# Chile, energía y desarrollo

Chile, energy and development

Fecha de entrega: 8 de diciembre 2011 Fecha de aceptación: 18 de mayo 2012

#### César Pastén

School of Civil and Environmental Engineering, Georgia Institute of Technology, Atlanta, EE.UU., cpasten@gatech.edu

El uso de diversos indicadores demuestra que el desarrollo de Chile está íntimamente asociado a su consumo energético. Esta relación se basa en el análisis de la evolución de su consumo energético primario en el contexto mundial y su impacto en indicadores de desarrollo y sostenibilidad ambiental. Los resultados en este análisis también indican una fuerte dependencia de combustibles fósiles, cuyo uso está asociado a importantes impactos ambientales. Esta situación empeorará debido al creciente uso de fuentes fósiles en la generación eléctrica y los costos asociados a sus externalidades. Para aminorar estos efectos se debe estimular principalmente el aprovechamiento de abundante energía solar y marina en el norte y sur del país, respectivamente. De esta forma, el desarrollo sostenible del país será compatible con restricciones ambientales y de abastecimiento.

Palabras clave: energía, desarrollo sostenible, índice de desarrollo humano, huella ecológica

The use of different indexes shows that the development of Chile is closely associated to the energy consumption. This relation is based on the analysis of primary energy consumption evolution within the world context and its impact on development indexes and environmental sustainability. The results in this analysis show a strong dependency on fossil fuels too, whose use is associated to important environmental impacts. This situation will be worse due to the increasing use fossil sources for electric generation and costs related to externalities. To mitigate these effects it should be encouraged mainly the harvesting of abundant solar and marine energy in the north and south of the country, respectively. In this form, a sustainable development of the country will be compatible with environmental and supplying constraints.

Keywords: energy, sustainable development, human development index, ecological fingerprint

#### Introducción

El consumo energético sostiene las actividades socioeconómicas y el desarrollo de una nación. Los países industrializados con economías de gran escala requieren abundantes cantidades de energía sólo para mantener su funcionamiento. Por otro lado, los países en vías de desarrollo requieren incrementar sus consumos energéticos para sostener su crecimiento (IEA, 2008). El tipo de energía que utiliza un país depende de los recursos naturales disponibles dentro de su territorio y las fuentes energéticas importadas, cuyo creciente consumo compromete la seguridad energética del país. En Chile, el recientemente formado Comité de Seguridad Energética reconoce que un abastecimiento seguro y confiable de energía es clave para el desarrollo económico y social del país (CNE, 2010b).

Un excesivo consumo energético puede afectar el medio ambiente. Por ejemplo, las emisiones de gases de efecto invernadero, producto del consumo de combustibles fósiles, están asociadas a un incremento sostenido de la temperatura global (IPCC, 2007). Si bien no se ha establecido fehacientemente una relación causa-efecto, la comunidad científica reconoce un desbalance de origen antropogénico. Es por esto que una de las problemáticas mundiales de mayor importancia es asegurar un suministro de energía constante manteniendo el balance de los ecosistemas. Los países desarrollados, y en menor

medida los países en vías de desarrollo, reconocen estas limitaciones y están optando por asegurar sus suministros con fuentes energéticas renovables y domésticas para no depender de bloqueos de abastecimiento y fluctuaciones de precios.

Si se compara el promedio de un periodo presidencial (4 años), el periodo entre el diseño y la puesta en marcha de una central eléctrica (del orden de 10 a 50 años dependiendo de su complejidad) y la permanencia en la atmósfera de los gases de efecto invernadero (del orden de cientos de años), se reconoce que la problemática energética tiene una fuerte discrepancia entre las escalas temporales que motivan las decisiones y los efectos que éstas provocan. En Chile, esta discrepancia se ha evidenciado debido a la discusión sobre el rechazado proyecto termoeléctrico Barrancones y los polémicos proyectos Central termoeléctrica Castilla y Central HidroAysén (Raineri y Contreras, 2010).

El crecimiento del consumo energético en Chile está asociado al crecimiento económico, por lo que se espera que la demanda por electricidad crezca a una tasa cercana al 5% anual (O'Ryan, 2008). La escasez de fuentes energéticas convencionales, tales como petróleo, carbón y gas natural, sugiere que este crecimiento debe ser compensado con un conjunto de alternativas que deben incluir, además de centrales termoeléctricas e hidroeléctricas, centrales solares, eólicas y mareomotrices, entre otras. Las energías geotérmica y nuclear tampoco deben descartarse aunque su implementación conlleva desafíos técnicos y económicos de mayor envergadura (CNEC, 2009; Morata, 2011).

Dos importantes características del territorio de Chile son su gran extensión longitudinal con acceso al mar y la presencia del desierto de Atacama. El mar representa una fuente energética que se puede explotar por medio de las mareas, las olas, las corrientes y los gradientes térmicos (Khaligh y Onar, 2010). El fácil acceso al mar desde cualquier lugar del territorio hace atractiva la explotación de este recurso y necesaria la cuantificación de su potencial (Cruz et al., 2009). De la misma forma, una gran fuente de energía solar es el desierto de Atacama (CNE, 2009). Si bien las ciudades emplazadas en esta zona representan sólo el 8% de la población del país (INE, 2003), la gran industria minera concentra sus actividades en esta área.

Por esta razón, cabe preguntar si el consumo eléctrico de estas empresas puede satisfacerse con el uso de energía solar.

Teniendo en cuenta estos antecedentes, Chile debe optar por desarrollar una matriz energética que le permita asegurar el suministro y aprovechar el potencial de las energías renovables. Al mismo tiempo, aprovechando que los niveles de consumo son menores que los de muchos países industrializados, se debe estimular la conservación energética a través de hábitos de consumo y la inserción de nuevas tecnologías. Un ejemplo de esto es la incorporación de sistemas distribuidos de generación y almacenamiento de energía renovable que no requieren la construcción de centrales y redes de distribución.

Este artículo analiza la relación entre el consumo energético y el desarrollo de las naciones, destacando el caso de Chile en el contexto mundial. Este análisis clasifica el consumo energético por fuentes, destacando sus implicaciones en la seguridad de suministro y en la generación de contaminantes. Además, se analiza el desarrollo del sector eléctrico y el potencial aporte de las energías solar, eólica y marina a la matriz energética de Chile.

# Consumo energético mundial

La tasa de consumo de energía primaria TCE [W], que corresponde al consumo de energía primaria anual E [J] dividido en el tiempo t [s], considera el uso de fuentes energéticas fósiles como petróleo, gas natural y carbón, y el uso de energías renovables como energía eólica, solar, geotérmica, hidroelectricidad y biomasa (CNE, 2010a). El consumo energético per cápita se obtiene dividiendo el consumo energético primario por el número de habitantes del país.

La tasa de consumo mundial de energía primaria el 2007 fue de 16.1 TW (TW = Tera-Watt = 10<sup>12</sup> W) (EIA, 2010). Los mayores consumidores fueron Estados Unidos, China, Rusia, Japón e India con un 52% del consumo total. El consumo per cápita de algunos de estos países se presenta en la Figura 1. Si bien el consumo total de India y China es elevado, su consumo per cápita es menor que el promedio mundial (2.4 kW/persona el 2007). El consumo promedio de Chile, en cambio, ha sido superior al promedio mundial desde el año 2000.

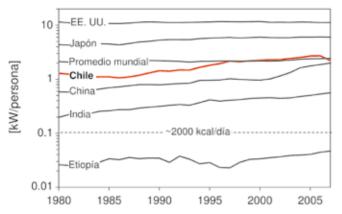


Figura 1: Tasa de consumo per cápita de energía primaria (datos de EIA, 2010)

El consumo energético está asociado al desarrollo de un país, el cual se puede estimar mediante el Indice de Desarrollo Humano IDH (PNUD, 2010). Este índice no sólo considera el ingreso bruto nacional como medida del bienestar, sino que incorpora índices referentes a salud y educación. El IDH se define a partir del 2010 como la media geométrica de los índices de esperanza de vida, de educación y del ingreso nacional bruto. El índice de educación incluye los índices de años de educación promedio y de años esperados de instrucción. La Figura 2 muestra el IDH como función de la tasa de consumo energético per cápita el 2007 y destaca la evolución de Chile, EE.UU., China e India desde 1980 hasta 2007 (UNDP, 2010a; UNDP, 2010b). Como es evidente, el nivel de desarrollo de los países es directamente proporcional a su consumo energético. El consumo mínimo de los países con altos índices de desarrollo es aproximadamente 4 kW/persona. Este valor contrasta con el bajo consumo de muchos países africanos que no supera los 100 W/persona. el equivalente a una dieta alimenticia de 2000 kcal/día (Santamarina, 2006). En el otro extremo se encuentran países como EE.UU. con una tasa de consumo de 11 kW/ persona, cuatro veces superior al promedio mundial.

La trayectoria de crecimiento de un país se puede considerar como una medida de eficiencia del uso energético. La Figura 3 muestra un detalle del índice de desarrollo humano de algunos países con tasas de consumo energético menor a 5 kW/persona. Países latinoamericanos como Uruguay y Cuba han alcanzado índices de desarrollo comparables al chileno, pero con menores incrementos de consumo. Países como Portugal e Israel, con índices

"muy altos" (superiores a 0.785) y que consumen a tasas menores que la mayoría de los países industrializados, pueden considerarse como modelos de desarrollo. Casos como el de China, con un consumo energético similar al de Chile en 1995, evidencian que un pronunciado desarrollo económico no implica necesariamente un desarrollo social en educación y salud. Chile ha experimentado un incremento sostenido de aproximadamente 0.06 puntos por kW/persona (excluyendo el año 2007). Siguiendo esta tendencia, el país podría alcanzar un índice de desarrollo "muy alto" con una tasa de consumo energético de 3.3 kW/persona, muy similar a la de Portugal (3.5 kW/persona).

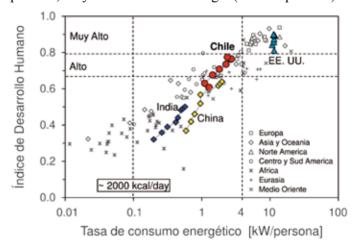


Figura 2: Consumo energético y desarrollo. La evolución de Chile, India, China y EE.UU. corresponde a los años 1980, 1985, 1990, 1995, 2000, 2005, 2006 y 2007. El resto de los países con población superior a tres millones de habitantes corresponde a datos del año 2007 (datos de EIA, 2010; UNDP 2010a; UNDP 2010b)

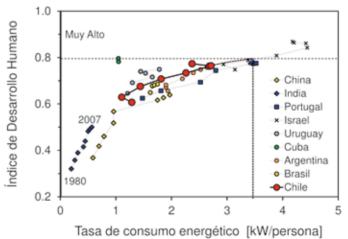


Figura 3: Consumo energético y desarrollo, Chile en el contexto mundial. La evolución de todos los países corresponde a los años 1980, 1985, 1990, 1995, 2000, 2005, 2006 y 2007 salvo Cuba solo en 2006 y 2007 (datos de EIA, 2010; UNDP 2010a; UNDP 2010b)

El Índice de Desarrollo Humano ajustado por desigualdad social *IDH-D* se publica a partir del año 2010. El *IDH* de Chile el 2010 fue 0.783, mientras que el valor ajustado por desigualdad fue 0.634. Esta pérdida global del 19% implica que el crecimiento del país se limitará si no se combate la desigualdad social (PNUD, 2010).

### Consumo energético en Chile

La evolución por fuentes de la tasa de consumo bruto de energía primaria en Chile desde 1991 hasta 2008 se muestra en la Figura 4. La figura distingue entre fuentes energéticas importadas y domésticas. La tasa de consumo total el 2008 fue de 33.2 GW, de los cuales el 71% corresponde a combustibles fósiles como petróleo, gas natural y carbón. Del total de energía, 64% corresponde a importaciones principalmente de petróleo y carbón. Estos elevados valores anticipan que problemas asociados al deterioro de relaciones con países proveedores y la escasez de recursos, como el experimentado con el gas natural durante la crisis Argentina (Kozulj, 2005), pueden afectar el suministro energético.

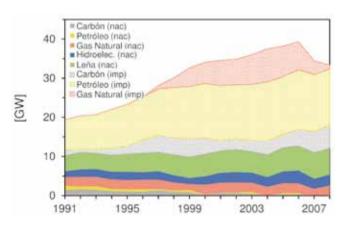


Figura 4: Tasa de consumo energético bruto primario de Chile. Fuentes energéticas nacionales (nac) e importadas (imp). El contenido calórico de la hidroelectricidad es 1 kWh/kWh<sub>e</sub> (datos de CNE, 2010a)

El flujo energético de Chile el 2008 se presenta en la Figura 5. El consumo neto de energía que se muestra es la suma del consumo bruto de energía primaria más las importaciones netas de energía secundaria (importaciones menos exportaciones). La mayoría de los productos derivados del petróleo son importaciones que se suman a las de energía primaria. El excesivo uso de fuentes energéticas importadas compromete la seguridad

energética del país ya que aumenta el riesgo de suministro y los niveles de dependencia. La Figura 5 indica que el petróleo se destina principalmente al sector transporte. Sin embargo, la reducción de las importaciones de gas natural ha estimulado un incremento del petróleo diesel como fuente de generación eléctrica. El detalle del consumo de este sector se analiza a continuación.

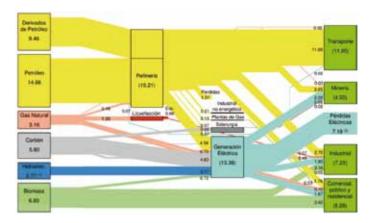


Figura 5: Flujo de energía en Chile. Los valores corresponden al 2008 y son expresados como tasa de consumo energético en GW. Los consumos de sectores secundarios no consideran el autoconsumo (datos de CNE, 2010a)

# Generación y capacidad eléctrica en Chile

La Figura 6 muestra un detalle de la capacidad instalada y la generación eléctrica en Chile desde 1990 hasta 2008 y especifica la fracción correspondiente a hidro y termoelectricidad. La generación total el 2008 fue 6.95 GW<sub>e</sub>, aproximadamente la mitad de la capacidad (14.30 GW<sub>e</sub>), y el consumo per cápita fue 0.42 kW<sub>e</sub>/persona. La tasa de crecimiento anual de la generación desde 1990 es aproximadamente 7%.

A partir del 2007, cerca del 60% de la electricidad se generó en centrales termoeléctricas. Las fuentes energéticas utilizadas por estas centrales son, en su mayoría, importaciones de carbón y derivados del petróleo (Figura 5). Sólo la generación hidroeléctrica, que alcanzó el 40% del total el 2008, puede considerarse como una fuente energética doméstica.

Del flujo energético de la Figura 5 y la generación eléctrica de la Figura 6 se puede estimar la eficiencia de las plantas termoeléctricas. El consumo de combustibles fósiles, es decir, petróleo y derivados, gas natural y carbón, fue equivalente a 9.89 GW el 2008, mientras que la generación eléctrica en plantas termoeléctricas fue 4.17 GW<sub>e</sub> (CNE, 2010a; SEA, 2010). Por lo tanto, la eficiencia obtenida dividiendo la generación por el consumo de combustibles fósiles es 42%.

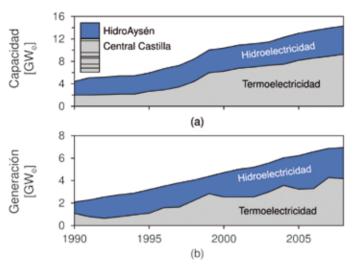


Figura 6: (a) Capacidad instalada y b) generación eléctrica por fuentes en Chile. El inserto en a) corresponde a los 8.85 GW de centrales eléctricas proyectadas (datos de CNE, 2010a; SEA, 2010)

La Figura 6 también muestra la capacidad de las plantas eléctricas proyectadas, algunas de las cuales se encuentran en etapa de evaluación ambiental (SEA, 2010). Las más destacadas son el proyecto Hidroeléctrico Aysén con 2.75 GW<sub>e</sub> y la central termoeléctrica Castilla con 2.10 GW<sub>e</sub>. Si se asume un factor de planta del 78% (Raineri y Contreras, 2010), ambas centrales generarían 3.78 GW<sub>e</sub>, equivalente a un 54% de la generación del país el 2008.

La demanda eléctrica total dentro de n años  $De_n$  [GW<sub>e</sub>] basada en el consumo del año 2008  $De_0$  [GW<sub>e</sub>] y una tasa de crecimiento anual constante  $t_c$  [%] se puede estimar como,

$$De_n = De_0 \left( 1 + \frac{t_c}{100} \right)^n \tag{1}$$

Considerando  $De_0 = 6.95 \text{ GW}_e$  y una tasa de crecimiento anual  $t_c = 4 \%$ , como la experimentada entre 2005 y 2008, el consumo dentro de 15 años (para el año 2023) sería  $De_n = 12.52 \text{ GW}_e$ . Este valor concuerda con estimaciones más

detalladas que asumen un acoplamiento entre el consumo eléctrico y el crecimiento del producto interno bruto *PIB* (O'Ryan, 2008).

Si se suma la generación actual de 6.95 GW<sub>e</sub> y la proporcionada por HidroAysén y la central Castilla 3.78 GW<sub>e</sub>, la generación total sería de 10.73 GW<sub>e</sub>, es decir, el 86% de la demanda el 2023. Considerando un aporte extra de 8.37 GW<sub>e</sub> de generación, correspondiente a 15.22 GW<sub>e</sub> de capacidad planificada (SEA, 2010) con un factor de planta de 55%, la oferta total sería 19.10 GW<sub>e</sub>. Este valor excede en un 53% la generación necesaria para satisfacer el incremento de demanda para los próximos 15 años previamente calculado. Cabe preguntarse si la apuesta por fuentes energéticas convencionales es exagerada o si la apuesta por energías renovables muy exigua.

#### Desarrollo sostenible

El crecimiento de las naciones debe asegurar un desarrollo sostenible, que compatibilice el uso y la capacidad de regeneración de los recursos naturales. El calentamiento global asociado al exceso de emisiones de gases que agudizan el efecto invernadero es un ejemplo del desbalance que existe actualmente (IPCC, 2007). Si bien se puede argumentar sobre las causas de esta problemática, no se puede desconocer que sus efectos pueden tener fuertes repercusiones en la economía Chilena (CEPAL, 2009).

Uno de los aportes más directos de un país al incremento global en la concentración de gases de efecto invernadero es la emisión de dióxido de carbono CO<sub>2</sub> (IPCC, 2007). La Figura 7 muestra la evolución de las emisiones de CO<sub>2</sub> con respecto a la tasa de consumo energético para diferentes países desde 1980 hasta 2007 (WB, 2010). La clara relación de proporcionalidad entre el consumo energético y las emisiones de CO<sub>2</sub> indica que éstas son un producto directo del crecimiento económico y el desarrollo. Chile ha experimentado un aumento sostenido de las emisiones, lo que puede ser explicado por el elevado consumo de combustibles fósiles, mayoritariamente por los sectores transporte y generación eléctrica.

Considerando el sector eléctrico, estimaciones de emisiones de dióxido de carbono equivalente por kWh<sub>e</sub> de electricidad generada por distintas tecnologías se muestran en la Figura

8 (Weisser, 2007). Las emisiones de plantas a petróleo diesel y carbón son al menos 10 y 20 veces mayores que las de plantas hidroeléctricas, respectivamente. Esto indica que la mitad de la electricidad generada en Chile contamina al menos 10 veces más que la hidroelectricidad.

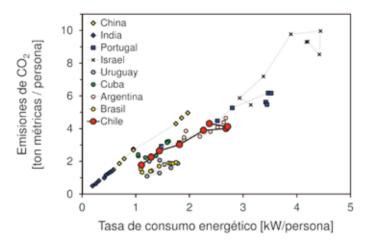


Figura 7: Emisiones de dióxido de carbono per cápita. La evolución de los países corresponde a los años 1980, 1985, 1990, 1995, 2000, 2005, 2006 y 2007 (datos del WB, 2010; EIA, 2010)

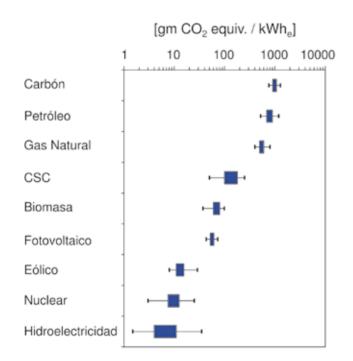


Figura 8: Emisiones de gases de efecto invernadero durante el ciclo de vida de plantas eléctricas. Los cuadros representan la desviación estándar mientras que las barras los mínimos y máximos valores reportados, CSC: captura y secuestro de carbono (datos de Weisser, 2007)

Otro indicador que cuantifica el impacto de las actividades de una sociedad en el ambiente es la huella ecológica. Este

indicador, expresado en hectáreas globales por persona, se define como el territorio ecológicamente productivo de un país necesario para producir los recursos utilizados y para asimilar los residuos de su población (Ewing et al., 2008). El cálculo de la huella ecológica incluye la huella de carbono y por ende las emisiones de dióxido de carbono. Del mismo modo, se define bio-capacidad como el territorio necesario para generar los recursos y absorber los desechos. La Figura 9a muestra la huella ecológica de diversos países en relación a su tasa de consumo de energía primaria per cápita. Claramente se observa que la huella ecológica aumenta con el consumo energético. La Figura 9b presenta el índice de reserva ecológica, que se define como la razón entre la bio-capacidad y la huella ecológica. versus la tasa consumo de energía primaria per cápita. Países con índices de reserva ecológica menores a uno no tienen una capacidad de desarrollo sostenible. Dentro de este grupo de países se encuentran aquellos que consumen a tasas elevadas y/o poseen una alta densidad de población. El índice de reserva de Chile el 2008 fue 1.4. Si bien este valor es aceptable, su evolución en el futuro depende del balance entre el crecimiento de la huella ecológica y la protección de la bio-capacidad del país.

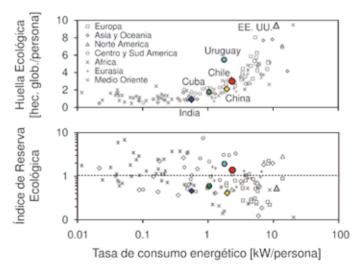


Figura 9: Huella ecológica e índice de reserva ecológica según tasa de consumo de energía primaria (datos de EIA, 2010; Ewing *et al.*, 2008)

Todos estos antecedentes indican que el desarrollo de Chile en el largo plazo debe estar acompañado por un incremento del uso de energías renovables y una reducción del consumo de combustibles fósiles. Como se demuestra en la siguiente sección, Chile cuenta con inmejorables posibilidades de explotar una considerable variedad de alternativas renovables.

# Potencial de energías renovables en Chile

A continuación se presenta un análisis que permite cuantificar el potencial de la energía solar, eólica y marina en Chile. El análisis estima el orden de magnitud de la energía aprovechable basado en ecuaciones físicas fundamentales. El objetivo es demostrar las favorables condiciones del país para la explotación de este tipo de energía. Al final de la sección se comparan los costos de generación eléctrica mediante el uso de fuentes renovables y fósiles.

#### Energía solar

El norte de Chile cuenta con excepcionales niveles de irradiación debido a su escasa nubosidad y cercanía al trópico. Sin embargo, a pesar de estas incomparables ventajas, muy pocos esfuerzos se han orientado a la masificación del uso de paneles fotovoltaicos y colectores solares. Ni siquiera la gran minería, que concentra sus actividades en esta zona, en sus mejores tiempos de bonanza ha intentado desarrollar estas tecnologías. El siguiente análisis cuantifica el potencial de la energía solar como fuente de energía eléctrica utilizando paneles fotovoltaicos.

Considerando una irradiación global anual  $I_g$  [kWh/m²], el número de horas de sol equivalente HSE [hrs] con una irradiación estándar  $I_e$  [kW/m²] (se adopta  $I_e$  = 1 kW/m²) es

$$HSE = \frac{I_g}{I_g} \tag{2}$$

La potencia eléctrica  $P_{gs}$  [kW] que se puede generar si se dispone de NP paneles fotovoltaicos con potencia nominal  $P_{pV}$  [kW<sub>max</sub>], donde W<sub>pmax</sub> es la potencia máxima de un panel bajo irradiación estándar  $I_e = 1 \text{ kW/m}^2$ , a una temperatura de 25°C y una masa de aire MA = 1.5 (Lynn, 2010), se determina como

$$P_{gs} = NP P_{PV} \frac{HSE}{HA} \tag{3}$$

donde HA es la cantidad de horas anuales, es decir, HA = 8760 hrs. El área de un panel foto voltaico  $A_p$  [m²] se puede definir en función de la eficiencia de conversión de energía del panel  $\eta$ , la potencia del panel  $P_{pV}$  y la irradiación estándar  $I_p$  como

$$A_p = \frac{P_{pV}}{I_e \eta} \tag{4}$$

El área total de paneles  $AT_p$  [m²] necesaria para generar una potencia eléctrica  $P_{gs}$  se puede obtener reordenando (3) para obtener el número de paneles NP y multiplicando por  $A_p$ 

$$AT_p = \frac{P_{gs}HA}{I_g\eta} \tag{5}$$

En este simple análisis, el área total depende sólo de la potencia eléctrica necesaria, la irradiación promedio del sitio y la eficiencia de conversión de energía del panel fotovoltaico. Si se define la tasa de irradiación global anual  $I_{\star}$  [kW/m²] como

$$I_t = \frac{I_g}{HA} \tag{6}$$

el área total es

$$AT_p = \frac{P_{gs}}{I_t \eta} \tag{7}$$

Asumiendo una irradiación global anual similar a la medida en la ciudad de Calama  $I_g = 2190 \text{ kWh/m}^2$ , equivalente a una tasa de irradiación global anual  $I_t = 250 \text{ W/m}^2$  (CNE et al., 2008), y una eficiencia de los paneles  $\eta = 0.15$  (Lynn, 2010), el área necesaria para generar una potencia eléctrica similar al consumo de la industria minera el 2008  $P_{gs} = 2.4 \text{ GW}$  (Figura 5) es  $AT_p = 64 \text{ km}^2$ . Este simple análisis demuestra que si esta generación se pudiera concentrar en la Región de Antofagasta, donde se encuentra la mayor parte de la industria minera, la energía solar sería capaz de sostener este consumo con una superficie de paneles fotovoltaicos del orden de  $64 \text{ km}^2$  (~8 km x 8 km). La potencia eléctrica que se puede generar usando paneles fotovoltaicos por unidad de área horizontal  $PA_s$  [W/m²] es

$$PA_s = I_t \eta \tag{8}$$

# Energía Eólica

La energía cinética EC [J] de un flujo de aire de densidad  $\rho$  [kg/m³] que atraviesa un área transversal A [m²] en un tiempo t [s] a una velocidad v [m/s] es (Khaligh y Onar, 2010)

$$EC = \frac{1}{2}\rho v^3 At \tag{9}$$

La densidad de potencia  $DP_{\nu}[W/m^2]$  se obtiene dividiendo la energía por el tiempo y el área transversal

$$DP_{\nu} = \frac{1}{2}\rho\nu^{3} \tag{10}$$

Esta expresión sugiere que la energía que se puede extraer de un flujo de aire es fuertemente dependiente de su velocidad. Si bien la densidad del aire es una función de la temperatura y la presión atmosférica, se puede considerar constante en términos prácticos. Sin embargo, la velocidad puede fluctuar considerablemente durante el año. Es por esto que una adecuada estimación de la velocidad es clave para determinar la densidad de potencia.

Para estimar la densidad de potencia en un sitio en forma más precisa se debe adoptar en la ecuación (10) la mejor aproximación de la velocidad del viento al cubo  $(v^3)_{prom}$ . Asumiendo que la función de densidad de probabilidad del viento durante el año es Rayleigh (Masters, 2004), este valor se puede asociar a la velocidad promedio anual del sitio  $v_n$  [m/s]

$$\left(v^3\right)_{prom} = \frac{6}{\pi}v_p^3 \tag{11}$$

Para estimar la velocidad promedio del viento durante un año se debe considerar además que la velocidad del viento es directamente proporcional a la altura desde la superficie. Los aerogeneradores capturan la energía cinética del viento a través de aspas de largo r [m] conectadas a un rotor. El área que abarcan las aspas es  $A = \pi r^2$  [m²]. Este sistema se monta sobre una torre de altura H [m] que se diseña para alcanzar las más favorables velocidades y densidades. La eficiencia de los aerogeneradores, llamada coeficiente de potencia  $C_p$  (Khaligh y Onar, 2010) depende de la eficiencia del rotor, del sistema de transmisión y del generador, y

se expresa como función de la velocidad del viento. En términos prácticos, este valor es aproximadamente  $C_p$  = 0.3, como referencia, la máxima energía que se puede extraer de la energía cinética del viento es 59.3% según la ley de Betz (Khaligh y Onar, 2010). Con todas estas consideraciones, la potencia eléctrica que se puede generar a partir de la energía eólica  $P_{ex}$  [kW] es

$$P_{gv} = \frac{3}{\pi} \rho v_p^3 A C_p \tag{12}$$

donde  $\rho$  [kg/m³] y  $v_p$  [m/s] son la densidad y la velocidad promedio del aire a una altura H [m], respectivamente, A [m²] es el área que abarcan las aspas del aerogenerador y  $C_p$  [-] su coeficiente de potencia. Adoptando una densidad del aire  $\rho$  = 1.225 kg/m³, una velocidad promedio anual  $v_p$ = 5 m/s, similar al reportado por la CNE según simulación numérica para la Región de Antofagasta (CNE, 2009), la densidad de potencia es  $DP_p$ = 146 W/m². Considerando además un área A = 5027 m² equivalente al área que abarcan las aspas de 40 m de largo de los aerogeneradores del Parque Eólico Canela y un coeficiente de potencia  $C_p$  = 0.3, correspondiente al del aerogenerador a  $v_p$  = 5 m/s (Vestas, 2008), la potencia eléctrica que se puede generar es  $P_{ev}$  = 221 kW.

Considerando un factor por eficiencia de grupo  $\eta_g$  y un área horizontal por aerogenerador  $A_{ha}$  [m<sup>2</sup>], la potencia eléctrica que se puede generar usando aerogeneradores por unidad de área horizontal  $PA_a$  [W/m<sup>2</sup>] es

$$PA_a = \frac{P_{gv}\eta_g}{A_{ha}} \tag{13}$$

Asumiendo una eficiencia de grupo  $\eta_g = 0.8$  y un área horizontal por aerogenerador dada por seis largos de aspa entre aerogeneradores contiguos y diez largos de aspa entre filas de aerogeneradores (Masters 2004), la potencia eléctrica es  $PA_a = 1.8 \text{ W/m}^2$ . Este valor indica que el uso de energía eólica es menos eficiente que el uso de paneles fotovoltaicos en términos de uso de suelo. Por ejemplo, para generar una potencia eléctrica  $P_{gv} = 2.4 \text{ GW}$  se requieren 10,860 aerogeneradores, que es equivalente a un área horizontal aproximada de 1300 km².

### Energía marina

Dos formas de extraer energía del mar son a través de la energía de las mareas y la energía de las olas (Holthuijsen, 2007; Khaligh y Onar, 2010). La energía de las mareas se puede estimar en forma análoga a como se estimó la energía cinética del viento en la sección anterior. La diferencia radica en la densidad del medio, en este caso agua de mar, y la velocidad del flujo. La densidad del mar fluctúa alrededor de  $\rho_m = 1025 \, \text{kg/m}^3$  y la velocidad del flujo es generalmente menor que la del viento. La energía de una ola se puede estimar considerando una ola sinusoidal como la mostrada en la Figura 10. La energía potencial y cinética total de esta ola  $E_w$  [J/m²] con respecto a su nivel basal es (Holthuijsen, 2007)

$$E_{w} = \frac{1}{2} \rho_{m} g \left(\frac{H}{2}\right)^{2} \tag{14}$$

donde  $\rho_m$  [kg/m³] es la densidad del agua de mar, g [m/s²] es la aceleración de gravedad y H [m] es el doble de la amplitud de la ola.

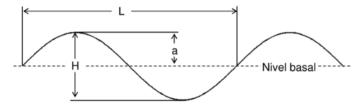


Figura 10: Parámetros de una ola sinusoidal

La velocidad de fase de la ola  $v_f$  [m/s] es la longitud de onda L [m] dividido por el periodo de la ola T [s]. En sistemas profundos, la velocidad de grupo es (Holthuijsen, 2007)

$$v_g = \frac{gT}{4\pi} \tag{15}$$

la mitad de la velocidad de fase.

La potencia de una ola por unidad de longitud  $P_w$  [W/m] es la energía cinética total de la ola multiplicado por la velocidad de grupo, es decir,

$$P_{w} = \frac{\rho_{m}g^{2}H^{2}T}{32\pi} \tag{16}$$

Multiplicando este valor por el largo del frente de la ola, perpendicular a la dirección de propagación, se obtiene la potencia total.

Las olas de la costa de Chile son muy propicias para la generación eléctrica por la reducida variabilidad estacional, su baja dispersión direccional y altos periodos (Monárdez *et al.*, 2008). Además, la batimetría es apropiada dada las fuertes pendientes que permiten alcanzar grandes profundidades cerca de la costa. Por ejemplo, una ola típica en el centro de la costa chilena de altura H=2 m, periodo T=12 s, considerando una densidad  $\rho_m=1025$  kg/m³, tiene una potencia por unidad de longitud  $P_w=47$  kW/m. En general, la potencia de las olas aumenta de 20 a 90 kW/m desde el extremo norte hasta el extremo sur del país (Monárdez *et al.*, 2008).

Considerando una eficiencia de conversión energética  $\eta_{\nu}$  [-], la potencia eléctrica que se puede generar utilizando convertidores de energía undimotriz por unidad de longitud  $PA_{m}$  [W/m] es

$$PA_{m} = P_{w} \eta \tag{17}$$

Utilizando una eficiencia de conversión energética  $\eta_v = 0.3$  correspondiente a la de un convertidor Pelamis (www. pelamiswave.com), se requiere una longitud aproximada de L=170 km para satisfacer una demanda de  $P_{gv}=2.4$  GW.

La Figura 11 resume en forma aproximada el potencial undimotriz y solar a lo largo del territorio chileno. La irradiación global aumenta de sur a norte mientras que la potencia de ola lo hace de norte a sur. La Tabla 1 presenta estimaciones de la potencia eléctrica que se puede generar utilizando paneles fotovoltaicos, aerogeneradores y convertidores de energía undimotriz.

Tabla 1: Estimaciones de potencia eléctrica por unidad de área/longitud en Chile

Energía	Valor	Unidad
Solar (1)	38	$W/m^2$
Eólica (2)	1.8	$W/m^2$
Undimotriz (3)	47	W/m

Notas: (1) Estimación para el norte de Chile

- (2) Estimación para el centro norte de Chile
- (3) Estimación para la zona central de Chile

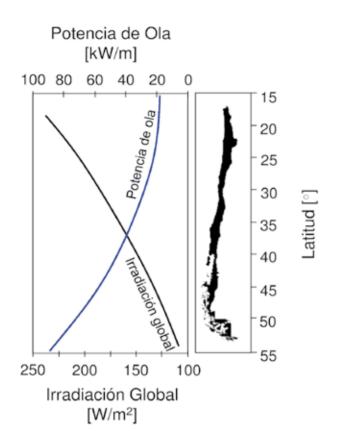


Figura 11: Estimación de irradiación solar global y potencia de ola en Chile. La potencia de la ola corresponde a una profundidad de 50 m (datos de Monárdez *et al.*, 2008; CNE, PNUD y UTFSM, 2008)

# Costos de energía

Una de las principales desventajas del uso de energía renovable es el elevado costo inicial de la inversión. Sin embargo, para comparar alternativas renovables y fósiles se debe incorporar en la evaluación económica factores como el incremento del precio de los combustibles, la incertidumbre de su valor y externalidades tales como los daños provocados por emisiones contaminantes, gastos por seguridad de suministro, y costos de transmisión y distribución (Roth y Ambs, 2004). Una forma de considerar todos estos costos es a través del costo nivelado de energía. Este valor corresponde al ingreso constante anual equivalente necesario para recuperar todos los costos a lo largo de la vida útil de un proyecto (Bemis y De Angelis, 1990; Masters, 2004; Roth y Ambs, 2004).

La Figura 12 muestra el costo nivelado de energía de distintas plantas de generación eléctrica incluyendo los costos de capital, de operación y mantenimiento, del

combustible y externalidades. Si bien existen discrepancias entre distintos investigadores sobre los costos y la equivalencia de las tecnologías a la realidad chilena, lo cierto es que aún el costo de la energía solar se encuentra muy por encima del resto de las alternativas. Sin embargo, las externalidades asociadas a su uso son mucho menores a las de otras tecnologías. Las externalidades asociadas al uso de plantas termoeléctricas pueden duplicar o triplicar sus costos. Asumiendo que los costos externos se internalizarán en el futuro debido a las restricciones discutidas en las secciones anteriores, las tecnologías renovables se harán más atractivas.

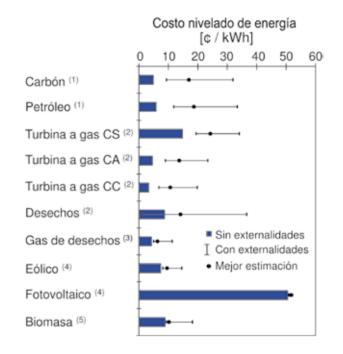


Figura 12: Costo nivelado de energía de distintas plantas de generación eléctrica. Las externalidades consideran daños por emisiones contaminantes, gastos por seguridad de suministro, costos de transmisión y distribución, y otros impactos ambientales. Los costos son expresados en centavos de dólar de 1999 (datos de Roth y Ambs, 2004)

Notas: 1) Plantas utilizan ciclos de Rankine

- 2) CS: ciclo simple, CA: ciclo avanzado y CC: ciclo combinado
- 3) Incineración de desechos municipales
- 4) Basado en plantas a gran escala
- 5) Combustión de biomasa

Otra desventaja asociada al uso de energías renovables es el desfase entre generación y consumo. Si bien la energía eólica es difícil de estimar, la energía solar y marina son de más fácil predicción. Una forma de superar esta limitación es a través del uso de almacenes de energía, que pueden variar desde sistemas distribuidos hasta centrales a gran escala (Pasten y Santamarina, 2010). De esta forma también se ahorra en la construcción de sistemas de transmisión que constituyen una parte importante del costo de un proyecto eléctrico.

#### **Conclusiones**

La tasa de consumo energético per cápita de Chile el 2007 fue de 2.4 kW/persona, similar al promedio mundial. Este valor sostiene un índice de desarrollo humano de 0.773, catalogado como "alto". El mismo valor asciende a 0.783 el 2010, pero se reduce considerablemente debido a la inequidad social. El incremento de este índice está directamente relacionado al consumo energético y si bien el consumo de Chile es menor que el de otros países con un mismo nivel de desarrollo, aún se pueden reconocer países con mayor eficiencia energética. En este sentido, el consumo energético en Chile aún permite tomar decisiones tendientes a mejoras en eficiencia y conservación, situación distinta a la de países como EE.UU. donde estas alternativas son difíciles de implementar (Pasten y Santamarina, 2012).

Del consumo total de energía primaria, el 64% corresponde a importaciones. Si se considera el consumo neto de energía, este valor se incrementa, dejando en evidencia la fuerte dependencia chilena de fuentes energéticas foráneas. Cerca del 70% del consumo energético de Chile corresponde a combustibles fósiles como gas natural, carbón, petróleo y sus derivados. Este consumo tiene un impacto directo en el incremento global de las emisiones de dióxido de carbono CO<sub>2</sub> y gases de efecto invernadero. Las emisiones per cápita de CO<sub>2</sub> alcanzaron 4.3 ton métricas/ persona el 2007 y se espera un incremento que afectará el balance entre la huella ecológica y la bio-capacidad del país. Actualmente, el índice de reserva ecológica de Chile es levemente superior a la unidad, lo que refleja la crítica situación del país en materia de sostenibilidad energética.

La generación eléctrica alcanzó un valor cercano a los 7 GW<sub>e</sub> el 2008 y se estima que el consumo se duplicará en los próximos 15 a 20 años. Para satisfacer esta demanda, existe una serie de proyectos termoeléctricos que impactarán directamente en las emisiones de gases de efecto invernadero. Además, la mayoría de estos proyectos dependería de combustibles importados que seguirían

comprometiendo la seguridad energética del país.

Chile cuenta con abundantes fuentes de energía solar y marina en el norte y sur del país, respectivamente. Si bien su aprovechamiento depende en gran medida de considerables inversiones iniciales, la internalización de los costos asociados a las emisiones de contaminantes, la seguridad de suministro y transmisión-distribución de otras fuentes, harían estas alternativas más competitivas en el futuro. Probablemente, la contribución de este tipo de energías a la generación total del país no sea significativa en el corto plazo, pero se debe invertir fuertemente en su desarrollo comenzando, por ejemplo, por la industria minera cuya ubicación coincide con las zonas de mayor irradiación del país. La inversión en fuentes alternativas de energía podría representar enormes beneficios para el desarrollo sostenible de Chile, más aun si se considera la fuerte dependencia actual del uso de combustibles fósiles importados.

#### Referencias

Bemis, G. R. and De Angelis, M. (1990). Levelized cost of electricity generation technologies. *Contemporary Economic Policy* **8**, No. 3, 200-214

CEPAL (2009). La economía del cambio climático en Chile - Síntesis. Naciones Unidas, Santiago, Chile

CNE (2009). *Modelación del recurso solar y eólico del norte de Chile*. Comisión Nacional de Energía, Santiago, Chile

CNE (2010a). *Balances energéticos*. Comisión Nacional de Energía. http://www.cne.cl/estadisticas/balances-energeticos. Acceso: 15 de Septiembre de 2011.

CNE (2010b). Ministro Raineri forma comité de seguridad energética. Comisión Nacional de Energía, http://www.cne.cl/noticias/otros/301-ministro-raineri-forma-comite-de-seguridad-energetica. Acceso: 16 de Septiembre de 2011

CNE, PNUD y UTFSM (2008). *Irradiancia solar en territorios de la República de Chile - Registro Solarimétrico*. Comisión Nacional de Energía, Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo y Universidad Técnica Federico Santa María, Santiago, Chile

CNEC (2009). Análisis relativo de impactos y riesgos de la generación núcleo-eléctrica. Corporación Nuclear Eléctrica de

Chile S.A., Santiago, Chile

Cruz, J., Thomson, M. D. and Stavroulia, E. (2009). *Preliminary site selection - Chilean marine energy resources*. Garrad Hassan and Partners Limited

EIA (2010). *International energy statistics*, U.S. Energy Information Administration. http://tonto.eia.doe.gov/cfapps/ipdbproject/IEDIndex3.cfm?tid=44&pid=44&aid=2. Acceso: 15 de Septiembre de 2011

Ewing, B., Goldfinger, S., Wackernagel, M., Stechbart, M., Rizk, S. M., Reed, A. and Kitzes, J. (2008). *The ecological footprint atlas 2008*. Global Footprint Network, Oakland

Holthuijsen, L. (2007). *Waves in oceanic and coastal waters*. Cambridge University Press, New York

IEA (2008). *International energy outlook 2008*. International Energy Agency and Organization for Economic Co-operation and Development, Paris, France

INE (2003). *Censo 2002: Resultados - Volumen I.* Instituto Nacional de Estadísticas de Chile

IPCC (2007). Climate change 2007: Synthesis report. Intergovernmental Panel on Climate Change

Khaligh, A. and Onar, O. (2010). *Energy harvesting: solar, wind, and ocean energy conversion systems*. CRC Press, Boca Raton, Florida

Kozulj, R. (2005). Crisis de la industria del gas natural en Argentina. CEPAL, Naciones Unidas, Santiago, Chile.

Lynn, P. (2010). *Electricity from Sunlight: An Introduction to Photovoltaics*. John Wiley & Sons Ltd., Chichester, West Sussex, UK

Masters, G. M. (2004). Renewable and efficient electric power systems. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, USA

Monárdez, P., Acuña, H. and Scott, D. (2008). Evaluation of the potential of wave energy in Chile. 27th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, ASME, Estoril, Portugal

Morata, D. (2011). Energía geotérmica en Chile: un desafío urgente para el país, Santiago. http://www.elmostrador.cl/opinion/2011/03/27/energia-geotermica-en-chile-un-desafio-urgente-para-el-pais/. Acceso: 17 de Mayo de 2012.

O'Ryan, R. (2008). Diseño de un modelo de proyección de demanda energética global nacional de largo plazo. Informe final preparado para la Comisión Nacional de Energía.

Programa de Gestión y Economía Ambiental, Departamento de Ingeniería Industrial, Universidad de Chile

Pasten, C. and Santamarina, J. C. (2010). Energy geo-storage. *KSCE Journal of Civil Engineering* **15**, No. 4, 655-667

Pasten, C. and Santamarina, J. C. (2012). Energy and quality of life. *Energy Policy (aceptado)* 

PNUD (2010). Informe sobre desarrollo humano 2010. Edición del vigésimo aniversario. La verdadera riqueza de las naciones: Caminos al desarrollo humano. Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo

Raineri, R. and Contreras, G. (2010). Efficient capacity investment and joint production agreements in an oligopolistic electricity market: The HidroAysen joint venture project. *Energy Policy* **38**, No. 11, 6551-6559

Roth, I. F. and Ambs, L. L. (2004). Incorporating externalities into a full cost approach to electric power generation life-cycle costing. *Energy* **29**, No. 12-15, 2125-2144

Rudnick, H. (2006). *Seguridad energética en Chile: dilemas, oportunidades y peligros*. Vicerrectoría de Comunicaciones y Asuntos Públicos, Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago

Santamarina, J. C. (2006). The worldwide energy situation. Anales de la Academia Nacional de Ingeniería República de Argentina, Tomo II, 79-98

SEA (2010). Servicio de evaluación ambiental - Búsqueda de proyectos. Servicio de Evaluación Ambiental. http://seia.sea.gob. cl/busqueda/buscarProyecto.php. Acceso: 16 de Octubre de 2011

UNDP (2010a). *The human development index (HDI)*. United Nations Development Program. http://hdr.undp.org/en/statistics/hdi/. Acceso: 23 de Octubre de 2011

UNDP (2010b). *Human development index (HDI) value*. United Nations Development Program. http://hdrstats.undp.org/en/indicators/49806.html. Acceso: 23 de Octubre de 2011

Vestas (2008). Catalogue V82-1.65 MW. www.vestas.com, Denmark

WB (2010).  $CO_2$  emissions (metric tons per capita) The World Bank. http://data.worldbank.org/indicator/EN.ATM.CO2E.PC. Acceso: 23 de Octubre de 2011

Weisser, D. (2007). A guide to life-cycle greenhouse gas (GHG) emissions from electric supply technologies. *Energy* **32**, No. 9, 1543-1559