

El Hidrógeno: Consideraciones sobre su aplicación

La utilización de hidrógeno como elemento transportador o portador de energía es uno de los desafíos más fascinantes de la ingeniería mecánica. Su conversión en calor o energía es, en principio, simple y limpia. Cuando se quema el hidrógeno con oxígeno puro se forma agua y no se genera ningún tipo de contaminante. El agua se devuelve a la naturaleza de dónde provino originalmente.¹

El hidrógeno, el elemento químico más común del planeta, no existe en la naturaleza en forma pura. Tiene que ser generado, o producido, separándolo de compuestos químicos preexistentes. Puede producirse a partir de agua por electrólisis, de hidrocarburos por reforming o por craqueo térmico, o de otros portadores de hidrógeno siguiendo otros procesos químicos.



Ing. Alberto H. Muñiz

Ingeniero Mecánico UBA
Docente del Departamento
de Mecánica FIUBA

INTRODUCCIÓN

Las energías limpias como la electricidad solar, eólica o hidráulica pueden usarse para producir hidrógeno también en forma limpia. El hidrógeno, hasta hoy, parece ser el único eslabón importante entre la energía renovable y la energía química.

El hidrógeno ha fascinado a generaciones de personas con buenas intenciones. Los fomentadores de demanda de hidrógeno afirman que una "Economía a Hidrógeno" será la solución a todos los problemas de energía y ambiente. Se han formado sociedades de hidrógeno para la promoción de esta meta por publicaciones, reuniones y exhibiciones. ¿Pero las características físicas de este elemento han sido consideradas apropiadamente?

Con este artículo se intentará echar una mirada más íntima a algunos de los aspectos de la energía relacionado con el uso del hidrógeno como portador de energía. La "Economía a Hidrógeno" no sólo involucra la producción y uso del hidrógeno, sino, también, todos los otros componentes de un mercado de energía como el envasado, almacenamiento, entrega y traslado.

Este mercado puede crecer si el costo consumido por el propio mercado es pequeño comparado con el precio de la energía entregada al cliente. Hoy, la energía normalmente perdida en la transmisión de

potencia, refinerías de crudo y transporte por mar y tierra de los combustibles es menor al 10% de la energía comercializada. Por consiguiente, se presentarán estimaciones de la energía exigida para operar con Hidrógeno.

Una razón importante para el interés renovado en la economía a hidrógeno es el problema del calentamiento global de la Tierra. Ochenta por ciento de la energía comercializada es proporcionada por combustibles fósiles. Hay estudios que consideran, con casi total certeza, que el uso de hidrocarburos fósiles y la emisión resultante de gases de invernadero como el dióxido de carbono causarían, un calentamiento global. Se cree que nunca ha sido más urgente encontrar recursos de energía que no causen emisión que aporte a la atmósfera mayor cantidad de gases triatómicos y/o tóxicos. A todas luces las energías renovables como el sol, el viento, el agua y la biomasa deben ser las fuentes de energía preferidas.

Hasta hoy día, esas fuentes limpias, para su aprovechamiento masivo, deben ser convertidas a energía química para su aprovechamiento. El hidrógeno es quien, aparentemente, podría proporcionar el eslabón entre ambos métodos.

Otro camino propuesto es el de continuar usando combustibles fósiles pero capturar y secuestrar el CO₂, antes de que se emita a la atmósfera acopiándolo, lue-

go, en cavidades herméticas como las marinas muy profundas, pozos petrolíferos agotados, etc. Más adelante se volverá sobre el tema.

Por encima de toda sospecha, las soluciones técnicas existen o pueden desarrollarse para una economía a hidrógeno. De hecho, hoy día se generan cantidades enormes de hidrógeno, se lo maneja, transporta y usa en la industria química. Pero este hidrógeno es un insumo químico, no un artículo de energía. La producción de hidrógeno y costes de transporte están absorbidos en el precio de los productos químicos sintetizados. O sea: El costo del hidrógeno es relativamente irrelevante con tal que los productos producidos encuentren mercado.

Hoy, el uso de hidrógeno se gobierna por argumentos económicos industriales y no por consideraciones de economía energética que hilan más fino por las implicancias que tiene en todos los aspectos de la vida humana.

Pero si se usa el hidrógeno como un portador de energía, pasa a ser importante la pregunta: **¿Cuánta energía de calidad superior se usa para envasar, manejar, guardar o transportar el hidrógeno?** El problema de energía global no puede resolverse en un ambiente de energía renovable, si la energía consumida para hacer y entregar el hidrógeno es comparable a la energía del combustible entregado. Es importante evaluar y comparar los balances de energía entre las distintas opciones a utilizar. De aquí surgen preguntas como si las opciones son tan eficaces como sea posible y hasta la de si podrá existir algún camino de utili-

zación del hidrógeno en el futuro.

De las conclusiones que surgen de este trabajo se muestra que la utilización futura del hidrógeno estará difícilmente basada en el hidrógeno puro. Personalmente creo que no hay duda que estará basado en el hidrógeno, pero que se deberá empaquetar químicamente bajo la forma de hidrocarburos sintéticos que no sean agresivos al medio ambiente.

En este artículo se presentan algunas conclusiones previas a un estudio más detallado que se publicará luego de la puesta en marcha de la planta piloto de ensayos.

LAS PROPIEDADES DE HIDRÓGENO

Las propiedades físicas de hidrógeno son bien conocidas.² Sabemos que es el más pequeño de todos los átomos. Por consiguiente, el hidrógeno es el gas más liviano. Su molécula tiene una masa de aproximadamente la octava parte de la del metano (representando al gas natural). En este estudio se considerará el valor del Poder Calorífico Superior (abreviado como Pcs). El hidrógeno tiene un valor del Poder Calorífico Superior de³:

Hidrógeno:

Pcs 142 MJ/kg (33888 kcal/kg)⁴
Pci 120 MJ/kg (28670 kcal/kg)⁵

Comparando con el metano se tiene:

Pcs 55.5 MJ/kg (13265 kcal/kg)
Pci 50.0 MJ/kg (11950 kcal/kg)

Los valores caloríficos volumétricos son (1 bar, 25°C):

Hidrógeno:

Pcs 11.7 kJ/litro (2,79 kcal/litro)
Pci 9.9 kJ/litro (2,36 kcal/litro)

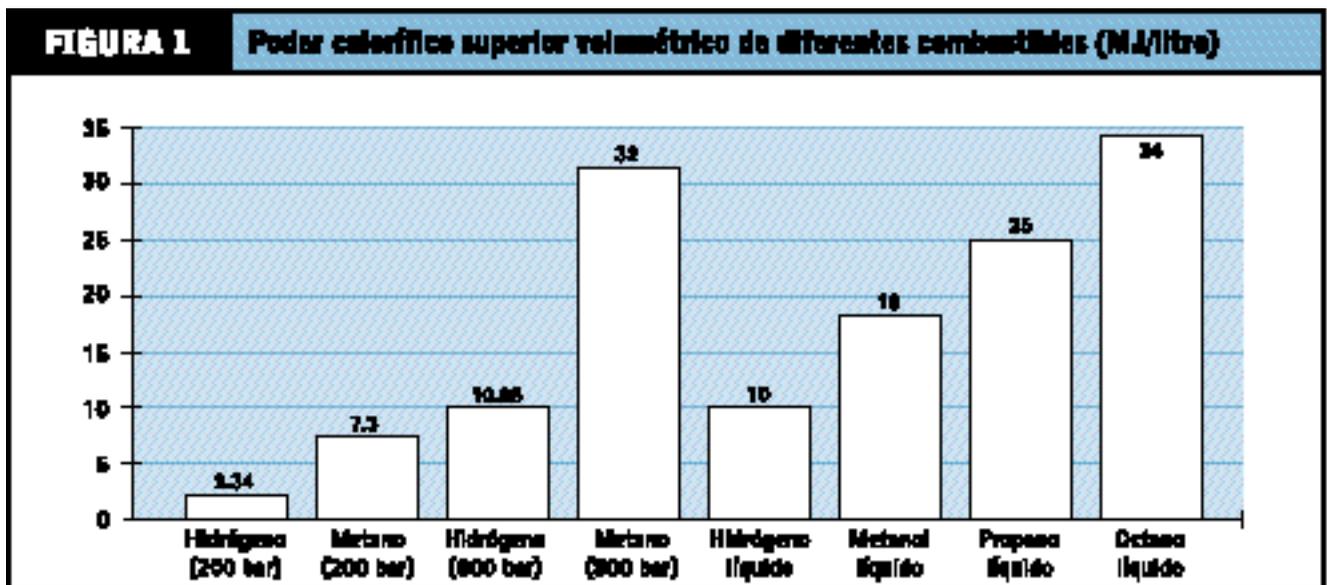
Metano:

Pcs 36.5 kJ/litro (8,72 kcal/litro)
Pci 32.9 kJ/litro (7,86 kcal/litro)

El Poder Calorífico Superior másico tiene una pequeña relevancia en el comercio del hidrógeno. El volumen disponible para los tanques de combustible siempre es limitado.⁶

Y esto no sólo es válido para las aplicaciones automotrices. Además como el diámetro de las tuberías de transporte no puede aumentarse a voluntad; para las valoraciones prácticas es más significativo usar el Poder Calorífico Superior volumétrico en lugar del másico. El hidrógeno tiene que ser compactado por compresión o por licuefacción para su almacenamiento, transporte o traslado. En la economía de energía de hoy el manejo de gas natural y los combustibles líquidos no presenta problemas mayores. **¿Pero esto también es verdad para el hidrógeno?**

La FIGURA 1 muestra los Pcs volumétricos de diferentes opciones de portadores de energía. Para un cierto volumen, a cualquier presión, el hidrógeno lleva menos energía que el metano (representando al gas natural), metanol, propano u octano (representando la gasolina). A 800 bar de presión el hidrógeno gaseoso alcanza la densidad de energía volumétrica del hidrógeno líquido. Pero la densidad de energía volumétrica del metano, a 800 bar es 3,2 veces más alta que la del hidrógeno. El metanol como portador de energía líquido común, propano y octano (representando la



gasolina) superan al hidrógeno líquido por los factores 1,7 a 3,4, respectivamente. Pero a 800 bar el hidrógeno debe contenerse en tanques de presión de alta tecnología o en estado líquido en recipientes criogénicos, mientras los combustibles líquidos se guardan bajo condiciones atmosféricas en recipientes sencillos.⁷

COSTO DE LA ENERGÍA EN UNA ECONOMÍA DE HIDRÓGENO

Dado que el hidrógeno se obtiene de un proceso químico es un transportador de energía sintético. O sea: Debe invertirse energía de calidad superior para producir, comprimir, licuar, transportar, transferir o guardar al hidrógeno. En la mayoría de los casos esta energía podría distribuirse también directamente al usuario terminal. También, en lugar del hidrógeno gaseoso, otros hidrocarburos líquidos como el metanol, o el éter dimetilico, podrían servir como portadores de energía del futuro. El carbono de biomasa o CO₂ capturado del flujo de los gases podría volverse a entregar a la molécula del portador químico esencial para que este vuelva a ser producido. El hidrógeno será generado como se explicó a partir de energía de fuentes renovables y, eventualmente, si fuese posible, de plantas nucleares limpias.

Se quiere no sólo dar énfasis a que el costo monetario del hidrógeno es importante y debe ser tan bajo como sea posible, sino también que el costo de la energía para sintetizar el hidrógeno y entregarlo al usuario final. Como se dijo antes, la economía a hidrógeno será significativa, sólo si la energía consumida para producir, envasar, acopiar y distribuirlo sea tan bajo como fuese posible comparada con la energía del gas combustible entregado.⁸

Hasta ahora, este aspecto no siempre se ha tratado apropiadamente. Pero debido a las propiedades físicas de este gas muy liviano, la economía a hidrógeno difiere significativamente de la economía a gas natural. La energía invertida en extraer y limpiar el gas natural es pequeña comparado a su volumen de energía. ¡Cosa que no pasa con el hidrógeno!

La transición a una nueva economía de energía afectará el suministro de energía entera y al sistema de distribución. Por consiguiente, se deben discutir las opciones prominentes antes de invertir en una economía de gas de hidrógeno.

Algunos de los aspectos energéticos, más importantes, de una economía a hidrógeno se analizan aquí. El objetivo de este estudio es proporcionar una valuación de la cantidad de energía invertida para fabricar, comprimir, licuar, transportar, trasladar y acopiar al hidrógeno en el negocio de venta y compararlo a la cantidad de energía contenida en el combustible entregado y, a su vez, comparar estos resultados con análisis similares para los portadores de energía usados actualmente. A lo largo del estudio sólo serán consideradas soluciones técnicas representativas, evitándose soluciones de tecnología a desarrollar en próximos años.⁹

PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO

La energía necesaria para producir Hidrógeno

Como se explicó el hidrógeno no existe en la naturaleza en estado puro, y tiene que ser producido de fuentes energéticas como el agua y el gas natural. La síntesis del hidrógeno requiere energía.

Este proceso siempre es asociado con pérdidas de trabajo. La producción de hidrógeno por ambos procesos, electrólisis y el reforming químico, implican transformación de energía.

Se transfieren energía eléctrica o energía química de los hidrocarburos a la energía química del hidrógeno.

El hidrógeno hecho, a partir del agua, por electrólisis es la manera más intensiva de producir el combustible. Es un proceso limpio¹⁰ con tal que la electricidad venga de una fuente limpia. Menos energía se necesita para convertir a un portador de energía, rico en hidrógeno, como el metano (CH₄) o el metanol (CH₃.OH) en vapor de hidrógeno con reforming.¹¹ Como quiera que sea la energía invertida siempre excede a la energía contenida en el hidrógeno. Las pérdidas térmicas limitan la eficacia de producción de hidrógeno reformado a aproximadamente el 90%.

Por consiguiente, se suelta más CO₂ con este "desvío" del proceso que por el uso directo de los precursores del hidrocarburo. Se asumirá rendimientos del 75% para la electrólisis y 85% para el reforming. Aproximadamente 1,2 a 1,4 unidades de valiosa energía en forma de electricidad, gas natural, gasolina etc. tiene que ser invertida para obtener una unidad de energía en forma de hidrógeno. Para la mayoría de los proce-

dos las energías de las fuentes podrían ser usadas directamente por el consumidor con un servicio comparable, o aun más alto que con la transformación y a un costo menor. Además se bajarían los costos y la emisión de CO₂ global.

Transformando electricidad o hidrocarburos limpios a hidrógeno no se provee una solución universal al futuro de la energía, aunque algunos sectores del mercado de energía pueden depender de soluciones a hidrógeno. El sector de transporte puede ser uno de ellos. Debe mencionarse que es considerablemente más caro producir hidrógeno con electricidad, desde el agua, que térmicamente de los combustibles fósiles. Según Audus¹² cuesta alrededor de 5,6 u\$/GJ para producir hidrógeno a partir del gas natural, 10,3 u\$/GJ para producir el hidrógeno a partir de carbón, pero 20,1 u\$/GJ para producir hidrógeno con electrólisis.

ENVASANDO EL HIDRÓGENO

Energía necesaria para comprimir el hidrógeno

Se necesita energía para comprimir los gases. El trabajo de compresión depende del proceso termodinámico de compresión. La compresión isotérmica ideal no puede realizarse. De las potencias de compresión de gases¹³ surge que para compresores grandes la potencia requerida por el compresor es ~1,75 x Potencia de Compresión Isotérmica en máquinas grandes y ~2,5 veces en máquinas chicas. Dada la potencia de los motores eléctricos utilizados, se puede suponer un rendimiento del 85% con lo que la potencia consumida, en forma de energía, oscilará entre 2,1 y 3 veces la energía de compresión isotérmica.

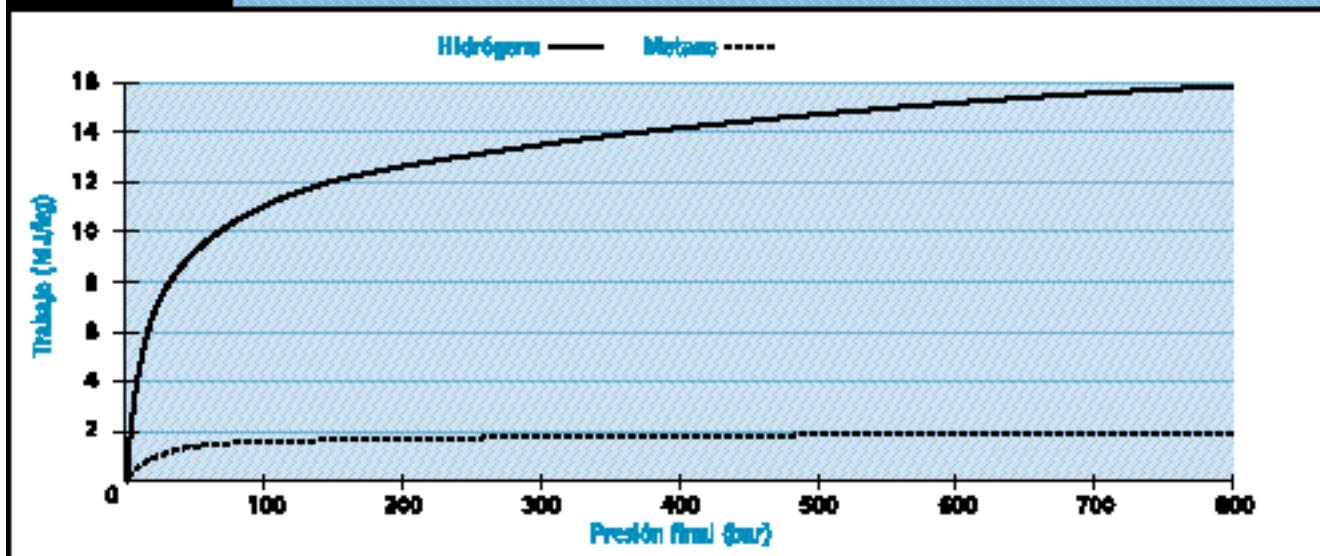
$$\therefore \text{Trabajo de compresión} = 2,1 \times p_1 \times V_1 \times \ln \left(\frac{p_2}{p_1} \right)$$

Los volúmenes de 1 kg de sustancia son:
Hidrógeno Vo = 11,11 m³/kg
Metano Vo = 1,39 m³/kg
 para ambos po = 1,0135 bar

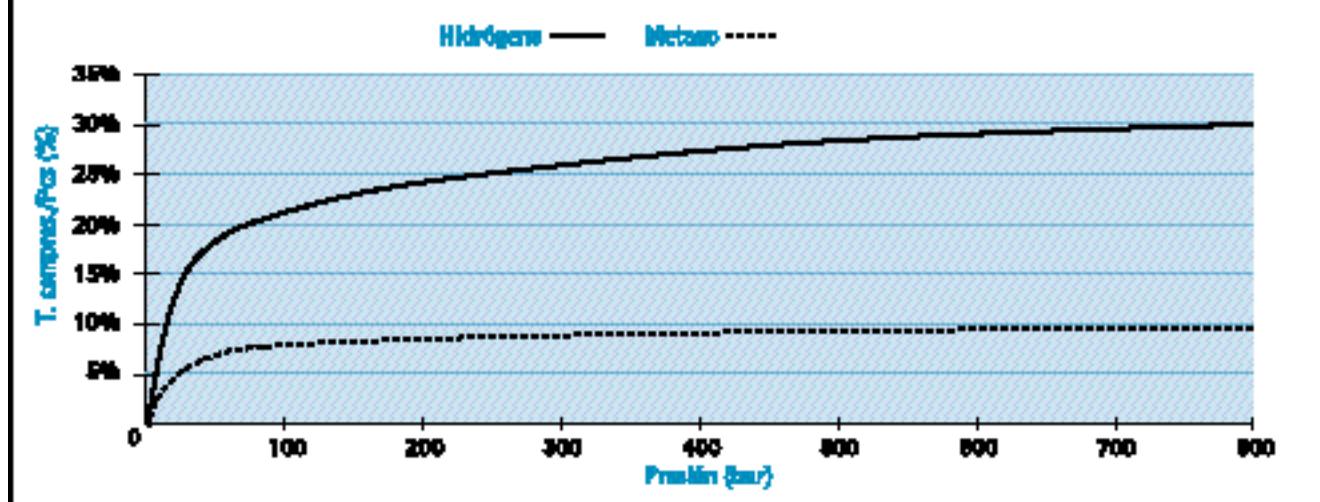
La FIGURA 3 muestra la cantidad total de energía necesaria gastar para comprimir hidrógeno y metano, incluyendo compresor, motor eléctrico, grupo generador, transformadores y transmisión eléctrica en alta tensión y en baja, ambas a corta distancia.

La energía necesaria para licuar el hidrógeno

Como se verá se necesita aun más

FIGURA 2**Trabajo necesario para comprimir 1 kg****FIGURA 3****Porcentaje de energía total consumida para comprimir el gas**

Rendimiento medio del equipo generador de la potencia para la compresión = 37% (Equipo + alternador + transmisión corta)



energía para condensar el hidrógeno por licuefacción criogénica. Teóricamente sólo se necesitarían extraer unos 4MJ/kg para enfriar el hidrógeno a 20K (-253°C) y hacerlo líquido a presión atmosférica. Pero este proceso de enfriamiento es sumamente ávido de energía. La eficacia límite o de Carnot, a estas temperaturas, apenas es de solo un 7%. Aquí se usarán valores de requerimiento de energía reales de licuefacción de hidrógeno en plantas, según datos entregados por Linde Kryotechnik AG. Esta compañía es una empresa proveedora de equipos y líquidos criogénicos.

El consumo de potencia, en plantas grandes, se estima entre los 50 y 60 MJ/kg. Al considerarse el rendimiento total de

planta energética (37%) queda un consumo de energía entre 135 y 162 MJ/kg.

Al referir esta energía al valor del Pcs. queda que se consume entre el 95% y el 115% del valor energético del hidrógeno.

Dicho de otra manera con la licuefacción se gasta tanta o más energía en licuar el hidrógeno como la bruta que se puede obtener de ese líquido. O, expresado de otra manera, se gastaría el doble de la energía mecánica obtenible en un motor térmico común.¹⁴

El requisito de energía para la licuefacción es considerable. Como se explicó, para una capacidad de la planta de 100 kg de hidrógeno líquido por hora se consumen, aproximadamente 60 MJ de energía eléc-

trica para licuar 1 kg de hidrógeno. La energía específica sube al disminuir el tamaño de la planta. El mínimo teórico, para el hidrógeno, es de aproximadamente 40 MJ por kg.

Uno de los problemas que tiene el almacenamiento por licuefacción, y que generalmente tampoco se tiene en cuenta, es el hecho que los termos deben mantenerse en ebullición para poder mantener la temperatura baja. Con termos en buenas condiciones puede estimarse la pérdida de energía en el orden del 1 al 2 % diario. Dicho en otras palabras a los dos o tres meses se puede considerar que se perdió la totalidad de la energía almacenada.

La pérdida permanente de hidrógeno,

además, es una invitación permanente a un accidente explosivo.

La energía necesaria para guardar el hidrógeno en hidruros

A pesar de los años desde que esta idea ha sido lanzada, en este momento, sólo puede presentarse una valoración generalizada. Se conocen dos métodos para el almacenamiento de hidrógeno: el físico (por ejemplo la adsorción en hidruros metálicos) y el químico. (Formación de hidruros de metal alcalino). Hay muchas opciones para ambos tipos de almacenamiento de hidrógeno.

Esto hace difícil de presentar números. Pero, independientemente del método a utilizar, nos podemos permitir algunos enunciados cautelosos.

Las leyes de la naturaleza se aplican también a este tipo de almacenamiento de hidrógeno. En el caso químico, una cantidad sustancial de energía se necesita para combinar el hidrógeno con los metales alcalinos. Esta energía se suelta cuando el hidrógeno se libera del compuesto. El calor generado tiene que ser quitado enfriando y, normalmente, este calor se pierde.

Para el almacenamiento físico del hidruro, el gas de hidrógeno debe presurizarse. De la energía requerida para la condensación se ha tratado en el párrafo anterior. La energía de compresión se pierde como calor durante el proceso de compresión. También, se necesita la calefacción externa para liberar el hidrógeno del hidruro metá-

lico de almacenamiento. Según Winter¹⁵, los hidruros metálicos pueden guardar hasta alrededor de 55 a 60 kg(H₂)/m³. Comparando estos valores con los 71 kg(H₂)/m³ para el hidrógeno líquido o comprimido a 800 bar.

Debe tenerse en cuenta, como comparación, que en un metro cúbico de metanol se contienen 100 kg de hidrógeno. O la energía de 128 kg de hidrógeno en combustión directa.

El almacenamiento del hidruro de hidrógeno no es por ninguna razón, un proceso de poco consumo de energía, y, en una primera aproximación, puede tratarse como una condensación y una evaporación del hidrógeno.¹⁶ Como se expresó, hoy día, aun no se puede presentar algo más que algunos números generalizados. En realidad es un proceso que no aparece como una realidad en un plazo breve.

LA ENTREGA DEL HIDRÓGENO

Energía necesaria para entregar Hidrógeno por transporte por carretera

Una economía a hidrógeno involucraría el transporte de hidrógeno con camiones.

Hay otras opciones para una infraestructura de hidrógeno, pero el transporte carretero siempre jugará un papel importante, sea para despachar a localidades remotas o proporcionar el combustible de reposición para rellenar a las estaciones ante

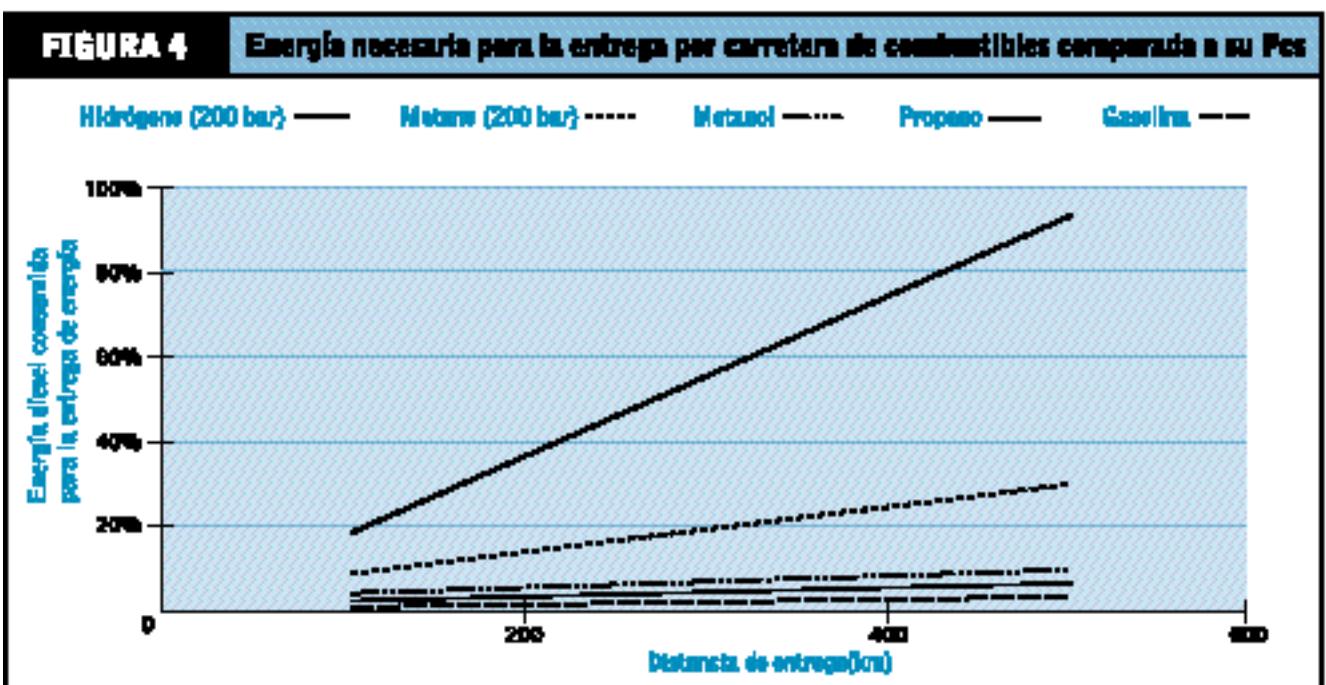
la demanda.

El análisis comparativo está basado en información extranjera¹⁷ por carecer este autor de datos nacionales. Se asumen las siguientes hipótesis: El hidrógeno se lleva a 200 bar, el metano a 200 bar, metanol, propano y octano (representando la gasolina) en forma líquida. Todos se transportarían en camión desde la refinería o planta de hidrógeno al consumidor que es una estación de Servicio. La entrega de hidrógeno líquido no es considerada en este momento para este uso por la necesidad de mantenerlo con pérdida permanente lo que implica un grave peligro. En planta es posible porque se pueden recuperar las pérdidas.

En todos los casos, los camiones considerados tendrán un peso bruto de 40 toneladas, en buen estado de mantenimiento, con sus tanques convenientes. Se considerará que, a carga completa los camiones consumirán 40 kg de Diesel cada 100 km. Esto es equivalente a 1 kg por tonelada cada 100 km.

En principio parecería posible utilizar estaciones de servicio de gas natural comprimido con, conceptualmente, pocos cambios. Habría que resolver algunos problemas de adaptación en cuanto a lubricación, tanque general de almacenaje, etc.

Cada 40 toneladas brutas de camión se llevarían las siguientes cantidades de combustible. Para el metanol, la carga útil sería de aproximadamente 25 t lo que equivaldría a 4000 kg de H₂. Con octano también se transportarían 25 t lo que equivaldría a



8500 kg de H₂. Con el propano se transportarían unas 20 toneladas, debido a la masa del tanque presurizado, lo que equivaldría a unos 7100 kg de H₂. A 200 bar de presión un camión de 40 toneladas puede transportar, aproximadamente, 3,2 toneladas de metano, lo que representan 1250 kg de H₂. Pero, con hidrógeno sólo se podrían llevar 320 kg de H₂. Ésta es una consecuencia directa de la baja densidad del hidrógeno, así como el peso de los vasos de presión y armaduras de seguridad.

Se presentan los resultados de este análisis en la siguiente figura original de Elliason y Bossel. La energía necesaria para transportar cualquiera de los tres combustibles líquidos es bastante pequeña. Permanece debajo de 5% de la energía del Pcs para una distancia de entrega de 500 km. Más energía se necesita para transportar el metano en camión. Pero el consumo de energía relativo se pone inaceptable para el hidrógeno a casi cualquier distancia.

La nota siguiente puede servir para ilustrar las consecuencias de esto. Una estación de servicio de tamaño mediano fácilmente venderá 25 toneladas de combustible por día. Este combustible de entregarse con camiones gasoleros de 40 toneladas significaría un camión diario. Pero se necesitarían 21 camiones de hidrógeno para transportar la misma cantidad de energía a la estación, es decir para mantener el combustible y servir al mismo número de automóviles por día.

El combustible en vehículos con celda de combustible cambiaría este número un poco, pero no considerablemente. El traslado de hidrógeno presurizado del camión a la estación de servicio toma mucho más tiempo que agotarlo. Y el servicio de transporte consumiría tanto o más que lo entregado.

La estación de servicio deberá estar, durante algunas horas por día, cerrada por razones de seguridad.

En Europa se calcula que, aproximadamente, uno de cada 100 camiones es para transportar gasolina o gasoil. Con hidrógeno, distribuido por camión se podrá ver a 120 camiones en el camino, 21 de ellos o sea el 17% estarán transportando hidrógeno.¹⁸

Además se sabe que, con los pequeños tanques de gas natural comprimido a alta presión, todos los accidentes que han involucrado roturas y/o fisuras han sido fatales, tanto en costo de vidas humanas como de instalaciones. Solo imaginarse la explosión de un tanque de varios metros cúbicos a 200/250 bar de presión da escalofríos. Este

solo argumento hace inaceptable el método por razones políticas y sociales. A 800 bar la explosión de un tanque es, sencillamente, de consecuencias inimaginables.

La energía necesaria a entregar al hidrógeno para circular en tuberías

Las tuberías de hidrógeno existen, pero sus usuarios están acostumbrados a transportar un artículo químico de un sitio a otro de la empresa. La energía necesaria para mover el gas es despreciable en este contexto, porque los costos de energía son parte de los costos de la producción. Además las distancias y/o caudales son irrelevantes.

O sea: Se gasta lo que se necesita y el producto final debe pagar.

Esto no es así para el transporte de energía a través de tuberías. Normalmente, se instalan compresores, o centrales de bombeo, a intervalos regulares para facilitar el movimiento del gas natural. Estas bombas dan energía de movimiento debido a energía tomada del flujo de gas transportado. Aproximadamente se usan 0,2% del gas natural cada 100 km para dar energía a los compresores que mantienen el transporte del gas.¹⁹

La valoración de la energía consumida para mover el hidrógeno, a través de las tuberías, debe estar basada en una comparación con las tuberías de gas natural con las que se tiene vasta experiencia. La comparación se hace para flujos de energía iguales, es decir la misma cantidad de energía que se entrega al cliente a través de la misma tubería en la forma de gas natural o hidrógeno.

Pero se establece bien, sin embargo, que las tuberías existentes no pueden usarse con hidrógeno, debido a las pérdidas de difusión, el carácter quebradizo que toman ciertos materiales de construcción y sellado, incompatibilidad de lubricación de la bomba con el hidrógeno y otros problemas técnicos

La potencia requerida para el bombeo N [W], en una primera aproximación, se da por:

$$N = V_0 \times \Delta p = A \times v \times \Delta p = \frac{\pi}{4} \times D^2 \times v \times \Delta p = \frac{\pi}{4} \times D^2 \times v \times \frac{1}{2} \times \rho \times v^2 \times \zeta$$

$$\text{donde } \zeta = 0,31164 / Re^3$$

$$\text{y } Re = \frac{v \times D}{\nu}$$

Los símbolos tienen el siguiente significado:

V₀ Flujo volumétrico [m³/s]

- A Sección normal de la cañería [m²]
- v Velocidad del gas [m/s]
- Δp Caída de presión [Pa]
- D Diámetro de tubería [m]
- ρ Densidad del gas [kg/m³]
- ζ Coeficiente de resistencia [-]
- Re Número de Reynolds
- n = 0.25 para flujo en cañerías de gas con régimen turbulento²⁰
- ν Viscosidad cinemática [m²/s] = h/r

Además, el flujo de energía, a través de la tubería, Q [J/s] se da por:

$$Q = V_0 \times \rho \times Pcs$$

donde Pcs es el valor del poder calorífico superior del gas transportado.

Combinando las ecuaciones anteriores se puede obtener la potencia teórica de bombeo N_{H2} para el hidrógeno y N_{CH4} para el metano:

Dado que las bombas funcionan continuamente, la potencia también representa el valor de consumo de energía.

Debido a que la densidad de energía volumétrica del hidrógeno es baja, la velocidad de flujo debe aumentarse al triple. Por consiguiente, la resistencia al flujo aumenta, pero el efecto se compensa parcialmente por las diferencias de viscosidades. Aun así se necesita, aproximadamente 4,6 veces más energía para mover el hidrógeno a través de la tubería que se necesita para el mismo transporte de energía con gas natural.

Los resultados de este análisis muestran que mientras el consumo de energía para el metano (representando al gas natural) parece razonable²¹, la energía necesaria para mover el hidrógeno a través de las tuberías, de este tipo de distribución, de hidrógeno es muy alta. El valor de consumo, en lugar del 0,2%, llegaría a casi el 1,0% del flujo de hidrógeno cada 100 km para dar energía a los compresores. Por ejemplo para una tubería, desde Río Gallegos a Corrientes (~3500km), llegaría sólo el 60 al 65% del hidrógeno alimentados en el Sur en lugar del 92 al 95% transportando metano. (VER ANEXO 1)

Otro de los problemas no considerados normalmente es que, a las presiones utilizadas normalmente en los gasoductos (70 a 120 bar) el hidrógeno tiene la octava parte de la densidad del gas con lo que para comprimirlo se necesita que los compresores tuviesen más rodetes que los de metano. Los rendimientos de estos compresores bajaría entre un 10 y un 30 %. Como quiera que sea habría un mayor costo de inversión.

La energía necesaria para generar el Hidrógeno para suministrar a las estaciones de servicio

Una opción para proporcionar el hidrógeno a las estaciones de servicio y dispersar los depósitos, sería generar in situ al gas por electrólisis. De nuevo, se compara la energía necesaria para generar y comprimir el hidrógeno, con este esquema, a la energía del Pcs del hidrógeno entregado a los clientes locales.

El hidrógeno obtenido reformando el gas natural no se considera por razones de complicación de la instalación, seguridad requerida y obvias ventajas de la utilización directa del gas natural.

El análisis se hace para obtener la energía de hidrógeno equivalente a la del combustible convencional necesario para servir 100 a 2,000 vehículos convencionales, por día, a una sola estación de gas.

Cada automóvil o camión acepta, en promedio, 60 litros de gasolina o diesel. Por lo tanto el equivalente de energía de hidrógeno sería aproximadamente de 1700 a 34000 kg de H₂ por día para 100 a 2000 vehículos, respectivamente.

La eficiencia de la electrólisis varía de 70 a 85% para equipos como los que se considera aquí, destinados a servir entre 100 y 2000 vehículos por día. Además se debe tener en cuenta que, también, ocurren pérdidas en las líneas, en la conversión CA-CC, en los equipos de regulación y control, etc. Entre 4 y 73 MW de potencia se necesitan para hacer el hidrógeno por electrólisis. Se necesita, además, potencia para preparar el agua (0.1 a 2.2 MW) y para la compresión del hidrógeno a 200 bar (0.4 a 6.MW). Por lo tanto debe proporcionarse entre 5 y 81 MW²² de potencia eléctrica, a la estación de servicio, para generar el hidrógeno para los 100 a 2000 vehículos por día.

Puede ser interesante considerar que se consumirían diariamente entre 15 y 305 m³ de agua. Considerando el agua perdida para su tratamiento la cifra sube a 20 a 400 m³ diarios, lo que significan de 14 a 277 litros por minuto, provistos en forma continua y durante las 24 horas.

La energía total necesaria para generar y comprimir el hidrógeno, a llenar en las estaciones de servicio, excede la energía (en forma de Pcs) del hidrógeno entregado en, por lo menos, un factor de 1.5. La disponibilidad de electricidad puede cuestio-

narse ciertamente. La generación de hidrógeno para llenar las estaciones de servicio haría que la capacidad de generación de las mismas debería aumentar al triple. No menor sería la inversión en tendido de redes, las que se deberían reforzar en la misma proporción.²³

LOS LÍMITES DE UNA ECONOMÍA DE HIDRÓGENO

Los resultados de este análisis indican la debilidad de una "Economía a puro hidrógeno." Todos los problemas se relacionan directamente a la naturaleza de hidrógeno. La mayoría de los problemas no puede resolverse por la investigación y desarrollo adicional. Tenemos que aceptar que el hidrógeno es el más liviano de todos los gases y, como consecuencia, sus propiedades físicas son incompatibles con los requisitos de la energía comercial.

La producción, envasado, almacenamiento, traslado y entrega del gas, es el componente clave de la economía. La humanidad no puede permitirse el lujo de gastar la energía por metas idealistas, pero deberá buscar soluciones prácticas y seleccionar las mejores. Todo indica que la solución "Hidrógeno Puro" parece ser inaceptable.

Pero el grado de pérdida de energía depende del camino escogido. El hidrógeno generado con electricidad solar recogida en la azotea y guardado a baja presión en tanques estacionarios, puede ser una solución viable para edificios privados. Por otro lado, soluciones como la del hidrógeno generado en el desierto de Sahara, transportado a través del Mediterráneo en tuberías, o licuado para el transporte por mar, y localmente distribuido por camiones no es una solución aceptable y no puede tomarse, en absoluto, en serio.

La cantidad de energía perdida en el proceso, no justifica el esquema. Pero hay soluciones entre estos dos extremos, aplicaciones a nichos económicos, casos especiales o instalaciones de lujo. Por ejemplo, quemar el hidrógeno en el mismo sitio donde se produce, como propuso la Compañía noruega Norsk Hydro hace algunos años, probablemente fuese una solución potable. Simplemente porque no hay transporte ni almacenamiento involucrado.

Norsk Hydro propuso separar el gas natural proveniente del Mar del Norte, en la costa, en hidrógeno y dióxido de carbono. Luego secuestrar el dióxido del carbono y

guardarlo en el Mar Norte, en pozos petrolíferos agotados. Luego quemar el hidrógeno en una planta de energía para hacer electricidad limpia.

Como se declaró al principio, el hidrógeno puede ser el único eslabón entre la energía física de las fuentes renovables y energía química. También es el combustible ideal para los dispositivos de conversión de energías limpias como las celdas de combustible.

Pero el hidrógeno no es el mejor o ideal portador de energía entre las fuentes primarias y los usuarios terminales a distancia. Las nuevas soluciones deben ser consideradas como puente comercial entre la electrólisis del hidrógeno y el consumidor de hidrógeno.

LA ECONOMÍA DE ENERGÍA CON EL METANOL

El portador de energía ideal, para reemplazar a los combustibles líquidos actuales, sería un fluido con un punto de ebullición de por lo menos 60°C y un punto de solidificación debajo de -40°C. Tal portador de energía se quedaría como líquido bajo las condiciones de tiempo normales y a grandes alturas.²⁴ La gasolina, diesel y el metanol tienen buenos ejemplos de cosas alimentadas, sin problemas, por ellos. No sólo están en el uso común, porque las compañías petroleras los destilan del crudo o del gas natural, sino que, además califican, para el uso extensivo, debido a sus propiedades físicas.

Aun cuando el petróleo nunca hubiese sido descubierto, el mundo no usaría el hidrógeno sintético, pero si de combustible un hidrocarburo sintético. La gasolina, el diesel, el kerosene, etc. han surgido como las mejores soluciones con respecto a manejar el almacenamiento, transporte y uso intensivo del combustible. Con alta certeza, en un futuro cercano, se sintetizarán tales líquidos a partir de hidrógeno y carbono.

Solo la posibilidad del uso abusivo e irrestricto de reservas petrolíferas ha desactivado procesos probados y comprobados como el Fischer-Tropsch. Hoy día, en Sudáfrica, se sigue produciendo, en forma económica y competitiva, combustible sintético a base de un carbón que tiene similitudes con el de Río Turbio.

El metanol es ciertamente el candidato más serio. Lleva cuatro átomos de hidrógeno por átomo de carbono. Es líquido

bajo condiciones normales. Puede utilizar la infraestructura existente para combustibles líquidos. También, el metanol puede convertirse directamente a electricidad con Celdas de Combustible de Metanol Directas (DMFC), las Celdas de Combustible de Carbonato Fundido (MCFC), etc. Entonces, el día que esos equipos u otros que cumplan esa función, el metanol se volverá un combustible universal para las celdas de combustible y aun para muchas otras aplicaciones.

Y, tal vez, lo más importante es que el metanol NO necesita de técnicas nuevas o a aparecer en un futuro hipotético. Le alcanza, perfectamente, con las ya desarrolladas y probadas.

La síntesis del metanol requiere hidrógeno y monóxido de carbono. En una energía futura el carbono mundial saldrá de la biomasa de las plantas, de pérdidas orgánicas, de anhídrido carbónico capturado químicamente proveniente de altos hornos, hornos de calizas, etc. Típicamente, la biomasa tiene la proporción ideal de hidrógeno a carbono, o sea dos.

Actualmente se están realizando estudios y ensayos para utilizar la basura orgánica domiciliaria como fuente posible de metanol. Algunos resultados previos pare-

cen presentar resultados auspiciosos.

Todo indica que el carbono de la biofera puede volverse un elemento importante para un esquema energético sustentable. En lugar de convertir la biomasa en hidrógeno, puede agregarse hidrógeno de fuentes renovables a la biomasa para formar el metanol. Los átomos de carbono deben quedar limitados, dentro de lo que sea posible, a la cadena de energía para evitar su aumento.

El carbono se devolverá a la atmósfera (reciclados) después del uso de la energía. El metanol sintético es la más brillante entre las varias opciones a ser consideradas para la planificación de un futuro de energía limpia y sustentable.

Se ha demostrado que es tiempo de cambiar la atención y los gastos de investigación desde una Economía a Hidrógeno a una a Metanol y dirigir mano de obra y recursos a aprovechar las soluciones técnicas disponibles actualmente para un futuro de energía sustentable, caracterizado por ciclos naturales agua y CO₂ o hidrógeno y carbono. [n](#)

ANEXO 1

CONSIDERACIONES SOBRE EL DIÁMETRO DE LOS GASODUCTOS

Va de suyo que se podría aumentar el diámetro de las cañerías de los gasoductos para bajar las pérdidas de energía por bombeo y lograr mantener el mismo porcentaje de pérdidas que cuando se envía gas natural.

Considerando, además las pérdidas por baja del rendimiento por tener que usar compresores más complejos resultaría la necesidad de duplicar el diámetro de la cañería.

Esta solución lo que aumenta es el costo de la instalación. El precio de la cañería se cuadruplicaría²⁵, así como el precio de los accesorios y bombas. La zanja y el revestimiento duplicarían el precio.

De todas estas consideraciones se tendría que el gasoducto triplicaría el precio con lo que, si bien se rebajarían los costos de bombeo subirían los financieros obteniéndose resultados similares.

- 1- La combustión del hidrógeno, excepto en pocos casos, se hará con aire en lugar de oxígeno puro. El nitrógeno del aire, en presencia de la alta temperatura de combustión del hidrógeno, será responsable de la generación de óxidos nitrosos y nítricos que, a su vez, serán responsables de la aparición de ácido nítrico y nítrico en el ambiente. Pensar que puede haber una combustión totalmente limpia es una fantasía.
- 2- Handbook of Chemistry and Physics, National Bureau of Standards, etc.
- 3- Valores extraídos del "Manual del Ing. Químico" de Perry y del "Synthetic Fuels" de Probst & Hicks. Ambos de Edit. Mc Graw Hill.
- 4- Pcs: Poder calorífico superior. Este nombre se usa indistintamente para el másico [MJ/kg], [kJ/kg] [kcal/kg], etc. o para el volumétrico [MJ/m³], [kJ/m³], [kcal/m³], etc. Excepto que pudiese haber confusión no es necesario aclarar cual se está usando. Modernamente suele llamarse como HHV (Higher Heating Value)
- 5- Pci: Poder calorífico inferior. Modernamente suele denominarse como LHV (Lower Heating Value). Ver también nota anterior.
- 6- Aun un simple tanque grande de petróleo, sin consideraciones especiales, construido de acuerdo a API 650, tiene un precio, instalado con accesorios y conexiones, del orden de los 50 u\$/m³ de capacidad. A esto se le debe sumar el precio del terreno, bombas, valor de la cantidad mínima de combustible no aprovechable que queda en el fondo, etc.
- 7- En los tanques a alta presión es común utilizar aceros u otras tecnologías especiales. También se han realizado tanques con materiales como fibras de vidrio y/o de carbono, filler o entramados de cuerda de piano, etc. En estas soluciones es crítico el problema de la fatiga. Ha habido varios accidentes por esta razón.
- 8- Dicho en otras palabras: Nos estamos refiriendo a la cantidad de combustible utilizado para entregar una unidad de él.
- 9- Y que generalmente resultan no tan próximos.
- 10- Llamar limpio, a este proceso, es una forma de decir pues el agua natural, antes de ser sometida a electrólisis, tiene que tener un tratamiento de preparación (filtrado, extracción de sales, etc.) que deja residuos y aguas salobres sumamente concentradas.
- 11- Los términos reforming y reformado se utilizan indistintamente y con el mismo significado.
- 12- Audus, Kaarstad & Kowal: Decarbonisation of Fossil Fuels: Hydrigen as an Energy Carrier, CO2 Conference, Boston/Cambridge 1997. Publicó: Energy Conversion Management, Vol 38, Suppl., pgs. 431~436.
- 13- Catálogos de datos de compresores de alta presión marcas: Ariel Compressors y Bauer Kompressoren.
- 14- Parece increíble el hecho que licuar el hidrógeno consuma tanta energía. Muchos autores, acostumbrados a considerar los valores de energía necesarios para licuar el aire (2,0 a 2,7 MJ/kg), no tienen en cuenta la diferencia de temperatura de condensación (90K vs. 20K) que hacen la diferencia hasta 50~60 MJ/kg necesarios en este caso.
- 15- Winter & Nitsch, "Hydrogen as an Energy Carrier", Springer Verlag.
- 16- La consideración de condensación y evaporación se debe considerar como un valor mínimo de energía en juego. La realidad oscila entre un 20% y un 300% más.
- 17- Baldur Eliasson & Ulf Bossel: "Energy Efficiency of Hydrogen Economy"; Brown Boverly (ABB) Research Center.
- 18- Posiblemente tanto en Argentina como en el resto de América la cantidad relativa de camiones para transporte de combustible sea sensiblemente mayor. Lo que haría que la cantidad de camiones en ruta creciera desmesuradamente. Y esto sin considerar la posibilidad de accidentes de camiones con combustible, que subirá en proporción a la cantidad de camiones, aunque con consecuencias mucho más graves.
- 19- YPF: Comunicación privada.
- 20- VDI Wärmeatlas, VDI Düsseldorf, Alemania 1977
- 21- Cuando se dice razonable, se dice razonable respecto a parámetros actuales de comparación.
- 22- Para estos valores de potencia se necesita aportar la energía eléctrica en media tensión (13200V o 33000V). Va de suyo que para trabajar con estas tensiones en motores, tableros, arranque motores, etc. se necesita personal sumamente preparado.
- 23- El mismo razonamiento de refuerzo de sistema eléctrico de generación y tendido de redes se aplicará de decidirse la adopción de la tracción eléctrica al área automotriz.
- 24- Y hasta, en esto, sería superior a la gasolina.
- 25- Se cuadruplica el precio porque se duplica la superficie y, además, se duplica el espesor.