Revisión bibliográfica

Panorama del coque de petróleo al 2030

María Isabel Specht[1]*

[1] Asesor, Bhakti Soluciones Técnica C.A.

Resumen

En este estudio se muestra un panorama del coque de petróleo, destacando su génesis; características; tipos producidos en Venezuela; precios; aplicaciones industriales a nivel mundial y nacional; lecciones aprendidas, junto con las características del mercado y su proyección hacia el 2030. Venezuela tiene la capacidad de generar 20.062 T/d de coque de petróleo retardado verde, siendo uno de los mayores productores del mundo. El 80 % del material se emplea como combustible sólido para generar electricidad, cemento y se calcina para usarlo en la industria del aluminio. Existen usos tímidos en la manufactura de carbón activado. Se espera que para el 2030, este mercado crezca y alcance el doble de su valor actual. La mayor demanda viene de las economías emergentes. El empleo masivo pudiese afectarse por regulaciones ambientales debido al alto contenido de azufre. Desde 1983, en Venezuela se han realizado estudios desde escala laboratorio hasta demostración comercial, para identificar la viabilidad de aplicación a escala industrial del coque de petróleo venezolano. Algunas iniciativas se ven en la calcinación del coque de petróleo, por parte de CVG Carbonorca. Ampliar el uso del coque de petróleo venezolano en el país demanda voluntad política, determinación, trabajo colaborativo, apoyo de máximas autoridades gubernamentales, sectores industriales, academia y de la comunidad.

Palabras clave: coque de petróleo, flexicoque, petcoke, coquificación, calcinación.

Recibido: 14 de noviembre del 2022
Aceptado: 17 de enero del 2023
Publicado: 11 de agosto del 2023
Conflicto de intereses: los autores declaran que no existen conflictos de intereses.
DOI: https://www.doi.org/10.5281/zenodo.7352686
***Autor para correspondencia:** María Specht
e-mail: chabela.specht@gmail.com

Review

Petroleum Coke Outlook 2030

María Isabel Specht[1],*

[1] Asesor, Bhakti Soluciones Técnica C.A.

Abstract

This study shows an overview of petroleum coke, highlighting its genesis; characteristics; types produced in Venezuela; prices; global and national industrial applications; lessons learned, along with the characteristics of the market and its projection towards 2030. Venezuela has the capacity to generate 20,062 T/d of green delayed petroleum coke, being among the largest producers in the world. The 80 % of the material is used as a solid fuel to generate electricity, cement, and is calcined for its application in the aluminum industry. Research is ongoing for using it in activated carbon production. It is expected that by 2030, the coke market will grow and reach twice of its current value. The greatest demand comes from emerging economies. Massive employment could be affected by environmental regulations due to the high sulfur content. Since 1983, studies have been carried out in Venezuela from laboratory scale to commercial demonstration, to identify the feasibility of industrial-scale application of Venezuelan petroleum coke. Some initiatives are seen in the calcination of petroleum coke by CVG Carbonorca. Expanding the use of Venezuelan petroleum coke in the country demands political will, determination, collaborative work, and support from the highest government authorities, industrial sectors, academia, and the community.

Keywords: petroleum coke, pet coke, flexicoke, delayed coking, calcination.

CIENCIA EN REVOLUCIÓN

Received: November 14, 2022
Accepted: January 17, 2023
Published: August 11, 2023
Conflict of interest: the authors declare that there are no conflicts of interest.
DOI: https://www.doi.org/10.5281/zenodo.7352686
***Corresponding author:**
María Specht
e-mail:
chabela.specht@gmail.com

1. Introducción

De los procesos de mejoramiento y refinación de crudo pesado y extra-pesado (CP y CXP), se derivan una variedad de productos: crudo diluido, también llamado diluted crude oil (DCO), crudo mejorado, gasolina, diésel, gasoil, querosén, jet fuel y como subproductos se derivan el azufre y el coque de petróleo.

Esta investigación documental se enfoca en el subproducto coque de petróleo y muestra los diferentes tipos según su génesis, características físico-químicas, producción del coque de petróleo, el precio a nivel internacional, las aplicaciones industriales y un panorama del mercado del coque de petróleo hacia el 2030, cerrando con una reflexión sobre el uso del coque de petróleo en el país para sustituir importaciones y atender algunas necesidades nacionales.

2. Metodología

Para realizar este trabajo se utilizaron fuentes documentales disponibles en internet: blogs, periódicos digitales, artículos de revistas científico-tecnológicas, reportes de empresas comercializadoras de coque de petróleo, informes o notas técnicas elaborados por la suscrita para CITGO Petroleum Corporation o para PDVSA Intevep. También, se utilizó información de diferentes presentaciones sobre el tema disponibles en formato PowerPoint o PDF, expuestas en talleres y cursos dictados también por la suscrita para diferentes grupos de

PDVSA, Industrias Básicas, Corporación Venezolana de Guayana (CVG) y, Ministerios del Poder Popular de Petróleo, Industrias y Producción Nacional, Ecosocialismo y Atención de las Aguas.

3. Discusión de resultados

3.1 Coque de petróleo

A partir de la producción de gasóleo, diésel, gasolina, lubricantes, combustible para aviones, entre otros hidrocarburos que se derivan de la conversión térmica de los crudos pesados y extra-pesados (crudos P y XP), se genera el coque de petróleo, que es un material orgánico sólido de alto contenido de carbono y poder calorífico.

Hay varios tipos de coque de petróleo según su génesis:

El coque de petróleo retardado que se deriva del proceso discontinuo de coquificación retardada, cuyo propósito es romper térmicamente las largas cadenas de C-H que conforman las corrientes provenientes del fondo de las destiladoras al vacío. La ruptura ocurre principalmente en los tambores de coque, entre los 450-500 °C y entre los 5 a 10 PSI. El coque se forma por condensación y polimerización, desde el fondo del recipiente y los gases resultantes fluyen hacia el tope, desde donde se inserta una herramienta que corta con agua a presión (> de 2500 PSI), el lecho de coque que se forma cuando el tambor está lleno. Luego, el coque pulverizado sale por el fondo hacia una fosa donde es recogido y trasladado hacia los patios de almacenamiento. Se estima que el rendimiento de cada unidad de coquificación

retardada oscila entre 15 al 20 % [1, 2] como se puede observar en la Figura 1.

En Venezuela existen 6 unidades de coquificación retardada con tres trenes cada una. En conjunto, tienen capacidad de producir 20.262 toneladas por día (T/d) de coque de petróleo retardado verde (sin procesar). De estas, dos unidades se encuentran operando en el Complejo Refinador Paraguaná (CRP) y ambas producen 5.200 T/d. Las otras cuatro unidades, operan en el Complejo Industrial José Antonio Anzoátegui (CIJAA) y juntas tienen capacidad de producir hasta 15.062 T/d.

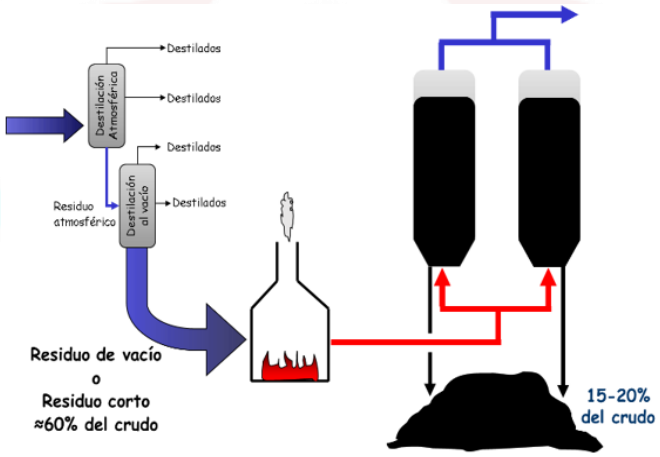

Figura 1. Esquema simplificado del proceso de coquificación retardada [2]

Con respecto a los tipos, se puede tener el coque tipo esponja, con segmentos porosos de forma irregular, de aproximadamente, 4 a 10 cm, cuya morfología es similar a la de una esponja. Este tipo de coque se deriva de la conversión de una corriente de fondo de vacío que contiene bajo nivel de asfaltenos, metales y bajo a moderado contenido de azufre

[1]. Su estructura es amorfa o isotrópica [3]. Cuando el fondo de la destiladora al vacío contiene altos niveles de asfaltenos o de oxígeno, resulta el coque tipo perdigón, partículas esféricas de 2 a 5 mm de diámetro o aglomerados que alcanzan hasta de 25 cm. Cuando las corrientes provienen del fondo de las unidades de craqueo catalítico o de hidrodesulfuración, se genera el coque tipo aguja que es de forma acicular y tamaño variable.

Otro tipo, es el coque fluido que se genera en la coquificación fluida, proceso continuo basado en un sistema de lecho fluidizado (partículas de coque de petróleo suspendidas en un gas). Aquí, el fondo de la destiladora al vacío que entra al reactor dispersado a través de boquillas a 510 °C y entre 22 a 36 PSI se craquea. El coque que se forma, se deposita sobre las partículas de coque suspendidas en el lecho. Con el tiempo, ellas se engrosan por la deposición sucesiva de coque hasta tener un tamaño y peso que no les permite seguir suspendidas, cayendo y extrayéndose del reactor. Una porción de ellas se muele y re-ingresa a la unidad para mantener al lecho fluidizado [1]. En Venezuela no hay de este tipo.

El flexicoque se deriva del proceso de flexicoquización, una tecnología de Exxon Mobil (FLEXICOKING™), parecido al de coquificación fluida. La corriente del fondo de la destiladora al vacío se coloca a 525 °C al encontrarse con el lecho fluidizado. El gas de bajo poder calorífico (flexigas), sale por el tope del reactor y el coque de petróleo se deposita sobre la superficie de partículas de coque suspendidas en el gas que entra por la parte inferior del reactor, según se observa en el esquema simplificado en la Figura 2.

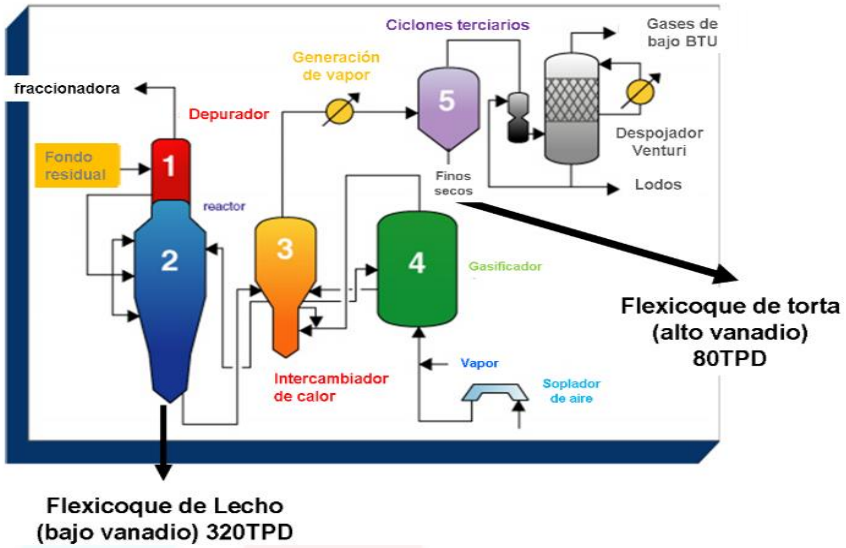

Figura 2. Esquema simplificado del proceso de flexicoquización [5]

La conversión es endotérmica, la temperatura dentro del reactor, se mantiene por el ingreso de partículas de coque provenientes del calentador, en donde se calientan al interactuar con el flexigas del gasificador. El exceso de partículas de coque en el calentador se transfiere al gasificador, donde reacciona con aire y vapor para producir el flexigas, el cual regresa al calentador para calentar el coque que irá al reactor. Posteriormente, el flexigas sale por el tope del calentador el cual se desulfuriza mediante el FLEXSORB™ y va a la sección de generación de vapor. Las partículas arrastradas por el flexigas se recolectan y aglomeran con un polímero formando el flexicoque de torta. En el reactor, las partículas del lecho fluidizado de coque que alcanzan entre 100 a 400 micrones, caen al fondo del reactor y son extraídas (flexicoque de lecho) [1, 4].

En Venezuela existe una unidad de flexicoquización la cual está ubicada en la refinería de Amuay en el CRP. Tiene una capacidad de producir

400 T/d de flexicoque. De aquí 320 T/d son flexicoque de lecho y 80 T/d de flexicoque de torta.

La Figura 3 muestra en el recuadro gris los tipos de coque de petróleo que se producen en Venezuela.

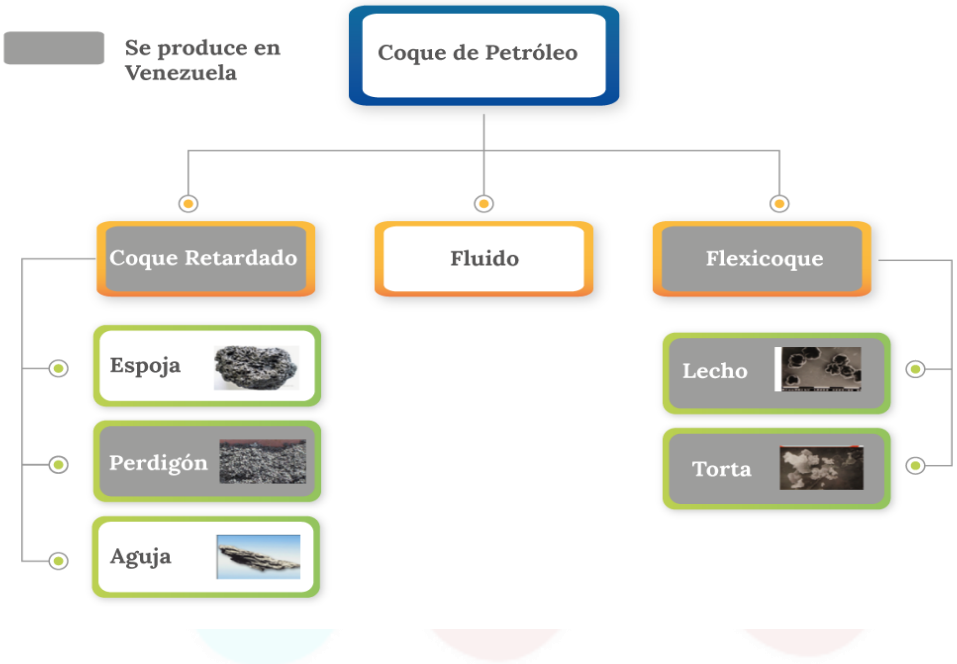

Figura 3. Tipos de coque retardado según su origen. (Elaboración propia 2009)

3.2 Características del coque de petróleo

En la Tabla 1 se muestran las características comparativas del coque de petróleo venezolano con el coque que se comercializa en el mundo. Se observa que el coque de petróleo venezolano tiene alto contenido de carbono. El flexicoque contiene más vanadio y níquel que el retardado, esto es atractivo para el sector siderúrgico, por ejemplo. Los niveles de azufre son moderados, lo que indica que para procesarlo se requiere tomar en cuenta tecnologías de CaO para absorber los componentes SO_x y CO_x de los gases que emerjan [6]. El poder calorífico del coque retardado venezolano es más alto que el flexicoque, esto lo hace atractivo como combustible sólido.

Tabla 1. Características comparativas del coque de petróleo

Características comparativas entre los coques de petróleos venezolanos				Características del coque a nivel mundial [6]		
ítems	**Coque retardado**	**Flexicoque del lecho del reactor**	**Flexicoque del gasificador**	**Coque retardado**	**Coque fluidizado**	**Coque fluidizado gasificado**
% C	85,5	88,4	79,8	87,9	86,3	94,9
% S	4,6	2,8	2,5	7,5	6,9	2,8
% V	1,4	1,3	9,3	-	-	-
% Ni	0,045	0,20	0,70	-	-	-
% Na	0,03	0,1	0,3	-	-	-
% Cenizas	0,90	2,40	11,00	0,33	1,30	1,00
% Materia volátil	13,6	2,6	N.A.	-	-	-
Poder calorífico (kcal/kg)	7.720	4.056	2.944	-	-	-

La Tabla 2 muestra, comparativamente, las características del coque de petróleo y el carbón mineral de Australia y Sudáfrica, quienes marcan el precio a nivel internacional. Se puede observar que el coque venezolano tiene mayor poder calorífico, menor contenido de cenizas y materia volátil, que los carbones minerales. El índice de molturabilidad (Hard Grove Index o HGI) también es mayor para el coque retardado. Esto sugiere que este material es más fácil de pulverizar [7], siendo un factor atractivo para usarlo en la industria de manufactura de cemento y generación de electricidad ya que requieren un combustible sólido pulverizado.

Tabla 2. Características comparativas del coque de petróleo con carbones minerales [5]

	Coque de petróleo	Carbón (Australia)	Carbón (Suráfrica)
Materia volátil	7-13 %	35 %	23-26 %
S	0,8 - 7 %	0,5 - 0,8 %	< 1,0 %
Ni (ppm)	165-580	-	-
V (ppm)	1.800-2.500	-	-
Índice de molturabilidad (HGI)	55-80	45-50	45-60
Cenizas (%p)	<0,4 %	12,0-15,0 %	< 15,0 %
Humedad (%)	8-12 %	8-10 %	2-4 %
Poder calorífico (BTU/Lb)	13.000-15.000	8.100-13.800	8.100-13.800

Históricamente, el coque de petróleo retardado venezolano se ha vendido a bajos precios a países como Italia, España, Francia, Turquía, entre otros, donde es utilizado para generar electricidad y producir

cemento. También, se ha vendido a EEUU, donde es calcinado y, luego, es importado para la industria del aluminio [5].

La calcinación del coque de petróleo se hace en hornos rotatorios, entre 1.250 y 1.400 °C, produciéndose la deshidratación, desulfuración, desvolatilización y densificación. El coque de petróleo calcinado es, prácticamente, carbón con pequeñas cantidades de impurezas metálicas, así mismo, es conductor eléctrico, debido a que ocurre un cierto ordenamiento estructural [1, 5].

En Venezuela se hicieron pruebas de calcinación procesando 11.000 toneladas de coque de petróleo retardado verde en CVG Carbonorca, produciéndose 5.500 toneladas de coque calcinado que se usaron como material de empaque en los hornos de cocción de ánodos base carbón en sustitución del coque metalúrgico [8].

En la Tabla 3, se muestran las características comparativas del coque de petróleo retardado verde venezolano con las del coque de petróleo calcinado estándar importado para el sector siderúrgico, la industrial del aluminio y las del coque de petróleo retardado verde que se calcinó en los hornos estáticos de CVG Carbonorca [8].

En ella, se aprecia que el coque de petróleo venezolano calcinado cumple con algunas de las especificaciones establecidas por el sector siderúrgico y del aluminio. Venezuela podría importar de Brasil su coque de petróleo que es bajo en azufre y metales, como se observa en la Tabla 4, para hacer mezclas y ajustar los requerimientos exigidos. Esta praxis se ha hecho más frecuente a nivel mundial ya que el contenido de azufre y metales en el coque de petróleo se ha estado incrementando con el tiempo como se muestra gráficamente en la Figura 4 [9].

Tabla 3. Características comparativas del coque de petróleo retardado verde venezolano con las del coque de petróleo calcinado

Propiedad	Coque retardado verde venezolano	Coque de petróleo calcinado importado estándar siderúrgico	Coque de petróleo calcinado importado estándar industria de aluminio	Coque de petróleo calcinado en los hornos estáticos de CVG Carbonorca, 2011 [8]
Densidad de bulto (g/cc)	0,79	ND	0,85	1,08
Densidad real (g/cc)	1,30 a 1,40	ND	2,06 a 2,10	2,12
Humedad (%)	6,0	ND	0,2 máx.	0,1
Volátiles (%)	12,00 a 16	0,49 máx.	0,40 máx.	1,40
Carbono fijo (%)	85,00	96,22 min	99,00 min	95,20
Reactividad al aire (%)	ND	ND	0,25 máx.	ND
Reactividad al CO2 (%)	ND	ND	13 máx.	ND
Resistencia específica	ND	ND	460 a 540	ND
Nivel de calcinación	ND	ND	21 a 32	ND
HGI	75 a 85		32 a 40	24
S (%)	4,70	2,38 máx.	1,90 a 3,50	
Fe (ppm)	71	ND	350 máx.	907
Na (ppm)	100	ND	150 máx.	
Ca (ppm)	108	ND	200 máx.	
Si (ppm)	310	ND	200 máx.	4.375
V (ppm)	2.055	ND	320 máx.	2.332
Ni (ppm)	434	ND	260 máx.	539
Cenizas (%)	1,30	3,29 máx.	0,40 máx.	3,30
Poder calorífico (kcal/kg)	8.800			7.772

Tabla 4. Comparación del coque de petróleo retardado venezolano con el brasileño [5]

Ítems	Coque retardado venezolano	Coque retardado brasileño
% C	85,5	85-88
% S	4,6	0,8-1,0
% V	1,4	0,025
% Ni	0,045	0,025
% Na	0,03	
% Cenizas	0,9	0,20-0,30
% Materia volátil	13,6	13
Poder calorífico (Kcal/kg)	7.720	-

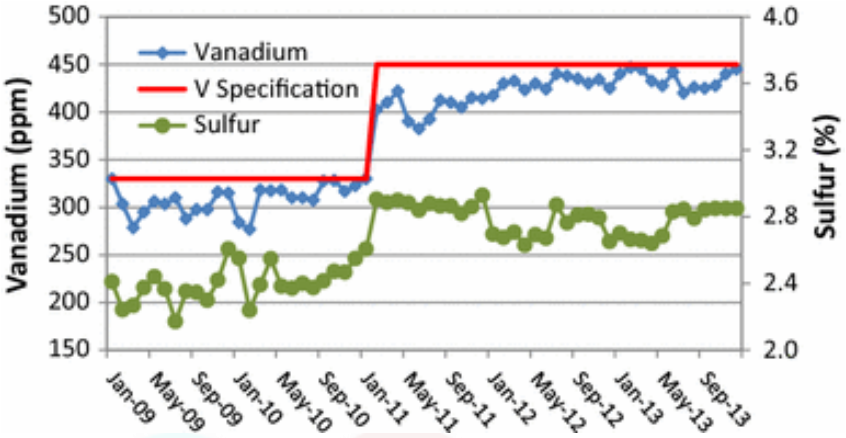

Figura 4. Variación histórica del contenido de metales (V y Ni) en el coque de petróleo retardado y calcinado [9]

3.3 Precios del coque de petróleo

En la Figura 5, se comparan los precios de dos tipos de coques de petróleo retardado: 6,5 % de azufre y 40 HGI, 4,5 % de azufre y 40 HGI, con los precios del carbón mineral asociado a un índice API 4, referido a los precios del carbón mineral que se exporta desde la terminal de Richards Bay de Sudáfrica, cuyo poder calorífico es 6.000 kcal/kg y el precio de referencia en contratos físicos y extrabursátiles [10, 11]. Se observa que históricamente los precios del coque de petróleo son inferiores al del carbón mineral. En abril del 2022, por ejemplo, el carbón mineral se cotizaba a 460 USD/T, mientras que los precios del coque de petróleo retardado estaban entre 175 USD/T (coque retardado de 6,5 % S y 40 HGI) y 210 USD/T (coque retardado de 4,5 % S y 40 HGI).

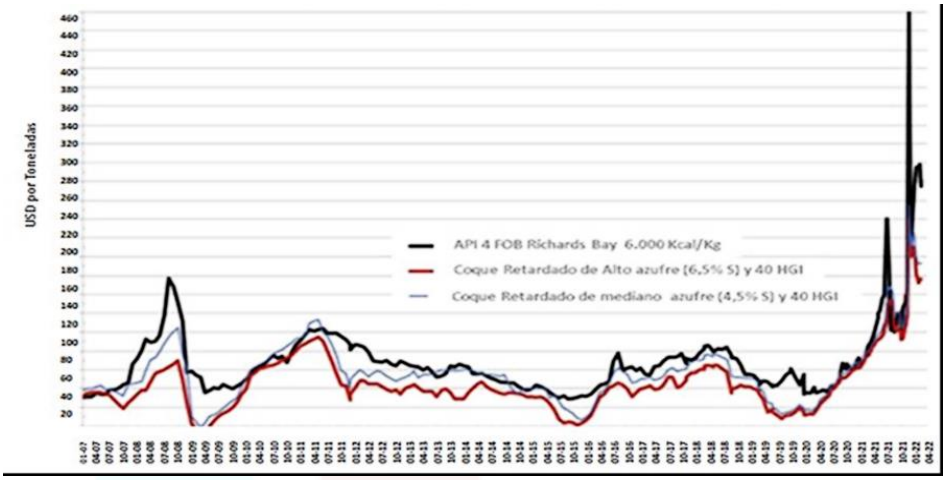

Figura 5. Precios comparativos del coque de petróleo retardado de diferentes porcentajes de azufre con el carbón mineral API 4 [11]

Mundialmente, el coque de petróleo retardado verde y el calcinado son los más comercializados. En la Figura 6, se aprecia el comportamiento histórico del precio mundial del coque de petróleo retardado verde desde el 2007 hasta abril 2022, observándose que, desde julio del 2020 hasta abril 2022, el precio del coque de petróleo retardado con 6,5 % de azufre y 40 Hard Grove Index (HGI), incrementó alrededor de 7 veces, desde 25 dólares americanos por tonelada (USD/T) hasta 175 USD/T [11].

El coque de petróleo retardado verde venezolano se está vendiendo de 15 a 20 USD/T por debajo del actual precio de venta internacional [10]. Mientras que el flexicoque se vende a precios más bajos, sin tomar en cuenta que contiene grandes cantidades de vanadio, en forma de pentóxido de vanadio, el cual se cotiza internacionalmente entre 5.000 a 20.000 USD/T [12]. Se reconoce que uno de los desafíos que tiene la comercialización del flexicoque, es la restricción

ambiental por el tamaño de sus partículas (400 a 15 µm), sin embargo, esto puede someterse a análisis para negociar precios justos.

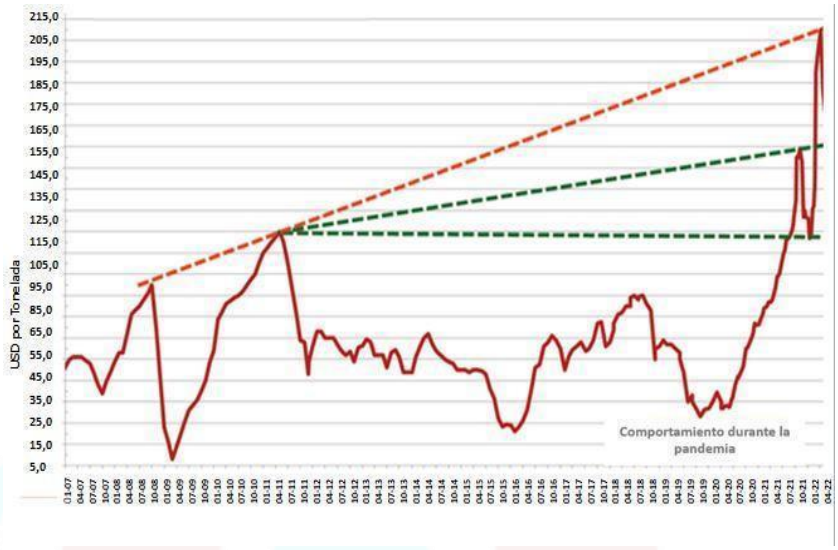

Figura 6. Comportamiento histórico del precio del coque de petróleo durante el período 2007 hasta abril 2022 [11]

3.4 Usos industriales del coque de petróleo

Alrededor del 80 % del coque de petróleo retardado verde producido en el mundo, se usa como combustible sólido para generar electricidad y en los hornos rotatorios de las plantas cementeras por su bajo contenido de cenizas, alto poder calorífico y costo inferior al carbón mineral [1, 5].

En la Figura 7, se muestra la distribución mundial del consumo de coque de petróleo retardado verde y calcinado, según su uso final [1].

El 75 % del consumo de coque de petróleo retardado verde es para usarlo como combustible sólido. Los sectores industriales que más lo consumen son las refinerías de crudo, 27 % por el sector de manufactura de cemento, 15 % dirigido a la generación de electricidad y 6 % usado como combustible para otras industrias. El 25 % restante se utiliza con fines no combustibles, entre ellos, la producción de aluminio (19 %), acero (1 %), ferroaleaciones (1 %), aportador de carbono en otros sectores industriales (3 %) y dióxido de titanio (1 %).

El 30 % del coque que se consume en las refinerías, es coque depositado en los catalizadores, usados en los procesos de conversión catalítica. El coque se usa como combustible para regenerarlos. También, se emplea como combustible sólido en las plantas de co-generación. Estas plantas generan electricidad y vapor para las diferentes unidades de procesos de las refinerías. En este 30 % se incluye el coque acumulado en sus patios de almacenamiento (mejoradores y refinerías de Canadá y Venezuela) [1].

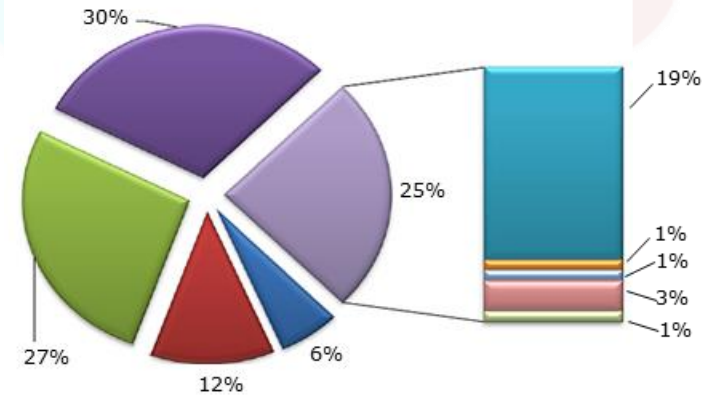

Figura 7. Distribución mundial del consumo del coque de petróleo retardado según su uso final [1]

Entre las diferentes aplicaciones industriales del coque de petróleo se tiene [1, 5, 13, 14]:

- En la industria del cemento, el coque de petróleo se emplea mezclado con el carbón mineral, en una proporción de hasta 50 %. La producción del clínker implica piroconsolidar una mezcla de rocas calcáreas y otros minerales, en un horno rotatorio, a 1.500 °C, bajo condiciones oxidantes, esto demanda un combustible con alto poder calorífico y mientras menor su costo, tanto mejor. De aquí que el 27 % de la producción mundial de coque de petróleo se destina a esta aplicación. El azufre contenido en el coque de petróleo se incorpora al clínker, del cual, posteriormente, se deriva el cemento, por lo que el impacto ambiental es reducido.
- El coque de petróleo retardado verde se usa mundialmente como combustible sólido, para generar electricidad por su alto poder calorífico. El elevado porcentaje de azufre y su impacto ambiental por las emisiones de SO_x y CO_x, se han manejado con el uso de calderas que tienen tecnologías de control de emisiones que emplean óxido de calcio como absorbentes de estos gases. El yeso resultante de esta absorción, se emplea en la industria de la construcción. Esta es la razón por la cual el 15 % del consumo total de coque de petróleo se destina a esta aplicación.

Entre otras aplicaciones industriales se tiene [5, 13]:

- Como agente reductor de mineral de hierro, por su alto contenido de carbono fijo, a través de las reacciones fundamentales, para producir arrabio, que es la materia prima para luego producir aceros y fundiciones, ver la Ecuación 1.

$$FeO + C \rightleftarrows Fe \qquad -34.460Cal$$
$$C + \tfrac{1}{2}O_2 \rightleftarrows CO \qquad +29.970Cal$$

Ec. 1

- Como agente piroconsolidador de aglomerados del mineral de hierro en forma de pellas o briquetas, por su alto poder calorífico. Al mezclar el coque verde pulverizado con mineral de hierro y otros componentes, el calor latente del coque contribuye a la consolidación del aglomerado a altas temperaturas confiriéndole las propiedades mecánicas necesarias para su manejo y reduciendo la cantidad de gas que se emplea en el proceso.

El 25 % del coque de petróleo restante se usa calcinado para [5, 13]:

- Producir ánodos base carbón que se emplean en las celdas electrolíticas para reducir la alúmina y producir aluminio. El proceso de calcinación le confiere al coque de petróleo conductividad eléctrica y resistencia química, para operar sostenidamente en las condiciones de las celdas electrolíticas.
- Producir dióxido de titanio (TiO_2), el cual es sustituto del plomo en las pinturas. También se usa como pigmento en el plástico, colorante de alimentos, para blanquear el papel y en pantallas expuestas al sol.
- Sustituto del coque metalúrgico en los procesos de reducción del mineral de hierro y carburación en las acerías.
- Producir amonio, urea y nitrato de amonio como resultado de su gasificación, a fin de producir papel y fertilizantes.
- Producción de vidrio y alfarería por su bajo contenido de cenizas en comparación con otros combustibles sólidos.

- Producir carburo de silicio al mezclar arena (óxido de silicio) con coque de petróleo calcinado en un horno de arco eléctrico a temperatura superior a los 2.000 °C, ver Ecuación 2.

$$SiO_2 + 3C \rightleftarrows SiC + 2CO \qquad \textbf{Ec. 2}$$

El SiC se muele, lava, seca, se selecciona y separa magnéticamente, se criba, y luego, se empaca en función de la granulometría. Se emplea para hacer papel de lija, pasta para pulir, discos de corte de metal, entre otras aplicaciones.

En Venezuela el coque de petróleo se ha considerado material de desecho de poco valor comercial. Desde el año 1983, en el seno de la industria petrolera y su centro de investigación PDVSA Intevep, se han realizado estudios para demostrar que este material es un subproducto con diversas potenciales aplicaciones industriales en el país [15, 16, 17, 18, 19], tal como se muestra en la Figura 8. Del mismo modo, otros investigadores venezolanos se han motivado a buscar soluciones para el uso masivo del coque de petróleo, buscando sustituir importaciones [3, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27].

La aplicación masiva del coque de petróleo venezolano en el país requiere del apoyo de las máximas autoridades gubernamentales, ministerios, de las diferentes corporaciones, empresas venezolanas e institutos de investigación, con el fin de acelerar la ejecución y conclusión de los proyectos asociados.

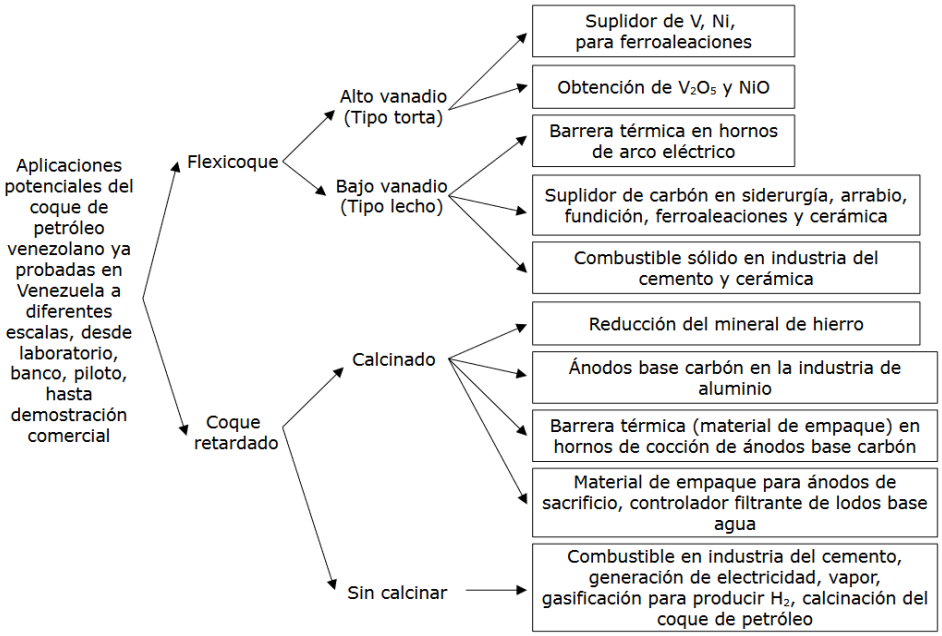

Figura 8. Potencial uso masivo del coque de petróleo venezolano en el país, probado a diferentes escalas (creación propia).

Para ello, es necesario:

- Involucrar e integrar a todos los influyentes de estos proyectos en las etapas tempranas de los mismos.
- Conformar equipos de ingenieros auto-gestionados, comprometidos, con determinación para trabajar colaborativamente, de forma integrada y con sentido de pertenencia.
- Garantizar el acondicionamiento y mantenimiento para la operación confiable y sostenible de los sistemas de manejo de sólido y los terminales de despacho de coque de petróleo, desde los mejoradores del Complejo Industrial José Antonio Anzoátegui (CIJAA) y de las

refinerías del Complejo Refinador de Paraguaná (CRP) hacia los sitios de consumo en el país.

- Igualmente, es necesario establecer la plataforma legal, considerando las restricciones ambientales, para que se garantice el acondicionamiento del coque de petróleo venezolano como material energético y estratégico, para impulsar la industrialización y la economía del país.

3.5 Características del mercado de coque de petróleo

Con la pandemia COVID-19, a nivel mundial interrumpieron la producción y cadena de suministro de coque de petróleo, impactando negativamente en la oferta y demanda de este material, cuyo mercado apenas está recuperándose en el 2022 [28] y se espera que incremente a 75,3 miles de millones de USD para el 2030, con un crecimiento para la próxima década del 6,9 % [29]. Este crecimiento se ve impulsado por la expansión de la producción de acero asociado a los proyectos del sector transporte: construcción de autopistas, vías ferroviarias, automóviles y las industrias de construcción de los países de la región Asia Pacífico (India, China, Malasia, Indonesia, Tailandia, Vietnam), en Oriente Medio, África y algunos países de Latinoamérica, y al hecho de que el precio del coque de petróleo es competitivo con respecto al carbón mineral API 4 [10, 28, 30].

Canadá y la región de la costa del golfo de EEUU lideran la producción de coque de petróleo verde, mientras que China lidera la producción

del coque calcinado, seguido por los países de la región del Medio Oriente y África [28].

Europa está entre el mayor importador de coque de petróleo retardado verde, lo motiva el incremento en la demanda de electricidad y el alto costo del gas natural [28].

India, con su nuevo complejo refinador que tiene capacidad para producir 11 millones T/año de coque de petróleo, con >7 % de azufre y un HGI de 40, han estado importando durante el 2022 coque de petróleo venezolano de 4,5 % de azufre y HGI entre 60 y 80, para hacer mezclas y facilitar el uso del coque de petróleo en la manufactura de cemento. La empresa indio-alemana Maroil Trading AG, está negociando con PDVSA tomar las operaciones y el mantenimiento de los sistemas de manejo de sólido del terminal del mejorador de PDVSA Petrocedeño, que está ubicado en el CIJAA para agilizar la exportación del coque de petróleo [31].

Entre las empresas competidoras en el mercado del coque de petróleo se tienen: Indian Oil Corporation Limited, Essar Oil Ltd., Royal Dutch Shell Plc, ExxonMobil Corporation, British Petroelum Plc, Valero Energy Corporation, HPCL - Mittal Energy Limited, Saudi Arabian Oil Co., Chevron Corporation, Reliance Industries Limited, Conoco Phillips, Essar Oil Ltd y Hindustan Petroleum Corporation Limited [29].

Una referencia a tener en cuenta es el coque de petróleo brasilero que se cotiza alrededor de los 385 USD/T, se calcina en su país para usarlo como materia prima en la manufactura de sus ánodos base carbón para producir aluminio [32].

4. Conclusiones

Venezuela está entre los mayores productores de coque de petróleo en el mundo, con capacidad para generar 20.062 T/d de coque de petróleo retardado verde. En el CIJAA hay alrededor de 10 millones de toneladas almacenadas valoradas en 1.700.000.000,00 USD, considerando el precio actual de 170 USD/T [11]. Este material no se usa para generar electricidad en el país ni para producir cemento, ya que las plantas existentes usan como combustible gas o fueloil. La demanda de electricidad es mayor que la oferta. Esta brecha incrementará al reactivarse completamente el sector industrial. Si queremos transitar hacia la cuarta revolución industrial en la que domina la transformación digital, necesitamos reforzar nuestro sistema eléctrico nacional. Esto se puede hacer revisando y actualizando los proyectos del uso del coque de petróleo para generar electricidad y por el hecho de que dos de cuatro mejoradores de crudo ubicados en el CIJAA son 100 % de PDVSA, con contratos de comercialización que permiten el uso masivo de este material en diferentes sectores industriales del país.

Venezuela es de los pocos países en el mundo que producen cemento a partir del gas. Si se hace el acondicionamiento de estas plantas para procesar coque de petróleo verde, el gas se podría desviar hacia otros sectores como el de la comunidad que lo necesitan para cocinar sus alimentos.

El coque de petróleo retardado verde venezolano se exporta para que otros países lo calcinen. Luego, se compra el coque de petróleo

calcinado, materia prima para la producción de ánodo base carbón para la industria nacional del aluminio, a un precio que es 4 veces mayor (736 USD/T) que el del coque de petróleo verde, proveniente de Venezuela, vendido inicialmente [33]. Algunas iniciativas se ven, por ejemplo, CVG Carbonorca inició la producción de 10 T/h de coque de petróleo venezolano calcinado.

Ampliar el uso del coque de petróleo venezolano en el país demanda voluntad política, determinación, trabajo colaborativo, apoyo de las máximas autoridades gubernamentales, de actores industriales, academia y de la comunidad. ¿Qué impide revivir y concretar el proyecto de construir una planta de calcinación para producir 550 mil toneladas de coque de petróleo calcinado [8], abastecer el mercado nacional y exportar el excedente a los precios del mercado internacional? Tomando en consideración que hay una demanda mundial de coque calcinado y que el precio continuará en alza porque la capacidad de calcinación en el mundo aún es insuficiente.

5. Referencias

[1] Roskill Information Services Ltd. Petroleum Coke: Global Industry Markets and Outlook. Sixth Edition, 2012. Roskill Information Services Ltd. ISBN 978 0 86214 582 8. 54, 2012. Russell Road, London SW19 1QL, UK.

[2] R. Sánchez. Mejoramiento de crudos pesados (CP) y extrapesados (XP). Una visión integral para el desarrollo de la Faja Petrolífera del Orinoco. FPIM Infraestructura y Mejoramiento Faja. PDVSA Intevep. Septiembre 2013. Los Teques, estado Miranda.

[3] A. Requena, M. Pérez, L. Delgado. Formación de la textura del coque de petróleo en coquizadores retardados. Revista de la Facultad de Ingeniería UCV, 18:1,73-81, 2008.

[4] Exxon Mobil. Conversión de residuos (FLEXICOKING™). 2002.

[5] M. Specht, R. Damas, H. Moreno. Calcinación del coque de petróleo. I Jornadas Técnicas de Coque de Petróleo. PDVSA Intevep. 2012. Los Teques, estado Miranda. Venezuela.

[6] A. Santos, R. da Silva y M. Renó. Analysis of Petroleum Coke Consumption in Some Industrial Sectors. Journal of Petroleum Science Research. 4, 1-7, 2015. DOI: https://doi.org/10.12783/jpsr.2015.0401.01

[7] SGS. Hardgrove Grindability Index (HGI). SGS. 2022. Blog recuperado a partir de: [https://www.sgs.com/services/hardgrove-grindability-index-hgi]

[8] R. Damas, C. Rodríguez, J. Rodríguez, J. Rodríguez, M. García, M. Specht, J. Méndez. Proyecto de diseño, instalación y puesta en marcha de una planta de calcinación de coque de petróleo con capacidad de 750.000 t/año, para sustitución de importación de coque de petróleo calcinado grado ánodo, coque metalúrgico, antracita, grafito y otros materiales base carbón, como contribución a la soberanía de la industria del aluminio y del hierro-acero. Mesa de Reactivación del Convenio MPPI – PDVSA. Caracas, 25 y 26 de septiembre 2013. PDVSA La Campiña, Caracas, Venezuela.

[9] L. Edwards. The History and Future Challenges of Calcined Petroleum Coke Production and Use in Aluminum Smelting. JOM 67, 308–321 (2015). DOI: https://doi.org/10.1007/s11837-014-1248-9.

[10] A. Media. Evaluación del precio de carbón API 4. 2022. Blog recuperado a partir de: [https://www.argusmedia.com/es/methodology/key-prices/api-4-coal]

[11] ICR Newsroom. Oil Prices Up While Coal and Petcoke are Stabilizing. 2022.

[12] Hubei Tao Yuan Chemical Co., Ltd. Pentóxido de vanadio precio. 2022. Recuperado a partir de: [https://spanish.alibaba.com/g/vanadium pentoxide-price.html]

[13] National Association of Manufacturers. Petroleum Coke: Essential to Manufacturing. 2014.

[14] S. Cardona. Reutilización y activación del coque de petróleo para remover metales en agua. Gestión y Ambiente, 9:1, 89-101, 2006. Universidad Nacional de Colombia. Medellín, Colombia.

[15] R. Schemel. Method for Leaching and Recovering Vanadium from Vanadium Bearing By-Product Materials. Patente N US4539186A, 1985.

[16] R. Schemel. Method for Precipitating Vanadium from Vanadium Bearing Liquors and Recovering Vanadium Pentoxide, 1985. Patente N 4548792.

[17] D. Esteller, M. Specht. Petroleum Coke Steel Making Industry application. Engineering Conference (AIChE) Annual Meeting, San Diego, California, EEUU. 1992.

[18] M. Specht. Coque de petróleo en Intevep - antecedentes y lecciones aprendidas. CEDI. 2012. PDVSA Intevep. Los Teques, estado Miranda. Venezuela.

[19] J. Iwanoski, R. Damas, M. Specht. Adaptación de una planta de sinterizado de bauxita para calcinar coque de petróleo en Guayana. 3er Coloquio Regional de Gerentes de Proyectos, en Guayana, Universidad Católica Andrés Bello, Puerto Ordaz, estado Bolívar. Venezuela. 2016.

[20] K. Gorry, G. Basanta, J. López, A. Rodríguez. Usos del coque de petróleo en los procesos productivos del sector Siderúrgico. UNEXPO, Venezuela. 2011.

[21] L. Sánchez. Desarrollo de un método eficiente de tratamiento químico del petrocoque para su reutilización. Universidad del Zulia. Venezuela Schlumberger, 2016, Oilfield Glosary.

[22] R. Vega, M. García-López, C. Rivas-Ruíz, L. Castillo-Campos, Y. Figueroa-Abán, O. Hernández-Cova. Uso del coque del complejo petroquímico General de División José Antonio Anzoátegui como controlador de filtrado en fluidos base agua. Ciencia e Ingeniería, 37:3,2016. Universidad de los Andes. DOI: http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.11860.71048

[23] M. Kräuter, M. Pérez. Estudio preliminar del reciclaje de ácido en la desmetalización y desulfuración simultánea de coques de petróleo venezolanos vía microondas. Revista de la Facultad de Ingeniería UCV, 8:1,73-81, 2003.

[24] M. Romano, M. De Chamorro. Simultaneous Demetallization and Desulphuration of Carbonaceous Materials Via Microwaves – Patente N US6068737A, 2000.

[25] L. Sánchez, A. Campos, A. Cáceres. Algunos aportes en la extracción de vanadio, níquel y azufre en petrocoque. 1:1, 2016. DOI: https://doi.org/10.33936/rev_bas_de_la_ciencia.v1i1.93

[27] A. de la Barrera. Activación de coque retardado venezolano empleando vapor de agua y carbonatos de metales alcalinos y alcalinotérreos como agentes activantes. Tesis de pregrado. Universidad Central de Venezuela. Caracas, octubre 2016.

[28] Globe Newswire. Petroleum Coke Market Size to Reach $75.3 Billion by 2030 | CAGR: 6.9%: AMR. Blog Benzinga. 2022.

[29] Prescient & Strategic Intelligence. Global Petroleum Coke Market Size, Share, Development, Growth and Demand Forecast to 2030. Report Code: PE10095. 2022.

[30] Allied Market Research. Petroleum Coke Market by Type (Fuel Grade and Calcines coke) and Application (Aluminium & other metals, Cement, Storage, Steel, Power and Others) Opportunity Analysis and Industry Forecast, 2021-2030. Blog Allied Market Research. Marzo 2022.

[31] M. Parraga, S. Varadhan. Maroil se hace cargo de la comercialización de casi todo el coque de petróleo de Venezuela. Blog Euronews. Finantial Times. Negocios & Tecnología. 2022.

[32] A. Media. Brazil Marketing Shift Boosts Coke Trade Flows. 2021.

[33] Chemanalyst. Petroleum Coke Price Trend and Forecast. Blog Chemanalyst. Market Overview. 2022.