

UNIVERSIDAD ANDINA SIMON BOLIVAR
GESTIÓN ESTRATÉGICA DE ENERGÍA,
HIDROCARBUROS Y ELECTRICIDAD

CURSO
ENERGIAS
ALTERNATIVAS

NOTAS DEL CURSO

Mgr. ENRIQUE BIRHUETT GARCIA

2014

Contenido

UNIVERSIDAD ANDINA SIMON BOLIVAR	1
1. INTRODUCCION.....	1
2. LAS ENERGIAS ALTERNATIVAS EN EL MUNDO, AMERICA LATINA Y BOLIVIA ...	2
3. LAS ENERGIAS ALTERNATIVAS	5
3.1. LEYES DE CONSERVACION DE LA ENERGIA	6
3.2. EXPRESIONES PARA “FUENTE ENERGÉTICA RENOVABLE”	7
4. RADIACIÓN SOLAR.....	7
4.1. RADIACION GLOBAL, DIRECTA Y DIFUSA.....	8
4.2. GEOMETRIA SOLAR	10
4.3. LA RADIACION SOLAR EN BOLIVIA.....	10
5. ENERGÍA HIDRÁULICA	14
5.1. EL CICLO DEL AGUA	14
5.2. CUENCAS PARA EL APROVECHAMIENTO HIDRICO	15
6. ENERGÍA EÓLICA	17
6.1. CLASIFICACION DE LOS VIENTOS.....	18
6.2. LA DISTRIBUCION DE WEIBULL	19
6.3. LA LEY DE BETZ	21
6.4. PERFIL DEL VIENTO A NIVEL DEL SUELO.....	21
7. BIOMASA	22
8. GEOTERMIA.....	24
9. ASPECTOS TECNICOS: TRANSFORMACION A ELECTRICIDAD	26
9.1. ENERGIA SOLAR	26
9.1.1. ABSORCIÓN POR UNA UNIÓN P-N	26
9.1.2. TIPOS DE CRISTALES DE LA UNIO P-N	29
9.1.3. PRODUCCIÓN MUNDIAL DE CELULAS POLICRISTALINA Y AMORFAS	30
9.2. CONDICIONES DE FUNCIONAMIENTO STC Y NOCT	31

9.2.1.	CONDICIONES STC	31
9.2.2.	CONDICIONES NOCT	31
10.	ENERGÍA HIDRÁULICA	31
10.1.	TIPOS DE TURBINAS (ACCIÓN Y REACCIÓN)	31
10.2.	RENDIMIENTOS.....	33
11.	ENERGÍA EÓLICA.....	34
11.1.	TIPOS DE TURBINAS	36
11.2.	COMPONENTES DE LA GENERACION ELECTRICA	39
11.3.	POTENCIA DE UN GENERADOR	41
12.	BIOMASA EN ELECTRICIDAD.....	43
13.	ENERGÍA GEOTÉRMICA EN ELECTRICIDAD	44
14.	CICLO DE RANKINE	45
15.	FACTOR DE PLANTA.....	47
16.	NORMAS TECNICAS DE INTERCONECION A LA RED	48
17.	ASPECTOS ECONOMICOS Y FINANCIEROS.....	49
17.1.	PRECIO DEL kWh SEGÚN TECNOLOGIA.....	49
17.2.	COSTOS.....	50
17.3.	INCENTIVOS REGULATORIOS Y MECANISMOS DE PROMOCIÓN.....	52
17.4.	EL PRINCIPAL INCENTIVO: EL PRECIO.....	53
17.5.	DESARROLLO DE MERCADOS	55
17.5.1.	MECANISMOS VOLUNTARIOS	55
17.5.2.	MECANISMOS MANDATORIOS	57
17.6.	FONDOS DE FINANCIAMIENTO.....	59
18.	REGULACION DE LAS ENERGIAS RENOVABLES EN BOLIVIA	60
18.1.	LAS POLITICAS PARA LAS ENERGIAS ALTERNATIVAS.....	61
18.2.	INTRODUCCIÓN DE LAS ENERGIAS ALTERNATIVAS	62
18.3.	LA NUEVA LEY DE ENERGIAS RENOVABLES.....	63

1. INTRODUCCION

El presente texto ha sido elaborado para complementar el módulo “Energías Alternativas” que la Universidad Andina Simón Bolívar está implementando en el marco de la maestría “Gestión Estratégica de Energía – Hidrocarburos y Electricidad”.

Este curso tiene como objeto brindar al candidato un marco general de las energías alternativas tanto en Bolivia como en otras partes del mundo. Se mostrarán e ilustrarán de manera global la producción principalmente de electricidad a partir de estas fuentes energéticas, así como su estructura e incidencia en el sector energético. De la misma forma, se brindarán los conceptos generales sobre la regulación energética para este tipo de fuentes y los mecanismos que hasta el presente se han implementado para incentivar su utilización.

El curso está orientado desarrollar el pensamiento lógico de los participantes para profundizar sus habilidades relacionadas con la evaluación y generación de ideas. Todo ello con el propósito que los participantes logren predecir, estimar y ponderar los resultados de dichas ideas en la solución de problemas sobre la provisión y consumo de la energía en general y de las energías alternativas en particular.

Las capacidades de los participantes a desarrollar a través del curso son:

- El razonamiento, estableciendo relaciones entre conceptos sobre las energías renovables y efectuar hacer deducciones lógicas.
- Las funciones ejecutivas, es decir, planificar y organizar conceptos e ideas sobre el desarrollo y proyectos con energías alternativas.
- Conocimientos básicos sobre los aspectos técnicos, económicos y de regulación de las energías renovables.

Al tratarse de un curso especializado de 25 horas académicas dentro de una maestría, y tomando en cuenta que los participantes provienen de diferentes disciplinas, es importante que los contenidos que se viertan permitan a todos adquirir criterios y conceptos para generar nuevas ideas en el uso y aplicación de las fuentes energéticas alternativas.

El curso, en el lapso de una semana, abarcará todos los aspectos tecnológicos, financieros y regulatorios esenciales que están involucrados en las fuentes de energías alternativas.

Los objetivos específicos que se plantea el curso permitirá que los participantes cuenten con:

- Conocimientos sobre los principios físicos que rigen las energías alternativas.
- Criterios económicos para la promoción de las energías alternativas.
- Instrumentos para el diseño y evaluación de políticas y planes que promuevan las energías alternativas en Bolivia.

2. LAS ENERGIAS ALTERNATIVAS EN EL MUNDO, AMERICA LATINA Y BOLIVIA

CONTRIBUCIÓN DE LAS ENERGIAS RENOVABLES A LA OFERTA DE ENERGÍA PRIMARIA TOTAL (OEPT), POR REGIONES, EN EL MUNDO (en 2009)

	OEPT	De la cual, renovables	Aportación renovables en OEPT	Aportación de las principales categorías en el total de renovables (%)		
	Mtep	Mtep	%	Hidro	Solar, eól, geot, mare	Biomasa y residuos
Africa	663,9	321,6	48,4	2,6	0,4	97,0
América Latina	567,9	177,1	31,2	33,7	1,9	64,4
Asia (sin China)	1449,8	388,6	26,8	5,4	6,9	87,7
China	2272,0	267,9	11,8	19,8	4,2	76,0
No OCDE Europa y Eurasia	1038,0	39,5	3,8	63,6	1,6	34,7
Oriente Medio	610,7	3,0	0,5	36,9	39,7	23,5
OCDE	5237,7	391,5	7,5	29,0	14,5	56,5
Transp. marítimo y aéreo int.	328,9	x	x	x	x	x
Mundo	12.169,0	1.589,3	13,1	17,7	6,4	75,9

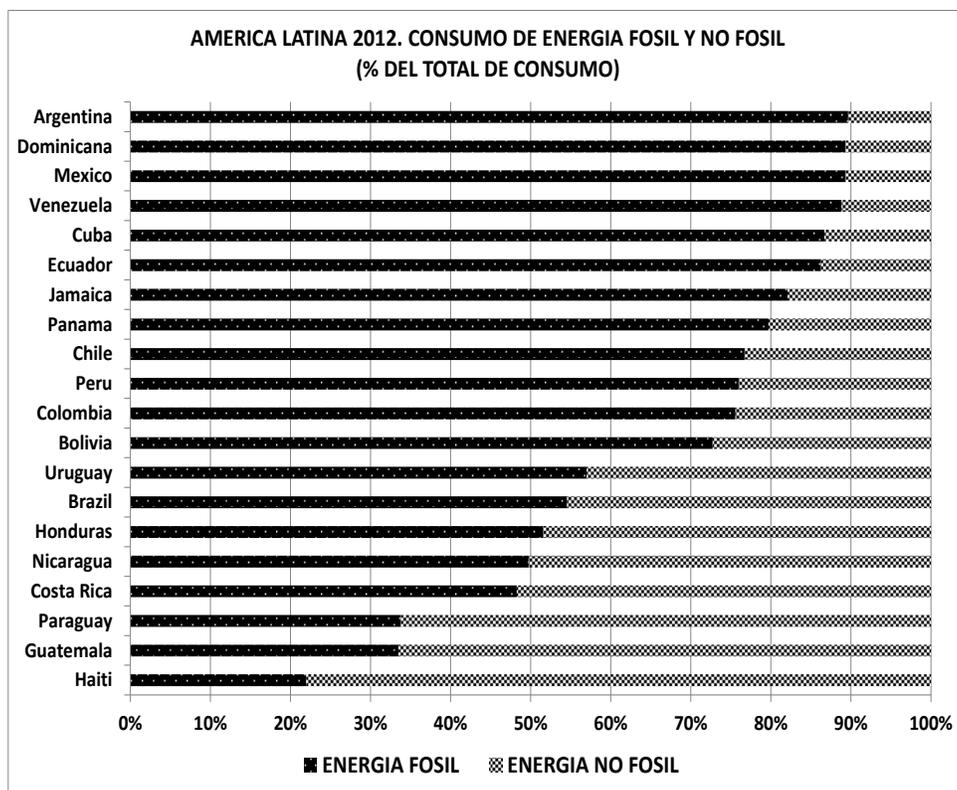
FUENTE: Javier, Francisco et al. 2011. Las energías renovables en el ámbito internacional. Universidad Complutense de Madrid.

En el anterior cuadro se muestra para el año 2009 la participación de las energías alternativas o renovables en la oferta de energía primaria en diferentes partes del mundo.

A nivel mundial, las energías renovables participan con el 13,1% en la oferta de energía primaria total, de los cuales el 75,9% es biomasa, el 17,7% hidroenergía y 6,4% el resto de renovables (solar, eólica, etc.).

Es importante remarcar que los más altos niveles de consumo de energía renovable se produzcan, bajo la forma de biomasa, en los continentes de Africa, América Latina, Asia y China. Uno de los principales usos de la biomasa en estos continentes es en la cocción de alimentos y en el calentamiento del agua.

En cambio, en los países como el Medio Oriente, la OCDE, la participación de la biomasa es mucho menor, haciendo énfasis en otras fuentes renovables.



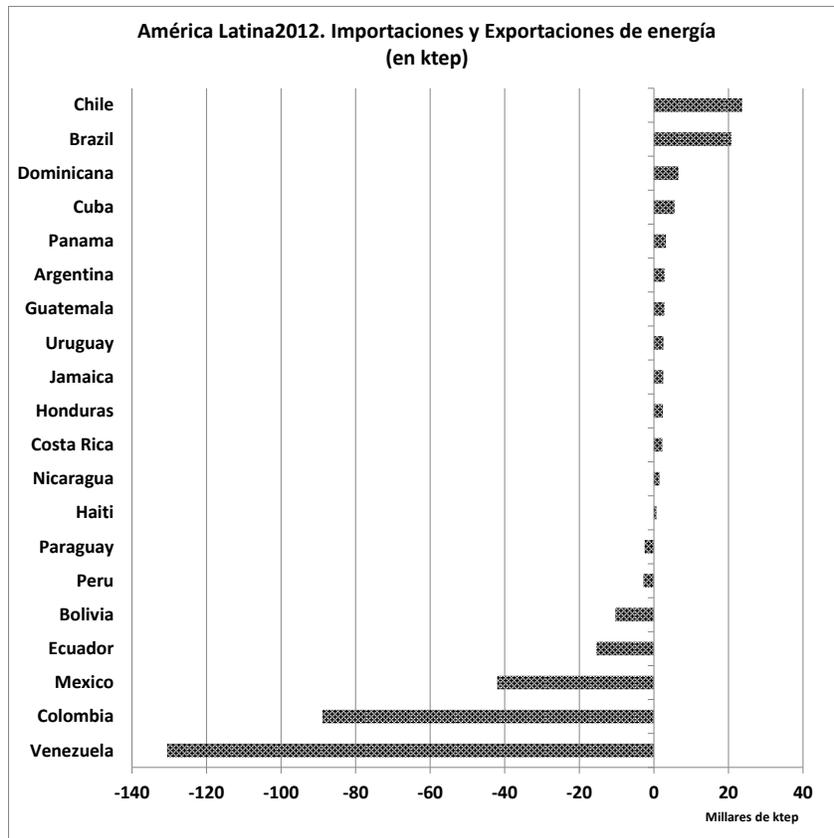
FUENTE: INTERNATIONAL ENERGY AGENCY-2012

En la figura anterior se muestra el consumo de energía de origen fósil¹ (hidrocarburos) y no fósil (biomasa, hidroelectricidad, nuclear) en los países de América Latina.

Para muchos de los países de América Latina, la participación de las energías fósiles es superior al 50% del total del consumo. Las energías no fósiles tienen aún una participación importante en Haití, Guatemala, Paraguay, Costa Rica y Nicaragua. Inclusive en Bolivia, el peso las fuentes no fósiles alcanza a alrededor del 25%.

En la siguiente figura se muestra las importaciones y exportaciones de energía para los países de América Latina. Existe un grupo que es un importador de energía y otro exportador neto.

¹ Origen fósil: procede de la biomasa obtenida en millones de años y que ha sufrido varias transformaciones hasta convertirse en sustancias con un alto contenido energético (combustión)

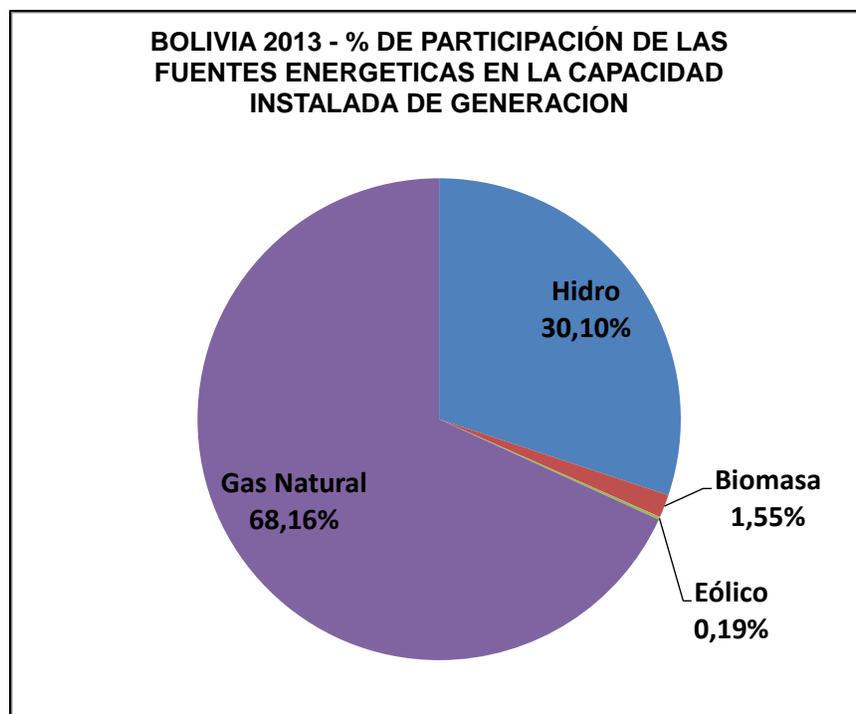


FUENTE: INTERNATIONAL ENERGY AGENCY-2012

En todo este escenario para América Latina, las fuentes fósiles juegan un rol muy importante y no así las fuentes no fósiles, entre ellas las alternativas.

Por lo general, las energías alternativas han sido utilizadas de forma local como la forma de calor o energía mecánica (hidráulica para molinos de granos) y últimamente transformándola en electricidad.

En el caso boliviano, la participación de las fuentes alternativas (hidroelectricidad, biomasa y energía eólica) en la capacidad instalada de generación de electricidad alcanza al 32%. La energía alternativa predominante es la hidroelectricidad, con una participación al 2013, sobre el total instalado, del 30,1% mientras que la biomasa y la energía eólica, juntas no superan el 2% de la capacidad instalada.



FUENTE: AE. ANUARIO ESTADISTICO 2013 (en preparación)

3. LAS ENERGIAS ALTERNATIVAS

Existen diversas definiciones de las energías alternativas², sin embargo, la más común está referida a que la fuente es prácticamente inagotable (solar, geotermia), o que hace parte de un ciclo natural (eólica, hidráulica, maremotriz, biomasa) que permanentemente se restablece, si existen en la naturaleza condiciones de equilibrio que permitan la restitución de dichos ciclos. En todos los casos, la cantidad de energía que es aprovechada prácticamente no modifica la reserva existente. A ello se suma otra cualidad, el balance de emisiones de gases de efecto invernadero como el CO₂ es cero, (o no emiten CO₂ y si lo hacen, éste es parte del proceso de absorción por parte de naturaleza).

Por tanto, sus principales características se definen por la relación que existe entre energía aprovechada (extracción) y la reserva existente la cual prácticamente no se modifica, y por su impacto casi nulo sobre el calentamiento global de la atmósfera.

Sin embargo la hidroelectricidad es un caso especial. Bajo ciertas circunstancias, esta fuente energética puede tener impactos sobre el medio ambiente e inclusive provocar emisiones de CH₄ (metano) cuando las aguas son represadas y sumergen grandes cantidades de biomasa. Hoy en la actualidad, existen entidades que pueden certificar

² De acá en adelante, se utilizará de forma indistinta la palabra “alternativa” y “renovable”.

(nota de referencia) si una central hidroeléctrica puede ser considerada como fuente de energía renovable si cumple algunos criterios que permitan decidir su impacto en el medio ambiente y principalmente su impacto en el calentamiento global.

De forma general, las fuentes renovables como la solar, eólica, biomasa e hidráulica tienen su origen en el sol, en la estructura de la atmósfera y en los ciclos naturales que se han establecido sobre la tierra para mantener la vida. La energía geotérmica tiene su origen en la formación del planeta, en la presencia de calor proveniente de su centro y en el calor que se forma por efecto del choque de las placas continentales.

Mientras estas condiciones se mantengan en equilibrio, la posibilidad de utilizar estas fuentes energéticas será bastante alta, sin embargo, si se provocan desequilibrios en los ciclos naturales, los cuales provocarán más sequías e inundaciones, fuertes vientos como consecuencia de acentuar el efecto invernadero, esta posibilidad también será cada vez menor.

3.1. LEYES DE CONSERVACION DE LA ENERGIA

Las energías renovables, así como cualquier fuente energética, están sometidas a las leyes de la Termodinámica. Es decir que las fuentes renovables no se crean ni desaparecen, sino que se transforman, pero además de transformarse, el balance total es nulo o cero (Primera Ley de la Termodinámica).

Esto se expresa de la siguiente forma:

$$\text{Fuente Renovable} = \text{Electricidad} + \text{Calor} \quad (1)$$

Por otra parte, toda transformación cíclica de una fuente energética en energía útil (trabajo) debe involucrar una pérdida de energía, de forma que dicha transformación nunca tiene una eficiencia del 100% (Segunda Ley de la Termodinámica).

La ecuación (1) puede ser escrita de la siguiente forma:

$$\text{Electricidad} = \text{Fuente Renovable} - \text{Calor} \quad (2)$$

A su vez, esta ecuación puede ser generalizada de la siguiente forma:

$$\text{Potencia efectiva} = \text{Fuente Renovable} - \text{Calor} \quad (3)$$

En la ecuación (3) se puede observar que la Potencia Efectiva tiene un valor neto positivo se las pérdidas por calor son menores que el valor de la Fuente Renovable. Por lo tanto,

el calor debe ser una porción o porcentaje de la Fuente Renovable, así como también la Energía Útil. Este hecho lleva a escribir la ecuación (3) de la siguiente forma:

$$\text{Potencia efectiva} = \text{COP} * \text{Fuente Renovable} \quad (4)$$

Donde COP expresa una proporción entre la Potencia Efectiva o también denominada Energía Útil y la Fuente Renovable. COP representa el Coeficiente de Operación (o en inglés Coeficient of Performance) de cualquier equipo o tecnología que convierte una fuente renovable en Potencias efectiva o Energía Útil (electricidad, energía cinética, flujos, etc.). El valor de COP es un dato que puede ser extraído de los ensayos o pruebas que se realizan a los equipos que aprovechan las fuentes renovables y que en muchos casos están ya estandarizados. Por lo general, este coeficiente también es conocido como rendimiento de los equipos que transforman la energía alternativa en electricidad.

Por ejemplo, para obtener electricidad mediante un módulo fotovoltaico que capta la radiación solar, el valor de COP oscila entre 11% a 16%. En una central hidroeléctrica, este valor puede alcanzar hasta el 80% y en una central térmica a base de biomasa, el valor típico de COP oscila entre el 20 al 25%.

3.2. EXPRESIONES PARA “FUENTE ENERGÉTICA RENOVABLE”

En el cuadro siguiente se muestran algunas de las principales expresiones de “Fuente Energética”.

	EXPRESION	NOMEMCLATURA	UNIDAD
Fuente Renovable =	$A * G_n$ (energía solar)	A=área (m ²) G _n =radiación solar global incidente sobre el área (Watts/m ²).	Watts (W)
	$m * g * \Delta h$ (energía hidráulica)	m = flujo de agua (kg/s) g = gravedad (m/s ²) Δh = diferencia de altura (m)	kilowatts (kW)
	$\frac{1}{2} * \rho * V^3$ (energía eólica)	ρ = densidad del aire (kg/m ³) V = velocidad media del aire (m/s)	kilowatts (kW/m ²)
	$m * C_e$ (energía térmica de la biomasa)	m = flujo de biomasa (kg/s) C _e = poder calorífico (J/kg)	kilowatts (kW)
	$m * C_p * \Delta T$ (energía geotérmica)	m = flujo de agua (kg/s) C _p = calor específico del agua (J/kg °K) ΔT = diferencia de temperatura (°K)	kilowatts (kW)

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

4. RADIACIÓN SOLAR

La fuente de la radiación solar proviene de una reacción nuclear que se produce en el centro del Sol, donde 4 átomos de Hidrógeno fusionan (se unen) bajo la fuerza que ejerce la gravedad para producir dos átomos de Helio y desprender grandes cantidades de energía, como efecto de la conversión de masa en energía ($E = mc^2$). El Sol actúa como un enorme reactor nuclear de fusión siendo el Hidrógeno el combustible que genera la radiación solar que llega a la Tierra. La cantidad de Hidrógeno existente en el Sol es suficiente para que esta estrella continúe produciendo energía durante los siguientes 5.000 millones de años de forma estable.

La radiación solar está compuesta por ondas electromagnéticas o fotones provenientes del Sol el cual es considerado como un “cuerpo negro” cuya superficie se encuentra a aproximadamente 5.000 °K. La radiación solar incidente (perpendicular) en la parte superior de la atmósfera es aproximadamente 1.360 W/m² (constante solar). La composición del aire, las partículas suspendidas, el vapor de agua y la presencia de otros gases (He, Ar, CO₂, CH₄) en la atmósfera provocan una disminución de este valor hasta un 40%, alcanzando la superficie terrestre un valor que oscila entre 600 a 800 W/m² según la latitud y altitud del lugar.

La radiación solar incidente, a lo largo del día, sobre la superficie de la Tierra depende de la latitud y la época del año. Ello se debe al hecho que el eje de la Tierra se encuentra inclinado 24,5° del plano ecuatorial y del movimiento de translación de la Tierra alrededor del sol.

4.1. RADIACION GLOBAL, DIRECTA Y DIFUSA

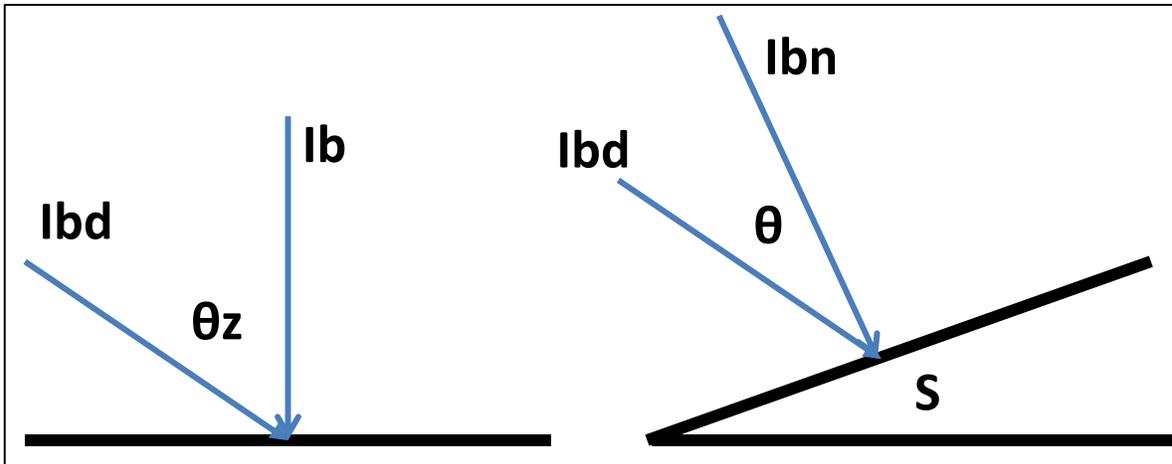
Si se toma un punto geográfico de la Tierra como un punto de referencia, es posible traducir en ecuaciones geométricas la posición del sol para cada instante a lo largo de un año. En el Anexo 1 se muestran varios sitios web que ilustran esta situación.

Los componentes de la radiación solar son dos. La radiación solar directa y la radiación solar difusa, la suma de ambas producen la radiación solar global.

Radiación Global = Radiación directa + Radiación difusa.

La radiación directa es la que proviene directamente del disco solar (y produce sombra), en cambio la radiación difusa proviene de todas partes del cielo y de todas las direcciones. En un nublado, la radiación difusa es la que predomina.

La radiación solar, sobre todo la directa depende de la hora y del día a lo largo del año, es decir, de la posición del sol en un determinado momento. Por otra parte, la radiación solar que es aprovechable es la que incide de forma perpendicular a cualquier superficie. Un rayo de sol que incide de forma oblicua a cualquier superficie debe ser descompuesto en dos componentes, uno perpendicular y otro tangencial a dicha superficie. La componente tangencial no tiene ningún efecto sobre la superficie, en cambio, la componente perpendicular puede ser absorbida dependiendo de las características de la superficie.



FUENTE: ELABORACION PROPIA

Los datos que se disponen para evaluar el potencial solar son las mediciones de la radiación solar difusa I_d sobre una superficie horizontal y la radiación solar global I sobre la superficie horizontal.

$$I_b = I - I_d \quad (5)$$

Pero por otro lado, se tiene que:

$$I_b = I_{bd} \cos(\theta_z) \quad (6)$$

Donde θ_z es el ángulo zenital del sol. Este valor se obtiene de la siguiente ecuación:

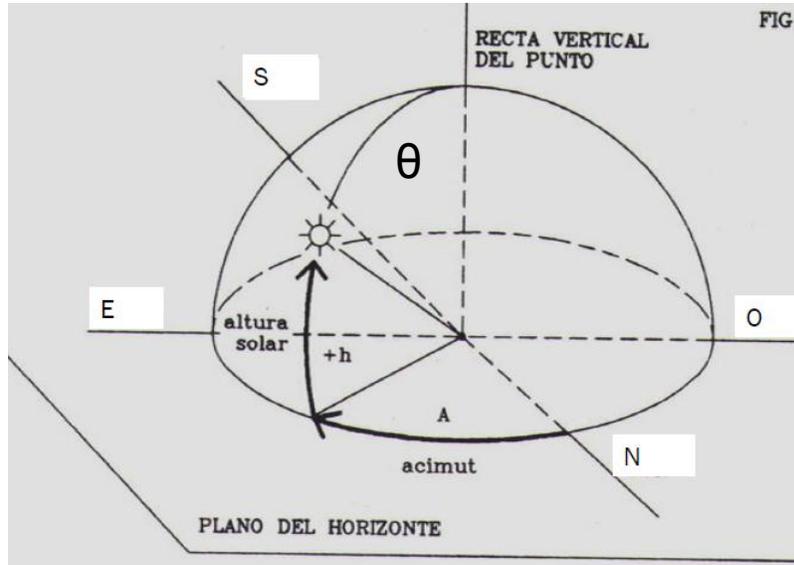
$$\cos(\theta_z) = \sin\delta \sin\Phi + \cos\delta \cos\Phi \cos\omega \quad (7)$$

Lo que se quiere saber es la cantidad de radiación solar directa perpendicular a cualquier superficie inclinada S grados sobre la superficie horizontal. La siguiente ecuación permite calcular dicha cantidad:

$$I_{bn} = I_{bd} \cos\theta \quad (8)$$

4.2. GEOMETRIA SOLAR

Donde $\cos\theta$ se calcula de las ecuaciones de la geometría solar y que se muestran a continuación:



FUENTE: <http://www.monografias.com/trabajos16/el-urbanismo/el-urbanismo.shtml>

Donde $\theta + h = 90^\circ$ y para una superficie orientada al norte:

$$\cos\theta = \cos(\phi - S) \cos\delta \cos\omega + \cos(\phi - S) \operatorname{sen}\delta \quad (9)$$

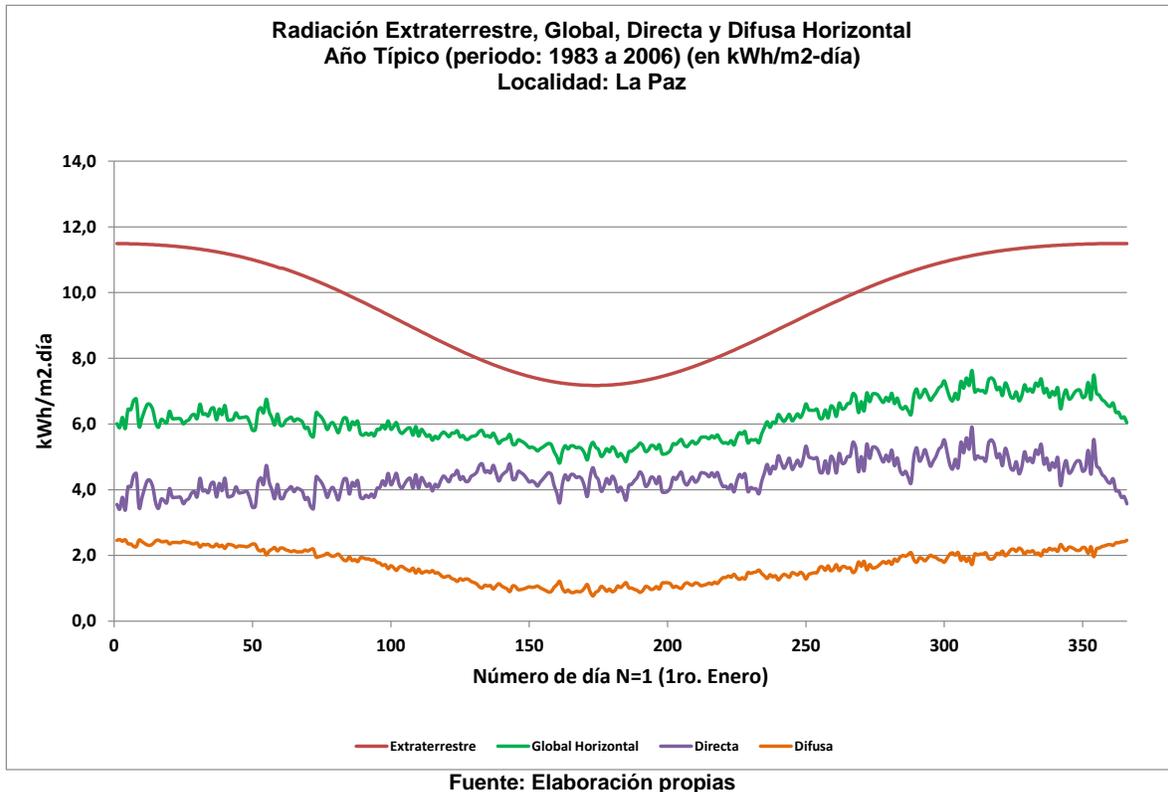
4.3. LA RADIACION SOLAR EN BOLIVIA

La radiación solar en Bolivia tiene características particulares debido a la diversidad de ecosistemas existentes en el territorio nacional.

Una primera constatación del comportamiento de la radiación solar es su variación con la altitud. En las regiones del altiplano, la radiación solar promedio es superior a las regiones de valle y trópico. Ello se debe principalmente a la poca presencia de vapor de agua en las zonas altas, como por ejemplo, el salar de Uyuni. El vapor de agua es un “filtro” que absorbe parte de la radiación solar.

Por otra parte, la presencia de la cordillera de Los Andes determina el perfil de la radiación solar a nivel global. A lo largo de la cordillera, la radiación solar, principalmente en el flanco oeste, sobre la cuenca cerrada de los lagos Titicaca, Poopó y Salar de Uyuni alcanza valores superiores a los 6 a 7 kWh/m².día. Existen regiones de alta pluviosidad como Todos Santos, el Sillar o La Siberia donde la radiación solar promedio anual se reduce bastante, hasta valores de 2,5 kWh/m².día.

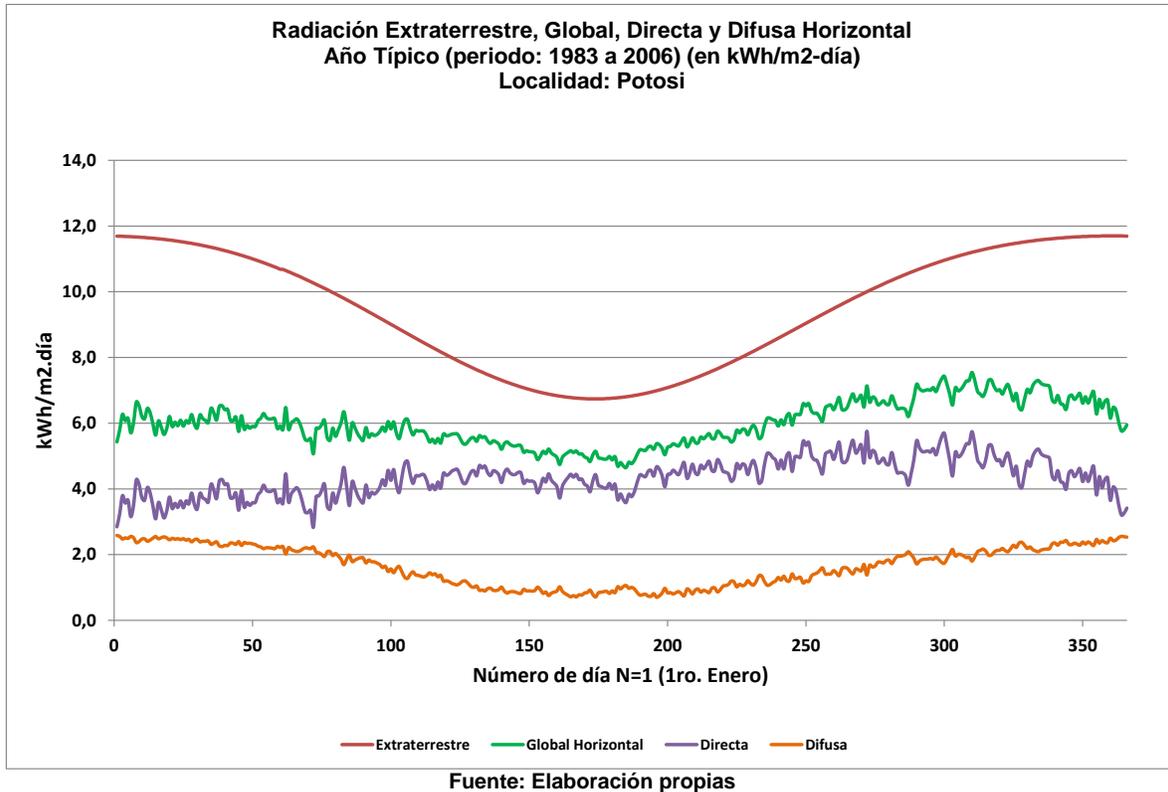
Otra forma de medir la radiación solar es por el número de horas-sol al día. Por lo general, en la zona andina, el número de horas-sol al año alcanza 2.300 a 2.400 horas. En las zonas tropicales este valor alcanza a 1.600 a 1.800 horas³.



En la figura anterior se muestra el comportamiento de la radiación solar para la ciudad de La Paz. Se puede observar que existe una variación estacional entre verano e invierno en lo que corresponde tanto a la radiación global cuyo promedio es 6 kWh/m2.día como a la radiación difusa cuyo promedio alcanza a 1,5 kWh/m2.día. La radiación directa permanece casi constante entre 4 y 5 kWh/m2.día.

Las variaciones diarias que presenta la radiación solar en La Paz se deben principalmente a la presencia de nubosidad por una parte y en los últimos años, debido a la presencia de partículas contaminantes, polvo y CO₂.

³ Es necesario recordar que durante un año existen 8.760 horas (día y noche), de las cuales, teóricamente 4.380 son horas con luz, sin embargo, la presencia de nubes reduce este número de horas con luz, según la región geográfica a un poco más de la mitad.

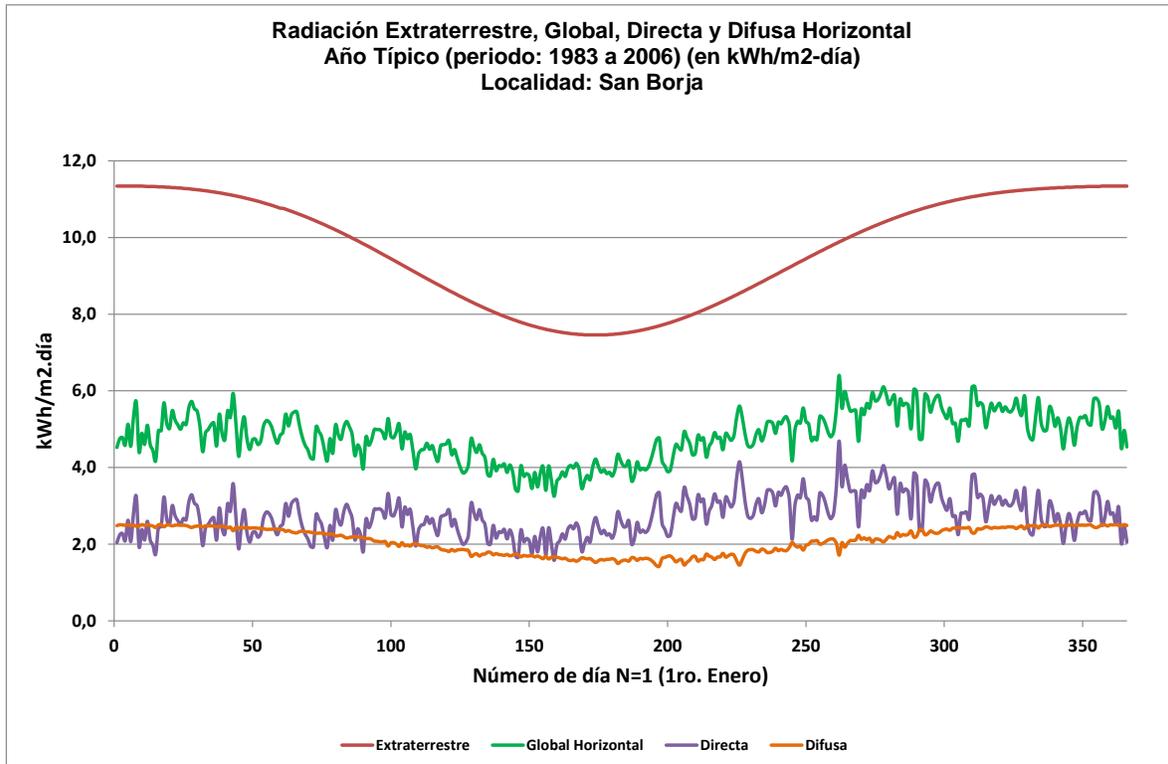


En la figura anterior se muestra la radiación solar en la ciudad de Potosí. Los valores promedio se aproximan a los de la radiación solar en La Paz, sin embargo, el comportamiento de la radiación solar directa es mucho más acentuado. Ello se debe principalmente al alto grado de claridad de la atmósfera en dicha ciudad.

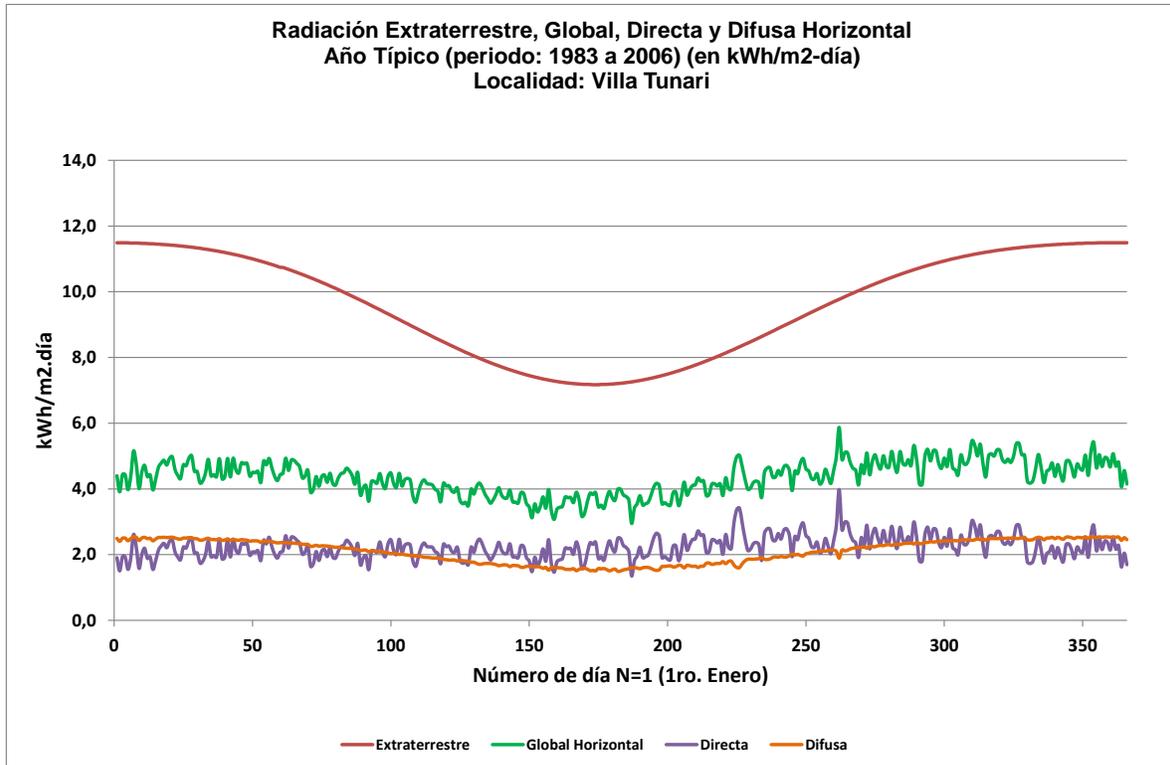
Existe una paradoja aparente en el comportamiento de la radiación solar, sobre todo en la región del Altiplano boliviano. En los meses de diciembre, enero y febrero, se presenta el ciclo lluvioso provocado por el hecho que estas latitudes se colocan perpendiculares a los rayos solares alrededor de dichos meses, y por lo tanto la abundancia de nubosidad es bastante alta. Esto debería reducir la radiación solar incidente. Por otro lado, durante el invierno, que corresponde a los meses de mayo, junio y julio se producen los niveles más bajos de pluviosidad, reduciéndose la cantidad de nubosidad y por lo tanto, este aspecto debiera permitir un aumento de la radiación solar.

Sin embargo, se observa que el comportamiento de la radiación global no presenta ese comportamiento. En los meses de verano, la radiación solar global es más alta que la radiación solar global de los meses de invierno. Esto se debe a que la radiación solar global a nivel del suelo sigue exactamente el mismo comportamiento de la radiación

extraterrestre, sin que los fenómenos meteorológicos afecten o distorsiones sustancialmente este comportamiento.

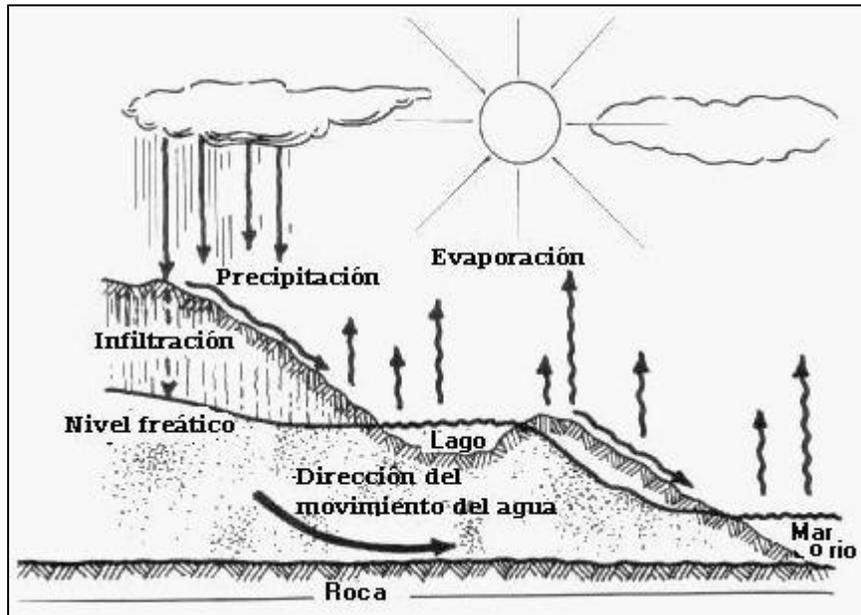


En las poblaciones de San Borja y Villa Tunari, ambas situadas del lado oriental de la cordillera, la radiación solar global alcanza en promedio los 4 kWh/m2.día y se puede observar que la radiación directa y la difusa prácticamente alcanzan a tener el mismo valor, alrededor de 2 kWh/m2.día. Esto significa que la atmósfera contiene un alto grado de vapor de agua el cual reduce la incidencia de la radiación solar. Este aspecto se puede constatar en la siguiente figura.



5. ENERGÍA HIDRÁULICA

5.1. EL CICLO DEL AGUA



La energía hidráulica tiene su origen en el ciclo natural del agua, el cual puede ser descompuesto en cinco fases:

1ra. fase: Evaporación de Líquido a Gas, el sol calienta el agua del mar, de los ríos y de los lagos. Al calentarse, parte de esta agua se evapora y forma: vapor de agua.

2da. fase: Condensación de Gas-Líquido, cuando llega a una altura determinada de la atmósfera el vapor de agua se transforma en pequeñas gotas de agua que suben en el aire y forman las nubes.

3ra. fase: Precipitación, cuando las nubes llegan a las zonas más frías, las gotas de agua se agrupan. Entonces caen en forma de lluvia.

4ta. fase: Infiltración, cuando los torrentes y los ríos recogen al agua de la lluvia o del deshielo de la nieve y la transportan finalmente al mar o a los lagos.

5 fase: Escorrentía superficial, el suelo absorbe parte de las aguas caídas y forma las aguas subterráneas que avanzan hasta el océano.

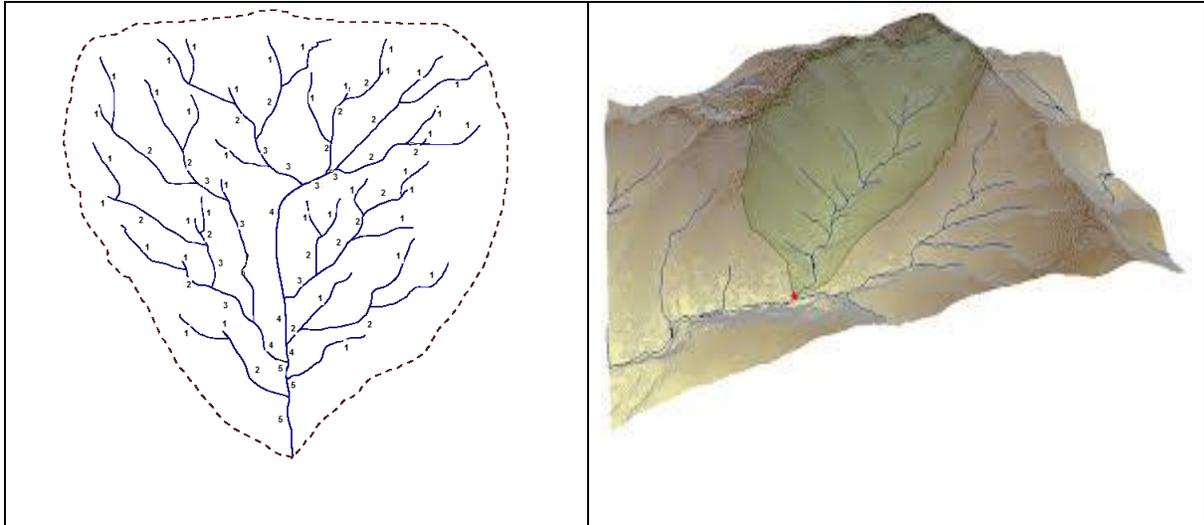
De forma general, el ciclo del agua corresponde a un balance hídrico dado por la siguiente expresión:

$$\text{Lluvia} - \text{Escorrentía} - \text{Evaporación} - \text{Infiltración} = \Delta \text{almacenamiento} / \Delta t \quad (10)$$

Esta ecuación es aplicada a una superficie determinada, por lo general, una cuenca o valle sobre la cual se producen los fenómenos de lluvia, escorrentía, infiltración y evaporación. Si en esta cuenca además se coloca una represa, entonces se puede almacenar agua siempre y cuando la lluvia sea mayor que los otros factores que intervienen en el balance de energía.

5.2. CUENCAS PARA EL APROVECHAMIENTO HIDRICO

Por lo general, estos conceptos se aplican a una cuenca hidrográfica conformada como una unidad natural definida por una divisoria de aguas en un territorio en particular. Cuenca es el territorio que aporta agua de las precipitaciones al río que lo contiene y forma un curso principal del agua que desemboca en un lago o en el mar.



FUENTE: <http://acolita.com/calcular-automaticamente-parametros-morfometricos-cuenca-idrisi-arcgis/>

Si en un lugar elevado se logra almacenar agua, en realidad se está almacenando energía potencial, la cual podrá ser aprovechada para generar electricidad.

La diferencia de altura genera un flujo de agua del cual se puede extraer energía mecánica y ésta a su vez convertir en energía eléctrica. La fuente de energía por lo tanto es el ciclo de agua en una cuenca donde se produce un valle erosionado por un río.

En este caso la ecuación (4) se escribirá de la siguiente forma:

$$\mathbf{Q\acute{u}til = COP * m * g * \Delta h \quad (11)}$$

En estos casos el COP oscila entre 0,75 y 0,85. En realidad la energía potencial del agua es convertida en energía cinética, la cual a su vez, al chocar contra los álabes de una turbina, la convierte energía de rotación. La rotación permite hacer girar un electroimán dentro de una bobina (generador eléctrico) para producir una corriente eléctrica alterna.

Por otra parte, al igual que un sistema fotovoltaico, la energía útil se puede escribir como:

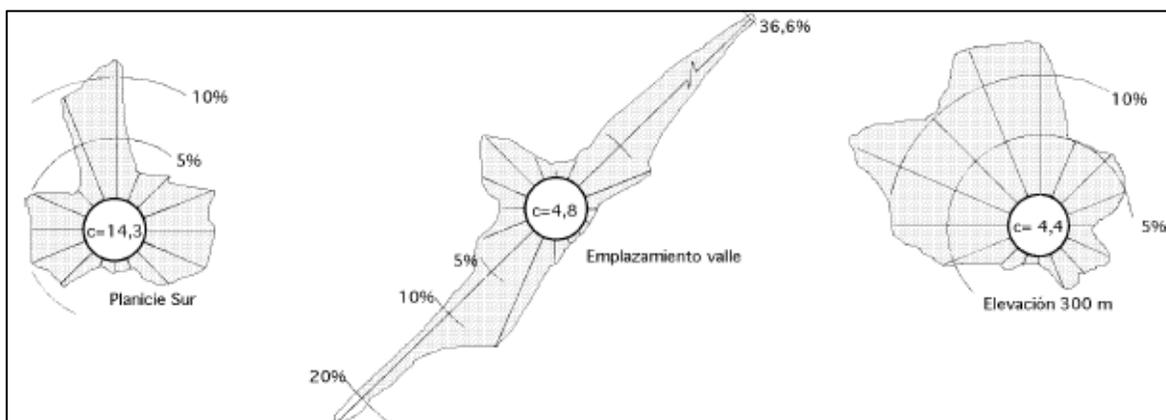
$$\mathbf{Q\acute{u}til = Voltaje * Corriente \quad (12)}$$

En estos casos, por el tipo de diseño del generador eléctrico, el voltaje puede ser un dato conocido, por ejemplo 380 V y a partir de este dato se calcula la corriente que el generador suministra.

6. ENERGÍA EÓLICA

El viento viene definido por dos parámetros esenciales que son, **su dirección y su velocidad**. La dirección del viento y su valoración a lo largo del tiempo conducen a la ejecución de la llamada **rosa de los vientos**.

La velocidad media del viento varía entre 3 y 7 m/seg., según diversas situaciones meteorológicas; es elevada en las costas, más de 6 m/seg., así como en algunos valles más o menos estrechos. En otras regiones es, en general, de 3 a 4 m/seg., siendo bastante más elevada en las montañas



FUENTE: www.ega-asociacioneolicagalicia.es

El viento es producto de la diferencia de temperaturas en la atmósfera entre el Ecuador y los polos, provocadas principalmente por la incidencia de la radiación solar sobre la superficie. Se producen un flujo de aire entre los polos y el Ecuador y por otro lado entre la atmósfera superior y el suelo. Estos flujos son desviados por efecto de la rotación de la Tierra (efecto de Coriolis), los cuales producen los vientos o circulaciones del aire que actualmente se conocen. Por las intermitencias entre el día y la noche, los accidentes geográficos como la presencia de continentes, cordilleras, mares y desiertos, la circulación del viento a nivel del suelo presentará variaciones horarias. Por lo tanto su comportamiento es aleatorio y sólo puede ser medido por variables probabilísticas.

La energía que puede extraerse del flujo de viento viene dada por la siguiente expresión:

$$\text{Energía útil} = \text{COP} * \frac{1}{2} * \rho * V^3 \quad (13)$$

De acuerdo a la expresión (13), la energía útil extraída del flujo del aire depende linealmente de su densidad. La densidad del aire, en altitudes mayores a los 3.500 msnm puede disminuir hasta en un 30%, lo que significa que para velocidades iguales, en altitudes elevadas, la energía útil extraída sería un 30% menor que la energía útil extraída

a nivel del mar. Por otra parte, un incremento de la velocidad del viento al doble, significa que la energía útil será 8 veces superior. Ambos factores son determinantes para establecer la cantidad de energía va a ser producida por una turbina eólica.

Si bien la velocidad promedio del viento es un parámetro que sirve para medir el potencial de energía que puede extraerse del viento, este parámetro no es suficiente. Es necesario analizar todo el espectro de vientos, principalmente los vientos de alto valor o contenido energético, cuya duración o probabilidad es baja.

Esto se debe principalmente al hecho que la energía eólica depende de la velocidad del viento al cubo. Si suponemos que el viento sopla a 2 m/s, la densidad del aire sea 1 kg/m³, la energía extraída sería de 4 W/m². Pero si luego, el viento sopla a 4 m/s, la energía extraída sería 32 W/m², es decir 8 veces más si la velocidad del viento se duplica.

Si suponemos que en ese lugar sólo existen vientos de 2 y 4 m/s, el promedio de la velocidad sería 3 m/s y por lo tanto la energía promedio extraída sería 13,5 W/m². Sin embargo si promediamos la energía extraída, $(32 + 4)/2 = 18$, ésta sería de 18 W/m² y no de 13,5 W/m² si sólo tomamos el promedio de la velocidad del viento.

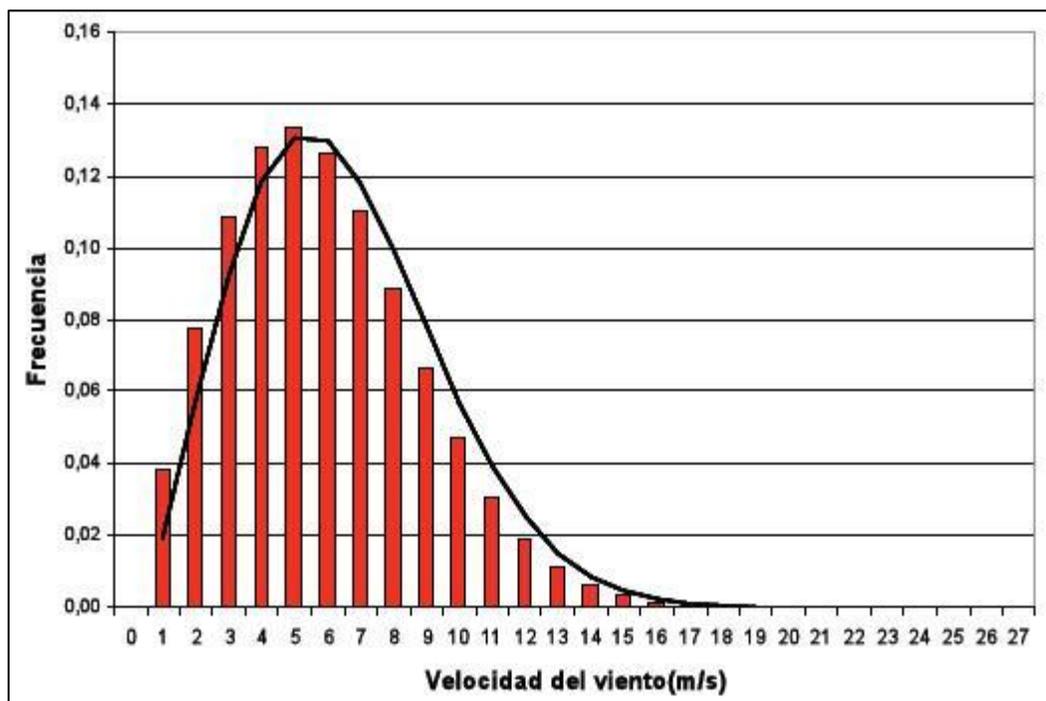
Esto significa que es necesario analizar el régimen de viento no solamente centrando la atención en la velocidad promedio, sino en el promedio de la duración del viento para velocidad por encima del promedio.

6.1. CLASIFICACION DE LOS VIENTOS

Número de Beaufort	Velocidad del viento (km/h)	Velocidad del viento (m/s)	Denominación	Efectos en tierra
0	0 a 1	0 a 0,27	Calma	Calma, el humo asciende verticalmente
1	2 a 5	0,55 a 1,38	Brisa muy suave	El humo indica la dirección del viento
2	6 a 11	1,66 a 3,05	Brisa muy débil	Se caen las hojas de los árboles, empiezan a moverse los molinos de los campos
3	12 a 19	3,33 a 5,27	Brisa ligera	Se agitan las hojas, ondulan las banderas
4	20 a 28	5,55 a 7,77	Brisa moderada	Se levanta polvo y papeles, se agitan las copas de los árboles
5	29 a 38	8,05 a 10,5	Brisa fresca	Pequeños movimientos de los árboles, superficie de los lagos ondulada
6	39 a 49	10,8 a 13,6	Brisa fuerte	Se mueven las ramas de los árboles, dificultad para mantener abierto el paraguas.
7	50 a 61	13,8 a 16,9	Viento fuerte	Se mueven los árboles grandes,

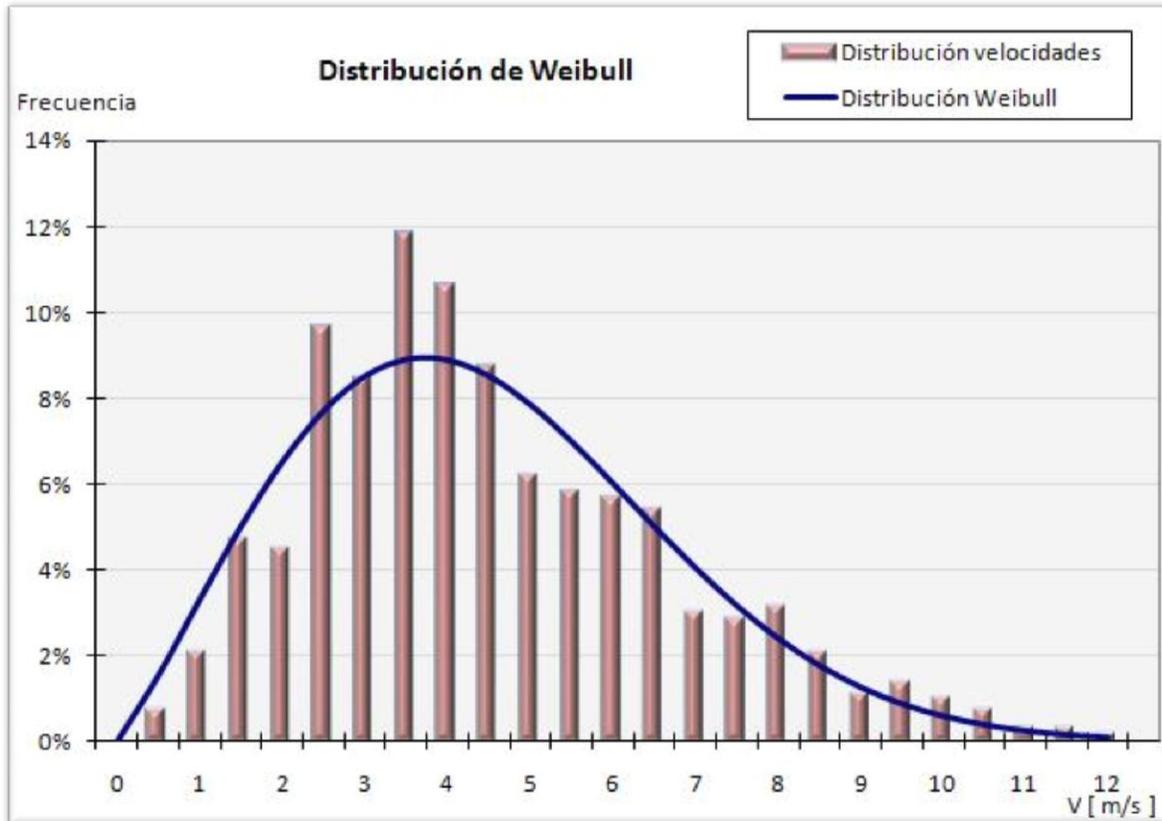
Número de Beaufort	Velocidad del viento (km/h)	Velocidad del viento (m/s)	Denominación	Efectos en tierra
				dificultad para caminar contra el viento
8	62 a 74	17,2 a 20,5	Viento duro	Se quiebran las copas de los árboles, circulación de personas muy dificultosa
9	75 a 88	20,8 a 24,4	Viento muy duro	Daños en árboles, imposible andar contra el viento
10	89 a 102	24,7 a 28,3	Temporal	Árboles arrancados, daños en la estructura de las construcciones
11	103 a 117	28,6 a 32,5	Borrasca	Destrucción en todas partes, lluvias muy intensas, inundaciones muy altas
12	>118	>32,7	Huracán	Voladura de autos, árboles, casas, techos y personas. Puede generar un huracan o un tifón

6.2. LA DISTRIBUCION DE WEIBULL



FUENTE: mingaonline.uach.cl

Para que el viento pueda ser aprovechable energéticamente, es necesario que su comportamiento, el cual es aleatorio, se ajuste a una distribución de probabilidad denominada distribución de Weibull. Dicha distribución de probabilidades está caracterizada por dos parámetros k y c denominados respectivamente factor de forma y el factor de escala.



FUENTE: www.ipeman.com

Esta distribución presenta algunas características importantes. Esta distribución señala que la probabilidad que el viento tenga velocidad cero en un determinado lugar, debe ser también cero. Es decir, que el sitio es aprovechable energéticamente, si los tiempos de calma son prácticamente inexistentes (es decir que todo el tiempo hay viento). Por otra parte, la probabilidad que se produzcan vientos huracanados debe ser muy baja. Por lo tanto, entre estos dos extremos, esta distribución presenta un máximo, es decir, que existe una velocidad para la cual la probabilidad que se produzca es máxima.

Cuando se efectúan mediciones del viento en un determinado lugar, los datos obtenidos se deben correlacionar con una distribución de Weibull. Si la correlación es alta, entonces el sitio es aprovechable energéticamente y principalmente se puede predecir el comportamiento del viento y conocer la cantidad de energía que realmente puede ser aprovechada.

6.3. LA LEY DE BETZ

Existe un límite superior para la potencia eólica aprovechada, según el cual ningún aerogenerador puede extraer del viento una potencia superior a la fijada por este límite, el cual está por la Teoría de Betz. Este teorema se demuestra para máquinas de eje horizontal (tipo hélice), sin embargo, sus conclusiones son aplicables a las de eje vertical. De hecho, el rendimiento de estas últimas se acostumbra a referir a la potencia máxima aprovechada dada por el límite de Betz.

La ley de Betz supone que la presión es la misma a ambos lados de la pala, pero de signo cambiado. La pala actúa como un obstáculo y por lo tanto aumenta la presión del viento justo delante de la pala; ahora bien, al otro lado de la pala la presión se ve aliviada y disminuye radicalmente invirtiendo su gradiente. Para que se produzca el movimiento de la pala, debe producirse sustentación sobre la pala y para ello debe haber un gradiente de presiones, aunque bastante pequeño, pero con suficiente energía para lograr el movimiento de las palas, por efecto de la fuerza de sustentación.

La ley de Betz presupone que la presión justo delante y detrás de la pala es la misma, pero de signo cambiado. La variación de presión es asintótica en las proximidades de la pala y sólo cuando se encuentra el viento lo suficientemente lejos de la pala, vuelve a sus condiciones estáticas.

La energía eólica es extraída de la energía cinética del viento y no de la diferencia de presiones como en el caso de la energía hidráulica.

De acuerdo a la Ley de Betz, es sólo se puede extraer energía cinética del flujo del aire, 16/27 de la energía disponible del viento, es decir, sólo el 59,2%.

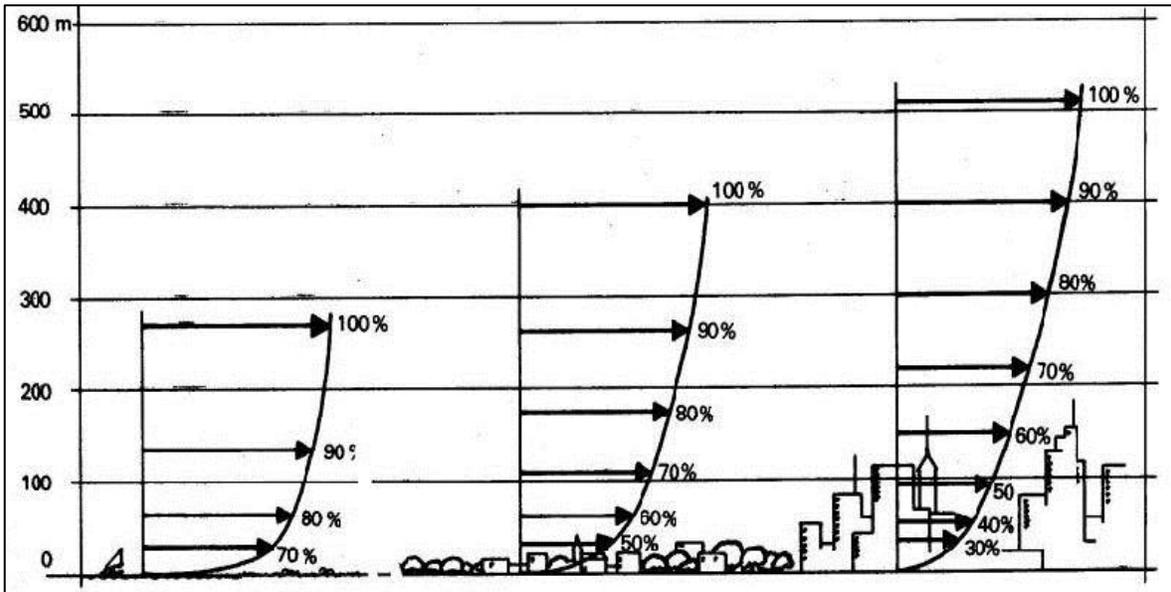
$$\text{Energía útil} = 16/27 * \frac{1}{2} * \rho * V^3$$

Esto significa que el COP de la ecuación () tiene como valor máximo 16/27.

6.4. PERFIL DEL VIENTO A NIVEL DEL SUELO

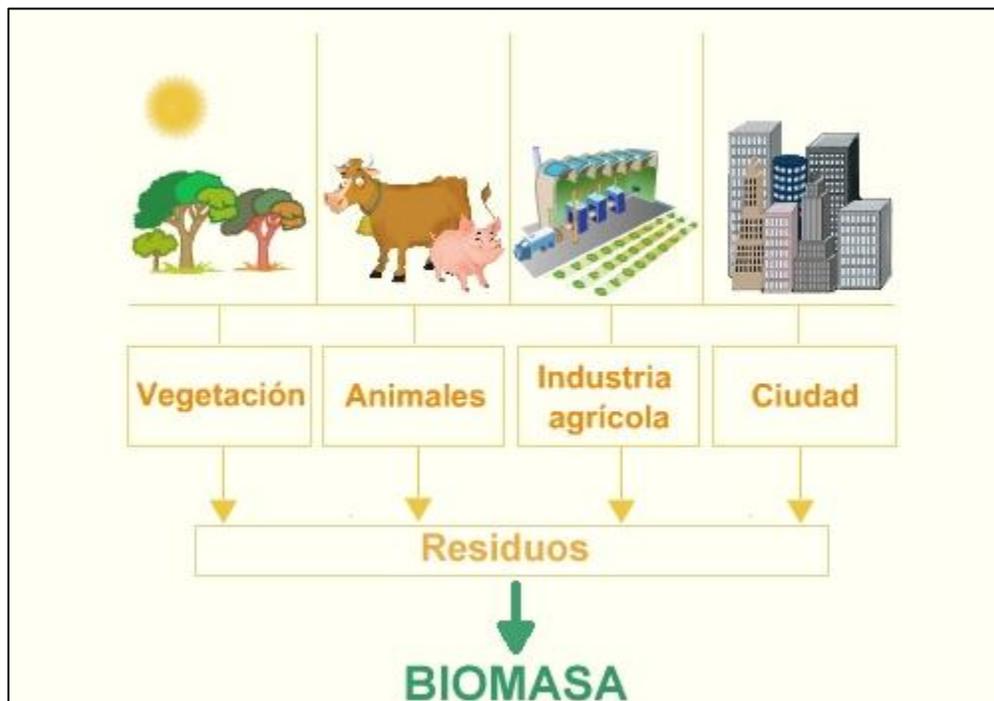
En la siguiente figura se muestra el perfil del viento para diferentes alturas y diferentes tipos de suelos. De forma general, la velocidad del viento es nulo a nivel del suelo y a medida que la altura va aumentando, también lo hace la velocidad del viento hasta alcanzar su valor de régimen. Cuando menos rugosa es la superficie, a menor altura el viento alcanza su valor de régimen. Por ejemplo, en una superficie como el agua, el viento alcanza el valor de régimen cerca de los 300 metros de altura, en cambio en una

superficie tan rugosa como de la una ciudad, la velocidad de régimen se alcanza a los 500 metros de altura.



FUENTE: <http://www.estrucplan.com.ar/articulos/verarticulo.asp?IDArticulo=3141>

7. BIOMASA

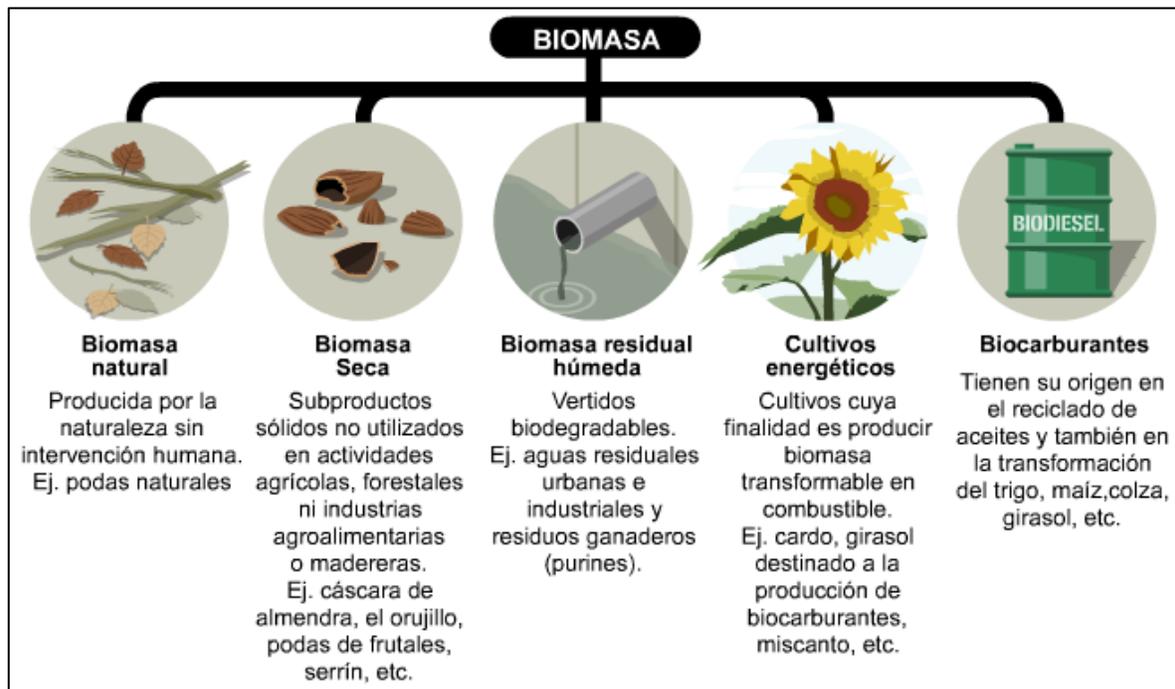


http://newton.cnice.mec.es/materiales_didacticos/energia/biomasa.htm

La biomasa es una fuente de energía orgánica que se ha formado principalmente a partir de la fotosíntesis y que tiene su origen en la energía solar. A partir de su combustión o de su fermentación, es posible extraer energía bajo la forma de calor o metano. El CO₂ que

produce proviene de un ciclo natural por lo que en el balance de emisiones de gases de efecto invernadero no cuenta.

Los grandes problemas en la utilización de la biomasa radican en su recolección y procesamiento para producir su combustión o fermentación. Por otra parte, la eficiencia de la combustión depende directamente de la cantidad de agua contenida en la biomasa, de los procesos a utilizarse para su combustión (gasificación y pirolisis) y sobre todo de la configuración del horno de combustión en el cual se produce la reacción química con la presencia del oxígeno.



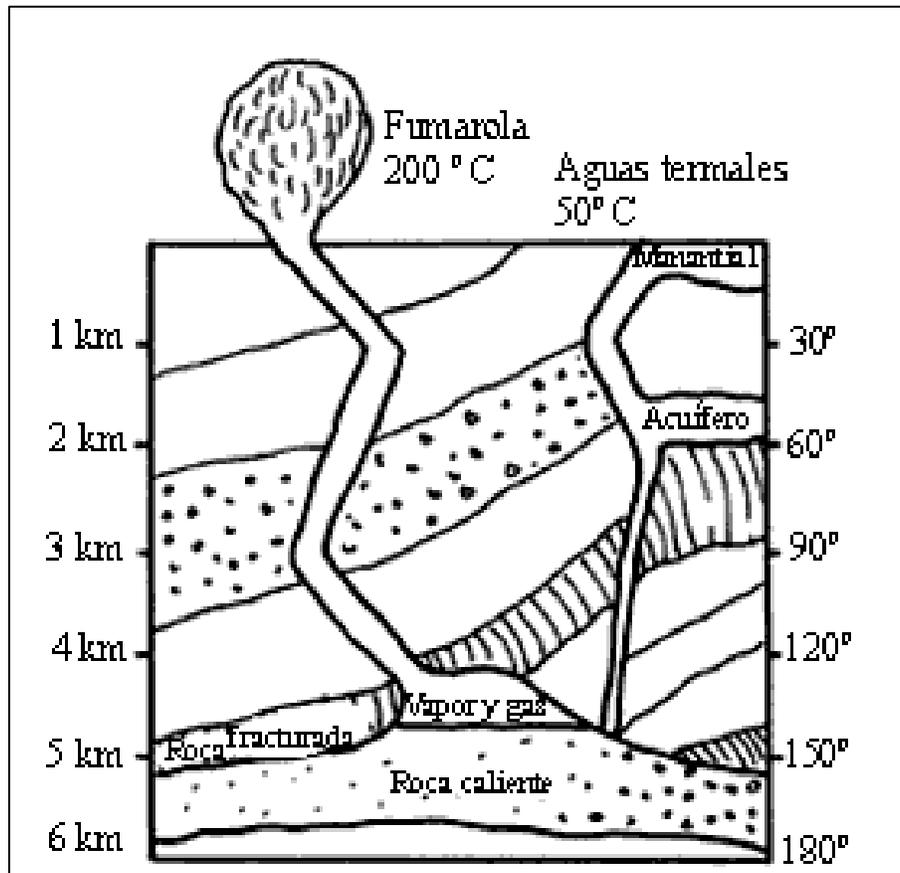
<http://icasasecologicas.com/tipos-de-biomasa/>

Como la combustión es un proceso estequiométrico (las cantidades de biomasa y oxígeno deben ser proporcionales) y posible por encima de una determinada temperatura (temperatura de ignición), estas condiciones no siempre son posibles de conseguir, por ejemplo en una cocina de tres piedras o en un fogón cerámico sin suficiente aislamiento térmico.

8. GEOTERMIA

La energía geotérmica tiene su origen en el calor almacenado debajo de la superficie terrestre. Este calor tiene varios orígenes, el choque entre placas continentales es el principal. En la figura siguiente se muestra el mecanismo de transporte de la energía geotérmica. El agua es un factor que juega un rol muy importante en el proceso de transporte.

Como el agua, a varios kilómetros de la superficie está sometido a altas presiones, a pesar de encontrarse a temperaturas elevadas, aún puede encontrarse en fase líquida o como se denomina vapor sobresaturado. Esta propiedad es la que se también se aprovecha para explotar la energía geotérmica.



El agua es capaz de filtrarse a través de las fracturas o de la porosidad de las rocas hasta lograr liberarse a la presión atmosférica como vapor sobrecalentado con una fuerza considerable, aspecto que es aprovechado para hacer mover una turbina a vapor.

En Bolivia, el principal yacimiento de energía geotérmica se encuentra en Potosí en Sud Lipez, en Laguna Colorada. Existen varios pozos perforados que sirvieron para evaluar inicialmente el potencial del yacimiento. ENDE tiene proyectado el desarrollo de una central geotérmica inicialmente de 50 MW hasta ser ampliada hasta los 100 MW.



<http://eerrbolivia.blogspot.com/2010/11/chile-quiere-desarrollar-geotermia-con.html>

Esta fuente energética presenta algunos problemas ambientales, sobre todo por la calidad del agua que sube a la superficie. Por lo general es agua con un alto contenido de azufre, arsénico y otros componentes que al ser depositados en la superficie contaminan el medio ambiente. Todo ello provoca alteraciones en la superficie, hundimiento de la tierra causado por el socavamiento por las aguas, contaminación térmica, y la expulsión de químicos dañinos.

En la fotografía siguiente se puede apreciar el vapor sobresaturado que es expulsado del pozo de observación. Los factores que permiten evaluar el potencial están referidos al flujo o cantidad de vapor que es extraído, la presión del vapor y la temperatura de salida. Estos datos que sólo pueden ser obtenidos mediante los pozos de observación permiten efectuar la evaluación correspondiente.

Existen algunos yacimientos geotérmicos en los cuales no existe agua que circule en sus profundidades (dry rock). En este caso, se introduce agua mediante un pozo de inyección, se la calienta y se la debe recuperar en otro pozo de extracción. Este proceso debe evitar que el yacimiento se pierda si no fracturan las capas internas. Existen muchos casos en los que las fracturas internas provocadas por las perforaciones de los pozos ha extinguido el yacimiento geotérmico.



<http://www.ende.bo/generacion.php>

9. ASPECTOS TECNICOS: TRANSFORMACION A ELECTRICIDAD

9.1. ENERGIA SOLAR

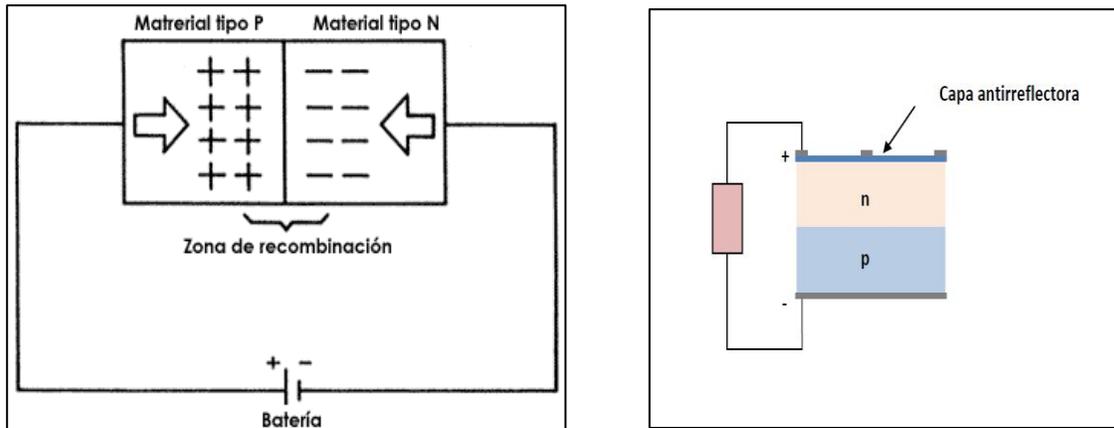
9.1.1. ABSORCIÓN POR UNA UNIÓN P-N

En este caso, la radiación solar es absorbida por una unión p-n fabricada en base a un material semiconductor, por lo general Si (silicio) y en la cual, el material p tiene exceso de “huecos” y el material n tiene exceso de electrones de un semiconductor. A este conjunto se denomina celda fotovoltaica.

Esto se consiguen sustituyendo átomos de Si por Boro (3 electrones en la última capa) para formar cristales P y por Fósforo (P) (5 electrones en la última capa) para formar los cristales N.

Al haber un exceso de electrones en una de las capas y un déficit en la otra, se produce un campo eléctrico cuando ambas capas se unen. La radiación solar interviene para

proporcionar energía cinética a los electrones y éstos puedan moverse en el campo eléctrico que se ha formado como consecuencia de la unión P-N.



FUENTE: http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen2/ciencia3/105/htm/sec_7.htm

Este es un fenómeno cuántico donde la radiación solar bajo la forma de partículas (fotones) choca con los electrones, los cuales se activan y saltan barreras provocando un flujo generando de esta forma corriente continua (a diferencia de la corriente alterna).

Los electrones saltan a los huecos existentes en el material generando un flujo continuo de electrones (y de huecos) y con ello, una corriente eléctrica y una diferencia de voltaje. Mientras exista radiación solar, el flujo de electrones se mantendrá y la unión p-n se convertirá en una fuente de energía eléctrica.

En este caso, la ecuación (4) se escribe de la siguiente forma:

$$\text{Potencia Efectiva} = \text{Voltaje} * \text{Corriente} = \text{COP} * \text{A} * \text{Gn} \quad (9)$$

La relación entre Voltaje e Intensidad, para el caso de una celda fotovoltaica viene dada por la siguiente expresión:

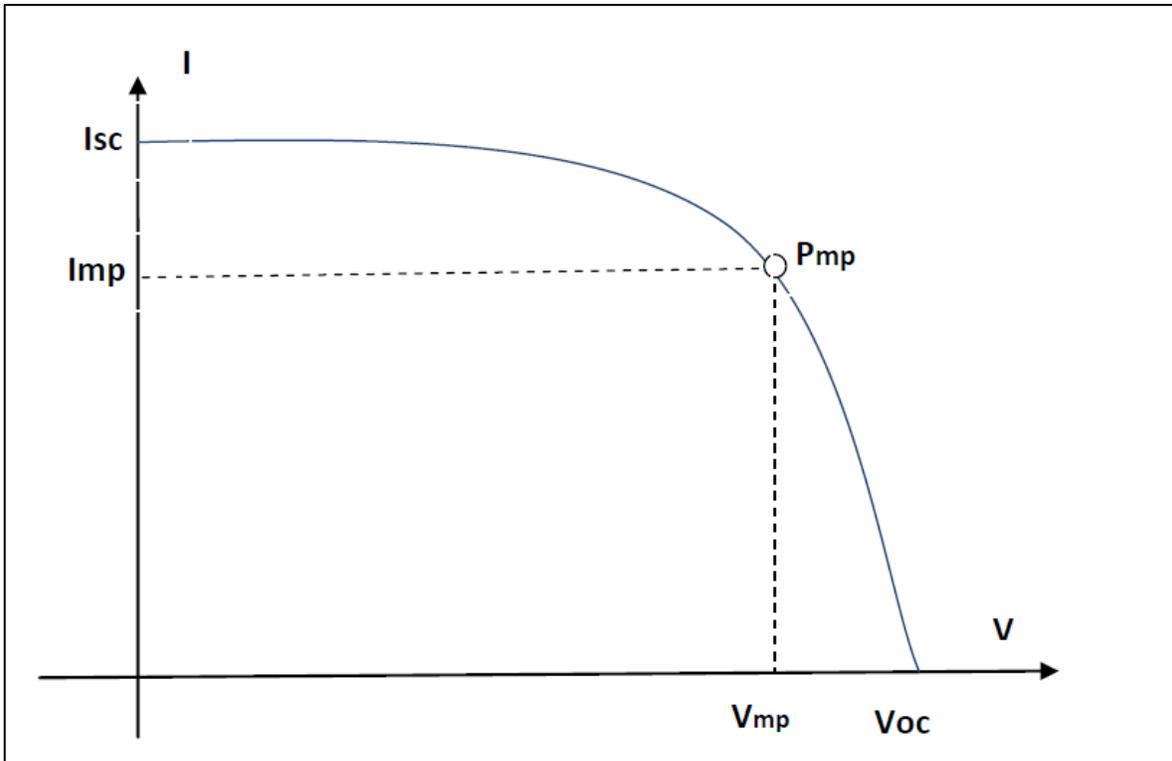
$$\text{Corriente} = \text{Corriente}_{(\text{corto circuito})} * \left(1 - e^{-\frac{I(V_{oc}-V)}{mkT}} \right) \quad (10)$$

Donde:

m = masa del electrón

k = constante de Maxwell-Boltzman.

T = temperatura absoluta en °K.



FUENTE: <http://www.monografias.com/trabajos82/energia-solar-fotovoltaica-y-sus-aplicaciones/energia-solar-fotovoltaica-y-sus-aplicaciones2.shtml>

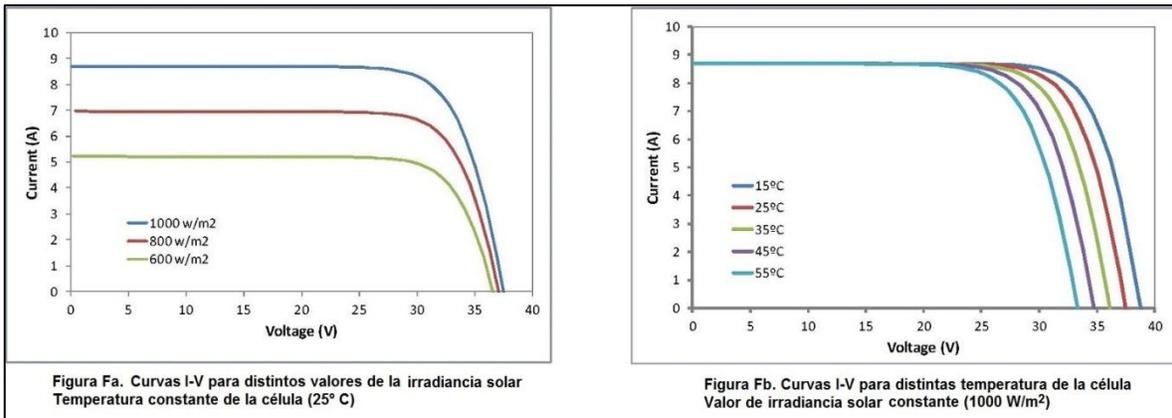
En una célula fotovoltaica, la producción de corriente y voltaje es proporcional a la cantidad de radiación solar que llega a su superficie. Por lo tanto la curva que se muestra en la figura anterior varía según la intensidad de la radiación solar.

En la siguiente figura, se muestra la curva I-V para diferentes intensidades de la radiación solar y para diferentes temperaturas.

La tensión de voltaje y la corriente efectivamente son proporcionales a la cantidad de radiación solar que recibe la celda fotovoltaica. Cuando la radiación solar se incrementa, manteniéndose constante la temperatura de la celda constante, la corriente producida también se incrementa y la máxima corriente producida es la que corresponde a la corriente de corto circuito. Por lo general, los equipos electrónicos acoplados a las células fotovoltaicas tienen que poseer sistemas de protección diseñados para soportar estas corrientes.

Cuando la temperatura de la celda aumenta sin que varíe la radiación, la tensión del voltaje se incrementa. Este fenómeno es muy importante tomarlo en cuenta en el diseño de los componentes electrónicos, ya que si se los toma en cuenta, se evita que existan

sobretensiones en dichos componentes que terminan muchas veces dañando dichos equipos.



<http://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn192.html>

9.1.2. TIPOS DE CRISTALES DE LA UNIO P-N

Existen tres tipos de células fotovoltaicas, las cuales se diferencian por el tipo de cristal: monocristalinos (m-Si), policristalinos (p-Si) y amorfos (a-Si).

La diferencia básica entre una célula solar monocristalina y una policristalina es la composición del cristal de silicio.

Las células monocristalinas están formadas por un cristal de silicio uniforme a lo largo de éste. Para conseguir ello, es necesario controlar el crecimiento del cristal en su fase líquida a sólida de forma que el cristal se hace de forma uniforme en toda sus direcciones, consiguiendo un alineamiento bastante perfecto de todos los componentes del cristal.

En cambio en las células policristalinas, no se controla el crecimiento del cristal de silicio de forma uniforme, pero se permite que se formen monocristales de corto alcanza (algunos milímetro) que se unen entre sí pero en varias direcciones.

Inicialmente, aunque el sistema de fabricación del cristal monocristalino era un poco más caro que el del cristal policristalino, se utilizaba esta técnica porque así se conseguía obtener más rendimiento de las células, aunque poco a poco estas diferencias tanto de coste económico a la hora de fabricar el cristal, como de mejores rendimientos, han ido disminuyendo frente a los cristales policristalinos.

En ambos casos, la durabilidad y estabilidad de ambas técnicas sobrepasan los 30 años. Muchas veces esto cristales son prácticamente eternos y lo que no es durable son los

materiales de encapsulamiento (la capa protectora, los aislantes, el marco de aluminio, etc.).

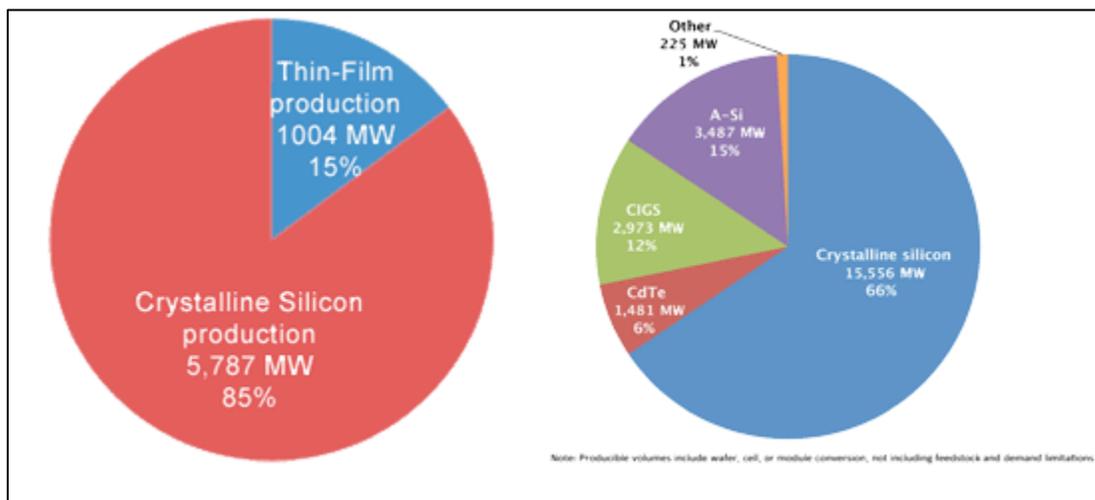
El caso de las células amorfas (a-Si), el Si no ha formado ningún tipo de cristal. Por lo general, el Si es depositado sobre una superficie en capas N y P sin ningún tipo de estructura cristalina, lo cual se denomina capa delgada (thin film).

Esta forma de fabricación de las células fotovoltaica es mucho más barata que los otros tipos de cristales. La gran desventaja radica en que son de muy bajo rendimiento (casi el 8%) y de muy baja durabilidad.

Ello se debe a que las capas N y P que a un inicio se hallan bastante diferenciadas, con el tiempo terminan entremezclándose, perdiendo la cualidad de producir el campo eléctrico responsable de la producción de electricidad. Esta entremezcla se produce justamente por efecto del campo eléctrico, el cual genera una fuerza mecánica de compresión sobre la unión, terminando entremezclándose entre ellas. A partir de ese momento, el campo eléctrico desaparece y no se produce más electricidad. Este proceso puede dura entre 4 a 7 años, lo cual corresponde a la vida útil de estas celdas.

9.1.3. PRODUCCIÓN MUNDIAL DE CELULAS POLICRISTALINA Y AMORFAS

La producción mundial de células fotovoltaicas está basada predominantemente en las células mono y policristalinas. Casi el 85% de la producción mundial de células está dedicada a estas últimas, mientras que sólo el 15% ocupan las células amorfas, como se muestra en la figura a continuación.



<http://www.greentechmedia.com/research/report/the-greentech-innovations-report-1>

9.2. CONDICIONES DE FUNCIONAMIENTO STC Y NOCT

9.2.1. CONDICIONES STC

Para que se puedan comparar las celdas fotovoltaicas, éstas son caracterizadas bajo las mismas condiciones denominadas Standard Test Conditions (STC). Estas condiciones se refieren a los siguientes: i) la radiación debe tener una intensidad de 1000 W/m² y, ii) la temperatura de la celda debe ser de 25°C.

9.2.2. CONDICIONES NOCT

NOCT es la Nominal Operation Condition Temperature y se la mide cuando la radiación solar tiene un valor de 800 W/m², la temperatura ambiente es de 20°C y una velocidad de 1 m/s. A partir de esta temperatura se puede determinar la temperatura de la célula a cualquier otro valor de radiación solar, si la temperatura ambiente promedio es de 20°C y una velocidad de 1 m/s.

10. ENERGÍA HIDRÁULICA

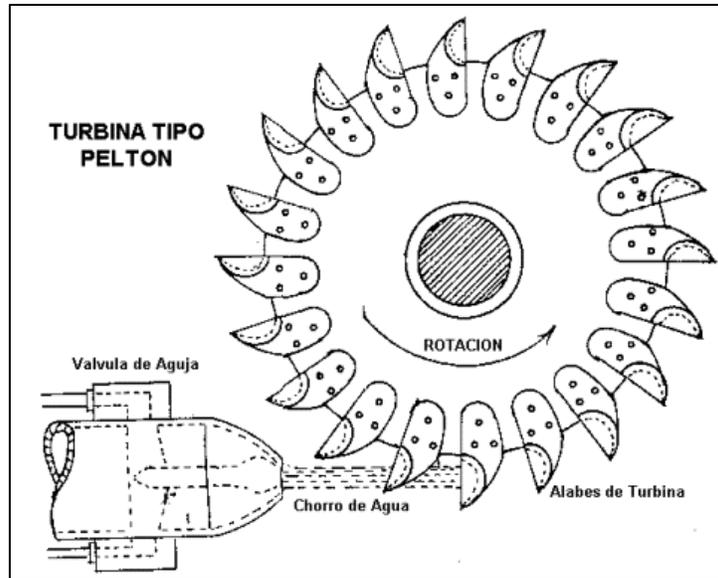
A continuación se describen los procesos que permiten convertir una energía renovable o alternativa en electricidad.

10.1. TIPOS DE TURBINAS (ACCIÓN Y REACCIÓN)

Las turbinas de reacción son aquellas que se encuentran completamente sumergidas en la corriente de agua. Las paletas está diseñadas, al igual que las hélices de un avión, para producir una diferencia de presión generando una fuerza denominada empuje, la cual permite que las hélices giren. Existen dos tipos de hélices diseñadas para tal situación: Kaplan y Francis.

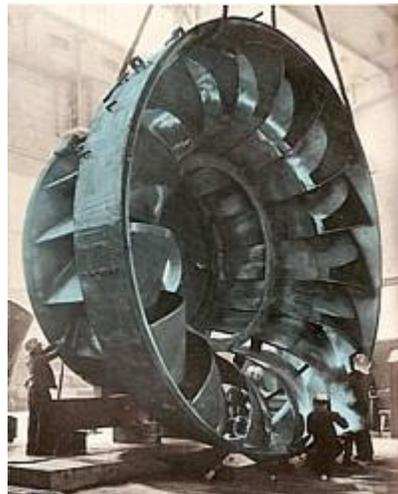
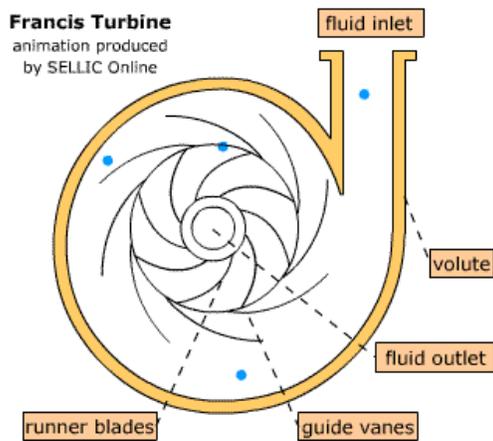
Estas turbinas por lo general se colocan al pie de una represa y según el flujo y la cantidad de energía que se quiera obtener, se define el tipo de turbina. La turbina Kaplan se caracteriza por el hecho que el flujo de agua es paralelo al eje de rotación, en cambio en la turbina Francis, el flujo inicialmente es perpendicular al eje de rotación para luego ser expulsada de forma paralela al eje.

Las turbinas de acción son aquellas que no se encuentran sumergidas en el flujo de agua y en su lugar éste choca con las paletas, y que como consecuencia del choque, la turbina se pone a girar. Entre las turbinas más conocidas se encuentran las turbinas Pelton y las turbinas Banki-Michel.

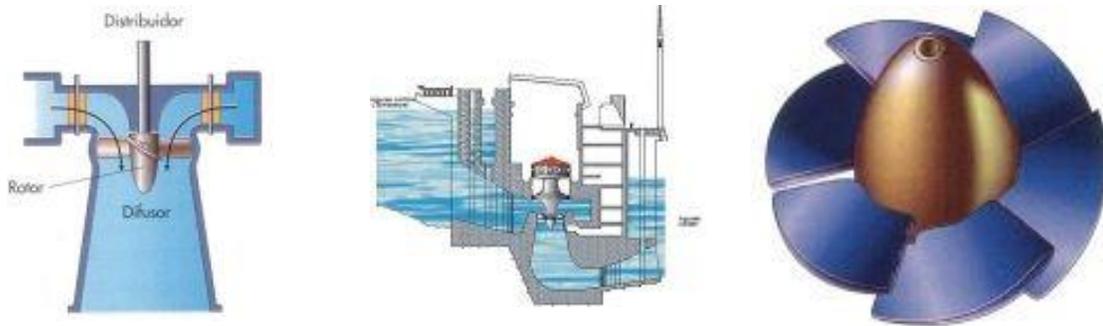


FUENTE: [http://www.ecopolisla.com/es/hydro-power/products/turbines/detail-pelton-turbine-hp---h-50/](http://www.ecopolisla.com/es/hydro-power/products/turbines/detail-pelton-turbine-hhp---h-50/)

Estas últimas turbinas se utilizan para caídas relativamente grandes y para flujos de agua que son relativamente bajos. Se pueden obtener potencias de hasta una decena de megawattios.



FUENTE: <http://ramaucsa.wordpress.com/2011/01/14/turbinas-francis-i/>



FUENTE: <http://ramaucsa.wordpress.com/2011/01/14/turbinas-francis-i/>

10.2. RENDIMIENTOS

El flujo de agua conlleva una cantidad de energía cuya expresión, como se ha visto depende de principalmente de la diferencia de altura. Si se mantiene el caudal y la altura constantes, la cantidad de energía disponible también es constante. Esta energía es convertida en energía cinética de rotación de la turbina, la cual es convertida a su vez en energía eléctrica si se acopla el eje de la turbina a un generador. Si a ello, se suma que se puede controlar el caudal mediante la apertura de válvulas, la energía hidráulica es una fuente renovable controlable.

Esta particularidad, de mantener la energía disponible y controlable tiene una consecuencia directa en el sistema eléctrico y que corresponde a la disponibilidad de potencia firme. El sistema eléctrico remunera a las fuentes energéticas por la disponibilidad de potencia firme.

Si toda la energía hidráulica fuera convertida en sólo la energía cinética de rotación, no habría posibilidad de extraer energía eléctrica. A su vez, si en un caso ideal sin pérdidas, toda la energía hidráulica fuese convertida en energía eléctrica, no habría rotación mecánica, lo cual es imposible. Por lo tanto, entre ambos extremos hay un punto de equilibrio que permite que exista un máximo de energía eléctrica que pueda ser extraída de la energía hidráulica. Por lo general, el máximo de energía eléctrica que es extraída del flujo de agua es superior a 85%, por lo que se puede esperar valores del COP superiores a este valor.

Este hecho tiene una implicación en el diseño y costos de los sistemas hidroeléctricos. Cuanto más eficientes sean los sistemas hidroeléctricos, se maximizará la cantidad de energía eléctrica a extraerse y por lo tanto su producción, y con ello, el precio unitario debería ser cada vez menor.

11. ENERGÍA EÓLICA.



<http://www.bolivia.com/tecnologia/visionarios/sdi/78342/inauguran-primer-parque-eolico-en-bolivia-con-una-inversion-de-us-76-millones>



<http://www.evwind.com/wp-content/uploads/2013/12/Bolivia-e%C3%B3lica-e%C3%B3lico-aerogeneradores.jpg>

Para convertir la energía eólica en electricidad, se utiliza el mismo principio que en energía hidroeléctrica. Se trata de hacer girar un eje, el cual será acoplado a un generador de electricidad. Para hacer girar un eje, el cual puede ser vertical u horizontal, se recurre a la utilización de hélices sobre las cuales debe producirse un efecto de sustentación, el cual genera la suficiente fuerza para que la hélice se mueva.



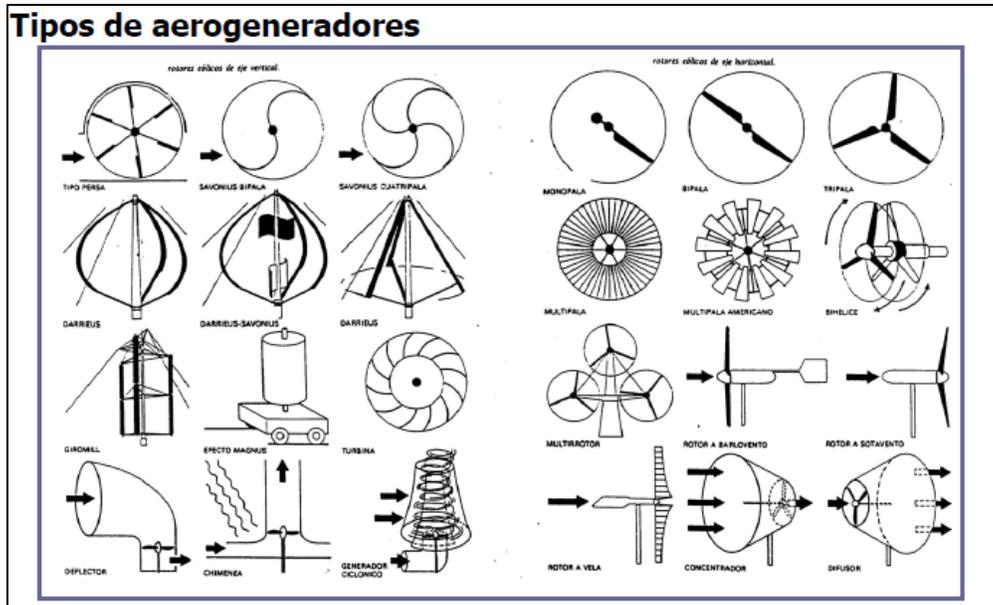
<http://www.evwind.com/2013/11/06/eolica-y-energias-renovables-en-bolivia-llegan-aerogeneradores-para-el-parque-eolico-en-pocona/>



<http://www.bolivia.com/tecnologia/visionarios/sdi/78342/inauguran-primer-parque-eolico-en-bolivia-con-una-inversion-de-us-76-millones>

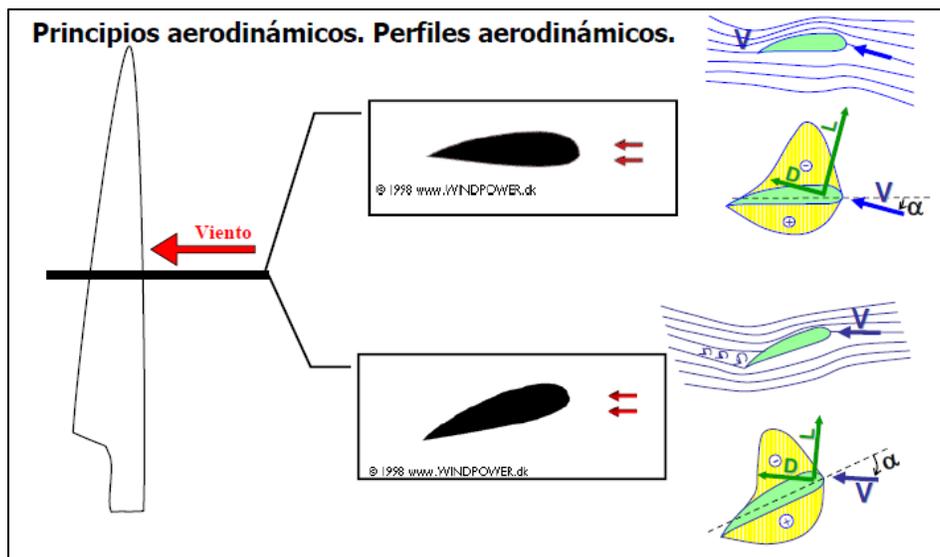
11.1. TIPOS DE TURBINAS

En la siguiente figura se muestran todos los tipos de aerogeneradores que se han venido utilizando para convertir la energía eólica en energía mecánica de rotación de un eje. Cada tipo de aerogenerador sirve para propósitos determinados, principalmente para el bombeo mecánico de agua o para la molienda.



FUENTE: <http://www.xatakaciencia.com/energia/cuanta-potencia-desarrolla-un-aerogenerador-y-ii>

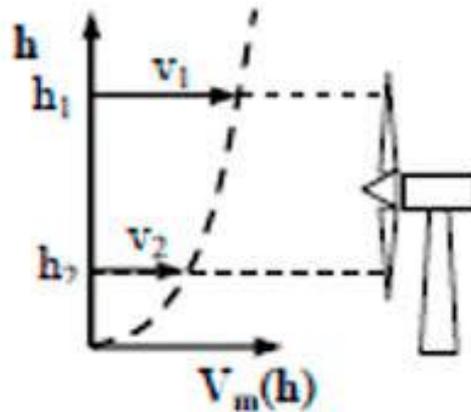
Para la producción de electricidad, se utilizan aerogeneradores de tres palas dispuestas en un eje horizontal. El perfil de las palas se muestra en la siguiente figura.



FUENTE: <http://www.xatakaciencia.com/energia/cuanta-potencia-desarrolla-un-aerogenerador-y-ii>

El perfil aerodinámico de la pala es el responsable de generar la fuerza de sustentación que obligará a aquella a girar. El perfil es exactamente a la de un avión, obligando al viento a incrementar su velocidad en una de las caras y disminuir en la otra, generándose por la Ley de Bernoulli una diferencia de presión entre ambas caras, la cual a su vez genera la fuerza de sustentación que es responsable del giro de las palas.

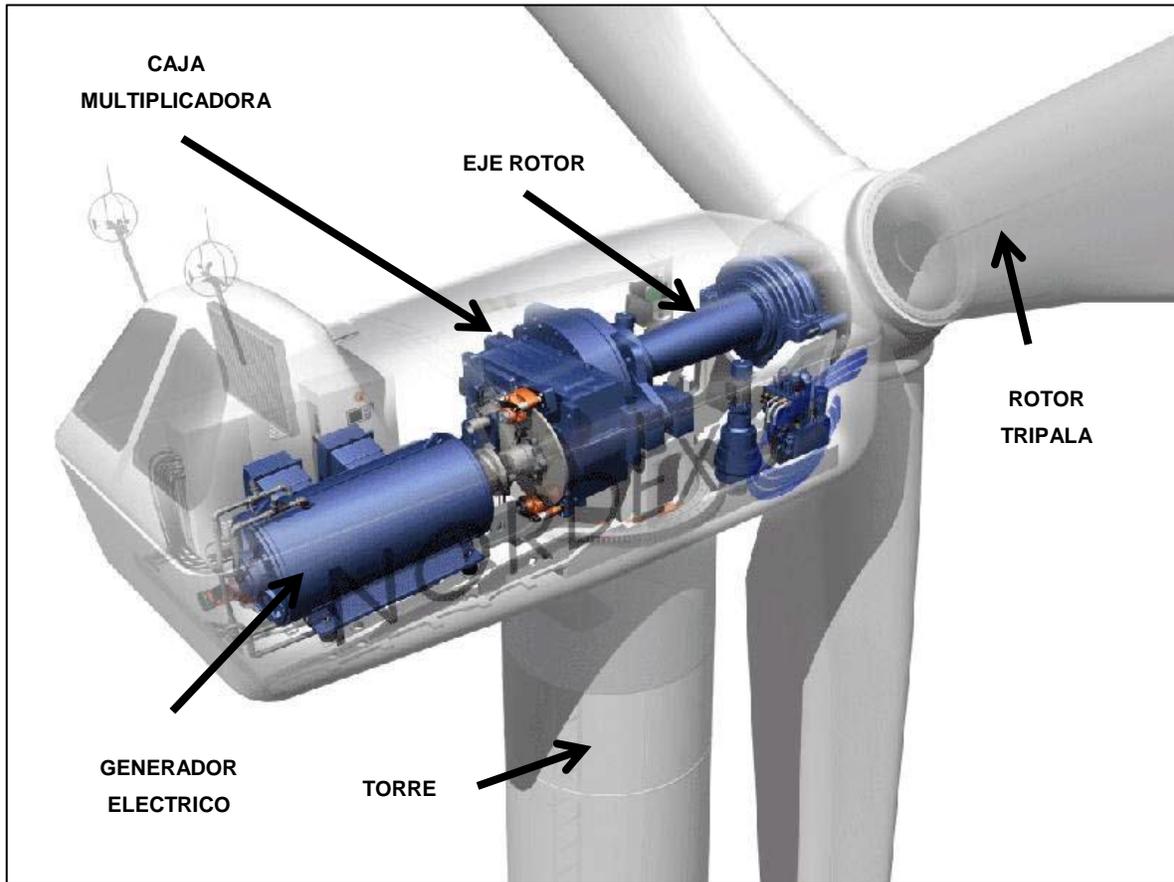
También se genera una fuerza de resistencia sobre las palas, la cual puede ser minimizada dependiendo del ángulo de ataque del viento sobre el perfil de las palas. Cuando se quiere detener el giro de las palas, por ejemplo, para mantenimiento, basta hacer girar la orientación de las palas para que el ángulo de ataque genera una fuerza elevada de resistencia y sea prácticamente nula la fuerza de sustentación.



Por lo general, las palas tienen una longitud que varía entre los 40 a 60 metros de longitud y una torre que tiene una altura de algo más de 100 metros. Las palas están construidas con materiales que sean relativamente livianos pero muy resistentes ya que se producen fuerzas de torque y torsión bastante grandes sobre todo cuando el viento cambia de dirección y el aerogenerador debe alinearse con la dirección del viento y además de ello, debe añadirse una diferencias de velocidad en el barrido de las palas.

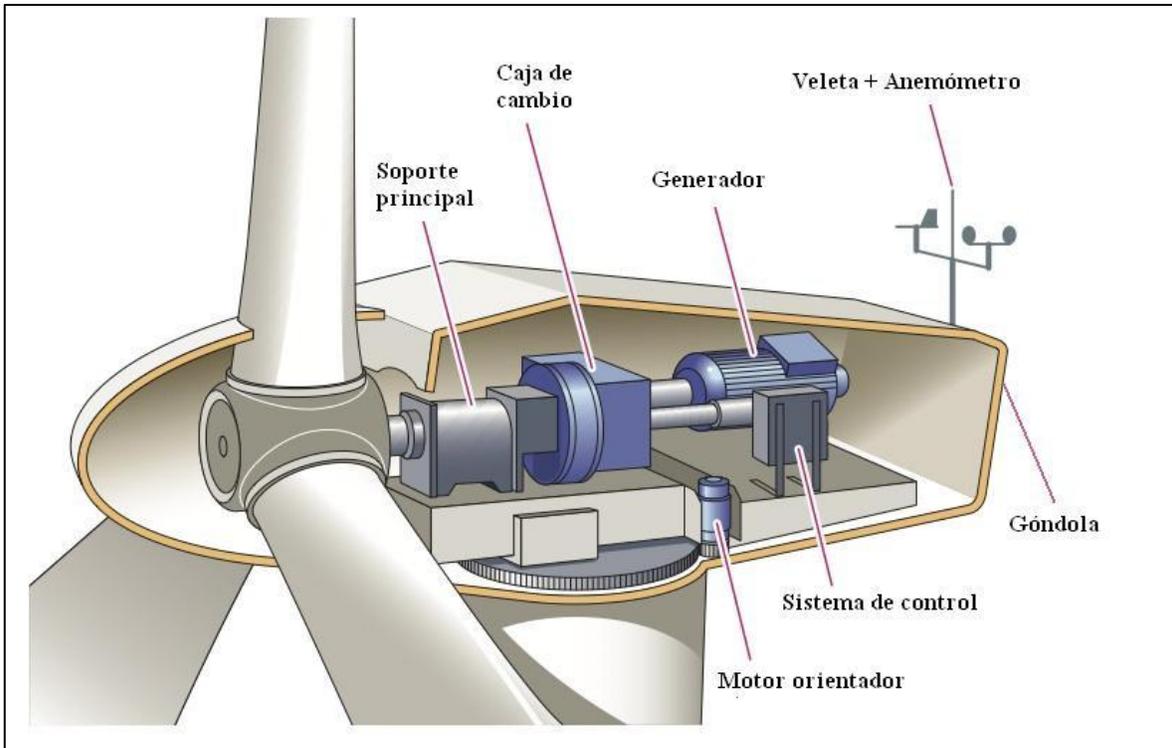
Por otra parte, el eje del aerogenerador se encuentra a 100 metros de altura, donde el viento tiene un gradiente vertical casi constante, aunque todavía existen diferencias en la velocidad del viento entre la parte superior e inferior de las palas.

11.2. COMPONENTES DE LA GENERACION ELECTRICA



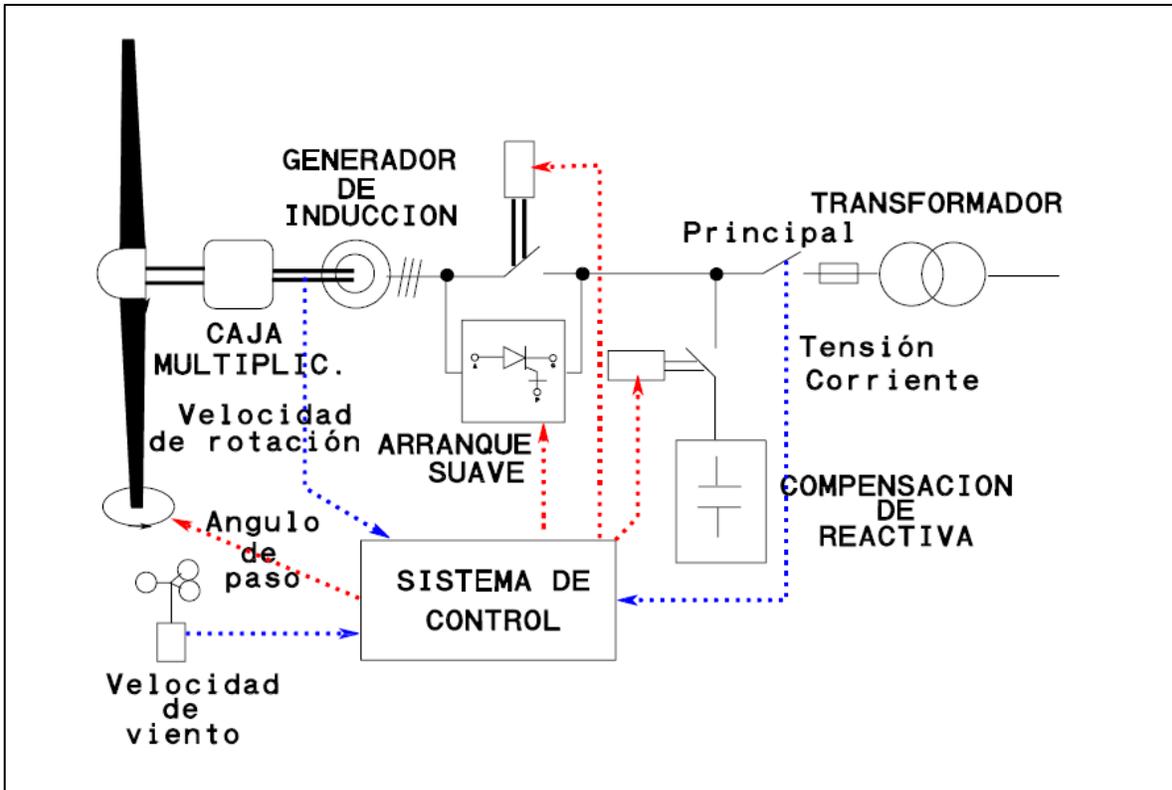
Fuente: <http://energiadoblezero.com/energias-renovables/energia-eolica/componentes-de-un-aerogenerador>

En un aerogenerador, la energía cinética del viento se transforma en energía mecánica mediante el giro del rotor eólico. Esta energía mecánica que aparece en el eje de éste rotor en forma de par y vueltas por unidad de tiempo, se transforma en energía eléctrica mediante una generador eléctrico. El generador eléctrico produce electricidad haciendo girar un campo magnético dentro de una bobina de hilos de cobre. El campo magnético puede provenir de imanes permanentes (generador síncrono) o puede ser inducido (generador asíncrono).



Fuente: <http://energiadoblezero.com/energias-renovables/energia-eolica/componentes-de-un-aerogenerador>

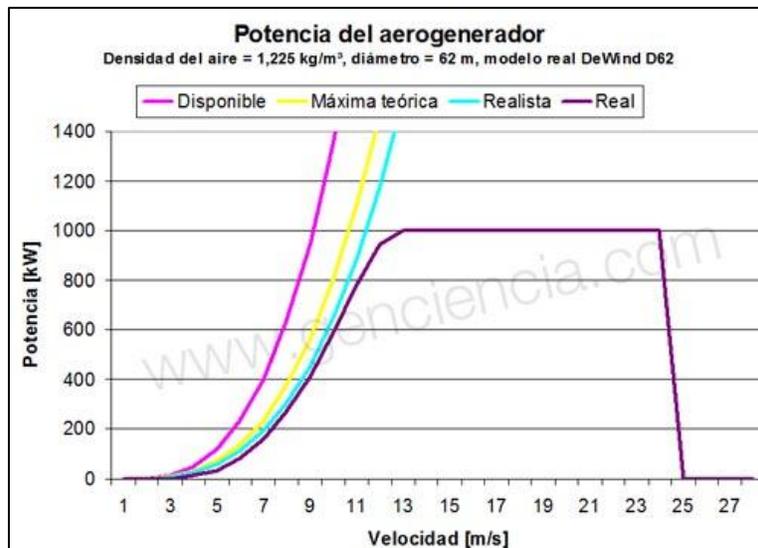
La velocidad de rotación típica del rotor de un aerogenerador se encuentra en el rango de 20 a 100 rpm para aerogeneradores de gran potencia y de entre 100 y 400 rpm para aerogeneradores de pequeña potencia. Las máquinas eléctricas convencionales (con bajo número de polos) suelen tener velocidades de sincronismo de entre 750 y 3000 rpm. La solución de acoplamiento pasa por utilizar una transmisión o caja multiplicadora que acople la relación par/vueltas del rotor de la turbina y del generador eléctrico o utilizar generadores eléctricos específicos que tengan velocidades de sincronismo bajas equivalentes al rango de velocidades de rotación del rotor (generadores con gran número de polos).



Fuente: <http://energiodoblezero.com/energias-renovables/energia-eolica/componentes-de-un-aerogenerador>

Una turbina de 3 MW de potencia, posee una góndola que tiene una longitud de 6,8 metros y un diámetro de 4,2 metros, y un peso de 73 toneladas. Las palas tienen una longitud de 49 metros y pesan 10,1 toneladas y el peso de la torre es de 173 toneladas.

11.3. POTENCIA DE UN GENERADOR



FUENTE: <http://www.xatakaciencia.com/energia/cuanta-potencia-desarrolla-un-aerogenerador-y-ii>

En el eje horizontal del anterior gráfico se muestra la **velocidad del viento**, medida en metros por segundo y en el eje vertical se muestra la **potencia** medida en kilowatios.

El gráfico muestra cuatro curvas:

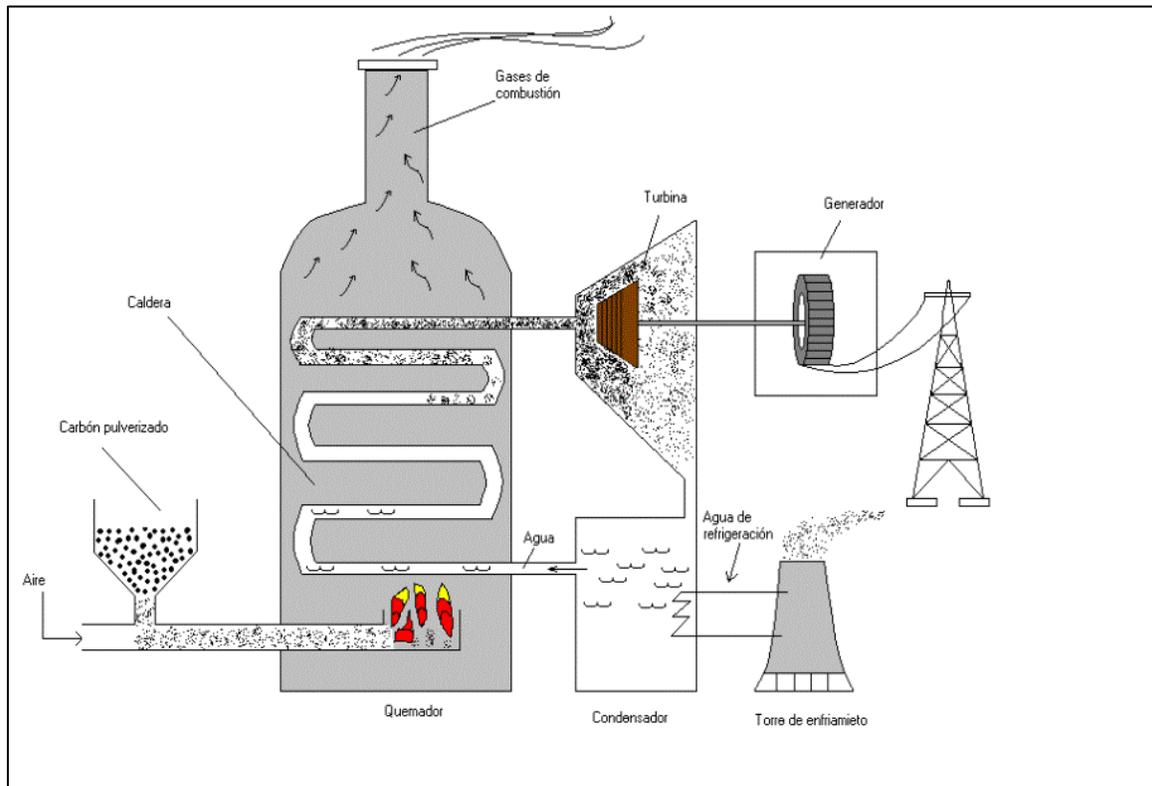
- a) la potencia disponible, es decir, la que está “contenida en el aire”, y la que obtendríamos si pudiéramos convertir el 100% en electricidad, sin embargo, el sentido común nos dice que habrá pérdidas.
- b) La potencia máxima extraíble teórica, ya que no es posible capturar más de $16/27$ (59%) de la energía cinética del viento. Este resultado se conoce como la Ley de Betz y se debe a que los aerogeneradores frenan el aire que los barre. La ley de Betz cuantifica el efecto de este frenado.
- c) La curva realista que representa el 80% sobre el máximo teórico establecido por Betz ya que toma las pérdidas o el valor de COP igual a 0,8.
- d) La curva de potencia real de un modelo comercial cuyo comportamiento es muy diferente a lo esperado. Para los valores más bajos de la velocidad del viento, esta curva se aproxima a la curva real, sin embargo, para un valor determinado de la velocidad del viento, se estabiliza a un determinado valor a pesar que la velocidad del viento vaya en aumento.

Esto último es lógico ya que es imposible diseñar un aparato capaz de desarrollar potencia infinita, y debido a la dependencia cúbica de la velocidad, la potencia crece muy rápido y los aerogeneradores terminarían destrozándose por efecto de fuerzas como la centrífuga a nivel de las palas. Por eso, los aerogeneradores tienen una potencia máxima denominada potencia nominal, por encima de la cual, no se podrá generar más que dicho límite y los sistemas de seguridad y frenado se pondrán en acción para proteger dicho aerogenerador.

Esto tiene una consecuencia en la elección de los emplazamientos de los parques eólicos, y es que no es factible instalar molinos eólicos en lugares donde existan ráfagas muy fuertes de viento, basta con que la velocidad del viento sea superior a la nominal. Lo verdaderamente importante es que el viento sople de forma constante durante todo el año.

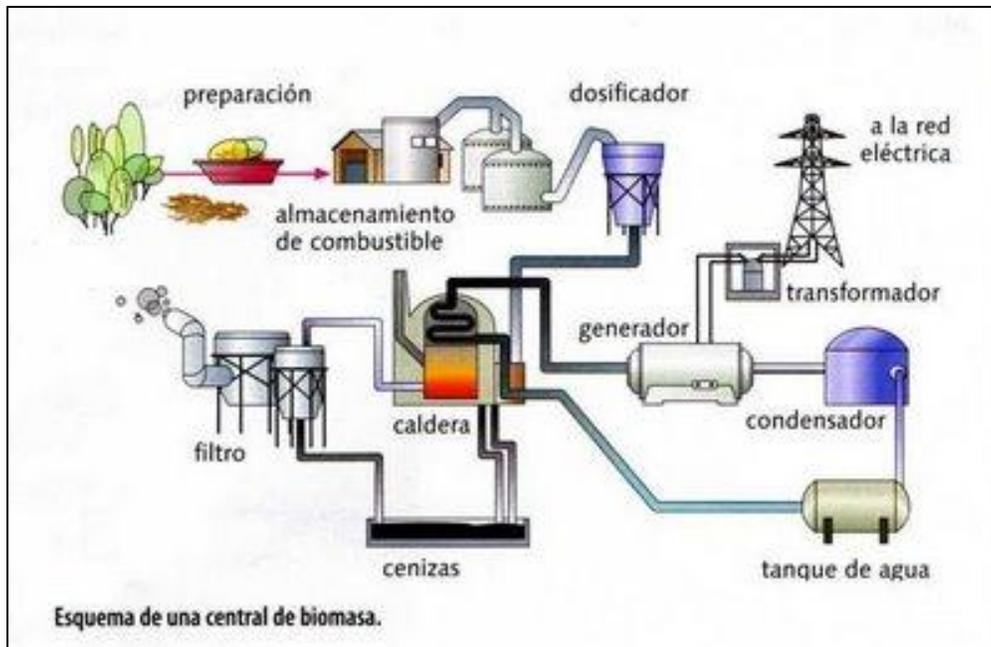
Para evitar daños al aerogenerador, a partir de cierta velocidad, la potencia obtenida pasa a ser cero. Esta es la llamada velocidad de corte, y es la velocidad máxima a la que el aerogenerador puede trabajar sin suponer un riesgo para su propia estructura. Los aerogeneradores tienen mecanismos de control para detenerse a ciertas velocidades las cuales están establecidas en diversas normas técnicas.

12. BIOMASA EN ELECTRICIDAD.



<http://javiyalex.wordpress.com/2008/05/09/centrales-termicas-biomasa/>

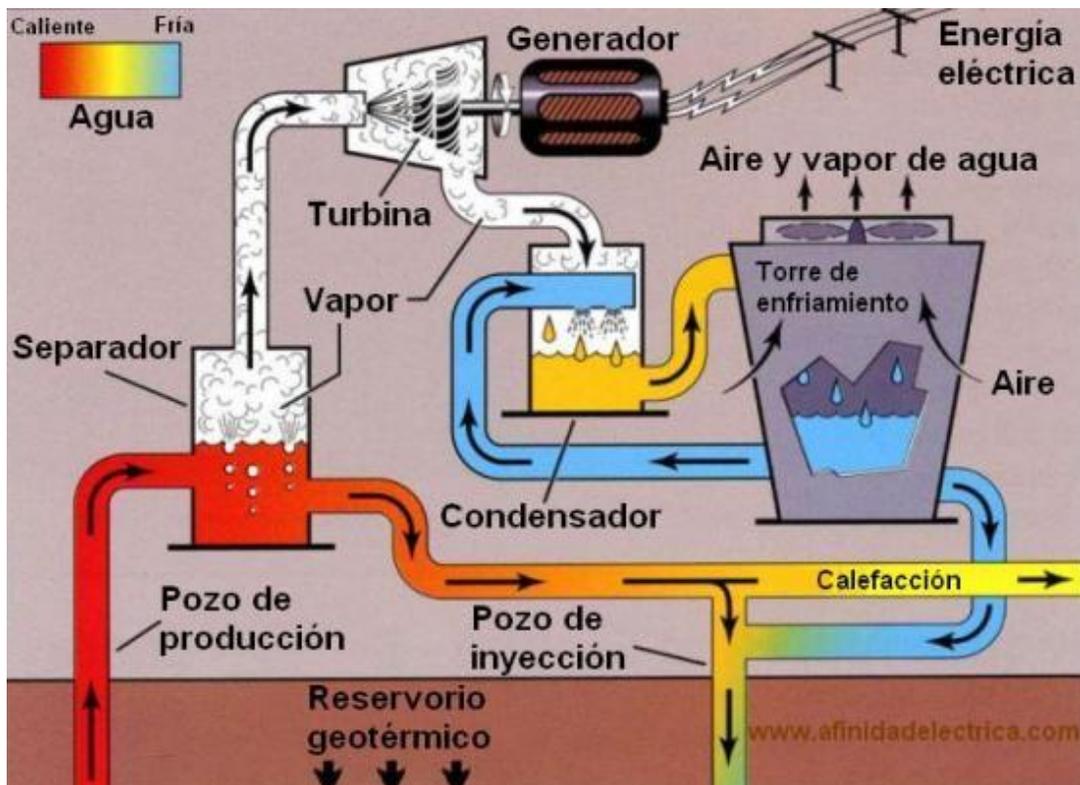
En la figura anterior se muestra la forma en la que la biomasa sirve para calentar hasta la saturación el agua y proveer de esta forma la energía para accionar una turbina a vapor. La biomasa que alimenta el quemador debe ser tratada con anterioridad para que su combustión sea lo más uniforme posible. En la figura siguiente se observa el proceso de pre tratamiento de la biomasa antes de su producción de vapor.



<http://javiyalex.wordpress.com/2008/05/09/centrales-termicas-biomasa/>

En los siguientes puntos se abordará la producción de vapor.

13. ENERGÍA GEOTÉRMICA EN ELECTRICIDAD



<http://www.afinidadelectrica.com.ar/articulo.php?IdArticulo=249>

Al diferencia de la biomasa, la energía geotérmica ya produce el vapor sobresaturado el cual va a servir para producir energía mecánica y luego energía eléctrica. Tanto para el caso de la biomasa como la energía geotérmica, el vapor de agua debe seguir un proceso de evaporación a una determinada temperatura y de condensación a otra temperatura, lo cual permite extraer una cantidad de energía neta que será convertida en potencial efectiva.

Este proceso se explica por el ciclo de Rankine, el cual es una aproximación para explicar lo que sucede en una turbina a vapor de una central térmica.

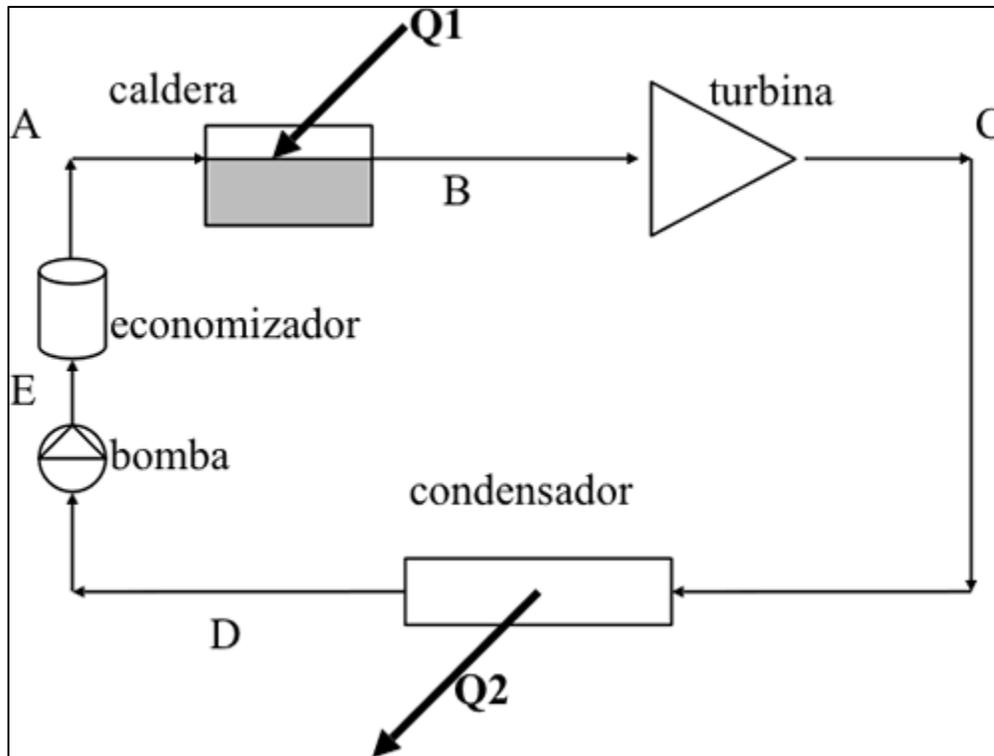
14. CICLO DE RANKINE

El ciclo de Rankine describe la obtención de potencia efectiva en una central térmica. Se tiene un proceso termodinámico reversible, en el cual se produce una evaporación y una condensación del líquido lo que permite obtener una potencia efectiva.

En este caso, el vapor de agua se produce en una caldera a alta presión (presión alta) para luego ser llevado a una turbina donde se expande (presión baja) para generar trabajo mecánico en su eje el cual está conectado a un generador eléctrico.

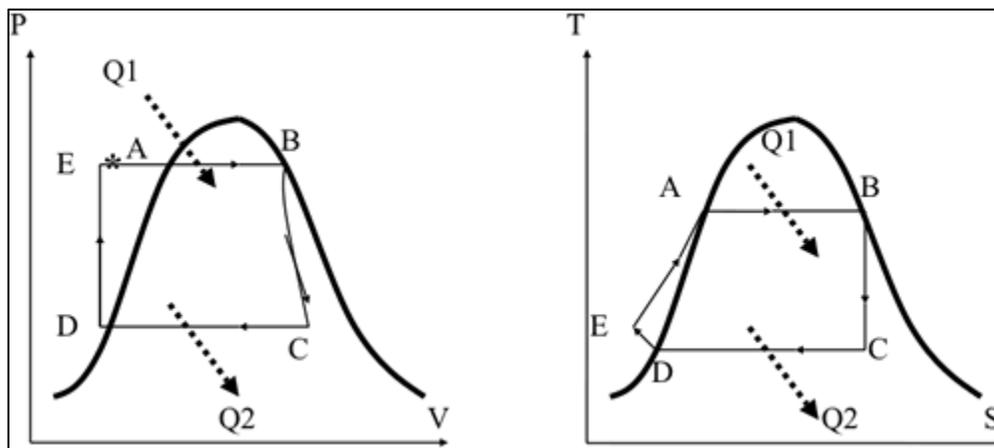
El vapor a baja presión que sale de la turbina y llega a un condensador, donde el vapor pasa del estado gaseoso a líquido, el calor de condensación es evacuado por una torre de refrigeración o por la combinación con agua fría.

En el segundo paso, la bomba aumenta nuevamente la presión del fluido en fase líquida y lo introduce en la caldera volviéndolo vapor nuevamente y de esa manera cerrando de esta manera el ciclo. Este ciclo se puede apreciar en la siguiente figura.



<http://www.textoscientificos.com/fisica/termodinamica/maquinas-vapor>

En los diagramas Presión-Volumen y Temperatura-Entropía, el ciclo de Rankine está descrito en la siguiente figura.



<http://www.textoscientificos.com/fisica/termodinamica/maquinas-vapor>

El agua es calentado (punto A) hasta convertirlo en vapor sobresaturado (punto B), luego es introducido a la turbina donde sufre una caída de presión hasta el punto C y pasa al condensador hasta convertirse en líquido nuevamente y ser comprimido por la bomba hasta el punto E. En el tramo de A a B, es donde se utiliza como fuente de calor ya sea la biomasa o la energía geotérmica. En el tramo C a D, es necesario evacuar el calor de la condensación. Muchas veces este calor es reutilizado para nuevamente generar vapor en

una segunda turbina y de esta forma obtener más electricidad. A este proceso se le denomina ciclo combinado. Cuando el calor del tramo C a D es utilizado para otros procesos térmicos (calefacción, refrigeración por ejemplo) se tiene un proceso de cogeneración.

15. FACTOR DE PLANTA

Se define como el factor de planta la siguiente relación entre la energía real generada durante un lapso de tiempo, por lo general, un año y la energía que debió haber generado si trabajaba a plena carga. La siguiente expresión muestra el factor de planta de cualquier generadora:

$$F_p = \text{Energía real producida} / (\text{potencia efectiva} * 8760) \quad ()$$

Si suponemos que un equipo de generación eléctrica tiene una potencia efectiva de 500 kW, durante un año, este equipo debía haber producido a plena carga 4.380.000 kWh. Sin embargo, si sólo ha producido 2.000.000 kWh, el factor de planta sería $2.000.000/4.380.000 = 0,45$. Es decir que el factor de planta es del 45%.

A continuación se muestran los factores de planta típicos para diferentes energías tanto alternativas como convencionales:

Parque eólico:	20-40%.
Panel fotovoltaico:	10-15%.
Central hidroeléctrica:	60%.
Central nuclear:	60%-98%.
Central termoeléctrica a carbón:	70-90%.
Central de ciclo combinado:	60%

Otras causas que provocan que disminuya el factor de planta son las siguientes:

1. Las operaciones de mantenimiento, los fallos más o menos largos de equipamientos, etc.
2. La ausencia de demanda de electricidad que obliga a los administradores de red a disminuir o parar la producción en algunas unidades.
3. La intermitencia o irregularidad de la fuente de energía como es, por ejemplo, el caso de la energía solar o la energía eólica, respectivamente.

4. Las pérdidas debidas a equipos eléctricos como inversores AC/DC, líneas de transmisión internas, etc. Otras pérdidas debidas por ejemplo a sombras en el caso de energía solar.

El factor de planta tiene varias implicaciones sobre todo en los costos y por ende en las inversiones. A mayor factor de planta, la energía generada será más costosa y viceversa, a mayor factor de planta, la energía generada será menos costosa.

De forma general, los diseños de las plantas de generación con energías alternativas estiman el valor del factor de planta sobre la experiencia y datos históricos de otras plantas similares. Por lo tanto, el factor de planta se convierte en un parámetro de diseño. Sobre la base de ello, la ecuación () puede escribirse de la siguiente forma:

$$\text{Energía producida} = F_p * \text{Potencia efectiva} * 8760$$

Pero a su vez, ahora sabemos que la Potencia efectiva está relacionada con la fuente de energía renovable a través de la ecuación (). Por lo tanto,

$$\text{Energía producida} = F_p * \text{COP} * \text{Fuente Renovable} * 8760$$

Se observa que la energía producida proveniente de cualquier Fuente Renovable depende del Factor de Planta (F_p) y del Coeficiente de Operación (COP). Como se dijo anteriormente, ambos factores son menores a la unidad y su producto también es menor a la unidad.

16. NORMAS TECNICAS DE INTERCONECION A LA RED

Las fuentes renovables intermitentes como la energía solar y eólica para conectarse a la red eléctrica deben cumplir con algunos requerimientos técnicos. Es importante señalar que la red eléctrica interconectada debe ser confiable (evitar interrupciones) y mantener una calidad del servicio según las normas establecidas (pequeñas variaciones de tensión y de frecuencia).

Los requerimientos técnicos están establecidos en la norma IEEE 1547, en la cual se establecen de forma general las siguientes condiciones:

- La frecuencia de la tensión y de la corriente que proporciona un sistema fotovoltaico o eólico debe ajustarse a la frecuencia de la red. En este caso, los equipos electrónicos que se utilizan en los generadores fotovoltaicos o eólicos

deben ser capaces de lograr esta condición. En realidad los inversores de corriente deben ser gobernados por la frecuencia de la red.

- Las intermitencias en la producción de electricidad de los generadores no deben introducir armónicos o señales que perturben la red. Esto significa que las intermitencias deben ser amortiguadas por filtros que detengan la producción de perturbaciones electromagnéticas, cuando se producen variaciones muy cortas y rápidas.
- Los generadores eólicos y fotovoltaicos deben desconectarse automáticamente si en la red no existe tensión. Esto significa que no pueden funcionar en modo “isla”, es decir, proporcionar electricidad a la red cuando ésta ha sufrido una interrupción.

17. ASPECTOS ECONOMICOS Y FINANCIEROS

17.1. PRECIO DEL kWh SEGÚN TECNOLOGIA

En el siguiente cuadro se muestran los precios de la electricidad para cuatro plantas de generación de electricidad así como sus principales características.

PARAMETROS	UNIDADES	SOLAR	EOLICA	MCH PASADA	GEOTERMIA
Potencia nominal	kW	1.000,0	2.000,0	30.000,0	45.000,0
Factor de Planta	%	30,0	35,0	56,0	80,0
COP	%	15,0	40,0	92,0	12,0
Inversión	US\$/kW	6.250,0	2.400,0	3.500,0	4.200,0
O&M	US\$/kW/año	40,0	49,0	85,0	0,14
Costo Electricidad	cUS\$/kWh	36,0	12,1	8,3	10,1

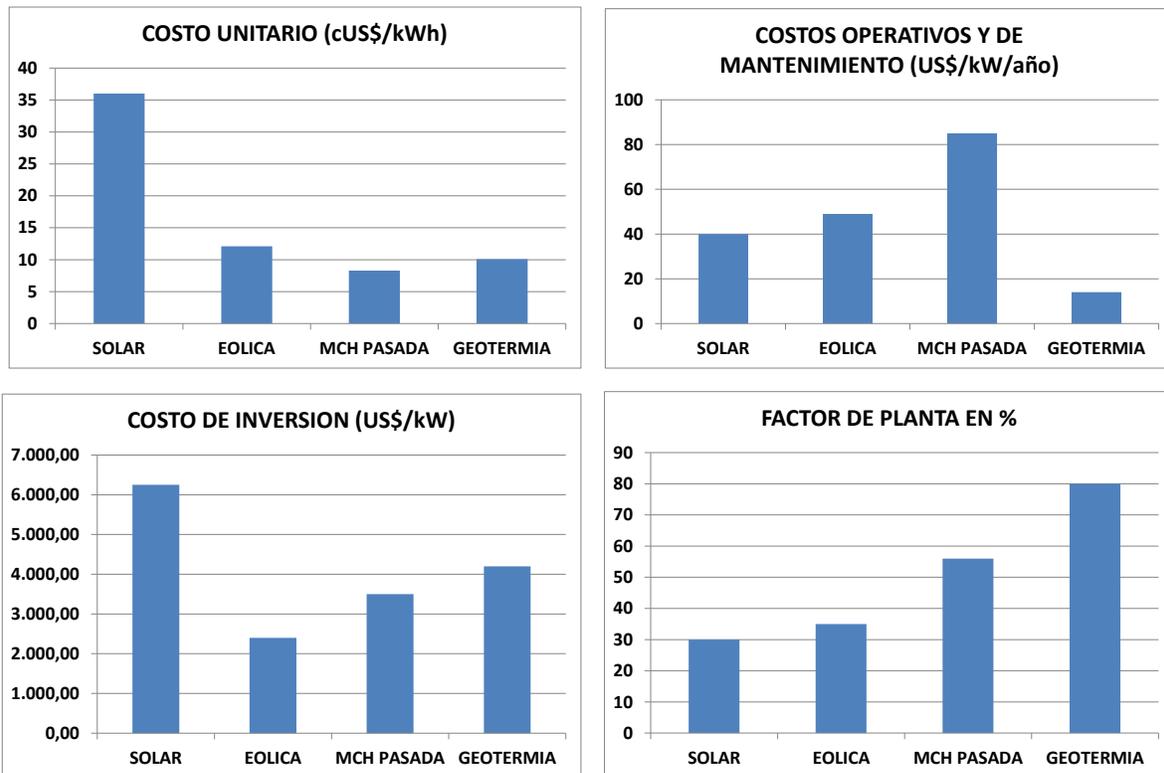
Fuente: Elaboración propia en base a diferentes datos referidos a 2011.

Las cuatro plantas se encuentran dentro de la Unión Europea, ello con la finalidad de poder hacer comparaciones entre los diferentes precios. Principalmente, los costos de operación y mantenimiento varían bastante de país a país, sin embargo, al tratarse de la Unión Europea estas diferencias no extremadamente son notorias.

Por otra parte, estos datos muy probablemente varíen a la fecha (2014) si estas plantas se hubieran instalado en la actualidad. Son plantas que tienen ya varios años de funcionamiento. La planta solar, instalada en España tiene ya casi 8 años y por ello, el costo del kW instalado es todavía alto, alrededor de 6.250 dólares americanos y la planta geotérmica alrededor de 12 años.

En los gráficos que se muestran abajo se puede constatar lo siguiente. A mayores costos de inversión, menores costos de operación y de mantenimiento, y a menores valores del

Factor de Planta mayores costos de la energía eléctrica resultante. Se puede observar que la planta solar y la planta eólica tienen el más bajo valor del Factor de Planta Fp, ello debido a su intermitencia. En el caso solar, la intermitencia viene dada no solamente por el ciclo día versus noche, sino también por las condiciones meteorológicas entre días despejados y días nublados. En el caso eólico, la intermitencia está determinada por el régimen de viento o su distribución estadística en largos periodos de tiempo.



FUENTE: Elaboración propia

17.2. COSTOS

De forma general, para calcular los costos de la energía producida se recurre a la siguiente expresión:

$$C.G. \left[\frac{US\$}{MWh} \right] = \frac{\sum_{i=0}^n \frac{I_i + CC_i + O\&M_i}{(1+r)^i}}{\sum_{i=0}^n \frac{E_i}{(1+r)^i}}$$

Donde:

- I_i = Costo inversión en el año i [US\$]

- CC_i = Costo Ciclo de Combustible en el año i [US\$]
- $O\&M_i$ = Costo de mantención y operación en el año i [US\$]
- E_i = Energía Generada en el año i [MWh]
- n = vida útil más el tiempo de construcción [Años]
- r = tasa de descuento
- C.G. = Costo de la electricidad (Levelized Cost Of Electricity)

Si se aplica la ecuación anterior al caso de las energías renovables, fijando n y r como constantes, podemos constatar lo siguiente:

- CC_i es cero para las energías renovables como el sol, el viento o el agua, lo cual reduce el costo de la electricidad.
- $O\&M_i$ tiene un valor muy bajo, por lo general un porcentaje de li (entre 3 a 5%), lo cual también reduce el costo de la electricidad.
- li en cambio tiene un valor bastante alto como se vio anteriormente en Cuadro (), aspecto que impacta en un incremento del costo de la electricidad.
- E_i es la energía generada y que como se vio anteriormente depende de los valores F_p y COP respectivamente. Cuanto más bajo sean estos valores, el costo de la unidad de electricidad se incrementará.

Entonces en la expresión () existen tres factores que empujan los costos hacia arriba, los cuales son la inversión, el Factor de Planta (F_p) y el Coeficiente de Operación (COP).

Los costos de inversión se irán reduciendo en la medida que la industria pueda producir más equipos, utilizando economías de escala. De esta forma el precio final del kilovatio será cada vez más bajo.

Para mejorar el COP es necesario que se recurra a una mejora de la tecnología construyendo equipos más eficientes que transformen las fuentes alternativas en potencia efectiva. Esto se logra reduciendo las pérdidas en el proceso de transformación. Al mejorar el COP los costos unitarios de la electricidad también se reducen.

En relación al factor de planta F_p , ya que es una variable que también depende de la demanda, una forma de incrementar su valor es promover el uso más eficiente de la

electricidad y el resultado final será una reducción de los costos de la electricidad a partir de las fuentes alternativas.

Por lo general, los países europeos, los Estados Unidos y Canadá se han trazado como políticas estos tres ejes temáticos: i) incentivar la producción de equipos de energía alternativa, incrementando su demanda, ii) establecer centros de investigación y desarrollo de estas fuentes energéticas⁴ y iii) modificar el patrón de la demanda de electricidad y haciendo que su uso sea más eficiente (aplanar la curva de carga, utilizar focos y equipos que ahorran electricidad, trasladar cargas a horas en la cuales la electricidad es más barata, etc.).

17.3. INCENTIVOS REGULATORIOS Y MECANISMOS DE PROMOCIÓN

Durante los últimos 20 años, se han implementado en varias partes del mundo, mecanismos financieros y regulatorios que incentiven la utilización de las fuentes renovables. Principalmente los Estados Unidos, Canadá y la Unión Europea, principalmente Alemania y España, han lanzado programas nacionales fijando metas concretas de participación de las energías alternativas en la matriz energética de estos países.

La principal motivación para que los países desarrollados inicien programas de utilización y aplicación de las energías renovables se basa en los acuerdos globales sobre el cambio climático. La necesidad de reducir las emisiones de los gases de efecto invernadero ya sea por acuerdos globales como el Protocolo de Kyoto o por políticas internas nacionales ha facilitado en cierta manera el avance que actualmente se muestra en varios países sobre la participación de las energías alternativas en la provisión de energía.

La Unión Europea tiene como objetivo para el año 2020 la reducción del 20% de las emisiones de CO₂ en el sector energético y alcanzar el 28% de participación de las fuentes renovables en la matriz energética. Solo Alemania se ha propuesto reemplazar la energía fósil por energía renovable: 35% hasta el 2020, 50% hasta el 2035 y 80% hasta el 2050. A eso se suma el hecho de apagar todas las centrales nucleares hasta el año 2022⁵.

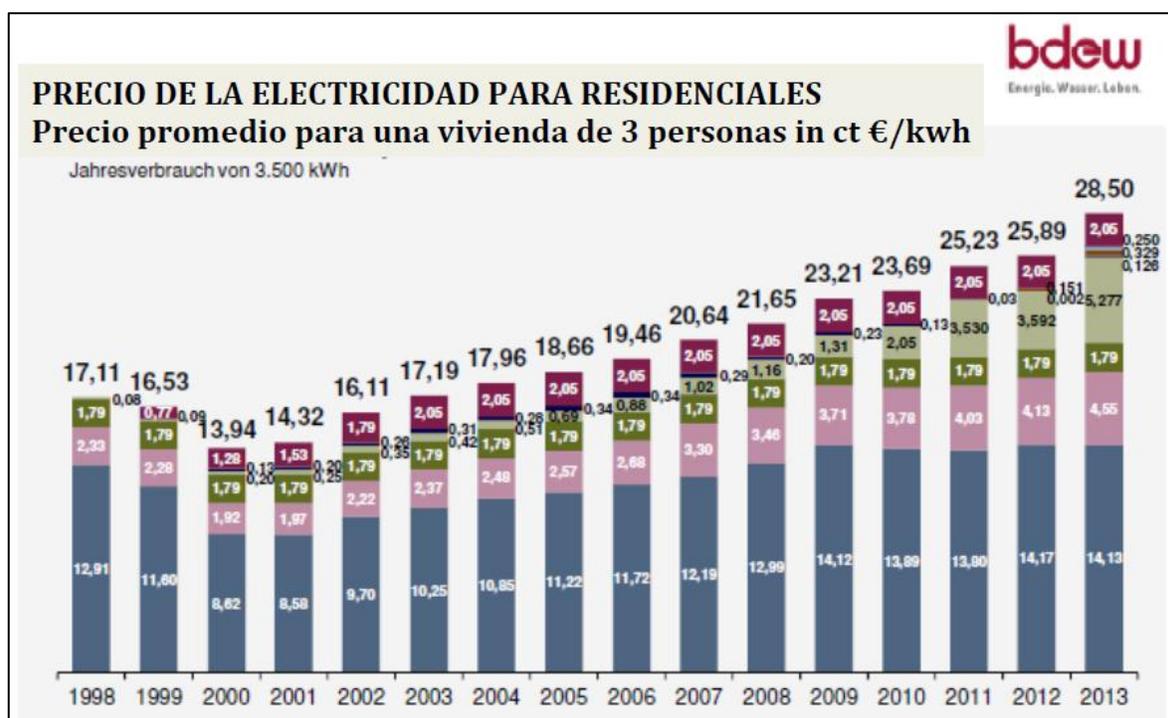
⁴ Ver por ejemplo: National Renewable Energy Laboratory (www.nrel.gov)

⁵ Ley de Energías Renovables (EEG) del año 2000 y reformada el año 2009. Objetivo: proteger el clima y el medio ambiente a través de un suministro energético que mitigue el uso de los recursos fósiles e incentive el desarrollo de las energías renovables. Ventajas: fuertes incentivos a los inversionistas, acceso a la red y tarifas aseguradas.

Esto significa que los grupos empresariales del sector energético, sobre todo europeo, responden a los incentivos de política estatal. Entre los principales grupos de inversionistas europeos se encuentran Enel Green Power (Italia), Aciona Energy (España), E-ON (Alemania), Electricité de France – EDF (Francia), RWE Innogy (Holanda), TEPCO (Japón). Estas empresas son las que poseen las principales centrales eólicas, solares y de biomasa en Europa y son las que han realizado las más grandes inversiones en fuentes alternativas.

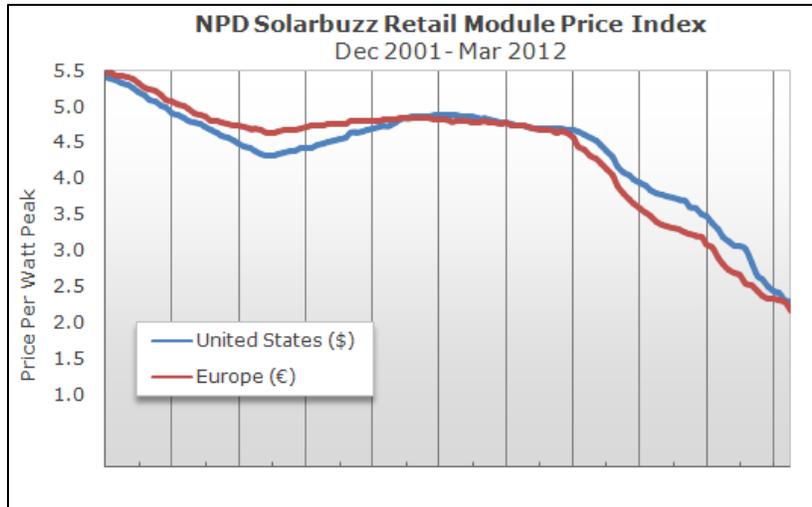
17.4. EL PRINCIPAL INCENTIVO: EL PRECIO

En la Figura más abajo se puede apreciar la evolución del precio de la electricidad en Alemania para los consumidores residenciales. En el año 2000, el precio del kWh se encontraba en 13,94 centavos de Euro hasta colocarse en 28,50 centavos de Euro en el año 2013. Los precios (corrientes) subieron anualmente un 7%.



FUENTE: http://figas.org/v4/wp-content/uploads/2013/11/14Carlos_Pelaez_FIGAS-2013.pdf

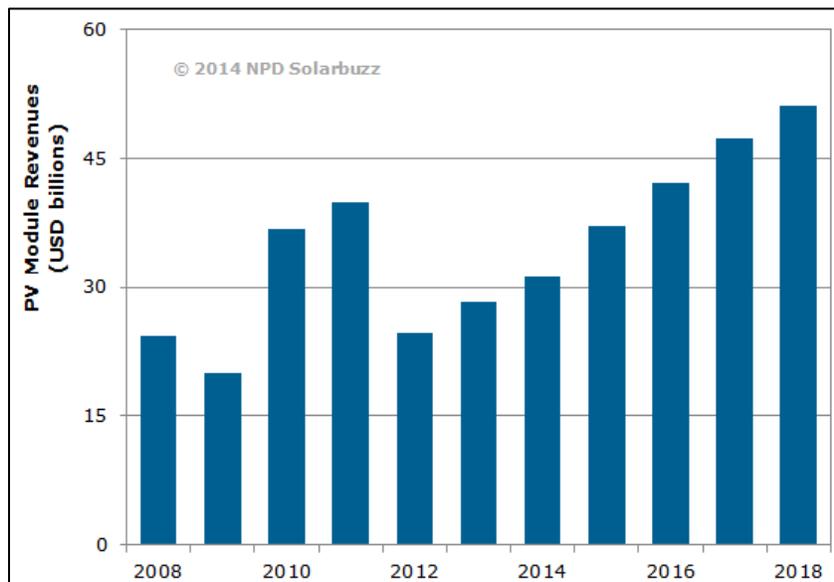
Por otro lado, el precio de los módulos fotovoltaicos por ejemplo ha venido sufriendo un descenso constante desde el año 2001 a marzo de 2012 como se muestra en la siguiente figura. El precio del Wpico de un módulo fotovoltaico a precio de detalle se redujo de 5,5 dólares americanos a 2,3 dólares americanos, lo que significa una reducción del 12% anual.



FUENTE: <http://www.solarbuzz.com/facts-and-figures/retail-price-environment/module-prices>

Se espera entonces que en algún momento ambas curvas puedan cruzarse y a partir de ese momento, los precios de la electricidad se estabilicen a medida que los combustibles fósiles para generar electricidad vayan siendo sustituidos por las energías alternativas.

La industria de los módulos fotovoltaicos presenta importantes ingresos anuales (del orden de los 30.000 millones de dólares) los cuales se muestran en la figura de abajo. Si bien entre los años 2011 y 2012 ha existido una reducción de estos ingresos debido principalmente a las crisis financieras de los Estados Unidos y de Europa, se aprecia que aún existe una tendencia de crecimiento hasta el año 2018.



FUENTE: <http://www.solarbuzz.com/news/recent-findings/solar-pv-industry-targets-100-gw-annual-deployment-2018-according-npd-solarbuzz>

17.5. DESARROLLO DE MERCADOS

De forma general se han implementado dos grandes mecanismos para incentivar el desarrollo del mercado de las energías renovables y que pueden ser clasificados como: los mecanismos voluntarios y los mecanismos mandatorios.

17.5.1. MECANISMOS VOLUNTARIOS

Los mecanismos voluntarios son aquellos en los cuales, importantes industrias o comercios que tienen imposiciones medioambientales porque contaminan al producir bienes y servicios, deciden contribuir con la conservación del medio ambiente a través del sector energético consumiendo “energía verde” como una forma de compensación.

Para ello, deciden pagar “un poco más” por la energía que consumen si ésta proviene de una fuente renovable o alternativa. Esto obliga a que las empresas distribuidoras de electricidad integren en su oferta una cierta cantidad de energía proveniente de las fuentes alternativas. Para ello dichas empresas deben generar por cuenta propia una cierta cantidad de “energía verde” o comprarla de otros “generadores verdes”.

Esto no siempre es posible para las empresas eléctricas encontrarse en estas situaciones y entonces buscan otras alternativas como la de comprar bonos o certificados de energía renovable que son transados en el mercado eléctrico y que sirven para incentivar la producción de dicha energía y que son vendidos a los demandantes de energía. Se puede observar que al final es el consumidor voluntario quien financia la producción de “energía verde”.

Las compañías de distribución de electricidad han desarrollado varios “productos” para vender de forma voluntaria electricidad proveniente de las fuentes renovables. Por ejemplo, entre los principales productos se encuentran los siguientes:

- Venta de una cantidad fija de kWh por mes a un precio también fijo y estable en el largo plazo. Si el consumidor sobrepasa el consumo fijado, pagará por el excedente al precio que corresponda, el cual puede ser más bajo o más alto que el de su contrato, y si el consumidor tiene un excedente no consumido, éste puede ser aún utilizado en el siguiente mes.
- Venta de energía renovable como un porcentaje del consumo mensual. El cliente y la compañía acuerdan un contrato en el cual, un porcentaje del consumo mensual

es renovable y entonces pagado a un mejor precio. Este porcentaje puede ser el 25, 50 o 100% del consumo.

- Cargo fijo por kWh que proviene de las energías renovables. El consumidor paga un plus o premio por aquella cantidad de energía que consume y que proviene de una fuente renovable. Este cargo es fijo y estable en el largo plazo y no se encuentra indexado a las variaciones de los precios de los combustibles fósiles.
- Contrato por potencia máxima y fija en kW. El consumidor contrata la energía a consumir por una potencia determinada en el mes como máxima demanda de energía renovable, por ejemplo, 200 W, y solo requiere de un limitador de potencia.

Todos estos productos se han venido desarrollando en el mercado voluntario y, efectivamente han promovido una mayor participación de las energías alternativas en la oferta de electricidad. Sin embargo, los mecanismos de control para que estas transacciones sean transparentes y confiables han requerido que se establezcan mecanismos regulatorios algo más complejos y que hacen referencia principalmente a la contabilidad de los balances de energía y de los balances financieros de las empresas eléctricas.

Para ello, se han diseñado e implementado programas en los cuales, los consumidores no participantes no se encuentren afectados por la existencia de posibles subsidios cruzados con los consumidores participantes.

Otros mecanismos más complejos también han sido implementados, sobre todo en los países como Estados Unidos y Canadá para promover el uso de las fuentes energéticas renovables. Uno de estos mecanismos es la emisión de Certificados de Energía Renovable (CER) por parte de los generadores de este tipo de energía. Al producir un kWh en una central de eólica, solar o geotérmica, al mismo tiempo este generador está emitiendo un CER el cual puede ser transado o vendido en el mercado.

Este mecanismo trabaja de la misma forma que los certificados de bonos de carbono y existen empresas dedicadas a la transacción de este producto como también entidades estatales que controlan la validez de dichos certificados.

En los Estados Unidos y en Canadá, estos certificados no pueden ser transados en el exterior y esto hace parte de las políticas ambientales de estos dos países, a diferencia de

las políticas ambientales de Europa y Japón⁶ que son globales y pueden transarse en varios mercados internacionales.

La Unión Europea y el Japón, y en cierta medida también los Estados Unidos, han desarrollado mecanismos como el “saldo neto” de energía (net metering), como una forma de incentivar la producción de energía eléctrica a partir de una fuente renovable, principalmente la solar.

El mecanismo es bastante sencillo y consiste en que un consumidor pueda generar su propia energía con una fuente renovable en su domicilio o empresa y consumir lo que autoproduce. En caso de déficit, el consumidor toma energía de la red y este déficit es facturado de forma normal, en caso de excedente o de exportación a la red, existe un saldo de energía a favor del consumidor el cual podrá ser utilizado en el siguiente mes. Este mecanismo utiliza un medidor que va en ambos sentidos, dando lugar a un “saldo neto” que unas veces es a favor del consumidor y otras en favor de la empresa distribuidora.

La inversión del equipo generador, por lo general un panel solar acoplado a un inversor el cual cumple varios requisitos en cuanto a protecciones y coordinación con la red, es efectuada por el propio consumidor. Esta inversión hace parte de un programa y goza de varios incentivos: crédito a baja tasa de interés y largo plazo, reducción en el pago de impuestos locales o nacionales, un subsidio aplicado directamente a la inversión, asistencia técnica por parte de la empresa eléctrica.

En varias regiones tropicales, a medida que el sol asciende y se incrementa la temperatura, crece la demanda de aire acondicionado y los paneles solares logran en parte mitigar esta demanda, aspecto que le es beneficioso a la empresa eléctrica que ya tiene que comprar menos energía para atender esta demanda.

17.5.2. MECANISMOS MANDATORIOS

Los mecanismos mandatorios son aquellos que se establecen como resultado de las políticas nacionales o regionales que se han traducido en leyes. Por lo general, estas leyes fijan metas de participación de las energías renovables en la matriz energética

⁶ Es importante remarcar que Estados Unidos ha generado un mercado interno para sus propios bonos de carbono y con ello para sus propios certificados de energías renovables. Ambos valores no se transan en los mercados internacionales. La política americana en relación al medio ambiente es altamente proteccionista. Esto ha permitido un acelerado desarrollo de las fuentes renovables en este país.

nacional y muchas veces, resultan ser cupos de cumplimiento para las empresas eléctricas.

Por otra parte, estas leyes generan condiciones para que determinadas fuentes renovables sean elegibles, como por ejemplo, la energía hidroeléctrica, el ciclo combinado o la cogeneración a partir del gas natural.

Finalmente, imponen obligaciones a las empresas eléctricas como generar una fracción de su demanda con energías alternativas o facilitar el acceso y el despacho preferente a estas fuentes energéticas.

Bajo este esquema, existen dos mecanismos para incentivar la producción de energía alternativa. Los generadores de electricidad con fuentes alternativas, al mismo tiempo de producir un kWh, emiten certificados de energías renovables, los cuales son recolectados por empresas intermediarias y autorizadas en la colocación de estos certificados. Las compañías de electricidad (de distribución) que están obligadas a suministrar una fracción de su demanda con energías alternativas compran dichos certificados y los presentan a la autoridad regulatoria como muestra de cumplimiento de la obligación contraída. La empresa intermediaria percibe una comisión por la transacción y transfiere los recursos obtenidos al generador de electricidad.

Este mecanismo presenta una ventaja, los certificados de energías renovables deben competir y es claro que se venden más aquellos que son más baratos. Es un mecanismo de mercado basado principalmente en la participación privada. Esto ha permitido un rápido desarrollo de las energías alternativas en el Reino Unido, Holanda y otros países como los Estados Unidos y Canadá.

El segundo mecanismo es la promoción de la generación distribuida, bajo el cual, un hogar, una fábrica o cualquier consumidor decide generar hasta un máximo de potencia (por ejemplo 10 kW) ya sea con energía solar u otra fuente renovable. Toda su producción es vendida a la red eléctrica a un precio fijo con el cual, este generador pueda pagar su inversión y contar con una ganancia correspondiente. La empresa eléctrica de distribución está obligada a comprar toda la producción y presentar los comprobantes de compra como prueba de cumplimiento de las obligaciones de suministrar una fracción de su demanda con energías renovables.

La empresa eléctrica para poder pagar a las energías renovables “algo más”, debe transferir este “plus” a todos los consumidores que están bajo su área de operación. Esto

significa que poco a poco se va incrementando el precio promedio de la electricidad. A medida que más energía renovable es producida y vendida a la red, los precios promedio van subiendo. A este mecanismo se lo denomina “feed in tariff” (tarifa con premio).

Este mecanismo presenta desventajas y desventajas. Por ejemplo, el precio de compra de la energía alternativa está fijado de antemano independientemente de la eficiencia de la generación, y por lo tanto puede que dicho precio no refleje los costos.

La ventaja de este mecanismo es incentivar la generación de electricidad a pequeña escala. Los consumidores domiciliarios que deciden invertir en un generador renovable, por lo general, fotovoltaico, lo instalan en el techo de su hogar y luego lo conectan a la red bajo normas específicas. Estos consumidores a su vez gozan de algunas ventajas como créditos con bajas tasas de interés o créditos fiscales a su favor o subsidios directos.

17.6. FONDOS DE FINANCIAMIENTO

Los fondos de financiamiento también son un mecanismo para incentivar el uso de las energías alternativas. Estos recursos sirven para desarrollar proyectos o para vencer barreras que impiden el desarrollo de las fuentes alternativas.

Una forma de alimentar estos fondos es a través de un cargo al consumo de electricidad, por lo general, correspondiente a una milésima parte del precio del kWh consumido.

Esta forma de recolectar recursos para el fondo puede asegurarle una larga vida. En otras ocasiones, el propio gobierno nacional o local, aporta recursos a estos fondos para fines específicos y modalidades de gasto o asignación de recursos ya predeterminados. Estos recursos sirven por lo general para comprar energía alternativa bajo contratos de largo plazo, así como también para otorgar préstamos o subsidios.

Cada año, en muchos casos, estos fondos son subastados entre diversos generadores de fuentes alternativas con la finalidad de establecer contratos de largo plazo y sirven para cubrir la diferencia entre los precios de mercado y los precios resultantes de la generación eléctrica con una fuente alternativa. La ventaja de la subasta de estos recursos radica en que anticipa la cantidad energía renovable que puede ser introducida al sistema ya que los recursos son limitados.

En la mayoría de los países que han optado por establecer fondos para las fuentes renovables, éstos son administrados por los respectivos gobiernos, ya sean nacionales o locales y son efectivamente un instrumento muy poderoso para la implementación de políticas energéticas orientadas a las fuentes renovables.

El rol del regulador es predominante porque es la entidad responsable de determinar los precios de generación con energías renovables y comparar con los precios que el mercado ofrece para con estos datos determinar el subsidio correspondiente.

18. REGULACION DE LAS ENERGIAS RENOVABLES EN BOLIVIA

La Ley de Electricidad N° 1604 señala que las empresas distribuidoras pueden generar hasta el 20% de su demanda máxima con fuentes renovables. Esta es la única referencia explícita en esta ley sobre las fuentes renovables o alternativas.

La reforma del sector eléctrico de 1994 no tomó en cuenta dos aspectos fundamentales en el desarrollo del sector eléctrico: la población que no poseía aún el servicio de electricidad y la provisión de electricidad a partir de estas fuentes energéticas.

Por esta razón, la regulación de las energías renovables o alternativas en Bolivia es un campo nuevo a desarrollar, con la ventaja de contar con muchas experiencias a nivel internacional sobre este tema. El despacho preferente, los tipos de remuneración que se pueden implementar, los subsidios de los que pueden sujetos y la participación del Estado en las inversiones son temas que deberán ser desarrollados en el corto plazo para contar con un marco normativo que permita la introducción de las fuentes alternativas en la matriz energética.

Sin embargo es necesario fijar objetivos de política energética para los cuales las energías alternativas son un medio que facilitan el logro de dichos objetivos.

Entre dichos objetivos se encuentran por ejemplo la seguridad energética, la independencia de los precios internacionales, la mitigación de los efectos negativos sobre el medio ambiente, la universalización del acceso al servicio de electricidad.

La contribución de las fuentes energéticas alternativas a estos objetivos es bastante evidente. Si una porción importante de la energía eléctrica a generarse proviene de las fuentes alternativas localmente disponibles, el shock por fluctuación de los precios internacionales puede ser amortiguado. Por otra parte, los efectos de la generación eléctrica sobre el medio ambiente serían mitigados en una proporción considerable y finalmente, las energías alternativas han demostrado ser una alternativa para la provisión de electricidad en zonas aisladas y remotas.

18.1. LAS POLITICAS PARA LAS ENERGIAS ALTERNATIVAS.

Las políticas nacionales para las energías alternativas se encuentran plasmadas en dos documentos del Ministerio de Hidrocarburos y Energía. Uno de ellos está referido al Diagnóstico General para la Elaboración del Plan Estratégico de Desarrollo de las Energías Alternativas en Bolivia (2012-2020)⁷ y en Políticas de Energías Alternativas para el Sector Eléctrico del Estado Plurinacional de Bolivia⁸.

En el documento sobre Políticas de Energías Alternativas se hace referencia los principios de la política energética los cuales son los siguientes: soberanía energética (propiedad de los energéticos), seguridad energética (autosuficiencia e independencia energética), universalización del servicio (acceso universal), eficiencia energética (incremento del PIB por cada unidad de energía consumida), industrialización (valor agregado de los recursos energéticos), integración energética (participación en mercados internacionales), fortalecimiento institucional (reestructuración del sector, principalmente de las empresas públicas).

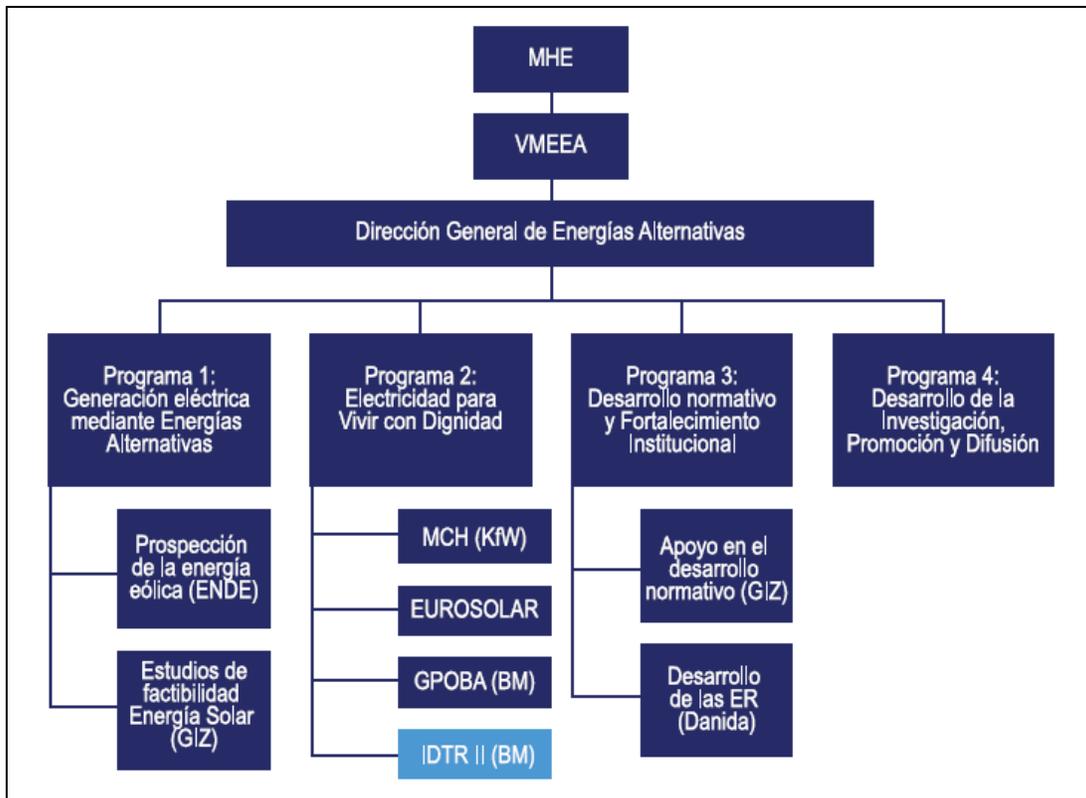
Las energías alternativas contribuyen directamente con los siguientes principios: soberanía energética, seguridad energética, universalización del servicio y eficiencia energética.

Para que esta contribución sea efectiva, se han propuesto algunos objetivos intermedios, entre ellos, contar con un marco normativo para las energías alternativas (actualmente en elaboración), desarrollar y fomentar aplicaciones de las energías alternativas, desarrollar programas específicos de energías alternativas, establecer un fondo de financiamiento que promueva sus aplicaciones.

A partir de estos objetivos intermedios se ha diseñado cuatro programas: generación de electricidad en el Sistema Interconectado Nacional (SIN) y en los Sistemas Aislados, Acceso Universal con energías alternativas, desarrollo normativo, desarrollo de la investigación y capacitación en energías alternativas.

⁷ Ministerio de Hidrocarburos y Energía. 2012. La Paz, Bolivia.

⁸ Ministerio de Hidrocarburos y Energía. 2011. La Paz, Bolivia.



FUENTE: POLITICAS DE ENERGIAS ALTERNATIVAS. MHE. 2011

En relación al primer programa, se ha puesto como meta hasta el 2025, que al menos un 10% de la demanda máxima del SIN sea suministrada con energía alternativa (solar, eólica, hidroelectricidad de menos de 2 MW y biomasa). También contempla la posibilidad de exportación de una de las fuentes alternativas más importante disponible en la oferta energética nacional como es la energía geotérmica.

18.2. INTRODUCCIÓN DE LAS ENERGIAS ALTERNATIVAS

En Bolivia existen varias posibilidades para la introducción de las energías alternativas. Entre las más importantes se encuentran: los proyectos de generación conectados al SIN a un nodo de retiro. En este caso, el precio básico que se pagará es el precio de nodo correspondiente más un incentivo que cubra la diferencia.

La generación distribuida a partir de desechos orgánicos (vertederos o lagunas de estabilización). En este caso la empresa distribuidora debería permitir el acceso a su red y al mismo tiempo comprar esta energía. Los precios a los cuales se produce esta transacción deberán estar regulados para determinar el correspondiente incentivo en caso de ser necesario. SAGUAPAC tiene un proyecto de generación de electricidad a partir del

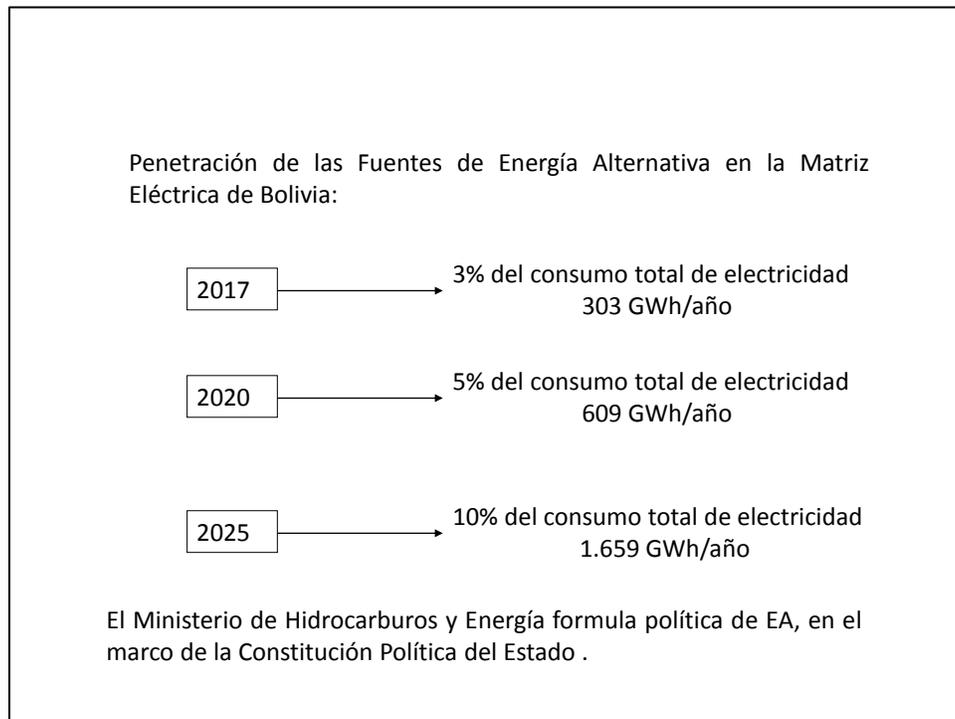
metano producido en las lagunas de estabilización, esta electricidad debería ser comprada por la CRE y hacer parte del programa de incentivos del gobierno.

Otra forma de incentivar las energías alternativas es promover el autoconsumo aún estando conectados a la red o lo que se denominó “saldo neto” o “net metering” en baja tensión. En caso de producir excedentes que son exportados a la red, el precio de energía deberá estar valuada en base a los “costos evitados” por la empresa distribuidora.

Finalmente se encuentra la generación de electricidad para pequeñas redes eléctricas con la finalidad de desplazar parcialmente la generación con diesel. Este tipo de proyectos tienen la ventaja de tener precios que son equivalentes al precio de importación del diesel (sin subsidio) y por lo tanto traer beneficios directos tanto al estado como a los consumidores.

18.3. LA NUEVA LEY DE ENERGIAS RENOVABLES

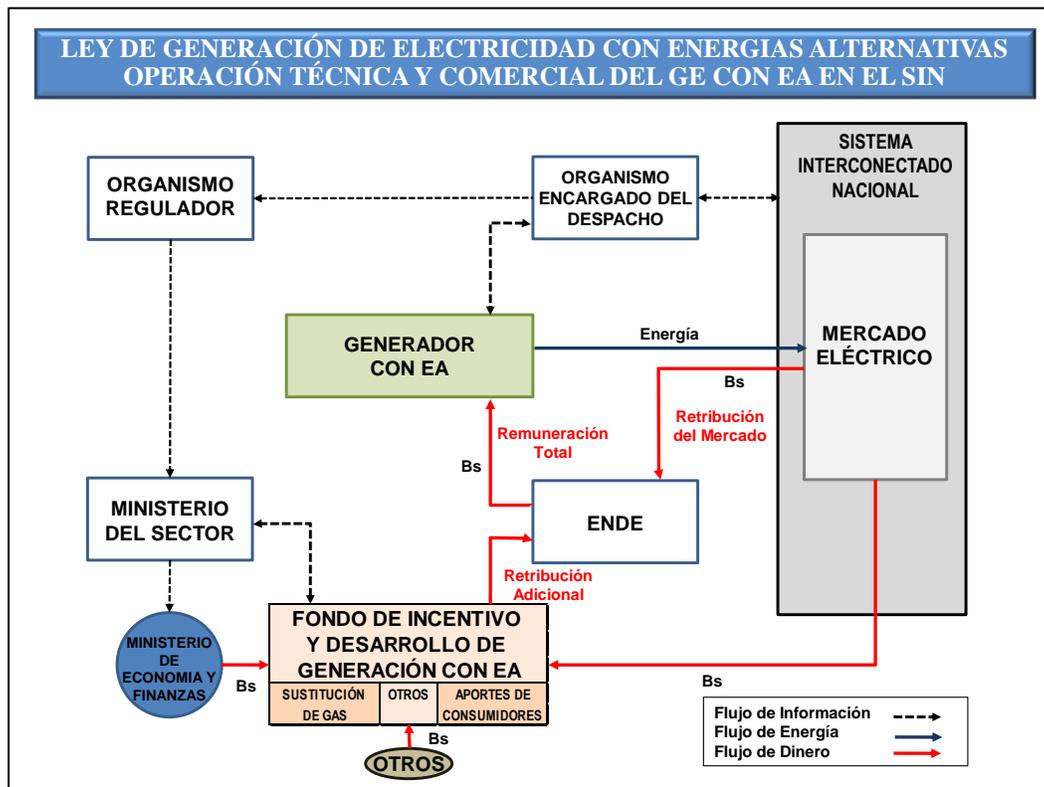
La propuesta de ley de Energías Alternativas ha propuesto que hasta el año 2025 la producción de electricidad con estas fuentes alcance el 10% del consumo a esa fecha. Ello significa que alrededor de 1.600 GWh deben provenir de las fuentes alternativas. En el siguiente cuadro se muestra la propuesta de evolución para alcanzar la meta fijada.



FUENTE: Presentación de la nueva ley de Energías Alternativas, 27/2/2014

El corazón de la nueva ley de Energías Alternativas es la generación de un fondo de Incentivo y desarrollo de la generación de electricidad con energías alternativas.

Este fondo se alimenta de tres fuentes: un aporte de los consumidores (puede provenir de las categorías comercial, industrial, consumidores no regulados) que presentan niveles de consumo a partir de una cierta cantidad mensual, un aporte del Ministerio de Economía y Finanzas proveniente de la exportación de gas natural por efecto de su sustitución en el sector eléctrico y “otros” por lo general provenientes de donaciones de la cooperación internacional.



FUENTE: Presentación de la nueva ley de Energías Alternativas, 27/2/2014

Estos recursos, de acuerdo a la futura nueva ley de electricidad, serán para retribuir a través de ENDE al generador con energía alternativa.

A diferencia de otros incentivos que se analizaron anteriormente y que fueron implementados en otros países, en el presente caso se ha optado por el establecimiento de un fondo y por una especie de “feed-in tariff” sólo para algunas categorías de consumidores. La política del actual gobierno en relación a las tarifas de la categoría domiciliaria es mantenerla prácticamente inalterable. En cambio, otro tipo de consumidores, para quienes resulta bastante barato el gas natural como los grandes

comercios, industriales y consumidores no regulados, potencialmente pueden convertirse en financiadores de las energías alternativas.

Esta situación permite que el fondo sea sostenible porque puede contar con una fuente permanente de financiamiento. Sin embargo, es necesario aún cuantificar las posibilidades reales de incrementar los precios de la energía a estos consumidores y cuantificar los montos posibles de recolección anual que permitan cubrir la meta del 10% hasta el año 2025.

Los recursos provenientes de los donantes son los más volátiles ya que dependen de muchas variables como ser las políticas del país donante, los objetivos que se quieren alcanzar con la donación y la disponibilidad de los recursos en los plazos requeridos.

Finalmente, los recursos provenientes del Tesoro General de la Nación dependerán de las decisiones que se tomen para que puedan hacerse efectivos. En principio, el gas natural que es evitado en la generación eléctrica no siempre será exportado. El mercado interno está creciendo y el consumo de gas natural en el sector industrial y transporte se halla en crecimiento. Sin embargo, aun así hay un diferencial de precios entre el precio del gas natural para generar electricidad y el precio de este combustible para otros sectores.

De acuerdo a las estimaciones del proyecto de ley de energías alternativas, el cálculo muestra que para el período 2017 a 2025, en promedio, se requieren 30,4 millones de dólares por año con el objeto de financiar el costo no cubierto de estas energías⁹ si se toma como base las metas propuestas.

⁹ Presentación ley de energías alternativas. 27 de febrero de 2014. MHE-VMEEA. La Paz-Bolivia.

ANEXOS

Páginas web recomendadas.

<http://www.unsa.edu.ar/~alejo/geosol/quees.htm>

<http://solardat.uoregon.edu/SolarRadiationBasics.html>

<http://astro.unl.edu/naap/motion3/animations/sunmotions.html> (recomendado)

<http://cer.gob.cl/tecnologias/geotermica/geotermia-de-baja-entalpia/captadores-horizontales/>

http://www.motiva.fi/myllarin_tuulivoima/windpower%20web/es/stat/betzpro.htm (página web de la industria eólica de Dinamarca)

<http://www.ohio.edu/people/womeldor/wind-ra/histograma.htm>

<http://www.solarbuzz.com/> (sobre precios y fabricantes)

www.retscreen.net/es/home.php (programas para la evaluación de las energías alternativas)

www.nrel.gov (National Renewable Energy Laboratory)

ABSORCIÓN POR UNA SUPERFICIE NEGRA PARA PRODUCIR CALOR

La radiación es absorbida por otro “cuerpo negro” (una plancha negra), la cual se calienta por efecto de dicha incidencia. En este caso tenemos la conversión de la radiación solar en calor. La plancha negra se calentará incrementando su temperatura hasta un punto de equilibrio en el cual la absorción de radiación solar iguale a las pérdidas al medio ambiente.

Esta conversión es térmica, es decir, que la radiación solar se convierte en calor. Sin embargo, no toda la radiación solar se convertirá en calor según la ecuación (4) ya que el COP es un valor menor a la unidad.

Las superficies presentan varias propiedades, muchas de ellas tienen la propiedad de absorber y emitir la misma cantidad de radiación (por ejemplo, una superficie enteramente negra) y otras, pueden absorber más y emitir poco (por ejemplo, la superficie de cobre negro denominadas superficies selectivas) y otras absorber poco y emitir mucho (por ejemplo, las superficies de aluminio utilizadas en los viajes espaciales). Estas propiedades hacen variar el valor de COP de la ecuación (4).

Para el caso de esta conversión (radiación solar en calor) se tiene la siguiente expresión:

$$\mathbf{Q_{\acute{u}til} = COP * A * G_n} \quad \mathbf{(5)}$$

Si $G_n=700 \text{ W/m}^2$, $A= 1 \text{ m}^2$ y $COP=0,65$, entonces la cantidad de calor recuperado es:

$$\mathbf{Q_{\acute{u}til} = 0,65 * 1 * 700 = 455 [W]} = \quad \mathbf{(6)}$$

Este calor va a calentar la plancha, la cual tiene una masa de 1 kg y un calor específico de $250 \text{ J/kg} \cdot ^\circ\text{K}$. Si la plancha se encontraba a temperatura ambiente (15°C), entonces se puede calcular la temperatura final de la plancha mediante la siguiente ecuación:

$$\mathbf{M * C_p * (T_{\text{final}} - T_{\text{ambiente}}) = Q_{\acute{u}til}} \quad \mathbf{(7)}$$

La temperatura final de la plancha negra será:

$$\mathbf{T_{\text{final}} = T_{\text{ambiente}} + Q_{\acute{u}til} / (M * C_p) = 15 + 455 / (1 * 250) = 16,8 \text{ } ^\circ\text{C}} \quad \mathbf{(8)}$$