

# ESTUDIO DE FACTIBILIDAD PARA EL CO-PROCESAMIENTO DE LAS AGUAS DE SENTINA EN PLANTAS CEMENTERAS

Denise Cajas Arenas<sup>1</sup>, Marcos Tapia Quincha<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Ingeniera Industrial especialización Producción, 2006

<sup>2</sup> Director de Tesis. Ingeniero Mecánico, Escuela Superior Politécnica del Litoral ESPOL, 1979, Masterado en Administración de Sistemas de Calidad, ESPOL, 1999, Diplomado en Formulación y Preparación de Proyectos, BID-ESPOL-PUCE, 2000, Diplomado en Habilidades Docentes, ESPOL, 1998, Profesor de ESPOL desde 1978.

## RESUMEN

El *“Estudio de Factibilidad para el Co-procesamiento de las Aguas de Sentina en Plantas Cementeras”* presenta un análisis de la viabilidad comercial, legal, ambiental, técnica y financiera para la implementación y puesta en marcha de un proyecto de co-procesamiento en busca de la reducción del costo específico de la energía térmica de la planta Cerro Blanco y de la mitigación de los impactos ambientales generados por la industria cementera.

El co-procesamiento de aguas de sentina en hornos cementeros consiste en la eliminación ambientalmente segura del residuo, aprovechando la energía térmica que el mismo puede aportar al proceso de fabricación de cemento. En otras palabras, consiste en la utilización del residuo como combustible alternativo.

El estudio demuestra la existencia de un mercado de generación del residuo, define un marco legal, identifica impactos ambientales y técnicos dada la inyección del residuo por el quemador del horno, y hace un análisis costo-beneficio según el escenario propuesto.

The *“Feasibility Study for Vessel Slop Oil Coprocessing in Cement Kilns”* presents a commercial, legal, environmental, technical, and financial analysis for the implementation of a coprocessing project that pursues the reduction of the thermal energy specific cost at Cerro Blanco plant, as well as it intends to contribute to the reduction of the environmental impacts caused by the cement industry.

Coprocessing slop oil in cement kilns consists of an environmentally sound alternative for disposing the residue while taking benefit of its thermal energy as an alternative fuel for the cement manufacturing process.

The following study demonstrates the existence of a waste generation market, it defines a legal framework, it identifies technical and environmental impacts during slop oil injection to the kiln's main burner, and it performs a cost-benefit analysis according to the proposed scenario.

## **INTRODUCCIÓN**

La disposición de las aguas de sentina es un tema importante para la sociedad ecuatoriana. Ecuador cuenta con cuatro puertos comerciales importantes – Esmeraldas, Manta, Guayaquil y Puerto Bolívar– y trece puertos privados en Guayaquil, en los cuales se genera un movimiento considerable de buques que generan aguas de sentina, residuo que muchas veces es clandestinamente vertido en el mar contaminando no sólo áreas marinas sino ríos y tierras aledañas.

Paralelamente, el proceso de fabricación de cemento se caracteriza por un alto consumo de energía al requerir de un proceso de combustión a temperaturas extremadamente altas (2000°C en la llama) para lograr la fusión de las materias primas y obtener clinker, componente principal del cemento. Así, con el fin de desarrollar la actividad cementera de una forma más provechosa, ambiental, económica y socialmente responsable, esta industria está interesada en la utilización de combustibles no tradicionales, obtenidos a partir de residuos, en su proceso.

El desarrollo del proyecto pretende evaluar la posibilidad de utilizar las aguas de sentina como un combustible alternativo para los hornos de cemento de la planta Cerro Blanco, ubicada en Guayaquil.

## **CONTENIDO**

El proyecto de co-procesamiento de las aguas de sentina consiste en la implantación de un sistema integrado de operaciones que incluyen la descarga, recolección, transporte, y disposición final (co-procesamiento) del residuo en los hornos cementeros de la planta Cerro Blanco.

## **ANÁLISIS COMERCIAL**

### **Estudio del mercado de generación de las aguas de sentina**

El estudio del mercado parte de la identificación del movimiento de carga y tráfico de buques a nivel nacional, a fin de establecer una relación entre esta variable conocida y la entrada de aguas de sentina al Ecuador. En un periodo de 14 años, el histórico muestra un crecimiento de 156% de la carga movilizada vía marítima, incremento consecuente con el aumento del número de naves movilizadas a nivel nacional. Lo anterior se vuelve más interesante para el desarrollo del proyecto al identificar que Guayaquil es el responsable de cerca del 70% del tráfico de buques, del cual aproximadamente el 30% corresponde a la operación en puertos privados.

El cálculo de los volúmenes de aguas de sentina generados en el país emplea datos de la descarga por buque arribado por un periodo de 5 meses analizado en Puerto Bolívar. El análisis permitió demostrar que no existe evidencia estadística para rechazar el supuesto de normalidad de la cantidad descargada por buque arribado así como la definición de una media poblacional para esta variable de 15

toneladas. Es así que, conociendo que el 40% de los buques arribados incineran sus residuos a bordo, que los de arribo quincenal requieren dos recaladas para tener suficiente residuo para descargar, y que las naves pesqueras generan cantidades significativamente menores a las 15 toneladas, fue factible calcular la oferta “potencial” de aguas de sentina, dada la siguiente fórmula:

$$\text{Oferta potencial} = \sum_{i=1}^n (15 \cdot 0.6 \cdot x_i + 15 \cdot 0.5 \cdot 0.6 y_i + 0.5 \cdot z_i) \quad (\text{fórmula 1})$$

donde,

$i = 1, 2, \dots, n$  representa los 17 puertos que fueron analizados (3 estatales y 14 privados),

$x_i$  = cantidad de buques bananeros o similares que arriban al puerto  $i$ ,

$y_i$  = cantidad de buques de arribo quincenal que recalán en el puerto  $i$ ,

$z_i$  = cantidad de buques pesqueros que arriban al puerto  $i$ ,

siendo 15 la cantidad promedio descargada por buque, 0.6 el factor incinerador y 0.5 la representación de que cada 2 recaladas se haría una descarga del residuo.

Con lo anterior, y dada la proyección de la tendencia secular del tráfico de buques en los distintos puertos ecuatorianos, fue factible la estimación de la oferta “potencial” de aguas de sentina para el periodo 2006 – 2010, misma que promete incrementos anuales de 2.3% en promedio, con aproximadamente 19500 toneladas en el 2006 y 21300 toneladas en 2010.

### **Estudio de la demanda de las aguas de sentina y precios del mercado**

El análisis de la demanda del residuo considera la presencia de 11 competidores actuales, todos autorizados por la Dirección General de la Marina Mercante y del Litoral para la recolección y disposición final de aguas de sentina en los distintos puertos ecuatorianos.

El cálculo para la demanda de aguas de sentina por parte de los competidores parte del supuesto de que ésta se comporta como una variable uniforme, fluctuando dentro de los límites mínimos y máximos identificados en Puerto Bolívar, donde el mercado está más explotado. Aplicando la fórmula 2, se generaron variables aleatorias para la capacidad de cada competidor, y se estimó una demanda anual de aproximadamente 13500 toneladas del residuo en 2006, con proyecciones hacia las 18400 toneladas para el 2010.

$$\text{Demanda unitaria (capacidad)} = 24 + 84R_i \quad (\text{fórmula 2})$$

La combinación entre la oferta potencial y la demanda calculada permitió definir una oferta insatisfecha que se puede captar dada la ejecución del proyecto.

Respecto a precios, la investigación identificó las tarifas mostradas en la Tabla I, cobradas por la descarga del residuo de los buques.

**TABLA I Precios de Mercado**

Punto de prestación del servicio	Tarifa [US\$/ton]
Puerto de Guayaquil	50.00
Puerto Bolívar	15.00
Puerto de Manta	20.00
Nuevo Millenium	No se registra

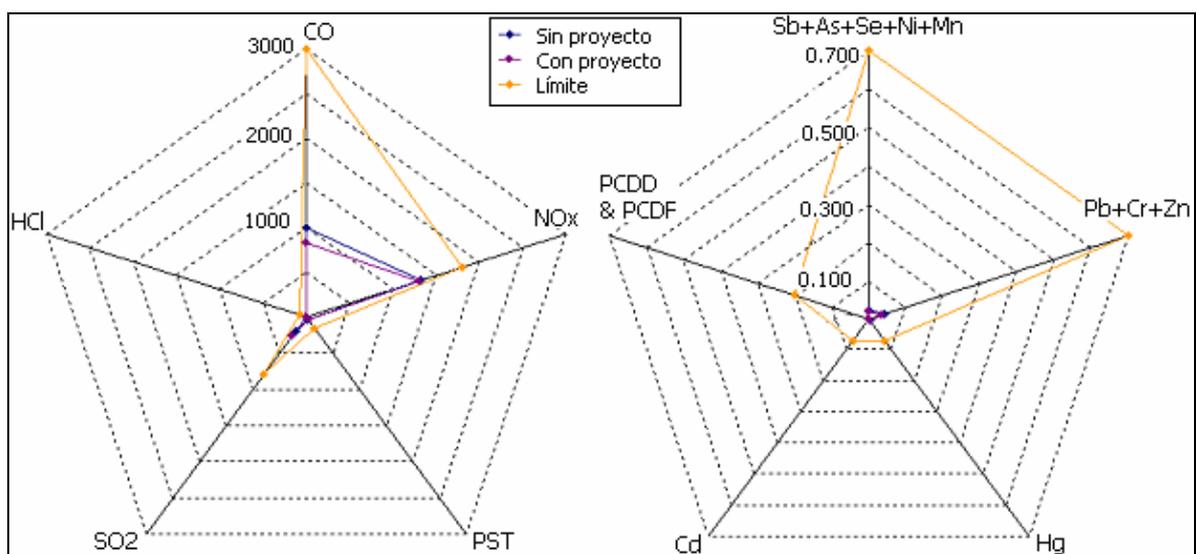
Las empresas que captan este residuo lo transportan a sus sitios de almacenamiento, le dan algún tipo de tratamiento y finalmente revenden el aceite usado para su uso como un combustible alternativo en procesos térmicos.

**ANÁLISIS LEGAL-AMBIENTAL**

El estudio legal-ambiental parte de la definición de un marco legal que regula la ejecución del proyecto, identificando requisitos y pasos previos a la puesta en marcha del mismo.

El análisis tiene dos ejes centrales: por un lado, la evaluación de los impactos generados por las actividades del proyecto, con especial énfasis en el análisis de las emisiones; y por otro, la definición de las medidas y costos asociadas al manejo ambientalmente adecuado de las operaciones del proyecto.

Para la identificación y evaluación de impactos en el co-procesamiento se realizó una comparación entre las emisiones de gases emitidos por las chimeneas de ambos hornos bajo la Situación de Línea Base (en ausencia del proyecto) como punto de partida, y las emisiones medidas durante el desarrollo de actividades de co-procesamiento en uno de los hornos, considerando el peor escenario posible en términos de impactos en emisiones, que es que el residuo sea en su mayoría aceite usado. Gráficamente, la Figura 1 muestra los resultados de las emisiones medidas.



**FIGURA 1 Gráficos radiales de las emisiones medidas por la chimenea del horno**

A partir de la Figura 1 es posible deducir que bajo ninguna de las dos alternativas planteadas (con o sin el proyecto) las emisiones generadas por la chimenea para los parámetros graficados se acercan al límite máximo permisible, sea para los parámetros de NOx, PST y SO<sub>2</sub>, regulados por el Texto Unificado de la Legislación Ambiental Secundaria (TULAS), como para los parámetros de HCl, CO, metales pesados y dioxinas y furanos, regulados por la norma ambiental mexicana NOM-040-ECOL-2002.

En relación a costos, el cumplimiento de los requisitos de estudios y permisología requeridos por la Autoridad Ambiental de Aplicación Responsable (AAAr) y la aplicación de las medidas para la prevención y mitigación de impactos ambientales negativos exigen la inversión en aspectos ambientales, generándose un costo ambiental anual recurrente de aproximadamente US\$ 16000, proporcional al costo total ambiental para el proyecto completo de co-procesamiento de residuos industriales.

## ANÁLISIS TÉCNICO

El estudio técnico parte del diagnóstico inicial de los límites técnicos de los hornos de la planta Cerro Blanco para identificar el potencial técnico de cada horno para el co-procesamiento del residuo. La Tabla II resume los resultados del diagnóstico realizado para ambos hornos.

**TABLA II Resultados del diagnóstico de los límites técnicos de los hornos**

Condiciones favorables	Condiciones desfavorables
Buena combustión en el quemador del horno	Probabilidad inminente de taponamientos del ciclón 3 H1
Buena quemabilidad de la harina cruda	Impulsión axial específica de operación del quemador inferior a lo recomendado
Sistemas de horno con precalcinadores en línea (con cámara de combustión en H1)	Problemas con la instrumentación en el ciclón 5 y entrada del horno
Quemador que permite la inyección de 2 combustibles adicionales al coque	Atmósfera polvosa en el horno y enfriadora
Entradas bajas de Cl	Instalación poco adecuada para la inyección del residuo
Reserva en el flujo de gases	

## Evaluación de los impactos técnicos

La evaluación de los impactos técnicos del residuo sobre el proceso de fabricación de clinker comienza con la categorización de las aguas de sentina como un combustible de bajo grado por la presencia de niveles altos de humedad y de elementos circulantes en su composición, así como variaciones en su poder calorífico.

Es así que, dada la definición anterior, el estudio cuantifica los impactos que el agua y el incremento de los niveles de O<sub>2</sub> generan sobre el consumo calorífico de los hornos, la temperatura de llama y la pérdida de capacidad de producción, según los factores de impacto determinados en el *Holcim Low Grade Fuel Study*.

Se evaluaron las dos situaciones extremas y la situación común identificadas, bajo las mismas condiciones de operación y alimentación del residuo (1 ton/h), obteniendo los resultados presentados en la Tabla III.

**TABLA III Resultados del análisis de impactos del residuo sobre el consumo calorífico, temperatura de llama y capacidad de producción**

Impacto \ Escenario	Unidad	Peor: Humedad 53%	Mejor: Humedad 1.9%	Promedio: Humedad 18.4%
Incremento en el consumo energético del horno	%	1.17	0.01	0.09
Pérdida de producción	[ton cli/ton residuo]	4.73	0.04	0.36

La capacidad del proceso para soportar impactos generados por elementos circulantes se determinó a partir de los resultados del Balance Alkali – Cloro – Azufre del proceso de fabricación de clinker para ambos hornos dada la situación actual, cuyos resultados principales se muestran en la Tabla IV.

**TABLA IV Resultados de los Balances Alkali – Cloro – Azufre realizados al proceso actual (Situación de Línea Base)**

Resultados principales	Horno 1	Horno 2	Límite
Cl "calculado" en clinker	155 g/t cli	169 g/t cli	<200-300
Azufre en el clinker	1.69% SO <sub>3 cli</sub>	1.26% SO <sub>3 cli</sub>	<1.5
Rel. Alk/SO <sub>3</sub> en clinker	0.39	0.43	0.8 - 1.2
Entrada "relevante" de Cl	155 g/t cli	169 g/t cli	<300
Volatilidad del Azufre	0.52	0.64	<0.7

De los resultados anteriores, aunque se evidencia niveles altos de azufre (3.5% de SO<sub>3</sub> en la harina caliente), la tendencia a que ocurran problemas de incrustaciones está relativamente controlada con la utilización de cañones de aire que frecuentemente limpian el sistema. Es más, según los análisis de las aguas de sentina, el máximo porcentaje de azufre presente en las mismas es 1.84% por lo que de inyectarlas como combustible alternativo, contrario a la ocurrencia de incrustaciones, su utilización representaría una ventaja por sustituir energía con más azufre por una que contiene menos.

Respecto a la presencia de cloro en el clinker, dado el límite máximo permisible de 300 g/t cli, se identificó la posibilidad de admitir hasta aproximadamente 140 g/t cli por la inyección de aguas de sentina, sin generar impactos negativos en el proceso. Por lo anterior, y considerando las concentraciones de Cl encontradas en el residuo, la presencia de Cl en el residuo no es una limitante para el desarrollo del proyecto.

#### **Definición y costeo del escenario propuesto para la inyección del residuo**

Para finalizar el estudio técnico, el documento analiza distintas alternativas para el co-procesamiento de las aguas de sentina, en función del punto de alimentación

de las mismas al sistema. La Tabla V presenta los resultados de la cuantificación de todas las alternativas propuestas, de donde finalmente se decidió que la mejor alternativa es alimentar los lotes de aguas de sentina por el quemador de los hornos, tal como arriban a la planta, dada una homogeneización previa.

**TABLA V Evaluación de costos de las alternativas planteadas**

Factor de costo	Alternat. A	Alternativa B		Alternativa C	
		con co-p del agua	sin co-p del agua	con co-p del agua	sin co-p del agua
Análisis físico-químicos	5.01	6.64	14.69	7.34	18.84
Pre-proceso + co-procesamiento	4.90	10.50	9.37	12.00	10.74
EPP's	1.54	3.24	3.24	3.24	2.26
Mantenimiento	3.24	5.81	5.81	5.81	5.81
Herramientas	0.54	0.54	0.54	0.54	0.54
Sustitución térmica	-23.40	-34.01	-34.01	-34.06	-34.06
Impactos en proceso	9.45	13.74	1.93	13.81	0.60
<b>Totales</b>	<b>1.28</b>	<b>6.45</b>	<b>1.56</b>	<b>8.67</b>	<b>4.73</b>

- (A) Co-procesamiento del residuo tal como arriba a la planta, por los quemadores de los hornos
- (B) Separación del aceite y agua sólo para los lotes con PCI inferior a 30 MJ/kg. El aceite se alimenta por los quemadores de los hornos, y el agua bien puede alimentarse por la cámara de combustión o destinarse a otro uso.
- (C) Separación del aceite y agua de todos los lotes arribados. Las condiciones de alimentación del residuo son las mismas que para la Alternativa B.

El análisis de costos por los aspectos técnicos termina con la evaluación de costos de la operación logística de carga y transporte del residuo desde los puestos hasta la planta de cemento, operación que encarece el proyecto.

## ANÁLISIS FINANCIERO

El análisis financiero consolida la información de costos de los estudios anteriores y elabora proyecciones financieras que permiten analizar la rentabilidad del proyecto con el uso de herramientas financieras para el análisis de proyectos de inversión.

El punto de partida para el análisis de la rentabilidad del proyecto es la realización del flujo de caja proyectado, para lo cual se utilizó la herramienta CAPEX Request que utiliza Holcim para el análisis de sus inversiones. En él se ingresó el presupuesto de inversiones calculado en el análisis técnico, así como los costos comerciales, legales-ambientales y técnicos calculados previamente.

Con un Valor Presente Neto (VPN) de US\$ 537000, una Tasa Interna de Retorno (TIR) de 48.1% (en comparación con un costo de capital ponderado de 10% anual) y un Periodo Estático de Retorno (payback) de 4 años y 8 meses, se concluye que el proyecto es rentable y por ende factible financieramente. Lo anterior, claro está, en la medida en que se cumplan las proyecciones del costo de la energía térmica tradicional, cuyo crecimiento auguran beneficios cada vez mayores para el proyecto. No obstante, aún cuando no se cumplan, y el precio del coque crezca a un ritmo lento, se prevé un beneficio dada la ejecución del

proyecto, con sustituciones térmicas (TSR) de 0.57% en el año 2006 creciendo hasta 2.2% en 2009. Económicamente, lo anterior significa un ahorro por sustitución térmica de 0.44% y 1.86%, respectivamente.

## **CONCLUSIONES**

Del desarrollo del estudio realizado, se pudo sacar las siguientes conclusiones:

- Los hornos de cemento son una excelente opción técnica para co-procesar residuos por sus características de diseño y funcionamiento. Su eficacia en la destrucción de residuos radica en la presencia de las 3T: temperaturas altas, tiempos de residencia largos y gran turbulencia en el proceso. Además, es un proceso que no genera residuos, por la incorporación de las cenizas al clinker, y que posibilita un importante aprovechamiento energético así como la disminución global de las emisiones al medio ambiente.
- Los análisis de la oferta y demanda de aguas de sentina evidencian la existencia potencial del residuo, mismo que no está siendo captado en el país por lo que se pierde hacia otros países. La generación del residuo en el Puerto de Guayaquil y puertos privados prevé incrementos anuales de 2.3% y 7.2% respectivamente, por lo que la recomendación sería concentrar esfuerzos en captar el mercado de Guayaquil, en lugar de buscar un poco en cada puerto. Esto además ayudaría a amortiguar los costos por la operación logística de carga y transporte del residuo, especialmente en los primeros años, cuando el proyecto recién se estaría afianzando.
- Desde la perspectiva legal-ambiental, el co-procesamiento de aguas de sentina no generaría impactos o una influencia significativa en las emisiones de gases liberados por las chimeneas de los hornos, ni en comparación con los valores registrados durante la medición dada la Situación de Línea Base, ni en comparación con los límites máximos establecidos por la NOM-040-ECOL-2002. No obstante, si bien los valores registrados en la planta Cerro Blanco están muy por debajo de los límites permisibles, la recomendación sería continuar con la política de medición de emisiones en línea y mediciones puntuales por laboratorios externos, para así garantizar el cumplimiento de la normativa ambiental.
- Técnicamente, el co-procesamiento del residuo impactaría por la presencia de agua al sistema. No obstante, de lograr una adecuada homogeneización, las fluctuaciones del poder calorífico del residuo serían mínimos y los impactos menores. En cuanto a elementos circulantes, el análisis de los mismos a la llegada de un lote sería de extrema importancia, por cuanto de ello dependería la dosificación del residuo al sistema.
- La proyección de los flujos de efectivo para el periodo 2005-2010 augura buenos resultados dado el desarrollo del proyecto. En valores netos, con las proyecciones de evolución del precio del coque se prevé que al 2010, el proyecto genere un ahorro en costos de energía térmica de US\$ 287000; esto

es, 65 cUSD menos por tonelada de clinker producida, con lo que se cumple el objetivo planteado de reducción del costo específico de la energía térmica.

## **REFERENCIAS**

1. A. Obrist, D. Pauling y A. Flacher, Low Grade Fuel – Study (Suiza, Holcim Group Support Ltd. HGRS, 2001)
2. Addendum Estudio de Impacto Ambiental para Actividades de Gestión de Residuos: Requerimientos Ambientales a las Actividades de Transporte de Residuos Peligrosos al Interior del Cantón Guayaquil (Guayaquil, Eficiencia Energética y Ambiental Efficácitas Consultora Cía. Ltda., enero 2005)
3. Análisis y Estudio sobre la Disposición de Aceites Usados del Sector Naviero Naciona e Internacional así como Sector Pesquero (Guayaquil, Vertinspec, 2003)
4. C. Engmann, Guide for Application of the Álkali, Sulfur, Chlorine Balance Program v. 2.1 (Suiza, Holcim Group Support Ltd. HGRS, 2003)
5. Emisiones Hornos, EMR H1 Local, EMR H2 Local, ABB, (“Asea Brown Boverly”, Knowledge Manager Personal Assistant, Holcim Information Platform (HIP), TIS Holcim Ecuador S.A., <http://mscbl00/km/>).
6. Estadísticas Portuarias (Guayaquil, Dirección General de la Marina Mercante y del Litoral DIGMER, 1990-2004)
7. Estudio de Impacto Ambiental para Actividades de Gestión de Residuos (Guayaquil, Eficiencia Energética y Ambiental Efficácitas Consultora Cía. Ltda., septiembre 2004)
8. Estudio de Impacto Ambiental para Actividades de Co-procesamiento de Residuos en Planta Cerro Blanco (Guayaquil, Eficiencia Energética y Ambiental Efficácitas Consultora Cía. Ltda., septiembre 2004)
9. EUREMI S.A., From Waste to A.F.R. For Cement Industry, Volumen 3.2, Liquid Injection Workshop (Bruselas, Holcim Group Support Ltd. HGRS, 2001)
10. I. Levin y S. Rubin, Estadística para Administración y Economía (7ma. Edición, México, Pearson Prentice Hall, 2004), pp. 674-707.
11. Informe Ejecutivo de Medición de Emisiones (México, Laboratorios ABC Química, Investigación y Análisis S.A. de C.V., diciembre 2005)
12. PEP Questionnaire Cement Plants (Guayaquil, Planta Cerro Blanco de Holcim Ecuador S.A., 2005)

13. Registro De Buques Por Fecha De Arribo (Puerto Bolívar, Departamento de Operaciones de la APPB, ene-dic 2004)
14. Registro de Apoyo Logístico (Puerto Bolívar, Departamento de Operaciones de la APPB, ene-dic 2004)
15. S. Grasmuck y V. Pavlu, CAPEX Request Versión 1.0 (Holcim, 2004)
16. Technical AFR Assessment Cerro Blanco (Guayaquil, Holcim Group Support Ltd. HGRS, Abril 2004)