

Análisis prospectivo medioambiental para la recuperación de aguas sulfurosas en la refinería de petróleo de Cienfuegos

Environmental prospective analysis for the sulphurous waters recovery in the Cienfuegos oil refinery

MSc. Gabriel Orlando Lobelles-Sardiñas^I, Dr. C. Eduardo Julio López-Bastida^{II}, Dr. C. Julio Pedraza-Gárciga^{III}, Ing. Rosemary Morejón-Gil^I
globelles@civenpetrol.cu

^IRefinería de petróleo Camilo Cienfuegos, Finca Carolina, Cienfuegos, Cuba;
^{II}Universidad de Cienfuegos Carlos Rafael Rodríguez; ^{III}Universidad Central de Las Villas “Martha Abreu”, Villa Clara, Cuba

Recibido: 27 de octubre de 2015

Aprobado: 23 de enero de 2016

Resumen

El análisis prospectivo medioambiental para la recuperación de aguas sulfurosas en la refinería de petróleo tiene como objetivo visualizar posibles escenarios futuros que permitan el cumplimiento de las normas de emisiones. Para ello se creó una metodología basada en la de Michel Godet. Fueron seleccionados nueve expertos por el método Delphi, quienes realizaron el diagnóstico de la industria mediante la Matriz DAFO. El resultado ubica a la empresa en una posición adaptativa, identificándose un problema general y proponiéndose una posible solución. Posteriormente, se trabajó con los métodos MIC-MAC y MACTOR, para conocer las variables y actores claves, respectivamente. Mientras que el método SMIC, apoyado en las hipótesis propuestas, conformó un total de sesenta y cuatro escenarios, de los cuales se pudo seleccionar el más deseado; aunque este no presenta la mayor probabilidad de ocurrencia. Se identificaron seis variantes tecnológicas para lograr un proceso sostenible de refinación.

Palabras clave: emisiones, escenarios, prospectivo, refinación, sostenible tres a seis.

Abstract

The objective of the environmental prospective analysis for the sulphurous water at the Oil refinery is to visualize the possible future scenarios that allow complying with the emissions standards. To achieve that the author created a methodology based on the Michel Godet's one. Nine experts were selected with the use of Delphi method. These experts made a diagnosis to the industry with the use of a DAFO Matrix. The results place the industry in an adaptive position, and an overall problem was identified and the possible solution proposed. Then, the author used the methods MIC-MAC and MACTOR, as to know the variables and key actors respectively. While the SMIC method, with the support of the hypotheses proposed composed a total of sixty four scenarios, of which it was possible to choose the most desirable, even when it is the most likely to occur. Six technological variants were identified to achieve a sustainable hydro-treating process.

Keywords: emissions, scenarios, prospective, refining, sustainable.

Introducción

En el transcurso de los años, debido al desarrollo de la ciencia y la tecnología, la humanidad ha estado sometida a serios cambios medioambientales. De ahí que uno de sus principales retos hoy día sea mitigar dichos efectos sin afectar el entorno natural y social, de la forma más racionalmente posible, con el objetivo de garantizar un futuro sostenible para el planeta.

Actualmente, en la refinería de petróleo de Cienfuegos existen emisiones líquidas y gaseosas producto de los diferentes procesos que se desarrollan, los cuales influyen en los altos costos de producción, en los costos de portadores energéticos y en el impacto medioambiental. Sin embargo, no existen en estos momentos las condiciones tecnológicas necesarias para la mitigación de esos impactos. Con vista a mejorar este esquema se ha concebido un proyecto de expansión, que involucra el montaje de otras unidades de producción y unidades de procesos auxiliares cuyo objeto social es el tratamiento de los diferentes residuales.

La refinería de petróleo de Cienfuegos trabaja con parámetros de calidad reconocidos según las normas internacionales y con un tratamiento primario de sus residuales, con el objetivo de minimizar los costos de producción y mitigar los impactos medioambientales, no obstante aún persisten problemas como:

- Imposibilidad de eliminación y recuperación del azufre presente en el crudo de alimentación.
- Las cargas contaminantes vertidas a la atmósfera y al medio ambiente a pesar del tratamiento de sus residuales.
- Elevados costos del crudo, la energía y el agua.

La puesta en marcha de unidades de conversión media en busca de mayor rendimiento tecnológico, unido a nuevas unidades medioambientales traerá consigo un incremento considerable de residuales líquidos y gaseosos [1-3]; se vislumbra un escenario inadecuado para el entorno, para los costos de producción y de la empresa en general.

En oposición, para el proyecto se han establecido un grupo de normas que permitirán el desarrollo eficiente del mismo y, como resultado final, se logrará un proceso sostenible de refinación en concordancia con la Política Nacional del Agua y la Política Estatal de Inversiones. Entre las normas regulatorias de emisiones aparecen las del Grupo del Banco Mundial y la Agencia de Protección Medioambiental de los EE.UU. [4-5].

Para dar solución a la problemática presentada, es objetivo de este estudio analizar, mediante la prospectiva estratégica ambiental, el proceso de eliminación de azufre en el agua de procesos e identificar el mejor escenario tecnológico que permita mitigar el impacto ambiental del proceso de refinación.

Fundamentación teórica

El agua es un componente vital para muchas operaciones industriales y se utiliza en una amplia gama de procesos industriales: despojamiento, extracción líquido-líquido, sistemas de enfriamiento y operaciones de lavado son unos pocos de muchos procesos, que están presentes en las refinerías y plantas químicas, donde se utiliza intensivamente el agua [6-8]. Dentro de los procesos de refinación de petróleo, el agua, a lo largo de todo el ciclo de vida del proceso, va adquiriendo contaminantes una vez que entra en contacto con ellos; es decir, el agua se degrada en función de la profundidad del proceso en que tiene participación.

Wauquier y Decoopman [9-10] reportan la emisión de aguas ácidas residuales de los diferentes procesos, las cuales son ricas en contenidos de NH_3 , H_2S y fenoles. Esta categoría de aguas ácidas residuales proviene del vapor del agua desmineralizada que se utiliza para el craqueo térmico, en el hidrotreamiento de los diferentes productos de la refinación, en la desalación del crudo de alimentación y en los sistemas de tope de las diferentes torres de estabilización y destilación. Cuando los productos pesados son craqueados (agrietados), el azufre se convierte en H_2S y mercaptanos. Durante el hidrotreamiento, los compuestos de nitrógeno se convierten a NH_3 . La reacción entre el vapor y los hidrocarburos cíclicos produce fenol. Estos condensados son llamados condensados amargos o aguas ácidas y son ricas en NH_4^+ , HS^- y fenoles. Su concentración asciende de 6 a 12 % wt (% peso) respecto a la carga de cada unidad y no pueden ser descargados en la alcantarilla sin desulfurización previa [11-12]. En los sistemas de tope de las torres el vapor de agua contacta con el H_2S presente en los gases y luego se condensan en el tambor de reflujo, desde donde puede separarse el agua ácida sulfurosa resultante.

En la tabla 1 puede apreciarse la mayor contaminación del agua por parte del HS^- y del NH_4^+ . El H_2S se forma en los mismos procesos de refinación por la presencia del azufre en el crudo de alimentación; esto ocurre, sobre todo, en los procesos de craqueo y de hidrodesulfurización [13-15].

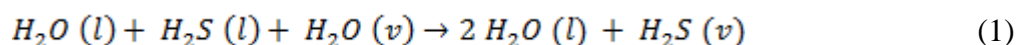
Análisis prospectivo medioambiental para la recuperación de aguas sulfurosas en la refinería de petróleo de Cienfuegos

TABLA 1. EMISIÓN DE EFLUENTES- AGUAS ÁCIDAS Y LOS RESPECTIVOS CONTAMINANTES POR PROCESOS

Procesos	Aguas (wt%)	pH	HS ⁻ , RSH (mg/L)	Cl ⁻ (mg/L)	CN ⁻ (mg/L)	NH ₄ ⁺ (mg/L)	Fenoles (mg/L)	HC (mg/L)
Desalación del crudo	5-6	5-8	--	--	--	--	--	--
Destilación atmosférica	2,5-3,5	6-7	20-200	5-100	--	10-60	10-30	30-60
Destilación a vacío	3-4	6-7	10-50	5-50	--	5-30	5-10	5-20
Craqueo Catalítico Fluidizado	6-12	8-9,5	500-3 000	10-50	5-200	300-3 000	80-300	5-60
Recuperación de azufre	6-8	5-6	2 500-4 000	--	--	--	--	100-150
Hidrotratamiento de nafta	3-6	5-6	1 500-3 000	10-30	5-10	1 000-2 000	10-20	5-20
Hidrocraqueo catalítico	6-12	8-9,5	500-2 000	10-30	5-100	100-2 000	50-200	5-20
Hidrotratamiento de diesel	5-6	5-6	3 000-5 000	10-30	5-10	1 500-3 000	10-20	5-20
Craqueo con vapor	15-35	6-8,5	10-20	10-30	--	Trazas	20-30	30-50

Fuentes: Decoopman, 2002; Gary and Handwerk, 2006; Lluch Urpí, 2008

Durante la limpieza, en la parte líquida el H₂O arrastra consigo el H₂S presente en los productos, convirtiéndose de esta forma en agua ácida. Entonces para eliminar ese contaminante será necesaria una torre despojadora que, fundamentalmente, trabaja basada en la siguiente reacción dada por la ecuación 1:



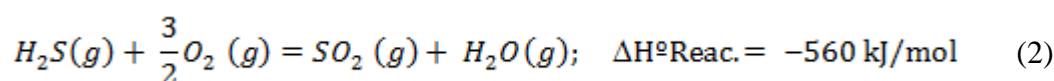
En dicha torre, más que una reacción química, ocurre un desplazamiento del H₂S (v) por la acción del H₂O (v), pues en condiciones operacionales de presión y temperatura el H₂S se vaporiza a partir de los 89 °C. El agua ácida entra a la torre con 84 °C y a una presión de 2,7 kg/cm²(a), el H₂S es despojado completamente sobre los 92 °C.

En los procesos auxiliares de la refinación el H₂S es despojado, tanto de las aguas ácidas, como de los gases ácidos y, posteriormente, venteados a la atmosfera mediante el mechurio o enviado como corriente de alimentación a las Unidades Recuperadoras de Azufre (URA). Sin embargo, en ambos casos persisten las emisiones gaseosas provocando un considerable impacto ambiental, a pesar del establecimiento de regulaciones ambientales cada vez más estrictas [4-5].

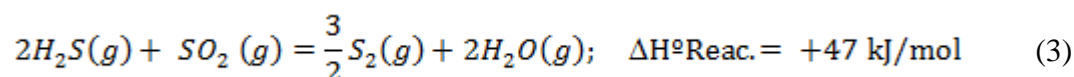
El proceso Claus se utiliza en refinerías y plantas de procesamiento de gas para la recuperación de azufre elemental a partir del sulfuro de hidrógeno (H₂S) contenido en

los gases agrios [13-14]. Las corrientes típicas que son procesadas por esta tecnología son los gases ácidos producidos durante la regeneración de aminas o solventes físicos utilizados para tratar gas natural o gases y/o líquidos de refinerías. También pueden tratarse en estas plantas los gases generados durante el despojamiento de las aguas ácidas producidas en las unidades de craqueo catalítico y otras unidades de proceso.

La conversión completa del H₂S en azufre utilizando unidades Claus está impedida por limitaciones termodinámicas de las reacciones que tienen lugar en el proceso [15-16]. El proceso Claus implica la quema de una tercera parte de H₂S con aire en un horno-reactor para formar dióxido de azufre (SO₂) según la ecuación 2:

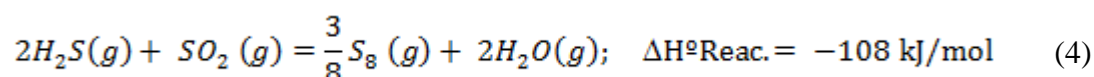


Los dos tercios restantes no quemados del H₂S se someten a reacción Claus (reaccionan con SO₂) para formar azufre elemental por la ecuación 3:

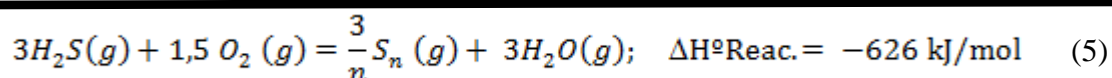


El horno es donde se lleva a cabo la reacción de combustión y la conversión inicial de azufre a través de una reacción gaseosa endotérmica y donde se produce el SO₂ requerido por las etapas catalíticas posteriores y los contaminantes como amoníaco, (benceno, tolueno, xileno) son supuestamente destruidos. En este horno-reactor aproximadamente el 60- 70 % de azufre es recuperado.

El H₂S remanente, que sale del horno-reactor de Claus, se hace reaccionar con SO₂ a temperaturas más bajas sobre un catalizador en base de dióxido aluminio o titanio para producir más azufre. Como promedio, alrededor del 70 % del H₂S y el SO₂ reacciona por la ecuación 4:



Se debe tener en cuenta que en la etapa catalítica, que opera por encima de la temperatura de rocío del azufre y hasta aproximadamente 370 °C, se produce principalmente S₈ y es una reacción exotérmica, mientras que en la etapa térmica, que opera por encima de los 930 °C, el S₂ es el producto principal y la reacción es endotérmica. Otros alótropos de azufre también pueden estar presentes en cantidades más pequeñas. La reacción global para el proceso viene dada por la ecuación 5:



En las URA el H₂S es convertido a azufre elemental con una eficiencia de recuperación entre 94 y 96 %, según las tecnologías de Propak, Siirtec Nigi, Chematek S.p.A, lo que resulta insuficiente para el cumplimiento de las normas de emisiones antes mencionadas. En tal sentido, se han establecido regulaciones operacionales adicionales que responden a la concentración de H₂S en la carga de alimentación relacionado con el nivel de recuperación [17-18]. Se debe destacar que otros proveedores de tecnologías novedosas para la recuperación de azufre como Warley Parson, Lurgi, Prosernat han logrado cumplir los parámetros de emisiones exigidos.

Para aumentar el nivel de recuperación en estas unidades, la mayoría de los estudios anteriores se han concentrado en los reactores Claus de conversión catalítica y en la unidad de tratamiento de gas de cola, donde los gases residuales de las unidades Claus pueden ser adicionalmente tratados y finalmente incinerados para su venteo a la atmósfera como dióxido de azufre (SO₂) [19].

Independientemente del valor comercial que se pueda obtener del azufre elemental producido, la instalación de estas unidades de recuperación de azufre es requerida por las regulaciones locales de emisiones de contaminantes a la atmósfera.

Por lo tanto, la selección de las tecnologías y secciones que formarán estas unidades se basará fundamentalmente en razones ambientales, tratando por supuesto de reducir al máximo la inversión, disminuir los costos operativos y maximizar el valor comercial del producto.

En el proceso de expansión que se propone en la refinería en estudio, en otra variante de proyecto, se aplica con mayor énfasis la norma de emisiones del grupo de normas del Banco Mundial [4]. En esta se especifica que el máximo de emisiones permisibles para NO_x es de 450 mg/Nm³ y de SO_x es de 150 mg/Nm³ para las unidades de recuperación de azufre, 500 para el resto de unidades, así como 50 mg/Nm³ para partículas sólidas y 10 mg/Nm³ de H₂S. No obstante, durante la otra fase del proyecto, se aplicarán las normas de la Agencia de Protección Ambiental (EPA) [5] que establece solo hasta 300 ppmv de SO₂ y 10 ppmv de H₂S.

Materiales y métodos

Para el Instituto de Prospectiva Estratégica de España la prospectiva es una disciplina con visión global, sistémica, dinámica y abierta que explica los posibles futuros, no solo por los datos del pasado sino, fundamentalmente, teniendo en cuenta las evoluciones futuras de las variables (cuantitativas y sobre todo cualitativas), así como los comportamientos de los actores implicados, de manera que reduce la incertidumbre, ilumina la acción presente y aporta mecanismos que conducen al futuro aceptable, conveniente o deseado [20].

A los efectos de aplicar la prospectiva estratégica al proyecto de expansión de la refinería de petróleo de Cienfuegos, la solución metodológica propuesta es adaptada a la Metodología de Escenarios propuesta por Michel Godet (figura 1) [21].

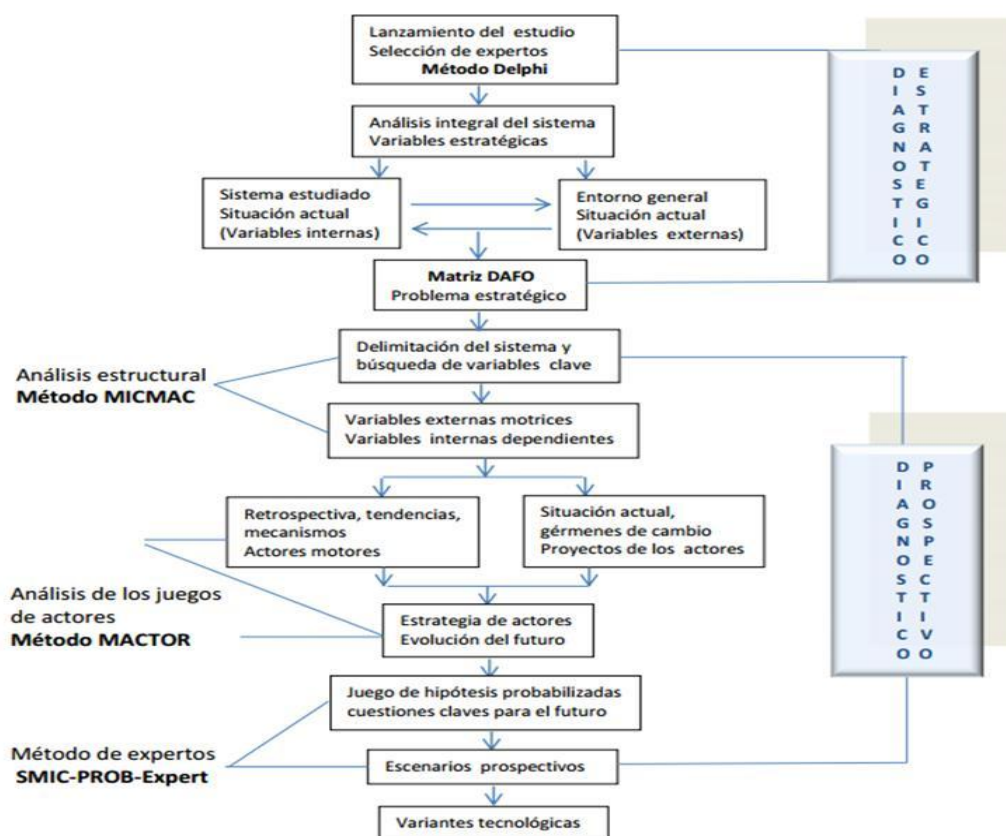


Figura 1. Esquema metodológico propuesto adaptado del Método de Escenarios de Godet

En la figura 1 se muestra el esquema general del procedimiento que debe desarrollarse y la selección y descripción de las herramientas. El mismo consta de una serie de etapas que, a pesar de formar parte del diseño original, no tienen que cumplirse con obligatoriedad de manera exacta, es decir, constituyen herramientas y cada quien usa la que necesite, de acuerdo a sus necesidades [22].

A continuación se presenta la metodología que ha sido elaborada para emplear en la investigación. La descripción para el desarrollo de los métodos empleados fue tomada del Cuaderno n° 20 de la Caja de Herramientas de Michel Godet [22].

Fase 0: Lanzamiento del estudio. Método Delphi

Para el desarrollo del estudio se requiere del criterio de expertos en el tema. Esta técnica permite extraer la información de los especialistas que conforman un grupo heterogéneo asegurando así la validez de los resultados. Esto permite analizar las convergencias de opiniones en torno al problema que se investiga pues facilita a los expertos entrevistados opinar sin saber lo que los otros colegas han planteado. Permite llegar así a un conjunto de ideas, reflexiones, criterios y consideraciones que incidan positivamente en la mejora del problema planteado. Esta técnica está basada en la utilización sistemática e interactiva de juicios de opiniones de un grupo de expertos hasta llegar a un acuerdo. Para ello se establecen diálogos anónimos entre los entrevistados individualmente mediante cuestionarios a través de un facilitador. Se realizan varias rondas de opiniones y los resultados de cada ronda se procesan estadísticamente.

El número de rondas para la aplicación del cuestionario se determina por la evolución de las curvas de distribución de respuestas, hasta llegar a la convergencia de opiniones, eliminando los valores más dispersos [23].

Los pasos lógicos para la aplicación de la técnica son:

Concepción del problema, determinación del número de expertos, selección de los expertos, preparación de los cuestionarios, procesamiento y análisis de la información mediante técnicas estadísticas.

El número de expertos se determina empleando un método de probabilidad binomial, según la ecuación 6:

$$n = \frac{p(1-p) * k}{i^2} \quad (6)$$

donde

n- Cantidad o número de expertos.

p- Proporción de error que se comete al hacer estimaciones del problema con la cantidad de expertos. En este caso p=0,02.

i – Precisión del experimento. Debe ser $i \leq 0,12$. En este caso $i=0,091$.

k- Constante que depende del nivel de significación estadística $(1 - \alpha)$ que se obtiene a través de la tabla 2 que se muestra a continuación, en este caso se trabaja con 3,841 6.

TABLA 2. COEFICIENTES DE SIGNIFICACIÓN ESTADÍSTICA

$(1-\alpha)$	k
99 %	6,656 4
95 %	3,841 6
90 %	2,689 6

Fase 1: Diagnóstico Estratégico. Variables estratégicas. Matriz DAFO

En esta fase corresponde la elaboración de un diagnóstico estratégico del proceso en estudio. Para guiar el comportamiento de una organización en un período de tiempo dado es necesario el análisis interno y externo de la misma como fuente de información para establecer las estrategias. Este análisis no puede considerarse como aspecto separado e independiente, sino que constituyen dos formas de ver la realidad y se encuentran estrechamente interrelacionados, pues las industrias no son ni autosuficientes ni cerradas, más bien intercambian recursos con el entorno externo y dependen de él.

Análisis interno

En el análisis interno se encuentran las debilidades y fortalezas: las primeras constituyen el conjunto de sensibilidades presentes en el proceso. Muchas de ellas se exponen en forma de objetivos específicos de transformación dentro de las correspondientes líneas de intervención prioritarias, pues lo deseable es la superación de dichas trabas o barreras. Las fortalezas constituyen el conjunto de puntos fuertes presentes en el proceso y, por tanto, deben considerarse como los principales activos para la elaboración de la estrategia de desarrollo.

Análisis externo

Está compuesto por las amenazas y oportunidades: las amenazas constituyen un factor que influye significativamente en el proceso, de ahí que su dominio sea determinante en el desarrollo sostenible y sus posibilidades de éxito. Mientras que las oportunidades constituyen factores que influyen positivamente en la transformación deseada.

Una vez realizado el diagnóstico se procede a la elaboración de la matriz DAFO conformada por cuatro cuadrantes, y seguidamente a la ubicación del proceso en uno de ellos, en este caso el de mayor impacto. Los resultados orientan la atención sobre los puntos claves que deben ser considerados para el análisis de escenarios reduciendo la incertidumbre en el estudio.

Fase 2: Análisis estructural. Variables claves. Método MICMAC

Concluido el análisis DAFO se prosigue a la elección de las principales variables que constituyen un factor clave en la selección de los escenarios. Inicialmente, se enumera el conjunto de variables, tanto internas como externas, que caracterizan el sistema estudiado y su entorno. Para ello se requiere, además de una definición precisa, para facilitar el análisis y localización de relaciones entre dichas variables. Esto constituye la base para toda reflexión prospectiva.

En todo sistema bajo investigación debe tenerse en cuenta que las variables encontradas surgen a partir de las otras, es decir, existe una total dependencia y el análisis estructural se ocupa de relacionar las variables en un tablero de doble entrada o matriz de relaciones directas. El relleno se efectúa de manera cualitativa: por cada pareja de variables se plantea la siguiente pregunta: ¿existe una relación de influencia directa entre la variable V_n y la variable V_{n+1} ? Si es negativa la respuesta, se anota (0), en el caso contrario, se cuestiona si esta relación de influencia directa es, débil (1), mediana (2) o fuerte (3).

Posteriormente, los expertos identifican las variables claves a través del programa MICMAC. Primero, mediante una clasificación directa (de realización fácil) y, posteriormente, por una clasificación indirecta (llamada MIC-MAC para Matrices de Impactos). Estos resultados en términos de influencia y de dependencia de cada variable pueden estar representados sobre un plano en el cual el eje de abscisas corresponde a la dependencia y el eje de ordenadas a la influencia. Su disposición en el plano en relación a las diagonales por la combinación de ambos resultados es la que definitivamente define a las variables según tipologías.

Fase 3: Análisis de juego de actores. Evolución del futuro. Método MACTOR

El método MACTOR (Matriz de Alianzas, Conflictos, Tácticos, Objetivos y Resultados), busca valorar las relaciones de fuerza entre los actores y estudiar sus convergencias y divergencias con respecto a un cierto número de posturas y de objetivos asociados.

Se construye una matriz de influencias directas entre actores a partir de un cuadro estratégico valorando los medios de acción de cada uno. El relleno se efectúa de manera cualitativa: por cada pareja de actores se plantea la siguiente pregunta: ¿existe una relación de influencia directa entre el actor A_n y el actor A_{n+1} ? Si es negativa la respuesta, se anota (0), en el caso contrario, se cuestiona si esta relación de influencia directa es, débil (1), mediana (2), o fuerte (3).

Las relaciones de fuerza son calculadas por el programa MACTOR teniendo en cuenta la fidelidad de los medios de acción directos e indirectos (un actor puede actuar sobre otro por mediación de un tercero). Luego se construye un plano de influencia-dependencia entre actores, a partir del análisis de sus relaciones de fuerzas, que revelan las fortalezas y debilidades de cada uno de ellos, sus posibilidades de bloqueo.

El juego de alianzas y conflictos potenciales entre actores que pone de manifiesto el método MACTOR contribuye a la formulación de preguntas claves de la Prospectiva y de las recomendaciones estratégicas.

Fase 4: Elaboración de los escenarios prospectivos. Método SMIC

Los métodos de impactos cruzados probabilistas permiten determinar las probabilidades simples y condicionadas de hipótesis o eventos, así como las probabilidades de combinaciones de estos últimos, teniendo en cuenta las interacciones entre los eventos y/o hipótesis. El objetivo de estos métodos no es solamente el de hacer destacar los escenarios más probables, sino también el de examinar el más deseado.

El programa SMIC (Sistemas y Matrices de Impactos Cruzados) ha dado pruebas de sus ventajas por el significativo número de aplicaciones concretas a las que ha dado lugar. En la práctica, si se considera un sistema de n hipótesis, el método SMIC, a partir de las informaciones facilitadas por los expertos, posibilita elegir entre las 2^n imágenes posibles (juegos de hipótesis), aquellas que deberían (habida cuenta de su probabilidad de realización) ser estudiadas muy particularmente. El método permite vigilar

estrechamente los futuros más probables que serán recogidos por el método de los escenarios.

Para la realización de un SMIC se utilizan los criterios de los expertos, quienes evalúan la probabilidad simple de realización de una hipótesis desde una probabilidad 1 (muy débil) hasta una probabilidad 5 (acontecimiento muy probable) y evalúan bajo forma de probabilidad condicional la realización de una hipótesis en función de todas las demás, por lo que teniendo en cuenta todas las preguntas que el experto debe plantearse, se le exige revelar la coherencia implícita de su razonamiento.

La etapa posterior se centra en la redacción de los escenarios, camino del presente hacia las imágenes finales con el comportamiento de los actores, a lo que se le denomina Método de Escenarios.

Un escenario es un conjunto formado por la descripción de una situación futura y de la trayectoria de eventos que permiten pasar de una situación origen a una situación futura. Se clasifican en:

- **Exploratorios:** parten de tendencias pasadas y presentes que conducen a futuros deseables.
- **De anticipación o normativos:** contruidos a partir de imágenes alternativas del futuro, pueden ser deseables o rechazables. Se conciben de un modo retrospectivo, de regresión.

El método de escenarios tiende a construir representaciones de los posibles futuros, así como el camino que conduce a su consecución. El objetivo de estas representaciones es poner en evidencia las tendencias fuertes y los orígenes de rompimiento del entorno general y competencial de la organización.

Los escenarios constituyen una luz indispensable para orientar las decisiones estratégicas. Este método puede ayudar a elegir, situando el máximo de apuestas para la estrategia que sea la más idónea de acometer en el proyecto que se determine.

Resultados y discusión

Lanzamiento del estudio (Método Delphi)

Inicialmente se determinó el número de expertos que encabezan la investigación, mediante la ecuación 6. Sustituyendo valores se tiene:

$$n = \frac{p(1-p) * k}{i^2} = 9,09 \approx 9$$

Posteriormente, se determinó el coeficiente de competencia ($K_{competencia}$) de cada uno de ellos, este parámetro se tiene en cuenta para la selección. Se determinó según la ecuación 7:

$$K_{competencia} = K_c + K_a \quad (7)$$

donde

K_c – Promedio de los valores que el candidato le confiere a cada aspecto que se evalúa en una encuesta presentada.

K_a – Coeficiente de argumentación, dado por la sumatoria de los valores adquiridos en cuanto al grado de influencia de cada una de las fuentes de argumentación.

Resulta válido destacar que:

- La competencia del experto es Alta (A): Si $K_{competencia} > 8$
- La competencia del experto es Media (M): Si $5 < K_{competencia} \leq 8$
- La competencia del experto es Baja (B): Si $K_{competencia} \leq 5$

Una vez aplicado este método se obtuvo como resultado que de los 20 candidatos propuestos para el desarrollo de la investigación, ninguno presentó evaluación de baja competencia, mientras 9 resultaron evaluados de alta competencia, con 11 en competencia media.

Diagnóstico estratégico y variables estratégicas (Matriz DAFO)

Una vez conocidos los procesos auxiliares que tienen lugar dentro de los procesos de refinación de petróleo, así como la situación actual y futura de la refinería de petróleo de Cienfuegos, los expertos fueron reunidos en un taller de interacción de criterios, donde se identificaron las principales fortalezas, amenazas, debilidades y oportunidades que pueden aparecer durante el proceso. A continuación se exponen las que se consideran de mayor importancia.

Debilidades

1. Escaso presupuesto nacional para la Investigación–Desarrollo–Innovación.
2. Ausencia de una política estatal de producción–comercialización del azufre.
3. Ausencia de acciones coordinadoras y de priorización para la inversión.

4. Elevado costo de producción en toda la cadena del valor para el azufre.
5. Falta de ordenamiento que considere el adecuado balance entre consumo, producción y energía.

Amenazas

1. Poca prioridad de los sistemas financieros para inversiones de producción de azufre.
2. Oposición social de sectores ambientalistas, entre otros, ante las emisiones atmosféricas.
3. Contaminación creciente del agua.
4. Restricciones ambientales cada vez más estrictas.
5. Elevado precio del agua y bajo precio del azufre en el mercado.

Fortalezas

1. Existe talento humano para la investigación, desarrollo y explotación de las nuevas tecnologías en Cuba.
2. Existe una alimentación a planta estable y con características similares.
3. Existe un mercado interno con capacidad de demanda inmediata para el azufre.
4. Una capacidad instalada para producir azufre con eficiencia tecnológica.
5. Una capacidad instalada para recuperar agua industrial con eficiencia tecnológica.

Oportunidades

1. Creciente importancia y necesidad de explotar el uso y reúso del agua industrial.
2. Imagen ambiental positiva ante los efectos negativos de la contaminación atmosférica.
3. Creciente importancia y necesidad de exportar el azufre.
4. Posibilidad para reducir costos energéticos y totales.
5. Representa una estrategia socio-ecológica importante para preservar la calidad de vida en la bahía.

El procesamiento de la matriz DAFO, que evalúa el nivel de impacto que presentan los criterios, requiere que se les confiera una puntuación a esta interacción. La influencia puede ser alta, media, baja o nula y para esto se anota 3, 2, 1 y 0 respectivamente (figura 2).

		OPORTUNIDADES					AMENAZAS					Total
		O1	O2	O3	O4	O5	A1	A2	A3	A4	A5	
FORTALEZAS	F1	2	2	1	1	2	0	2	2	1	2	15
	F2	1	2	3	2	0	2	2	1	3	0	16
	F3	2	2	1	0	2	1	0	2	0	1	11
	F4	1	3	2	2	1	0	0	0	2	0	11
	F5	3	2	0	1	0	1	0	2	1	1	11
		Sub-total 38 = 27,74 %					Sub-total 26 = 18,98 %					
DEBILIDADES	D1	1	1	2	2	3	2	0	3	3	1	18
	D2	1	1	2	1	3	0	2	0	1	0	11
	D3	2	1	2	2	3	2	2	1	1	3	19
	D4	2	2	1	3	1	2	1	0	0	0	12
	D5	1	0	3	3	2	1	0	1	0	2	13
		Sub-total 45 = 32,85 %					Sub-total 28 = 20,43 %					
Total		16	16	17	17	17	11	9	12	12	10	137

Figura 2. Resultados de la Matriz DAFO.
Elaboración propia

Problema estratégico general

Como puede observarse en la matriz DAFO, la refinería se encuentra en el tercer cuadrante, estado de adaptación (D-O), donde predominan las debilidades de la empresa, pues actualmente no existe la tecnología para eliminar el azufre en el agua técnica de los procesos de refinación. Sin embargo, existen una serie de oportunidades que permiten atenuar la situación y que pueden ser aprovechadas.

Solución estratégica general

La ubicación estratégica en una posición adaptativa precisa enfrentar las debilidades presentes que impiden aprovechar las oportunidades. Por ello es necesario solucionar prioritariamente las debilidades, entonces se podrán aprovechar las oportunidades.

Análisis estructural. Variables claves (Análisis en el MIC-MAC)

Obtenidos los resultados de la matriz DAFO y apoyados en el análisis a documentos de trabajo, los expertos realizaron un listado sobre las variables que caracterizan a la refinería y su proceso de expansión, con su correspondiente definición. El trabajo con este grupo de variables permitió identificar los factores críticos del contexto, mostrando con la ayuda del análisis estructural las variables claves que tienen mayor influencia en la industria.

Listado de variables y conceptualización

1. Producción: garantiza la producción de azufre, proveniente de las aguas contaminadas.
2. Procedimiento de trabajo: algoritmo lógico para el desarrollo de las actividades laborales.
3. Disponibilidad de materia prima (agua): insumos necesarios para desarrollar la actividad fundamental.
4. Otorgamiento de créditos ambientales: posibilidad de crédito ambiental para inversión por proyecto.
5. Demanda: existencia de mercado interno con demanda para la producción de azufre.
6. Decisiones gubernamentales: legislaciones estatales que influyen sobre la organización.
7. Inversiones: conjunto de recursos en una organización para crear activos.
8. Concertación entre actores: refiere acuerdos entre operación–inversionista–sociedad.
9. Disponibilidad de solvente (amina): químicos necesarios para lograr la separación del H₂S de la corriente de gases.
10. Mercado: existencia de mercado interno y competencia con el mercado externo.
11. Insumos materiales: insumos necesarios para desarrollar la actividad fundamental.
12. Costo: corresponde al costo de las inversiones para estos procesos.
13. Tecnología: medio para garantizar la recuperación del agua industrial y el Azufre.
14. Política de lineamientos: comprende la implementación de los lineamientos a la actividad según la política de desarrollo del país.
15. Marco regulatorio: legislaciones y regulaciones establecidas para el funcionamiento de la organización.
16. Proveedores: nivel de influencia de la garantía de los medios y materiales necesarios proporcionados por los proveedores para la continuidad de todos los servicios de la entidad (calidad, precio, distribución, etcétera).
17. Seguridad y salud: conjunto de normas y procediendo que garantizan la seguridad y salud de los trabajadores en la organización.

18. Fuerza técnica especializada: disponibilidad de fuerza de trabajo calificada en el mercado.
19. Normas de calidad agua: regulan la reutilización del agua industrial.
20. Metrología: medición de consumo y operación del sistema.
21. Precio: refiere lo que cuesta el consumo de agua y lo que aporta la venta del azufre.
22. Calidad: establece los parámetros a cumplir para la venta del azufre.
23. Integración: posibilidad de integración de los sistemas que recuperan el agua y el azufre.
24. Educación y concientización: vía para lograr un uso racional del agua.
25. Energía: influencia directa en cada proceso.
26. Normas de emisiones: regulan las emisiones al medio líquido o gaseoso.
27. Contaminación: comprende el impacto sobre el medio acuático y atmosférico.
28. Infraestructura tecnológica: estado de las instalaciones tecnológicas que garanticen el servicio del agua, su tratamiento como residual y la protección de las aguas marinas.
29. Presupuesto: posibilidades reales de utilizar el presupuesto asignado a la organización.
30. Capacitación técnica y tecnológica: posibilidad de recibir capacitación técnica para enfrentar la nueva tecnología.
31. Bloqueo económico: repercusión en Cuba en cuanto a las regulaciones jurídicas, las restricciones económicas en la integración de Cuba al mundo y otras.
32. Disponibilidad de materia prima: insumos necesarios para desarrollar la actividad fundamental, con el crudo aparece el azufre que contamina al agua.
33. Responsabilidad social: refiere la responsabilidad que adquiere la explotación de la tecnología con el medio ambiente.
34. Condiciones de trabajo: requerimientos mínimos para cada puesto que satisfaga a los trabajadores con el objetivo de que se puedan ejecutar sin riesgos las tareas previstas.
35. Clima: comportamiento de los vientos, períodos de seca y lluvia en el año hidrológico.
36. Activos fijos existentes: inmueble y medios que se necesitan para realizar la actividad fundamental y para la relación inter- plantas existentes y proyectadas.

Relación entre variables

Una vez que fueron identificadas las variables de mayor influencia, los expertos establecieron mediante un consenso las relaciones entre las mismas e identificaron el grado de influencia o dependencia de cada una sobre el resto. Para ello se creó una matriz (Matriz de Influencias Directas- MID) que contempla dichos resultados.

Identificación de las variables claves

Una vez que fueron introducidas, tanto las variables como la matriz de influencia entre ellas, en el programa MIC-MAC se obtuvo como resultado el Plano de Influencias y Dependencias Directas y Plano de Influencias y Dependencias Indirectas (ver tabla 3).

TABLA 3. INDICADORES Y VALORES EXPUESTOS EN LA (MID)

Indicadores	Valores	
Tamaño de la matriz	36	
Número de iteraciones	2	
Total de ceros	84	
Total de uno	728	
Total de dos	481	
Total de tres	3	
Total de P	0	
Total	1212	
Velocidad de llenado	93,518 52 %	
Estabilidad	Iteración 1--- Iteración 2	
Influencia	95 %	100 %
Dependencia	97 %	99 %

Teniendo en cuenta que en el segundo plano (figura 3) se evidencia el desplazamiento de las variables desde el punto de las influencias directas hasta las indirectas, a partir de este se pueden interpretar las siguientes variables.

Variables de entrada: poco dependientes que, generalmente, determinan el funcionamiento del sistema, se identificaron- Procedimiento de trabajo (V2) y Condiciones de trabajo (V34).

Variables de enlace: fueron definidas- Decisiones gubernamentales (V6), Inversiones (V7), Tecnología (V13), Política de lineamientos (V14), Proveedores (V16), Seguridad y salud (V17), Precio (V21), Normas de emisiones (26) y Contaminación (V27).

Variables excluidas: Muy dependientes- Producción (V1), Disponibilidad de materia prima (agua) (V3), Mercado (V10), Marco regulatorio (V15), Calidad (V22), Integración (V23), Educación y concientización (V24), Energía (V25), Infraestructura tecnológica (V28), Capacitación técnica y tecnológica (V30), Disponibilidad de materia crudo (azufre) (V32), Responsabilidad social (V33), Clima (V35) y Activos fijos existentes (V36).

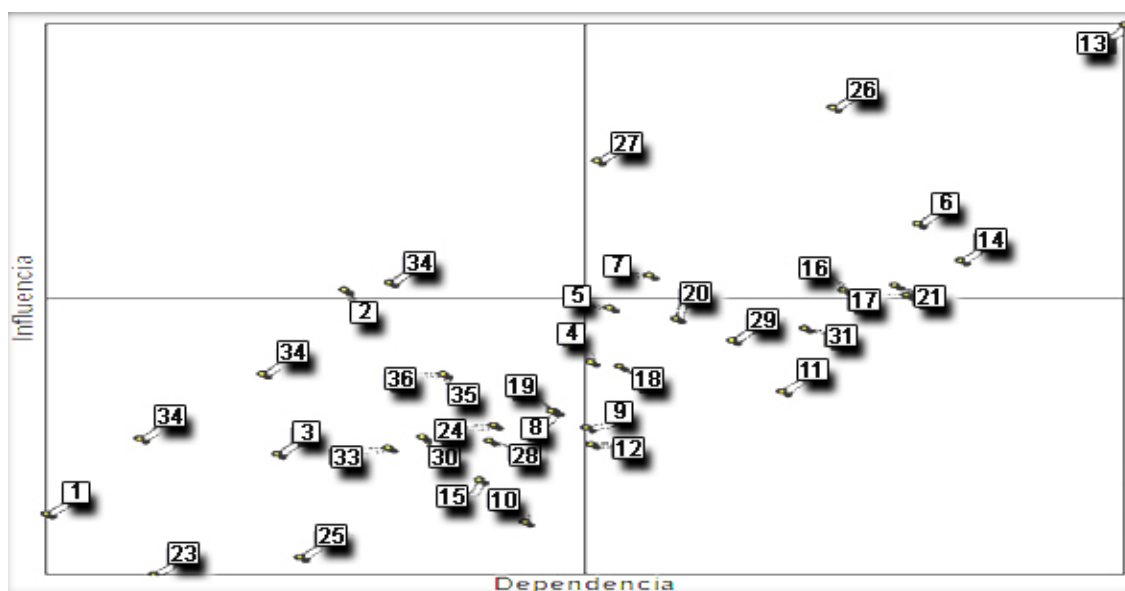


Figura 3. Plano de Influencias y Dependencias Indirectas Potenciales por el MIC-MAC

Variables de resultado: como variables de salida- Insumos materiales (V11), Metrología (V20), Presupuesto (V29) y Bloqueo económico (V31).

Variables de pelotón: las que se encuentran en el centro de la matriz- Otorgamiento de créditos ambientales (V4), Demanda (V5), Concertación entre actores (V8), Disponibilidad de solvente (amina) (V9), Costo (V12), Fuerza técnica especializada (V18) y Normas de calidad agua (V19).

En la figura 3 anterior se definen las variables claves, es decir, las que se consideran con alto nivel de potencialidad, las más importantes para el proceso de eliminación de azufre. A continuación se hace mención a cada una de ellas.

Variables claves

- Decisiones gubernamentales: legislaciones estatales que influyen sobre la organización.
- Inversiones: conjunto de recursos en una organización para crear activos.

Análisis prospectivo medioambiental para la recuperación de aguas sulfurosas en la refinería de petróleo de Cienfuegos

- Tecnología: conjunto de aparatos, procedimientos, etcétera, necesarios para garantizar la recuperación del agua industrial y el azufre.
- Política de lineamientos: comprende la implementación de los lineamientos a la actividad según la política de desarrollo del país.
- Proveedores: nivel de influencia de la garantía de los medios y materiales necesarios proporcionados por los proveedores para la continuidad de todos los servicios de la entidad (calidad, precio, distribución, etcétera).
- Seguridad y salud: conjunto de normas y procediendo que garantizan la seguridad y salud de los trabajadores en la organización.
- Precio: refiere lo que cuesta el consumo de agua y lo que aporta la venta del azufre.
- Normas de emisiones: regulan las emisiones al medio líquido o gaseoso
- Contaminación: comprende el impacto sobre el medio acuático y atmosférico.

Se puede precisar entonces que teniendo en cuenta las normas de emisiones existentes, así como la importancia de la seguridad y salud en el trabajo y los impactos ocasionados por la contaminación, es necesario realizar inversiones que, apoyadas en la política de lineamientos como decisiones gubernamentales, permitan la adquisición a través de los proveedores, de una tecnología capaz de disminuir las debilidades que fueron detectadas en el diagnóstico realizado al inicio de la investigación, teniendo en cuenta los precios que influyen en los gastos para la empresa, así como los ingresos que aportará a la misma.

Análisis del juego de actores. Evolución del futuro (Análisis en el MACTOR)

Los expertos como parte de su función, una vez que fueron definidas las variables claves, identificaron los siguientes actores que pueden influir en la introducción de las tecnologías para recuperar agua industrial y producir azufre.

Listado de Actores

1. Cooperación Nacional.
2. Ministerio de Economía y Planificación.
3. Cooperación internacional.
4. Ministerio de Finanzas y Precios.
5. Ministerio de Salud Pública.

6. Ministerio de Industrias.
7. Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medioambiente.
8. Sector Petrolero.
9. Sociedad Civil.
10. Ministerio de Energía y Minas.
11. Sector Financiero.
12. Tecnólogos.
13. Sector Académico.
14. Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos.
15. Consejo de Estado.

Posteriormente, los expertos analizaron el grado de influencia o dependencia de cada una con respecto a las otras. De esta forma, se conformó la Matriz de Influencias Directas- MID, que contempla dichos resultados.

A partir de esta matriz el método MACTOR proporciona la Matriz de Influencias Directas e Indirectas- MIDI. Según estos resultados se puede concluir que: los actores que más influyen son: Ministerio de Economía y Planificación (A2), Ministerio de Finanzas y Precios (A4), Ministerio de Energía y Minas (A10) y Tecnólogos (A12). Mientras que los que más dependen son: Ministerio de Finanzas y Precios (A4), Ministerio de Industrias (A6), Sector Petrolero (A8) e Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos (A14).

Por otra parte, se tiene también la Matriz de Máximas Influencias Directas e Indirectas- MMIDI, que se emplea para identificar el nivel máximo de influencias y dependencia que un actor puede ejercer sobre otro actor, ya sea de forma directa o a través de un actor relevo.

Una vez realizado el análisis de esta matriz se tiene que los actores que presentan mayor influencia son Cooperación internacional (A3), Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medioambiente (A7), Sector Petrolero (A8) y el Consejo de Estado (A15). Mientras que los que presentan mayor dependencia son el Ministerio de Salud Pública (A5), Ministerio de Industrias (A6), Sociedad Civil (A9) y el Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos (A14).

Análisis prospectivo medioambiental para la recuperación de aguas sulfurosas en la refinería de petróleo de Cienfuegos

Finalmente, se obtiene un plano de influencias y dependencias entre actores que permite identificar los actores dominantes, actores de enlace, actores autónomos y los actores dominados (figura 4).

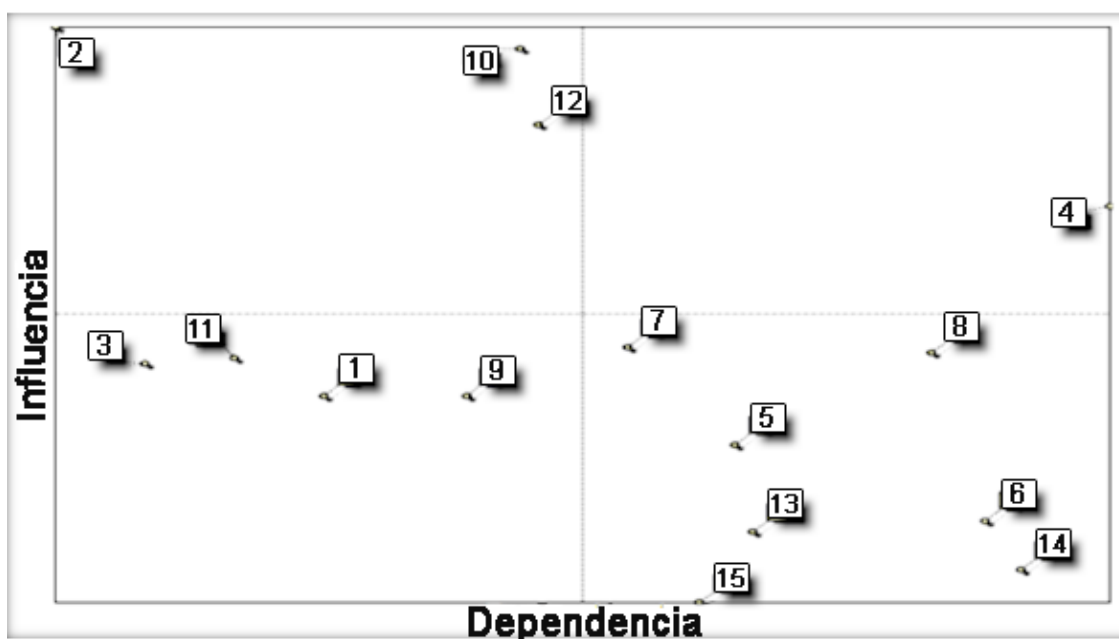


Figura 4. Plano de Influencias y Dependencias entre actores por el MACTOR

A partir de lo anterior se tiene como resultado:

Actores dominantes: Ministerio de Economía y Planificación (A2), Ministerio de Energía y Minas (A10) y Tecnólogos (A12).

Actores de enlace: Ministerio de Finanzas y Precios (A4).

Actores autónomos: Cooperación Nacional (A1), Cooperación internacional (A3), Sociedad Civil (A9) y el Sector Financiero (A11).

Actores dominados: Ministerio de Salud Pública (A5), Ministerio de Industrias (A6), Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medioambiente (A7), Sector Petrolero (A8), Sector Académico (A13), Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos (A14) y el Consejo de Estado (A15).

Elaboración de los escenarios prospectivos (Análisis en el SMIC)

Para la elaboración de los escenarios prospectivos se tienen en cuenta los análisis MIC-MAC y MACTOR que permitieron conocer las variables claves del sistema, así como los actores más influyentes y dependientes. Todo esto contribuye a que los expertos tengan la facilidad de definir los eventos, es decir, las hipótesis que pueden o no ocurrir durante el proceso en estudio, para lo cual se hace necesaria la participación en un taller

con el objetivo de llegar a un acuerdo. A partir de lo anterior se obtuvo como resultado el siguiente listado de hipótesis.

Listado de hipótesis

H1: la implementación y cumplimiento de las normas regulatorias de emisiones, facilitará la sostenibilidad del proceso de refinación.

H2: la posibilidad de que los residuales líquidos (agua ácidas) generados en los procesos productivos sean tratados y recuperados para su reúso.

H3: la integración de las unidades, para la eliminación de azufre en el agua industrial y la producción de azufre, potenciará el desarrollo socio económico industrial y el equilibrio sociedad–naturaleza.

H4: la potenciación del talento humano permitirá el desarrollo de la Investigación–Desarrollo–Innovación tecnológica y permitirá adecuar la asimilación de tecnologías apropiadas.

H5: el establecimiento de una clara estrategia de producción–comercialización de azufre facilitará la gestión de financiamiento nacional e internacional.

H6: la adecuada coordinación entre actores y factores de la producción de azufre reducirá los costos de transacción y mejorará los parámetros de emisiones a la bahía.

Luego se presenta una encuesta a los expertos para que, mediante su opinión, puedan determinar la probabilidad de ocurrencia de los eventos de manera independiente, así como la probabilidad de que ocurra H_n si a su vez ocurre H_{n+1} , o por el contrario que ocurra H_n si a su vez no ocurre H_{n+1} ; para lo cual se utilizan tres matrices, que serán introducidas en el SMIC para determinar los resultados finales. Estos se exponen a continuación.

Probabilidades simples

Como se puede observar a continuación, se encuentran tabuladas, según el Sistema de Matrices de Impactos Cruzados (SMIC), las probabilidades simples de ocurrencia de cada hipótesis o evento, teniendo en cuenta la siguiente clasificación:

Evento casi improbable (0,00)

Evento improbable (0,30)

Evento medianamente improbable (0,50)

Evento probable (0,70)

Evento casi cierto (1,00)

Por el resultado de la matriz se puede deducir que el evento más probable es la implementación y cumplimiento de las normas regulatorias de emisiones, que facilitará la sostenibilidad del proceso de refinación (H1) con un 0,775. Mientras que el evento menos probable resulta ser la posibilidad de que los residuales líquidos (agua ácidas) generados en los procesos productivos sean tratados y recuperados para su reúso (H2) con un valor de 0,55 (ver tabla 4).

**TABLA 4. DATOS DE PROBABILIDADES
SIMPLES**

Hipótesis	Probabilidades
1: H1	0,775
2: H2	0,55
3: H3	0,718
4: H4	0,746
5: H5	0,707
6: H6	0,696

Probabilidades condicionadas con realización

El análisis sobre las probabilidades condicionadas con la realización de otro evento demostró que la combinación más probable es la implementación y cumplimiento de las normas regulatorias de emisiones, facilitará la sostenibilidad del proceso de refinación, con la integración de las unidades, para la eliminación de azufre en el agua industrial y la producción de azufre, potenciará el desarrollo socio económico industrial y el equilibrio sociedad–naturaleza. En este caso H1 con H3 con una probabilidad igual a 0,995. Esto significa que las normas regulatorias de emisiones serán cumplidas si ocurre la integración de las unidades.

Por otra parte, se tiene que la combinación menos probable resulta ser la de H2 con H5 con un valor de 0,607. Esto significa que la posibilidad de que los residuales líquidos (agua ácidas) generados en los procesos productivos sean tratados y recuperados para su reúso es poco probable a pesar del establecimiento de una clara estrategia de producción de azufre que facilitará la gestión de financiamiento nacional e internacional (tabla 5).

**TABLA 5. DATOS DE PROBABILIDADES CONDICIONADAS
CON LA REALIZACIÓN**

Hipótesis	H1	H2	H3	H4	H5	H6
1 : H1	0,775	0,904	0,995	0,985	0,815	0,931
2 : H2	0,642	0,55	0,65	0,659	0,607	0,72
3 : H3	0,922	0,849	0,718	0,921	0,769	0,921
4 : H4	0,948	0,894	0,956	0,746	0,831	0,927
5 : H5	0,744	0,781	0,757	0,788	0,707	0,848
6 : H6	0,836	0,911	0,892	0,865	0,834	0,696

Probabilidades condicionadas sin realización

En cuanto al análisis sobre la probabilidad condicionada (ver tabla 6), si no hay realización de otro evento señala que la combinación más probable es H1 con H5 con 0,679; es decir, la implementación y cumplimiento de las normas regulatorias de emisiones, facilitará la sustentabilidad del proceso de refinación (H1) a pesar de que no se efectúe H5 (el establecimiento de una clara estrategia de producción de azufre que facilitará la gestión de financiamiento nacional e internacional).

Mientras que la menos probable es la combinación H3 con H1 con 0,017, la cual expresa que es poco probable que la integración de las unidades, adecuada y racionalmente a la eliminación de azufre en el agua industrial y la producción de azufre, potenciará el desarrollo socio económico industrial y el equilibrio sociedad–naturaleza si no se tiene en cuenta la implementación y cumplimiento de las normas regulatorias de emisiones.

**TABLA 6. DATOS DE PROBABILIDADES CONDICIONADAS SIN LA
REALIZACIÓN**

Hipótesis	H1	H2	H3	H4	H5	H6
1 : H1	0	0,617	0,215	0,16	0,679	0,18
2 : H2	0,234	0	0,294	0,23	0,412	0,161
3 : H3	0,017	0,558	0	0,125	0,595	0,255
4 : H4	0,05	0,565	0,21	0	0,54	0,33
5 : H5	0,582	0,618	0,58	0,47	0	0,385
6 : H6	0,212	0,432	0,195	0,199	0,361	0

También se tiene como resultado un histograma de probabilidades que muestra la probabilidad de ocurrencia de los escenarios construidos a partir de las hipótesis (figura 5). Al realizar el análisis correspondiente se tiene que de los seis eventos o hipótesis consideradas se formaron un total de 64 escenarios. Para ello se tomaron en consideración todas las posibles combinaciones entre ellos.

Análisis prospectivo medioambiental para la recuperación de aguas sulfurosas en la refinería de petróleo de Cienfuegos

En cuanto a la selección de estos, la metodología del SMIC plantea que se seleccionan una cantidad de escenarios tales que en su conjunto tenga el 80 % de las probabilidades de ocurrencia. A pesar de que este valor puede variar, y por tanto la cantidad de escenarios evaluados, en esta investigación se trabajó bajo esa condición. De ahí que del total, cinco fueron clasificados como los más probables. Entre ellos se selecciona el más probable, así como el más deseado.

Teniendo en cuenta que cuando la probabilidad de ocurrencia de un escenario es superior a 0,2 (20 %) se tiene una débil coherencia en el sistema, el escenario 01 es rechazado del estudio.

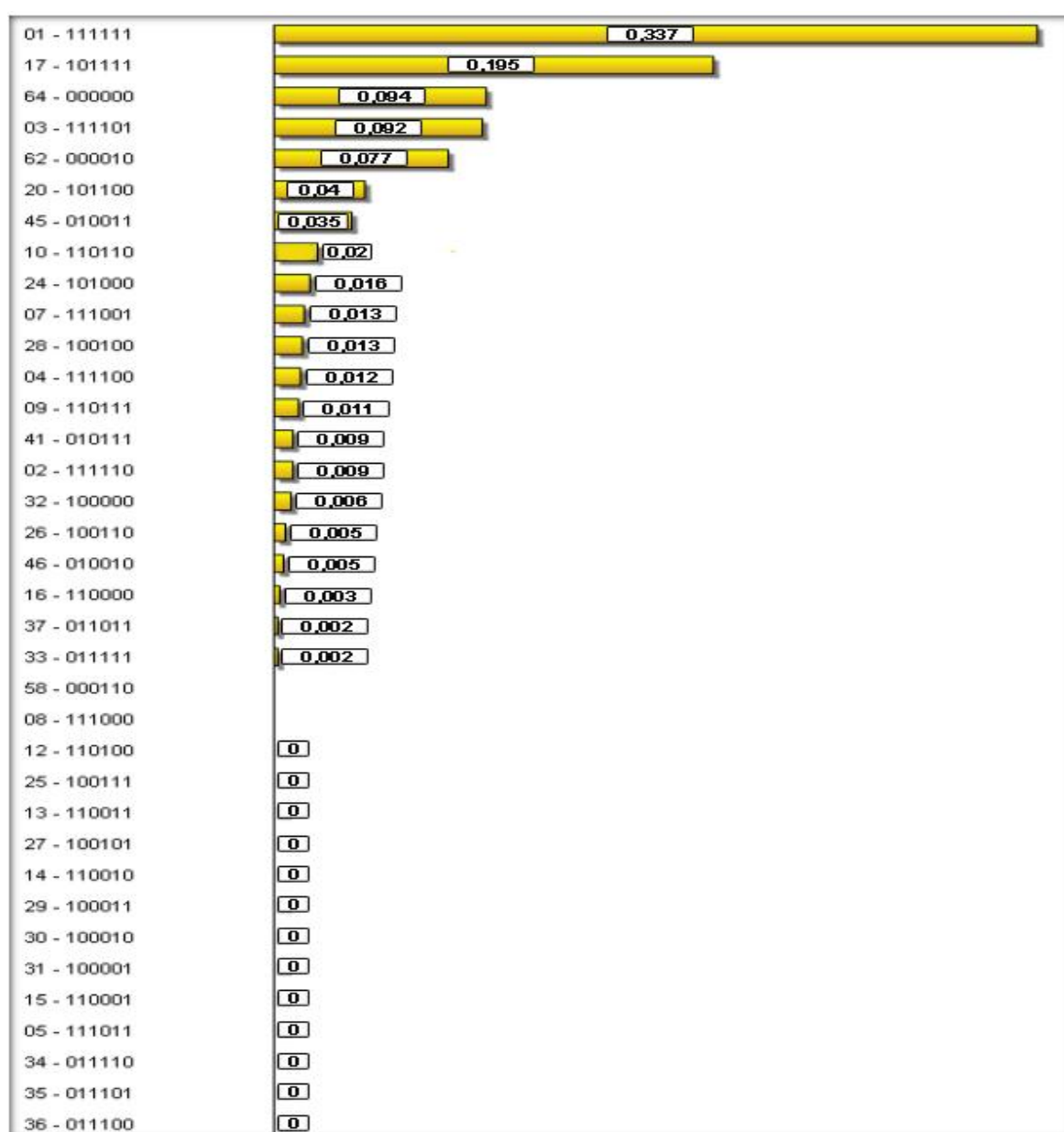


Figura 5. Histograma de Probabilidad de Escenarios según el SMIC

Escenarios apuestas

Escenario 17 (101111): (P= 0,195). En este se alcanza la implementación y cumplimiento de las normas regulatorias de emisiones, que facilitará la sostenibilidad del proceso de refinación; la integración de las unidades para la eliminación de azufre en el agua industrial y la producción de azufre, que potenciará el desarrollo socioeconómico, industrial y el equilibrio sociedad–naturaleza; la potenciación del talento humano que permitirá el desarrollo de la Investigación–Desarrollo–Innovación tecnológica y posibilitará adecuar la asimilación de tecnologías apropiadas; el establecimiento de una clara estrategia de producción de azufre que facilitará la gestión de financiamiento nacional e internacional, así como la adecuada coordinación entre actores y factores de la producción de azufre que reducirá los costos de transacción y mejorará los parámetros de emisiones a la bahía. Sin embargo, no se logra que los residuales líquidos (agua ácidas) generados en los procesos productivos sean tratados y recuperados para su reúso.

Escenario 64 (000000): (P= 0, 094). En este se alcanzan resultados totalmente adversos, ya que no se cumple ninguno de los eventos propuestos, pues no se logra la implementación y cumplimiento de las normas regulatorias de emisiones, que facilitará la sostenibilidad del proceso de refinación; el hecho de que los residuales líquidos (agua ácidas) generados en los procesos productivos sean tratados y recuperados para su reúso; la integración de las unidades para la eliminación de azufre en el agua industrial y la producción de azufre, que potenciará el desarrollo socioeconómico industrial y el equilibrio sociedad–naturaleza; la potenciación del talento humano que permitirá el desarrollo de la Investigación–Desarrollo–Innovación tecnológica y permitirá adecuar la asimilación de tecnologías apropiadas; así como tampoco el establecimiento de una clara estrategia de producción de azufre que facilitará la gestión de financiamiento nacional e internacional; ni la adecuada coordinación entre actores y factores de la producción de azufre que reducirá los costos de transacción y mejorará los parámetros de emisiones a la bahía.

Escenario 03 (111101): (P =0, 092). En el mismo se consigue la implementación y cumplimiento de las normas regulatorias de emisiones, que facilitará la sostenibilidad del proceso de refinación; la posibilidad de que los residuales líquidos (agua ácidas) generados en los procesos productivos sean tratados y recuperados para su reúso; la integración de las unidades para la eliminación de azufre en el agua industrial y la

producción de azufre, que potenciará el desarrollo socio económico industrial y el equilibrio sociedad–naturaleza; la potenciación del talento humano que permitirá el desarrollo de la Investigación–Desarrollo–Innovación tecnológica y permitirá adecuar la asimilación de tecnologías apropiadas; y la adecuada coordinación entre actores y factores de la producción de azufre reducirá los costos de transacción y mejorará los parámetros de emisiones a la bahía. Mientras que no se alcanzará el establecimiento de una clara estrategia de producción de azufre que facilitará la gestión de financiamiento nacional e internacional.

Escenario 62 (000010): (P= 0, 077). Como se puede observar en este escenario solo se cumple con la quinta hipótesis, es decir, solo se logrará el establecimiento de una clara estrategia de producción de azufre que facilitará la gestión de financiamiento nacional e internacional. Mientras que se imposibilita la probabilidad de lograr la implementación y cumplimiento de las normas regulatorias de emisiones, que facilitará la sostenibilidad del proceso de refinación; el hecho de que los residuales líquidos (agua ácidas) generados en los procesos productivos sean tratados y recuperados para su reuso; la integración de las unidades para la eliminación de azufre en el agua industrial y la producción de azufre, que potenciará el desarrollo socio económico industrial y el equilibrio sociedad–naturaleza; la potenciación del talento humano que permitirá el desarrollo de la Investigación–Desarrollo–Innovación tecnológica y permitirá adecuar la asimilación de tecnologías apropiadas; así como tampoco la adecuada coordinación entre actores y factores de la producción de azufre que reducirá los costos de transacción y mejorará los parámetros de emisiones a la bahía.

Descripción del escenario más probable

A partir de lo analizado anteriormente, el escenario más probable es el 01. En este queda claro que es posible realizar los seis eventos, lo que demuestra la importancia de trabajar sobre ellos para su cumplimiento. Para ello es necesaria la colaboración de los actores que influyen en el proceso en aras de potenciar las variables claves y darle solución a la problemática.

Descripción del escenario apuesta

A partir del criterio de cada uno de los expertos, el escenario por el que se apuesta es por 17. En este queda claro que se debe alcanzar la implementación y cumplimiento de las normas y regulaciones ambientales, para lo cual será necesaria la integración de las unidades. Por otra parte, se debe establecer una estrategia de producción de azufre, así

como la potenciación del desarrollo del talento humano y la adecuada coordinación entre actores. Todo esto provoca la conversión de debilidades en fortalezas, la potenciación de las ya existentes, aprovechando las oportunidades que se tienen y enfrentando de manera positiva todas aquellas amenazas que atentan, no solo contra el proceso, sino también contra el entorno, contra los seres humanos.

Propuesta de plan de mejoras

Concluido el análisis prospectivo quedan definidos los escenarios futuros a los que se enfrentará la refinería y su proyecto de expansión, así como los actores que tendrán la oportunidad de llevar a vía de ejecución. Sin embargo, son conocidas las regulaciones medioambientales [5, 6, 18, 19] que establecen pautas a seguir para cada inversión o proceso nuevo.

El impacto ambiental de las aguas residuales industriales y el costo mucho más alto del agua cruda son serios desafíos que enfrenta la industria de procesos químicos en la actualidad.

A partir de los años 80, la industria de procesos químicos comenzó a mostrar interés en la implementación de políticas que analizaran el flujo de contaminantes como flujos de materiales de valor que podían ser recuperados de manera efectiva. Estos avances también han sido en respuesta a regulaciones ambientales cada vez de mayor exigencia que han presionado a las industrias para desarrollar estrategias de prevención y minimización de la contaminación a un costo rentable. Por consiguiente, es necesario trazar estrategias que permitan que su uso sea económica y ambientalmente sostenible.

En consecuencia, el grupo de expertos, basados en el principio de sostenibilidad establecido por Brundtland [24]: “satisfacer las necesidades de la actual generación pero sin que por esto se vean sacrificadas las capacidades futuras de las siguientes generaciones de satisfacer sus propias necesidades”; luego de un proceso de búsqueda de información, del uso de su experticia y de un consenso unánime, propusieron seis variantes tecnológicas que, bien diseñadas o integradas, posibilitarán el cumplimiento de las hipótesis planteadas y, por consiguiente, garantizarán el buen desempeño del proceso de refinación a pesar de su expansión tecnológica. Se recomienda que las variantes tecnológicas que se presentan a continuación, sean evaluadas con las herramientas de la economía ecológica, con el objetivo de lograr su valoración integral,

si se tiene en cuenta que su objeto social abarca el aporte económico y su impacto social. A continuación las variantes identificadas:

Variantes tecnológicas

Variante A: Refinería actual

Variante B: Variante A+ Unidad de vacío + Unidad de craqueo catalítico

Variante C: Variante B+ Unidad endulzamiento de gases + Despojadora de aguas ácidas

Variante D: Variante C+ Unidad de recuperación de azufre - INCINERADOR

Variante E: Variante C+ Unidad de recuperación de azufre + INCINERADOR

Variante F: Variante D + Reactor de Reducción + enfriamiento y recirculación del gas ácido de salida + Quemadores de los Hornos (Innovación Tecnológica)

Conclusiones

En un primer momento de la investigación se fundamentan las concepciones teóricas del proceso de recuperación de las aguas sulfurosas y de la prospectiva estratégica, para sentar las bases de la misma, logrando la interrelación. En este sentido, la prospectiva asume una significación especial como fundamento para la planificación estratégica con el objetivo de impulsar el proceso de expansión de la refinería.

Existen diversas metodologías para los estudios de futuro, en especial para la construcción de escenarios. En el estudio se propone una metodología adaptada al método de escenarios de Michael Godet, la cual permite hacer un análisis de las tendencias considerando variables cualitativas y cuantitativas, reduciendo el grado de incertidumbre ante el entorno cambiante y adoptando las decisiones pertinentes considerando los datos exactos que caracterizan el sistema. A partir del trabajo con expertos, se puede definir acciones estratégicas que impulsen el proceso de expansión.

Considerando los resultados obtenidos a partir del criterio de los expertos del estudio y la aplicación de las diferentes técnicas, se obtienen nueve variables claves (V6, V7, V13, V14, V16, V17, V21, V26 y V27) las cuales se correlacionan con las debilidades de la situación, permitiendo pronosticar que todos los parámetros evaluados van a contar con un fuerte accionar en el futuro. Se

propone un grupo de cuatro actores de mayor influencia en el sistema, destacándose el grupo gobierno (A2, A4, A10 y A12. Determinándose el escenario apuesta que incluye cinco de la hipótesis elaboradas (H1, H3, H4, H5 y H6). De acuerdo con este escenario se plantean seis variantes tecnológicas que pueden dar respuesta a la problemática diagnosticada, luego de un análisis ecológico para su selección, teniendo en cuenta que su fundamento se basa en la problemática ambiental.

Referencias bibliográficas

1. PEMEX, Aprovechamiento y reúso del agua en procesos de refinación de petróleo, Refining Process, México, 2013, consultado: 10 de marzo de 2014, disponible en: <http://www.ref.pemex.com/octanaje/o63/o.htm>
2. JONES & PUJADO. P., *Handbook of Petroleum Processing*, First part., pp. 631-643, 2006, consultado el 10 de marzo de 2014, Disponible en línea <http://es.slideshare.net/BenimbenFaruk/handbook-of-petroleum-processing>
3. MEYERS, R., *Handbook of Petroleum Refining Processes*, third edition, McGraw-Hill, Chapter 9.4, 2004, consultado el 21 de abril de 2014, disponible en línea: http://es.slideshare.net/roode_vlinder/handbook-of-petroleum-refining-processes-mcgraw-hill
4. INTERNATIONAL FINANCE CORPORATION (IFC), *Environmental, Health, and Safety Guidelines for Petroleum Refining*, p. 13, table 1, Air emissions levels for petroleum refining facilities, World Bank Group, consultado el 30 de abril de 2007, disponible en línea: <http://www.elaw.org>
5. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (US EPA), *Standard of Performance for New Stationary Sources. Federal Regulations*, 40 CFR Part 60. Rule 62-204.800, 2010. F.A.C. Subpart JA—Standards of Performance for Petroleum Refineries for Which Construction, Reconstruction, or Modification Commenced After May 14, 2007, § 60.102a Emissions limitations, Paragraphs (f)(1) or (2)-pages 4-6, Washington, DC: US EPA. 2010, disponible en línea <http://www.epa.gov/epacfr40/chapt-I.info/>

6. ALVA ARGAEZ, A., "The design of water using systems in petroleum refining using water-pinch decomposition", *Chemical Engineering Journal*, 2007, 1(3), 33-46.
7. ANDERSON, J., "The environmental benefits of water recycling and reuse", *Water Science and Technology. Water Supply*, 2009, 3(4), 1-10.
8. LOBELLES, G. O. "Estrategia para uso racional del agua y su energía asociada, desde la perspectiva de la economía ecológica, para el proceso de refinación de petróleo", Tesis en opción al grado de especialista en tecnologías de refinación de petróleo, Universidad Camilo Cienfuegos, Matanzas, Cuba, 2012.
9. WAUQUIER J.P. *Distillation, Absorption and Stripping in the Petroleum Industry. In Separation Processes*, Translate by Barbara Brown Balvet, Editions TECHNIP, Institut Français du Pétrole, Paris, 2001, Chapter 5: pages 241-251, ISBN: 2-7108-0761-0, Series ISBN 2-7108-0686-X París, Francia.
10. DECOOPMAN, F., *Water Treatment. In Petroleum Refining III Conversion Processes*, Translate by Barbara Brown Balvet, Editions TECHNIP, Institut Français du Pétrole, Paris 2002, Chapter 19: pages 639-667, ISBN: 2-7108-0779-3 Series ISBN 2-7108-0686-X París, Francia.
11. GARY H. J.; HANDWERK, G. E., *Crude Distillation. Petroleum Refining-Technology and Economics*, fourth edition, Editorial Marcel Dekker, Inc. New York, USA, 2006, Chapter 4: pp. 46-49, ISBN: 0-8247-0482-7
12. LLUCH URPI. J., *Tecnología y margen de refino*, Ediciones Díaz de Santos, España, 2008, ISBN: 978-84-7978-875-9, consultado el 24 de junio de 2014, disponible en: <http://www.diazdesantos.es/ediciones>
13. SASS, I. M.; GUPTA, A., "Sulfur recovery from Acid Gas using the Claus Process and High Temperature Air Combustion (HiTAC) Technology", *American Journal of Environmental Sciences*, 2008, 4(5), 502-511.

14. ZARENEZHAD, B.; HOSSEINPOUR, N., “Evaluation of different alternatives for increasing the reaction furnace temperature of Claus SRU by chemical equilibrium calculations”, *Applied Thermal Engineering*, 2008, (28), 738-744.
15. OLMEDO TOLEDO, T., *Análisis y selección de la mejor tecnología del proceso de recuperación de azufre para gases de cola en refinerías de México*, Universidad del ISTMO, Santo Domingo TEHUANTEPEC, OAXACA, 2010, consultado el 24 de junio de 2015, disponible en línea <https://www.scribd.com/ediciones>
16. ABEDINI, R.; KOOLIVAND, M.; GHASEMIAN, S., “Modeling and simulation of condensed sulfur in catalytic beds of Claus process: rapid estimation”, *Chemical Engineering Research Bulletin*”, 2010, 14(2), 110-114.
17. NORMA OFICIAL MEXICANA (NOM-148-SEMARNAT), *Contaminación atmosférica. Recuperación de azufre proveniente de los procesos de refinación del petróleo*, Diario Oficial de la Federación, tercera sección, 2007, pp. 2-3, consultado el 18 de noviembre de 2014.
18. THE LINDE GROUP, *Sulfur Process Technology*, SULFUR BROCH, 2012, consultado el 8 de septiembre de 2015, disponible en línea <https://www.scribd.com/.../Sulfur-Process-Technology>
19. ELSNER, M. P. *et al.*, “The Claus process: teaching an old dog new trick”, *Catalysis Today*, 2003, núm. 79-80, pp. 487-494. DOI: 10. 1016/S0920-5861(03)00071-3
20. ORTEGÓN, E.; MEDINA, J., *Manual de Prospectiva y Decisión Estratégica: Bases Teórica e instrumentos para América Latina y el Caribe*, 2006, disponible en línea: <http://www.degerencia.com/articulo/que-es-prospectiva>

21. GODET, M., *De la anticipación a la acción. Manual de Prospectiva y Estrategia*, Editorial MARCOMBO, S.A., España, 2004, ISBN: 84-267-0924-9
22. GODET, M.; DURANCE, P., *Prospectiva Estratégica: problemas y métodos*, segunda edición, cuaderno 20, Editorial: LIPSOR, 2007, consultado el 20 de junio de 2014, disponible en línea: <http://www.lapropective.fr/>
23. MARI, M.; RECALDE, A.; FONTANALS J., *Prospectiva y planificación estratégica en ciencia y tecnología en argentina*, 2007, consultado el 29 de junio de 2011, disponible en línea <http://es-es.start2.mozilla.com/firefox?client=firefox-a&rls=org.mozilla:es-ES:official>
24. BRUNDTLAND, G. H., *Nuestro futuro común. Comisión Mundial sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo*, 1987, DOI:84-206-9574-2, disponible en <http://www.researchgate.net/>