



El desarrollo, ¿es sustentable?

El tema del desarrollo sustentable crea un contrapunto entre la equidad del desarrollo y la ecología; más que un tema económico, es un tema moral. Lograr que se consigna la loable meta de mitigar la inequidad energética mientras se satisface a la población mundial esperada para el 2050 (10-12 mil millones) significaría quintuplicar, para entonces, el suministro primario total de energía de hoy, llevándolo al orden de magnitud de 10^9 boe/d. Basar el desarrollo futuro en la espectacularmente exitosa economía del carbono que motorizó el siglo XX podría ser una entelequia; primero porque acarrearía riesgos ambientales inadmisibles y como complicación adicional, el fantasma del pico de capacidad de producción de hidrocarburos pareciera ya más tangible. Necesitamos, entonces, encontrar alternativas física y comercialmente viables de fuentes de energía renovables, lo que implica un urgente y significativo salto tecnológico. Tal esfuerzo requiere de la activa participación subsidiaria del Estado. Se necesita también que más jóvenes brillantes se dediquen a las ciencias básicas y a las ingenierías.



Por el Ing. Carlos A. Garibaldi

El desarrollo sustentable como imperativo moral

Aunque no hay una sola definición, la más aceptada es la siguiente: desarrollo sustentable (DS) significa cumplir con las necesidades de las generaciones presentes sin comprometer las de las futuras. Como premisa, entonces, no debería limitar el desarrollo sino maximizar sus beneficios a la humanidad en el largo plazo (beneficios netos, por ejemplo, de daño ambiental). El problema es que se trata de un concepto algo etéreo que no responde a una serie de preguntas lógicas. Entre ellas: ¿Tenemos todos los humanos derecho al mismo (o a un razonable) desarrollo económico y consumo? ¿Qué nivel sería “razonable”? ¿Estamos en verdad degradando el planeta y comprometiendo a generaciones futuras? ¿Le importa esto al mercado? Para resolver estos problemas, ¿necesitamos un caso de negocio, o se trata simplemente de hacer lo correcto? ¿Alcanza el acuerdo de Kyoto? ¿Otorga el DS ventajas competitivas a quienes lo practican o debería ser un estándar operativo? ¿Cómo medimos su éxito?

Todo dilema moral lo es porque tiene un costo. En este caso, hacer lo correcto traería aparejado un gran costo a los países más desarrollados. No sorprende entonces, que el DS se haya vuelto un debate paradigmático entre sordos, dominado por la retórica inflamable entre dos grupos de fundamentalistas. En un extremo están los utopistas que se oponen al desarrollo, a la globalización, al mercado y a casi todo. En el opuesto, están los neoconservadores (muy amigos de nuestra industria) que gobiernan actualmente los EE.UU., quienes pareciera que creen que la seguridad energética y la resultante competitividad económica de su país no deben ser amenazadas de manera alguna, y que la “mano invisible” se ocupará por sí sola de encontrar el punto de equilibrio. Es decir, “el desarrollo sustentable es un tema privado, no de Estado” (Chenney).

A estos puristas del método científico y del caso de negocio (“no reaccionemos históricamente y comprometamos nuestra competitividad económica hasta que tengamos certeza absoluta de que, en efecto, hay calentamiento global causado por la actividad del hombre”), habría que recordarles el principio de la precaución: los indicios, la proximidad y la gravedad de las consecuencias son suficientes para justificar la gestión de sus riesgos. Lo racional sería, entonces, entablar un diálogo franco e intentar, sin más demora, varias cosas simultáneamente: frenar la explosión demográfica, consumir menos, aumentar eficiencias y buscar fuentes de energía alternativas. Empresas del sector como BP y Shell habrían comprendido y adoptado esta actitud más iluminada (o al menos, hacen el esfuerzo por aparentarlo).

Cuando fallan el mercado y el Estado

A veces el mercado falla en fijar el precio correcto. De todo lo que no se valoriza correctamente (o se subsidia), se abusa. En el caso particular de los hidrocarburos, los consumidores no pagan por las externalidades ambientales (como el crecimiento de las emisiones atmosféricas) y por ser un *commodity* global, las de origen, como las militares:

“defender” las zonas más prospectivas y los cuellos de botella geopolíticos. Las externalidades son a la economía y al ambiente lo que la entropía a la física; tarde o temprano se nos pasará la factura.

El Estado falla al no fijar políticas industriales y fiscales conectadas con el problema; por ejemplo, en EE.UU., los impuestos penalizan más el ingreso que el consumo. La consecuencia es que un precio relativamente bajo de los combustibles fósiles provoca consumos excesivos y reduce el potencial competitivo de formas alternativas de la energía. El dilema es que, si el precio de los combustibles fósiles reflejara las externalidades o soportara mayores impuestos, se provocaría recesión, desempleo y caída de la calidad de vida en los países desarrollados, principalmente los EE.UU.

¿Importa el calentamiento global?

El argumento raíz del debate parece ser si el impacto del progreso humano está efectivamente comprometiendo la sustentabilidad del planeta. Más sutil y pernicioso que la evidente contaminación ambiental, dicho impacto se manifestaría a través del aparente calentamiento global.

Para unos, dicho efecto es indiscutible y claramente antropogénico. Otros reconocen que hay calentamiento global pero ven hasta presuntuoso que el efecto sea causado por la actividad humana, se trataría probablemente, entonces, de un ciclo conceptualmente natural y similar a muchos ya pasados. Hay quienes (Oligney) incluso niegan que haya calentamiento real discernible, ya que no se tienen mediciones directas de temperaturas previas a la Revolución Industrial, y que las mediciones modernas de temperatura se verían afectadas por reflexiones y

refracciones superficiales de las zonas urbanas (ladrillos, cementos y asfaltos). Sin embargo, el consenso ampliamente mayoritario de la comunidad científica parece ser que efectivamente hay calentamiento, que es muy veloz para ser natural y que, lógicamente, lo causa nuestra especie. Más allá de las mediciones de temperatura, el calentamiento parece ser probado por el estrés de los corales y por grandes desprendimientos de hielos polares (como el bloque Larson B en la Antártida).

El calentamiento global sería resultante de la concentración de CO_2 en la atmósfera, que interfiere con la homeostasis natural del ambiente. El CO_2 es el producto principal de la combustión “limpia” del carbón y los hidrocarburos. No es tóxico *per se*, sino todo lo contrario: es un componente esencial del ecosistema como materia prima de la biomasa (fotosíntesis), pero concentraciones excesivas crean un efecto “invernadero”. La concentración atmosférica de CO_2 habría pasado de 270 ppm antes de la Revolución Industrial a 330 en 1970, a 370 hoy día, y si no tomamos medidas, superará las 700 en el 2100, haciendo que la temperatura promedio aumente entre 1 y 5 °C. En el Cretácico Medio habría llegado a 1200 ppm (10 °C más que en la actualidad pero se trataba de un planeta bien diferente del actual). Al aumentar entonces la concentración del gas a este ritmo, y por ende la temperatura, se derretirían aún más los casquetes polares, subiría el nivel del mar casi

un metro durante el siglo XXI, habría olas de calor, sequías, inundaciones, tormentas, se extenderían las enfermedades tropicales, migrarían o desaparecerían especies vegetales y animales, etc.

Crecimiento de la demanda

La demanda energética aumenta implacablemente por causa radical del crecimiento demográfico. Aunque moderado por la educación (que favorece el control de la natalidad), el esfuerzo es insuficiente. En cierta manera, esto nos hace volver al argumento Malthusiano sobre la colisión entre el crecimiento demográfico y la sustentabilidad.

Demanda energética

(KW)

=

Población

(N)

x

Desarrollo económico

(PBI/N)

x

Intensidad energética

(KW/PBI)

El planeta tiene unos seis mil millones de años, los proto-humanos habrían evolucionado recién desde hace un millón, aunque los humanos modernos surgimos hace muchísimo menos. Alcanzamos gradualmente los mil millones recién en 1830. Desde que la explosión tecnológica de los últimos 150 años nos ha permitido conquistar (y degradar) la naturaleza, nos hemos multiplicado exponencialmente, como una verdadera plaga. De dos mil millones en 1930, somos ya 6,33 miles de millones al 30 de noviembre del 2003, lo que significaría un aumento del 1,6% anual sobre el período, aunque en los últimos años la tasa ha bajado al 1,4% gracias al control de la natalidad. En 2004 entonces, habremos acumulado unos 80-90 millones más netos, entre nacimientos y defunciones, a los que hay que alimentar, dar agua potable, salud, educación, empleo, energía, etc. Dependiendo de la continuidad o no en la baja de las tasas de fertilidad, seremos entre 10-12 mil millones de seres humanos para 2050.

La demanda energética crece por el efecto compuesto del desarrollo económico (que es también exponencial) sobre el demográfico (figura 1).

La gráfica muestra la población a futuro creciendo a un “optimista” 1,2% y el PBI/cápita, al 2,3%. La economía mundial (PBI) crece como resultante a un 3,5%, pero al

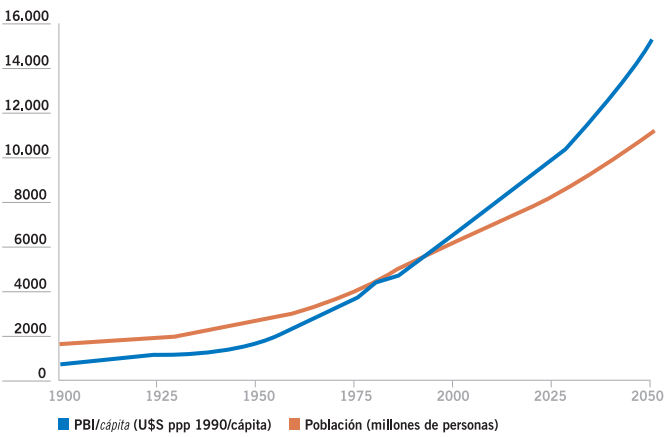


Figura 1. Crecimiento y desarrollo

mejorar la eficiencia energética con la tecnología (que reduce la intensidad energética casi a un 2%), esta se amortigua parcialmente (aunque no lo suficiente), obteniéndose un crecimiento de la demanda energética del 1,5%. De este crecimiento, 2/3 provendrá de los países en vías de desarrollo, ya que una vez alcanzado un cierto bienestar económico, la demanda energética se desacopla de él y comienza a hacerse algo asintótica (figura 2). Ese efecto, quizás, se deba a la reducción de la intensidad energética en los países desarrollados y a que la urbanización aumenta más rápidamente en los países en desarrollo (lo que implica el acceso a formas comerciales de energía y de transporte masivo).

Pero los países desarrollados tienen su gran cuota de culpa también. El gráfico también ilustra otros dos problemas: (a) la inequidad energética y (b) el desmesurado consumo energético de los EE.UU., **con 5% de la población y 25% del consumo mundial** (el doble *per cápita* que el resto de los países desarrollados), que parece haber alcanzado un punto de saturación. Para ilustrarlo más gráficamente, el ciudadano de los EE.UU. consume unos 60 boe / año de energía; un japonés consume 30, mientras que un nigeriano consume 0,8. Los países desarrollados en su conjunto (OECD) gozan del 50% del consumo con el 15% de la población, mientras que el resto está segmentado también. De los 6,3 miles de millones que vivimos hoy día, casi 1/3 vive en la pobreza absoluta, no tiene siquiera acceso a formas comerciales de energía y sobrevive quemando biomasa (leña y deshechos animales).

El acceso a la energía salubre y barata, además de ser un tema de equidad, está ligado causalmente a la salud, los alimentos, las aguas, el transporte, la libertad de traslado, la facilidad de emprender industrias, etc. Millones de mujeres y niños mueren innecesariamente cada año por enfermedades vinculadas al agua insalubre o a enfermedades respiratorias (por aspirar el producto de la combustión de biomasa dentro de sus hogares). ¿No debería ser la calidad “razonable” de vida un derecho humano básico?

El consumo actual de energía supera los 210 MMboe/d, o sea 14,4 TW (terawatt: TW = Wx10¹²). Si se asume un crecimiento demográfico del 1,2%, la demanda energética crece al 1,5% y se mantiene la relación de inequidad; necesitaríamos unos 400 MMboe/d para el 2050 o 27 TW. Para darnos una idea, 1 TW equivale a 1430 respetables plantas de 700 MW. Para borrar la inequidad energética, necesitaríamos para hoy mismo 38 TW (550 MMboe/d) y para borrar la inequidad y, además, satisfacernos a todos en el 2050, casi 70 TW (1 Bboe/d).

Digamos que el consumo de los EE.UU. es desaforado y fijemos el nivel más frugal del Japón y la Unión Europea como “adecuado” para una sociedad económicamente bien desarrollada. Volviendo al gráfico, supongamos solamente que los 1300 millones de chinos (20% de la humanidad) alcanzaran pronto el nivel de desarrollo y pulcritud ambiental del Japón, ¿sería esto sustentable respecto de las emisiones?

¿Seguir quemando combustibles basados en el carbono?

Para darnos una idea del efecto, la combustión de un litro (0,26 galones; 700 g) de gasolina (por ejemplo, heptano) consume unos 2,46 kg de O₂ (el contenido de 8,67 m³ de aire) y emite unos 2,16 kg de CO₂, lo suficiente para

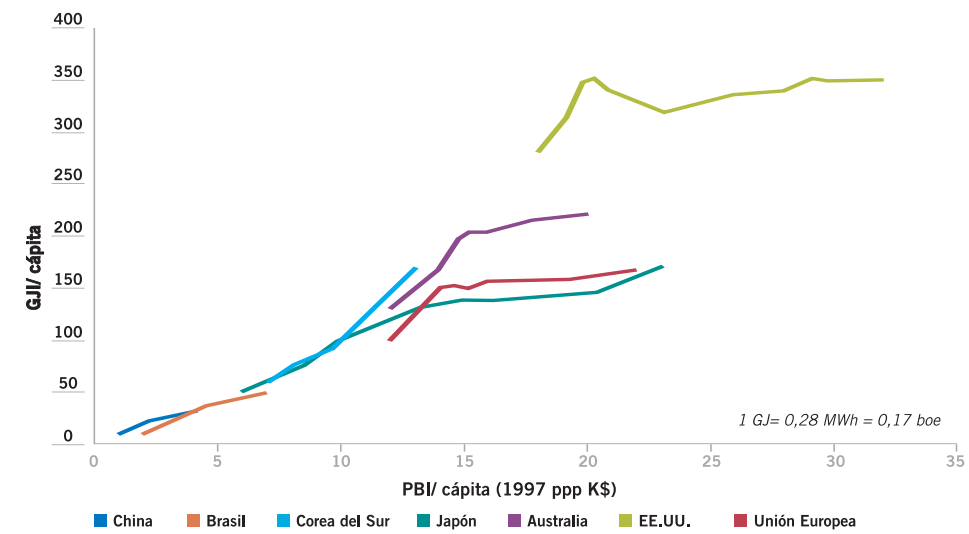


Figura 2. Consumo energético per cápita en función del desarrollo

duplicar su concentración normal actual en 3130 m³ de aire (un edificio cúbico de cinco plantas).

Las emisiones de CO₂ crecen por encima del 1% anual y, al vencer la capacidad de proceso del ecosistema, hacen que aumente la concentración atmosférica de CO₂. El crecimiento de las emisiones sería mayor en los países asiáticos, que seguirán utilizando carbón para su desarrollo. Aunque las emisiones por unidad de energía consumida se reducirían con mejor tecnología, dichas mejoras resultan insuficientes. La fórmula clásica de proyección de las emisiones es la siguiente:

$$\begin{aligned}
 \text{Emisiones} &= \text{Demanda energética} \times \text{Emisión energética} \\
 (\text{ton CO}_2) & \quad (\text{KW}) \quad (\text{ton CO}_2/\text{KW}) \\
 &= \text{Población} \times \text{Desarrollo económico} \times \text{Intensidad energética} \times \text{Emisión energética} \\
 & \quad (N) \quad (\text{PBI}/N) \quad (\text{KW}/\text{PBI}) \quad (\text{ton CO}_2/\text{KW}) \\
 &= \text{Población} \times \text{Desarrollo económico} \times \text{Intensidad de carbono} \\
 & \quad (N) \quad (\text{PBI}/N) \quad (\text{ton CO}_2/\text{PBI})
 \end{aligned}$$

Entre 1997 y 2000, las emisiones aumentaron un 1,1% anual, mientras que la población aumentó el 1,4% y el desarrollo económico un 2,3%. Consecuentemente, la intensidad del carbono disminuyó, en promedio, un 2,5%. En esto tuvieron gran peso específico China, que redujo sus emisiones significativamente al mejorar su tecnología de combustión del carbón y Rusia, que redujo sus emisiones 30% desde la caída de la URSS. En el mundo desarrollado, el cambio de las economías, desde los productos hacia los servicios, también contribuyó a la reducción en las emisiones. Pero a pesar de este tipo de eficiencias, **el efecto neto es que las emisiones siguen creciendo exponencialmente**. Si se quisiera mantener la concentra-

ción atmosférica actual, las emisiones deberían ser reducidas a razón del 3-4% anual.

Las opciones lógicas son: (a) no emitir más CO₂, encontrando otra fuente energética sustentable o (b) al menos, frenar el crecimiento de su concentración atmosférica. El Protocolo de Kyoto (no ratificado por los EE.UU., el principal perjudicado por su aplicación, ni tampoco por Rusia, que entiende, frena su crecimiento) requiere reducir, para 2012, las emisiones de los países desarrollados 5,2% por debajo de los niveles de 1990. No participando los EE.UU., Rusia no tiene a quien venderle sus créditos

ganados por su buena conducta; perdido ese incentivo, no quiere restringir su propio crecimiento. En consecuencia, lo planeado en Kyoto lamentablemente no se cumplirá.

Una manera de bajar las emisiones sería penalizarlas como una externalidad mediante impuestos. De cierta forma incipiente, se está estableciendo ya un mercado de “créditos de emisiones”, donde el “limpio” le vende su cuota remanente al “sucio”, que así paga por su privilegio (y alienta así el caso de negocio). El problema es que cualquier aumento substancial del precio de la energía en los EE.UU. tendría un efecto políticamente inaceptable; en cada pico de crisis petrolera pasada, se han perdido, en promedio, medio millón de empleos. Ningún político con ambiciones electorales o principios neoconservadores está dispuesto a sacrificar el bienestar económico de sus electores (o de los contribuyentes a su campaña política) en el corto plazo.

Otro camino sería seguir emitiendo CO₂, pero limpiándolo al mismo tiempo. Por ejemplo, secuestrar el CO₂ con biomasa (convertirlo en más plantas mediante la fotosíntesis). Sin embargo, el ecosistema está limitado por la disponibilidad finita de nutrientes. Otra alternativa sería separar de las emisiones y reinyectar el CO₂ en reservorios naturales, o reemplazando el CH₄ adsorbido al carbón. Pero, ¿es esto técnicamente posible? ¿Alcanzan los reservorios adecuados? La realidad es que esta idea no ha pasado aún del nivel seminal y aunque nos damos una idea de cuánto costaría, no sabemos siquiera si funcionaría. Implicaría un salto tecnológico impresionante. No digo que sea imposible,

porque hay precedentes como el de los convertidores catalíticos, los que redujeron las emisiones más perniciosas de los motores de combustión interna (CO, NO_x, SO_x) en 98%, en los últimos 30 años.

Y como si esto fuera poco, ¿se nos viene encima la escasez de hidrocarburos?

Actualmente, los combustibles fósiles (petróleo, gas y carbón) proveen el 84% de la demanda energética, contribuyendo el crudo con el 36% (figura 3).

Noten las modestas contribuciones de nuclear más hidroeléctrica (8%) y de las renovables (8%). Estas últimas

constan de biomasa en su casi totalidad (que causa deforestación y es la más contaminante en su combustión) ya que las contribuciones solares y eólicas son ínfimas (se reparten 4% de la de los renovables, o un mísero 0,3% del total).

Con el sostenido aumento de la demanda, ¿podrían o deberían los combustibles fósiles seguir dominando la mezcla? Si no fuere así, ¿de dónde provendrá la diferencia? Los combustibles fósiles deberían seguir dominando el menú energético en el corto y mediano plazo, dadas sus ventajas de precios. Sin embargo, dicha dominación se ve acotada por dos condiciones de contexto: (1) como vimos, hay presiones sociales para “cobrarles” las externalidades ambientales y militares aumentando entonces su precio, haciéndolos demasiado valiosos para ser quemados y, consiguientemente, aumentando las chances comerciales de formas alternativas de energía y (2) parece que finalmente se tiene en cuenta el pico de capacidad. Este último factor, aunque bienvenido por razones ecológicas, señalaría una preocupante posibilidad de severo déficit energético en el futuro mediano. Al margen, esta percepción de maduración y potencial escasez contribuiría a explicar la respuesta estratégica de las consolidaciones empresarias del sector.

Hago la salvedad de que la teoría de la escasez, sustentada por Simmons y Campbell y muchos otros, no cuenta con el aval de otros analistas (como Lynch), del IAEE y de las súper-petroleras (oficialmente). Es importante resaltar que no es que “se acabe” el petróleo convencional, sino que deja de crecer, llega a su pico y comienza a declinar. Producimos hoy día, aproximadamente, 75 MMbo/d y la capacidad sigue creciendo. Sin embargo, los 14 yacimientos con mayor producción actual (20% del total global) tienen una edad promedio de 44 años (Simmons). Era cierto, entonces, lo de la exploración inteligente de una distribución lognormal (figura 4).

Estos viejos y nobles gigantes vieron su pico de descubrimientos en los años ‘60 y casi no declinaban, pero están empezando a hacerlo. Los campos nuevos declinan más rápidamente. Además, los resultados exploratorios son cada vez más decepcionantes para la mayoría de las firmas. Los pronósticos difieren, entonces, en el pico entre 2020 y 2050. Es decir, no se discute tanto el pico, sino su *timing*.

La mayoría de los recursos petroleros convencionales

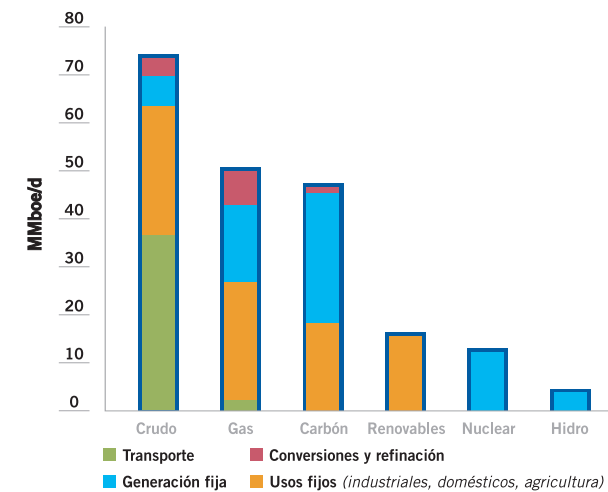


Figura 3. Energía primaria (2002)

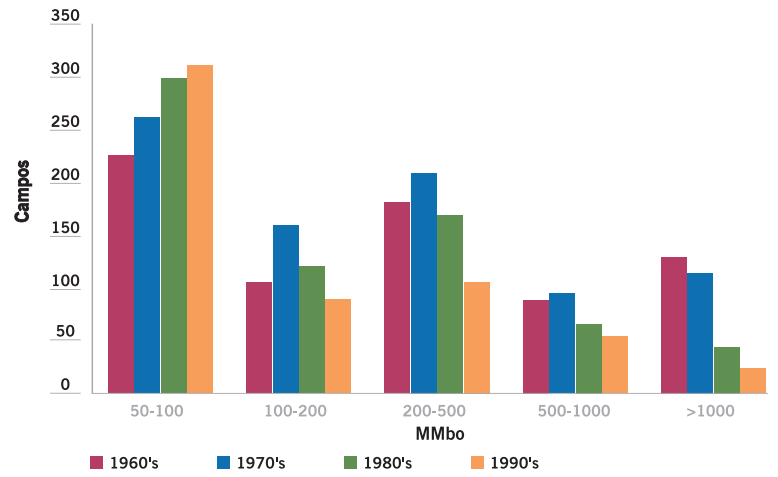


Figura 4. Historial de la distribución de descubrimientos de crudo

baratos subdesarrollados y subexplorados están en naciones de acceso vedado o bajo mayores riesgos geopolíticos, lo que genera interesantes dinámicas. Los gigantes dormidos de bajo costo estarían predominantemente en Medio Oriente, donde el “Triángulo de Oro” alrededor del Golfo Pérsico, concentra el 60-70% del crudo “barato” del planeta, pero en manos estatales y sin acceso a la empresa privada. A los ojos de los cínicos, eso haría a los países allí ubicados candidatos a ser “liberados” y que sus industrias petroleras sean privatizadas.

La tecnología petrolera ha aumentado espectacularmente (perforación horizontal, sísmica 3D, aguas profundas) pero no lo suficiente para eliminar el riesgo exploratorio (aunque bajó el costo de descubrimiento) o acotar suficientemente la incertidumbre. Los hidrocarburos no convencionales solo demorarían el pico y amortiguarían parcialmente la inevitable declinación (Campbell). El EOR para recuperar crudos pesados de arenas podría alterar la geopolítica del petróleo (Canadá 300 Bbo; Venezuela 272 Bbo, comparables a los 250 Bbo de crudo liviano de Arabia Saudita) si el precio fuera lo suficientemente alto (lo que dijimos es un *catch 22* para los EE.UU.).

Se observa también un aumento en la contribución de gas natural a la mezcla. Sin embargo, tres de los cuatro grandes productores (los EE.UU., Rusia y el Reino Unido; el cuarto es Canadá) están ya en declinación. Los gases no convencionales (*tight sands*, *coalbed methane*, *shale gas*, *LNG*, *GTL*, *CNG*) implican costos mucho más altos.

Pero en síntesis, creo que “pico o no pico”, las presiones ambientales le podrían ganar la carrera, al menos al petróleo. La Edad de Piedra no terminó por falta de piedras, sino porque apareció el bronce.

¿Hay alternativas a los combustibles fósiles?

Lamentablemente, las formas alternativas de energía están o tecnológicamente inmaduras, o necesitan tener menores costos relativos que los combustibles fósiles (precisar las externalidades del petróleo o alcanzar suficientes economías de escala). Su contribución actual es muy modesta mientras que su demanda futura sería primordial tanto en el caso de la escasez como en el de la sustentabilidad (figura 5).

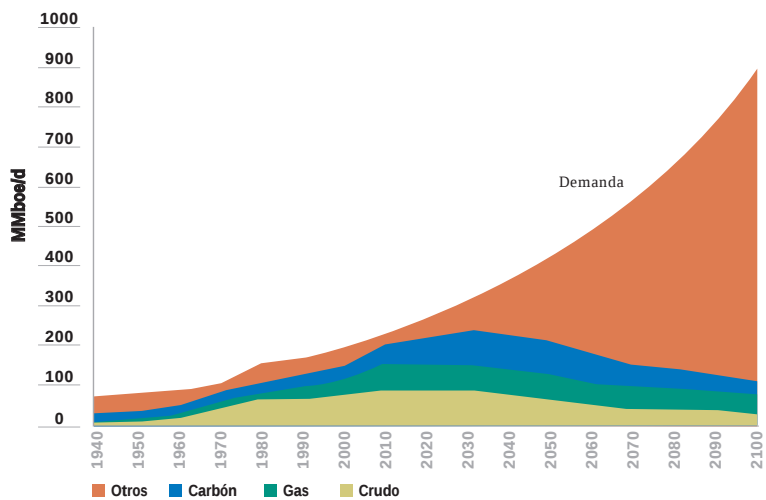


Figura 5. Déficit energético

A veces las limitaciones son simplemente de leyes físicas. El hecho es que ninguna de las fuentes alternativas de energía en su estado actual podrá llenar el déficit energético en el corto o mediano plazo. Este es un problema acuciante para la humanidad. Se requiere de un milagro, un salto cuántico y revolucionario. Se necesitan inversiones gigantescas en I&D (básica y aplicada), en la escala de un Programa Apolo o un Plan Marshall. Es decir, no se puede esperar a que el sector privado pueda desarrollar su caso de negocios, sino invocar el principio de subsidiariedad del Estado, para que este asuma su rol de actor (por ejemplo, la eficiente red de supercarreteras interestatales en los EE.UU. la construyó Eissenhauer, no el mercado). Se requiere reavivar, también, el interés de los jóvenes por las Ciencias Físicas y la Ingeniería.

Hay, sin embargo, razones para el optimismo: hemos resuelto problemas antes y tenemos, al menos, un menú diverso inicial de opciones:

- **Hidratos de gas.** A altas presiones y bajas temperaturas, el metano se hidrata establemente como $\text{CH}_4\cdot 6\text{H}_2\text{O}$. La disminución de presión o el aumento de la temperatura fuera de este punto crítico provocarían la sublimación del gas. Los depósitos son muy importantes y se encuentran a lo largo de los taludes continentales. La molécula contiene, entonces, solo aproximadamente 1/7 de su peso en metano. La tecnología está aún a 10-20 años de la aplicabilidad comercial. El problema es que no atiende al calentamiento global (igualmente seguimos quemando metano). Además, vale hacer notar que la tendencia actual al calentamiento global se auto-aceleraría al aumentar la temperatura del agua y provocar la desestabilización y sublimación de dichos hidratos (el metano es también un gas “de invernadero”).
- **Biomasa.** Si se utilizara el 50% de toda el área cultivable se generarían a lo sumo 7-10 TW. Además, en ese caso, podríamos necesitar plantas genéticamente modificadas o *frankenplants* de rápido crecimiento, lo que despierta



ansiedades sociales. No atiende tampoco al problema de calentamiento global y de las otras emisiones perniciosas.

- **Hidroeléctrica.** No alcanzaría, ya que tenemos la limitación física de encontrar suficientes locaciones con los gradientes adecuados. Sufre, además, de objeciones ecológicas. Habría 0,3 TW de capacidad instalada con potencial total de cota de 4,6 TW en todo el planeta, de los cuales 1,6 son técnicamente viables y 0,9 lo son económicamente.

- **Fotovoltaica (solar).** Los hidrocarburos son un ejemplo de energía solar transformada y acumulada. La luz solar es abundante y gratis, pero la energía solar comercial es carísima. Sería comercialmente viable si nano-celdas fotovoltaicas se pudieran aplicar, por ejemplo, con la facilidad de la pintura blanca. La energía solar comercial tiene un problema de acumulación, pero uno más fundamental de escala: tenemos 3 km² de celdas fotovoltaicas en existencia y, por ejemplo, para alimentar de energía a los

EE.UU., prácticamente el estado de Nuevo México entero (similar en extensión a la provincia de Buenos Aires o al Ecuador) debería ser un panel colector de 270.000 km²; se necesitarían unos cuatro para alimentar todo el planeta. Si todos los techos de las casas de los EE.UU. se cubrieran con paneles fotovoltaicos, se generarían solamente 0,25 TW. Se han postulado soluciones dignas de Julio Verne: (a) fabricar celdas fotovoltaicas en el espacio (más barato que transportarlas, salvo que la nanotecnología facilite los ascensores espaciales) e instalarlas allí, fuera del efecto refractario de la atmósfera y los aerosoles, conectadas a Tierra con nanomateriales superconductores, (b) instalarlas en el lado claro de la Luna y transmitir la energía por medio de microondas, etc.

- **Eólica (molinos de viento).** Sufre de un problema similar de acumulación, escala, espaciamiento y costo unitario. De instalarse molinos en todos los lugares factibles se generarían solamente 2-3 TW.
- **Fisión (nuclear).** Suscita, a veces, reacciones emocionales respecto de la potencial proliferación de armamentos

nucleares y de su seguridad operativa (Chernobyl). Es una de las formas ecológicamente más benignas, salvo el problema de cómo disponer de los desechos radioactivos. Como resultante, se han dejado de construir nuevas plantas, mientras que se abandonan las más antiguas. Habría 1 TW disponible. Funcionaría económicamente mejor si se lograra bajar los capex. Para evitar accidentes como el de Chernobyl, en vez de reactores de agua liviana, se podrían utilizar reactores en lecho fluido, moderados con grafito y refrigerados por helio. De cualquier manera, el uranio es un recurso finito y tampoco alcanzaría para cubrir el déficit energético en el largo plazo. Pero los obstáculos no son tanto técnicos o económicos en el corto plazo, como de aceptación política.

- **Geotérmica.** Toma ventaja del gran reactor nuclear que tenemos bajo los pies e implica minar el calor de la la Tierra. El gradiente normal es de 23-25 °C/km y el geotérmico comercial es de 80 °C/ km. Enfriar 1 km³ de granito a 3000 m en 1°C equivale a 0,4 MMBoe. La capacidad actual es de 8,5 GWh, la que puede ascender a 12, por lo



que ni remotamente alcanzaría el orden de TW.

- **Fusión.** Sería como crear un Sol en la Tierra. Se tienen grandes esperanzas y, si triunfara esta idea, podría resolverse el problema de escala. Presenta grandes dificultades técnicas y alto costo. Hasta ahora, la energía producida es similar a la requerida para calentar el plasma.
- **Hidrógeno.** A pesar de que ha capturado la imaginación popular, falta mucho para que logre escala. El problema es que generarlo a partir de la electrólisis del agua (obviamente, abundante) es prohibitivo. Lo más factible es hacerlo a partir del CH_4 , por lo que seguimos dependiendo de los hidrocarburos. Entonces, tenemos dos problemas: uno de eficiencia de conversión (¿por qué pasar de $\text{CH}_4 \rightarrow \text{H}_2 \rightarrow \text{e}^-$, si se puede pasar de $\text{CH}_4 \rightarrow \text{e}^-$, directamente?) y otro de disposición del carbono. Eso sí, los vehículos híbridos logran grandes mejoras en la eficiencia.

Conclusiones

Mantengamos los dedos cruzados para que (a) se controle la explosión demográfica; (b) los países desarrollados racionalicen su consumo energético mientras que los subdesarrollados puedan mejorar su estándar de vida; (c) sigan mejorando las eficiencias energéticas de nuestras máquinas y líneas de transmisión, posiblemente gracias a la nanotecnología y la superconductividad; (d) se frenen las emisiones que contribuyen al calentamiento global, mientras que (e) las actuales y nuevas generaciones de científicos y tecnólogos encuentren alternativas viables, sin limitaciones físicas o económicas.

Más allá de la prueba científica absoluta, la elemental prudencia dicta atacar el problema de inmediato en todos los frentes posibles. El imperativo es, sobre todo, moral y los costos deberán ser asumidos. Se requiere del trabajo conjunto del mercado y del Estado. Por último, alienten a sus hijos para que estudien ciencias básicas o aplicadas; los vamos a necesitar.

Carlos A. Garibaldi es Ingeniero Químico (UNBA), M.S. en Ingeniería del Petróleo (U. of Tulsa) y MBA (Rice U.). Durante su carrera se ha desempeñado en Amoco (ingeniero de reservorios, operaciones e ingeniero investigador), Plains Resources (vicepresidente), Arthur D. Little (gerente senior), San Jorge Internacional (presidente y COO), Chevron Latinoamérica (vicepresidente) y G&G Energy Consultants (socio). Actualmente es vicepresidente senior de The Scotia Group, y presidente del IAPG, Houston Section.

Fuentes Bibliográficas

International Energy Agency: “World Energy Outlook 2002”.

Sir Phillip Watts (Shell): “Prudence pays – practical steps to bridge conflicting views on climate change”, marzo 2003.

Dr. Anthony Owen (U. of New South Wales): “Externalities and subsidies”, IAEE Newsletter, 4Q 2003.

Sarah-Jane Piggott (Shell): “Is sustainable development attainable?”, PSC Roundtable, noviembre 2003.

Dr. Malcom Gillis (Rice U.): “The economics of sustainable development”, marzo 2003.

Colin Campbell: artículos varios.

Bob Williams: “Peak oil, global warming concerns opening new window of opportunity for alternative energy sources”, O&GJ, 18 agosto 2003.

Shell: varios casos de estudio sobre DS y su informe anual de 2002.

BP: informe anual de 2002.

Notas de las presentaciones siguientes durante la conferencia “Energy and Nanotechnology”, Rice U., mayo 2-4 2003:

Dr. Richard Smalley (Rice U.; Premio Nobel de Química 1996): “Our energy challenge”

Matthew Simmons: “Challenges for O&G: can the miracle continue?”

Dr. Martin Hoffert (New York U.): “Energy implications of global climate stabilization”

Dr. Wolfgang Schollnberger (BP): “Energy and nanotechnology”

Dr. Yoram Shoham (Shell): “Geothermal”

Dr. Walter Chapman (Rice U.): “Methane hydrates”

Dr. Julio Friedman (U. of Maryland): “Carbon sequestration”

Dr. Nathan Lewis (CalTech): “Earth Solar”

Dr. John Mankins (NASA): “Space solar”

Dr. Ernie Moniz (MIT): “Fission”

Dr. Robert Goldston (Princeton U.): “Magnetic Fusion”

Jeremy Rifkin (autor): “The Hydrogen Economy”