



90  
AÑOS  
PONTIFICIA  
UNIVERSIDAD  
CATÓLICA  
DEL PERÚ

Federación  
Iberoamericana  
de Ingeniería  
Mecánica



## 8º CONGRESO IBEROAMERICANO DE INGENIERIA MECANICA

Cusco, 23 al 25 de Octubre de 2007

### PERSPECTIVAS DE LA GASIFICACION DE CARBON PARA LA GENERACION ELECTRICA EN CHILE, DE LA IDEA AL PROYECTO.

Alejandro Concha A.\*, Oscar Farías F.º

\*Depto. Ingeniería Industrial, Universidad de Concepción, Casilla 160-C, Concepción-Chile,  
aconcha@udec.cl

ºDepto. Ingeniería Mecánica, Universidad de Concepción, Casilla 160-C, Concepción-Chile, ofarias@udec.cl

#### RESUMEN

El desarrollo económico chileno trae consigo una creciente demanda energética. Dada la actual situación de difícil disponibilidad de gas natural y elevados precios del petróleo, la gasificación de carbones aparece como una alternativa atractiva desde el punto de vista técnico, económico y ambiental. En efecto, las tendencias mundiales en la generación de energía eléctrica apuntan hacia la utilización de ciclos combinados con gasificación integrada (IGCC) debido a su mayor rendimiento térmico y menor impacto ambiental con relación a tecnologías convencionales. Por otra parte, la oferta de carbón a nivel mundial es amplia y en particular Chile cuenta con reservas importantes en la cuenca de Magallanes con potencial para uso en procesos de gasificación.

El trabajo muestra un análisis técnico y económico para implementación de plantas IGCC (385 MWe) en comparación con alternativas convencionales, bajo diversos escenarios de precios (energéticos y tecnologías). Se describe, además, los esfuerzos desarrollados en la Universidad de Concepción para impulsar la introducción de tecnología IGCC en Chile, para lo cual se ha elaborado un plan de tres etapas: 1) desarrollo de capacidades tecnológicas, 2) análisis de la gasificación de carbones a escala piloto y proyecciones desde el punto de vista económico y social, 3) difusión y transferencia de resultados a los actores relevantes del sector energético.

**PALABRAS CLAVE:** Energía, gasificación, tecnología IGCC, carbón.

## ANTECEDENTES

Como todos los países, Chile tiene una demanda creciente de energía, factor clave para permitir el crecimiento económico necesario para su desarrollo. Hasta el año 2005 [1], la matriz energética se caracterizaba por lo indicado en la Tabla 1, representando el Gas Natural un 27,3% del consumo total de energéticos.

Tabla 1: Consumo Bruto Energía Primaria en Chile (Teracalorías)

ENERGETICO	AÑOS		VARIACION
	2004	2005	%
Petróleo Crudo	109.140	110.365	1,1
Gas natural	80.955	78.313	-3,3
Hidroelectricidad	18.614	22.616	-3,1
Leña	43.112	45.988	21,5
Biogas	0	0	
<b>TOTAL</b>	<b>281.521</b>	<b>286.049</b>	<b>1,6</b>

Fuente: Balance de Energía 2005, Comisión Nacional de Energía (CNE). [1]

El Gas Natural, a su vez, era destinado en esa época principalmente a los sectores Centros de Transformación (74%), Industrial y Minero (11,5%) y Comercial-Público-Residencial (6%). El consumo de gas natural comienza a disminuir, producto de las restricciones del suministro desde Argentina, situación que se ha ido agudizando en el tiempo, llegando al año 2007 a restricciones del orden del 90% en ciertos períodos.

En cuanto al sector eléctrico, la generación ha estado sustentada en forma importante por hidráulica y gas natural, lo que se detalla en la Tabla 2. Se puede apreciar que en el año 2005 disminuye la participación del gas natural y aumenta la de Diesel Fuel Oil y la Hidráulica con respecto al año 2004, lo que sin duda obedece a la sustitución que se está produciendo por la falta de gas.

Tabla 2: Generación Eléctrica en Chile por tipo de energético (GWh)

ENERGETICO	AÑOS			
	2004	%	2005	%
Hidráulica	20.969	42,8	25.576	50,2
Gas natural (*)	17.683	36,1	14.954	29,4
Carbón	8.895	18,2	8.371	16,4
Diesel Fuel Oil	160	0,3	1.201	2,4
Otros	1.263	2,6	836	1,6
<b>TOTAL</b>	<b>48.970</b>		<b>50.938</b>	

Fuente: Balance de Energía 2005, Comisión Nacional de Energía (CNE) [1]

Para muchos usuarios, principalmente los del sector industrial y minero, la sustitución de gas natural ha recaído en el petróleo-diesel, lo que significa un incremento en sus costos. Asimismo, los precios de la energía eléctrica tienden a aumentar, producto también de la sustitución del gas natural.

Son muchas las soluciones de largo plazo que se han estado estudiando para permitir que Chile cuente con una matriz energética más diversificada y así enfrentar con mayor seguridad y economía las fluctuaciones naturales en los mercados de los cuales provienen los energéticos. Chile importa la mayor parte de los energéticos de tipo fósiles, como el petróleo crudo, gas natural y carbón.

## PROYECTOS ENERGÉTICOS EN CHILE

En Chile se plantea que, para garantizar seguridad energética, se deberá duplicar la capacidad instalada en generación eléctrica de aquí al año 2020 [3]. Eso significa sumar 11.900 MW al sistema, a través de fuentes tradicionales y de energías renovables no convencionales (ERNCC). En el informe de cálculo de precio nudo que desarrolla la CNE [4], se considera para el caso del Sistema Interconectado Central (SIC) 10 centrales que aportarían 1.093,6 MW en el período 2007-2010, de las cuales 377 MW usarán carbón, 377 MW gas natural, 340 MW fuentes hidráulicas y 18,15 MW energía eólica. Se considera en este informe que la planta de regasificación de gas natural en construcción en Quintero estaría en operaciones el segundo trimestre de 2009.

Para el caso del Sistema Interconectado del Norte Grande (SING), el informe técnico de CNE [5] suma 400 MW en base a carbón, al año 2010. Las tablas 3 y 4 incluyen los planes de obras.

Tabla 3: Programa de Obras del SIC (en construcción) 2007-2010

Fecha de entrada	Obras en Construcción	Potencia (MW)
Octubre 2007	Ciclo combinado GNL San Isidro II (Oper. Ciclo abierto diesel)	240
Abril 2007	Central Hidroeléctrica Quilleco	70
Junio 2007	Central Hidroeléctrica Chiburgo	19,4
Septiembre 2007	Central Eólica Canela	18,15
Agosto 2007	Central Hidroeléctrica Hornitos	55
Octubre 2007	Central Hidroeléctrica Palmucho	32
Marzo 2008	Cierre Ciclo Combinado GNL San Isidro II (Ope. Diesel capacidad final)	358
Abril 2008	Central Hidroeléctrica Ojos de Agua	9
Octubre 2008	Central Hidroeléctrica La Higuera	155
Marzo 2009	Cierre Ciclo Combinado GNL San Isidro II (Ope. GNL capacidad final)	358
Abril 2009	Ciclo Combinado GNL San Isidro II Fuego Adicional (Capacidad final)	377
Octubre 2009	Central Carbón Guacolda III	135
Enero 2010	Central Carbón Nueva Ventanas	242

Fuente: Informe Técnico Definitivo, CNE, Abril 2007 [4]

Tabla 4: Proyectos recomendados para el SING

Central	Potencia Neta (MW)	Tipo	Fecha puesta en servicio	Costo Unitario de Inversión (US\$/kW)
Mejillones I	200	Térmica-Carbón	Julio 2010	1.500
Mejillones II	200	Térmica-Carbón	Julio 2010	1.500
Tarapacá I	200	Térmica-Carbón	Julio 2013	1.500
Diesel I	50	Térmica-Diesel	Julio 2014	499
Tarapacá II	200	Térmica-Carbón	Abril 2015	1.500
Mejillones III	200	Térmica-Carbón	Enero 2017	1.500

Fuente: Informe Técnico Definitivo, CNE, Abril 2007 [5]

El Gobierno de Chile realiza acciones para fomentar el uso eficiente de energía a nivel de hogares, industrias, transporte, edificios y sector público, a través de programas tales como “Programa País de Eficiencia Energética”. También se han puesto en marcha otras iniciativas que pueden ser un aporte para ampliar la capacidad de generación, diversificar la matriz energética y reducir la dependencia de combustibles fósiles. Algunas de ellas son: Biocombustibles, Energía renovables, Energía Nuclear [3].

## PORQUE LA GASIFICACION DE CARBON

Aunque no es una alternativa recurrente en los planes señalados anteriormente, la tecnología de generación de energía eléctrica en base a gasificación de carbón integrada a ciclo combinado (IGCC) tiene el potencial de reducir sustancialmente el impacto ambiental de las plantas de carbón, reduciendo las emisiones de gases contaminantes, el consumo de agua y la producción de residuos sólidos. Permite una alta eficiencia y también la separación y captura de emisiones de CO<sub>2</sub> y la co-producción de hidrógeno. Estas características hacen de esta tecnología una vía importante para lograr energía eléctrica en base a carbón, con economía, seguridad y mínimos impactos ambientales.

Los precios en alza y con alta volatilidad de petróleo y gas natural, han llevado a un interés creciente en la gasificación de carbón. Al año 2005, existían a nivel mundial 117 plantas de gasificación con 385 gasificadores, con 35 proyectos adicionales en desarrollo (diseño y construcción). De las 117 plantas, 39% generan combustible, 19% generan electricidad y 42% generan productos químicos. 49% de las plantas usan carbón y 36% usan petcoke [6].

Chile, en base a datos del año 2005, importa prácticamente el 80% del carbón, siendo los principales proveedores Indonesia (32,2%), Australia (21%), Colombia (14,1%) y Canadá (13,4%). Sin embargo, el país cuenta con yacimientos de carbón que podrían ser explotados comercialmente si las condiciones económicas lo justifican. Los principales yacimientos se ubican en Arauco, Valdivia y Magallanes, siendo esta última localización la más importante con reservas del orden de 3.500 millones de toneladas [2]. Esta fuente de carbón daría la seguridad que Chile necesita para su abastecimiento energético.

## FUNDAMENTACION ECONOMICA

Los esfuerzos que la Universidad de Concepción está realizando para impulsar la introducción de la tecnología de gasificación de carbón en Chile se fundamentan en la evaluación económica que se describe a continuación, basados en una variedad de artículos técnicos que proveen los datos necesarios.

Como se muestra en la Figura 1, se analiza la generación eléctrica a partir de una central con turbina a gas y ciclo combinado operada con gas natural licuado (proyecto en fase de construcción en Chile), con diesel (actualmente en uso) y con carbón a través de un gasificador. Se toma como caso una central existente de 385 MW de potencia eléctrica. La evaluación económica considera los siguientes datos de entrada, señalados en la Tabla 5.

Figura 1: Esquema de la comparación de alternativas

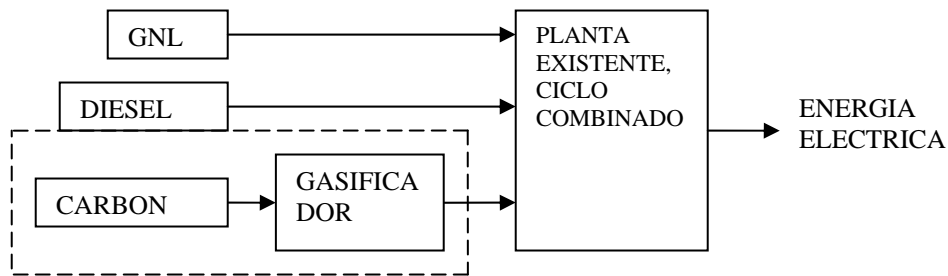


Tabla 5: Parámetros utilizados para la evaluación económica base

tasa de descuento	0,12
precio carbon	65 US\$/ton
poder calorifico carbon	6000 kcal/kg
precio de gas	6,6 US\$/mmBTU
Factor utilizacion	0,85
Precio dólar	530 \$/US\$
Eficiencia gasificador carbon	0,8
Vida util	30 años
Recuperacion inversion	0,1
Costo operación y mantencion	0,00215 US\$/KWh t gas producido
Costo inversion planta Gasificadora	423,5 US\$/KW t gas producido
precio nudo energía eléctrica	31,617 \$/KWh
precio potencia	4622,77 \$/ KW / mes
Eficiencia planta con ciclo combinado	0,52
Costo OyM parte generacion	0,0015 US\$/KWh
Recuperacion final	0,1
Costo inversion parte generacion	710 US\$/KWe
Precio gas natural licuado	8 US\$ /mmBTU
Precio diesel	640 US\$ /ton
Poder calorifico GNL	9000 kcal / m3
Poder calorifico diesel	11000 kcal / kg

Los parámetros utilizados en cuanto a “costos de operación y mantención”, “costo de inversión” de planta gasificadora se estimaron en base a Kreutz [8], como asimismo los “costos de operación y mantención” y “costo de inversión” de la parte generación eléctrica o planta de turbina a gas con ciclo combinado.

Los precios de carbón, gas natural, diesel y energía eléctrica se obtuvieron de informes del Centro de Despacho Económico (CDEC) de Chile [9] y [10], por lo tanto son precios reales para las generadoras eléctricas. Los parámetros referentes a eficiencias de gasificador, de planta IGCC fueron obtenidos de [11] y [12]

Las evaluaciones económicas realizadas, en un horizonte de tiempo de 20 años y manteniendo los precios de la energía fijos, permiten afirmar lo siguiente:

- 1 La gasificación de carbón como actividad comercial para la venta de gas de síntesis es económicamente rentable con un precio de 65 US\$/ton de carbón. Este gas puede ser competitivo a un precio de 6,6 US\$/mmBTU. Esto permitiría suplir una demanda insatisfecha en la actualidad, compitiendo con el gas natural que se pretende importar como licuado.
- 2 El funcionamiento de una planta generadora de electricidad en base a gasificación de carbón (IGCC) podría soportar un precio máximo de carbón de 107 US\$/ton, dado los precios actuales de la energía eléctrica en Chile.
- 3 Una planta IGCC funcionando con carbón al precio de 84 US\$/ton tendría la misma rentabilidad que una planta de Ciclo Combinado en base a gas natural licuado a 8 US\$/mmBTU, que es el precio estimado por expertos en Chile para los próximos años.
- 4 Una planta productora de gas de síntesis, funcionando con carbón nacional (con menor poder calorífico, en este caso considerando 5400 kcal/kg) podría pagar un precio máximo de 48 US\$/ton para competir con un gas de 6 US\$/mmBTU; o bien pagar un máximo de 82 US\$/ton para competir por un gas de 8 US\$/mmBTU.
- 5 Una planta IGCC funcionando con carbón nacional, podría funcionar soportando un precio máximo de 96 US\$/ton de carbón.

Si estos resultados se comparan con la generación eléctrica por medio de central térmica a carbón (proyectos hay varios en construcción), se concluye que esta última no es claramente conveniente. En efecto, basados en información de artículos disponibles, se sabe que una central de este tipo puede generar electricidad a un costo de 46,5 US\$/MWh con carbón a un costo de 1,5 US\$/mmBTU [7]. Estos valores, llevados a las unidades de medida utilizadas en este trabajo, significa un precio equivalente de carbón de 35,7 US\$/ton, lo que es bastante bajo en relación a los valores que en el mercado interno de Chile se están pagando. Por otra parte, de acuerdo a los precios de la energía utilizados en los cálculos, se obtiene un costo de la energía de 43,3 US\$/MWh, lo que es menor a la cifra dada en la referencia. Así entonces, se aprecia que la alternativa de generación en base a carbón con central térmica tradicional no es claramente competitiva con una planta IGCC y por lo tanto es necesario estudiar con mayor profundidad el tema.

## **PROYECTO PARA INTRODUCCION DE SISTEMAS DE GASIFICACION EN CHILE**

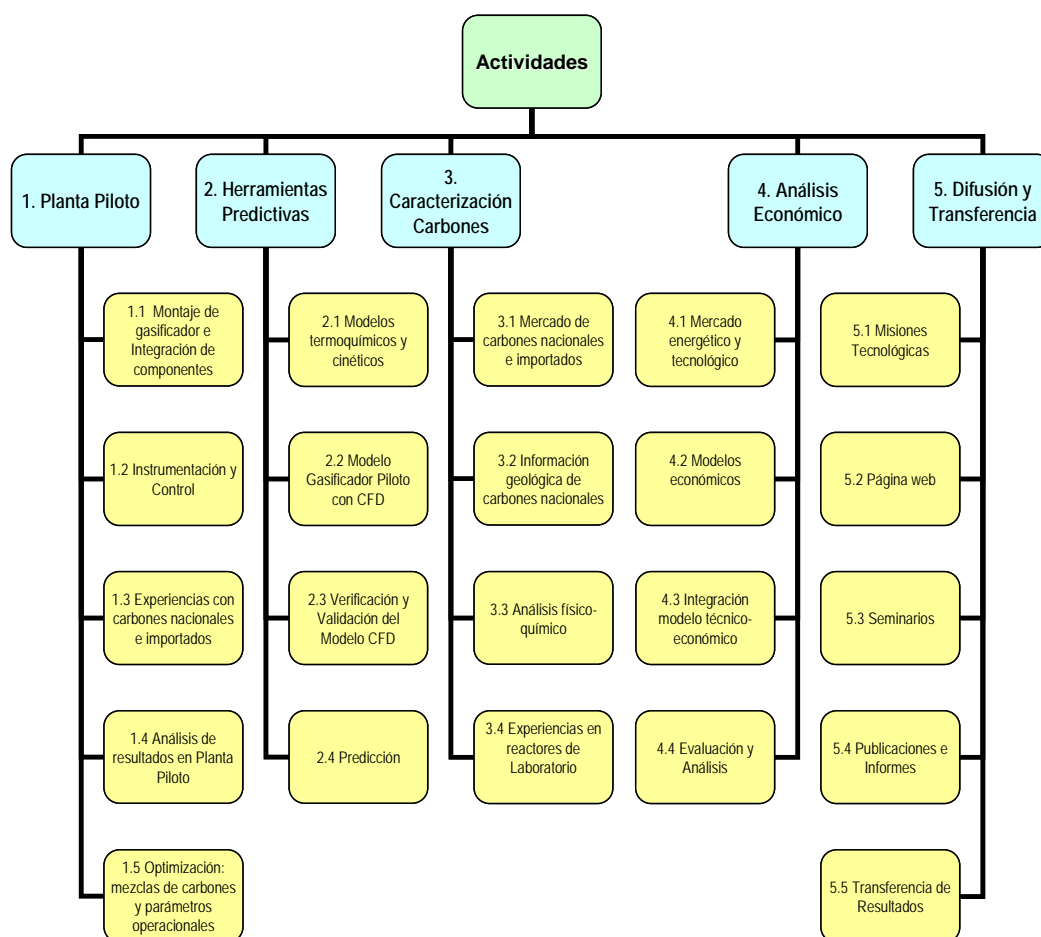
En base a los antecedentes técnicos y económicos brevemente descritos, la Universidad de Concepción (UdeC) está impulsando un proyecto de Consorcio Tecnológico, cuyo objetivo principal es el desarrollo de herramientas de apoyo a la toma de decisiones de inversión para la introducción de procesos de gasificación como alternativa de diversificación de recursos energéticos en Chile. Estas herramientas incluyen: bases de datos sobre propiedades geológicas y físico-químicas de carbones nacionales e importados, modelos de desempeño de los carbones en la producción de gas de síntesis y determinación del impacto ambiental asociado, modelos validados para la simulación de tecnologías de gasificación, y modelo de evaluación económica para la generación de energía eléctrica mediante plantas IGCC.

UdeC se encuentra abordando el desarrollo de este proyecto a través de un grupo multidisciplinario de expertos, apoyados por asesores internacionales de las universidades de Ben-Gurion (Israel) y Pensilvania (USA). Además se cuenta con un preacuerdo de colaboración con una empresa americana que pondrá a disposición del proyecto su experiencia y un gasificador piloto de 10 MWt. Por otra parte, dado el impacto positivo en las regiones donde existen yacimientos carboníferos, el proyecto cuenta con la colaboración de entidades gubernamentales (CORFO, Secretaria Ministerial de Energía y Minería en regiones del Bio Bio y Magallanes, entre otras) y de Centros de Investigación tales como CERE de la Universidad de Magallanes y CIMM (estatal).

Para establecer un centro de conocimientos en gasificación y alcanzar los objetivos sugeridos anteriormente, se ha propuesto las siguientes actividades:

1. Implementación de una Planta Piloto que integre un gasificador y sus accesorios a una caldera de prueba, para desarrollar experimentos con diferentes tipos de carbones y caracterizar la información termo-química y cinética requerida para el análisis de procesos de gasificación.
  2. Desarrollo de una herramienta computacional que permita evaluar la performance de un cierto tipo de carbón en el gasificador.
  3. Evaluación del mercado, características geológicas, propiedades físico-químicas y de reactividad para diferentes principios de gasificación de carbones chilenos e importados.
  4. Análisis económico con el fin de evaluar diferentes alternativas tecnológicas para la generación de energía a partir de procesos de gasificación de carbones.
  5. Difusión y transferencia de resultados del proyecto al sector empresarial, público y académico.
- Cada una de estas actividades comprende sub-actividades que se pueden apreciar en la Figura 2.

Figura 2: Esquema de las actividades propuestas



## CONCLUSIONES

Basados en estudios preliminares y evaluaciones económicas realizadas, se aprecia que la tecnología de gasificación de carbón puede ser una alternativa interesante y atractiva desde el punto de vista económico y ambiental, dada la situación de precios de los principales energéticos empleados en la actualidad por Chile. Para despejar dudas, es por lo tanto necesario obtener información en base a experimentación piloto, que permita además demostrar las ventajas de esta tecnología a los actores interesados.

El desarrollo del proyecto de Consorcio Tecnológico impulsado por UdeC facilitará la toma de decisiones a las entidades estatales y privadas para introducir la gasificación de carbón como una alternativa energética sustentable para Chile, ya que permitirá reducir el grado de incertidumbre y desconocimiento existentes en

relación a este tipo de tecnología. Asimismo, el proyecto permitirá fortalecer y formar las capacidades humanas y tecnológicas en el país, acelerando el proceso de aprendizaje necesario para la introducción de la tecnología.

## REFERENCIAS

Las referencias deben estar identificadas en el texto entre corchetes (paréntesis cuadrados) y agrupadas al final del texto en el orden de aparición. Las referencias deben escribirse de acuerdo a los siguientes ejemplos según sea el caso: artículo de revista, libro, tesis, reporte o memoria de congreso.

1. Balance de Energía año 2005, *Comisión Nacional de Energía, Chile*, 2007, disponible en [www.cne.cl](http://www.cne.cl)
2. Carbón, nuevamente un referente energético, Revista *Electricidad Interamericana*, Edición N° 93, pp. 4-10, Febrero 2007.
3. Destellos de Energía, Revista *Induambiente*, Año 15 N°85, pp. 14-17, Marzo-Abril 2007.
4. Fijación De Precios De Nudo Sistema Interconectado Central (SIC), *Informe Técnico Definitivo, Comisión Nacional de Energía*, Abril 2007.
5. Fijación De Precios De Nudo Sistema Interconectado Norte Grande (SING), *Informe Técnico Definitivo, Comisión Nacional de Energía*, Abril 2007.
6. Coal Gasification for power generation, *Research Reports International*, pp. 10-13, 1<sup>st</sup> edition, Sept. 2005.
7. The Economics of Coal Gasification, Coal Gasification for power generation, *Research Reports International*, pp. 65-78, 1<sup>st</sup> edition, Sept. 2005.
8. Kreutz, T. et al., Co-production of hydrogen, electricity and CO<sub>2</sub> from coal with commercially ready technology. Part B:Economic analysis, *International Journal of Hydrogen Energy*, pp. 769-784, 30 (2005)
9. Estadísticas de Operación 1996-2005, Centro de Despacho Económico-Sistema Interconectado Central, 2006
10. Estadísticas de Operación 1996-2005, Centro de Despacho Económico-Sistema Interconectado del Norte Grande, 2006.
11. Treviño C, Manuel, Tecnología de Gasificación Integrada en Ciclo Combinado: GICC, Libro editado por Elcogas y Enerclub, 2001.
12. Dighe S. ; Lazzara D., Westinghouse Plasma Gasification Technology, *Technical Paper, Pittsburgh Coal Conference 2002*.