHILE  
2010

## Comisión de Titulación

---

Sr. Fredy Ríos Martínez

---

Sr. Mario Fox Osses

---

Sr. Pedro Rey Clericus

Fecha de Examen de Titulación: \_\_\_\_\_

## **Agradecimientos y Dedicatoria.**

Agradezco a mis padres, por permitirme estudiar esta carrera, en esta bella ciudad. Al profesor Fredy Ríos por darme la oportunidad de trabajar en un tema aplicado y de interés para mi formación profesional. Al mayordomo del campus don Hermin Muñoz, a don Jorge Cid y a don Juan Peters, por su ayuda en la instalación de los paneles. A la profesora Charlotte Lovengreen, del Instituto de Física de la Universidad, por facilitarme los datos de radiación.

Dedicado a todo aquel que crea que la energía de la estrella es la verdadera y única energía convencional.

# Índice

<b>Agradecimientos y Dedicatoria.</b> .....	III
<b>Resumen.</b> .....	VI
<b>1. Introducción</b> .....	1
<b>2. Problemática energética</b> .....	4
2.1 La civilización del petróleo.....	4
2.1.1 Breve historia del ‘Oro Negro’ .....	5
2.1.2 Modelo de desarrollo actual y la dependencia de los combustibles fósiles. ....	12
2.2 Crisis energética global.....	15
2.3 Crisis de energía eléctrica .....	17
2.4 Consumo de electricidad en el mundo: la realidad actual. ....	19
<b>3. Problemática energética en Chile.</b> .....	24
3.1 Breve reseña histórica. ....	24
3.2 Situación Energética en Chile.....	30
3.2.1 Energía Primaria.....	30
3.2.2 Energía Eléctrica .....	31
3.3 Sistema Eléctrico Chileno .....	32
3.3.1 Funcionamiento del mercado eléctrico chileno. ....	35
3.3.2 La Comisión Nacional de Energía (CNE) .....	36
3.3.3 La Superintendencia de Electricidad y Combustibles (SEC) .....	37
3.3.4 La Comisión Nacional del Medio Ambiente (CONAMA).....	37
3.3.5 Los Centros de Despacho Económico de Carga (CDEC) .....	38
3.3.6 El Panel de Expertos de la Ley General de Servicios Eléctricos .....	40
3.3.7 Tipos de Clientes.....	40
3.4 Proyección de oferta y demanda. ....	42
3.5 Búsqueda de alternativas. ....	46
3.6 Las ERNC en Chile.....	47
<b>4. Energía solar para la generación eléctrica</b> .....	55
4.1 El Sol .....	55

4.2 Radiación Solar.....	61
4.2.1 Radiación Solar Extraterrestre.....	61
4.2.2 Radiación Solar Terrestre.....	64
4.3 Radiación Ultravioleta.....	73
4.4 Radiación Local.....	75
4.4.1 Radiación UV-A, registro 2006.....	76
4.4.2 Radiación UV-A medida.....	83
4.5 Energía solar fotovoltaica.....	86
4.5.1 Principios Físicos.....	86
4.5.2 Elementos de una celda de Si-c.....	93
4.5.3 Características Eléctricas de la Celda Solar.....	94
4.5.4 El Panel Fotovoltáico.....	100
4.5.5 Status Quo y futuro de la tecnología fotovoltaica.....	101
<b>5. Sistema de medición de potencia generada.....</b>	<b>102</b>
5.1 Resultados esperados.....	103
5.2 Paneles Kyocera KC-50T.....	104
5.3 Filtro UV.....	105
5.4 Lugar de instalación.....	109
5.5 Metodología de medición.....	111
5.5.1 Simulación de baterías.....	116
5.5.2 Medición directa con reóstatos.....	117
5.5.3 Sistema con baterías.....	117
5.5.4 Subsistema de descarga.....	119
5.5.5 Subsistema de Control.....	120
5.6 Sistema de Registro de Datos.....	124
5.7 Implementación y puesta en marcha.....	128
5.8 Recepción y Almacenamiento de Datos.....	130
<b>6. Resultados.....</b>	<b>132</b>
<b>7. Conclusiones.....</b>	<b>138</b>
<b>Bibliografía.....</b>	<b>141</b>

## **Resumen.**

En este trabajo se entrega el detalle del marco teórico, el diseño, la implementación y los resultados de un estudio sobre el aprovechamiento de la radiación ultravioleta en celdas fotovoltaicas. Para ello se han utilizado dos paneles solares multicristalinos Kyocera, de 50 Watts, a uno de los cuales se le ha aplicado un cristal laminado como filtro UV. De este modo, a través de la diferencia de generación entre ambos paneles, se calculó el porcentaje de energía eléctrica transformada a partir de la radiación UV-A incidente, con respecto al espectro visible e infrarrojo. Además, y con objeto de obtener la eficiencia de estos paneles en la banda UV-A, se ha empleado un instrumento detector de la irradiancia para longitudes de onda entre 320 y 400 nm.

Los dos paneles se han conectado, con controladores de carga, a un pequeño banco de baterías. Así, la generación diaria de energía se ha obtenido midiendo la corriente y voltaje de carga hacia estas baterías. Para impedir que éstas se carguen completamente e imposibiliten la medición, se ha diseñado un pequeño sistema de descarga nocturno. La medición de la energía generada se ha realizado mediante un microcontrolador con conexión de datos a un PC, en donde se van registrando diariamente las mediciones a través de un software.

Los resultados muestran la generación de potencia eléctrica en el panel con filtro y sin filtro, los cuales al ser comparados y ponderados en relación a la irradiación UV-A medida, se ha obtenido una eficiencia en dicha banda del 12,5%.

## **Abstract.**

In this paper, is given the detail of the theoretical study, the design, the implementation and the results of a study about the ultraviolet radiation catching on photovoltaic cells. For it, it was used two Kyocera multicrystal solar panels, 50 Watts power, to one of which it has been applied a laminated crystal like a UV-filter. By this way, from power differences between both panels, it has calculated the percent of electric energy that has been transformed from the UV-A

incident irradiation, about the visible and infrared spectrum. Besides, with the intention to obtain this panels UV-A efficiency, it has been used a spectrum irradiance detector instrument for 320-400 nm wavelength.

The two panels have been connected, with charge controllers to a little battery bank. So, the daily energy generation has been obtained measuring the charge current and voltage to these batteries. For avoiding the full charge of batteries and stop the measurement, has designed a little nocturnal discharge system. The measurement of the generated energy has been making with a microcontroller with connection to a computer; they are registered daily by software.

The results shows the electric energy generation with filter and without filter panel, which being compared and averaged in relation to the UV-A irradiation measured, has been obtained a efficiency on this band of 12,5%.

# Capítulo 1.

## Introducción

Desde nuestros comienzos como civilización, la energía ha sido el factor determinante en nuestra evolución. En un principio, la única fuente de energía fue nuestra propia fuerza física, que utilizamos para obtener alimento y protegernos de las adversidades del clima. Más tarde, con el descubrimiento del fuego, obtuvimos el calor suficiente como para permanecer calientes en condiciones frías, espantar a los depredadores y cocer los alimentos.

Desde aquellos remotos tiempos hasta el día de hoy, cada nueva fuente de energía ha significado una verdadera revolución de nuestra forma de vivir. Con cada una de ellas hemos ido mejorando nuestra calidad de vida, y aumentando la capacidad de expansión. El descubrimiento de los combustibles fósiles, como el carbón y más tarde el petróleo, puso en nuestras manos inmensas cantidades de energía concentradas en muy poco volumen, siendo además fáciles de transportar. Avances tecnológicos, como la máquina de vapor en el caso del carbón, y el motor Diesel en el caso del petróleo, multiplicaron la velocidad del transporte, de la construcción y de la producción de alimentos, con el consiguiente resultado de que nuestra curva de crecimiento poblacional se empinara como nunca antes.

La electricidad en tanto, apareció inicialmente como un mero fenómeno físico, de curiosidad más que nada para la gente de ciencia. No sería hasta finales del siglo XIX, cuando se expandió la iluminación eléctrica, que se hizo necesaria su generación masiva. De ahí en adelante, el aumento del consumo eléctrico fue producto de una de las propiedades más nobles de este tipo de energía: su facilidad para transformarla en otros tipos de energía. Esto ocasionó que, en poco tiempo, se desarrollaran un sin número de artefactos que funcionaban a base de energía eléctrica. En un principio la principal demanda provino del sector residencial, pero finalmente la aplicación de la electricidad en los procesos industriales traería los enormes

requerimientos que, al día de hoy, generan una seria problemática en muchos países, como el nuestro.

Cada país, según los recursos naturales disponibles en su geografía, busca explotar de la mejor forma su potencialidad para generar electricidad. Chile no es la excepción, y ha aprovechado la gran cantidad de ríos disponibles, sobre todo en la zona sur, para explotar su potencial hidroeléctrico. Sin embargo, la potencia instalada actual es insuficiente, siendo la demanda suplida por centrales termoeléctricas a carbón, petróleo y gas.

Tanto la creación de centrales hidroeléctricas de mayor envergadura, como el aumento de centrales termoeléctricas, presentan actualmente problemas socio-ambientales. De este modo, nos encontramos ante un escenario en que la curva de generación de energía eléctrica se detiene, mientras la curva de demanda sigue creciendo. Esto nos obliga a estudiar alternativas, concentrando la mirada en nuestros recursos y en las tecnologías disponibles, que sean factibles económicamente, y cuyo impacto socio-ambiental sea aceptable.

Dentro de estas alternativas se encuentra la energía solar fotovoltaica, que si bien, dado su elevado costo aun no representa una solución viable a gran escala, la aparición de nuevas tecnologías, y la madurez cada vez mayor del mercado de las ERNC, la sitúan como una de las energías más prometedoras para satisfacer la demanda del sector residencial, a través de micro-centrales.

Es dentro de este marco en que se encuadra el presente trabajo de titulación, que se presenta como un estudio experimental específico, con afán de contribuir al conocimiento aplicado de la actual tecnología fotovoltaica para esta zona, y que tiene por objetivo principal registrar y evaluar el efecto de la radiación ultravioleta en la generación de electricidad, a través de paneles solares multicristalinos, que son los mayormente utilizados. De paso, se busca crear un sistema de medición autónomo, que registre de forma continua la cantidad de energía generada, de modo que dicha información sirva de referencia para la evaluación de futuras instalaciones en esta zona.

## Objetivos

### Generales:

- Desarrollar un tema de investigación teórico-práctico que contribuya al uso de algún tipo de energía renovable en la región.
- Evaluar la aplicación local de las nuevas tecnologías en energía solar fotovoltaica.

### Específicos:

- Estudiar los niveles de radiación ultravioleta en la región y evaluar su transformación a energía eléctrica a través de paneles solares.
- Investigar las tecnologías disponibles actualmente en celdas fotovoltaicas.
- Diseñar e implementar un sistema que mida el nivel de transformación de la radiación solar a energía eléctrica, en un panel normal y en otro con filtro UV, con objeto de comparar ambas situaciones.
- Calcular el nivel de aprovechamiento de la radiación UV en los paneles solares, a partir de los datos que arrojan las mediciones.

## Capítulo 2:

### Problemática energética.

El déficit energético es un tema ya muy en boga y que ha traspasado todas las barreras. Muchas naciones buscan nuevas fuentes de energía, o bien intentan mejorar el rendimiento de sus fuentes actuales, a través de la eficiencia. Pero, ¿qué fue lo que nos llevó hasta este escenario? ¿De pronto aumentó bruscamente el consumo de energía en el mundo? ¿Se nos está acabando la energía?

Para contestar estas interrogantes, conviene revisar el origen de nuestro actual modelo de desarrollo, y las bases que lo han sostenido desde sus inicios.

#### 2.1 La civilización del petróleo

Basta realizar una breve mirada a nuestro alrededor, en cualquier punto del mundo civilizado, para darnos cuenta de que estamos inmersos en un sistema de vida-desarrollo propiciado básicamente por el petróleo y sus derivados.

Químicamente, el petróleo es una mezcla de hidrocarburos (compuestos de hidrógeno y carbono), especialmente alcanos y aromáticos pesados. Dependiendo de la cantidad y cualidad de los enlaces entre átomos de carbono e hidrógeno, se generan los distintos hidrocarburos que lo componen. De este modo, podemos encontrar al petróleo y sus derivados en los tres estados, sólido, líquido y gaseoso. Estas propiedades le confieren una versatilidad enorme para generar subproductos. Ejemplos mayormente conocidos son: diesel, gasolina común, gasolina de aviación, turbosina, queroseno, gas natural, gas licuado, asfalto, polietileno, alquitrán, tolueno, diversos disolventes, lubricantes y ceras, entre otros. Esta característica, sumada a la gran cantidad de energía contenida en el petróleo (en promedio 10.000 calorías/gramo), su facilidad

y relativa seguridad para ser transportado, han sido factores que han contribuido a que la humanidad lo tenga hoy como la principal fuente de energía en todo el planeta. Sin embargo, como se verá a continuación, la actual dependencia del petróleo y la consiguiente crisis energética no es atribuible únicamente a sus bondades físico-químicas.

### 2.1.1 Breve historia del ‘Oro Negro’

Hay registros de que el petróleo se utilizaba ya desde la antigüedad, como betún impermeabilizante, o como asfalto. En el siglo IX, Al-Razi inventó el alambique con el que obtuvo el queroseno y otros destilados, pero sólo para usos médicos. En el siglo XVIII empezaron a perfeccionarse los métodos de refinado, obteniéndose derivados para el engrase de máquinas, y en el siglo XIX se logran refinar aceites fluidos y queroseno apto para el alumbrado. En este punto de la historia, las grandes ciudades comenzaban a desarrollarse, y un grupo de eruditos en Estados Unidos vieron el gran mercado que se generaría para la iluminación de casas, sustituyendo con queroseno el aceite de ballena utilizado para las lámparas. Fue por este motivo que se envió al coronel Edwin Drake, para realizar excavaciones en las colinas del pueblo de Titusville, en donde se producían grandes filtraciones de forma natural. Fue así como en agosto de 1859 se perforó el primer pozo petrolero a nivel industrial de la historia.



*Figura. 2.1: Coronel Edwin Drake en Titusville*

Un año después la fiebre del “oro negro” había estallado y ya se habían instalado en la zona cerca de 70 pozos. En sus inicios, el mercado del petróleo generó una fuente de riqueza para mucha gente que buscaba fortuna, pero la mayoría ganaba tan rápidamente como perdía, y el precio del barril subía y bajaba locamente. Aun así, a comienzos de la década del 60 el petróleo ya se había convertido en una industria de mediana envergadura.

### ***El nacimiento de las transnacionales***

En 1863, aparece la figura de John David Rockefeller, el magnate de los negocios que se convertiría en el padre de la industria petrolera moderna. Para ese entonces montó una refinería junto a un socio. No tardó en comprarle su parte y así obtener la mayor refinería de Cleveland. Rockefeller diseñó entonces una estrategia que sería la clave para su éxito empresarial: la integración vertical de las distintas actividades. Creó una serie de empresas relacionadas con la industria del petróleo, además de comprar todas las empresas competidoras, todo esto en secreto y con ayuda de espionaje. Adquirió terrenos en los que obtener la madera para fabricar barriles, vagones cisterna para el transporte por ferrocarril, almacenes en Nueva York para guardar el producto y barcazas para su transporte por el río Hudson. Además, apoyado en una fuerte posición tesorera, se mantuvo aislado de las presiones de los bancos. Consiguió rebajas exclusivas con las compañías férreas, y un trato en el que éstas le abonaban cada vez que la competencia transportaba petróleo.

### ***Standard Oil***

Tras una crisis por sobrecapacidad, Rockefeller decide apoderarse por completo de la producción de queroseno. Con tal fin une capital con otros tres hombres y funda la Standard Oil, el 10 de Enero de 1870. Esta vez, para apoderarse de las demás compañías, instalaba una refinería ficticiamente independiente, en la que bajaba los precios y hacía sucumbir a los competidores, para después comprarlos. Con este mecanismo, en 1879 la Standard logró poseer el 90% del mercado petrolífero americano, siempre en secreto, ya que la mayor parte de sus

refinerías no eran oficialmente suyas. Cuando ya el queroseno de la Standard iluminaba gran parte de los EEUU, el crecimiento de la producción instó a la compañía a ampliar su mercado a todo el mundo.

## ***Shell***

Ya en la década de los 80, el petróleo de la Standard dominaba el mercado mundial. La mitad de su producción se destinaba a exportación, cuya mitad a su vez correspondía al queroseno. Sin embargo esta supremacía comenzaría a tambalear ante la aparición de nuevas compañías en Europa. Los suecos Ludwig y Robert Nobel, encontraron una pequeña industria de petróleo en Bacú, Rusia, y la adquirieron bajo el nombre de Nobel Brothers Company. Al año siguiente la producción alcanzó los 600.000 barriles y 10 años más tarde ascendería a 10,8 millones, con alrededor de 200 refinerías, lo que equivalía en ese entonces a un tercio de la producción americana. Dada las grandes distancias entre las zonas productoras y consumidoras, los Nobel crearon barcos-cisterna que atravesaron el Mar Caspio.

En 1886 entran en el mercado ruso los Rothschild, quienes compran también una comercial petrolera en Bakú, bajo el nombre de Caspian-Black Sea Commercial and Industrial Co. Así el petróleo ruso, de la mano de estos dos grupos, Nobel y Rothschild, fue ganando terreno en el mercado europeo, de modo que la Standard Oil enfrentó por primera vez un competidor serio. Sin embargo la Standard respondió rápidamente, abriendo filiales, y convirtiéndose en una transnacional. Hacia 1890, tanto los Nobel como los Rothschild tenían sociedades de distribución en las distintas zonas, convirtiéndose en compañías integradas pero competidoras, entre sí y con la Standard.

Otros dos magnates del negocio aparecieron por aquel entonces: los hermanos Samuel. Tenían una compañía que comerciaba con distintos productos del Lejano Oriente. Aprovechando sus contactos con las casas comerciales de distintos países, decidieron comerciar parte del petróleo ruso en aquellas zonas. Fue así como en 1892, zarpó el primer petrolero de la nueva compañía, bautizada como Shell Transport and Trading Company, que atravesando el

Canal de Suez y con petróleo procedente de los campos de los Rothschild, fue la primera amenaza seria del dominio internacional de la Standard Oil.

En ese mismo entonces se forma en Sumatra, Indonesia, una compañía bajo el nombre de Royal Dutch Company. Obtuvo una concesión con el sultán de Langkat, en el noreste de Sumatra, ahorrando significativamente en transporte, lo que le permitió suministrar petróleo competitivo a la zona. Poco a poco fue creciendo, y tuvo varios intentos de fusión, tanto con la Standard como con la Shell, que en un primer intento no funcionaron.

### ***Gulf, Sun, Texaco***

Un nuevo gran hallazgo en Spindletop, al sudeste de Texas, EEUU, fomentó la aparición de nuevas compañías de petróleo en América. La producción fue inmensa. En unos meses, ya se habían instalado 200 pozos, y el suministro era tan intenso que el barril llegó a costar 3 centavos de dólar. Por ese entonces la principal compañía fue la Gulf, de la mano de James Guffey. En 1886 fue fundada la Sun Oil Company (hoy Sunoco), y la Texaco, que surgió de las concesiones obtenidas por Joseph Cullinam, un ex directivo de la Standard.

### ***La Standard se divide***

Los oscuros métodos con que la Standard, desde sus inicios, se expandía a través de los diferentes mercados, de a poco fueron poniendo a la opinión pública en su contra. Aunque Rockefeller se retiró de su dirección en 1897, la mayor parte de la sociedad norteamericana siguió creyendo que él era quien estaba al frente de la compañía. En 1904, la periodista Ida Tarbell publicaría una serie de artículos que pondrían al descubierto las artimañas que utilizaba la Standard, así como una terrible biografía de Rockefeller. Fue así como al poco tiempo, la Standard fue sometida a largos procesos judiciales, con objeto de dividir su poder. En 1909, un juez dictaminó la disolución de la Standard Oil, dividiéndola en otras compañías: la Standard Oil de New Jersey; la Standard Oil de Nueva York (Mobil); Standard Oil de California (Chevron);

Standard Oil de Ohio (Sohio); Standard Oil de Indiana (Amoco); Continental Oil (Conoco); y Atlantic, que terminó siendo absorbida por Sun.

Al contrario de lo que se esperaba, la competencia entre las nuevas empresas contribuyó a que aumentaran sus inversiones. Crecieron mucho más de lo que la Standard independiente. Años después de la separación, Rockefeller había doblado su fortuna.

### ***Fusión de Shell y Royal Dutch***

Para cuando la Standard se dividió, la Shell necesitaba urgentemente más petróleo. Su capacidad comercializadora era grande, pero el petróleo ruso obtenido de los Rothschild no era suficiente. Por su parte la Royal Dutch salía adelante y crecía de la mano de Deterding. Fue así como estas dos compañías, con el interés común de hacer frente al gigante americano, se unen bajo el nombre de Royal Dutch-Shell en 1907. Bajo el mando de Deterding, la unión internacional tuvo éxito rotundo, ampliando su mercado a los EEUU. En 1911 ya negociaban la adquisición de todo el negocio petrolero de los Rothschild en Rusia.

### ***Persia***

En 1908, en Masjid-i-Suleiman, Persia, un inmenso pozo aparece. Se constituyó para la explotación una nueva compañía, la Anglo-Persian Oil Company. En 1912 llegó a un acuerdo con la Asiatic, la rama comercial de Royal Dutch-Shell en Asia, lo que le dio salida a su elevada producción de crudo. Sin embargo, la compañía tuvo dificultades financieras y, en 1914, nada menos que el Estado Británico, adquiere el 51% de sus acciones. Con el petróleo persa, el Reino Unido mejoraría la tecnología de su Marina, como una manera de levantar su seguridad nacional. Con el apoyo del gobierno inglés, y con un mercado seguro como era la Marina, la Anglo-Persian vio asegurado su desarrollo, y se convirtió en una de las compañías petroleras más potentes.

### ***El petróleo en la Primera Guerra Mundial***

El petróleo fue el elemento decisivo de este episodio de la historia. La consolidación del motor de combustión interna y la disponibilidad de petróleo fueron cruciales para decantar la guerra del lado aliado. Cuando el crudo de Europa y Oriente se hizo escaso, las compañías americanas suministraron la diferencia que determinaría el final de la guerra.

### ***Ford T y el petróleo turco***

Hacia 1912, un millonario armenio, Calouste Gulbenkian, muy introvertido, dirigía la creación de una compañía en el Imperio Turco, la Turkish Petroleum Company, que tras la guerra se repartiría entre la Royal Dutch-Shell, la Anglo-Persian y capitalistas franceses.



*Figura 2.2: Ford T.*

En EEUU, por su parte, el aumento del número de vehículos fue sorprendente, pasando de 1,8 a 9,2 millones entre 1914 y 1922. En ese año, Henry Ford lanzó su famoso modelo “T”, lo que produciría la definitiva masificación exponencial del automóvil. Esto produjo una creciente escasez de petróleo, lo que fijó la vista de las compañías americanas en Medio Oriente. El gobierno inglés en un principio lo rechazó, pero en 1928 finalmente accedió, con lo cual el petróleo turco se repartió a la Standard, las dos compañías inglesas y el grupo francés.

### ***Petróleo mexicano***

En los años 20 las principales compañías petroleras en México fueron la Pan American Petroleum y la Mexican Eagle. Poseían el mayor pozo del mundo, con una producción de 193 millones de barriles. Si bien la Shell adquirió la Eagle en 1918, tras la revolución el nuevo gobierno estableció la propiedad nacional sobre el subsuelo, pasando las compañías a ser “concesionarias” de su explotación.

### ***Petróleo Venezolano***

La explotación del petróleo venezolano corrió a cargo, primero, de la Royal Dutch-Shell y la Pan American, adquirida en 1925 por la Standard de Indiana. A su vez, ésta vendió sus activos extranjeros a la Standard de Jersey en 1932. Venezuela pasó de producir 1,4 millones de barriles en 1921 a 137 millones en 1929, lo que le colocaba como segundo mayor productor mundial. Casi toda su producción se destinaba a EEUU, y el petróleo llegó a representar el 76% de los ingresos por exportación del país.

### ***East Texas y el control de la producción***

Hacia finales de los 20, en un pueblo perdido de East Texas se encontró la mayor reserva petrolera de los EEUU. La producción llegó a un millón de barriles diarios, dejando los precios muy por debajo del coste de producción. Las continuas llamadas del Estado a una moderación de la producción eran desoídas, hasta que finalmente, se declaró el East Texas en “estado de insurrección” y la Guardia Nacional y los Texas Rangers paralizaron la producción de los pozos. A partir de entonces las llamadas a la moderación fueron obedecidas. Sin embargo, empezó a aparecer petróleo ilegal, y a superar el límite de los estados. Los precios volvieron a caer a 10 centavos y menos. Pero entonces (1933) llegó a la Presidencia Franklin Roosevelt, y con el Nuevo Programa empezó a coordinar y controlar la producción entre los estados. Además, agregó un arancel a las importaciones, que las redujo del 10 al 5% de la demanda nacional. Estas

medidas trajeron estabilidad al sector petrolero, manteniendo los precios en torno a un dólar durante los años siguientes.

En este punto de la historia, las más grandes compañías petroleras del mundo ya estaban conformadas, así como también se habían dividido todo el globo, de acuerdo a sus intereses político-energéticos. Desde aquel entonces hasta nuestros días, el petróleo ha sido “la tinta con la que se ha escrito la historia”; guerras, constantes luchas de poder entre las distintas naciones se han iniciado, desarrollado y acabado de acuerdo al petróleo. Así también las denominadas “crisis del petróleo” y las consiguientes crisis energéticas y económicas, han sido producto de tensiones y desequilibrios entre las compañías y los países consumidores, productores y poseedores del llamado ‘oro negro’.

### **2.1.2 Modelo de desarrollo actual y la dependencia de los combustibles fósiles.**

La rol de los hidrocarburos en nuestra actual sociedad, no está representado únicamente por la variedad de productos que se obtienen directa o indirectamente de su procesamiento, sino además por su presencia en prácticamente todos los sectores y ramos industriales. Se lo utiliza de manera indispensable en varios momentos al interior de un proceso productivo, y es responsable de revolucionar las comunicaciones y el transporte, pero, por sobre todo, es la base energética que permite el movimiento completo de la producción y la reproducción en nuestra sociedad.

#### ***Petroquímica***

Diversas cadenas productivas que se basan en la conversión de hidrocarburos en productos químicos, conforman la industria denominada de manera general Petroquímica. Esta ha sido una de las piedras angulares de la industria y la tecnología de la sociedad del siglo XX y principios del XXI.

Esta industria ha hecho posible el desarrollo de muchos de los productos que hoy se consideran normales e imprescindibles, como las computadoras, tejidos, juguetes irrompibles y

una cantidad de otros productos que no existen en la naturaleza y que no existían antes de la utilización del petróleo de manera masiva.

El concepto de que éstos productos, derivados del petróleo, aseguran una calidad de vida aceptable, ha imposibilitado la vida sin ellos, y ha convertido a la sociedad moderna del siglo XX, en una sociedad dependiente del petróleo. El crecimiento de la demanda de los productos petroquímicos, se ha debido al desplazamiento de las materias primas tradicionales por las nuevas materias sintéticas, lo que a su vez ha permitido la masificación del consumo.

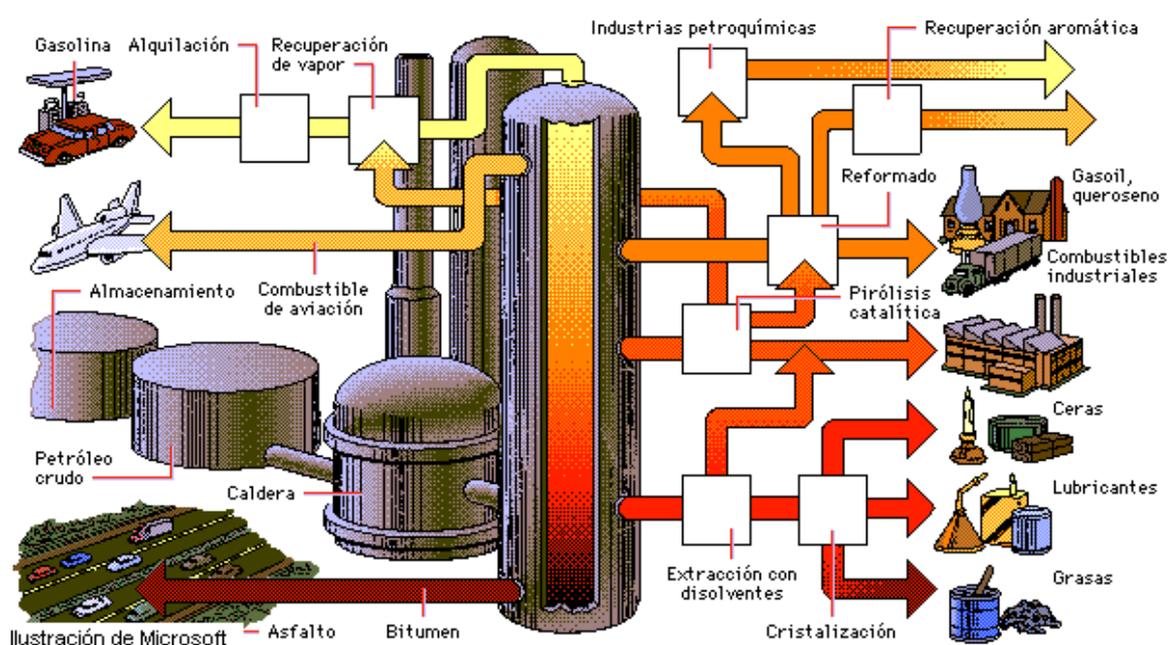


Figura 2.3: Distintos productos de la petroquímica.

Así, en la industria textil, las fibras sintéticas suplen a la lana y el algodón. La primera fibra que se comercializó fue el nylon, en 1938. Desde entonces, el aumento de la demanda no ha dejado de crecer. Por su volumen, representan la segunda materia en importancia de la Petroquímica, después de los plásticos.

La industria del caucho utiliza nuevos productos con iguales propiedades y a veces superiores a las del caucho natural. La industria de envases y embalajes ha sustituido el polietileno como alternativa al cristal y al celofán, plásticos para la construcción, por su gran

resistencia a la corrosión y a las inclemencias del tiempo, por su ligereza y flexibilidad. Los productos enlatados usan ácido benzoico derivado del tolueno como preservante.

Por otro lado, la inmensa variedad de productos terminados de la Petroquímica puede clasificarse en cinco grupos: plásticos, fibras sintéticas, cauchos sintéticos o elastómeros, detergentes y abonos nitrogenados.

El nombre común de plásticos se debe a la propiedad que tienen de ser deformables por plasticidad (frente a la elasticidad), bajo la influencia del calor, la presión o de ambos a la vez. Hay tres grandes familias de plásticos: los termoplásticos, los termoendurecibles y los poliuretanos. Los termoplásticos constituyen aproximadamente el 50% del consumo de plásticos del mundo, e incluyen películas fotográficas, bolsas, papel de envasar, tuberías, canalizaciones, construcción en general, embalajes, muebles, juguetes, aislamientos, electrónica, PVC para revestimientos, tuberías, válvulas, flores artificiales, botas, etc.

Los plásticos termoendurecibles se usan en aislamientos eléctricos, paneles decorativos, utensilios domésticos, etc. Los plásticos poliuretanos son productos con apariencia de vidrio y espumas extraligeras. Fibras sintéticas incluyen poliamidas para lencería fina, alfombras, cortinas, trajes de baño, recubrimiento interior de neumáticos, etc. Los poliésteres son usados en trajes, corbatas, impermeables, visillos, alfombras... Las fibras acrílicas sustituyen a la lana: ovillos y moquetas, entre otros usos.

Los cauchos sintéticos y elastómeros son los principales suministradores de la industria del automóvil, pues es un elemento fundamental de los neumáticos. También se emplean, en algunas de sus variedades, para los calzados y para la construcción de recubrimientos de terrazas y tejados.

Los detergentes son productos solubles en el agua, cuya propiedad fundamental consiste en poder modificar la tensión superficial de los líquidos en los que se encuentra, disminuyendo o eliminando la suciedad contenida en ellos. Sus usos principales están centrados en el hogar, en forma de polvos, escamas o líquidos.

Abonos para la agricultura química incluyen el ácido sulfúrico. Los fosfatos y la síntesis del amoníaco, han puesto en circulación una gama muy amplia de abonos químicos. A través de la petroquímica y del suministro de hidrógeno a bajo precio para la producción de amoníaco, se

ha promovido el empleo masivo del nitrógeno asimilable en sus tres variantes: nitratos, sulfatos y urea y la infinidad de abonos complejos. Además, a través de la petroquímica se han creado una gran cantidad de agrotóxicos como herbicidas, fungicidas, insecticidas, nematocidas, etc.

Finalmente, este “aceite de roca” parece ser algo más que energía. A través de la petroquímica se obtienen hasta 5 millones de distintos productos, y debido a ellos se transformó la sociedad del siglo XX. Creó, promovió y desarrolló bajo su amparo una civilización dependiente de él y de las transnacionales que controlan la explotación petrolera y la petroquímica.

## **2.2 Crisis energética global**

Cuando hablamos de “crisis energética”, la frase suena como una verdadera pandemia. La imaginamos como una falta general de energía en todo el mundo, como si la energía se estuviera acabando o como si ya no hubieran más formas a través de las cuales producirla o transformarla. Se la ve a menudo ligada a una crisis alimentaria y, ya de manera más amplia a una crisis económica, es decir, una falta de recursos.

Es tanta la psicosis que se ha generado en torno al tema, que a veces induce a pensar que el planeta está llegando al límite de su capacidad para albergar más vida humana en términos de recursos. Esta idea a su vez trae consigo un sin número de planteamientos éticos entorno al control de la población y nuestra forma de vida expansiva.

Sin embargo, el dramatismo y la especulación, que muchas veces se utiliza con éxito para crear consciencia en las personas, a la hora de buscar las reales causas y estudiar posibles soluciones es más bien un obstáculo que nubla la objetividad y el correcto análisis.

Y es que, en estricto rigor, no existe tal crisis de energía. El planeta cuenta con una rica variedad de recursos naturales, en cantidades que superan con creces los requerimientos actuales de los distintos pueblos. Además, y este es el punto crucial, el planeta recibe día a día millones de veces la energía que ocupa actualmente la civilización. El Desierto del Sahara, por

ejemplo, recibe en 6 horas la cantidad de energía que consume el mundo entero durante un año.

La verdadera “crisis energética” actual es simplemente una de las consecuencias del ocaso de la Era del Petróleo, o visto de otro modo, del fracaso de un modelo de desarrollo que tomó como base la disponibilidad de un recurso finito. Diferentes conflictos geopolíticos durante la segunda mitad del siglo pasado ocasionaron varias crisis, verdaderas crisis, pero *crisis del petróleo*. Ejemplos de ello son las del '73, '79 y '90. Sin embargo, a partir de 2004 el precio del barril ha crecido sostenidamente, sin que hayan habido de por medio conflictos como los que originaron las anteriores crisis. El motivo de este aumento es el agotamiento del petróleo barato y de buena calidad de los grandes pozos, siendo cada vez más difícil y costoso extraerlo. Los expertos afirman que estamos próximos al *cenit* del petróleo, es decir el punto de producción máxima, a partir del cual empieza a decaer paulatinamente hasta acabarse.

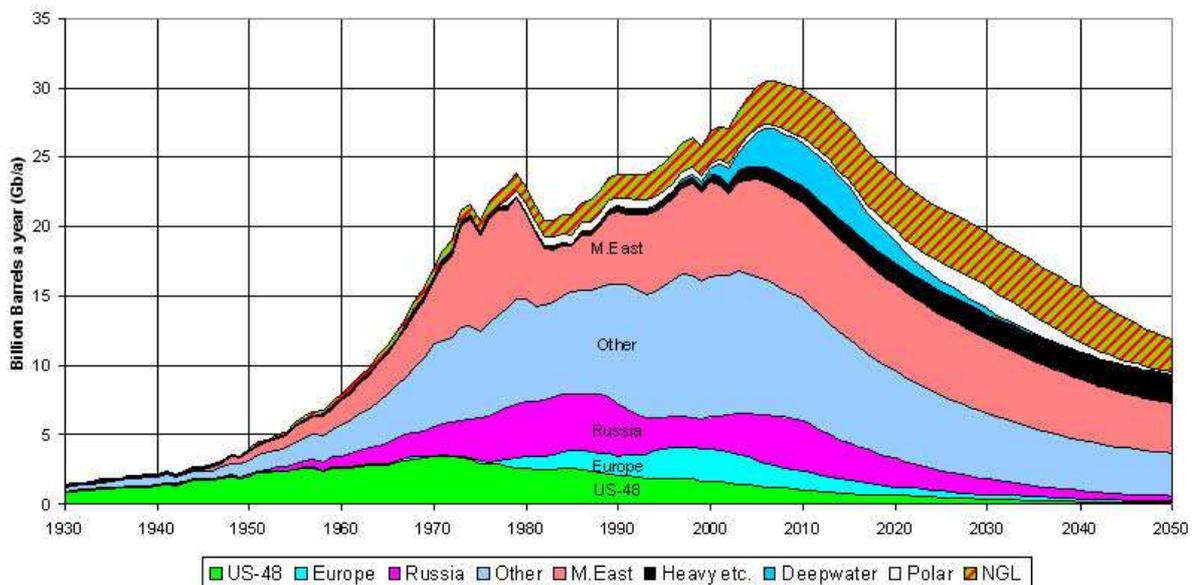


Figura 2.4: Teoría del cenit del petróleo de Hubbert

Además, se le debe sumar la especulación en torno a un posible disparo de la demanda mundial, sobre todo por parte del continente asiático.

## 2.3 Crisis de energía eléctrica

Hasta ahora, se ha analizado el actual modelo de desarrollo material y cómo la energía proporcionada por los combustibles fósiles ha hecho posible una amplia gama de tecnologías y productos, así como ha conformado todo un sistema productivo dependiente de él. Pero, ¿de qué manera este modelo ha sido, en mayor o menor medida, responsable de una crisis de energía eléctrica? Las principales fuentes de generación de electricidad en el mundo, actualmente no dependen directamente del petróleo. Entonces, ¿cuál es el nexo?

El punto clave es nada más ni nada menos que uno de los legados de la civilización del petróleo y el capitalismo industrial: la sociedad de consumo. En ella, el concepto de realización, e incluso de felicidad, está denotado por la adquisición de la mayor cantidad de productos y servicios posibles, originalmente para la satisfacción de las necesidades. Normalmente, dichas necesidades son inicialmente secundarias, pero los sistemas de información y propagandas se encargan de promoverlas como verdaderas necesidades primarias, con el mismo nivel de importancia que la alimentación, la vivienda y el vestuario.

Hoy en día es imposible concebir una vida de ciudad sin los electrodomésticos. Cuando se inventó el televisor, era un verdadero lujo poseer uno de estos aparatos en el hogar, al nivel de que muchas personas visitaban la casa de una familia poseedora para ver un partido de fútbol, una película o un programa. Hoy el televisor es una verdadera necesidad material, y es normal ver más de uno en muchos hogares de clase media.



Llegamos a un punto en que cabe preguntarse si acaso la mayor disponibilidad de energía eléctrica nos restará necesidades, o generará el ambiente propicio para que el mercado nos otorgue otras nuevas.

En síntesis, la facilidad para transformar la electricidad en otros tipos de energía, ha producido en las sociedades de consumo una verdadera inundación de artefactos eléctricos y electrónicos. A pesar de esto, el sin número de estos aparatos en nuestros hogares no es precisamente el factor que gatilla una crisis de energía eléctrica. El crecimiento de la demanda energética está más bien asociado a un factor cultural que a un factor material, o visto de otro modo, a una falta de cultura, *cultura energética*.

La mayoría de los habitantes de las grandes ciudades, reciben la energía eléctrica en sus hogares sin tener la más mínima idea de dónde y cómo se ha obtenido dicha energía. Muchos no saben siquiera, que se trata de un recurso finito. Al entregarse como un producto/servicio que no es perceptible por ninguno de nuestros sentidos, normalmente la obviamos, considerándola una magnitud infinita que “está siempre disponible”.

Por último, para el usuario doméstico, el único referente que le otorga cierta noción de la magnitud de energía que consume es el valor de la cuenta de electricidad que llega cada mes. Mientras este valor se mantenga en un rango aceptable para el consumidor, poco y nada le interesará ahorrar energía.

Todo esto nos genera un estado general de inconsciencia en materia energética. Si a esto le sumamos la comodidad y la ineficiencia, hemos resuelto buena parte de la ‘ecuación’ de la crisis eléctrica.

## **2.4 Consumo de electricidad en el mundo: la realidad actual.**

La Figura 2.6, muestra la distribución, por rangos exponenciales, del consumo de energía eléctrica de las distintas naciones. Como se puede ver, el mayor consumo de energía eléctrica está concentrado en los Estados Unidos y China.

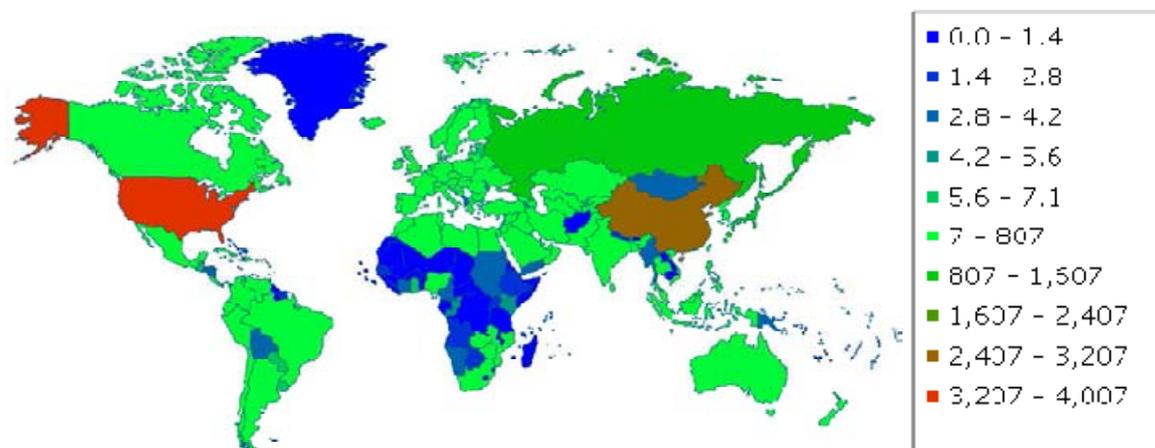


Figura 2.6: Consumo de energía eléctrica, miles de millones de kWh. Fuente: The World Factbook, CIA.

RANK	país	( KWH)	Fecha EST.
1	Estados Unidos	3,892,000,000,000	2007
2	China	3,271,000,000,000	2007
3	Unión Europea	2,926,000,000,000	2007
4	Japón	1,080,000,000,000	2006
5	Rusia	1,003,000,000,000	2006
6	Alemania	549,100,000,000	2006
7	Canadá	530,000,000,000	2006
8	India	517,200,000,000	2006
9	Francia	480,000,000,000	2007
10	Brasil	402,200,000,000	2007
...	...	...	...
47	Chile	45,520,000,000	2006
...	...	...	...
207	Islas Malvinas	14,880,000	2006

Tabla 2.1: Consumo total de energía eléctrica. (Fuente: The World Factbook, CIA)

<b>PAIS</b>	<b>Wh/dia</b>
<i>Qatar</i>	28495.1
<i>Iceland</i>	15606.3
<i>United Arab Emirates</i>	14035.7
<i>Bahrain</i>	13651.7
<i>Luxembourg</i>	12530.8
<i>Netherlands Antilles</i>	12250.8
<i>Trinidad y Tobago</i>	11393.6
<i>Canadá</i>	11055.0
<b>Estados Unidos</b>	<b>10381.2</b>
<i>Brunei Darussalam</i>	9968.6
<i>Finlandia</i>	9613.1
<i>Noruega</i>	7902.4
<i>Suecia</i>	7677.6
<i>Australia</i>	7622.4
<i>Belgica</i>	7595.8
<i>Saudi Arabia</i>	7434.4
<i>Singapore</i>	6870.6
<i>Gibraltar</i>	6798.3
<i>Netherlands</i>	6675.2
<i>France</i>	6017.6
<i>Russian Federation</i>	5890.7
<i>Nueva Zelanda</i>	5831.4
<i>South Korea</i>	5788.6
<i>República Checa</i>	5752.5
<i>Alemania</i>	5597.7
<i>Austria</i>	5398.0

<i>Japón</i>	5381.2
<i>Reino Unido</i>	5218.2
<i>Dinamarca</i>	5104.6
<i>Irlanda</i>	5009.2
<i>Suiza</i>	4952.4
<i>Estonia</i>	4890.9
<i>Turkmenistan</i>	4856.4
<i>Eslovenia</i>	4743.5
<i>Eslovaquia</i>	4592.8
<i>Cyprus</i>	4369.9
<i>España</i>	4299.5
<i>Libyan Arab Jamahiriya</i>	4265.9
<i>Israel</i>	4245.6
<i>Italia</i>	4164.8
<i>Grecia</i>	3594.0
<i>Bielorrusia</i>	3503.9
<i>Lithuania</i>	3501.7
<i>Sudáfrica</i>	3458.6
<i>Hungría</i>	3456.4
<i>Hong Kong</i>	3194.8
<i>Poland</i>	3156.1
<i>Malaysia</i>	3087.6
<i>Uzbekistan</i>	2721.0
<i>Irán</i>	2709.0
<i>Croacia</i>	2585.6
<i>Latvia</i>	2515.5
<i>Lebanon</i>	2264.1
<b>Chile</b>	<b>2200.3</b>

<i>Argentina</i>	<i>2097.3</i>
<i>Jamaica</i>	<i>2057.6</i>
<i>Serbia and Montenegro</i>	<i>2049.4</i>
<i>México</i>	<i>2041.8</i>
<i>Philippines</i>	<i>2031.0</i>
<i>Azerbaijan</i>	<i>1971.4</i>
<i>Thailand</i>	<i>1872.1</i>
<i>República Macedonia</i>	<i>1749.7</i>
<i>Gabon</i>	<i>1663.2</i>
<b><i>China</i></b>	<b><i>1516.0</i></b>

*Tabla 2.2: Consumo de energía per cápita. (Fuente: World Resource Institute)*

Claramente el mayor consumo de energía está presente en los países más desarrollados, y el ranking es encabezado por las potencias mundiales. En la mayoría de los lugares que encabezan la tabla de consumo, están los países industrializados y con un alto estándar de vida. Excepción es China, que si bien es la segunda potencia con el mayor consumo/generación de electricidad en el mundo, la energía per capita está muy por debajo de la nuestra, lo que delata las precarias condiciones de vida en el gigante asiático. Cabe destacar también el elevado consumo per cápita en países nórdicos, atribuibles a las bajas temperaturas y la menor luminosidad. En contraste aparecen también algunos países del medio oriente.

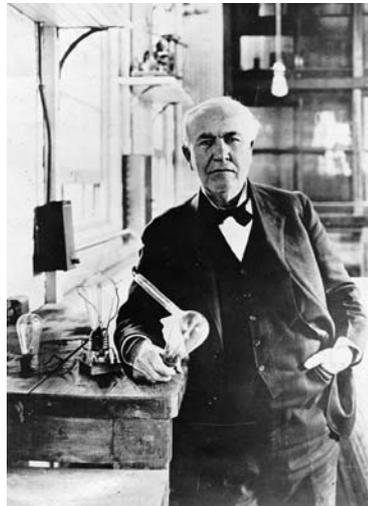
Si bien la sociedad de consumo y los factores agravantes anteriormente mencionados, son las principales causas de la creciente demanda de energía eléctrica en el mundo, en cada país se da una realidad diferente, ya que la distribución de la demanda difiere de acuerdo a las actividades de las cuales se sostiene cada nación. Como veremos en el siguiente capítulo, es el sector industrial el que, en países productores de materias primas como el nuestro, requiere la mayor cantidad de energía, en este caso varias veces mayor al que demanda, por ejemplo, el sector residencial.

## Capítulo 3.

### Problemática energética en Chile.

#### 3.1 Breve reseña histórica.

La historia de la energía eléctrica en Chile comienza hacia 1883, cuando un empresario visionario instala un dínamo accionado por un motor a gas en el centro de Santiago, inaugurando así el alumbrado eléctrico en la Plaza de Armas, el pasaje Matte y ciertos comercios céntricos. En ese entonces habían pasado sólo 4 años desde que Thomas Alva Edison había inventado y patentado la lámpara incandescente.



*Figura 3.1 Thomas Alva Edison y su lámpara incandescente.*

Hasta entonces, el potencial hidráulico de los ríos chilenos se había utilizado en la molienda del trigo y en algunas fábricas solamente. Recién a finales de siglo, se dio el gran paso al sustituir las ruedas hidráulicas por las turbinas generadores de electricidad. La primera central hidroeléctrica chilena se construyó para las minas de carbón de Lota en

1897, en Chivilingo, localidad con agua abundante. Con la electricidad de dicha localidad se iluminaron las minas de Lota y se hicieron funcionar los elevadores y las bombas de agua.

El desarrollo urbano de Santiago estimuló la instalación de tranvías eléctricos, que sustituyeron a los de mulas. Como era habitual en aquella época, las empresas de transporte público urbano solían ser británicas, como en el caso de la capital, de cuya gestión y funcionamiento se encargó en 1897 la empresa Parrish and Brothers, de Londres. Ese año se inauguró el tranvía de Chivilingo. El primero eléctrico circuló en Santiago el 3 de septiembre de 1880. En 1899 la red fue transferida a la empresa Tramway and Light Co., también con sede en Londres.



Tranvías eléctricos, Santiago de Chile, 1900.

En aquella época, la electricidad generada era de tipo corriente continua, y no podía trasladarse a grandes distancias, debido a las grandes pérdidas en las líneas de transmisión. Por ello, en un principio las centrales eléctricas se construyeron cerca de las áreas de consumo. En el caso de la red de tranvías chilena, fue la central Mapocho, en la calle del mismo nombre. Se trataba de una central termoeléctrica, alimentada a carbón.

La tecnología hizo su aporte para transformar la corriente continua en corriente alterna. Así en 1905 se instaló cerca de Valparaíso la central El Sauce, la primera

hidroeléctrica con alternadores del país. Poco después, en 1909, se inauguró, también en el Núcleo Central, la central Florida. Dichas obras estaban destinadas a abastecer la demanda urbana de Santiago y de Valparaíso: alumbrado público, uso doméstico y energía industrial. Otras ciudades menores siguieron a la capital y a la ciudad portuaria e introdujeron sus propias redes eléctricas.

### ***La electrificación del norte***

Paralelo al nacimiento de la red del Núcleo Central, la explotación de los yacimientos de Chuquicamata requirió de la energía eléctrica. Como los ríos de la zona poseían un escaso potencial, se optó por la termoelectricidad. Así, a comienzos del siglo, en el litoral, se construyó en Tocopilla una gran central térmica a partir del carbón, con su propio muelle de atraque para los buques carboneros. La electricidad se transmitía a Chuquicamata, en el interior, a través de una línea de alta tensión. La central de Tocopilla sigue siendo una pieza clave en el sistema eléctrico del norte.

La generación de electricidad se fue convirtiendo en una actividad económica que generaba grandes beneficios. En 1905 se fundaría la Compañía General de Electricidad para aprovechar los saltos de agua de la región del Biobío y Concepción.

La electricidad tuvo su mayor auge en la década de 1920. Las ciudades se electrificaron, donde incluso las viviendas más humildes tenían luz eléctrica. Las mineras del cobre y el salitre la utilizaron cada vez más. En 1920 se fundó una empresa eléctrica chileno-estadounidense, la Compañía Nacional de Fuerza Eléctrica (Conafe), y se construyó la hidroeléctrica de Maitenes, en el río Colorado, afluente del Maipo. Seis años después se creó la Sociedad Austral de Electricidad (Saesa) en la región de Arauco, cuyos principales centros de consumo fueron Puerto Montt y, a partir de 1928, Osorno. Más tarde Saesa se introdujo en la Región de Los Lagos.

La incidencia social de la electricidad motivó la intervención de los poderes públicos, que regularon el uso y la producción, fijando normas de seguridad y estableciendo un sistema de concesiones a las empresas mediante licitación pública. Esta tarea se le

encargó a la Dirección de Servicios Eléctricos y de Gas, ente estatal, en funcionamiento desde 1925.

En 1928 se inauguró la central hidroeléctrica de Queltehue y se perfeccionó la interconexión entre las dos redes principales, las de Santiago y Valparaíso. En la capital, la vieja central térmica de la calle Mapocho fue reconvertida a corriente alterna. La industria fue instalando sus propios grupos electrógenos, que en ocasiones eran centrales térmicas, como la citada de Tocopilla o la de Barquito, vinculada al yacimiento cuprífero de Potrerillos.

Pese a los avances, hasta fines de 1939 Chile era uno de los países menos desarrollados en cuanto al uso de la electricidad. La situación empezó a cambiar cuando ese mismo año se crea la Corporación de Fomento de la Producción, entidad estatal que planificó la electrificación sistemática del país.

Para desarrollar el plan de electrificación, la Corfo impulsó la creación de la Empresa Nacional de Electricidad (Endesa), la cual se fundó en 1944 con el fin de optimizar los recursos hidroeléctricos. El país fue dividido en siete regiones eléctricas, de acuerdo con los recursos generadores de cada una, considerando la situación geográfica de los ríos y la naturaleza de sus regímenes y, además, analizando las condiciones del momento y las futuras en el desarrollo del consumo de energía eléctrica.

Endesa comenzó la construcción de grandes centrales hidroeléctricas: en 1944 Pilmaiquén, en la V Región eléctrica; en 1948 Sauzal, en la III Región eléctrica; Abanico, en la IV Región, y en 1952 Los Molles, en la II Región eléctrica. Además se pusieron en funcionamiento diversas plantas termoeléctricas en Antofagasta, Copiapó, Ovalle, La Serena y Punta Arenas, entre otras.

A finales de la década de 1950 e inicios de la de los sesenta, Endesa prosiguió la construcción de centrales hidroeléctricas: en 1955 se inauguró Cipreses y en 1959, Sauzalito. En 1962, entre los lagos Calafquén y Panguipulli, se construyeron las centrales de Sauzal y Pullinque. Además, se instalaron líneas de alta tensión de 100 kw que permitieron la interconexión de los diferentes subsistemas eléctricos.



*Figura 3.2: Central Rapel, Las Cabras, VI Región.*

El abastecimiento de la región central había quedado obsoleto y sobrecargado. Para afrontar el problema, la Compañía Chilena de Electricidad (Chilectra) construye las centrales térmicas de Renca, en 1962, y Ventanas 1, en 1964. Entre 1960 y 1970 se construyeron grandes hidroeléctricas: Rapel, de 350 MVA, se inauguró en 1968, y El Toro, de 400 MVA, en el río Laja, en 1973. Dos nuevos gigantes empezaron a generar electricidad en la década de 1980: Antuco, con 300 MW, y Colbún-Machicura (490 MW).

Pese al gran desarrollo en plantas generadoras, las características del territorio chileno, con sus enormes distancias de norte a sur, han impedido la integración de los diversos subsistemas eléctricos. En la actualidad existen cuatro de ellos, pero los dos más importantes son el subsistema Norte, basado fundamentalmente en las centrales termoeléctricas, y el Sistema Interconectado Central, con aporte hidroeléctrico. Los dos restantes funcionan en la zona sur y en la más austral.

La primera zona eléctrica, en las regiones de Tarapacá y Antofagasta, tenía su sistema de generación en manos de empresas particulares. La participación de Endesa era inferior al 20 por ciento. La estrategia seguida por Endesa en esta zona fue la de firmar contratos de cooperación con los grandes productores locales, principalmente con los propietarios de Tocopilla; de esta manera, el subsistema Norte quedó integrado, aunque aislado del subsistema Central.

El Sistema Interconectado Central cubre desde la III Región hasta Los Lagos, incluyendo

Chiloé, que enlaza con el mismo por cable submarino. El abastecimiento de esta zona, que es la de mayor consumo, depende de las empresas Chilectra y Endesa.

En septiembre de 2004 Endesa puso en marcha la central hidroeléctrica de Ralco, en el Alto Biobío. El proyecto requirió la construcción de una central hidroeléctrica a unos 120 km al sudeste de Los Ángeles y a unos 30 km aguas arriba de la central Pangue, la cual comenzó a producir energía en marzo de 1996. La Central Ralco tiene una potencia instalada de 570 MWA, con una producción de 3.380 millones de kw/h, equivalente al 18 por ciento de la energía producida por todo el sistema interconectado central.



*Figura 3.3: Central Ralco, Alto Bio-Bio, VIII Región*

La presa tiene una longitud de 370 m y una altura de 155 m, generando un embalse de 3.467 hectáreas. La construcción del embalse ocupó 638 hectáreas de las comunidades Quepuca-Ralco y Ralco-Lepoy, pertenecientes al grupo étnico pehuenche, que, amparándose en lo dispuesto por la ley Indígena 19.253 de 1993, se oponían al abandono de sus tierras. Endesa entregó los fundos de El Barco, El Huachi y Santa Laura para compensar la pérdida del territorio a los pehuenches.

Actualmente, el SIC suministra energía al servicio público desde Taltal por el Norte hasta la Isla Grande de Chiloé por el sur. Existen 18 centrales hidráulicas que suman en potencia de 2.182 megawatts (MW) y representan el 74% de la potencia total instalada. El resto corresponde a las centrales térmicas que funcionan con carbón o petróleo.

## 3.2 Situación Energética en Chile

### 3.2.1 Energía Primaria

Las energías primarias son aquellas provistas por los recursos naturales y que se utilizan de forma directa sin sufrir algún proceso de transformación. Según el BNE 2007, la oferta de energías primarias en Chile para ese período fue de 301.381 GWh. En nuestro país estas fuentes corresponden principalmente al petróleo crudo, gas natural, carbón, hidroelectricidad y leña. El balance de dichas fuentes se muestra en la Figura 3.4:

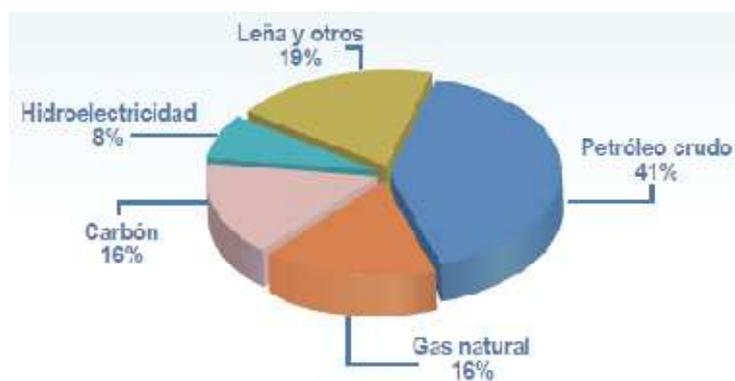


Figura 3.4: Distribución de fuentes de energía. Fuente: BNE 2007.

Del gráfico anterior se aprecia la gran dependencia de fuentes externas. Chile debe importar el petróleo y el gas natural, que constituyen más de la mitad de la energía total que consume el país, como se muestra en la Figura 3.5:



Figura 3.5: Dependencia de fuentes externas. Fuente: CNE

### 3.2.2 Energía Eléctrica

En nuestro país la electricidad se genera a partir de cuatro grandes fuentes. Estas son: la hidroeléctrica (38%), carbón (26%), petróleo combustible (22%) y gas natural (10%). El resto corresponde a fuentes de energía renovable no convencional (ERNC), como son la pequeña hidráulica, eólica y biomasa, que en total constituyen un 3,1% de la generación.

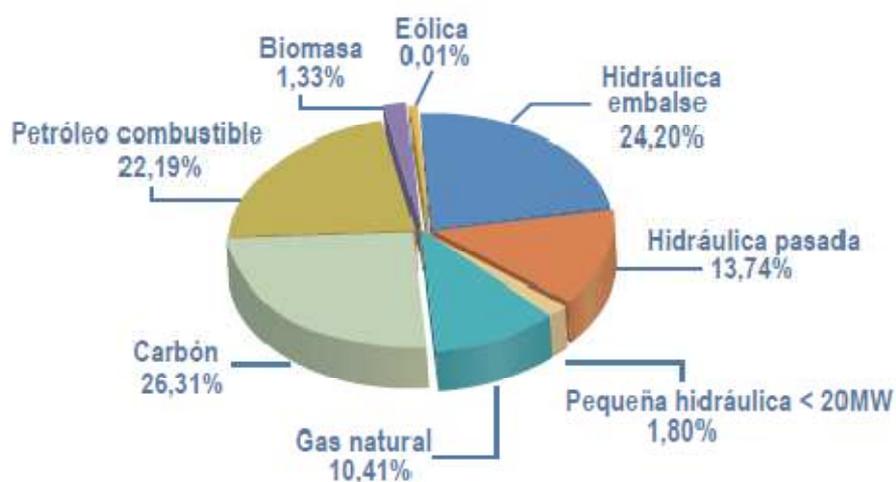


Figura 3.6: Generación eléctrica por fuente de origen. Fuente: BNE 2007

Esta distribución se encuentra actualmente estable, si bien algunas fuentes, como la hidráulica, varían su generación cada año. En el año 2007, la generación total fue de 55,9 GWh.

En cuanto al consumo, en nuestro país éste está directamente relacionado con la actividad económica, donde el sector minero concentra un 37%, otras industrias un 31%, y la suma de los sectores residencial, comercial y público otro 31%.

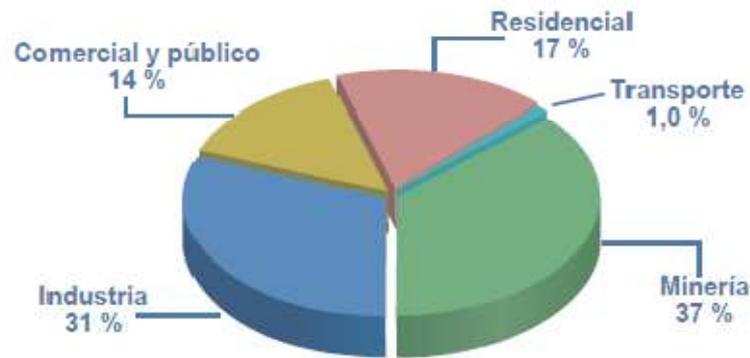


Figura 3.7: Distribución del consumo eléctrico por sector. Fuente: BNE 2007

### 3.3 Sistema Eléctrico Chileno

Un sistema eléctrico es el conjunto de instalaciones de centrales eléctricas generadoras, líneas de transporte, subestaciones eléctricas y líneas de distribución, interconectadas entre sí, que permite generar, transportar y distribuir energía eléctrica.

En Chile se clasifican según su tamaño. Los sistemas mayores corresponden a aquellos con una capacidad instalada de generación igual o superior a 200 MW, los medianos tienen una capacidad instalada superior a 1,5 MW e inferior a 200 MW y los pequeños una capacidad instalada igual o inferior a 1,5 MW. Los principales sistemas eléctricos en Chile son 4:

- **El Sistema Interconectado del Norte Grande (SING):** Sistema mayor que abastece la Zona Norte del país, desde Arica por el norte hasta la localidad de Coloso por el sur. A diciembre de 2007, constituía el 28% de la capacidad total instalada en el país, pero solamente abastece al 5,8% de la población. Su generación es fundamentalmente térmica y orientada a la industria minera.
- **El Sistema Interconectado Central (SIC):** Sistema mayor que abastece la Zona Central

del país, desde Taltal por el norte hasta Quellón, en la isla de Chiloé, por el sur. La distancia entre ambas localidades es de aproximadamente 2.100 km. Constituye el 71% de la capacidad instalada total del país y sirve al 90% de la población.

- **El Sistema Eléctrico de Aysén:** En la práctica corresponde a cinco sistemas medianos ubicados en la Zona Sur del país: Palena, Hornopirén, Carrera, Cochamó y Aysén. Su capacidad conjunta corresponde al 0,4% de la capacidad instalada nacional.

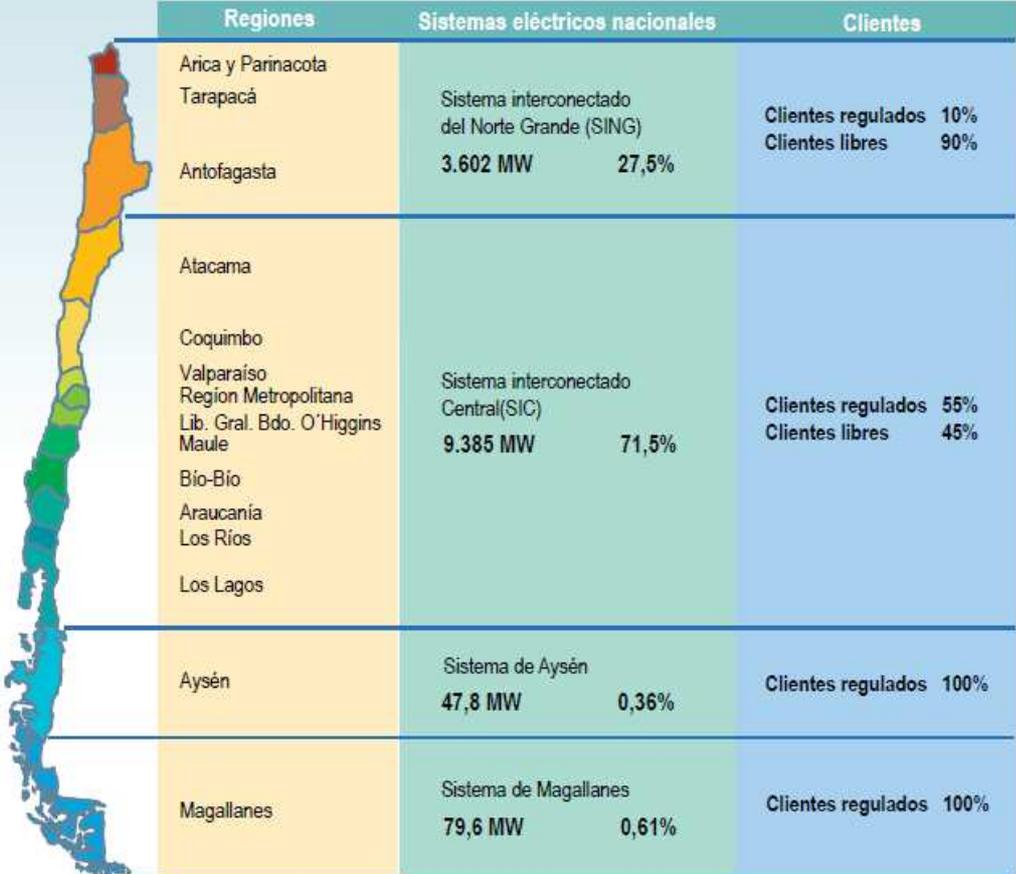
- **El Sistema Eléctrico de Magallanes:** Corresponde a cuatro subsistemas medianos: Punta Arenas, Puerto Natales, Porvenir y Puerto Williams, que abastecen a las ciudades del mismo nombre. Se localiza en el extremo más austral del país. Su capacidad instalada conjunta corresponde al 0,6% de la capacidad instalada nacional.

La siguiente tabla resume la capacidad instalada a diciembre de 2007 en cada uno de los sistemas, desagregada en fuentes convencionales y energías renovables no convencionales:

Fuente	SIC	SING	Magallanes	Aysén	Total
Hidráulica > 20 MW	4.771	0	0	0	4.771
Combustibles Fósiles	4.035	3.589	80	26	7.729
Total Convencional	8.806	3.589	80	26	12.500
Hidráulica < 20 MW	104	13	0	20	136
Biomasa	191	0	0	0	191
Eólica	18	0	0	2	20
Total ERNC	313	13	0	22	347
Total Nacional	9.118	3.602	80	48	12.847

Tabla 3.1: Capacidad instalada por sistema. Fuente: CNE.

La Figura 3.8 muestra detalles de capacidades instaladas hasta el año 2007:



Regiones	Sistemas eléctricos nacionales	Clientes
Arica y Parinacota Tarapacá Antofagasta	Sistema interconectado del Norte Grande (SING) 3.602 MW      27,5%	Clientes regulados 10% Clientes libres 90%
Atacama Coquimbo Valparaíso Región Metropolitana Lib. Gral. Bdo. O'Higgins Maule Bio-Bío Araucanía Los Ríos Los Lagos	Sistema interconectado Central(SIC) 9.385 MW      71,5%	Clientes regulados 55% Clientes libres 45%
Aysén	Sistema de Aysén 47,8 MW      0,36%	Clientes regulados 100%
Magallanes	Sistema de Magallanes 79,6 MW      0,61%	Clientes regulados 100%

Figura 3.8: Fuente: CNE

Año a año, la generación de cada sistema va aumentando de acuerdo a nuevas inversiones, que a su vez van acorde al crecimiento de la demanda. Sin embargo, en los últimos años se ha evidenciado una baja en el nivel de estas inversiones, con la consiguiente baja en el nivel de la producción eléctrica. Como se observa en los siguientes gráficos, para el caso del SIC se tiene una fuerte caída en la reserva, es decir, el superávit de energía, al orden del 35%.

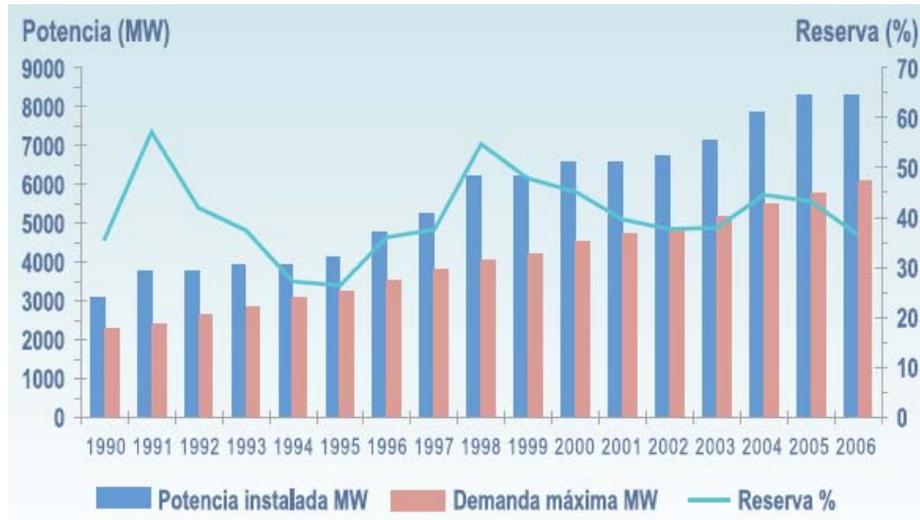


Figura 3.9: Capacidad Instalada y reserva porcentual, SIC. Fuente: CNE

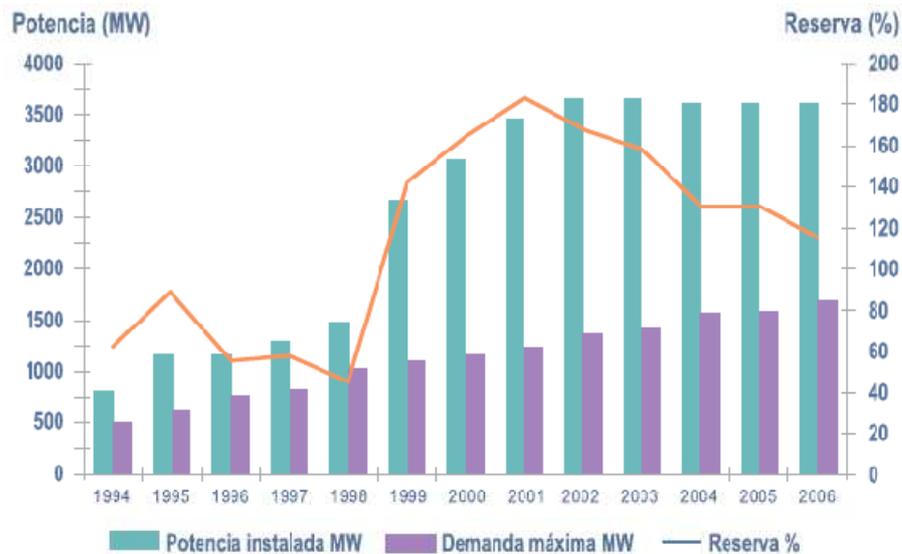


Figura 3.10: Capacidad Instalada y reserva porcentual, SING. Fuente: CNE

### 3.3.1 Funcionamiento del mercado eléctrico chileno.

En la industria eléctrica nacional participan 70 empresas, de las cuales 28 son generadoras, 5 son transmisoras y 37 distribuidoras. Al igual como sucede en la mayoría de los sistemas a nivel internacional, el sector eléctrico chileno tiene un alto nivel de concentración de

mercado. A modo de ejemplo, para el año 2006, tres empresas y sus filiales poseían el 89% de la potencia instalada de servicio público del SIC (Endesa 51%, Colbún 20%, AES Gener 19%). Otras doce empresas poseen el 10% restante.

Estas empresas son controladas en su totalidad por capitales privados. El Estado sólo ejerce funciones de regulación, fiscalización y planificación de inversiones, siendo esta última de carácter indicativo solamente. Dichas funciones las realiza a través de distintas instituciones, cada una con tareas específicas. Ellas son:

- La Comisión Nacional de Energía (CNE)
  
- La Superintendencia de Electricidad y Combustibles (SEC)
  
- La Comisión Nacional del Medio Ambiente (CONAMA)
  
- El Panel de Expertos de la Ley General de Servicios Eléctricos
  
- Los Centros de Despacho Económico de Carga (CDEC)

### **3.3.2 La Comisión Nacional de Energía (CNE)**

La Comisión Nacional de Energía (CNE) es un organismo fiscal, autónomo y descentralizado, creado bajo el amparo del Decreto Ley N° 2.224 del 25 de mayo de 1978. Es la entidad encargada de elaborar y coordinar los planes, políticas y normas para el buen funcionamiento y desarrollo del sector energía y asesorar al gobierno en todas aquellas materias relacionadas con la energía.

Realiza una planificación indicativa de inversiones en generación y transmisión, elabora los reglamentos y normas; le corresponde efectuar el cálculo de tarifas a clientes regulados, entre otras actividades que se encuentran expresamente indicadas en la ley.

La dirección superior de la CNE corresponde a un Consejo Directivo integrado por un

representante del Presidente de la República, quien tiene el rango de Ministro Presidente de la Comisión Nacional de Energía, y por los Ministros de Minería; de Economía, Fomento y Reconstrucción; de Hacienda; de Defensa Nacional; de la Secretaría General de la Presidencia; y de Planificación y Cooperación. Cabe mencionar que durante el año 2008 entró a tramitación al Congreso de la República un proyecto de ley que crea el Ministerio de Energía, por lo que la CNE quedaría adscrita a este ministerio.

### **3.3.3 La Superintendencia de Electricidad y Combustibles (SEC)**

La Superintendencia de Electricidad y Combustibles (SEC) fue creada en el año 1984. Desde entonces sus funciones han evolucionado y en la actualidad, de acuerdo a lo establecido en las Leyes N° 18.410 de 1985 y N° 19.613 del 8 de junio de 1999, tiene por misión vigilar la adecuada operación de los servicios de electricidad, gas y combustibles, en términos de su seguridad, calidad y precio.

Es responsabilidad de la SEC fiscalizar el cumplimiento de las disposiciones legales, reglamentarias y normativas, otorgar las concesiones provisionales de plantas productoras de gas, de centrales productoras de energía eléctrica, de subestaciones eléctricas, de líneas de transporte y de líneas de distribución de energía eléctrica, resolver conflictos, autorizar servidumbres, amonestar, aplicar multas, entre otras.

### **3.3.4 La Comisión Nacional del Medio Ambiente (CONAMA)**

La Comisión Nacional del Medio Ambiente (CONAMA), es la institución del Estado que tiene como misión velar por el derecho de la ciudadanía a vivir en un medio ambiente libre de contaminación, la protección del medio ambiente, la preservación de la naturaleza y la conservación del patrimonio ambiental. CONAMA fue creada en 1994 por la Ley N°19.300 de Bases Generales del Medio Ambiente.

Es responsabilidad de CONAMA actuar como un servicio de consulta, análisis, comunicación y coordinación en materias relacionadas con el medio ambiente. Además, debe proponer al Presidente de la República, políticas para la gestión ambiental e informar sobre el cumplimiento de la legislación vigente. Asimismo, es la encargada de administrar el Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA), elaborar normas ambientales y planes de prevención y descontaminación, entre otras.

La ley contempla, además, la existencia de las Comisiones Regionales de Medio Ambiente (COREMAS). Son comisiones que se reúnen periódicamente para coordinar la gestión ambiental de la región, como sucede con la calificación ambiental de los proyectos o actividades sometidas al Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental u otra decisión regional importante. Las COREMAS están integradas por el Intendente Regional, quien la preside, los Gobernadores provinciales de la región, los Secretarios Regionales de aquellos Ministerios que forman el Consejo Directivo de CONAMA, cuatro consejeros regionales, y el Director Regional de la CONAMA, que actúa como secretario.

La ley contempla, además, la existencia de un Comité Técnico de COREMA, el cual está integrado por el Director Regional de CONAMA, que lo preside, y por los directores regionales de los servicios públicos que tengan competencia en materias ambientales.

Análogamente al sector energía, durante el año 2008 entró a tramitación al Congreso de la República un proyecto de ley que crea el Ministerio del Medio Ambiente.

### **3.3.5 Los Centros de Despacho Económico de Carga (CDEC)**

Son órganos de derecho privado encargados de coordinar la operación del sistema eléctrico, tienen sus funciones definidas en la Ley Eléctrica y en el Reglamento aprobado por el Decreto Supremo N° 291 de fecha 4 de octubre de 2008, con la responsabilidad de:

- Preservar la seguridad global del sistema eléctrico.
- Garantizar la operación más económica para el conjunto de las instalaciones del

sistema eléctrico.

- Garantizar el acceso abierto a los sistemas de transmisión.
- Determinar los costos marginales de energía y las transferencias económicas entre los integrantes del CDEC.

Cada sistema interconectado mayor posee su propio CDEC, por lo que existen el CDEC-SIC y CDEC-SING para los sistemas interconectados central y del norte grande respectivamente.

Los integrantes del CDEC corresponden a todas aquellas empresas que posean instalaciones de generación, transmisión, subtransmisión, transmisión adicional y clientes libres conectados directamente a instalaciones de transmisión. Sin embargo, de acuerdo con la reglamentación, se pueden abstener de conformar el CDEC las empresas que cumplan con las siguientes características:

- Empresas propietarias de centrales eléctricas, cuya capacidad instalada total sea inferior a 9 MW.
- Empresas que posean la calidad de autoproducción, cuyos excedentes totales de capacidad instalada de generación sean inferiores a 9 MW.
- Empresas propietarias de instalaciones de transmisión troncal, cuyos tramos de líneas de transmisión troncal no superen, en total, los 100 kilómetros.
- Empresas propietarias de instalaciones de subtransmisión cuyos tramos de líneas de subtransmisión no superen, en total, los 100 kilómetros.
- Empresas propietarias de instalaciones de transmisión adicionales, cuyos tramos de líneas de transmisión adicional no superen, en total, 100 kilómetros.

- Clientes libres cuya barra de consumo por medio de la cual se conectan a un sistema de transporte tenga una potencia total en dicha barra inferior a 4 MW.

### **3.3.6 El Panel de Expertos de la Ley General de Servicios Eléctricos**

El Panel de Expertos de la Ley General de Servicios Eléctricos es un órgano creado por la Ley N° 19.940 en forma exclusiva para el sector eléctrico, con competencia acotada, integrado por profesionales expertos, cuya función es pronunciarse, mediante dictámenes de efecto vinculante, sobre aquellas discrepancias y conflictos que ocurran con motivo de la aplicación de la legislación eléctrica que le deben ser sometidas conforme a la ley y sobre las demás que dos o más empresas del sector eléctrico, de común acuerdo, sometan a su decisión.

La institución la integran siete profesionales de amplia trayectoria profesional o académica. Cinco de ellos deben ser ingenieros o licenciados en ciencias económicas, nacionales o extranjeros, y dos deben ser abogados. Los integrantes y un Secretario Abogado son designados por el Tribunal de Defensa de la Libre Competencia, mediante un concurso público por periodos de seis años. La composición se renueva en forma parcial cada tres años.

### **3.3.7 Tipos de Clientes**

En el mercado eléctrico chileno existen dos tipos de clientes: el cliente regulado y el cliente libre.

#### ***Cliente Regulado***

El cliente regulado es aquél que paga una tarifa definida por la autoridad, calculada en base a una empresa distribuidora modelo que opera en forma eficiente, y al precio de compra por parte de la empresa de distribución.

Este segmento está integrado por consumidores de una potencia conectada igual o inferior a 2 MW, teniendo la posibilidad aquellos de potencia entre 500 kW y 2 MW, y que están ubicados en el área de concesión de una empresa distribuidora, de optar a ser clientes libres. Estos consumidores representan, aproximadamente, un 66% del consumo total en el SIC, y aproximadamente, un 10% del consumo del SING.

En este mercado, las ventas de las compañías generadoras están dirigidas a las empresas distribuidoras, las cuales adquieren la energía a “precio de nudo” (reflejo de componente generación y transmisión). Estos precios son determinados cada 6 meses por la Comisión Nacional de Energía, sobre la base de las proyecciones de los costos marginales esperados del sistema para los próximos 48 meses. Sin embargo, de acuerdo a los cambios legales introducidos el año 2005, el precio de nudo a partir del año 2010 debiera estar formado por el precio resultante de licitaciones de las empresas distribuidoras, según lo establecido en la Ley 20.018.

A este precio se agrega el denominado VAD (Valor Agregado de Distribución), calculado en procesos tarifarios en base a costos medios de distribución que se realizan cada 4 años. En estos procesos, a través de modelos basados en el concepto de una empresa modelo (empresa eficiente), se estima una tarifa que permite cubrir los costos de distribución con una rentabilidad de un 10%.

En base a lo anterior, la CNE procede a fijar precios máximos a nivel de usuario final (exceptuando clientes libres), considerando tres elementos básicos:

- Un cargo fijo por conexión, independiente del tamaño y uso.
- Un cargo variable por energía consumida, que integra las componentes de costos generación-transmisión y distribución.
- Un cargo variable por energía consumida en horas de punta.



*Figura 3.11: Componentes de la tarifa al cliente regulado.*

### **Cientes Libres**

El término cliente libre está designado a los clientes finales que consumen por sobre un determinado nivel mínimo, los cuales pactan libremente precios con sus suministradores.

Este segmento está integrado por consumidores cuya potencia conectada es superior a 2 MW y opcionalmente cuando supera los 0,5 MW, habitualmente de tipo industrial o minero. Se trata de clientes no sujetos a regulación de precios, que negocian libremente los precios y condiciones del suministro eléctrico con las empresas generadoras o distribuidoras. En el SIC, los clientes de esta categoría concentran aproximadamente el 30% del consumo total del sistema, en tanto que en el SING representan alrededor del 90%.

### **3.4 Proyección de oferta y demanda.**

A lo largo de la historia, nuestro país cada año ha presentado diferentes tasas de crecimiento en la demanda de energía eléctrica. Durante la década del '70, por ejemplo, hubo años con un aumento del orden del 12%, y otros con un decrecimiento del 7%. Sin embargo, durante los últimos años, el crecimiento parece estabilizarse en torno a un valor promedio del 5% anual:

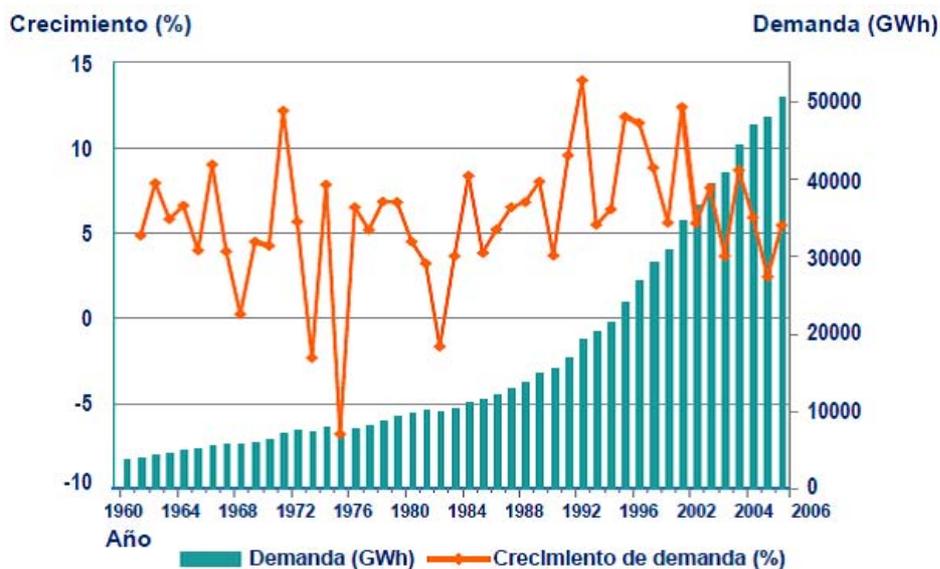


Figura 3.12: Curva de demanda y crecimiento porcentual 1960-2006. Fuente: CNE.

En todos los países, la curva de demanda energética, no sólo de electricidad sino de todos los tipos de energía, varía siempre de la mano al crecimiento económico, que comúnmente se mide a través del Producto Interno Bruto. La figura siguiente ilustra la evolución del consumo de energía en nuestro país, en contraste con el crecimiento económico, en el lapso 2000-2006:

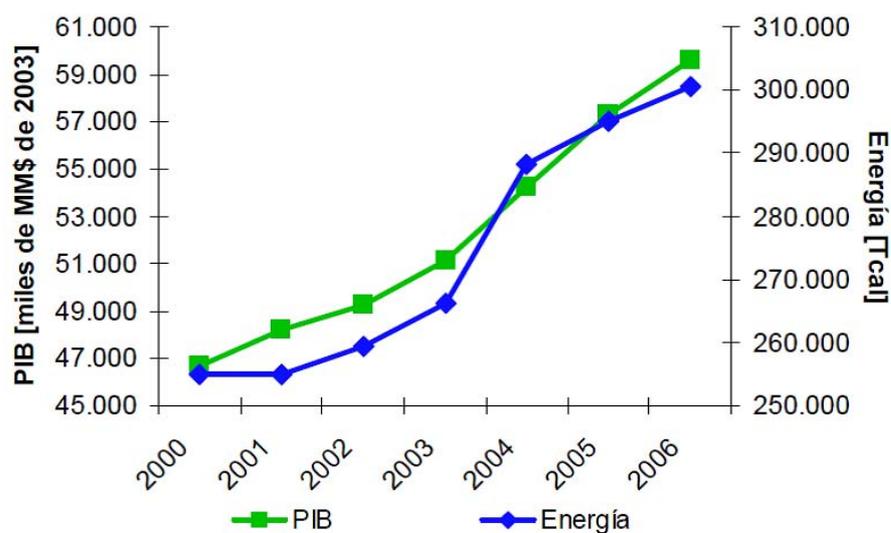


Figura 3.13: Evolución del PIB y del consumo de energía 2000-2006. Fuente: PRIEN

Por otro lado, el consumo per cápita, desde el año 2002 al 2007 ha crecido en un 51% a nivel país. Este crecimiento se ha dado sobre todo en la Región Metropolitana, como se aprecia en la figura inferior, cuyo consumo es más del doble que en el de la Zona Sur.

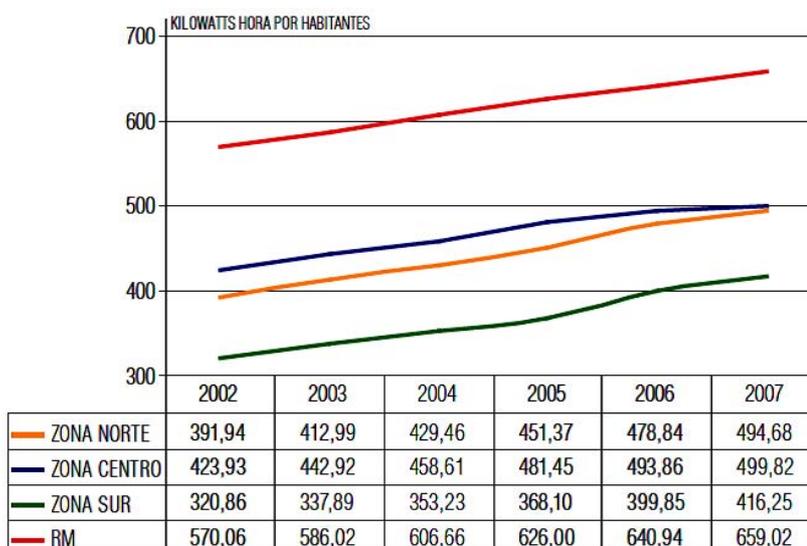


Figura 3.14: Consumo residencial per cápita 2002-2007. Fuente: INE

Con la tendencia actual, y con los datos del mercado de Precios de Nudo, es que los analistas proyectan una demanda estimada para los próximos años. En la Figura 3.15 se aprecia la proyección de la demanda para los sistemas SING y SIC al año 2025:

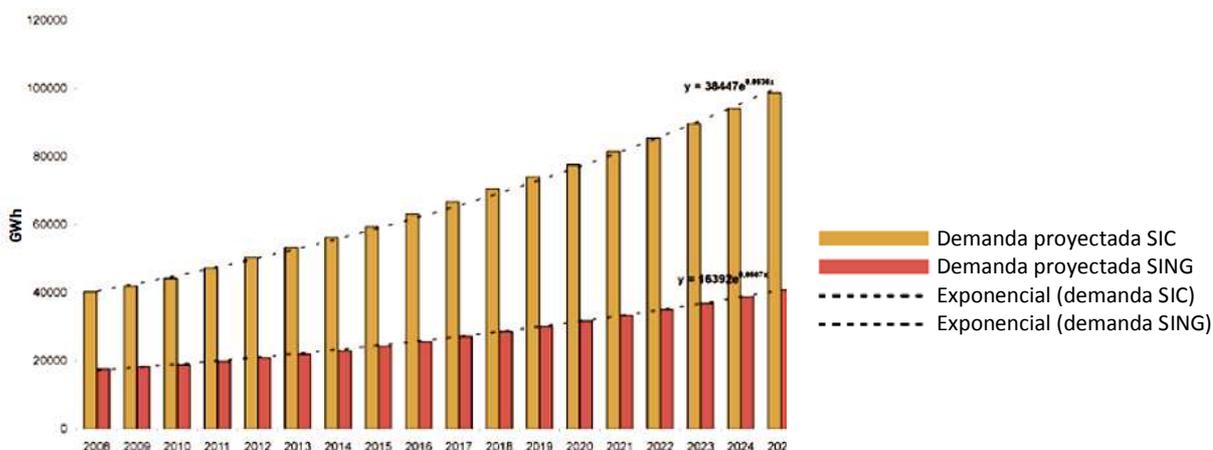


Figura 3.15: Demandas proyectadas SIC y SING. Fuente: BNE, 2008

Del mismo modo se proyecta una evolución en la demanda por sector de la economía, en este caso para el SIC:

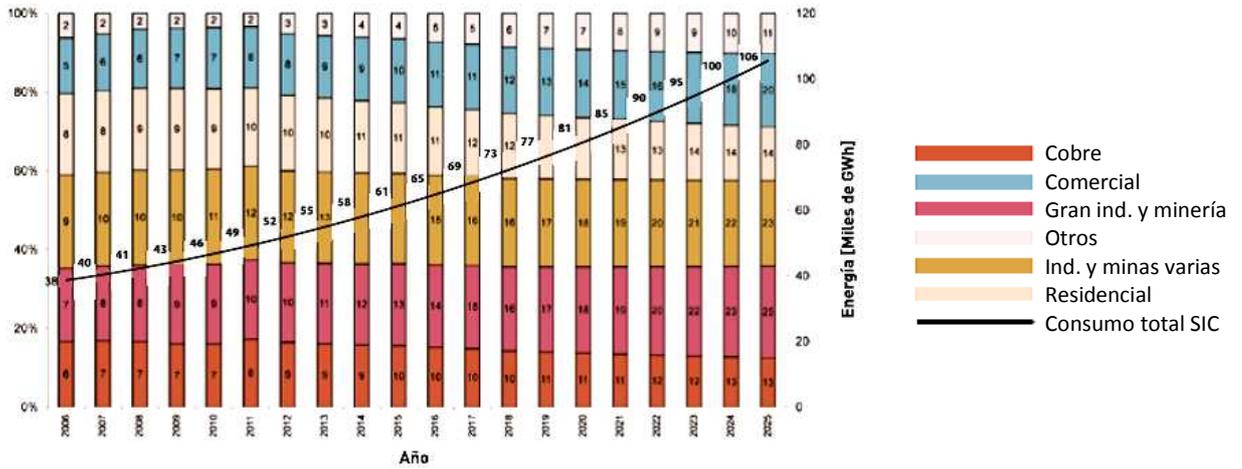


Figura 3.16: Proyección de la demanda del SIC por sector. Fuente: PRIEN 2008.

En cuanto a la oferta, para realizar su proyección se toma en cuenta la actual potencia instalada, y los actuales proyectos que han ingresado o están en proceso de ingresar al SEIA. De esta estimación se obtiene el total de energía “adicional proyectada” (ap). Por otro lado, existe la estimación que la CNE recomienda para satisfacer la demanda proyectada con un nivel aceptable de seguridad energética. A este valor se lo conoce como la energía “adicional recomendada” (‘ar’ en la Figura 3.17):

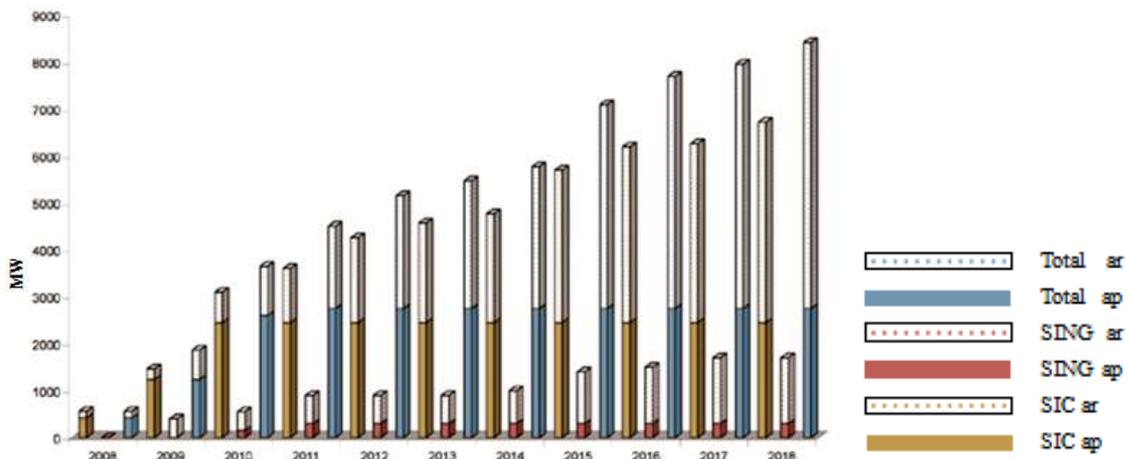


Figura 3.17: Oferta proyectada al 2018 según CNE.

Según la CNE, las actuales cifras y tendencias harían suponer un escenario de fuertes inversiones durante los próximos 20 años, para satisfacer la demanda prevista.

### 3.5 Búsqueda de alternativas.

Chile, al igual que muchos países actualmente, se encuentra en una etapa de búsqueda de alternativas para satisfacer a mediano plazo sus requerimientos proyectados de energía eléctrica.

La mayoría de los grandes proyectos que han sido aprobados en el último tiempo, o que están actualmente en trámite de evaluación en el SEIA, corresponden a centrales hidroeléctricas de embalse, en el SIC, y centrales termoeléctricas a carbón en el SING. Ambas soluciones carecen de un panorama sostenible a largo plazo. En el caso de las termoeléctricas, está el negativo impacto ambiental que provoca la combustión de carbón, y en el caso de las hidroeléctricas de embalse, además de inundar vastos territorios, con la consecuente pérdida de ecosistemas y el traslado de habitantes, existe la limitante económica, ya que el orden de construcción de estas centrales ha dado prioridad a las menos costosas, dejando para futuro las que presentan menor relación costo/beneficio.

En los siguientes gráficos se aprecia cómo la matriz energética eléctrica se inclina hacia estas dos grandes fuentes:

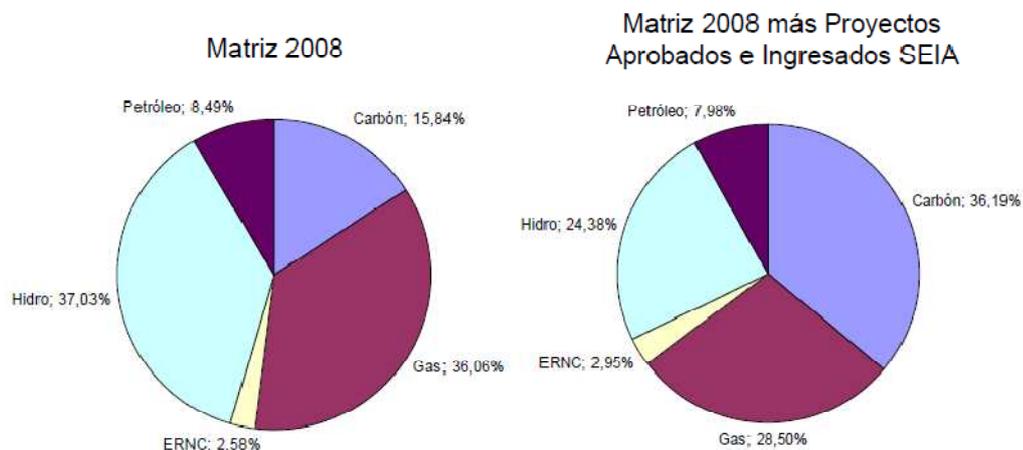


Figura 3.18: Matriz energética en 2008 más proyectos aprobados. Fuente: CNE

### 3.6 Las ERNC en Chile.

De forma general, las energías renovables son aquellas que, a escala humana, son inagotables o bien se regeneran constantemente y de forma natural. De ellas las más comunes son la solar, la eólica, hidráulica, mareomotriz, geotérmica y biomasa. A su vez, las energías renovables suelen clasificarse en convencionales y no convencionales, según sea el grado de desarrollo de las tecnologías para su aprovechamiento y la penetración en los mercados energéticos que presenten. De las convencionales, la más utilizada en nuestro país son la hidráulica y la biomasa.

Por otro lado, y de acuerdo a la última modificación de la LGSE, los medios de generación renovables no convencionales (ERNC) son los que presentan cualquiera de las siguientes características:

- Aquellos cuya fuente de energía primaria sea la energía de la biomasa, correspondiente a la obtenida de materia orgánica y biodegradable, la que puede ser usada directamente como combustible o convertida en otros biocombustibles líquidos, sólidos o gaseosos.
- Aquellos cuya fuente de energía primaria sea la energía hidráulica y cuya potencia máxima sea inferior a 20 MW.
- Aquellos cuya fuente de energía primaria sea la energía geotérmica, entendiéndose por tal la que se obtiene del calor natural del interior de la tierra.
- Aquellos cuya fuente de energía primaria sea la energía solar.
- Aquellos cuya fuente de energía primaria sea la energía eólica.
- Aquellos cuya fuente de energía primaria sea la energía de los mares, correspondiente a toda forma de energía mecánica producida por el movimiento de las mareas, de las olas

y de las corrientes, así como la obtenida del gradiente térmico de los mares.

- Otros medios de generación determinados fundadamente por la Comisión Nacional de Energía, que utilicen energías renovables para la generación de electricidad, contribuyan a diversificar las fuentes de abastecimiento de energía en los sistemas eléctricos y causen un bajo impacto ambiental, conforme a los procedimientos que establezca el reglamento.

A nivel internacional, a partir de los años 90 se ha observado un notable aumento de la participación de las ERNC en los mercados energéticos. A comienzos de 2007, la capacidad instalada de generación eléctrica con ERNC alcanzó los 182 GW a nivel mundial, equivalente a un 4 por ciento de la capacidad instalada total (4.100 GW).

Este aumento es resultado de la introducción de incentivos para las ERNC en diversos países. La motivación de los países por invertir en este sector se debe, entre otras razones, a la necesidad de diversificar las fuentes energéticas para lograr una mayor independencia de las importaciones, una mayor seguridad en el suministro y en abordar aspectos relacionados con el desarrollo sustentable.

Nuestra realidad no es muy diferente. El mercado eléctrico chileno presenta una alta dependencia de combustibles fósiles importados, y la seguridad energética se ve sensiblemente afectada según las condiciones climáticas en el caso de las centrales hidroeléctricas. Es por estos motivos que las ERNC se nos presentan como una opción atractiva para diversificar la matriz y aumentar la seguridad energética.

En los últimos años, han mejorado significativamente las condiciones para el desarrollo de las ERNC en Chile, lo que se está traduciendo en un creciente interés de inversionistas nacionales e internacionales en el desarrollo de estos proyectos en el país, así como en la puesta en marcha de los primeros proyectos en el SIC que usan energía eólica y biogás, y de nuevas pequeñas centrales hidroeléctricas y de biomasa.

Si bien la maduración tecnológica de muchas ERNC y el aumento de los precios de la energía son parte de estas nuevas condiciones, las medidas emprendidas por el Estado en la

remoción de las barreras que limitan el desarrollo de los proyectos ENC, se presentan hoy como el esfuerzo fundamental para acelerar el desarrollo del mercado asociado a esos proyectos en el país.

En este sentido, las principales líneas de acción con este fin han sido: el perfeccionamiento del marco regulatorio del mercado eléctrico, y la implementación de instrumentos de apoyo directo a iniciativas de inversión en ERNC.

Mediante el perfeccionamiento del marco regulatorio, el Gobierno ha buscado asegurar que las reglas en las que se desenvuelve el mercado eléctrico consideren las particularidades de las ERNC, al modo de facilitarles el ingreso al mercado y a los sistemas eléctricos. Además, se están haciendo esfuerzos en crear condiciones favorables para los proyectos de ERNC que permitan acelerar el desarrollo del mercado. Por otro lado, se están eliminando las barreras asociadas a la innovación, y se busca generar confianza en el mercado eléctrico respecto de este tipo de tecnologías.

Si bien el perfeccionamiento del marco regulatorio continúa, sin duda un punto clave para las ERNC fue la promulgación, en abril de 2008, de la Ley para el desarrollo de las ERNC (Ley 20.257). En ella se establece la obligación para las empresas eléctricas, de que un porcentaje de la energía comercializada provenga de fuentes ERNC. Las disposiciones principales de dicha ley son:

- Cada empresa eléctrica que efectúe retiros de energía desde los sistemas eléctricos con capacidad instalada superior a 200 MW (es decir, el SING y el SIC) para comercializarla con distribuidoras o con clientes finales, deberá acreditar que una cantidad de energía equivalente al 10% de sus retiros en cada año calendario haya sido inyectada a cualquiera de dichos sistemas, por medios de generación renovables no convencionales, propios o contratados.
- Entre los años 2010 y 2014, la obligación de suministrar energía con medios renovables no convencionales será de 5%. A partir de 2015, este porcentaje se incrementará en 0,5% anual, hasta llegar al 10% en el año 2024. Este aumento progresivo se aplicará de tal

manera, que los retiros afectos a la obligación el año 2015, deberán cumplir con un 5,5%, los del año 2016 con un 6% y así sucesivamente, hasta alcanzar el año 2024 el 10% provisto.

- La empresa eléctrica que no acredite el cumplimiento de la obligación al 1 de marzo siguiente al año calendario correspondiente, deberá pagar un cargo, cuyo monto será de 0,4 UTM20 por cada MWh de déficit respecto de su obligación. Si dentro de los tres años siguientes incurriese nuevamente en incumplimiento de su obligación, el cargo será de 0,6 UTM por cada MWh de déficit.
- Esta obligación regirá a contar del 1 de enero del año 2010, y se aplicará a todos los retiros de energía para comercializarla con distribuidoras o con clientes finales cuyos contratos se suscriban a partir del 31 de agosto de 2007, sean contratos nuevos, renovaciones, extensiones u otras convenciones de similar naturaleza.
- Las obligaciones pueden acreditarse con indiferencia del sistema interconectado en que se realicen las inyecciones (SIC o SING), es decir, una empresa que suministra energía en el SIC puede usar ERNC producida en el SING para fines de acreditación, para lo cual la ley establece la coordinación necesaria de los CDEC.
- Cualquier empresa eléctrica que exceda su obligación de inyecciones de energía renovable no convencional podrá convenir el traspaso de sus excedentes a otra empresa eléctrica, los que podrán realizarse incluso entre empresas de diferentes sistemas eléctricos.

A pesar de que el mercado eléctrico en Chile está muy concentrado, y la presencia de grandes empresas en el rubro hace más difícil la competitividad de las nuevas tecnologías, en este caso, de las ERNC, las medidas del Estado parecieran empezar a tener frutos. La Tabla 3.2 muestra los proyectos en ERNC aprobados por el SEIA a fines de 2008:

No	Nombre	MW	Tipo	Región	Titular	DIA o EIA
1	Central Hidroeléctrica Don Alejo	4,8	Hidroeléctrica	X	Rhomaya Ltda.	DIA
2	Central Hidroeléctrica Trueno	6	Hidroeléctrica	IX	Ganadera y Agrícola Ltda.	DIA
3	Aumento de Generación en Complejo Colbún	19,4	Hidroeléctrica	VII	Colbún S.A.	DIA
4	Central Hidroeléctrica Licán	15	Hidroeléctrica	X	Inv. Candelaria Ltda.	EIA/DIA
5	Minicentral Hidroeléctrica Ojos de Agua	9	Hidroeléctrica	VII	Endesa Eco	DIA
6	Central Hidroeléctrica Alto Cautín	6	Hidroeléctrica	IX	Agrícola Río Blanco S.A.	DIA
7	Central Hidroeléctrica Puclaro	5,4	Hidroeléctrica	IV	Hidroeléctrica Puclaro S.A.	DIA
8	Central Hidroeléctrica Chilcoco	12	Hidroeléctrica	X	Ganadera y Forestal Carrán Ltda.	DIA
9	Central Hidroeléctrica Lircay	19,04	Hidroeléctrica	VII	Hidromaule S.A.	DIA
10	Central Hidroeléctrica Pulelfú	9	Hidroeléctrica	X	Empresa Eléctrica La Leonera S. A.	DIA
11	Central Hidroeléctrica Convento Viejo	14	Hidroeléctrica	VI	Central Hidroeléctrica Convento Viejo S.A.	DIA
12	Central Hidroeléctrica Balalita	10,94	Hidroeléctrica	IV	Hidroeléctrica Río Turbio Ltda.	DIA
13	Acueducto Hidroeléctrica Cuchildeo	0,8	Hidroeléctrica	X	Sociedad de Inversiones BEC S.A.	DIA
14	Central Hidroeléctrica San Clemente	6	Hidroeléctrica	VII	Colbún S.A.	DIA
15	Minicentral Hidroeléctrica El Manzano	4,7	Hidroeléctrica	IX	José Pedro Fuentes de la Sotta	DIA
16	Proy. Hidroeléctrico Río Blanco-Encalada	3,3	Hidroeléctrica	X	Alex Jurgen Ziller Bustamante	DIA
17	Minicentral Hidroeléctrica	5,5	Hidroeléctrica	X	Hidroaustral S.A.	DIA

	de Pasada Río Blanco Rupanco					
18	Central Don Walterio	2	Hidroeléctrica	X	Rhomaya Ltda.	DIA
19	Central Hidroeléctrica Río Blanco,Hornopiren	18	Hidroeléctrica	X	Hydroenergía Chile S.A.	DIA
20	Minicentral Hidroeléctrica La Paloma	4,5	Hidroeléctrica	IV	Hydroenergía Chile S.A.	DIA
21	Minicentral Hidroeléctrica de Pasada Río Nalcas	3,5	Hidroeléctrica	X	Hidroaustral S.A.	EIA/DIA
22	Minicentrales Hidroeléctricas de Pasada Palmar- Correntoso	13	Hidroeléctrica	X	Hidroaustral S.A.	DIA
23	Central de Pasada Carilafquén-Malalcahuello	18,3	Hidroeléctrica	IX	Eduardo Jose Puschel Schneider	DIA
24	Central de Pasada Tacura	5,87	Hidroeléctrica	IX	Mario García Sabugal	DIA
25	Pequeña Central Hidroeléctrica Dongo	5	Hidroeléctrica	X	Hidroeléctrica Dongo Ltda.	DIA
26	Central Hidroeléctrica Guayacan	10,4	Hidroeléctrica	RM	Energía Coyanco S.A.	DIA
27	Proyecto Parque Sra. Rosario	84	Eólica	III	Acciona Energía S.A. Endesa Eco	DIA
28	Proyecto Eólico Canela	18,15	Eólica	IV	Energías Renovables del Bío-Bío	DIA
29	Campos Eólicos Altos de Hualpen	20	Eólica	VIII	Com. Barrick Chile Generación Ltda.	DIA
30	Parque Eólico Punta Colorada	20	Eólica	IV	Ingeniería Seawind Sudamérica Ltda.	DIA
31	Parque Eólico Monte Redondo	74	Eólica	IV	Empresa Eléctrica de Aysén S.A.	DIA
32	Aumento Potencia Central Eólica Alto Baguales	1,7	Eólica	XI	Norvind S.A.	DIA
33	Parque Eólico Totoral	44,55	Eólica	IV	Endesa Eco	DIA
34	Parque Eólico Canela II	60	Eólica	IV	Barrick Chile Generación Ltda.	DIA

35	Ampliación Parque Eólico	16	Eólica	IV	CBB Forestal S.A.	DIA
36	Punta Colorada	4 a 6	Biomasa	VIII	Forestal y Papelera Concepción S.A.	DIA
37	Cogeneración de Energía con Biomasa Vegetal	10	Biomasa	VIII	MASISA S.A.	DIA
38	Cogeneración de Energía de Forestal y Papelera Concepción S.A.	9,6	Biomasa	VIII	Celulosa Arauco y Constitución S.A.	EIA/DIA
39	Sistema de Cogeneración de Energía MASISA Cabrero	31	Biomasa	VIII	Compañía Papelera del Pacífico S.A.	DIA
40	Planta de Cogeneración con Biomasa en CFI Horcones	15	Biomasa	VI	Rhomaya Ltda.	DIA
	<b>TOTAL MW</b>	<b>640</b>				

*Tabla 3.2: Proyectos en ERNC aprobados por el SEIA hasta fines de 2008.*

Claramente, se aprecia que la mayoría de los proyectos son del área hidroeléctrica. Sin embargo, ya empiezan a aparecer importantes proyectos eólicos y sistemas de aprovechamiento de la biomasa. Además, la gran mayoría de los proyectos hidroeléctricos son de tipo pasada y no de embalse, que es el tipo convencional y que genera mayores impactos socio-ambientales. De continuar esta tendencia, los proyectos futuros poco a poco podrían diversificar la matriz, con la consiguiente mejora de la seguridad energética a nivel país.

De la mano de los esfuerzos por fomentar las ERNC, cabe destacar también la presencia de efectivos planes de Eficiencia Energética. Si bien durante 2008 la economía chilena y mundial se contrajo, con la consiguiente baja en la demanda de energéticos, sobre todo combustibles, las campañas de buenas prácticas en materia de ahorro energético tuvieron un impacto positivo determinante, tanto en el sector público-residencial, como también en el sector industrial y comercial. Para 2009, durante el primer semestre, el consumo de electricidad del sector centro-sur del país se contrajo en un 0,5%, respecto del año pasado.

De mantenerse este panorama, la combinación de ERNC y EE podría significar a mediano y largo plazo una de las mejores armas a la hora de enfrentar el futuro déficit energético proyectado por los especialistas. De paso, Chile podría adquirir una importante evolución en materia de gestión de recursos, no sólo atribuible al esfuerzo político sino también a un cambio en la cultura de las personas.

## Capítulo 4:

### Energía Solar para la generación eléctrica.

#### 4.1 El Sol

Nuestra estrella, Sol, es el astro que nos entrega día a día la energía necesaria para la vida en la Tierra. Al ser la más cercana, de su estudio se han obtenido las teorías que explican el comportamiento de otras estrellas y buena parte de los fenómenos de todo el universo físico. Si bien aun se desconocen importantes detalles, tanto de su composición como de su comportamiento, debido a la radiación que incide sobre la Tierra ha sido posible deducir su estructura, la materia que lo conforma y qué tipos de reacciones ocurren en él.



*Figura 4.1: Fotografía real del Sol, SOHO 2009.*

La astronomía clasifica a las estrellas según varios criterios, siendo la temperatura y el tamaño-luminosidad los más importantes. Gracias a Planck, se sabe que la radiación que emite un cuerpo va en directa relación con su temperatura, de tal manera que, a mayor temperatura, la energía irradiada se concentra en frecuencias más altas.

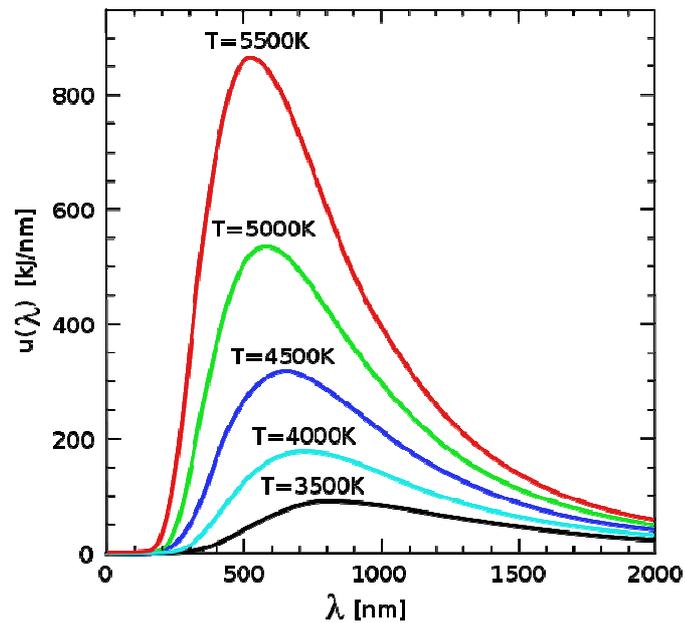


Figura 4.2: Curvas de Planck.

De esta maneira existe a *clasificación espectral de Harvard*, desarrollada en dicha Universidad, la cual asigna distintas letras según diferentes rangos de temperatura. Dado que la mayor parte de la radiación de las estrellas se concentra en el espectro visible, a estas letras se les asocia también con un color:

Tipo espectral	Color	Temperatura (°C)
O	Azul	30.000 – 40.000
B	Celeste	12.000 - 25.000
A	Blanco	8.000 – 12.000
F	Amarillo Claro	~7.000
G	Amarillo ( <b>Sol</b> )	4.000 – 6.000
K	Naranja	~4.000
M	Rojo	2.000 – 3.500

Tabla 4.1: Clasificación espectral de Harvard.

A su vez, cada letra contiene subniveles de 0 a 9, de mayor a menor temperatura respectivamente. Así, el Sol pertenece a la clase G2, con una temperatura promedio en su superficie un poco menor a los 6000 °C. Debido a ello es que la mayor parte de su radiación de espectro visible se concentra en el color amarillo.

Por otro lado, según la luminosidad de las estrellas, que está intrínsecamente relacionada con el tamaño de éstas, existe la *clasificación MKK* (Morgan, Keenan, Kellman), que asigna números romanos del I al VII. El Sol, pertenece a la clase luminosa V (enana):

N°	Descripción
I	Supergigantes
II	Gigantes brillantes
III	Gigantes
IV	Sub-gigantes
V	Enanas ( <b>Sol</b> )
VI	Sub-enanas
VII	Enanas blancas

*Tabla 4.2: Clasificación de Morgan, Keenan y Kellman.*

De este modo hoy en día se clasifica a nuestra estrella como una “enana amarilla”, es decir, del tipo G2V. Esto le confiere características físico-químicas bien específicas, que son responsables de la cantidad y calidad de radiación que recibe nuestro planeta a diario. A continuación se presenta una tabla resumen con las más importantes:

Diámetro	1.392.000 Kms
Superficie	$6,09 \times 10^{18}$ m <sup>2</sup>
Volumen	$1,41 \times 10^{27}$ m <sup>3</sup>
Masa	$1,9891 \times 10^{30}$ Kg

Densidad	1.411 Kg/m <sup>3</sup>
Gravedad en la superficie	274 m/s <sup>2</sup>
Temperatura de la superficie	5.780 °K
Temperatura de la corona	5.000.000 °K
Temperatura del núcleo	13.600.000 °K
Luminosidad (LS)	$3,827 \times 10^{26}$ W
Período de rotación en el Ecuador	27° 6' 36"
Período orbital galáctico	$2,2 \times 10^8$ años
<b>Hidrógeno</b>	<b>73.46%</b>
<b>Helio</b>	<b>24.85%</b>
Oxígeno	0.77%
Carbono	0.29%
Hierro	0.16%
Neón	0.12%
Nitrógeno	0.09%
Silicio	0.07%
Magnesio	0.05%
Azufre	0.04%

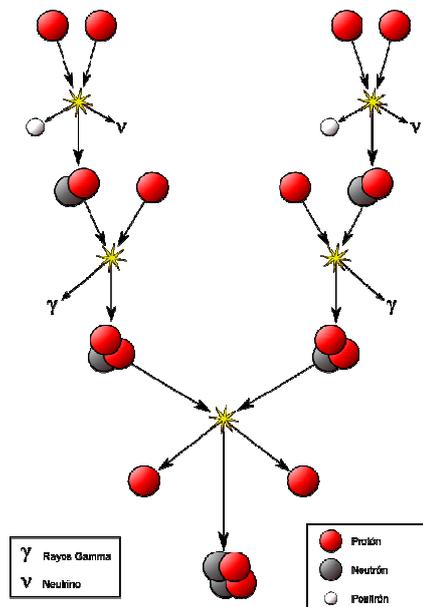
*Tabla 4.3: Principales características físico-químicas del Sol.*

**Estructura:**

De la observación y captación se cree que el Sol posee una estructura interna formada por cuatro capas. Estas son: núcleo, zona radiante, zona convectiva y fotosfera, su capa exterior visible. Además, cuenta con una atmósfera formada por otras dos capas llamadas cromósfera y corona, la que habitualmente podemos ver durante los eclipses.

El núcleo, comprende 1/5 del radio total del Sol, con un 2% del volumen total, y el 50% de su masa. Está formado principalmente por hidrógeno y helio en proporciones relativamente

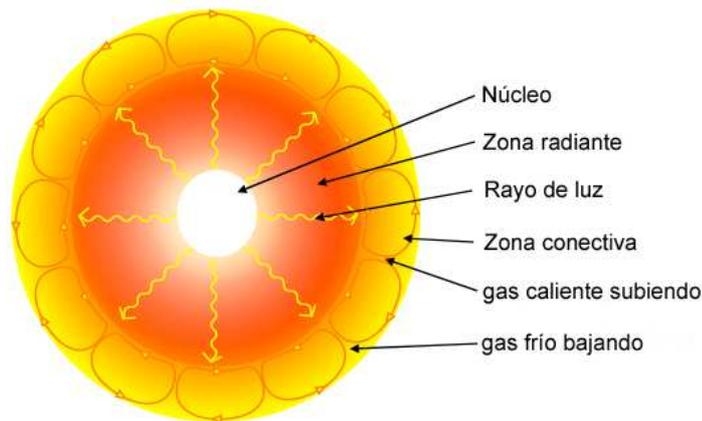
iguales (49%), y una pequeña cantidad de otros elementos (2%). Su temperatura estimada es de 15.000.000 °K, y su presión aproximadamente unas  $10^{11}$  atmósferas terrestres. En tales extremas condiciones, el hidrógeno se encuentra completamente ionizado, es decir, más que átomos son simplemente protones, y los electrones presentes se encuentran en forma de plasma libre. En esta fracción del Sol ocurren, gracias a la enorme temperatura y presión, las reacciones de fusión nuclear que transforman cuatro protones de hidrógeno en un átomo de helio. En dicha reacción se libera energía en dos formas: a través de radiación gamma, y a través de partículas (neutrinos).



*Figura 4.3: Fusión nuclear del núcleo solar.*

La siguiente capa del Sol es la zona radiante. Se denomina así puesto que en ella se absorben y transportan hacia el exterior las ondas emitidas por las reacciones del núcleo. Comprende desde  $\frac{1}{4}$  hasta  $\frac{9}{10}$  del radio de la estrella y está compuesto mayormente de hidrógeno y helio ionizado. Debido a la gran densidad y el ambiente fuertemente ionizado, la energía irradiada por el núcleo tarda millones de años en ser traspasada a la siguiente capa y poder salir a la superficie en forma de luz visible.

La zona convectiva es la tercera capa del Sol, y en ella los gases dejan de estar ionizados, no pudiendo así transportar la energía por radiación sino por convección. Es decir las masas de plasma más caliente suben a la superficie, tal como el agua en ebullición. Dicho movimiento se realiza constantemente y de forma cíclica.



*Figura 4.4: Núcleo, zona radiante y convectiva.*

La última zona gaseosa del Sol es llamada Fotósfera, y corresponde a su superficie, que transforma la energía traída del centro en forma de radiación y calor, en la luz visible que observamos desde nuestro planeta. Se cree que tiene en profundidad unos pocos cientos de kilómetros, y su temperatura es de aproximadamente 5.800 °K.

Finalmente, el Sol cuenta con dos capas exteriores que forman su atmósfera. La primera de ellas, la cromósfera, abarca unos 2.000 Kms, y su temperatura asciende desde los 4.700 °K en la cercanía con la fotósfera, hasta unos 10.000 °K. En ella suelen permanecer accidentes como espículas, protuberancias y playas. Por último, la corona, es la capa más exterior de la atmósfera solar, y es la más misteriosa en términos físicos, ya que su temperatura asciende hasta el millón de grados Kelvin. A través de su actividad los científicos prevén el estado del ciclo de actividad solar, que dura aproximadamente 11 años.

## **4.2 Radiación Solar.**

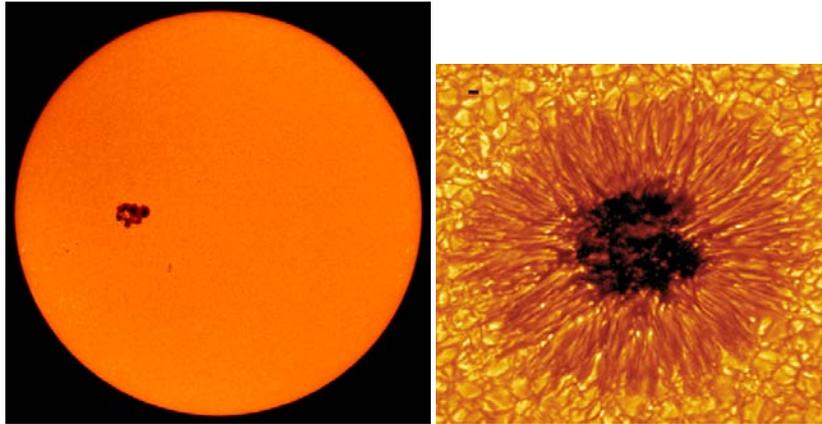
El Sol genera actualmente una potencia de aproximadamente  $3 \times 10^{26} \text{W}$ , quemando en el proceso alrededor de  $6 \times 10^{11} \text{ Kg}$  de helio cada segundo. Este valor se obtiene a partir de la temperatura de su superficie, la fotosfera. Según los físicos, esta estrella tiene una edad aproximada de 4.600 millones de años, y contiene hidrógeno suficiente para otros 5.000, entregando tanta energía como lo hace en este momento. La radiación que emana de la fotosfera es enviada al espacio en todas direcciones. Dado que la Tierra se encuentra a una distancia promedio de  $1,5 \times 10^8 \text{ Kms}$  del Sol, la energía liberada por la estrella tarda aproximadamente 8 minutos y 19 segundos en llegar nuestra atmósfera.

### **4.2.1 Radiación Solar Extraterrestre.**

La cantidad y calidad de energía solar que a diario arriba a nuestro planeta es bastante constante, estable. Esta característica se la debemos al tipo de estrella al cual pertenece el Sol, G2, y a la edad en la cual se encuentra. Las leves variaciones en la radiación que recibimos son producto del llamado ciclo solar, y de la variación en la distancia entre nuestro planeta y la estrella, debido al movimiento de traslación.

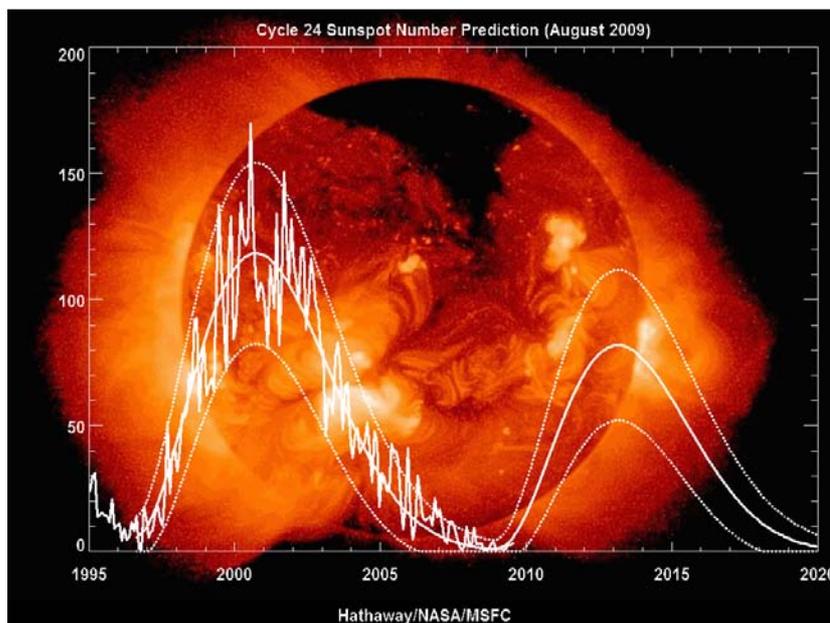
Con respecto al ciclo solar, éste tiene una duración promedio de 11 años, aunque ha habido períodos cortos y largos de 9 y 14 respectivamente. Este ciclo es producido por las variaciones en la intensidad y frecuencia con que ocurren las manchas solares. Comúnmente se lo llama también actividad solar o variación solar.

Una mancha solar es una región más oscura, y por lo tanto, menos caliente del sol. Aparecen en latitudes que van de los 5 a los 40 grados en ambos hemisferios. Están formadas por una "umbra" o centro muy oscuro (comparado con el resto de la fotosfera) rodeada por una penumbra o región menos oscura. Pueden durar días, semanas o meses, y su temperatura en el centro se estima en unos 4.000 grados. El origen de las manchas solares aun se discute, si bien se cree que son producto de flujos magnéticos que se forman bajo la fotosfera.



*Figura 4.5: Mancha solar.*

El ciclo con que estas manchas aparecen es registrado continuamente por satélites y telescopios terrestres. Además se cuenta con modelos matemáticos que predicen su aparición con gran precisión. En la imagen inferior se muestra la predicción actual del ciclo solar. Al momento de redactar este trabajo, nos encontramos en un llamado “mínimo solar”, es decir el punto de menor actividad de las manchas solares:



*Figura 4.6: Registro y proyección del ciclo solar. Fuente: David Hathaway, NASA/MSFC.*

Si bien recientemente se han planteado posibles relaciones entre el ciclo solar y fenómenos climáticos terrestres, como ya se dijo, el efecto de variación que tienen las manchas solares en la cantidad de energía recibida por nuestra atmósfera es mínimo; se estima que es del orden de  $1 \text{ W/m}^2$ . El efecto que sí es notorio y digno de mencionar, es en la ionósfera, donde variaciones en la radiación provocan diferencias en el estado de los gases, produciendo anomalías y/o dificultades para las comunicaciones de onda corta.

### **Variación debido a la distancia.**

En su trayecto hacia nuestra atmósfera, la radiación solar va perdiendo intensidad de forma proporcional al cuadrado de la distancia. Matemáticamente esta variación está dada por la siguiente expresión:

$$G(n) = I_{sc}[1 + 0,033\text{Cos}(360n/365)]$$

Donde  $n$  es el número del día del año.  $I_{sc}$  es la *constante solar*, y corresponde a la cantidad de energía solar que por unidad de tiempo incide perpendicularmente sobre una superficie de área unitaria, colocada fuera de la atmósfera terrestre a una distancia del Sol igual a la distancia media Sol-Tierra. El valor aceptado más reciente (World Radiation Center) es de  $1367 \text{ W/m}^2$ . De este modo, variando  $n$  de 1 a 365, se obtiene una curva de variación como la siguiente:

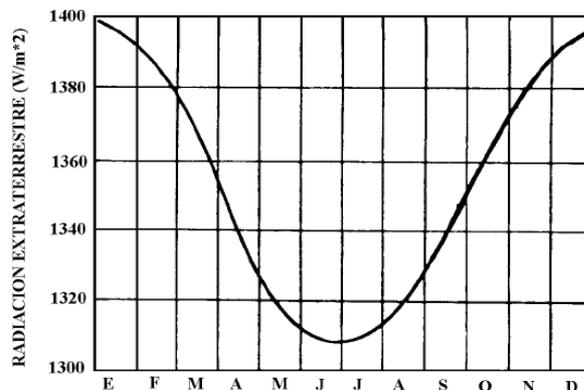


Figura 4.7: Curva de variación anual de la energía solar extraterrestre.

La variación máxima desde Isc hacia los valores máximo y mínimo, de enero y julio respectivamente, no superan el 3,3%.

Existe un tercer fenómeno de radiación, aunque estrictamente no debiera llamársele como tal. Corresponde al llamado *viento solar*. Es un flujo de partículas, mayormente helio ionizado, que es emitida por la corona del Sol y conducida por sus líneas de campo magnético hacia el exterior. El viento solar, al llegar a la Tierra interactúa con su campo magnético, pero al ser una “lluvia” de partículas y no de fotones, esta no penetra la atmósfera como la radiación visible y ultravioleta.

#### **4.2.2 Radiación Solar Terrestre.**

Si bien la energía que recibe nuestro planeta desde el Sol es bastante constante, al entrar a la atmósfera sufre distintas variaciones antes de llegar a la superficie terrestre. La composición química de las diferentes capas de la atmósfera, así como las partículas en suspensión, generan efectos que inciden en la forma e intensidad de la radiación solar. De acuerdo a la naturaleza de cada efecto, éstos se dividen en dos grupos: dispersión y absorción.

##### ***Dispersión.***

A diferencia de la materia, que es energía condensada en forma de partículas, la radiación se presenta en forma de fotones. Los fotones, que viajan a la velocidad de la luz en el vacío, interactúan con la materia de tal manera que pueden ceder parte o totalidad de su energía, cambiar su dirección, velocidad, etc. El factor determinante en la forma en que los fotones de la radiación solar interactúan de una manera u otra con los gases de las distintas capas de nuestra atmósfera, es la longitud de onda relativa entre onda y partícula, o en este caso, fotón y molécula.

La dispersión, es un fenómeno por el cual la radiación, al entrar en contacto con los diferentes gases, sufre cambios en su dirección.

**Dispersión de Rayleigh:** Ocurre cuando la longitud de onda de la radiación es mucho mayor al tamaño de las partículas. Su intensidad es inversamente proporcional a la cuarta potencia de la longitud de onda, y está dada por la siguiente expresión:

$$I = I_0 \frac{(1 + \cos^2 \theta)}{2R^2} \left( \frac{2\pi}{\lambda} \right)^4 \left( \frac{n^2 - 1}{n^2 + 2} \right)^2 \left( \frac{d}{2} \right)^6$$

En donde  $I_0$  es la intensidad original del haz de luz,  $\lambda$  la longitud de onda,  $\vartheta$  el ángulo de dispersión,  $n$  es el índice de refracción de la partícula y  $d$  su diámetro. La fuerte dependencia de este tipo de dispersión con la longitud de onda ( $1/\lambda^4$ ), es responsable de que ondas con menor  $\lambda$  sean dispersadas con mayor intensidad que las de longitudes mayores. En el caso de la radiación solar, el azul, violeta y ultravioleta se dispersan con gran intensidad en la atmósfera, mientras que el amarillo, naranja y sobre todo el rojo, presentan una muy leve dispersión. Es por este motivo que en un día despejado, al mirar hacia los costados del cielo vemos el color azul, que ha sido dispersado principalmente por las moléculas de nitrógeno y oxígeno presentes en el aire, mientras que al mirar más directamente al sol vemos el amarillo, el cual no ha sufrido gran dispersión. Así mismo al amanecer/atardecer, la luz solar recorre una distancia tan grande en la atmósfera que sólo los tonos anaranjados-amarillentos logran llegar hasta nuestra superficie, siendo el azul, violeta y ultravioleta dispersados en su totalidad hacia los costados.



*Figura 4.8: Dispersión Rayleigh del azul y rojo.*

**Dispersión de Mie:** Este tipo de dispersión ocurre cuando la longitud de onda de la radiación incidente es del mismo orden que el tamaño de las partículas. En este caso, las partículas absorben parte de la radiación, y el resto la reflejan. Se da con las partículas en suspensión en los gases atmosféricos, como son el polvo, la ceniza y el vapor de agua.

**Dispersión no selectiva:** Cuando el tamaño de las partículas es mucho mayor a la longitud de onda de la radiación incidente, la dispersión ocurre en igual intensidad para todas las longitudes de onda. Aquí la forma en que las ondas son dispersadas responde tal cual a la óptica de ondas, según los tres fenómenos; reflexión, refracción y difracción.

La reflexión, es el cambio de dirección que sufre la onda de radiación al entrar en contacto con la superficie de separación entre dos medios, de forma tal que regresa totalmente al medio inicial. Es decir ninguna porción de la radiación atraviesa el medio interpuesto. Cuando la superficie del medio es totalmente lisa, ocurre una *reflexión regular*. En cambio cuando la superficie presenta imperfecciones, da lugar a una *reflexión difusa*. En la práctica, ningún material presenta en 100% ninguno de los dos tipos de reflexión, sino que se dan en superposición.

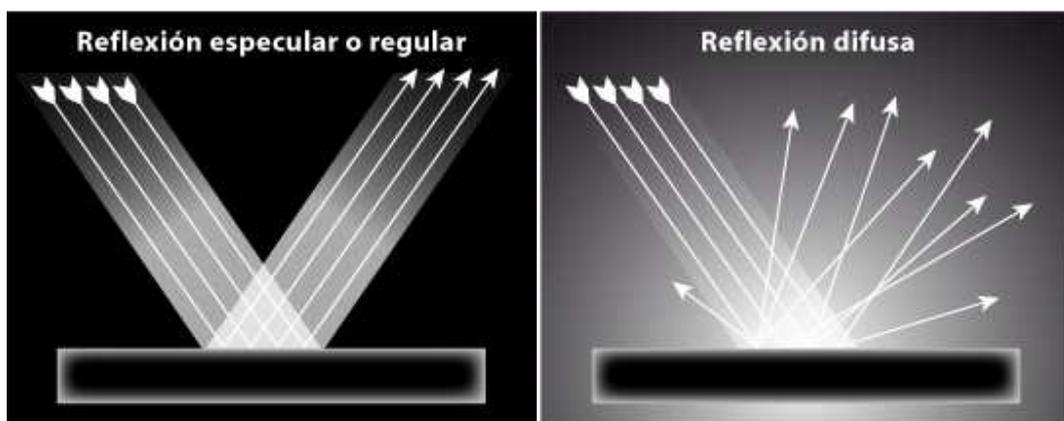


Figura 4.9: Reflexión regular (izquierda) y difusa (derecha).



Figura 4.10: Reflexión difusa con componente especular (regular).

La refracción, a diferencia de la reflexión, es el cambio de dirección que experimenta la onda al pasar de un medio a otro. El ángulo de la onda refractada va a depender del *coeficiente de refracción* del material,  $n$ , que corresponde a la relación entre la velocidad de propagación de la onda en el vacío con respecto a la velocidad en el material.

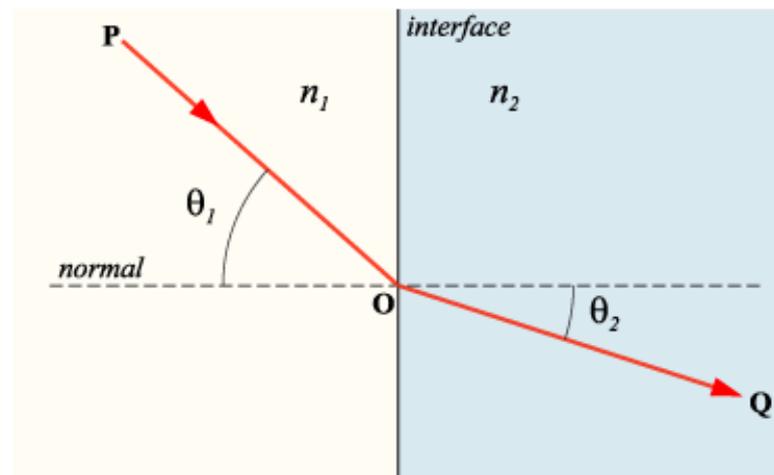


Figura 4.11: Refracción de una onda incidente de un medio  $n_1$  a un medio  $n_2$ .

Normalmente en la naturaleza, cuando una onda incide de un material a otro, ocurren los fenómenos de reflexión y refracción simultáneamente, dividiendo la energía de la radiación en dos partes:

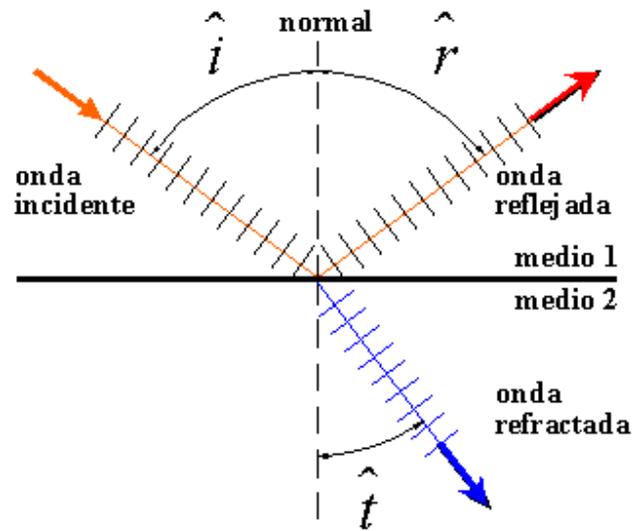


Figura 4.12: Reflexión y refracción de una onda entre dos medios.

Por último, la difracción, es un fenómeno general de las ondas, mediante el cual éstas se dispersan y curvan su propagación al encontrarse con un obstáculo. También, bajo el mismo fenómeno, un haz discreto de radiación tiende a expandirse y dispersarse aleatoriamente en un medio. Es responsable, por ejemplo, de que la luz solar llegue a iluminar levemente algunas sombras bajo obstáculos que, por geometría, sería imposible.

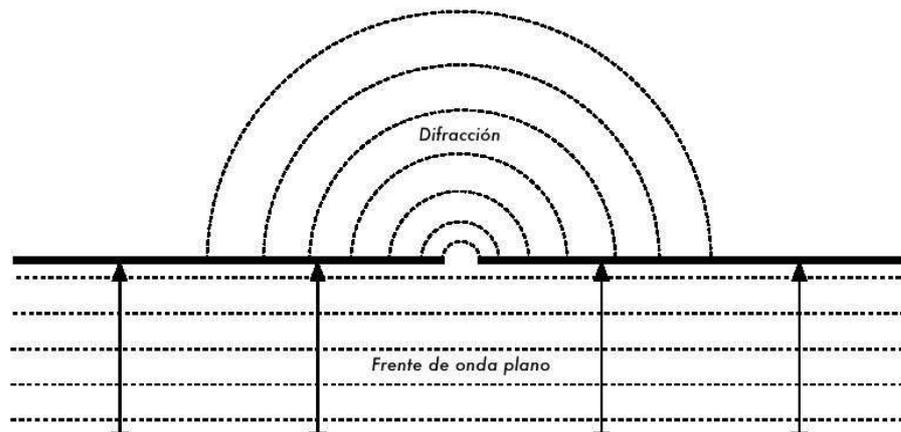
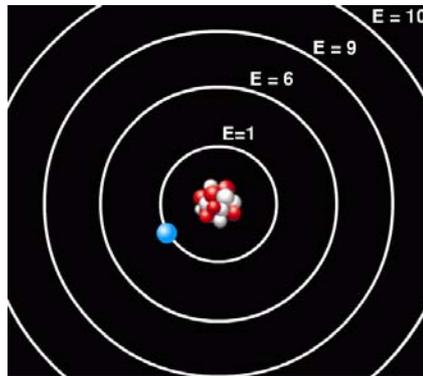


Figura 4.13: Difracción de una onda incidente a través de un obstáculo.

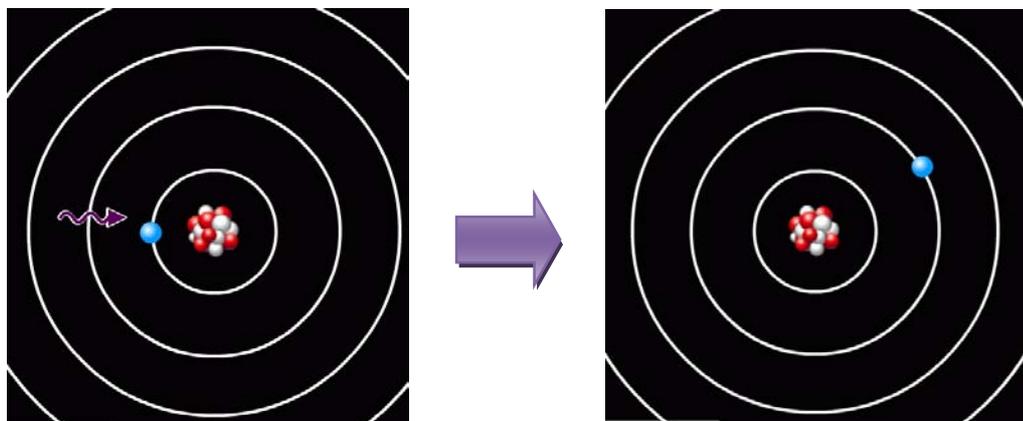
### **Absorción.**

La dispersión no es el único efecto que sufre la radiación, sobre todo la solar, al ingresar a nuestra atmósfera. Los átomos, contienen a sus electrones en determinados niveles de energía, que son característicos para cada elemento químico puro, y también para las moléculas. Cada nivel energético está asociado a su vez con una frecuencia de oscilación específica.



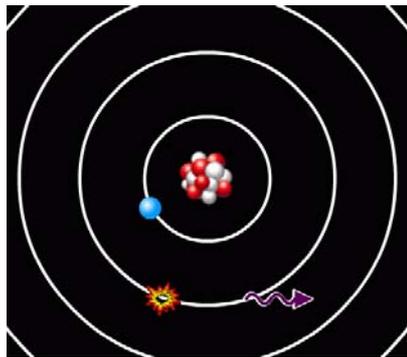
*Figura 4.14: Niveles de energía en un átomo.*

Cuando los fotones de la radiación solar poseen la energía y la frecuencia correspondiente a la diferencia entre dos niveles electrónicos de un átomo, éste puede absorber dicho contenido espectral para elevar un electrón de su nivel original a uno de mayor energía:



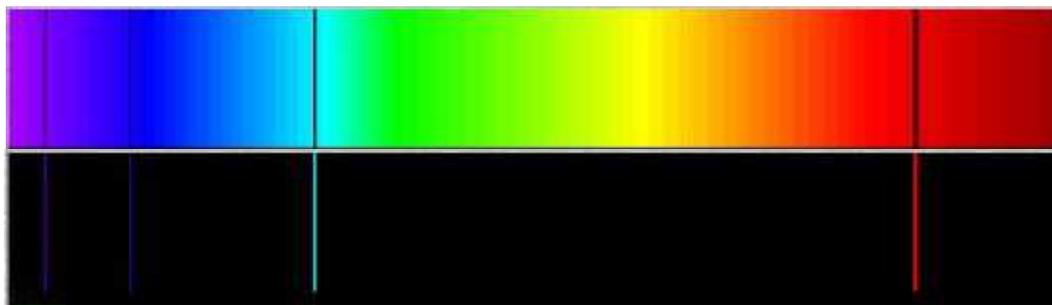
*Figura 4.15: Absorción de un fotón por parte de un átomo.*

Una vez absorbido el fotón, el átomo queda en un estado excitado, que a cierta temperatura es inestable, por lo cual, de forma inmediata, el electrón promovido de nivel vuelve a su estado original, emitiendo un fotón de misma energía y frecuencia que el absorbido. La dirección con que emite dicho fotón no es la misma que la de la radiación incidente, sino que es al azar:



*Figura 4.16: Emisión del fotón.*

Los átomos de cada elemento poseen diferentes niveles energéticos, y por lo tanto, diferentes líneas de absorción/emisión. La Figura 4.17 muestra las líneas de absorción y emisión para el hidrógeno.



*Figura 4.17: Líneas de absorción y emisión del Hidrógeno en el espectro visible.*

No sólo los elementos químicos puros emiten y absorben fotones en bandas espectrales específicas, también los compuestos. En una molécula compuesta por enlaces de varios átomos, sus líneas de absorción equivalen a la suma de las líneas individuales de cada elemento

que la constituye. De este modo se obtiene, por ejemplo, el espectro de absorción del agua, del dióxido de carbono, del ozono atmosférico, etc.

### ***Transmitancia atmosférica.***

La atmósfera terrestre está constituida por gases que se mantienen por sobre la superficie gracias a la fuerza de gravedad. Está compuesta en su mayoría por nitrógeno (78,1%) y oxígeno (20,9%), más un 1% de otros gases, como el vapor de agua y el dióxido de carbono. Tiene una altura total de aproximadamente 1.000 Kms, a partir de la cual se estima que los gases ya no son atraídos hacia la superficie. Pese a este valor, debido a la presión, el 99% de su masa total se concentra en los primeros 30 Km.

<b>Gas</b>	<b>Concentración (%)</b>
Nitrógeno	78.08
Oxígeno	20.95
Argón	0.93
Anhídrido Carbónico	0.03
Neón	0.018
Helio	0.005
Criptón	0.001
Vapor de Agua (máx)	0,0001
Hidrógeno	0.00006
Ozono	0.00004
Xenón	0.000008

*Tabla 4.4: Principales gases de la atmósfera terrestre.*

Todos estos gases, distribuidos en cada una de las capas de la atmósfera, van absorbiendo determinadas frecuencias a partir del espectro original de radiación que proviene desde el Sol. La cantidad de energía retenida en cada banda de frecuencia depende de las concentraciones relativas a cada gas. Por ejemplo, el dióxido de carbono y el vapor de agua absorben gran parte del infrarrojo térmico, que comprende las longitudes de onda de entre 3 y 15  $\mu\text{m}$ , ayudando al efecto invernadero natural.

Por su parte, el ozono atmosférico ( $\text{O}_3$ ), es responsable de absorber la mayor parte del ultravioleta C y B, que constituyen radiaciones dañinas para la vida en la superficie.

El espectro visible, desde el rojo hasta el violeta, constituye la región de mayor *transmitancia* de la atmósfera.

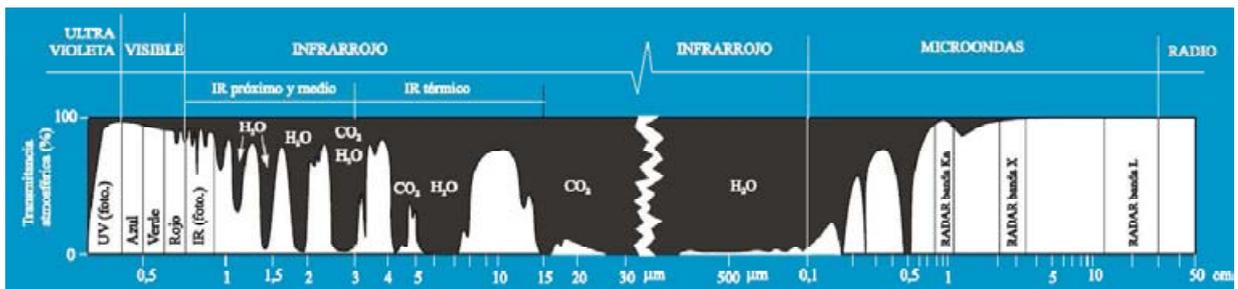


Figura 4.18: Transmitancia porcentual de la atmósfera terrestre.

El resultado final de la interacción entre la radiación solar y los gases del aire es la energía que logramos recibir en la superficie. Es ésta la energía que utilizan los organismos vivientes para sus procesos biológicos, y la misma que transformamos a electricidad. La Figura 4.19 muestra la diferencia entre la radiación solar extraterrestre y la radiación que, luego de haber atravesado la atmósfera, finalmente llega a la superficie, en este caso a nivel del mar:

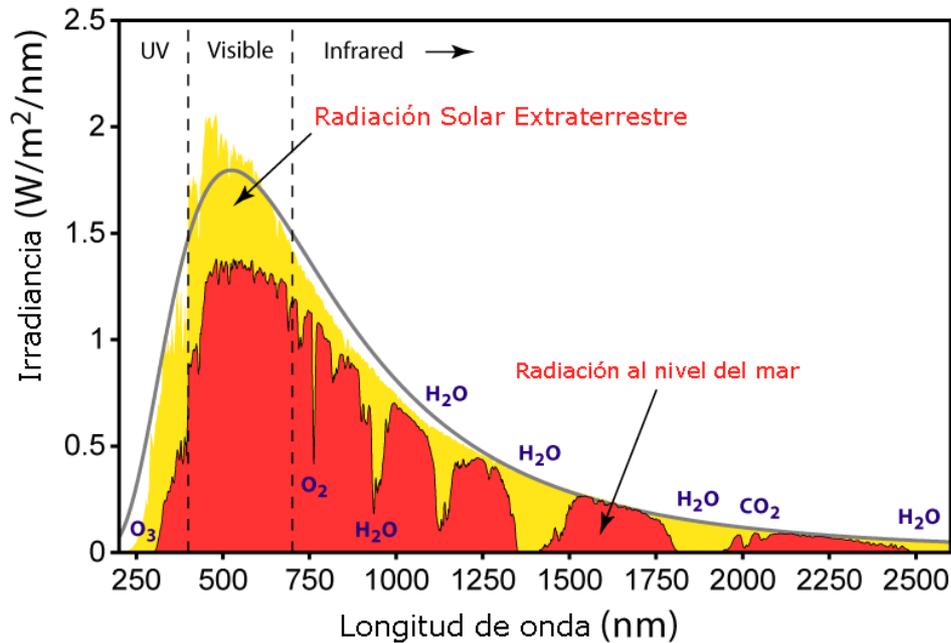


Figura 4.19: Comparación entre radiación extraterrestre y radiación al nivel del mar.

### 4.3 Radiación Ultravioleta.

A la región del espectro comprendida entre los 400 y los 10 nm, se le denomina comúnmente radiación ultravioleta. Dicha nomenclatura hace alusión a que se trata de una energía de frecuencia superior a la del color violeta visible por el ojo humano. Es conocida mayormente por sus efectos nocivos en la salud, dado que, debido a su gran energía, es capaz de dañar las células y corromper su ADN, dando origen a tumores cancerígenos. Sin embargo, dentro de la región ultravioleta hay rangos de frecuencia que generan diferentes efectos, no sólo en la salud de los seres vivos sino también en procesos físico-químicos de la atmósfera. Además, ciertas porciones del espectro UV son mayor o menormente absorbidas en las diferentes capas de la atmósfera, razón por la cual se lo divide en tres regiones: UV-A que comprende entre los 400 y 320 nm, UV-B comprendido entre los 320 y 280 nm y los UV-C que abarcan entre los 280 y los 180 nm. Además de esta división, se utilizan también las denominaciones cercano, medio, lejano y extremo, como lo muestra la figura siguiente:

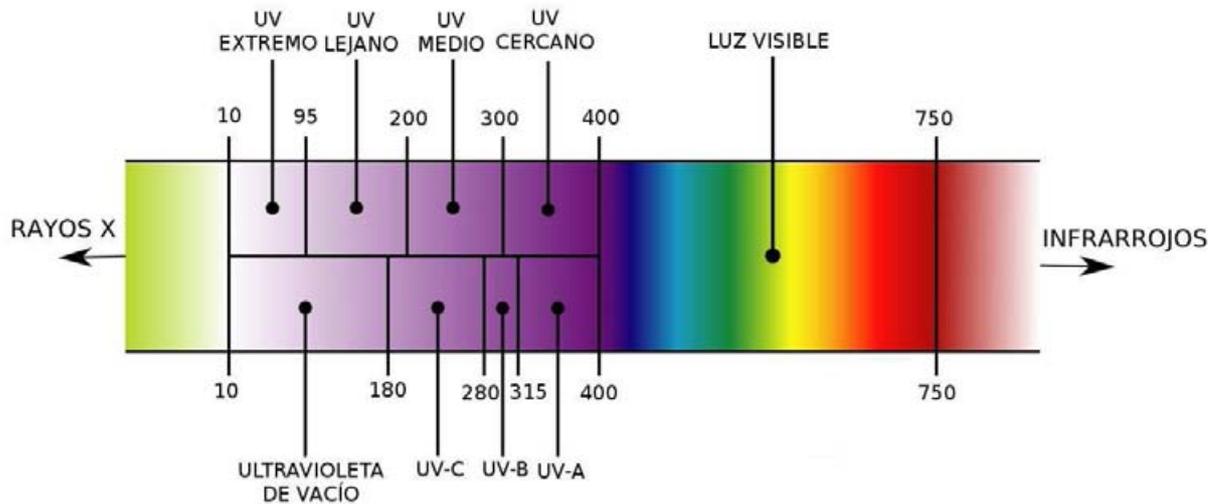


Figura 4.20: Rayos X, bandas UV, visible e infrarrojo.

Los rayos UV-C, son los de mayor energía y los más nocivos para la vida en la superficie. Afortunadamente, la totalidad de esta radiación es absorbida por la capa de ozono en la estratósfera. Esto se da incluso en las zonas donde esta capa es más débil, ya que se necesita de muy poco ozono para absorber los fotones de esta banda.

La radiación UV-B, en cambio, sí es sensible a variaciones en la cantidad de ozono sobre la atmósfera. Si bien la mayor parte de estos rayos son absorbidos antes de llegar a la superficie, en verano, su aumento es muy significativo, sobre todo por su efecto nocivo sobre la piel humana.

Por último, los rayos UV-A son los menormente filtrados, es decir, de todo el espectro UV son los que llegan en mayor porcentaje a la superficie. El siguiente gráfico muestra una comparación porcentual de la cantidad de radiación que recibe en promedio la superficie terrestre, entre el infrarrojo, visible y UV:

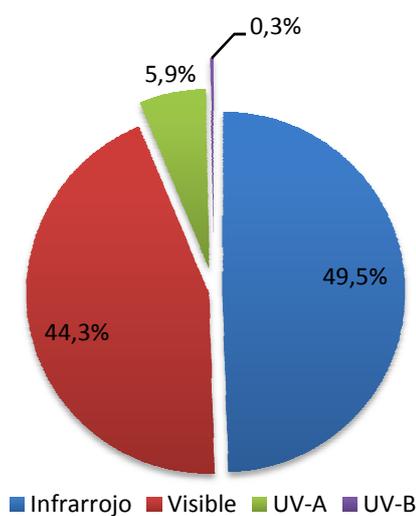


Figura 4.21: Gráfico porcentual de la radiación solar terrestre.

#### 4.4 Radiación Local.

La ciudad de Valdivia, perteneciente a La Región de Los Ríos, Zona Sur de nuestro país, se encuentra a una latitud Sur de  $39,83^\circ$ . Evidentemente a esta latitud la radiación no es la misma que en el Ecuador, dada la inclinación con la que llegan los rayos del Sol. Sin embargo, en verano la radiación alcanza niveles muy similares a los del Norte del país, tanto en la porción visible como en la región ultravioleta.



Figura 4.22: Valdivia, Chile.

En cuanto a la nubosidad, que es bastante frecuente casi todo el año, se cree comúnmente que ésta bloquea la totalidad o la mayor parte de la radiación. Sin embargo, estudios frecuentes han demostrado que en días de nubosidad parcial en verano, y sobre todo cuando el Sol no está totalmente cubierto, los niveles de radiación se mantienen. Incluso, se han medido empíricamente alzas, del orden de hasta un 20% con respecto de un día despejado. También se sabe que las radiaciones de onda más corta, en este caso, UV, son menos sensibles a las pérdidas de irradiancia en su paso a través de las nubes.

Estos fenómenos ocurren principalmente debido a variaciones en la suma de las componentes directa y difusa de la luz que llega a la superficie. Por definición, la radiación total que recibimos en la superficie está dada por la suma de tres componentes:

$$\text{Radiación Total} = \text{Radiación Directa} + \text{Radiación Difusa} + \text{Albedo}$$

El albedo es la tercera componente y corresponde a la suma de toda radiación reflejada por elementos de la superficie terrestre, ya sea naturales o artificiales. Es máximo en la nieve fresca, y mínimo en el agua. Las nubes tienen un promedio de albedo del 50% (reflejan una mitad, dispersan la otra), mientras que la superficie terrestre total tiene un promedio del 31%.

Cuando una nube se posiciona a un costado de la trayectoria directa entre el Sol y la superficie terrestre, a un punto determinado de ésta puede llegar la componente directa original, es decir, la cantidad de radiación de un día despejado, “sumada” a la radiación difusa que ha sido proyectada por la nube. Este fenómeno ocurre con mayor intensidad para la nubosidad tipo cúmulos.

#### **4.4.1 Radiación UV-A, registro 2006.**

Para efectos de poder evaluar la eficiencia espectral de los paneles fotovoltaicos en la porción ultravioleta, se precisa conocer los niveles de radiación en la zona. Los siguientes datos han sido obtenidos de las mediciones efectuadas sobre el antes edificio de la Facultad de Ciencias de la Universidad Austral, con un espectrorradiómetro ultravioleta de alta resolución,

*SUV-100 Biospherical Instruments Inc*, mediciones a cargo de la profesora Charlotte Lovengreen. Corresponden a la integral de la irradiancia en la banda de 320-400 nm, es decir, UV-A, para días del año 2006. Los datos se presentan agrupados por día a intervalos de 15 minutos, y en magnitud  $W/m^2$ :

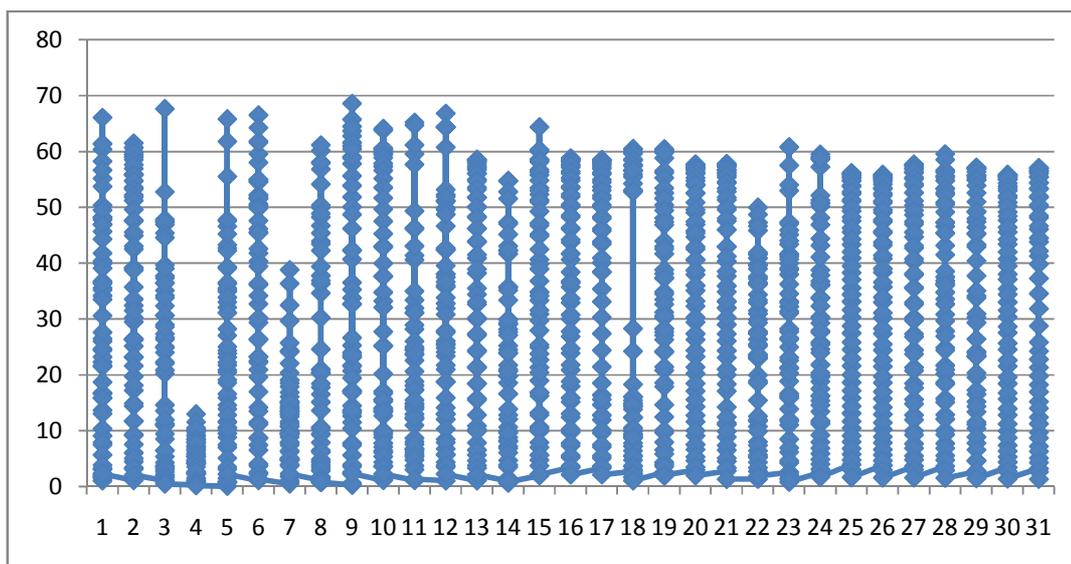


Figura 4.23: Radiación UV-A, en  $Watts/m^2$ , Enero 2006.

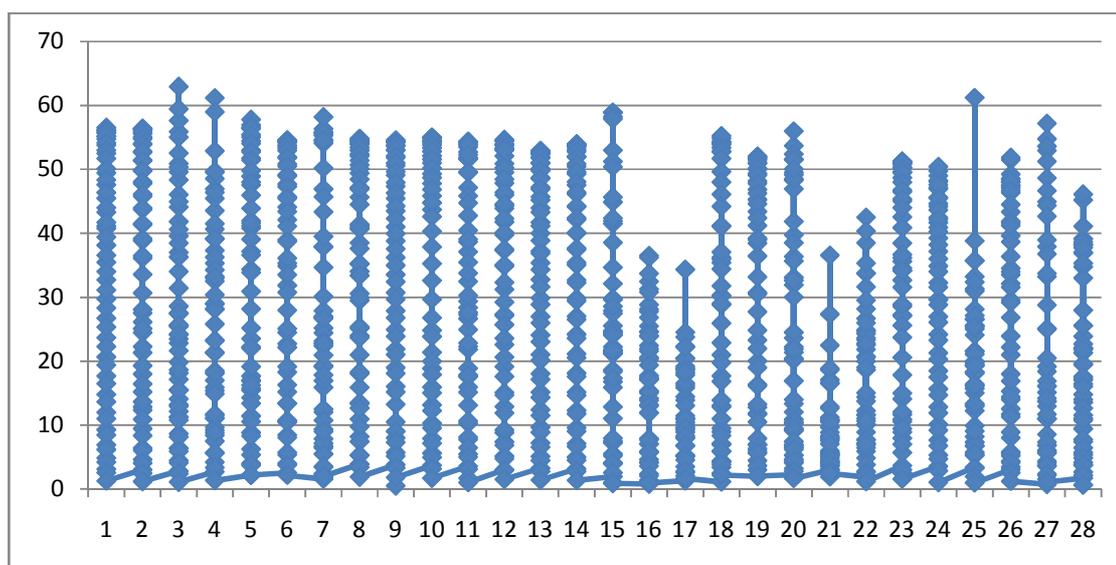


Figura 4.24: Radiación UV-A, en  $Watts/m^2$ , Febrero 2006.

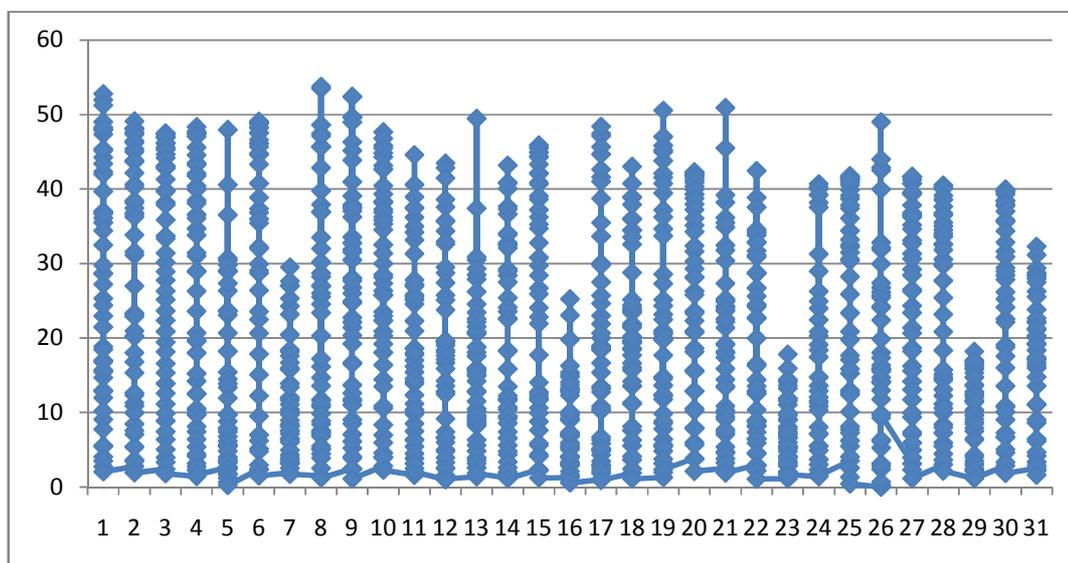


Figura 4.25: Radiación UV-A, en Watts/m<sup>2</sup>, Marzo 2006.

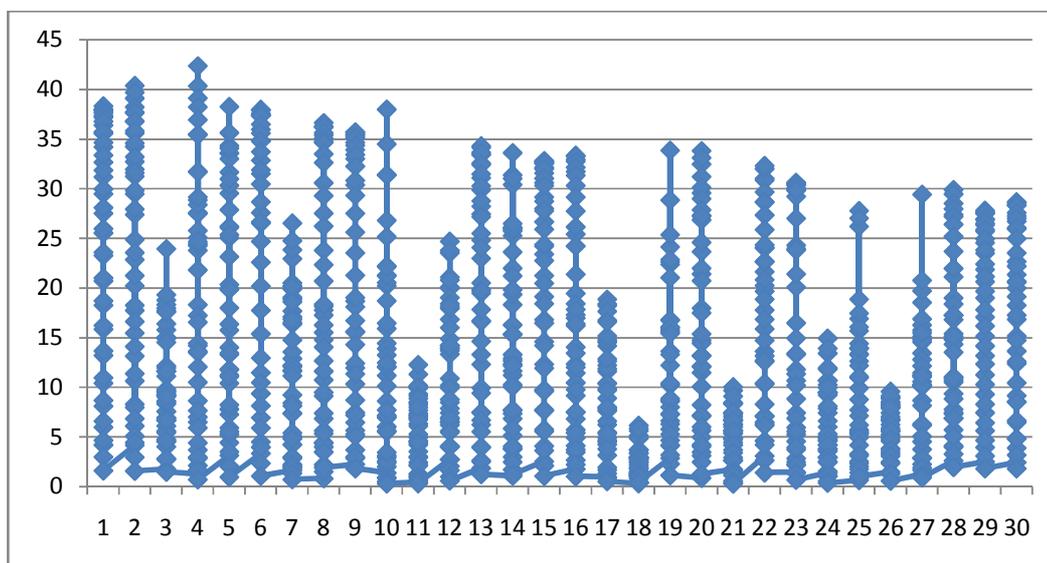


Figura 4.26: Radiación UV-A, en Watts/m<sup>2</sup>, Abril 2006.

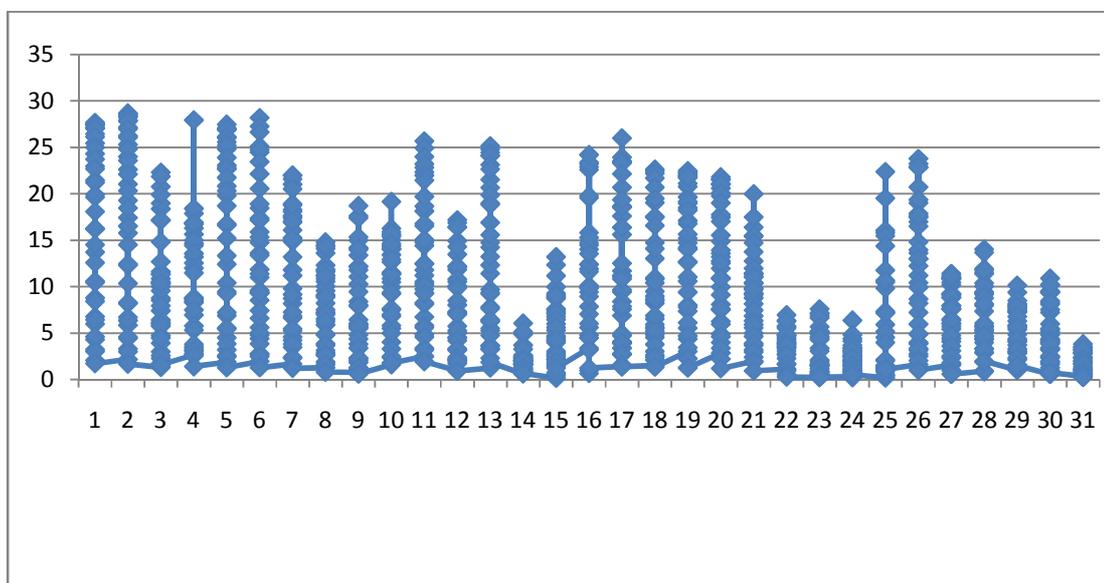


Figura 4.27: Radiación UV-A, en Watts/m<sup>2</sup>, Mayo 2006.

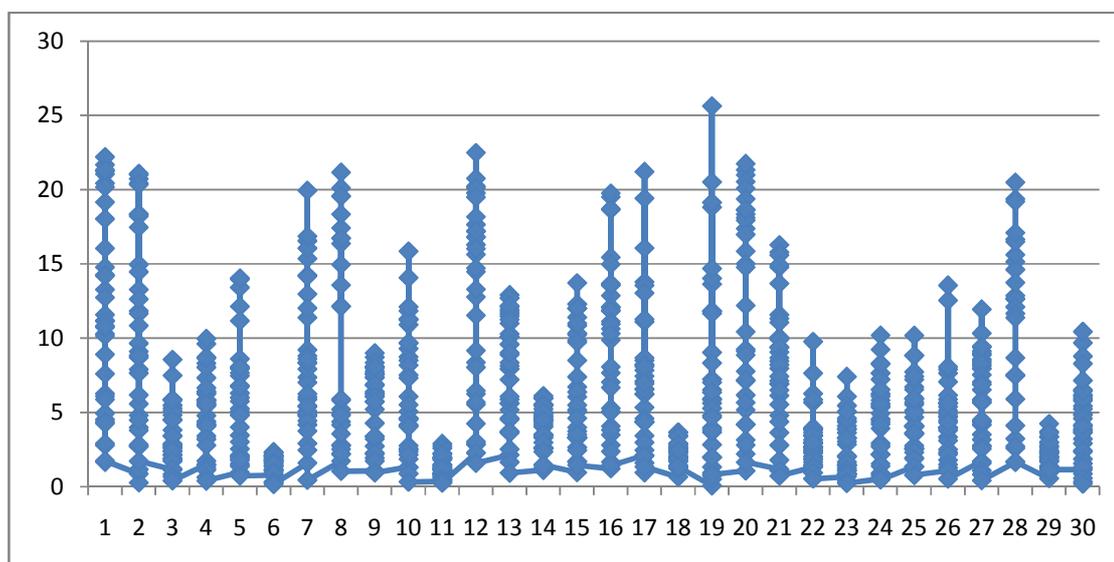


Figura 4.28: Radiación UV-A, en Watts/m<sup>2</sup>, Junio 2006.

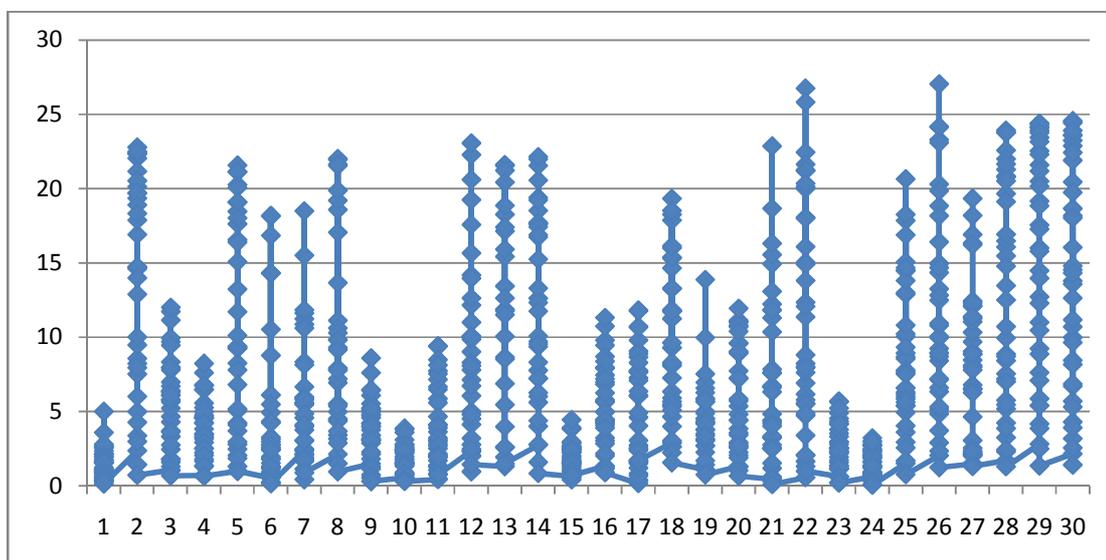


Figura 4.29: Radiación UV-A, en Watts/m<sup>2</sup>, Julio 2006.

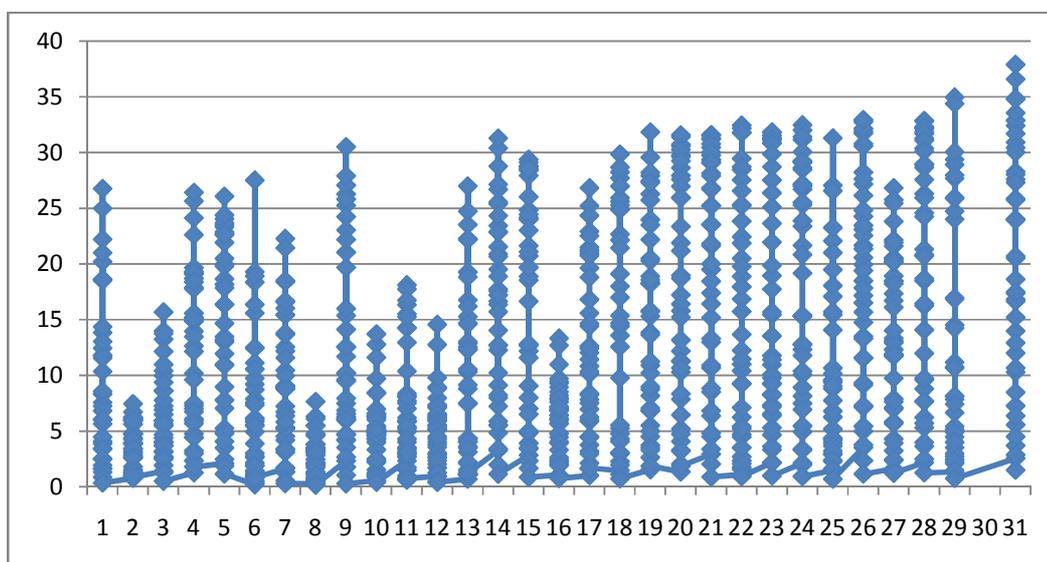


Figura 4.30: Radiación UV-A, en Watts/m<sup>2</sup>, Agosto 2006.

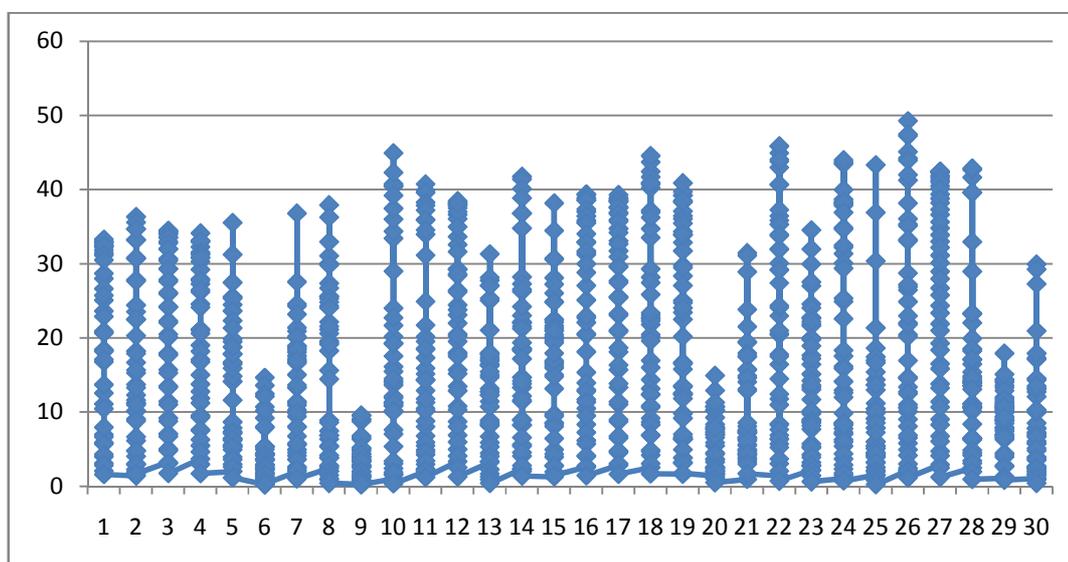


Figura 4.31: Radiación UV-A, en Watts/m<sup>2</sup>, Septiembre 2006.

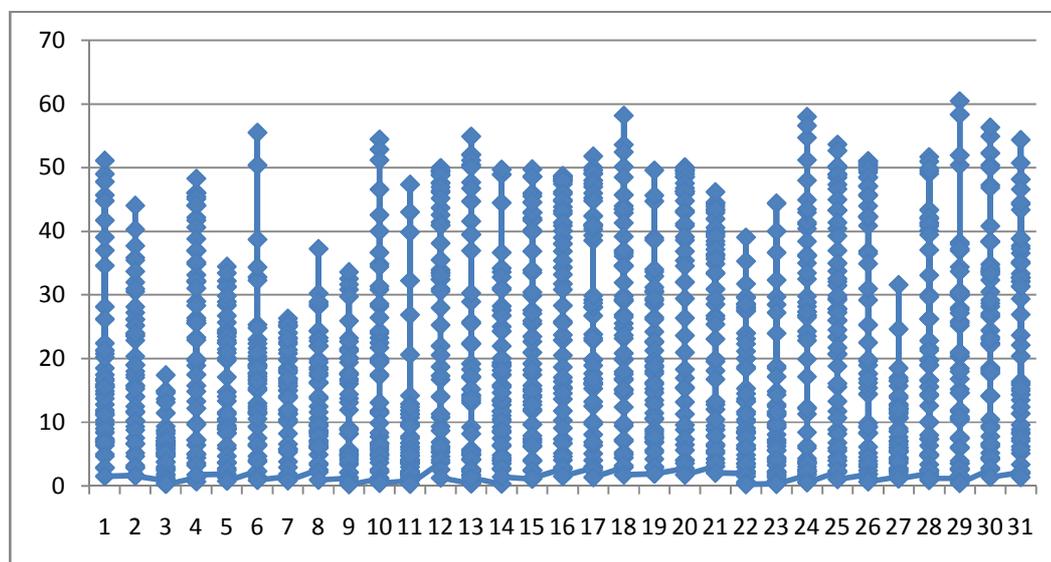


Figura 4.32: Radiación UV-A, en Watts/m<sup>2</sup>, Octubre 2006.

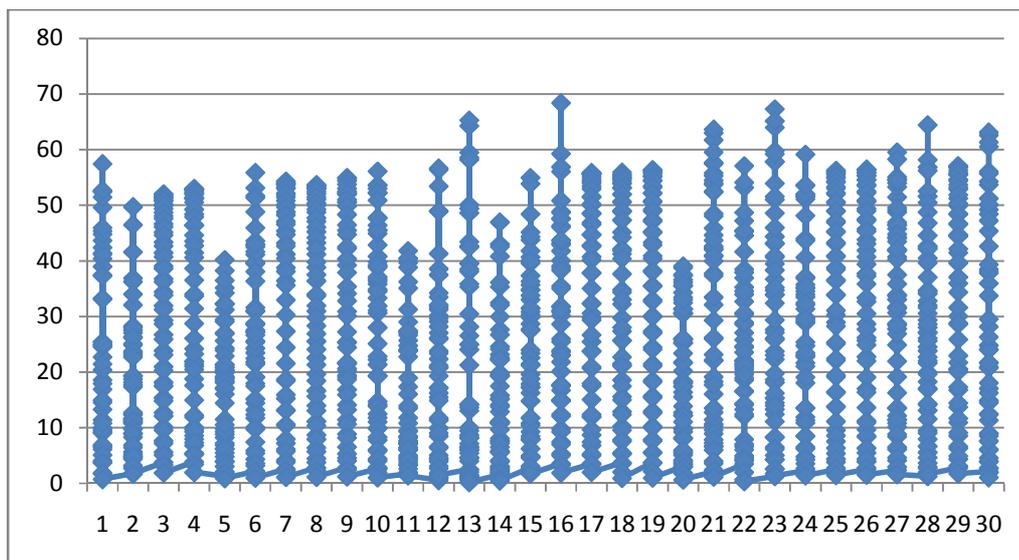


Figura 4.33: Radiación UV-A, en Watts/m<sup>2</sup>, Noviembre 2006.

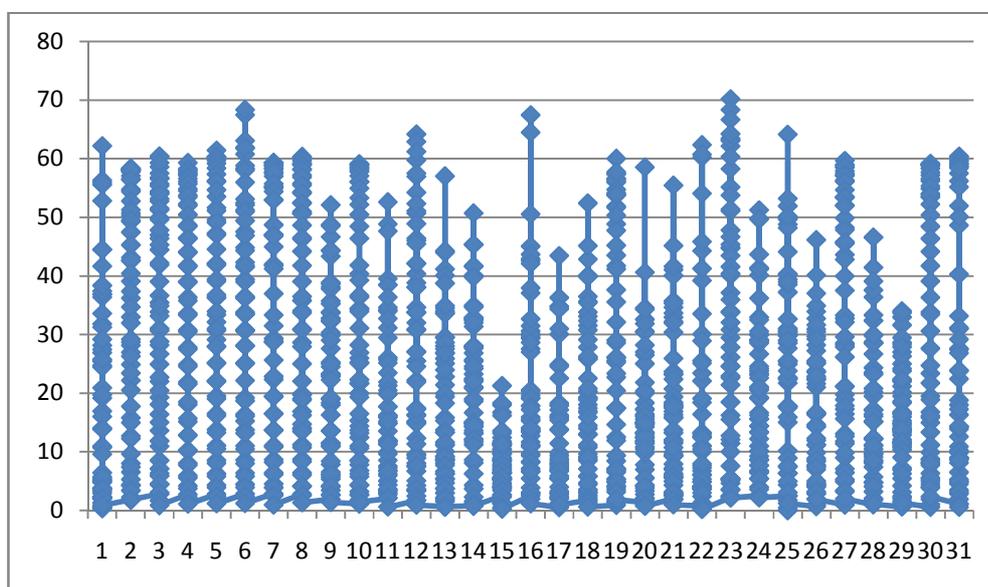


Figura 4.34: Radiación UV-A, en Watts/m<sup>2</sup>, Diciembre 2006.

Se aprecia claramente cómo en los meses de verano los máximos de radiación son relativamente constantes, en cambio en meses de otoño-invierno fluctúan considerablemente de un día a otro. Esto evidentemente corresponde al efecto de la nubosidad. En Junio hay días en que la radiación UV-A cae hasta los 3 W/m<sup>2</sup>.

En general se nota que la radiación UV-A decae, en invierno, a un tercio de la radiación estival, de un promedio de 60 W/m<sup>2</sup> (Enero) a 20 W/m<sup>2</sup> (Junio):

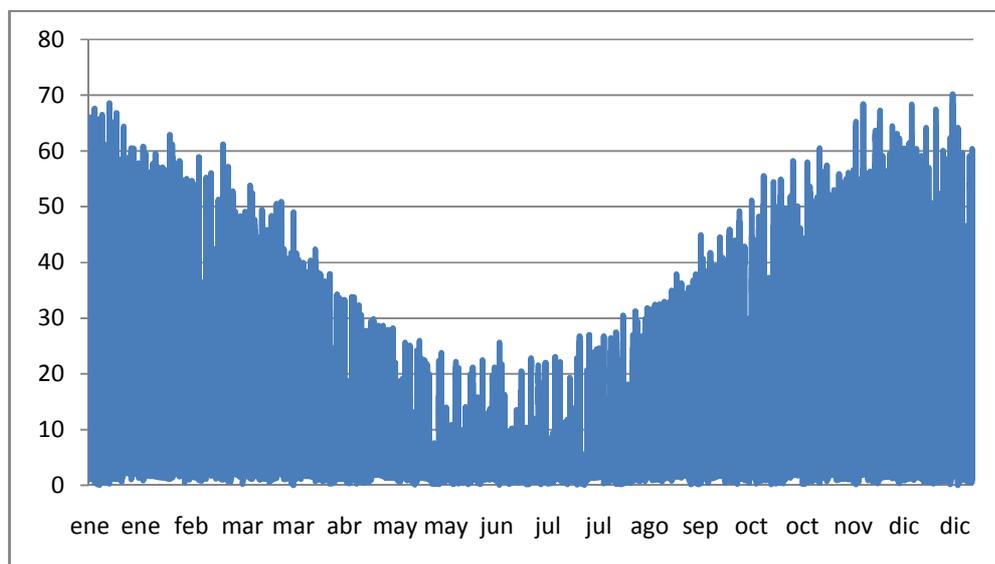


Figura 4.35: Radiación UV-A [W/m<sup>2</sup>], Valdivia 2006.

#### 4.4.2 Radiación UV-A medida.

A modo de tener un dato aproximado de la radiación UV-A, de forma accesible y de rápida adquisición, se adquirió un equipo medidor de esta radiación desarrollado por Optoelectrónica Icalma, modelo OPTO-360. Sus especificaciones son las siguientes:

- Medición: Radiación Ultravioleta UV-A.
- Detector: Semiconductor con filtro para rango de medición UV-A, entre 320 y 400 nm.

- Rango de medición:  $0,1 \text{ mW/cm}^2$  .  $20 \text{ mW/cm}^2$ .
- Exactitud:  $\pm 5\%$  del valor real
- Domo de teflón para integración de radiación difusa y directa.
- Cabezal: duraluminio
- Dimensiones: 150 (largo) x 95 (ancho) x 50 (alto)  $\text{mm}^3$
- Alimentación: Batería 9 V. (duración aprox. 3 meses de uso no continuo) o 220 VAC.
- Calibración realizada por la Universidad de Santiago para cada equipo.
- Conexión de datos a PC mediante cable paralelo.



Figura 4.36: Medidor UV-A OPTO-360.

Con este equipo se procedió a realizar mediciones de la radiación UV-A, a partir de Marzo del presente año (2009), tanto en días despejados como en días nublados, seleccionados al azar dos veces a la semana. Las mediciones se realizaron a la hora de mayor radiación (13:30 en horario invierno, 14:30 en horario de verano), y buscando un ángulo de incidencia de  $90^\circ$  entre el sensor (cabezal) y los rayos del sol.

El equipo arrojó valores en  $\text{mW/cm}^2$ , los cuales fueron transformados a  $\text{W/m}^2$ , que es una magnitud más atractiva para el análisis y comparación con potencia eléctrica.

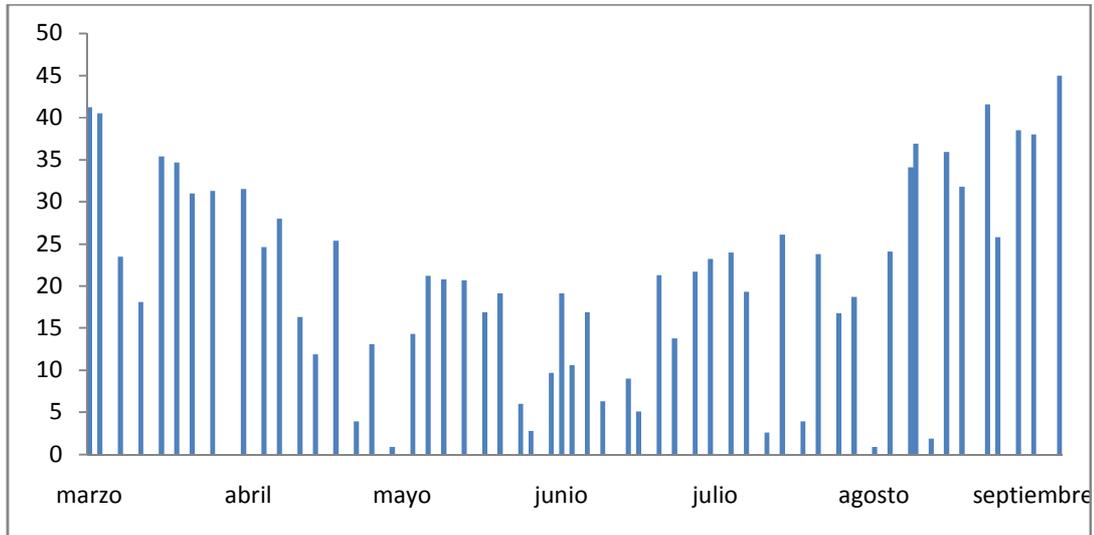


Figura 4.37: Irradiancia UV-A medida, Marzo-Septiembre 2009, en W/m<sup>2</sup>.

Los valores medidos con este instrumento estuvieron en plena correspondencia con los niveles esperados a partir de los datos proporcionados por el Instituto de Física de la Universidad, analizados anteriormente. A pesar de que las mediciones se realizaron apuntado perpendicularmente el cabezal del sensor en dirección al Sol, no se notó un aumento significativo en el registro. Por el contrario, aún al inclinar levemente el sensor (ángulo cenital), la medición prácticamente no variaba. Esto es atribuible a la forma física del sensor, una fotocelda de superficie semiesférica.

La medición sí sufría un cambio brusco al variar el ángulo acimutal, disminuyendo rápidamente a la mitad con unos pocos grados de inclinación.

En días nublados, la disminución en la radiación medida dependía exclusivamente del tipo y cantidad de nubes. En días con nubosidad leve, la potencia medida se redujo entre un 25 y un 50%, mientras que en días de nubosidad intensa la irradiancia bajaba a menos del 10% del valor medido en un día despejado. Este fenómeno fue más notorio en invierno, atribuible a que al haber un mayor ángulo de oblicuidad de los rayos incidentes, las nubes reflejan la radiación hacia el espacio, haciendo que menor cantidad de ésta logre atravesarlas y llegue hasta la superficie.

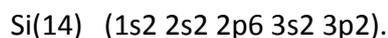
## 4.5 Energía solar fotovoltaica.

Existen variadas formas de generar electricidad a través de la radiación solar. Sin embargo la más difundida, y la única que es capaz de generar energía eléctrica en forma directa, es actualmente la fotovoltaica. Ésta tiene como base el efecto fotoeléctrico que ocurre en un semiconductor al ser bombardeado por fotones del espectro visible y UV, generando una caída de tensión y una corriente aprovechable. Las tecnologías que hoy se utilizan son las mismas que las de hace 50 años, pero el avance en los procesos de fabricación ha aumentado la eficiencia y reducido los costos, lo que ha fomentado el mercado de esta ERNC y disminuido cada año la brecha competitiva entre ésta y las fuentes convencionales de obtención de energía eléctrica.

### 4.5.1 Principios Físicos.

Los semiconductores son materiales cuya resistividad eléctrica varía entre  $10^{-4}$  y  $10^{10}$  W-cm, mientras que la resistividad de los metales varía entre  $10^{-4}$  y  $10^{-6}$  W-cm. Materiales semiconductores son, por ejemplo, Si, Ge, P, As; compuestos químicos como CuAlS<sub>2</sub>, CuInS<sub>2</sub>, etc. A muy bajas temperaturas, los semiconductores se comportan como aislantes, mientras que a altas temperaturas se pueden llegar a comportar como metales.

Aunque las celdas solares pueden fabricarse de diferentes materiales, el Silicio es el material más frecuentemente empleado. Este semiconductor tiene la siguiente estructura electrónica:



De los 14 electrones, los primeros 10 se encuentran fuertemente ligados al núcleo, mientras que los 4 exteriores, denominados *electrones de valencia*, están menos fuertemente ligados al núcleo y en capacidad de interactuar con los otros átomos, jugando un papel importante en el efecto fotovoltaico.

Para formar un cristal, gran número de átomos de Si se enlazan a través de sus electrones de valencia (enlace covalente). En un sólido cristalino, cada átomo de Si comparte uno de sus 4 electrones de valencia en un enlace covalente con cada uno de los 4 átomos vecinos. El sólido consiste de unidades de 5 átomos de Si: el átomo original mas 4 átomos vecinos con los cuales comparte sus electrones de valencia. En este caso se dice que los enlaces se encuentran saturados:

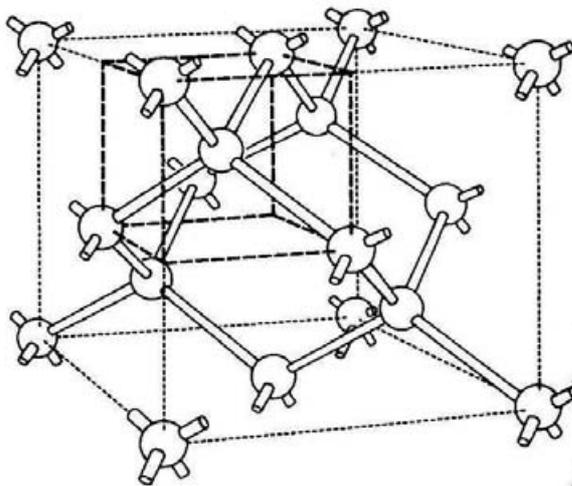


Figura 4.38: Celda elemental de Si.

En este caso, no hay electrones libres, y si a bajas temperaturas se aplica un campo eléctrico al cristal de Si, la conductividad es cero. A temperatura ambiente, la conductividad no es cero ya que por efecto térmico se rompen enlaces que dejan electrones libres y huecos, que contribuyen a la conductividad del material. En este caso, el número de huecos es igual al número de electrones libres y se habla de un *semiconductor intrínseco* (o tipo "i").

Sin embargo, si se introduce una impureza (un átomo diferente de los que conforman la red cristalina de Si), como por ejemplo As o P, con 5 electrones de valencia, 4 de ellos se emplearán en los enlaces con los átomos vecinos de Si y uno quedará débilmente ligado. Este electrón de valencia "libre" se comporta como un electrón de la banda de conducción del cristal. Puesto que hay un electrón donado por cada átomo de impureza, se habla entonces de semiconductores donadores o "tipo n":

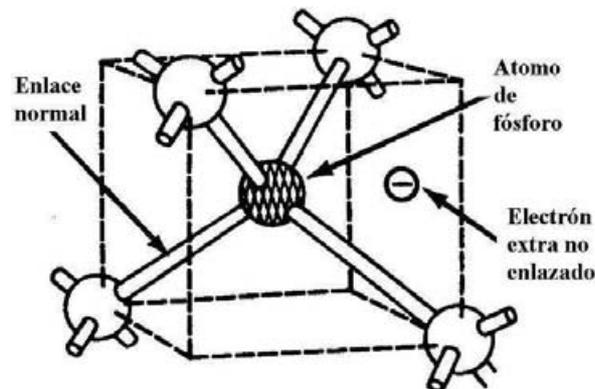


Figura 4.39: Efecto de una impureza de P.

Similarmente, si se introduce un átomo de Al o B, que tienen 3 electrones de valencia, faltará un electrón para saturar un enlace covalente con un Si vecino. Este "hueco" se comporta como una carga positiva y es relativamente libre de moverse por el cristal. A dicho semiconductor se le denomina "tipo p":

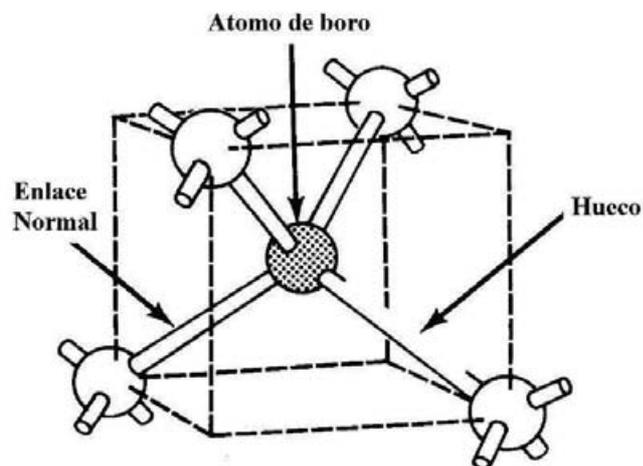


Figura 4.40: Efecto de una impureza de B.

En los átomos libres, los electrones ocupan niveles discretos de energía. Al formarse el sólido, la densidad de átomos es del orden de  $10^{22}$  átomos/cm<sup>3</sup> y los átomos se aproximan entre sí. Debido a la proximidad, los niveles discretos de energía de los átomos individuales se

superponen formando zonas en donde los niveles están tan próximos que forman un *continuum*. La figura siguiente muestra la estructura de bandas de energía de tres semiconductores:

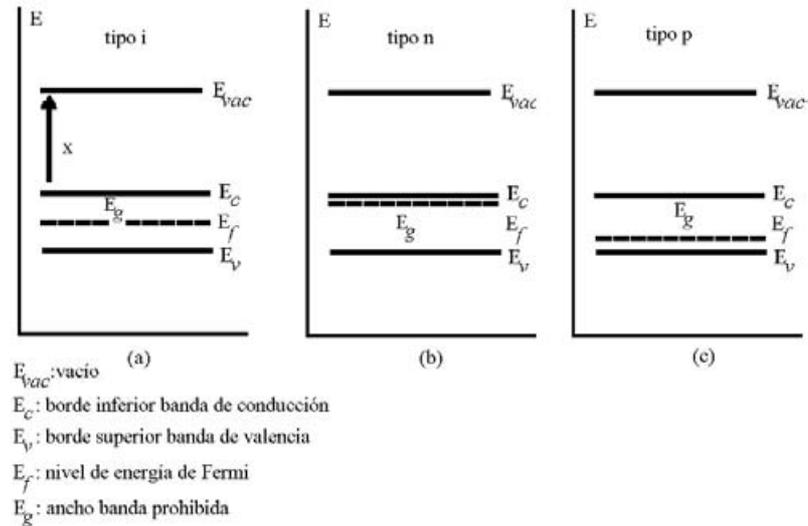


Figura 4.41: Estructura de bandas de tres semiconductores.

En este diagrama de niveles de energía se observan tres bandas: la banda de valencia cuyo borde superior es  $E_v$ , la banda prohibida entre  $E_v$  y  $E_c$ , y la banda de conducción entre  $E_c$  y  $E_{vac}$ . La banda prohibida se denomina así porque los electrones no pueden tener energías dentro de esos valores. Los electrones de la banda de valencia pueden hacer transiciones a la banda de conducción y viceversa. El ancho de la banda prohibida  $E_g$  depende del semiconductor.

El nivel de Fermi,  $E_f$ , es la energía a la cual la probabilidad de ocupación de estados es de  $1/2$ . En un semiconductor tipo i,  $E_f$  se encuentra en la mitad de la banda prohibida, mientras que en uno tipo n se ha desplazado hacia el borde inferior de la banda de conducción, debido a que los electrones donados están débilmente ligados y por consiguiente, la energía necesaria para llevarlos a la banda de conducción es más pequeña que  $E_g$ . Por el contrario, en un semiconductor tipo p,  $E_f$  está desplazado hacia  $E_v$ . En el caso en que dos semiconductores tipo p y n estén en contacto y en equilibrio térmico,  $E_f$  es igual para ambos semiconductores.

### Efecto Fotovoltaico.

Cuando un fotón interactúa con un cristal, por ejemplo Si-i, hay una cierta probabilidad de que sea absorbido por un electrón de la banda de valencia. Si la energía absorbida por el electrón es superior a  $E_g$ , el electrón “brinca” a la banda de conducción convirtiéndose en un electrón de conducción y dejando en la banda de valencia un “hueco”. Se produce entonces un par electrón-hueco.

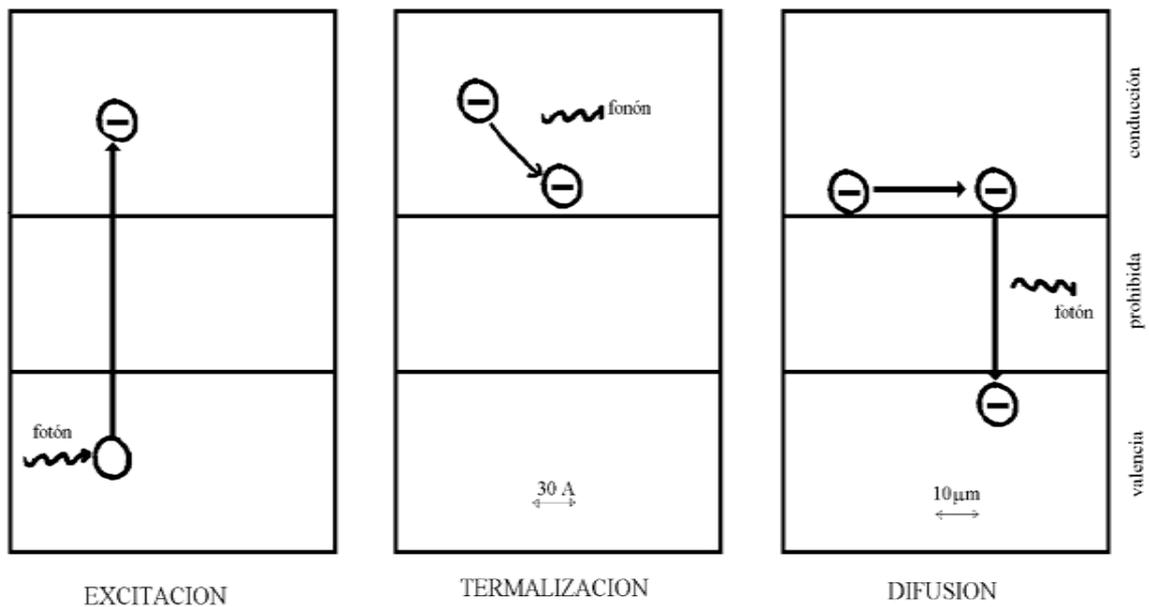


Figura 4.42: Procesos elementales en un sólido.

Los electrones excitados pierden rápidamente su energía en interacción con la red del sólido mediante la emisión de fotones, decayendo a la base de la banda de conducción. En ella, el electrón es capaz de difundirse en el sólido a distancias del orden de los  $10 \mu\text{m}$ . De la base de la banda de conducción, los electrones regresan a la banda de valencia mediante la emisión de un fotón, si antes no son, por ejemplo, recolectados y conducidos a un circuito externo. Este efecto de recombinación debe ser reducido en la celda solar porque reduce la corriente y la eficiencia de la misma.

De este modo, la conductividad del material aumenta por efecto de la absorción de

radiación de una longitud de onda adecuada. De esta manera se liberan por efecto de la luz los electrones con los cuales se puede generar una corriente. Existe por consiguiente una longitud de onda crítica por debajo de la cual la energía de los fotones no alcanza a producir excitación de electrones de la banda de valencia a la banda de conducción. Por ejemplo el Si, con un  $E_g$  de 1.14 eV, presenta una longitud de onda crítica de 1.09  $\mu\text{m}$ . Fotones con energías inferiores a 1.14 eV absorbidos por el material, se transforman en calor. Esto quiere decir que tanto la luz ultravioleta, visible e infrarrojo cercano excitan en este material los electrones de la banda de valencia a la de conducción.

Cuando con dos materiales  $p$  y  $n$  se produce una juntura  $p-n$ , los electrones que se encuentran en exceso en el semiconductor  $n$  migran hacia el semiconductor  $p$  y los huecos del semiconductor  $p$  al semiconductor  $n$ . De esta manera, se establece un campo eléctrico en la interfase de la juntura. Este campo eléctrico en la juntura es el responsable de establecer la corriente eléctrica a partir de los electrones que en su difusión en el sólido alcanzan la región de la juntura donde se encuentra el campo eléctrico.

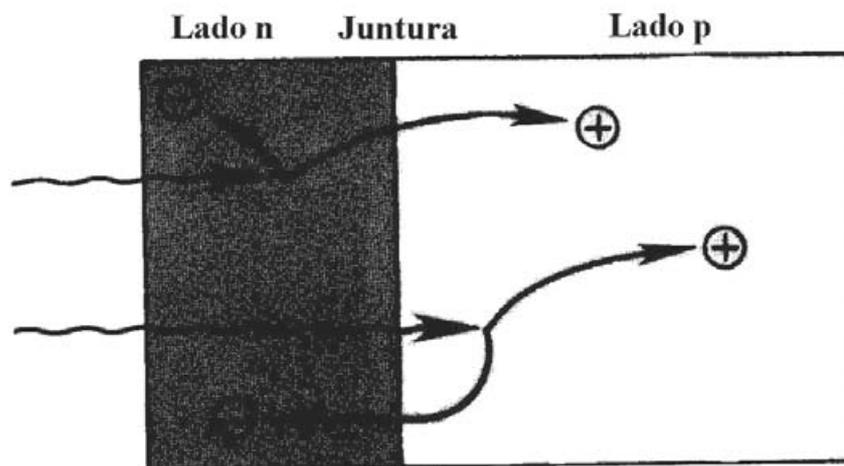


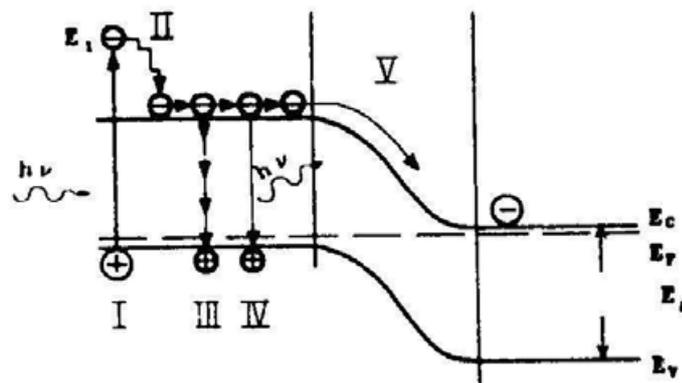
Figura 4.43: Campo eléctrico en la interfase de la juntura  $p-n$

El potencial va a depender de la concentración de impurezas y de portadores intrínsecos. Para el Si, con niveles de impurezas de  $10^{15}/\text{cm}^3$  tanto en el  $n$  como en el  $p$ , se tienen

potenciales de 550 mV.

Mediante la absorción de fotones, se forman pares electrón-hueco tanto en el semiconductor tipo  $p$  como en el  $n$ . Debido a la difusión, los portadores de carga minoritarios en cada semiconductor alcanzan la juntura, en donde el campo eléctrico existente se encarga de desplazarlos a la región donde estos electrones y huecos son portadores de carga mayoritarios: la región  $p$  se carga positivamente mientras la  $n$  negativamente, dando lugar a una diferencia de potencial y, en un circuito exterior acoplado, a una corriente. De esta manera se tiene el *efecto fotovoltaico*, fundamento de las celdas solares.

La Figura 4.44 muestra la estructura de bandas de energía para una juntura  $p-n$ , los procesos que producen el efecto fotovoltaico y los mecanismos de pérdidas:



- I. Absorción de luz  $h\nu > E_g$
- II. Termalización de electrones "calientes"
- III. Recombinación no radiativa
- IV. Recombinación radiativa
- V. Separación de cargas (efecto fotovoltaico)

Figura 4.44: Procesos del efecto fotovoltaico

Hay sin embargo dos mecanismos de pérdidas inherentes que limitan la conversión de energía solar en electricidad: el exceso de energía de los fotones que se transforma en calor por la termalización de los electrones y los fotones que no son absorbidos por el material, por

poseer energía inferior al ancho de banda.

Puesto que en este caso se tiene el mismo material base para los semiconductores  $n$  y  $p$ , se habla entonces de *homojunturas  $p-n$* . Otros tipos de dispositivos que se pueden emplear para la recolección de estos electrones son las heterojunturas  $pn$ , las junturas  $pin$ , las barreras Schottky y las junturas MIS (Metal – Insulator - Semiconductor). Las heterojunturas aprovechan mejor el espectro solar mientras que las Schottky y MIS disminuyen las pérdidas por recombinación superficial.

#### **4.5.2 Elementos de una celda de Si-c.**

Desde el punto de vista comercial y del desarrollo del mercado, las celdas más importantes de acuerdo a la estructura cristalina son las de homojunturas Si-c (cristalino) y Si-m (multicristalino).

Los elementos esenciales de una celda típica de Si-c son:

- Un contacto-ventana superior que permite la recolección de cargas negativas y la transmisión de una fracción de la radiación solar,
- los semiconductores tipo  $n$  y  $p$ , y
- el contacto inferior colector de cargas positivas.

Puesto que en la dirección de la radiación se encuentra primero el  $n$  y luego el  $p$ , esta configuración es  $n-p$ . El diagrama de bandas muestra el comportamiento de electrones y huecos en la juntura.

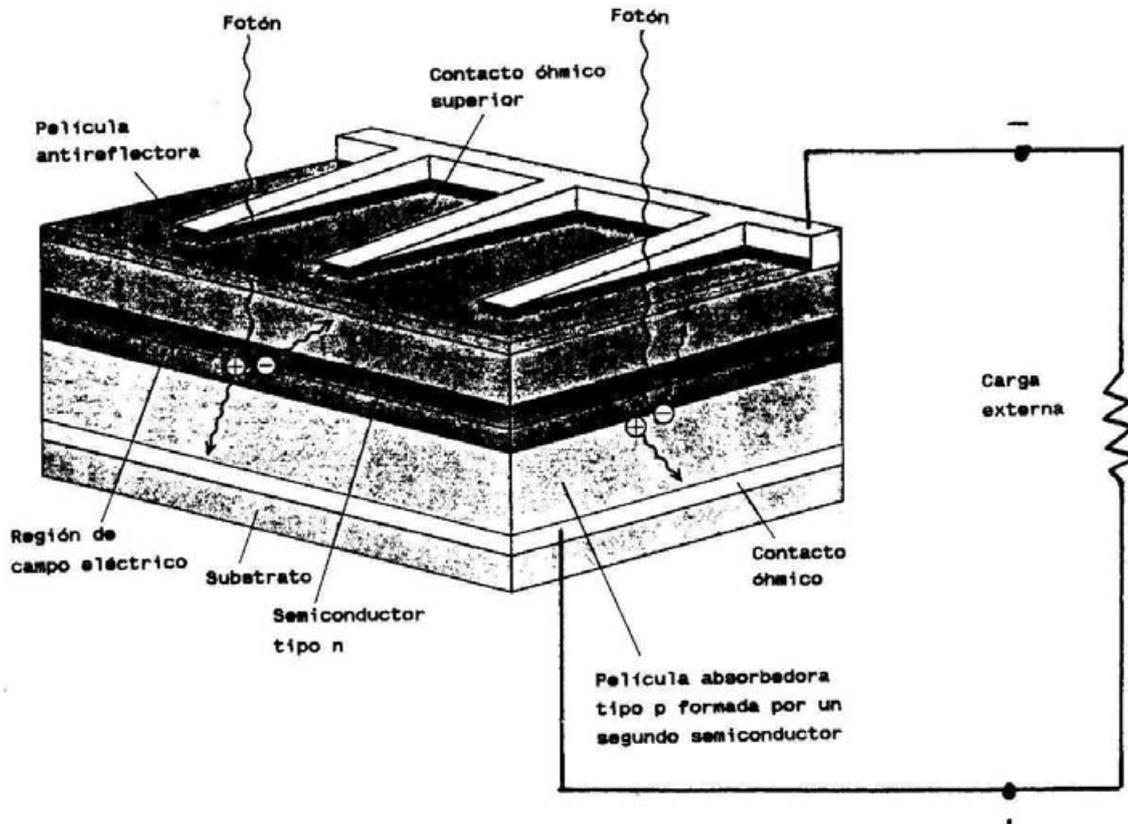


Figura 4.45: Elementos esenciales de una celda solar

### 4.5.3 Características Eléctricas de la Celda Solar.

#### Característica I-V:

La característica corriente-voltaje, I-V de una celda solar está dada por:

$$I = C \cdot R - I_s [\exp(qV/kT) - 1]$$

en donde  $C$  es una constante,  $R$  es la irradiación solar ( $\text{W}/\text{m}^2$ ),  $I_s$  es la corriente de saturación del diodo,  $q$  la carga eléctrica elemental,  $k$  la constante de Boltzmann y  $T$  la temperatura absoluta en grados Kelvin.

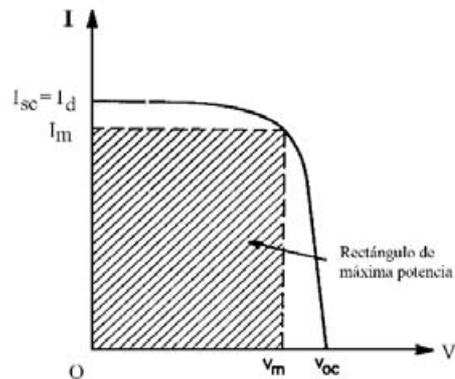


Figura 4.46: Característica IV de una celda solar.

Sin iluminación, su característica I-V es la de un diodo:

$$I_d = - I_s [ \exp (qV/kT) - 1 ]$$

Dos importantes valores característicos de las celdas solares son el voltaje de circuito abierto  $V_{oc}$  y la corriente de corto circuito  $I_{sc}$ . Para circuito abierto  $I=0$ , por lo cual:

$$V_{oc} = (kT/q) * \ln [ (C * R / I_s) + 1 ]$$

En corto circuito,  $V=0$  y por lo tanto:

$$I_{sc} = C * R$$

La corriente  $I_{sc}$  es entonces una función lineal de la irradiación solar.

### **Potencia:**

La potencia que suministra una celda es  $P = I * V$ . Esta potencia es el área bajo la curva I-V definida por el voltaje de operación.

Si  $V=0$  ,  $I = I_{sc}$  y  $P= 0$

Si  $V=V_{oc}$  ,  $I = 0$  y  $P= 0$

La potencia máxima que se puede obtener de la celda es el área del máximo rectángulo que se puede inscribir dentro de la curva I-V.  $V_{mp}$  es el valor del voltaje para el cual se tiene  $P_{mp}$  e  $I_{mp}$  es la corriente correspondiente:

$$P_{mp} = V_{mp} * I_{mp}$$

$P_{mp}$  puede calcularse teóricamente reemplazando las ecuaciones:

$$P = C * R * V - I_s * V [\exp(qV/kT) - 1]$$

La condición para máxima potencia se obtiene cuando  $dP/dV=0$ , o sea

$$I_{mp} = I_s * (q/kT) V_{mp} [\exp (q V_{mp}/kT)] \gg C R [1 - (kT/q V_{mp})]$$

$$V_{mp} = (kT/q) \ln \left[ \frac{(CR/I_s) - 1}{1 + (q V_{mp}/kT)} \right]$$

$$\approx V_{oc} - (kT/q) \ln \{1 + (q V_{mp}/kT)\}$$

La potencia máxima  $P_{mp}$  se da entonces como

$$P_{mp} = I_{mp} V_{mp} \gg CR [ V_{oc} - (kT/q) * \ln \{1+(q V_{mp}/kT)\} - kT/q ]$$

$$= CR (E_m / q)$$

en donde

$$E_m = q [ V_{oc} - (kT/q) * \ln \{1+(q V_{mp}/kT)\} - kT/q ]$$

es la energía entregada por cada fotón a la carga en el punto de máxima potencia.

**Vatíaie peak:**

El vatíaie *peak*,  $W_p$ , es el vatíaie máximo entregado por la celda solar (o módulo) cuando el módulo se expone a las condiciones estándar: 1000 W/m<sup>2</sup> de irradiación a incidencia normal, masa del aire AM 1.5 y temperatura ambiente de 25°C.

**Factor de llenado:**

El factor de llenado  $FF$  está definido como

$$FF = V_{mp} * I_{mp} / (V_{oc} * I_{sc})$$

Corresponde al cociente entre la máxima potencia obtenible y el producto  $V_{oc} * I_{sc}$ .  $FF$  es por lo tanto la desviación que presenta una celda de la rectangularidad y es una medida de la calidad de la celda.

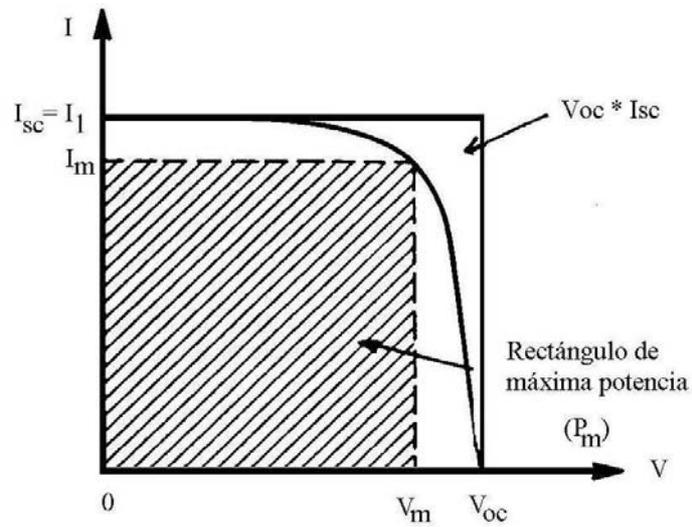


Figura 4.47: Factor de llenado

### Eficiencia:

La eficiencia de las celdas solares,  $\epsilon$ , se define como

$$\epsilon = (\text{Potencia máxima eléctrica} / \text{Potencia solar incidente})$$

La eficiencia se da entonces como

$$\epsilon = V_{oc} * I_{sc} * FF / (A * R)$$

Puesto que  $I_{sc}$  es una función lineal de la radiación solar  $R$ , entonces

$$\epsilon = (C * FF / A) * (kT / q) * \ln [C * R / I_s]$$

### Efecto de la temperatura:

La temperatura afecta la corriente y el voltaje de una celda solar. La corriente aumenta mientras que el voltaje disminuye. El efecto combinado es que la potencia de la celda solar disminuye con la temperatura.

### Circuitos equivalentes:

Eléctricamente, el circuito equivalente ideal de la celda solar es una fuente de corriente en paralelo a un diodo y una resistencia. Sin embargo, en la práctica se presentan resistencias de tal manera que la corriente generada se ve disminuida. De este modo, la celda solar es un generador de corriente  $I_L$ , la cual es reducida por la corriente del diodo  $I_s$ . Las caídas de voltaje están representadas por las resistencias en serie y en paralelo  $R_s$  y  $R_{sh}$ . La corriente está dada por:

$$I = I_L - I_s \left\{ \exp \left[ \frac{q(V + I R_s)}{kT} \right] - 1 \right\} - V/R_{sh}; \quad I_L = C R$$

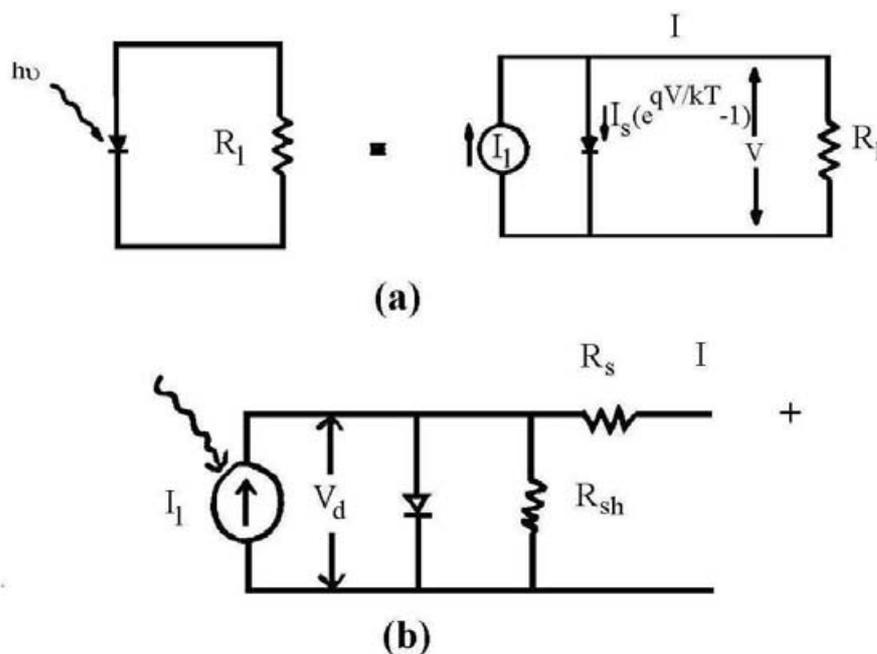


Figura 4.48: Circuitos equivalentes de la celda fotovoltaica

#### 4.5.4 El Panel Fotovoltaico.

El denominado panel fotovoltaico, comúnmente llamado panel solar, es la disposición en conjunto de muchas celdas fotovoltaicas, conectadas en grupos serie y paralelo, y con uniones óhmicas colectoras de la corriente que convergen a 2 terminales, positivo y negativo. Son los que se utilizan normalmente para la generación eléctrica ya sea a pequeña, mediana o gran escala.



*Figura 4.49: Panel solar comercial.*

La cubierta exterior de las células corresponde a un cristal especial de vidrio templado, con una resistencia mecánica capaz de resistir fuertes golpes, y sumamente liso para no retener suciedad. Además protege a las celdas del panel, permitiéndoles soportar cambios bruscos de temperatura, así como condiciones extremas.

Los fabricantes agregan comúnmente una cubierta posterior de color blanco, reflectante, resistente a la humedad y que devuelve a las células parte de la radiación incidente no aprovechada. El marco, generalmente es de aluminio anodizado, liviano y resistente, y normalmente se lo entrega perforado y listo para el montaje.

Por último, los paneles incluyen una caja de conexiones con los terminales positivo y negativo, protegidos con diodos que bloquean la tensión en el sentido inverso.

#### 4.5.5 Status Quo y futuro de la tecnología fotovoltaica.

Actualmente, las celdas fotovoltaicas utilizadas mayormente en instalaciones domésticas corresponden a tecnologías de Silicio cristalino y multicristalino, con una eficiencia promedio del 15%. En laboratorio, se fabrican cada año celdas de mayor calidad, que a la fecha ya han superado el 50% de eficiencia. La razón por la cual no las vemos sobre nuestros tejados es porque el mercado de las ERNC es lento (aunque crece sostenidamente), y por que los costos de producción aun no le dan la competitividad necesaria para posicionarse por sobre otras alternativas.

Sin embargo, el avance de la nanotecnología, así como de la física cuántica, prevén un futuro hasta ahora impensado para la energía solar fotovoltaica. El principal impedimento para mejorar la eficiencia de las celdas es la incapacidad de absorber uniformemente todo el espectro de radiación, dado que el cristal de Silicio sólo transforma en electricidad aprovechable fotones con un rango determinado de longitudes de onda. Los esfuerzos por vencer esta limitación hasta ahora han sido costosos e inviables, pero la inminente aparición de tecnologías de fabricación a escala atómica permitirán crear celdas de cristal perfecto a muy bajo costo, con el plus de poder mezclar uniformemente materiales absorbentes de todas las bandas del espectro de radiación solar.



*Figura 4.50: Celda solar ultra delgada fabricada con nanotecnología.*

## Capítulo 5:

### Sistema de medición de potencia generada.

En la búsqueda constante de nuevas alternativas, sobre todo en el ámbito de las ERNC, así como en la evaluación y análisis de las técnicas actuales, surge la necesidad de contar con datos empíricos, lo más acercados a la realidad aplicada, sobre el rendimiento de estas tecnologías en la zona.

El sur de nuestro país (latitud Valdivia), cuenta con una dosis de radiación UV en el verano de  $60 \text{ W/m}^2$ , valor muy cercano a los máximos registrados en la Zona Central y Norte. Por otro lado, la radiación total alcanza un valor en verano de  $900 \text{ W/m}^2$ , comparable casi a los  $1000 \text{ W/m}^2$  que recibe nuestro Desierto de Atacama. Se pretende evaluar, con el presente trabajo, cuál es el nivel de participación de la banda UV-A en la generación fotovoltaica, con respecto al resto del espectro, y además tener una medida diaria de la generación total de electricidad por medio de un panel de silicio multicristalino, que es la tecnología más utilizada y difundida actualmente.

De forma práctica, la idea principal consiste en disponer, en iguales condiciones de radiación - esto es, inclinación y orientación - dos paneles fotovoltaicos idénticos, aplicando a uno de ellos un filtro de radiación ultravioleta, de transmitancia conocida, para así, a través de la diferencia de generación de ambos paneles, obtener la cantidad de energía eléctrica generada sólo por el espectro ultravioleta.

## 5.1 Resultados esperados.

En el capítulo anterior se vio cómo, a través del efecto fotoeléctrico, un fotón puede otorgar energía a un electrón de valencia para llevarlo a la banda de conducción. En la celda fotovoltaica de un panel solar como el utilizado en este estudio, los fotones de las distintas frecuencias de la luz solar colisionan con los cristales de silicio, arrancando electrones hacia niveles más altos de energía. Ahora bien, cada fotón porta una cantidad de energía característica según su frecuencia.

Dado que la energía de un fotón está dada por la expresión:

$$E_f = h * f$$

en donde  $h$  es la constante de Planck y  $f$  es la frecuencia del fotón, un fotón de UV-A del centro de esta banda (360 nm) contiene aproximadamente 1,5 veces la energía de un fotón del centro de la banda visible (550 nm, luz verde), y 3 veces la energía de un fotón de infrarrojo (1080 nm).

Si bien se conoce que la respuesta del silicio cristalino a la radiación ultravioleta es menor a la de la radiación visible e infrarroja, la mayor cantidad de energía que porta el fotón de UV excita los electrones del silicio con más facilidad y, por lo tanto, genera mayor cantidad de cargas libres listas para ser conducidas como corriente eléctrica.

Se espera que este fenómeno se vea reflejado positivamente en la generación, lo cual se pretende evidenciar con las mediciones de potencia eléctrica.

## 5.2 Paneles Kyocera KC-50T.

Se han escogido para el estudio, paneles de Si-m con una potencia nominal de 50 Watt, del fabricante japonés Kyocera, modelo KC-50T.



*Figura 5.1: Panel fotovoltaico Kyocera KC50T.*

Este panel posee las siguientes especificaciones eléctricas, para condiciones estándar (irradiación  $1000 \text{ W/m}^2$ , masa del aire 1.5, temperatura  $25^\circ\text{C}$ ):

Potencia Máxima	54 Watt (+10% / -5%)
Voltaje de trabajo máximo	17,4 V
Corriente de trabajo máxima	3,11 A
Voltaje de circuito abierto	21,7 V
Corriente de cortocircuito	3,31 A

*Tabla 5.1: Especificaciones eléctricas del panel KC50T*

Y una característica corriente-voltaje entregada por el fabricante, como se muestra en la figura siguiente:

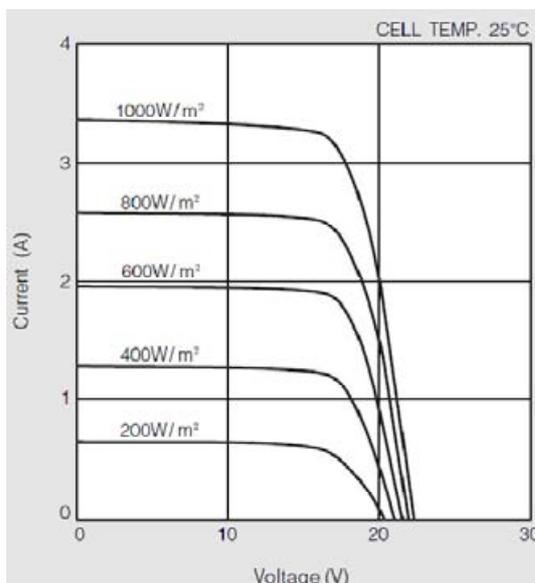


Figura 5.2: Curvas características del panel KC50T. Fuente: Datasheet.

### 5.3 Filtro UV.

Dado que los paneles deben estar a intemperie, el filtro ultravioleta debe ser resistente, impermeable y no calentarse excesivamente, ya que así perjudicaría el funcionamiento de las celdas. Un barniz con protección UV sería una buena idea, pero la dificultad para lograr una capa uniforme, sin imperfecciones, así como la imposibilidad de obtener fidedignamente su transmitancia a la luz, aumentaría el error de las mediciones en un porcentaje inaceptable. Por este motivo, se ha escogido un cristal laminado, cuya fabricación es homogénea y sus parámetros de transmitancia a distintas frecuencias son dadas por el fabricante. Este tipo de cristal, se construye a través de dos láminas de vidrio simple unidas entre sí por una película de Butiral de Polivinilo (PVB), transparente a la luz visible pero opaca al ultravioleta (99%). Esta película además le otorga una excelente resistencia a golpes.

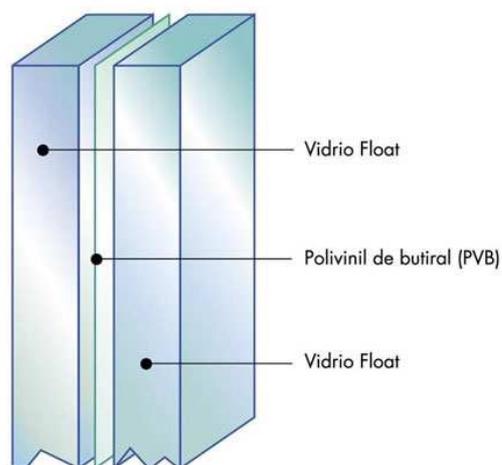


Figura 5.3: Estructura de un cristal laminado.

El cristal adquirido fue construido por el fabricante chileno Dialum Ltda, quien otorga las siguientes características acerca de esta pieza:

Parámetro	Valor
Tipo de transmisión sonora	33
Tipo de transmisión exterior-interior	28
<b>Transmitancia del visible (%)</b>	<b>88</b>
<b>Opacidad del ultravioleta (%)</b>	<b>99</b>
<b>Factor solar</b>	<b>0,68</b>
Valor U	5,7

Tabla 5.2: Características de transmitancia del cristal laminado.

De estos parámetros, el Factor Solar corresponde a la relación entre el “calor solar” entrante y saliente al cristal; esto es, la proporción del infrarrojo cercano que logra atravesar el material. En resumen, la radiación total saliente del cristal está dada por:

$$R_t = 0,68I + 0,88V + 0,01U$$

En donde  $I$  es la radiación de infrarrojo cercano,  $V$  visible y  $U$  ultravioleta, incidentes sobre la superficie de la lámina de vidrio exterior. La cantidad de ultravioleta que atraviesa el cristal, alrededor del 1%, la podemos despreciar con respecto de la cantidad de infrarrojo y visible, con lo cual:

$$Rt = 0,68I + 0,88V$$

Estas relaciones no son en verdad constantes, sino que representan un promedio aproximado a la respuesta espectral real del vidrio laminado, que tiene una curva diferente para cada frecuencia. Una curva típica para este tipo de cristal laminado (simple) se muestra en la figura:

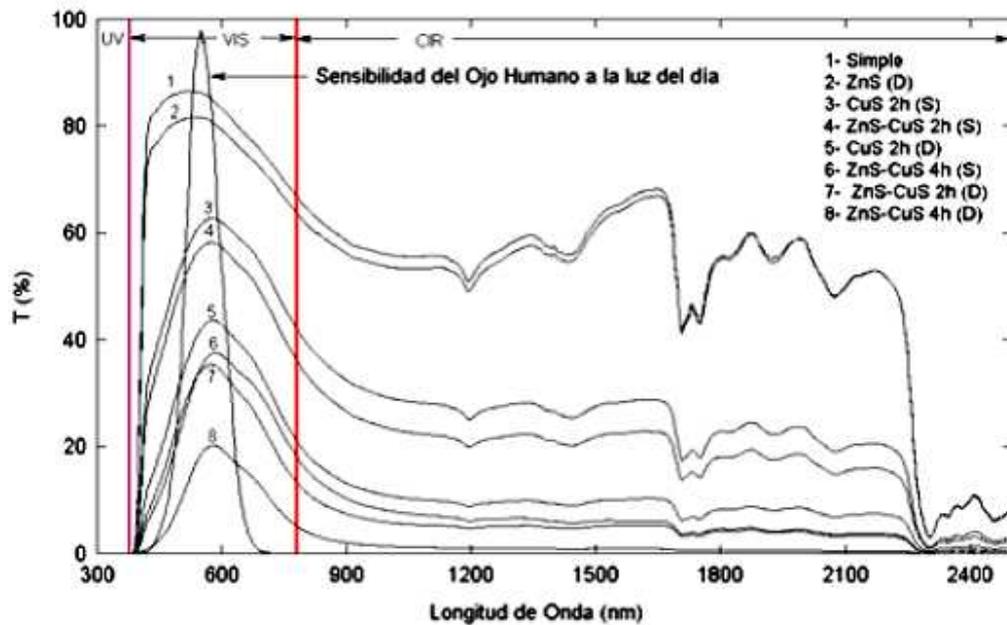


Figura 5.4: Transmitancia de cristales laminados. Fuente: American Society for Testing and Materials.

La curva superior corresponde a la forma de respuesta (transmitancia) del cristal en cuestión, que es de tipo simple. Se aprecia la tendencia de este tipo de cristales a filtrar alrededor del 40% del infrarrojo cercano. Si bien el cristal escogido para el estudio debe

presentar una forma de transmitancia similar, sus valores son algo más altos, por lo que especifica su fabricante. Teniendo en cuenta estas especificaciones, y la curva antes descrita, podemos promediar los efectos de las transmitancias individuales del infrarrojo y visible, resultando la expresión, para obtener la potencia generada por el panel al cual se le va a aplicar el filtro, en términos de la potencia generada por las radiaciones infrarroja y visible incidente:

$$P_{CF} \cong 0,72(P_I + P_V)$$

En donde  $P_{CF}$  es la potencia total generada por el panel con filtro,  $P_I$  es la potencia generada por la radiación infrarroja, y  $P_V$  la potencia generada por la radiación visible.

En cuanto al panel sin filtro, éste no recibe alteración en la radiación incidente, y por lo tanto su potencia generada tampoco se ve afectada:

$$P_{SF} = P_I + P_V + P_{UV}$$

En donde  $P_{SF}$  es la potencia total generada por este panel y  $P_{UV}$  la potencia generada particularmente por la radiación ultravioleta. Reemplazando y reduciendo términos semejantes, se obtiene finalmente la expresión para la potencia generada por el espectro ultravioleta:

$$P_{UV} = P_{SF} - \frac{P_{CF}}{0,72}$$

Físicamente, el cristal escogido se dimensionó del mismo tamaño que el panel fotovoltaico, y se adhirió a él en sus bordes, con silicona neutra de color blanco.

## 5.4 Lugar de instalación.

El lugar físico para disponer los paneles debe de estar alejado completamente de obstáculos que perturben los rayos del Sol. También debe estar lejos de fuentes de suciedad y polvo, hojas de árboles, etc., que pudieran adherirse a la superficie de los paneles y afectar la generación. Por último, para este estudio se ha procurado la elección de un lugar poco accesible, o bien escasamente transitado, para evitar posibles siniestros.

Después de evaluar varias alternativas, se escogió el techo del Edificio Multimedia del Campus Miraflores de la Universidad (Edificio 7000). Este edificio tiene una altura total aproximada de 30 metros, en donde los árboles cercanos no interfieren con el arco solar en ninguna época del año. Su techo es de zinc, está orientado hacia el norte, y posee una elevación desde el nivel del suelo de 5,6°.

Orientados hacia el norte, se decidió instalar los paneles con una elevación de 40°, que corresponde aproximadamente a la latitud de la ciudad de Valdivia. Normalmente, en las instalaciones domiciliarias en esta zona, se suele dar una elevación de 10° más que la latitud, es decir unos 50° por sobre el suelo, para así mejorar la generación durante el invierno, en desmedro de un pequeño porcentaje en verano. Esta opción se descartó para así obtener datos de generación lo más neutral posible, sin dar prioridad a ninguna estación del año en particular.

Dado que el marco de los paneles es de aluminio, la estructura de soporte para fijarlos al techo del edificio se construyó del mismo material, para evitar la corrosión que otro metal, como el fierro, pudiera ocasionar. Los pernos para la fijación de las estructuras se eligieron de acero inoxidable, por el mismo motivo.

En cuanto a la conexión eléctrica, los negativos de ambos paneles se unieron como negativo común. Los marcos de ambos paneles se unieron eléctricamente a través de un cable, para conectarlos a la tierra del edificio. Se utilizó una hebra de 4 cables calibre AWG 8 multiflex, para el positivo del panel sin filtro, el positivo del panel con filtro, el negativo común y la tierra. La distancia desde la caja de conexión de los paneles hasta el 4to piso del edificio es de aproximadamente 10 metros, con lo cual, según las corrientes máximas estimadas de

generación, las pérdidas de tensión en dicho trayecto son despreciables para los efectos de medición (menores a 0,05 Volt).

La hebra de 4 cables fue protegida con un tubo de PVC, desde la caja de conexión hasta el punto de bajada hacia el interior del edificio, que coincidía con la salida del sistema de extractores de aire del mismo, con lo cual no fue necesario hacer ninguna perforación en su estructura.

La instalación se realizó un día despejado de Diciembre de 2008, con los elementos de seguridad debidos (casco, arnés y soga, zapatos de seguridad). En el primer día se fijó la estructura y se instalaron los paneles. Al día siguiente se realizaron las conexiones eléctricas y se extendieron los cables hacia la cabina de control de la Sala de Computación ubicada en el 4to piso del edificio.

Finalmente se limpiaron restos de polvo y grasa de la superficie del panel sin filtro y de la del filtro UV aplicado al segundo panel.



*Figura 5.5: Fotos de los paneles instalados (panel inferior con filtro).*

## 5.5 Metodología de medición.

La celda fotovoltaica, al comportarse como una fuente de corriente, es ideal para alimentar cargas que le exijan una tensión relativamente constante. En la mayoría de las instalaciones solares domiciliarias, se configura un arreglo de paneles, es decir, varios paneles conectados en circuito serie y/o paralelo, según la tensión que se requiera, para cargar un banco de baterías. De este modo encontramos en el mercado paneles en variadas tensiones, que para instalaciones de potencia van desde los 12V (los más utilizados), 24, 48, 60, 72, etc. Estos voltajes se deben a que las baterías más utilizadas para estos sistemas están también en esos rangos.

Dejando de lado obstáculos fortuitos entre la línea de vista del sol y un panel, como puede ser una pequeña nube pasajera, la radiación solar que incide sobre el panel es bastante estable. Esto se traduce en una suave curva de generación de electricidad.

Caso contrario es el consumo de energía que demanda un hogar a cada instante, el cual es muy variante durante el día, y con altos de potencia muy elevados (hervidor, plancha, aspiradora). Además, cuando las baterías están completamente cargadas, los paneles ya no deben continuar entregándoles corriente, ya que las sobrecargarían y dañarían. Es debido a esto que en tales sistemas se utiliza toda una electrónica de control, con dispositivos cada vez más inteligentes, para manejar la tensión y las corrientes de carga-descarga en las baterías. Un diagrama básico se muestra en el esquema siguiente:

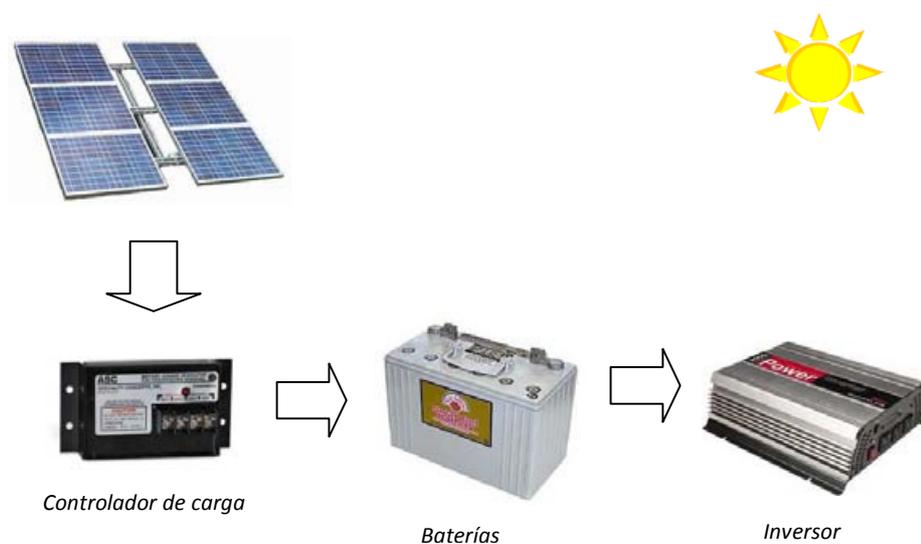


Figura 5.6: Sistema fotovoltaico típico.

En estos sistemas, un controlador de carga regula la impedancia que ven los paneles hacia las baterías, ajustando la corriente con la cual éstas se cargan. También se ocupa de abrir el circuito cuando las baterías han alcanzado su nivel máximo de carga.

Para el sistema de medición que se quiere implementar, el modelo anterior no es de mucha utilidad, puesto que el controlador de carga tomará de los paneles solo la energía que estime conveniente para cargar las baterías. Aun cuando las baterías se mantuviesen siempre en un nivel de carga intermedio, el controlador seguirá limitando la corriente hacia ellas. Esto se debe a que las curvas de carga/descarga de estas baterías varían mucho en función de la corriente y del tiempo. A ello se suman factores críticos como la temperatura y la humedad.

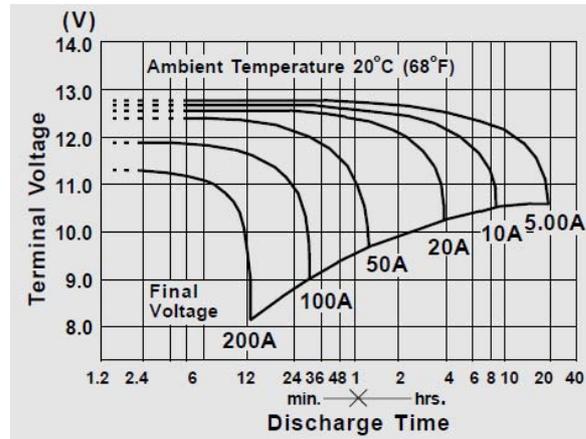


Figura 5.7: Curvas de descarga para una batería de ciclo profundo de 12V, 100Ah.

El sistema que se pretende implementar debe medir en todo momento la totalidad de la potencia generada por los paneles, sin llevarlos a sobrecarga o cortocircuito. De esta manera se tendrá una medida lo más real posible de la capacidad de generación de este tipo de paneles. Por este motivo se ha descartado la utilización de un modelo o sistema como el descrito anteriormente, que si bien habría sido ideal para simular las condiciones más comunes en que estos paneles se utilizan en la actualidad, se habrían obtenido datos erróneos.

### **Circuito Equivalente**

Para efectos de diseñar una correcta metodología de medición, el circuito equivalente de la celda fotovoltaica es de gran ayuda:

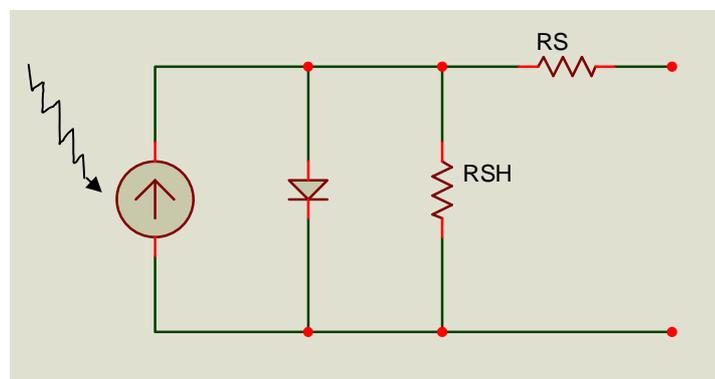


Figura 5.8: Circuito equivalente de la celda solar.

Éste nos dice que cada celda es una fuente ideal de corriente en paralelo a un diodo y un par de resistencias serie y paralelo. La fuente de corriente es equivalente a las cargas libres que se generan tras el efecto fotovoltaico, el diodo es producto de la juntura propiamente tal, y las resistencias aparecen debido a las pérdidas térmicas en el semiconductor y óhmicas de los contactos.

Por simple inspección, se deduce que el elemento característico de la celda fotovoltaica es una fuente de corriente, pero, ¿cuál es su capacidad?, o dicho de otra manera, ¿de qué forma está dada su potencia nominal y máxima?.

Sabemos que la intensidad de esa corriente depende de la cantidad de cargas libres que estén disponibles en el material, y que debido al campo eléctrico que se forma en las celdas, estas cargas se orientan en una dirección o polaridad determinada. Del efecto fotovoltaico, sabemos también que la cantidad de estas cargas libres es directamente proporcional a la intensidad de radiación incidente sobre la celda. Si bien las firmas comerciales que fabrican paneles solares no nos dan a menudo curvas características de voltaje-corriente, teóricamente se las conoce de la siguiente forma:

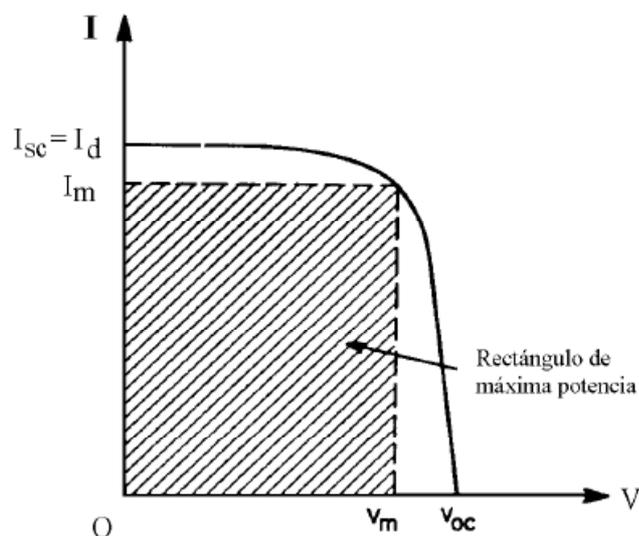


Figura 5.9: Curva característica de una celda solar.

En la práctica, se ve que los paneles solares, a medida que se les exige corriente (carga), tienden a mantener una tensión de salida relativamente estable, que es un poco menor a la tensión de circuito abierto, o “Voc”. De este modo, siguen entregando corriente hasta llegar a su máximo de potencia, en donde al aumentar la carga la corriente ya no sigue aumentando y la tensión decae. Este ‘punto’ crítico en la curva característica del panel equivale a la potencia máxima que está generando gracias al efecto sumado de todas sus celdas. Este punto, idealmente, es el que se pretende medir con el sistema propuesto.

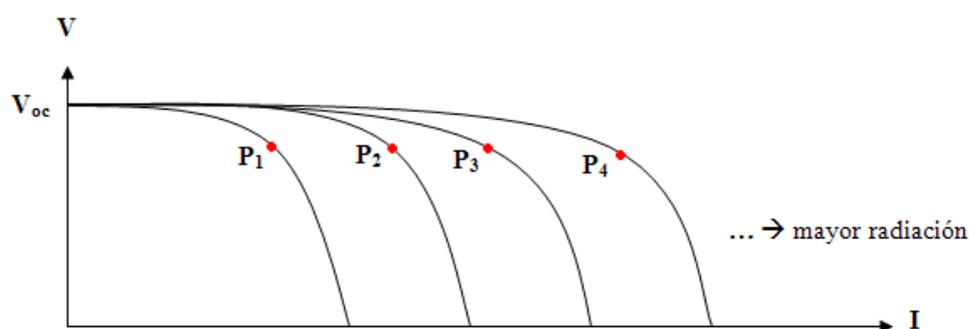


Figura 5.10: Curvas características de un panel solar a diferentes niveles de radiación.

Ahora bien, para cada nivel de radiación, el panel entregará una curva característica diferente, puesto que estará generando una cantidad igualmente diferente de energía. Si nos fijamos en cada punto de máxima potencia (en la figura, P1, P2, P3, P4), nos damos cuenta que la resistencia de carga ( $V/I$ ) para cada uno de ellos es diferente. Para niveles bajos de radiación, la resistencia de carga para una transferencia óptima de potencia en el panel debe ser mucho más alta que para niveles de mayor radiación.

El trabajo de ajustar dicha impedancia para cada nivel de radiación, es lo que hace el controlador de carga mencionado con anterioridad, en el modelo doméstico donde se cargan baterías para almacenar la energía generada. Estos controladores vienen diseñados de forma inteligente para detectar el nivel de potencia en que se encuentra el panel en todo momento, pudiendo extraer de ellos la mayor cantidad de energía en caso de que se requiera para cargar las baterías.

Para nuestro sistema de medición, entonces, sería ideal poder utilizar uno de estos dispositivos, si es que pudiéramos, claro, contar con una batería ideal que le esté exigiendo siempre un nivel de corriente adecuado como para aprovechar al máximo la potencia generada por el panel. Esto en la práctica sería posible ideando un circuito inteligente de descarga, que se encargue de mantener la batería en un estado de carga intermedio.

Como ya se comentó anteriormente, los controladores de carga siempre van a limitar la corriente hacia las baterías. ¿Por qué? Simplemente porque la vida útil de las baterías se ve sensiblemente reducida al cargarlas con corrientes grandes. Por ese motivo los controladores suelen utilizar una carga de alrededor del 10-15% de la capacidad total de la batería.

### 5.5.1 Simulación de baterías.

Por los motivos antes mencionados se ha pensado en un circuito de descarga directamente a la salida del controlador, que simule el estado semi-descargado de una batería de 12V, y que a su vez contenga una impedancia de carga suficiente como para exigir la máxima potencia a cada panel. Un circuito básico se muestra en la Figura 5.11, en donde la “tensión de batería” ha sido suplida por una fuente de alimentación externa. Se ha añadido un diodo de protección que impide que el controlador intente “cargar” la fuente, y una resistencia de valor lo suficientemente grande como para impedir que la fuente genere corriente.

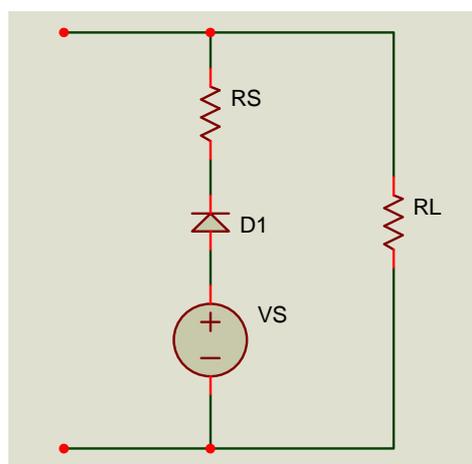


Figura 5.11: Circuito de descarga simulando una batería.

El voltaje necesario para simular una batería parcialmente descargada, dependerá de la tensión nominal de la batería y, obviamente, del tipo de batería. Un controlador de carga de 12V, para sistemas fotovoltaicos, esperará ser conectado a una batería del mismo voltaje. Las baterías de 12V comerciales suelen tener 6 celdas de ácido-plomo, de 2,1V cada una cuando están completamente cargadas. De este modo una batería de 12V a carga plena entregará entre 12,6 y 13V en vacío y reposo. Un valor adecuado para el circuito de descarga sería de 12 a 12,25 Volt, que equivale a una batería de 12V con un nivel de carga de entre el 30 y el 50% de su capacidad.

En cuanto a la impedancia de carga (RL en la imagen), se tendrá que ajustar experimentalmente haciendo pruebas de corriente con el controlador.

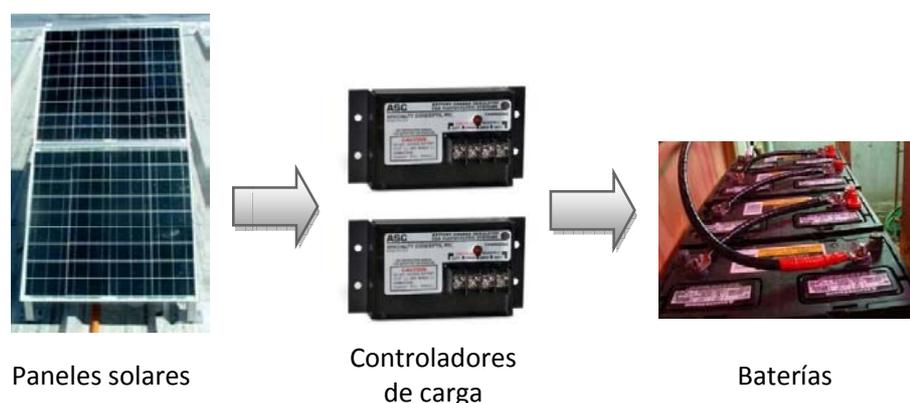
### **5.5.2 Medición directa con reóstatos.**

Como se mencionó con anterioridad, un controlador de carga para baterías siempre limitará la corriente hacia éstas dependiendo de su nivel de carga y de la capacidad total de la batería. Por este motivo, y de forma de obtener una medición lo más acercada posible a la potencia máxima que los paneles generan, se ha decidido realizar mediciones conectando directamente, a la salida de los paneles, reóstatos cuya resistencia se pueda ajustar al momento de la medición, de modo de encontrar manualmente el punto de máxima potencia. Esto se realiza disminuyendo gradualmente la resistencia del reóstato conectado a un panel, y verificando cómo comienza a descender su tensión a medida que aumenta su corriente. Al principio la tensión decae lentamente, pero cuando se llega al punto de máxima potencia, al seguir disminuyendo la resistencia, la tensión cae abruptamente y la corriente se estabiliza.

### **5.5.3 Sistema con baterías.**

Paralelamente a la metodología anterior diseñada, y a modo de tener un referente de generación acorde al escenario común en el que se utiliza esta tecnología, se propuso la

creación de un sistema de energía solar fotovoltaica básico, compuesto por el mismo par de paneles, pero sumados a controladores de carga, encargados de conducir la energía generada a un pequeño banco de baterías.



*Figura 5.12: Sistema fotovoltaico propuesto.*

La elección de estos componentes, va en directa correspondencia con los paneles solares con los cuales se dispone. En este caso, al tener éstos una tensión de trabajo comprendida entre los 10 y los 18 Volt, se los utiliza comúnmente para cargar baterías de 12V.

En el caso de los controladores de carga, se han escogido unidades Specialty Concepts, modelo ASC-12/8, especialmente diseñados para sistemas fotovoltaicos, con tensión de salida para baterías de 12V, y corriente de trabajo máxima de 8A, aproximadamente el doble de la corriente máxima generada por cada panel.

En cuanto a la capacidad de las baterías, en un sistema de generación normal se dimensiona acorde a la cantidad de energía que se requiere almacenar. Para este estudio, lo relevante es la generación en sí y no el almacenamiento de electricidad, por lo cual cualquier valor en capacidad no influirá en la medición. El único cuidado que se debe tener es que la capacidad de la batería, medida en Amper-hora (Ah), debe ser al menos 10 veces la corriente de carga máxima. Esta regla es de tipo experimental y se utiliza para evitar que la batería se cargue con corrientes muy altas, que acortarían sensiblemente su tiempo de vida. Para el sistema propuesto, una batería de 55 Ah para cada panel es más que suficiente.

En cuanto al tipo de baterías, existen de variadas tecnologías según el rendimiento que se necesite y la aplicación a la que estén destinadas. Las más adecuadas para un sistema de energía renovable son las de ciclo profundo, cuyo nombre deriva de su capacidad para cargarse/descargarse casi completamente sin sufrir daños. Para el estudio se ha escogido una batería de ciclo profundo de 100 Ah para el panel sin filtro, y otra normal de plomo-ácido de 55 Ah para el panel con filtro. La diferencia de tecnologías se ha decidido con el motivo de comparar su desempeño individual a lo largo del tiempo, y obtener alguna conclusión útil. La asignación de cada batería a un panel u otro es arbitraria para efectos de medición y registro de los datos de generación.

Ya que se necesita medir la potencia eléctrica generada por cada panel solar de forma separada, cada panel se conecta a un solo controlador y a una sola batería.

#### **5.5.4 Subsistema de descarga.**

La elección de los componentes anteriormente mencionados, corresponde a un sistema de energía solar básico para cargar un banco de baterías. Sin embargo este sistema es incompleto si se pretende medir la potencia generada de forma continua y automatizada. Esto debido a que las baterías, a los pocos días de ser conectadas, se cargarían completamente y los controladores cerrarían el circuito desde los paneles, impidiendo la circulación de corriente y por lo tanto la medición de la potencia generada.

Para evitar que esto suceda, se necesita entonces de una carga eléctrica, adecuada a la tensión de las baterías, para que de forma controlada y pertinente, vaya descargando un porcentaje igualmente adecuado de la capacidad de cada batería. De este modo se contaría con un sistema de carga/descarga, en que las baterías estarían siempre a un nivel intermedio, listas para ser cargadas en todo momento. De forma práctica, es recomendable que dicho nivel esté por sobre el 50%, para prolongar la vida útil de las baterías. Para el caso, se ha escogido un nivel máximo del 75%, para ambas baterías, lo que genera un ciclo de carga/descarga de 25% de la capacidad de cada una de ellas. La intención de crear este ciclo es el de utilizar las baterías de

una manera lo más similar posible a como se emplean en un sistema real, además de otorgarles un rango de trabajo que evite el efecto memoria.

Por último, el elemento de carga se dimensiona de acuerdo a la cantidad de energía que se le extraerá a cada batería, y al tiempo que se estime para ello. Como máximo en corriente, se ha impuesto la misma regla general del 10% de la capacidad. Es decir, para la batería de 55 Ah una corriente máxima de 5,5 A, y para la de 100 Ah una corriente máxima de 10A.

Dado que el sistema será instalado al interior de un edificio, se descarta la utilización de elementos de carga eléctrica que pudiesen generar algún riesgo desde el punto de vista de la seguridad. En este sentido, son impensables elementos que generen un exceso calor, movimiento y vibración. Por este motivo se han escogido ampolletas, del tipo dicroicas, para 12V, las que se utilizan normalmente para iluminación de espacios interiores reducidos. Éste tipo de ampolletas viene dentro de un cono de metal y vidrio al vacío, con lo cual en caso de quemarse el filamento no existe riesgo de chispa y menos aún de inflamación.



*Figura 5.13: Ampolleta dicroica de filamento.*

### **5.5.5 Subsistema de Control.**

Para poder mantener las baterías en un nivel de carga como el propuesto, se precisa de un sistema inteligente capaz de detectarlo y accionar la carga durante el tiempo correcto.

Las baterías de acumuladores de plomo, poseen un grupo de celdas conectadas en configuración serie y paralelo, a modo de entregar el voltaje requerido. Cada celda posee una tensión a plena carga de 2,12V. Así, una batería “de 12V” es en realidad un grupo de 6 celdas acumuladoras conectadas en serie, de tal forma que la tensión de salida de la batería en conjunto es de 12,72V a plena carga.

A medida que una batería se descarga, su tensión va decayendo paulatinamente y de forma relativamente lineal. En una batería sellada, la única forma de conocer su nivel de carga es través de su voltaje entre bornes, positivo y negativo. Sin embargo, las baterías varían su tensión cuando están siendo cargadas, así como cuando están entregando corriente. Cuando se están cargando, su tensión sube aproximadamente a entre 13 y 14V. Por el contrario, cuando se les exige carga su tensión puede decaer hasta 10V o menos según la corriente.

Por otro lado, cuando la batería ha dejado de ser utilizada, es decir, no se está cargando/descargando, toma un tiempo en volver a su estado de reposo, en el cual su tensión se estabiliza. Por lo tanto la única forma de conocer su real nivel de carga es después de por lo menos unas dos horas de desuso.

Durante el día, mayormente desde las 9 de la mañana hasta las 6 de la tarde en invierno, y las 9 de la noche en verano, los paneles fotovoltaicos se encontrarán generando energía, por lo tanto las baterías se estarán cargando. Por este motivo se ha decidido que la descarga de las baterías se efectúe durante la noche. Además, se hace preciso desconectar completamente los paneles durante la noche, ya que en días de luna llena, la radiación reflejada por ésta hace que los paneles generen una cantidad de energía, mínima, pero que igualmente eleva la tensión de las baterías y por lo tanto impide la correcta medición de su nivel de carga.

De este modo, se ha decidido crear un sistema de control que, a cierta hora de la noche, cuando las baterías estén en reposo, mida su tensión, y si éstas se encuentran en un nivel igual o mayor al 75%, active un circuito de descarga, en este caso compuesto por las ampollitas dicroicas descritas anteriormente. Dicha descarga podría durar como máximo hasta el próximo día a las 9 de la mañana, donde se volverían a conectar los paneles.

De acuerdo a lo último, el sistema fotovoltaico para este estudio quedaría compuesto por los paneles solares, las baterías, y un sub-sistema de control encargado de la carga y descarga de las baterías:

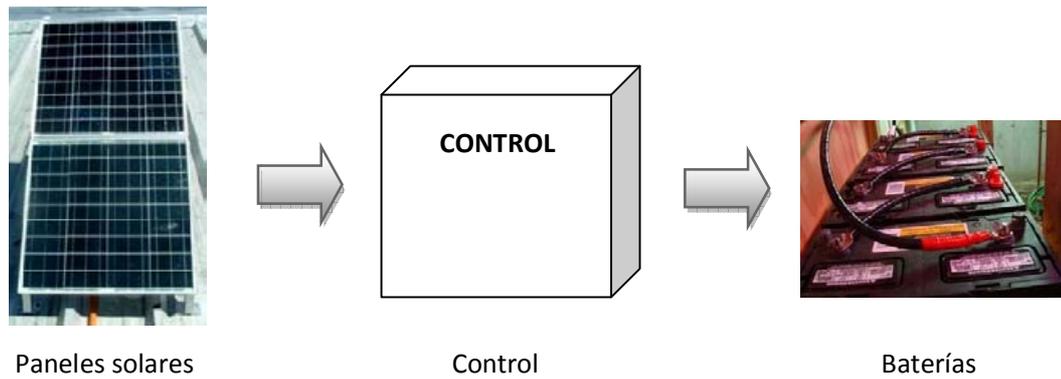


Figura 5.14: Sistema fotovoltaico propuesto, con subsistema de control.

Para el control del nivel de las baterías, se han escogido comparadores de tensión LM393. Estos CI poseen en su interior 2 amplificadores operacionales especiales para dicha aplicación. Su principio de funcionamiento se basa en activar una salida cuando una de sus entradas ha alcanzado la tensión de referencia previamente ajustada.

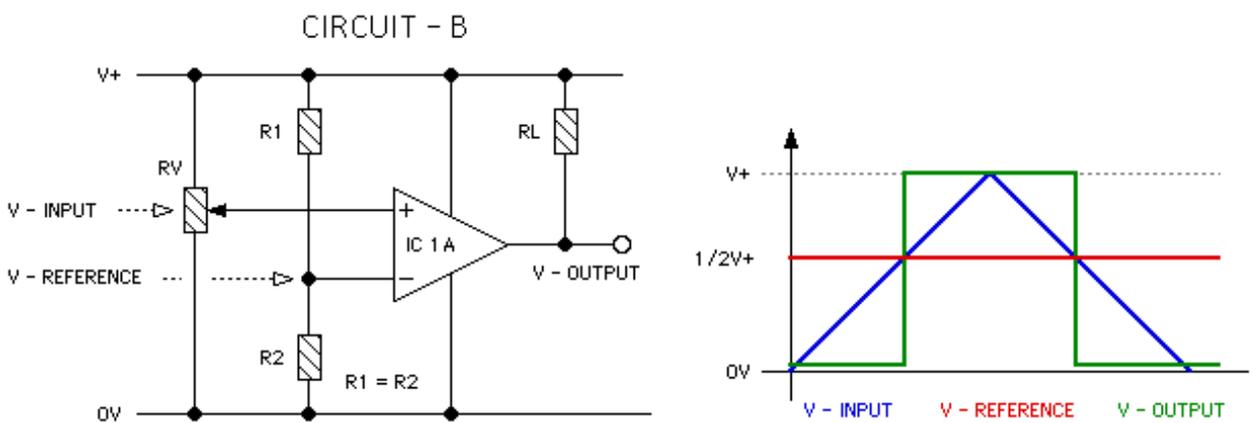


Figura 5.15: Funcionamiento de un AOP en modo comparador.

La tensión de referencia a los comparadores se conecta simplemente a  $V_{CC}$  o a cualquier otra tensión fija estable, mientras que las entradas analógicas se conectan a un divisor de tensión, que se calibra por medio de potenciómetros para extraer el voltaje requerido de las baterías. Como el nivel de carga escogido para las baterías era de un 75% como máximo, esto equivale a una tensión de aproximadamente 12,45 Volt.

Una vez calibrado el nivel de tensión para cada batería, queda seleccionar un actuador adecuado para el circuito de carga, es decir, para encender y apagar las ampolletas durante la noche, y cuando los comparadores así lo indiquen. Existen variados dispositivos para este cometido. Para el caso se ha decidido utilizar relés, pero no de corriente continua sino de corriente alterna, accionados por triacs BTA06-400C. A su vez, para separar el circuito de control de la red de alimentación AC se utilizaron optoacopladores MOC3031.

En resumen, cuando la tensión de las baterías alcanza el nivel de referencia ajustado en los comparadores, éstos elevan su salida activando los optoacopladores, quienes entregan la señal a los triacs para que conduzcan y cierren el relé respectivo.

Para lograr que el sistema de descarga funcione solamente de noche, se ha utilizado un *timer* de corriente alterna, de tipo común como los que se venden en las ferreterías. Éstos tienen una exactitud de 15 minutos (más que suficiente) y permiten configurar un periodo de activación que se repite todos los días a través de un reloj incorporado. Para este sistema se ha escogido un período de descarga entre las 1:00 y las 6 am, tiempo en el cual los paneles no generan electricidad y las baterías están en reposo.

Para la carga diurna, es decir, para permitir que los paneles se conecten a las baterías para cargarlas mientras hay radiación, se ha utilizado también un *timer* del mismo tipo, configurado como activo desde las 8 de la mañana a las 10 de la noche.

Para la batería de 100 Ah, descargar su nivel desde el 75% hasta el 50% equivale a ocupar una energía de 25Ah. Puesto que desde las 1:00 hasta las 6:00 transcurren 5 horas, se necesita una corriente constante de 5 A durante dicho período para efectuar esta descarga. Dado que la tensión de esta batería, bajo este nivel de corriente descendería hasta aproximadamente 12V, la potencia requerida es de  $5A \times 12V = 60W$ .

Para la batería de 55 Ah, un 25% de su capacidad equivale a 13,75 Ah, lo que en 5 horas de descarga se traduce a una corriente de 2,75A. A 12V, equivale a una potencia requerida de 33W. Puesto que estas potencias no se encuentran de forma exacta para ampolletas dicróicas, se escogen las más cercanas a estos valores y se compensa el tiempo en los *timers*.

Por último, a ambas baterías se les ha agregado en su salida fusibles de 10A, para protegerlas ante una eventual falla de cortocircuito en las ampolletas.

## **5.6 Sistema de Registro de Datos.**

El sistema de medición que se requiere implementar, debe captar, con la mayor exactitud posible, la potencia generada por ambos paneles, en un intervalo de tiempo determinado. Se ha estimado que, tanto para almacenar los datos, como para analizarlos posteriormente, una buena frecuencia de muestreo es cada 5 minutos. De este modo, cada día se tendrán 288 mediciones, una cantidad más que suficiente para el estudio. La potencia generada debe ser registrada en magnitud analógica y posteriormente convertida a un dato digital para enviarlo a un computador. Dicho computador recibirá los datos a través de un puerto de conexión dedicado, y a través de un software, guardará los datos en un archivo de texto plano o planilla Excel para su fácil visualización y análisis.

Para ello se ha elegido utilizar un microcontrolador PIC16F877A con convertidor Análogo/Digital integrado, y con capacidad de enviar datos a través de comunicación RS232 (puerto serie).

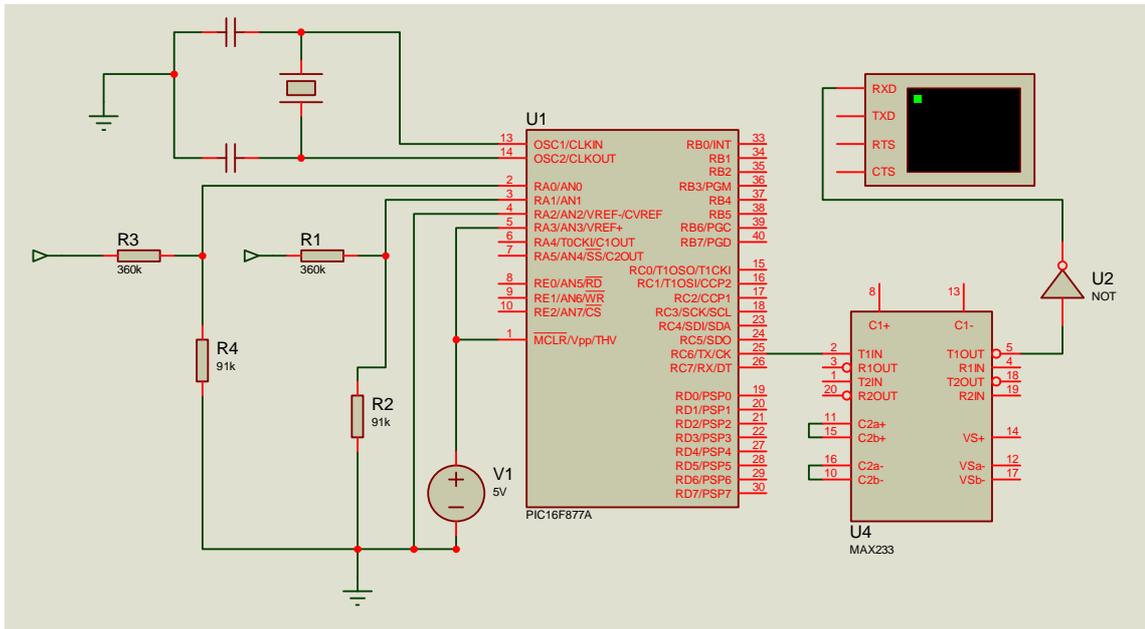


Figura 5.16: Microcontrolador PIC16F877A configurado como convertor A/D.

Este microcontrolador posee varias entradas analógicas, de las cuales dos de ellas se han utilizado para medir la tensión de las baterías, previo divisor de tensión.

A modo de obtener una medición lo más fiel posible, así como de no interferir con el circuito del sistema fotovoltaico original, se han escogido, para medir la corriente, sensores de efecto Hall (LEM LTS 6-NP). Estos dispositivos poseen un pequeño agujero por donde se hace atravesar el conductor, en este caso proveniente de los controladores de carga. La corriente en el conductor genera un pequeño campo magnético a su alrededor, que es captado por una pequeña bobina al interior del sensor. Esta bobina genera a su vez una pequeña corriente que el sensor a través de un amplificador y una resistencia convierte a tensión. Esta tensión es linealmente proporcional a la corriente del conductor, y está comprendida entre 2,5 y 5V, ideal para circuitos TTL, pudiendo conectar su salida directamente al convertidor analógico/digital del microcontrolador.

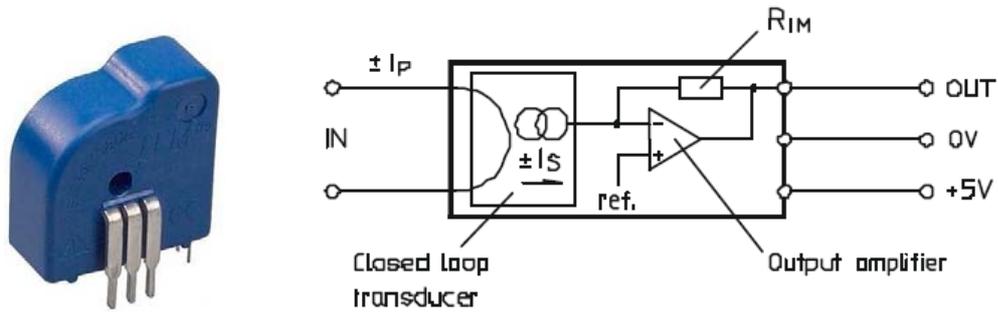


Figura 5.17: Sensor de efecto Hall.

La programación del microcontrolador se realiza en lenguaje C, por lo cual es simple su configuración, tanto de la recepción y conversión de los datos como del envío a través del puerto serie. Se ha creado una rutina cíclica, sin fin, que lee la tensión en sus entradas análogas, hace el cálculo de la potencia eléctrica para cada panel fotovoltaico y envía los datos al puerto serie:

```
#include <16f877A.h>
#include <adc.h>
#include <stdio.h>

#define delay(clock=4000000)
#define rs232(baud=2400, xmit=pin_c6, parity=N, bits=8)
#define fuses XT, NOWDT, PUT, BROWNOUT, NOLVP, NOPROTECT, NOCPD, NODEBUG

main()
{
    float h1;
    float h2;
    float v1;
    float v2;
    float i1;
    float i2;
    float p1;
    float p2;
    int8 i;

    set_tris_a(0x2F);
```

```
set_tris_b(0x00);
set_tris_c(0x00);
set_tris_d(0x00);
set_tris_e(0x0F);

output_b(0x00);
output_d(0x00);

setup_adc(ADC_CLOCK_DIV_32);
setup_adc_ports(ALL_ANALOG);

while (1)

{

    set_adc_channel(0);
    delay_ms(1);
    h1=READ_ADC();
    h1=h1*5;
    h1=h1/255;
    h1=h1-2.5;
    if (h1<0)
        h1=0;
    i1=h1*4.8;

    set_adc_channel(1);
    delay_ms(1);
    h2=READ_ADC();
    h2=h2*5;
    h2=h2/255;
    h2=h2-2.5;
    if (h2<0)
        h2=0;
    i2=h2*4.8;

    set_adc_channel(4);
    delay_ms(1);
```

```
v1=READ_ADC();
v1=v1*3;

set_adc_channel(6);
delay_ms(1);
v2=READ_ADC();
v2=v2*3;

p1=i1*v1;
p2=i2*v2;

if (p1<10)
    printf("0");
printf("%g", p1);
printf(" ");

if (p2<10)
    printf("0");
printf("%g", p2);
printf(" ");

for (i=1;i<=6;++i)
    delay_ms(50000);
}
}
```

## 5.7 Implementación y puesta en marcha.

Los circuitos de control y de medición de la potencia generada, contienen electrónica delicada y conexiones con una gran cantidad de cables. Además, varios de los dispositivos utilizados funcionan con corriente alterna, con lo que estar expuestos significaría un riesgo para el personal que trabaja en el edificio y específicamente en la sala de computación. Por estos motivos se ha decidido instalar toda la circuitería al interior de una sola caja metálica, desde y

hacia donde se conectan el resto de componentes, como son los paneles, las baterías, las ampollas y la alimentación. La carcasa ha sido eléctricamente aterrizada a la tierra del edificio para evitar que acumule estática y pudiese dañar los circuitos.



*Figura 5.18: Caja metálica con los circuitos de carga, control y descarga de los paneles y baterías.*



*Figura 5.19: Caja metálica instalada en la Sala de Computación, 4to piso Ed. Multimedial.*

## 5.8 Recepción y Almacenamiento de Datos.

Los datos medidos por el microcontrolador, son enviados a través de un puerto serial a uno de los computadores ubicados en la Sala de Computación, 4to piso del mismo edificio donde se han instalado los paneles. Dicho computador utiliza un S.O. Windows, entorno para el cual existen variadas herramientas de monitoreo y registro de datos vía puerto serial.

Ya que se necesita, en la medida de lo posible, un sistema que requiera la nula intervención de un usuario para su continuo funcionamiento, se ha escogido un software que funciona como 'demonio', es decir, que es capaz de ejecutarse en segundo plano y registrar datos automáticamente, guardándolos en una panilla Excel con un número de filas creciente.

El software además tiene la opción de guardar la fecha y hora de cada medición, dato de vital importancia para el estudio.

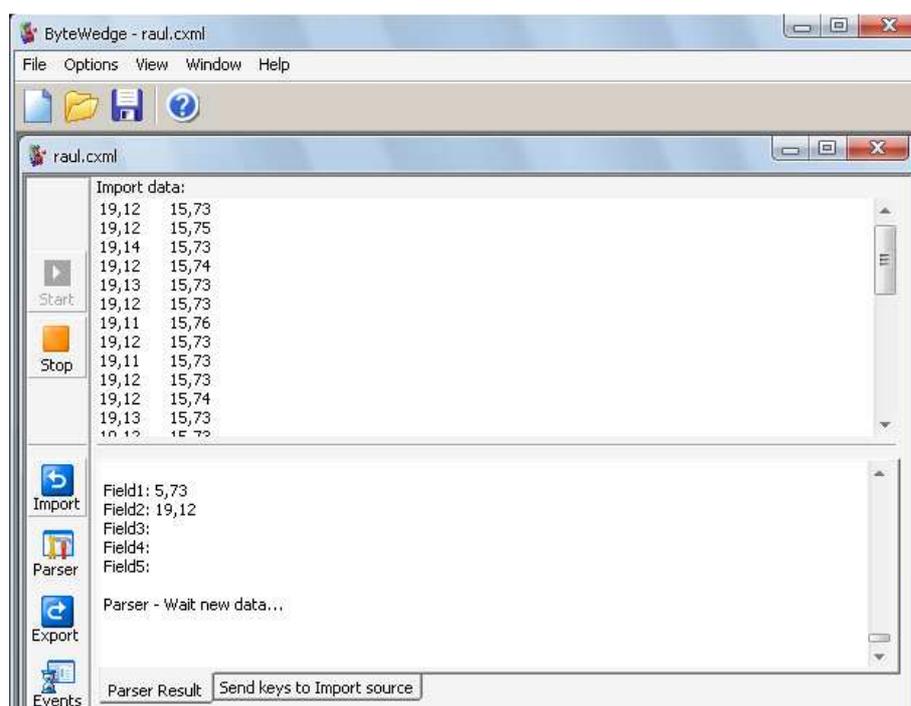
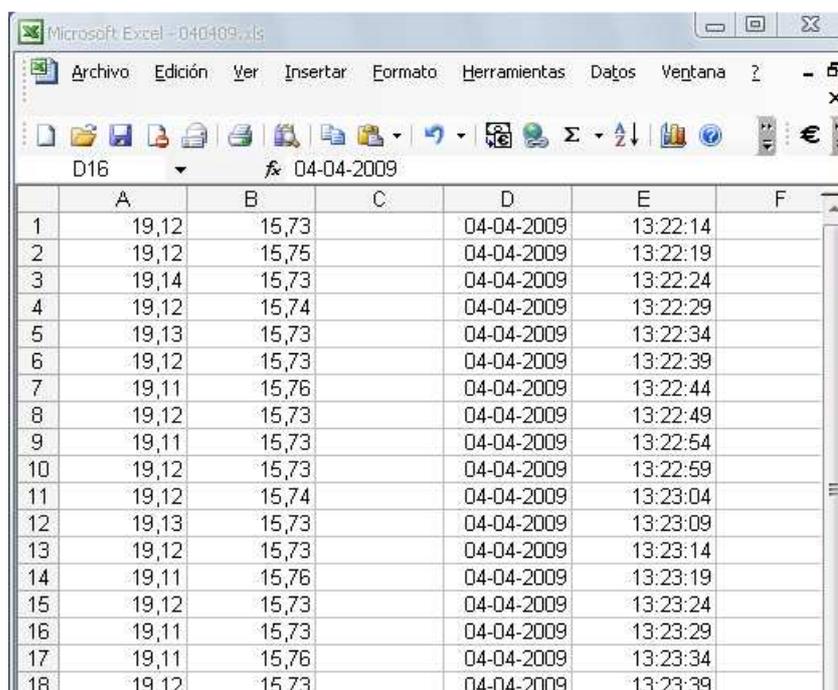


Figura 5.20: Software ByteWedge registrando datos desde el puerto serie.



Microsoft Excel - 040409.xls

Archivo Edición Ver Insertar Formato Herramientas Datos Ventana ?

D16 04-04-2009

	A	B	C	D	E	F
1	19,12	15,73		04-04-2009	13:22:14	
2	19,12	15,75		04-04-2009	13:22:19	
3	19,14	15,73		04-04-2009	13:22:24	
4	19,12	15,74		04-04-2009	13:22:29	
5	19,13	15,73		04-04-2009	13:22:34	
6	19,12	15,73		04-04-2009	13:22:39	
7	19,11	15,76		04-04-2009	13:22:44	
8	19,12	15,73		04-04-2009	13:22:49	
9	19,11	15,73		04-04-2009	13:22:54	
10	19,12	15,73		04-04-2009	13:22:59	
11	19,12	15,74		04-04-2009	13:23:04	
12	19,13	15,73		04-04-2009	13:23:09	
13	19,12	15,73		04-04-2009	13:23:14	
14	19,11	15,76		04-04-2009	13:23:19	
15	19,12	15,73		04-04-2009	13:23:24	
16	19,11	15,73		04-04-2009	13:23:29	
17	19,11	15,76		04-04-2009	13:23:34	
18	19,12	15,73		04-04-2009	13:23:39	

Figura 5.21: Planilla Excel donde el software va agregando las mediciones.

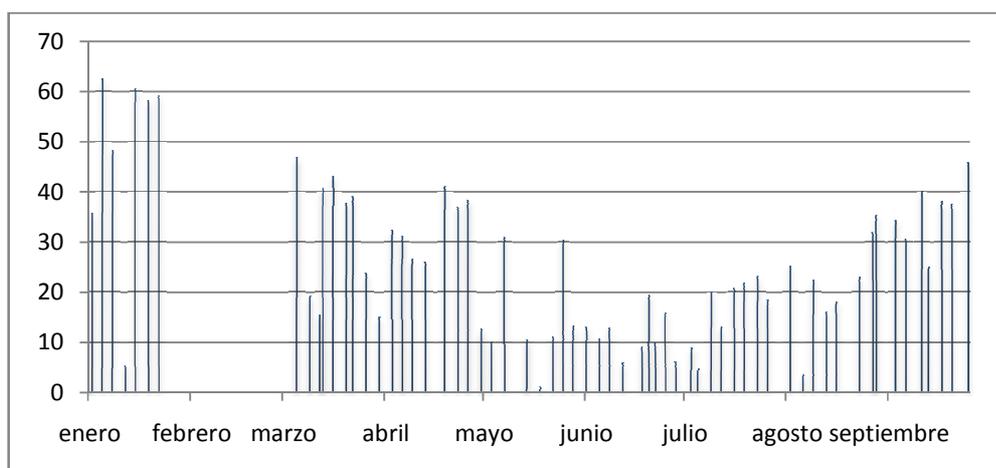
De forma que los resultados de este estudio estén disponibles fácilmente y sin necesidad de recurrir físicamente al computador donde está instalado el software de registro de datos, se ha configurado un servidor FTP, en este mismo computador, para así poder acceder a los datos desde la red.

## Capítulo 6:

### Resultados.

Los datos expuestos a continuación, corresponden a la potencia eléctrica generada por los paneles solares, sin filtro y con filtro UV, en días de Enero y el período Marzo-Septiembre, medida con el método directo de reóstatos. Se han escogido los resultados de éste método como los apropiados para el análisis de este estudio en particular, a modo de poder establecer conclusiones lo más fehacientes posibles. Sin perjuicio de lo anterior, los datos arrojados por el sistema con baterías serán registrados y almacenados de forma continua en el computador servidor, incluso después del término de este estudio, y a largo plazo entregarán información acerca del comportamiento de estos paneles en el tiempo y de su rendimiento en sistemas de generación residencial, como el que se ha querido simular.

Las mediciones siguientes fueron tomadas a la hora de mayor radiación (13:30 en horario invierno, 14:30 en horario de verano). Se tomaron rápidamente y de forma simultánea, para evitar fluctuaciones, sobre todo en días nublados, donde en presencia de viento una nube puede tapar la trayectoria de la luz solar para luego retirarse prontamente.



*Figura 6.1: Potencia eléctrica generada por el panel sin filtro [Watts]*

Como se aprecia, se registraron valores máximos, en enero, del orden de los 60 Watts, es decir, algo superior a la potencia máxima especificada por el fabricante (54 W), para condiciones de radiación estándar (1000 W/m<sup>2</sup>). En general se nota en invierno una caída hacia el 33% de la potencia promedio generada en verano.

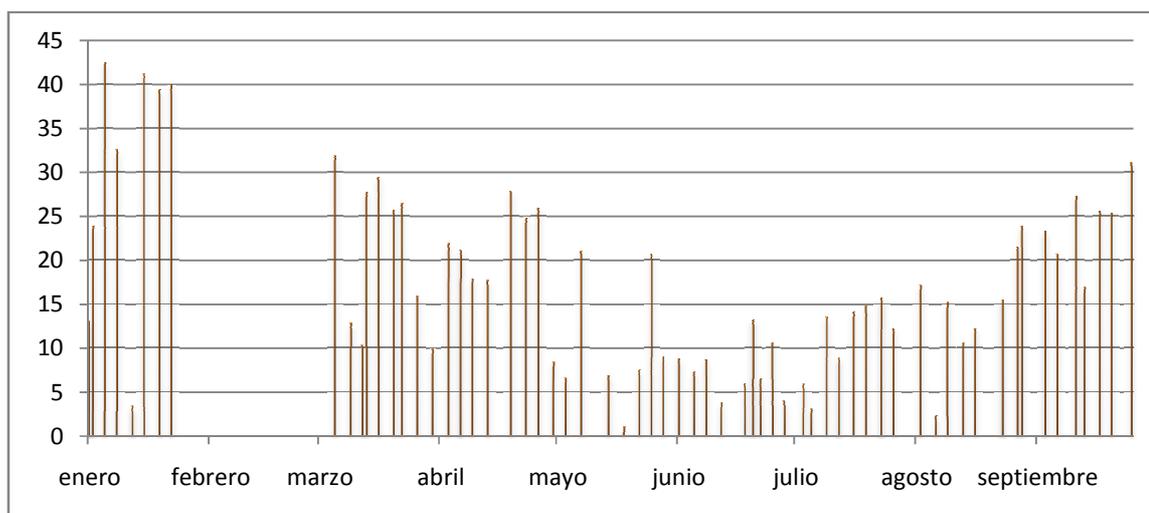


Figura 6.2: Potencia eléctrica generada por el panel con filtro [Watts]

En el panel con filtro se apreció una caída de igual proporción, y en general los valores de potencia registrados fueron dos tercios de la potencia generada por el panel sin filtro.

Utilizando la relación de potencia obtenida de la transmitancia del cristal laminado utilizado como filtro,

$$P_{UV} = P_{SF} - \frac{P_{CF}}{0,72}$$

en donde  $P_{UV}$  es la potencia eléctrica generada por el panel sin filtro atribuible a la radiación UV-A,  $P_{SF}$  la potencia total del panel sin filtro y  $P_{CF}$  la potencia generada por el panel con filtro, se calculó la potencia generada a partir de la radiación ultravioleta:



A modo de poder estimar la eficiencia energética de las celdas solares utilizadas, se analizaron datos de radiación total de onda corta (300-4000 nm), proporcionados por el archivo meteorológico satelital NOAA READY (Administración Nacional Oceánica y Atmosférica, Departamento de Comercio de Estados Unidos), el cual provee una interfaz Web para descargar los datos. Además se descargó también el porcentaje de cielo cubierto por nubes para los días y hora en que se realizaron las mediciones, todo esto para la latitud en que se ubicaron los paneles:

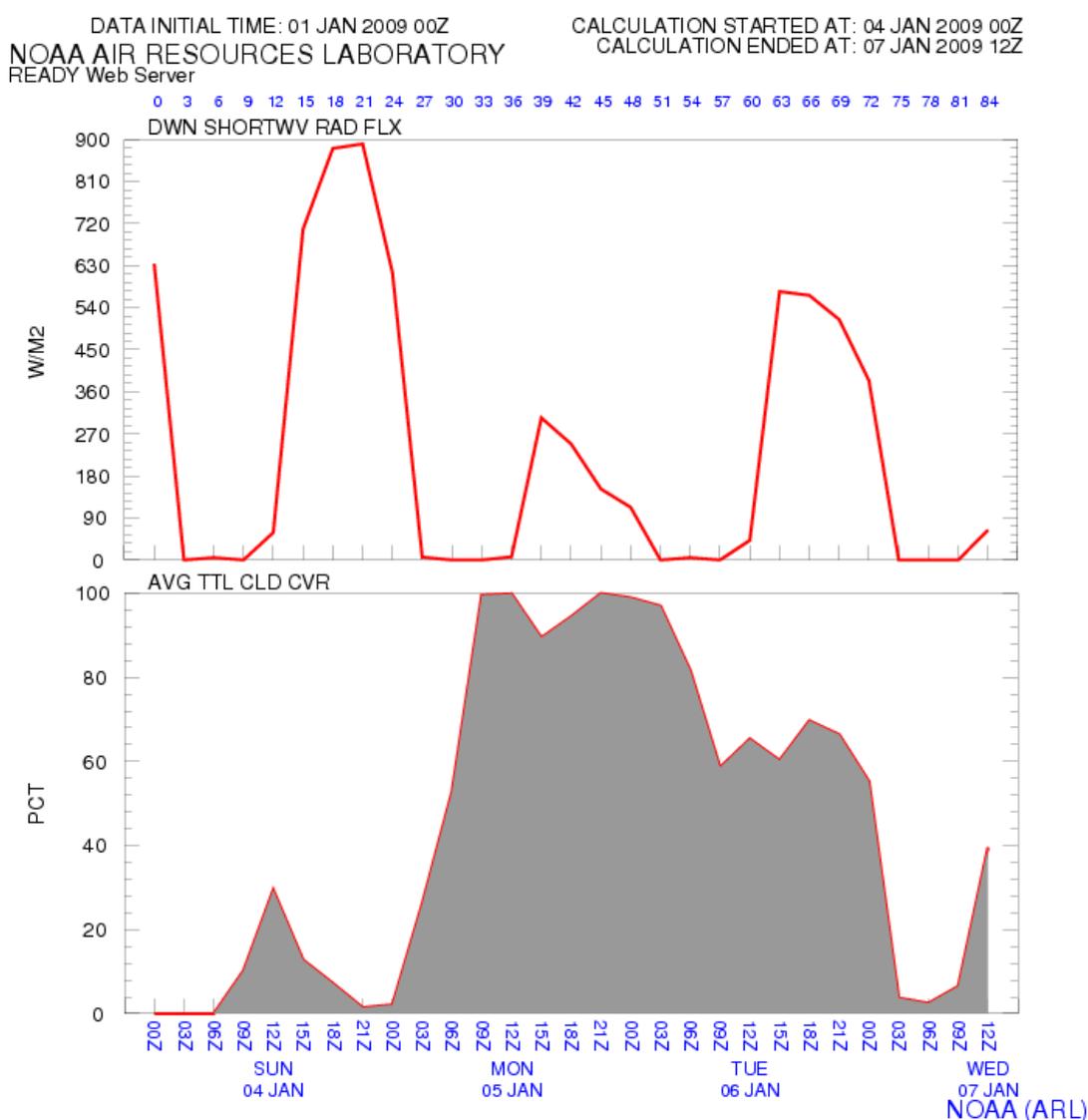
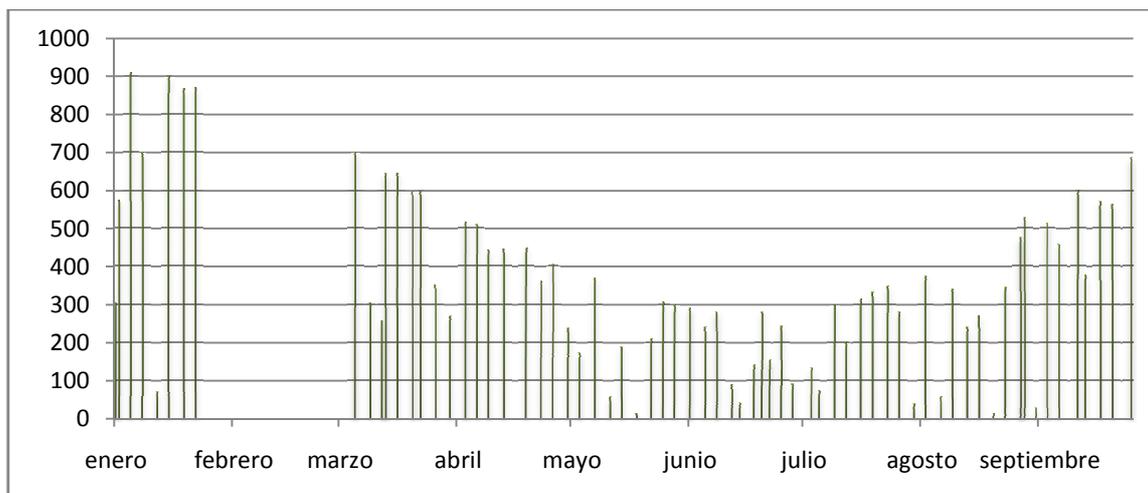


Figura 6.5: Radiación de onda corta y porcentaje de nubosidad, 4-6 Enero, NOAA READY.

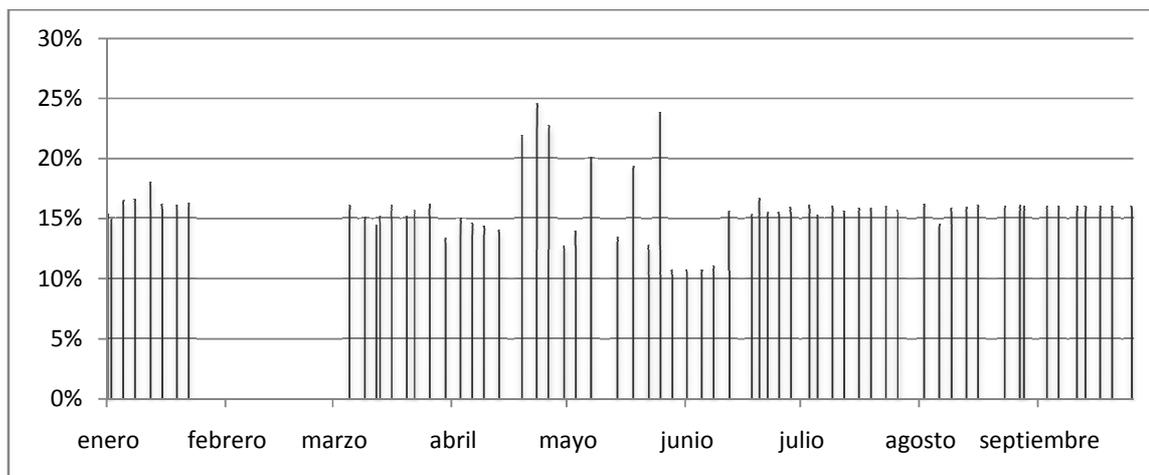


*Figura 6.6: Radiación de onda corta, Enero y período Marzo-Septiembre, NOAA READY.*

Como se puede observar, la evolvente es muy similar a la obtenida por los datos de radiación ultravioleta y los de potencia eléctrica generada por los paneles. Se aprecia claramente el declive de la radiación en los meses de invierno. Cabe destacar también que la radiación en enero alcanza niveles bastante altos, con máximos cercanos a los 1000 Watts, nivel que se considera como estándar para un día despejado en la superficie terrestre.

### ***Eficiencia.***

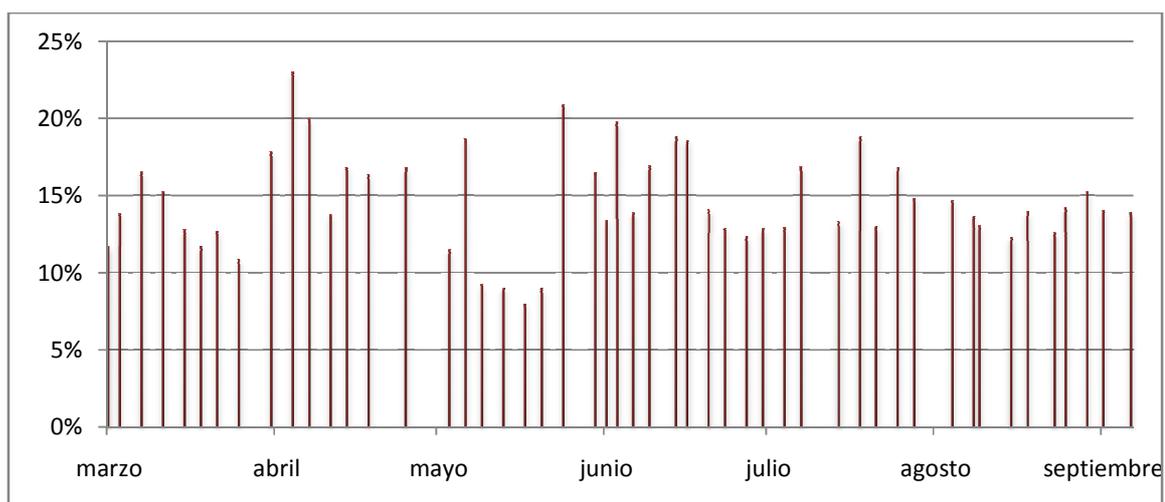
Utilizando los valores de potencia eléctrica registrados con el panel sin filtro, en contraste a los valores de radiación total obtenidos del archivo meteorológico NOAA READY, se calculó la eficiencia general de los paneles fotovoltaicos utilizados para el estudio.



*Figura 6.7: Eficiencia energética general, panel sin filtro.*

El promedio de eficiencia resultó ser de un 16%, algo mayor al esperado según las especificaciones del fabricante, que sugieren entre un 12 y un 13%.

Comparando la cantidad de potencia generada por el panel sin filtro, atribuible a la banda UV-A, con la irradiancia UV-A incidente sobre el panel en los días de medición, se estimó la eficiencia de estos paneles a dicha radiación:



*Figura 6.8: Eficiencia del panel en la banda UV-A, Marzo-Septiembre 2009.*

## Capítulo 7:

### Conclusiones.

En el presente Trabajo de Titulación, se logró instalar satisfactoriamente un sistema de generación de energía eléctrica a partir de paneles solares multicristalinos. Aplicando un cristal laminado sobre uno de los paneles, que actuó como filtro para la radiación ultravioleta, se logró estimar la potencia que estos paneles generan al transformar dicha radiación en electricidad.

Desde el momento de su instalación en el Edificio 7000 del Campus Miraflores de la Universidad, tras las primeras mediciones éstos ya mostraron una eficiencia total del 16%, la cual se mantuvo constante durante los meses siguientes.

En presencia de nubosidad, la potencia generada por ambos paneles cayó sensiblemente, debido evidentemente a que la cantidad de radiación también es menor bajo dichas condiciones. Sin embargo, por ser paneles multicristal se esperaba que tuvieran una baja o nula respuesta a la radiación difusa, lo cual no fue así. Aun con nubosidad intensa, en días de verano y hasta el mes de Abril, presentaron un excelente rendimiento, en el sentido de que la potencia generada seguía siendo proporcional a la radiación incidente, aún cuando esta fuera menor. Sólo en días completamente cubiertos de densa nubosidad, y sobre todo en el período Junio-Julio, se apreció una caída abrupta en la potencia generada. Esto se atribuye a que la eficiencia de estos paneles es mucho menor para niveles de radiación inferiores a  $200 \text{ W/m}^2$ .

Paralelamente a las mediciones de potencia eléctrica, se analizaron datos de radiación UV-A proporcionados por la profesora Charlotte Lovengreen. También, se tomaron muestras de radiación ultravioleta con un instrumento adquirido especialmente para el estudio. De ambas fuentes en conjunto, se obtuvieron valores que variaron desde los  $60 \text{ W/m}^2$  en verano, a los  $20 \text{ W/m}^2$  en invierno, lo que equivale aproximadamente al 6,7% de la radiación solar total que se recibe en la superficie, para la latitud de la ciudad de Valdivia en dichas estaciones.

El cristal laminado aplicado a uno de los dos paneles, bloqueó la totalidad de la radiación ultravioleta y porciones diferentes del visible e infrarrojo. Si bien estas proporciones fueron detalladas por el fabricante del cristal, su valor no es exacto, y estimar su correcta aplicación en el cálculo de la incidencia UV fue la principal dificultad del estudio. En promedio, del total de potencia generada por los paneles, un 6% fue atribuible a la radiación UV-A. Considerando que la proporción de irradiancia que arriba a la superficie terrestre en la banda UV-A, con respecto a la radiación visible e infrarroja, es de similar magnitud, y, sabiendo además, que los paneles solares utilizados en este estudio tienen su mínimo de eficiencia precisamente para longitudes de onda inferiores a 400 nm (UV), se concluye que los resultados obtenidos fueron mayores a los esperados.

Esto también se vio reflejado en la eficiencia específica en el ultravioleta, calculada para estos paneles, que fue de un 12,5%; bastante cercana a la eficiencia general (16%).

Si bien es poca la cantidad de radiación UV-A que llega hasta la superficie, con un máximo de  $65 \text{ W/m}^2$  en verano, y además es baja la eficiencia que la actual tecnología fotovoltaica presenta en dicha banda, la mayor cantidad de energía que porta el fotón de ultravioleta respecto al de luz visible e infrarroja, tiene un efecto compensatorio en la generación.

Ahora bien, en términos de energía generada, el ultravioleta no deja de ser una pequeña fracción del total, y si bien entrega un aporte real y apreciable, no constituye un elemento determinante en la generación, cuya importancia apremie la motivación de esfuerzos por mejorar la eficiencia de estos paneles en dicha banda.

Como evaluación general del sistema implementado, se evidenció un excelente rendimiento de este tipo de paneles, prácticamente durante la totalidad de los días medidos, tanto en condiciones de cielo despejado como nublado. Además, dado el comportamiento lineal que presentaron, la caída de generación en invierno fue atribuible directamente a la disminución de la radiación incidente y no a la mayor presencia de la componente difusa. Los

paneles continuaron generando incluso hasta el atardecer, aun cuando los rayos de luz en ese momento inciden oblicuamente.

Con todo lo anterior, la actual tecnología fotovoltaica sigue siendo una alternativa vigente en la búsqueda de fuentes de energía que diversifiquen nuestra matriz energética, en el marco de las energías renovables no convencionales. La Zona Sur, y en particular la Región de Los Ríos, presenta altos niveles de radiación en verano y aceptables niveles en invierno, entregando un atractivo potencial para la generación eléctrica en forma de microcentrales, sobre todo para el sector residencial.

## Bibliografía.

- [1] Aguilar, J.O.; Gómez-Daza, O. *Resistencia adhesiva interfacial de vidrios laminados con películas delgadas semiconductoras*. Sociedad Mexicana de Ciencia de Superficies y de Vacío. 2004.
  
- [2] Antony, F. *Photovoltaics for Professionals: Solar Electric Systems Marketing, Design and Installation*. Earthscan Publications, 2008.
  
- [3] Aten Solar. *ATPV-40 thin film photovoltaic module*. Spec Sheet. 2005.
  
- [4] Bloss, W.H. *Photovoltaics: Solar Electricity*. World Solar Summit, UNESCO, 1993, París.
  
- [5] Borregaard N. y Katz, R. *Opciones para la matriz energética chilena*. Fundación Futuro Latinoamericano – AVINA. Ecuador, 2009.
  
- [6] Calbó, J.; Pages, D. *Empirical studies of cloud effects on UV radiation: A review*. *Geophys*, 2005.
  
- [7] Castañer, L. *Energía Solar Fotovoltaica*. Ed. UPC, España, 1994.
  
- [8] Chudnovsky, Ch. y Porta, F. *Auge y ocaso del capitalismo asistido. La industria petroquímica latinoamericana*. CEPAL/Centro Internacional de Investigaciones para el Desarrollo. Alianza Editorial, Chile, 1997.
  
- [9] Cobarg, C.C. *Energía solar: bases y aplicaciones*. Ed. Paraninfo, Madrid, 1983

- [10] Comisión Nacional de Energía. *Balance Nacional de Energía*. Chile, 2007.
- [11] Comisión Nacional de Energía. *Capacidad instalada por sistema eléctrico nacional*. Chile, 2008.
- [12] Comisión Nacional de Energía. *Datos históricos de precios de nudo, sistemas eléctricos chilenos*. Chile, 2009.
- [13] Comisión Nacional de Energía. *Distribución de energía eléctrica por sectores económicos*. Chile, 2009.
- [14] Comisión Nacional de Energía. *Generación Bruta SIC-SING, 1999-2009*. Chile, 2009.
- [15] Comisión Nacional de Energía. *Generación de energía eléctrica, por regiones*. Chile, 2009.
- [16] Comisión Nacional de Energía. *Proyecto energías renovables no convencionales*, Chile, 2007.
- [17] EPV Solar. *EPV-5X Solar Module*. Datasheet. 2009.
- [18] Ersol Solar Cells. *Solar Cell BlackPower E6M+*. Datasheet. 2008.
- [19] Etienne, G., y Menchaca, H. *El petróleo y la petroquímica*, ANUIES, Edicol, México, 1975.
- [20] González, R. *El pico de producción mundial de petróleo*. Aspo - México, 2008.
- [21] Green, M. *Crystalline Silicon Solar Cells*. Photovoltaic Special Research Centre, University of new South Wales, Australia, 2001.

- [22] Huovinen, P.; Lovengreen, Ch.; Gómez, I. *Estudio de cinco años de radiación UV en el sur de Chile (49°S): Potencial impacto en sistemas marinos costeros*. Instituto de Física UACH, Valdivia, Chile, 2004.
- [23] ISO 9050:2003. *Standard Test Method: Glass in building — Determination of light transmittance, solar direct transmittance, total solar energy transmit*. International Organization for Standardization, 2009.
- [24] Jiménez, J. *Energía Solar*. Ed. Pamiela, 2001.
- [25] Kreith, F. y Kreider, J.F. *Principles of Solar Engineering*. Ed. McGraw Hill, New York, 1978.
- [26] Kyocera. *High efficiency multicrystal photovoltaic module, KC50T*. Spec Sheet. 2007.
- [27] Kyocera. *Installation manual for the KC-Series of solar photovoltaic power modules*. 2006.
- [28] LEM. *Current transducer LTS 6-NP*. Datasheet. 2003.
- [29] León, E. y Rosas, L. *Geopolítica crítica de la civilización petrolera, una mirada desde América Latina*. 2007.
- [30] LLamazares, A.; Busso, A.; Bajales, L. *Generación fotovoltaica: caracterización de una celda comparando datos experimentales y simulados aplicando un modelo teórico simple*. Departamento de Física UNNE, 2000, Argentina.
- [31] Lovengreen Ch.; Fuenzalida, H.; Videla, L.; Valdebenito, M. *Dependencia espectral de la atenuación y alzas de radiación UV y visible por la nubosidad estival en Valdivia*. Instituto de Física UACH, Valdivia, Chile, 2004.

- [32] Luccini, I. *Efecto de incremento de radiación solar por nubes dispersas en el ambiente de Bahía Paraíso, Península Antártica*. Instituto de Física de Rosario – CONICET, Argentina, 2007.
- [33] Microchip. *PIC16F87XA Data Sheet*. Datasheet. 2005.
- [34] National Semiconductor. *LM393 Low power low offset voltage dual comparators*. Datasheet. 2004.
- [35] Oilwatch, *Guerra y petróleo: Artífices de la historia del siglo XX*. 2004.
- [36] Oilwatch, *La civilización del petróleo*, Boletín N°56, 2005.
- [37] O’Ryan, R. *Diseño de un modelo de proyección de demanda energética global nacional de largo plazo*. Informe para la CNE, Chile, 2008.
- [38] Palma R.; Jiménez G.; Alarcón I. *Las energías renovables no convencionales en el mercado eléctrico chileno*. Comisión Nacional de Energía, Chile, 2009.
- [39] Quadri, P. *Energía Fotovoltaica*. Ed. Elsiná, México, 1994.
- [40] Sánchez, M. *Energía Solar Fotovoltaica*. Ed. Limusa, México, 2008.
- [41] Sarmiento, P. *Energía Solar: Aplicaciones e ingeniería*. Ed. Universitaria de Valparaíso, Chile, 1995.
- [42] Schkolnik, M. *Distribución y consume energético en Chile*. Boletín Informativo INE, Chile, Septiembre 2008.

- [43] Serrano, P. *Energía solar para todos*. 1ra Edición, Artesol, 1992, Chile.
- [44] Solar Energy International. *Fotovoltaica, manual de diseño e instalación*. 2007.
- [45] ST Microelectronics. *BTA/BTB06 Series, 6A Triacs*. Datasheet. 2004.
- [46] Texas Instruments. *MAX232 Dual EIA-232 Drivers/Receivers*. Datasheet. 2004.
- [47] Tokman, M. *Matriz energética y proyecciones futuras*. Comisión Nacional de Energía, Chile, 2008.
- [48] Transelec. *Mapa del sistema de transmisión*. Chile, 2009.
- [49] Yergin, D. *La Historia del Petróleo*. Javier Vergara Editor, Argentina, 1992
- [50] Wenham, S. *Applied Photovoltaics*. Ed. Earthscan, UK, 2008.