 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-27

Zeolitas: generalidades, potenciales y sus aplicaciones en energía

FERNEY SANTIAGO MEJÍA RODRÍGUEZ

Ingeniería Electromecánica

Director del trabajo de grado: PhD. Robison Buitrago Sierra

INSTITUTO TECNOLÓGICO METROPOLITANO

2016

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

RESUMEN

Las zeolitas naturales constituyen uno de los grupos más grandes de minerales. Las zeolitas son aluminosilicatos cristalinos micro porosos con canales y cavidades de dimensiones moleculares Barrer y Col (1983). En palabras más simples, son sólidos con una estructura cristalina tridimensional relativamente abierta construida a partir de átomos de los elementos aluminio, oxígeno y silicio, con metales alcalinos o alcalinotérreos (tales como sodio, potasio, y magnesio) más moléculas de agua atrapadas en los espacios entre ellos. Las zeolitas se forman con muchas estructuras cristalinas diferentes, que tienen grandes poros abiertos (a veces denominados cavidades) en un arreglo muy regular y más o menos del mismo tamaño que las moléculas pequeñas (Woodford, 2009).

En 1756 Axel Fredrick Cronstect, un mineralogista suizo fue quien las nombró con las palabras griegas “zeo” y “lithos” que significan hervir y piedra respectivamente, haciendo alusión a sus características peculiares de formar espuma al tiempo de calentamiento. En la actualidad han sido reconocidas más de 40 especies naturales distintas de este tipo de material y cerca de 100 especies sintetizadas en laboratorio.

Por sus propiedades las zeolitas han sido de gran importancia en diferentes campos industriales y diversas aplicaciones, desde la industria petroquímica (para refinar el crudo y convertir el petróleo en gasolina) hasta la purificación de agua contaminada con metales pesados. Uno de sus usos más comunes se presenta en la industria alimenticia, tanto humana como animal; por ejemplo, para encapsular compuestos nutricionales y liberarlos en el organismo. Las zeolitas también pueden atrapar los componentes activos de los fertilizantes y luego liberarlos paulatinamente para nutrir plantas, lo que permite reducir las aplicaciones de estos y evitar que su exceso termine contaminando las fuentes de agua. Un caso reconocido de su uso, fue en el accidente nuclear de Chernóbil, en donde se esparcieron cerca de 1.5 millones de toneladas de ... para atrapar parte de los elementos radioactivos que quedaron en el ambiente, probando una vez más, la versatilidad de estos materiales (Escobar, 2013).

Colombia importa al año un aproximado de 2.500 toneladas de zeolitas para diversos procesos industriales. Un estudio reciente, determinó que el país tiene todas las condiciones geológicas para producir este apreciado mineral. Sin embargo, hace falta una mayor investigación para determinar los lugares de extracción y de esta manera iniciar el proceso de exportación Escobar y Col. (2013). En la actualidad las zeolitas son de gran uso en Colombia en el sector agropecuario, siendo este uno de los pilares de economía colombiana, sus propiedades son aprovechadas en la producción animal, control ambiental y agricultura.

Entre los estudios más recientes sobre zeolitas realizados en Colombia se encuentra un estudio de Gelves y Col.(2016) sobre la caracterización mineralógica de las zeolitas presentes en las rocas basálticas de la formación geológica de combia en la pintada (Colombia), donde los resultados

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

mostraron la presencia de grupo de zeolitas de hielandita asociado con predominancia de hielandita en fase rica de calcio y potasio, con prevalencia de comportamiento laminar y en menor medida presenta un comportamiento de tipo confinado, la presencia de chabacita, filipsita y modernita se evidenció como fases de zeolitas minoritarios. Basado en las propiedades de las zeolitas, las fases en formación de combia encontradas puede ser un material interesante para las aplicaciones tecnológicas en áreas como la agrícola, catálisis o separación de gases. Especialmente en Colombia esta clase de mineral puede ser importante debido a su continuo consumo lo que hace importar este producto de otros territorios (Gelves et al., 2016). También se encuentra reportes de producción de zeolitas donde Villaquirán y Col. (2016) a partir de caolín colombiano por medio de síntesis hidrotérmica, demostrando que es posible sintetizar zeolitas tipo A de buena calidad comparable a las disponibles comercialmente, usando como materia prima caolines colombiano (Villaquirán-Caicedo et al., 2016).

El objetivo de este proyecto es reunir la mayor cantidad de información científica reciente, mediante una consulta sistemática de la documentación publicada en las décadas del 2000 y de 1990, relacionada con los usos energéticos de las zeolitas. Entre estos documentos se encuentran artículos de corte científico que se encuentran en bases de datos internacionales como ScienceDirect y Scopus. Todo esto con el fin de contrastar las diferentes publicaciones relacionadas con este mineral y a su vez resaltar las propiedades y potencial energético de las zeolitas para obtener un artículo que resuma el uso de este mineral en diferentes aplicaciones energéticas, además de aportar una especie de estado del arte o una información recopilada acerca del tema.

Palabras clave: zeolitas, refrigeración, adsorción, hidrodesulfuración, craqueo catalítico de líquido, refrigeración, solar, adsorción, desorción.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

RECONOCIMIENTOS

Expreso mis reconocimientos al Departamento de Ingenierías de Instituto Tecnológico Metropolitano de Medellín, en especial al profesor Robison Buitrago por ayudarme y apoyarme en el desarrollo de este trabajo, y a mi madre Ana María Rodríguez por patrocinarme en toda la carrera universitaria.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

ACRÓNIMOS

AlPOs: Aluminofosfatos.

MeAlPOs: Metal divalente (Me) aluminofosfatos sustituidos.

SaPos: Aluminofosfato sustituido de silicio.

SBU: Unidad de construcción secundaria.

FCC: Craqueo católico de líquido / fluid catalytic cracking.

HDS: Hidrodesulfuración.

RON: Research Octane Number/Número de Octano de Investigación.

CFC: Clorofluorocarbonos.

HCFC: Hidroclorofluorocarbonos.

THT: Tetrahidrotiofeno.

TBM: Tert-butyl mercaptan/terc-butylmercaptano.

MMMs: Membranas de matriz mixtas.

GHGs: Green house gasses/gases de efecto invernadero.

CCS: Carbon capture and storage/obtención y almacenamiento de carbon.

PAN: Nitrato de peroxiacetilo.

ULDS: Ultra low diesel sulfur/diesel ultrabajo de asufre.

GNL: Gas natural licuado.

HC: Hidrocarburos.

HDT: Hidrotratamiento Termico.

HDA: Hidrodesaromatización.

HDN: Hidrodesnitrogenación.

HDM: Hidrodesmetalización.

HDO: Hidrodesoxigenación.

HDS: Hidrodesulfuración.

CIIE: Capacidad de intercambio iónico esperada.

MEA: Etanolamina se llama comúnmente monoetanolamina o MEA.

PFSA: Ácido perfluorosulfónico polielectrolito.

PEMFC: Celda de combustible de membrana de intercambio de protones.

CFA: Cenizas volantes de carbón.

HPA: heteropoliácidos

GHSV: Velocidad espacial horaria de gas

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

GLOSARIO

Nafión: Nafión es un fluoropolímero sulfonado-copolímero a base de tetrafluoroetileno.

Oligomérica: Se dice que una molécula constituye un oligómero, cuando los radicales asociados son distintos entre sí.

Desaluminización: Consiste en el tratamiento del material sólido con soluciones de ácido clorhídrico de diferente concentración con el propósito de eliminar aluminio de la muestra.

Difractograma: Es una imagen o espectro resultante de una de las principales técnicas usadas por los mineralogistas y químicos para examinar la composición físico-química de los sólidos desconocidos, mediante el empleo de un difractómetro.

Adsorbato: Sustancia adsorbida en la superficie de un adsorbente. El adsorbato se adhiere sobre la superficie del adsorbente por un proceso de adsorción.

Complicación: Son reacciones en las que un metal o ion central, se une o compleja con sustancias llamadas ligandos, formando complejos o compuestos de coordinación.

GSHV: Por sus siglas en inglés es definido como la tasa de flujo volumétrico en el reactor a temperatura estándar y presión, dividida por el volumen del reactor o del lecho catalizador.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

TABLA DE CONTENIDO

Zeolitas: generalidades, potenciales y sus aplicaciones en energía.....	1
1. INTRODUCCIÓN.....	9
2. METODOLOGÍA.....	10
3. MARCO TEÓRICO.....	11
3.1 Zeolitas.....	11
3.2 Clasificación de las zeolitas.....	12
3.3 Propiedades físicas.....	16
3.4 Propiedades químicas.....	16
3.5 Propiedades adsorbentes.....	16
3.6 Intercambio iónico y catiónico.....	18
3.7 Intercambio catiónico.....	20
3.8 Métodos de síntesis de las zeolitas.....	21
3.9 Métodos de caracterización.....	22
3.9.1 Espectroscopia infrarroja.....	23
3.10 Difracción de rayos X.....	23
3.11 Microscopia de transmisión de electrones (TEM).....	24
3.12 Espectroscopia fluorescente de rayos X.....	24
4. APLICACIONES DE LAS ZEOLITAS.....	26
4.1 Aplicaciones generales.....	26
4.1.1 Zeolitas en el secado de gases.....	27
4.1.2 Otros usos de las zeolitas.....	27
4.2 Zeolitas y su importancia en las aplicaciones energéticas.....	28
4.3 Zeolitas y sus aplicaciones en refrigeración.....	29
4.4 Zeolitas y sus aplicaciones en las celdas de combustible.....	34
4.5 Zeolitas y sus aplicaciones en la reducción de agentes contaminantes en la Combustión.....	39
4.6 Zeolitas y sus aplicaciones en el mejoramiento de combustibles.....	42
5. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO.....	46
6. REFERENCIAS.....	48

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

7. APÉNDICE	53
Apéndice 1	53

LISTA DE TABLAS

Tabla 1	12
Tabla 2	15
Tabla 3	18
Tabla 4	21
Tabla 5	25
Tabla 6	27

LISTA DE FIGURAS

Ilustración 1	13
Ilustración 2	30
Ilustración 3	35

LISTA DE ECUACIONES

Ecuación 1	11
Ecuación 2	12
Ecuación 3	18
Ecuación 4	18
Ecuación 5	18
Ecuación 6	19
Ecuación 7	20

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

1. INTRODUCCIÓN

Las zeolitas son minerales aluminosilicatos hidratados, hechos de tetraedros interconectados de alúmina (AlO_4) y sílice (SiO_4). En palabras más simples, son sólidos con una estructura cristalina tridimensional relativamente abierta construida a partir de los elementos aluminio, oxígeno y silicio, con metales alcalinos o alcalinotérreos (tales como sodio, potasio, y magnesio) más algunas moléculas de agua atrapadas en los espacios entre ellos. Las zeolitas se forman con muchas estructuras cristalinas diferentes, que tienen grandes poros abiertos (a veces denominados cavidades) en un arreglo muy regular y más o menos del mismo tamaño que las moléculas pequeñas y son alrededor de 2 a 12 angstroms (Woodford, 2009).

En la actualidad, hay reportadas alrededor de 40 zeolitas naturales, que se forman tanto en rocas volcánicas y sedimentarias; de acuerdo con el Servicio Geológico de Estados Unidos, las formas más comúnmente extraídas de minas incluyen chabazita, clinoptilolita y mordenita. Decenas más de zeolitas artificiales, sintéticas (alrededor de 150) han sido diseñadas para fines específicos, el más conocido de los cuales son zeolita A (comúnmente utilizado como un detergente), zeolitas X e Y (dos tipos diferentes de faujasitas, utilizados para el craqueo catalítico) y el catalizador típico de petróleo ZSM-5 (un nombre comercial para la pentasil-zeolita)(Woodford, 2009).

Dada la gran variedad de zeolitas, sus usos se han extendido en diversos campos, siendo el sector energético con aplicaciones como la refrigeración por adsorción, celdas de combustible, purificación de gases, refinación de crudo, uno de los más importantes, sin embargo se requiere la recopilación de la información que se encuentra bastante disgregada en las bases de datos, por lo que con este trabajo se pretende concentrar la mayor cantidad de información posible respecto a estos materiales y sus aplicaciones en energía. Con el objetivo principal de realizar una revisión bibliográfica de numerosos artículos relacionados con el aprovechamiento de las zeolitas en el campo energético, teniendo así un documento que aporte información en español sobre las generalidades más importantes de estos materiales y la importancia de las zeolitas en dichas aplicaciones soportadas a través de las fuentes consultadas. Se trazaron como objetivos específicos recopilar información general de los materiales zeolíticos a través de los recursos electrónicos ofrecidos por el ITM, específicamente bases de datos como Science direct y Scopus. Con el fin de establecer las principales aplicaciones de los materiales zeolíticos en el campo de la energía y su aprovechamiento energético. De tal forma que este documento se convierta en un insumo para todas las personas que requieran información respecto al uso de las zeolitas en este campo y sus últimos avances.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

2. METODOLOGÍA

Toda la información relacionada en este texto fue consultada en las bases de datos ofrecidas por el ITM, específicamente Sciencedirect y Scopus. El ejercicio de recopilación de artículos, inició con un barrido de información relacionada con las zeolitas en general.

Luego, con el fin de construir una conceptualización sobre las zeolitas, fue de gran relevancia la consulta de definiciones, características, aplicaciones y métodos de caracterización entre otros conceptos. Finalmente se procedió a realizar una búsqueda exhaustiva de artículos relacionados con las síntesis y uso de zeolitas en aplicaciones energéticas.

Se analizó primordialmente documentación actualizada desde el año 2005 hacia el presente, tomando así un total de 100 referencias distintas, y se realizó una clasificación de la información en una tabla de Excel que ayudara al almacenamiento y consulta de dicha información, para luego poder realizar el análisis consignado en el presente trabajo escrito donde se relaciona la importancia y las diferentes aplicaciones de las zeolitas en energía y refrigeración, soportando la información con las investigaciones ya previamente consultadas en las bases de datos.

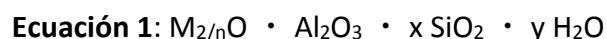
	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

3. MARCO TEÓRICO

3.1 Zeolitas

Las zeolitas son aluminosilicatos cristalinos micro porosos con canales y cavidades de dimensiones moleculares entre 2 a 12 angstroms Barrer y Col.(1983). Cristales pertenecientes al grupo de los tectosilicatos, están formados por una red tridimensional de tetraedros SiO_4 y AlO_4^- unidos entre si compartiendo los vértices a través de átomos de oxígeno.

La composición química de las zeolitas se puede representar de una manera general con la fórmula:



Siendo M uno o varios cationes de compensación de carga con valencia n. En el caso de zeolitas naturales los cationes son inorgánicos, mientras que en el caso de las sintetizadas en el laboratorio podrán ser tanto orgánicos como inorgánicos. La relación $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ vendría dada por x, siendo un número siempre igual o mayor a 2, lo que significa que en una zeolita no se pueden encontrar dos tetraedros AlO_4^- compartiendo el mismo vértice. Este principio se conoce como la regla de Lowenstein (Löwenstein, 1954).

Todos los sólidos cristalinos son eléctricamente neutros por lo que si en la red cristalina sustituimos un átomo de Si por otro de Al, se genera una carga negativa que debe ser compensada por cationes para volver a su estado neutro.

Además de las zeolitas naturales, existen análogos sintéticos a algunas de ellas, y también zeolitas sintéticas que no corresponden a ningún material natural. Esta síntesis de zeolitas en el laboratorio, permite obtener nuevas estructuras con sistemas de canales y/o aperturas de poros diferentes, lo que ha permitido ampliar extraordinariamente el rango de aplicabilidad de las zeolitas. Esta historia de evolución en el mundo de las zeolitas empezó con la síntesis de la zeolita Levinita por St Claire Deville y Col. (1962), sin embargo, la síntesis de zeolitas tal y como se conoce ahora tuvo sus orígenes en los trabajos de Richard Barrer y Robert Milton en los años 1940.

Adicionalmente, los nuevos métodos de síntesis han permitido introducir otros heteroátomos diferentes del Si y Al en posiciones tetraédricas, como pueden ser Zn, Ga, Be, Ge, Ti, Sn, P, B, entre otros.

Existe, además, la posibilidad de preparar nuevos materiales de estructura zeolítica que no contienen silicio, llamados serotipos, como AlPOs (aluminofosfatos) Wilson y Col. (1982), MeAlPOs (aluminofosfatos de metal divalente (Me) sustituido), germanatos, etc. Por lo cual se ha aceptado una definición más amplia del termino zeolita Weitkamp y Col. (1999), siendo cualquier material cristalino micro poroso cuya estructura este formada por unidades tetraédricas $\text{TO}_{4/2}$ unidas por los vértices formando una red tridimensional, independientemente de su composición. En definitiva, la

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

composición química de una zeolita puede representarse de manera más específica mediante la siguiente fórmula general:



Donde M son cationes con estado de oxidación n^+ que compensan la carga que introducen en la red los elementos T^{III} , y que se localizan en los canales y/o cavidades de la estructura. Los valores de x, y, n o z dependen de la estructura zeolítica.

3.2 Clasificación de las zeolitas

Existen diferentes formas de clasificar las zeolitas, la primera clasificación se basa en la topología estructural. De esta manera, las diferentes estructuras reciben un código de tres letras Meier y Col (1996). La IZA (International Zeolite Association) es el organismo encargado de asignar el código de tres letras a todas las estructuras zeolíticas que se van descubriendo. Por el momento se tiene una base de datos compuesta por 201 estructuras diferentes. El código de tres letras se le asigna al tipo de estructura, las zeolitas y la prioridad en la denominación de las zeolitas depende del primer mineral descubierto en el grupo, por ejemplo, FAR Farneseita, FAU Faujasita, FER Ferrierita, FRA Franzinita, GIS Gismondina (Armbruster & Gunter, 2001).

Otro método de clasificación se basa en su estructura porosa, ya que la estructura final de una celda unitaria (jaula) es una enramado de poros y cavidades de varias dimensiones, se consideran “poco porosas” a las zeolitas con 6, 8 y 9 jaulas en el anillo, mientras que la “porosidad media” se le asigna a las una estructura con anillos de 10 elementos. En la siguiente tabla se clasificaron algunos de las zeolitas más reconocidas (Pelayo Alvarado, 2011).

Zeolita	Átomos de O que forman la abertura	Diámetro de poro $\Theta(\text{Å})$
Poros extra grande	18	$\Theta > 9$
Poros grande	12	$6 < \Theta < 9$
Poros mediano	20	$5 < \Theta < 6$
Poros pequeño	8	$3 < \Theta < 5$

Tabla 1 Clasificación de las zeolitas según el tamaño de los poros (Pelayo Alvarado, 2011).

Aunque no hay un sistema de nomenclatura desarrollada para los materiales de tamiz molecular. El descubridor de las especies sintéticas basado en las características de patrones de difracción de rayos X y la composición química asigna símbolos triviales. Los primeros materiales sintéticos descubiertos por Milton, Breck y compañeros de trabajo en la Unión Carbide utilizaron el alfabeto

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

árabe, por ejemplo las zeolitas A, B, X, Y, L. El uso del alfabeto griego fue iniciado por Mobil y Union Carbide con las zeolitas Alfa, Beta y Omega. Muchas zeolitas sintéticas que tienen la topología estructuras de especies de zeolitas minerales, se le asignó el nombre del mineral como por ejemplo, modernita sintética, chabacita, erionita y ofertita, la literatura de tamices moleculares está llena de acrónimos como ZSM-5, -11, ZK-4 (Mobil); EU-1, FU-1, NU-1 (ICI); LZ-210 and A1PO, SAPO, MeAPO, etc.(Flanigen, 2001).

También existe un método para la clasificación estructural de zeolitas que fue descrito por Meier y Col.(1968), basado en un concepto denominado *Unidad de Construcción Secundaria* (SBU por sus siglas en inglés) como se muestra en la Figura 1. La unidad principal de formación de zeolitas es el tetraedro y las SUBs son las disposiciones geométricas de tetraedros (Breck, 1974)(Armbruster & Gunter, 2001). Muy a menudo, estas SBUs tienden a controlar la morfología de zeolita.

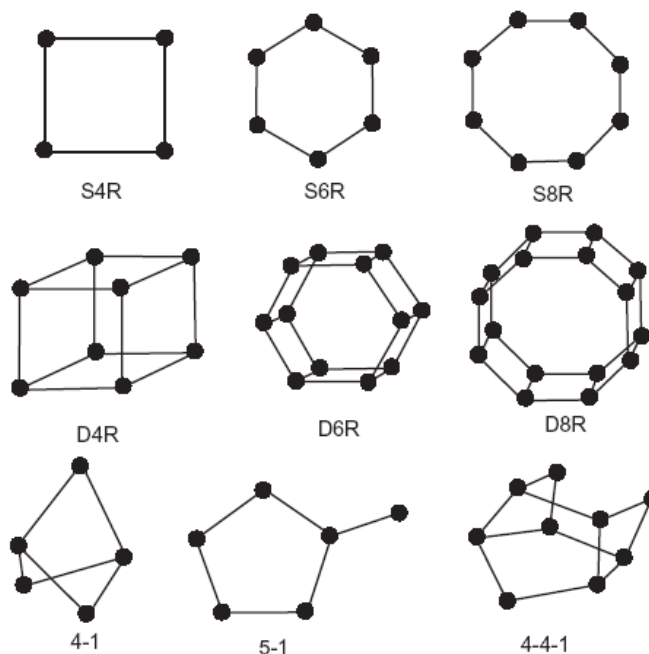


Ilustración 1 Los átomos de oxígeno en los de entre silicio y aluminio se omitieron por simplicidad.

De estas estructuras la más sencilla es la unidad 4 con cuatro átomos formando un cuadrado. Una forma simplificada de representar estas unidades es incluyendo solo los átomos de silicio o aluminio y omitiendo los oxígenos puente y terminales.

Por ejemplo la unidad sodalita está formada por ocho unidades de tipo "6" y seis unidades tipo "4". Este poliedro se puede considerar generado a partir de un octaedro. Si se corta

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO			Código	FDE 089
				Versión	03
				Fecha	2015-01-22

uno de los seis vértices el resultado es un octaedro con un vértice truncado. Si repetimos la operación en todos los vértices obtenemos octaedro truncado o sodalita.

Meier, (Meier, 1968), propuso una clasificación estructural de las zeolitas apoyándose en estudios cristalográficos, la cual estaba basada en la existencia de 8 unidades secundarias de construcción, que se muestran en la tabla 2 (Jorge, 2014).

GRUPO C4 (GRUPO DE LA FILIPSITA)			GRUPO C8- T1 (GRUPO DE LA MODERNITA)			GRUPO C6-C6 (GRUPO DE LA FAUJASITA)		
ZEOLITA	TO4	Si/Al	ZEOLITA	TO4	Si/Al	ZEOLITA	TO4	Si/Al
Li-ABW	8		Bikitaita	9		Linde	24	
Filipsita	16		Deschiardita	24		Rho	46	
Harmotoma	16		Epistilbita	24		ZK5	96	1-3
Gismondita	16		Ferreirita	36	4-7	Faujasita	192	
Na-P	16		Mordenita	48		Paulingita	672	
Amicita	16	1-3	ZSM-5	96	<20	Linde N	768	
Garronita	16		ZSM-11	96				
Yugawaralita	16							
Merlionita	32							
GRUPO C4- C4 (GRUPO			GRUPO C6 (GRUPO DE			GRUPO C4-C4- T1 (GRUPO DE		

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO			Código	FDE 089
				Versión	03
				Fecha	2015-01-22

DE LA ANALCITA)			LA CHABAZITA)			LA HULENDITA)		
Analcita	48		Sodalita	12		Brewsterita	16	
Leucita	48	1-3	Canocrinita	12		Heulandita	36	2.5-5.0
Wairakita	48		Ofrerita	18		Stilbita	72	
A	48		Losod	24	2.5-4.0	Stellerita	72	
GRUPO C4-T1 (GRUPO DE LA NATROLITA)	192		Gmelinita	24		Barretita	72	
Edingtonita	10		Liotita	36		GRUPO C8 (GRUPO DE LAUMONTITA)		
Gonnardita	20		Chabazita	36		Laumontita	24	1-2
Thomsonita	40	1-2	Mazzita	36				
Natrolita	40		Erionita	36				
Scolecita	40		Aghanita	48				
Mesolita	120		Levynita	54				

Tabla 2 una clasificación estructural de las zeolitas (Barrer, 1983).

TO4: Numero de tetraedros por celda unitaria Si/Al: Relación Si/Al en el grupo estructural

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

La combinación de formaciones bases conduce a la creación de las estructuras secundarias ,esta tabla recopila 8 diferentes grupos de formaciones secundarias y las demás que están en cada grupo siguen el mismo patrón de cristalización (Barrer, 1983).

3.3 Propiedades físicas

Las propiedades físicas de una zeolita se deben considerar de dos formas: primero una descripción mineralógica de la zeolita desde el punto de vista de sus propiedades naturales, incluyendo la morfología, forma del cristal, gravedad específica, densidad, color, tamaño del cristal o grano y el grado de cristalización. Segundo desde el punto de vista de su desempeño físico como un producto para cualquier aplicación específica, tomando en cuenta las características de brillo, color, viscosidad de Brookfield, viscosidad de hércules, área superficial, tamaño de partícula, dureza, resistencia al desgaste, resistencia a la corrosión y abrasión. La caracterización de cualquier zeolita siempre incluye la descripción básica de sus características mineralógicas y una evaluación al cambio con el efecto con la humedad las cuales son consideradas para las aplicaciones comerciales específicas (Pelayo Alvarado, 2011).

La tendencia a la micro porosidad y las características estructurales de estos materiales permite la transferencia de materia entre el espacio intracristalino y el medio circundante; esta transferencia está condicionada por el diámetro de los poros, por lo que sólo podrán ingresar o salir del espacio intracristalino aquellas moléculas cuyas dimensiones sean inferiores a un cierto valor crítico, el cual varía de una zeolita a otra (Demuth, Th. *et al.* 2000).

El hecho de presentar diversos diámetros moleculares le proporciona a las zeolitas una propiedad muy particular, de gran uso industrial, conocida como selectividad geométrica o de forma.

Entre las características generales de las zeolitas están las siguientes:

- Diámetro de poro: 2 a 12 angstroms.
- Diámetro de cavidades: 6 a 12 angstroms.
- Superficie interna: varios cientos de m²/g.
- Capacidad de intercambio catiónico: 0 a 650 mq/100g.
- Capacidad de adsorción: <0,35 cm³/g.
- Estabilidad térmica: desde 200° hasta más de 1.000°C.

3.4 Propiedades químicas

Las aplicaciones de las zeolitas naturales, hacen uso de uno o más de sus propiedades químicas, que generalmente incluye el intercambio de iones, adsorción o deshidratación y rehidratación. Estas propiedades están en función de la estructura del cristal de cada especie, y su estructura y composición catiónica.

3.5 Propiedades adsorbentes

Los procesos de adsorción son muy utilizados en la química , bioquímica, e industrias de petróleo, solo para la extracción de trazas impuras sino para la separación por tamaño ,también, la

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

purificación por adsorción ha sido operada por muchos años en el tratamiento de agua, aire y decoloración de azúcar.

Todos los proceso de separación por adsorción depende selectivamente de adsorber, uno o más componentes de una corriente de alimentación y luego recuperar el adsorbato (extracto producto) o el refinado purificado. En algunos casos son recuperados ambas corrientes de productos (Valencia D, Giraldo O, & Veléz, 1989).

En la siguiente tabla se muestra una lista parcial de algunas aplicaciones comerciales publicadas donde se utilizan las zeolitas como adsorbentes para procesos de purificación y separación.

Aplicación	Alimentación	Gas o Líquido	Adsorbente
Secado de	-gas natural	G	4A
	-aire	G	4A
	-solventes orgánicos	L	3A
Remoción de CO ₂	-del aire en submarinos y aeronaves	G G	4A (Vacío)
Remoción de H ₂ S	-de gases ácidos	G	CaA o Ca Chabazita
Remoción de SO _x , NO _x	-del aire	G	Silicalita
Concentración de alcoholes	-de alcoholes acuosos diluidos	L	3A,4A

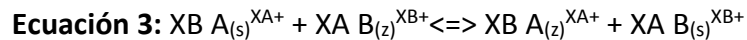
	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Separación parafinas lineales	-destilado	G	5A
	-kerosene	L	
Separación del aire	-aire	G	5 A/13x
	-aire	G	4A

Tabla 3 lista parcial de algunas aplicaciones comerciales (Valencia D et al., 1989).

3.6 Intercambio iónico y catiónico

Para un intercambio iónico binario en el que se involucran los iones A^{xA+} y B^{xB+} , la reacción química se puede expresar de la siguiente forma:



En donde:

XA y XB son las cargas de los cationes de intercambio A y B, z y s corresponden a los cationes en el material sólido (zeolita) y en solución, respectivamente.

Los aniones también están presentes en la solución acuosa y mantienen la electro-neutralidad en dicha fase (Servin R, 2011).

El equilibrio de intercambio binario se describe mediante isotermas de intercambio, las cuales se construyen al graficar la concentración en el equilibrio del ion que se intercambia y que se encuentra en solución como una función de la concentración en el equilibrio de este mismo ion en la zeolita, para una temperatura constante y a una determinada concentración del ion en solución (Morell, 2001).

Para elaborar una isoterma, comúnmente se grafica la fracción equivalente del ion de intercambio en solución como una función de la fracción equivalente del mismo en la zeolita. Las fracciones equivalentes de cationes que se intercambian en la solución y en el sólido, A_s y A_z se definen de acuerdo con las siguientes ecuaciones:

$$\text{Ecuación 4 } A_s = \frac{x_{Ams}A}{x_{Ams} + x_{Bms}B}$$

$$\text{Ecuación 5 } A_s = \frac{\text{equiv. A}}{x_{\text{equiv. totales}}}$$

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

En donde:

- m es la molalidad de los iones A y B de la solución en el equilibrio.
- equiv. Se refiere al número de equivalentes intercambiados del ion A en la zeolita con respecto a los equivalentes totales que posee dicha zeolita.

El parámetro α_{AB} indica la preferencia que tiene la zeolita por el catión que originalmente está en ella (por ejemplo el sodio para el caso de una zeolita sódica) y se expresa como:

$$\text{Ecuación 6: } \alpha_{AB} = ([A_z] [B_s]) / ([B_z] [A_s])$$

Este factor puede variar con la temperatura y la concentración.

Tratándose de un intercambio iónico ideal la gráfica de A_z vs. A_s es una línea recta diagonal, sin embargo a menudo se presentan otros comportamientos, en donde cada uno de ellos implica lo siguiente (Breck, 1974):

- Si el factor de separación $\alpha_{AB} > 1$, la zeolita tiene preferencia por el catión que está originalmente en solución.
- La selectividad varía con el grado de intercambio resultando una isoterma de tipo sigmoideal (Lee, Kim, Whang, & Kim, 2001).
- Si el factor de separación $\alpha_{AB} < 1$, la zeolita no tiene preferencia por el catión que está originalmente en solución.
- La zeolita no ha alcanzado un intercambio completo por efecto de tamizado de los iones.
- Este comportamiento es poco común, debido a que durante el proceso de intercambio iónico se forman dos fases de zeolita produciéndose un efecto de histéresis.
- La línea punteada representa el comportamiento de un intercambio ideal.

Desde otro punto de vista, la selectividad de la zeolita por determinados iones se basa en los calores de hidratación de los cationes involucrados en el proceso de intercambio iónico. La chabacita, la clinoptilolita y la mordenita, que tienen una alta relación Si/Al, pueden intercambiar sus cationes selectivamente por cationes grandes como el Cs^+ , el Rb^+ , el K^+ , el NH_4^+ , el Na^+ , el Ba^{2+} o el Sr^{2+} . Este fenómeno se debe a los calores de hidratación de los cationes: $\text{Ha}(\text{Cs}^+) = -280 \text{ kJ/mol}$; $\text{Ha}(\text{Rb}^+) = -312 \text{ kJ/mol}$; $\text{Ha}(\text{NH}_4^+) = -326 \text{ kJ/mol}$; $\text{Ha}(\text{K}^+) = -339 \text{ kJ/mol}$; $\text{Ha}(\text{Na}^+) = -423 \text{ kJ/mol}$; $\text{Ha}(\text{Ba}^{2+}) = -1339 \text{ kJ/mol}$; $\text{Ha}(\text{Sr}^{2+}) = -1477 \text{ kJ/mol}$ (Morell, 2001).

El comportamiento del intercambio iónico en las zeolitas depende de varios factores que determinan la selectividad, siendo algunos de ellos:

- Naturaleza de los cationes: tamaño, carga iónica, forma
- Temperatura
- Concentración de los cationes en solución
- Aniones asociados con los cationes en solución

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

e) Estructura de la zeolita-topología de la red, densidad de carga de la red

3.7 Intercambio catiónico

El cociente Si/Al determina la capacidad total de intercambio (meq/g) en una zeolita y se determina fácilmente contando el número de átomos de aluminio en la celda unidad (N^{Al}) según la ecuación siguiente:

$$\text{Ecuación 7: } C = (N^{Al} / N_{Av}) / \rho Vc$$

En donde N_{Av} es el número de Avogadro, ρ es la densidad de la zeolita y Vc es el volumen de la celda unitaria. La relación se basa en el hecho de que N^{Al}/N_{Av} es el número total de equivalentes de cationes intercambiables por celda unidad y ρVc es la masa de la celda unidad. Por lo tanto la capacidad de intercambio iónico esperada (CIIE) para las zeolitas naturales está en función de la densidad de carga de la estructura aniónica de la zeolita, es decir del grado de sustitución del Al^{3+} por el Si^{4+} en la red cristalina. Entre mayor sea dicha sustitución mayor será la cantidad de cationes necesaria para mantener la electroneutralidad y por lo tanto se tendrá una alta CIIE (Capacidad de intercambio iónico esperada).

La Tabla 4 muestra la CIIE para varias zeolitas naturales con base en la sustitución isomórfica que posean. Como puede apreciarse en esta tabla, dentro de las zeolitas que poseen la mayor capacidad de intercambio iónico se encuentra la natrolita. Para fines de investigación sobre zeolitas naturales, es importante determinar la capacidad de intercambio iónica efectiva además de la capacidad de intercambio iónica externa e interna.

Nombre de la zeolita natural	CIIE(meg/g)
Analcina	4,5
Chabacita	3,9
Clinoptilolita	2,2
Erionnita	2,8
Faujasita	3,6
Ferrerita	2,3

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Heulandita	3,2
Laumontita	4,3
Modernita	2,2
Natrolita	5,3
Filipsita	4,5
Wairakita	4,6

Tabla 4 Capacidad de intercambio iónico esperada para diferentes zeolitas naturales, expresada en mili equivalentes por gramo de zeolita (Pelayo Alvarado, 2011).

El intercambio catiónico es una de las propiedades más importantes de las zeolitas ya que así se consigue modificar las propiedades y ajustar las zeolitas a diversas aplicaciones, por ejemplo una aplicación interesante se da en la zeolita A, que en vez de unir las cavidades por canales hexagonales lo hace por canales cuadrados. Debido a la sustitución de cuatro iones de sodio en los sitios tipo II de la estructura de zeolita A, por dos iones de calcio alterando la estructura cristalina de tal forma que permite el paso rápido de ciertas moléculas de hidrocarburos e impide el paso de otros (Bosh & Shifter, 1997).

3.8 Métodos de síntesis de las zeolitas

La síntesis hidrotérmica de zeolitas de aluminosilicatos implica unos pasos elementales por los cuales una mezcla de especies de Si y Al, cationes metálicos, moléculas orgánicas y agua se convierten a través de una solución alcalina sobresaturada en aluminosilicatos cristalinos micro porosos. Los complejos procesos químicos que participan en esta transformación pueden designarse como zeolización. Los precursores más comunes de la especie de Si son sílice coloidal, vidrio soluble, sílice de pirólisis o alcóxidos de silicio tales como tetrametil y tetraetilortosilicato. Es esencial darse cuenta de que las fuentes de Si pueden ser diferentes en términos de grado de polimerización de las especies de Si. Especies de Al se pueden derivar de fuentes tales como gibsitita, pseudo-boehmita, aluminato y polvo de aluminio metálico. Moléculas orgánicas neutras catiónicas o pueden actuar como disolvente o como agentes que dirigen la estructura. El proceso de zeolización se activa térmicamente y por lo general se lleva a cabo a temperaturas elevadas con el fin de lograr un alto rendimiento de los cristales en un período de tiempo aceptable. Con base en los fenómenos químicos que ocurren durante la génesis de zeolita, el proceso puede ser dividido en tres pasos básicos: logro de sobresaturación, la nucleación y crecimiento de cristales. El envejecimiento o maduración del gel se describe como el periodo de tiempo y los dichos fenómenos ocurren después de la preparación del gel. Después del envejecimiento de los hidrogeles, se

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

calientan hasta la temperatura de cristalización apropiada, que frecuentemente es por debajo de 350 °C (Colella, 2005).

Una síntesis de zeotipos o zeolita hidrotérmica simple puede ser descrita de la siguiente manera:

1. Las fuentes de los principales componentes como (sílice, alúmina, fuentes de heteroátomos) son seleccionados usando un criterio de viabilidad, reactividad química y costo. Como reactantes son usualmente usados en forma de óxidos y amorfos.
2. Los reactantes son luego mezclados junto con una fuente de cationes, usualmente en un medio a base de agua básico ósea de alto pH.
3. La mezcla de reacción acuosa es calentada, frecuentemente a (>100 °C) en un autoclave sellado.
4. Durante un tiempo después de elevar la temperatura de síntesis, los reactivos permanecen amorfos.
5. Después del anterior “periodo de inducción” zeolitas cristalinas o producto zeotipo puede ser detectado.
6. Gradualmente, todo el material esencialmente amorfo es remplazado por una masa aproximadamente igual de producto cristalino ,recuperada por filtración lavado y secado (Cundy, 2005).

En muchas reacciones de síntesis el calentamiento es llevado a cabo a través de métodos térmicos directos, la mayoría generalmente colocando el recipiente de reacción en un horno convencional. Sin embargo, un procedimiento alternativo muy útil es del calentamiento en microondas dieléctrico en su forma más simple, esto implica el uso de un vaso adecuado, de vidrio transparente a las ondas microondas o de plástico. En el calentamiento convencional, las reacciones pueden ser fuertemente influenciadas por la velocidad de transferencia de calor a través de las paredes del recipiente y el gradiente térmico resultante a través del volumen de reacción. Estas limitaciones son modificadas cuando se aplica una diferente energía de entrada. La ventaja más evidente del calentamiento por microondas es el acortamiento del tiempo de reacción (Cundy, 2005).

No todos los métodos de síntesis de materiales micro porosos conocidos han venido de los laboratorios, un gran entendimiento ha sido logrado gracias al desarrollo y el uso de una variedad de procesos de modelado matemáticos, estos han aumentado considerablemente en importancia con el gran crecimiento de la capacidad computacional .En los últimos años, métodos computacionales han sido aplicados para ambos procesos termodinámicos y cinéticos de la síntesis y también para la base la base molecular de las reacciones de la síntesis. Información importante puede ser obtenida cuando el laboratorio y los estudios de modelado son utilizados de una manera sinérgica (Cundy, 2005).

3.9 Métodos de caracterización

Desde los tempranos avances de Barrer y Milton, obtener una imagen de la formación de las zeolitas se convirtió en una de mayores objetivos de los investigadores de las zeolitas, sin embargo, hasta ahora no hay una total comprensión de los mecanismos de síntesis de zeolitas a nivel molecular por lo cual geles amorfos son convertidos a productos cristalinos porosos. Esto se debe a las complejas

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

reacciones químicas y equilibrios entre los componentes sólidos y la solución utilizada en el proceso de cristalización. Empezando desde los mecanismos propuestos tempranamente de síntesis de zeolitas cuales fueron principalmente basados en una transformación de fase sólida y la transformación de solución mediada. En la recientes décadas ha habido muchos progresos en los aspectos mecánicos de la síntesis de zeolitas con la ayuda de técnicas de caracterización modernas, tales como espectroscopia avanzada NMR, microscopía electrónica de alta resolución (HRTEM), dispersión dinámica de luz in situ (DLS), microscopía de fuerza atómica in situ (AFM), y dispersión de ángulo pequeño de rayos X y de neutrones (SAXS y SANS). Técnicas de modelado por ordenador también han ayudado sustancialmente a la comprensión de los procesos fundamentales que intervienen en las síntesis de hidrotérmica de zeolitas. A pesar de que persisten algunos desacuerdos, la imagen sobre la formación de zeolitas cristalinas se ha tiene mucho más clara (Yu, 2007).

La caracterización de una zeolita provee información acerca de su estructura y su morfología, su composición química, su habilidad para sorber y retener moléculas y su habilidad química para convertir estas moléculas. Una mayor dificultad surge debido a que las últimas dos habilidades son propiedades químicas de la superficie. La superficie micro porosa de una zeolita es no obstante una propiedad periódica intrínseca tridimensional del material y por lo tanto no puede ser probada directamente por técnicas de sensibilidad de superficie. Por consiguiente, muchos de los enfoques elegidos se basan en técnicas de caracterización a granel y se focalizan en la interacción de la zeolita con muestras atómicas o moleculares (Jentys & Lercher, 2001).

3.9.1 Espectroscopia infrarroja

La espectroscopia de absorción de infrarrojo es una de las herramientas utilizadas en la química analítica que se utiliza para la identificación de estructuras orgánicas, inorgánicas y bioquímicas. Dado que todas las moléculas están formadas por átomos, los cuales están unidos por enlaces químicos, esta herramienta es útil para poder detectar la mayoría de estos enlaces químicos a una determinada longitud de onda.

3.9.2 Difracción de rayos X

Se utiliza en las zeolitas para analizar si hay formación o no de un material cristalino, también nos ayuda a verificar que la estructura cristalina corresponda al producto que se trataba de sintetizar. En general los difractogramas que se realizan a las estructuras zeolíticas se realizan en un rango de 2θ entre 0 a 40. En este rango se encuentran los picos característicos de este tipo de estructuras.

La mayoría de catalizadores son sólidos cristalinos como zeolitas, muchos óxidos, metales soportados, y sales, La difracción de rayos X en polvo se convierte en una técnica fundamental que permite evaluar.

1. naturaleza de las fases cristalinas
2. su concentración en el sólido
3. tamaño de cristales

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Las dos últimas características se pueden solo determinar en espectros simples. En el caso de los sólidos con baja simetría es decir zeolitas, el cálculo del grado de cristalinidad es muy difícil (Leofanti et al., 1997).

3.9.3 Microscopia de transmisión de electrones (TEM)

En TEM, un haz primario de electrones a alta intensidad (normalmente 100-200 KeV) pasa a través de la muestra de polvo, para que así los electrones transmitidos y difractados sean colectados. Por lo tanto, la muestra tiene que ser colocada al vacío (<10⁻⁸ torr) y debe ser de un bajo espesor entre (10-500 Å). Luego de la atenuación del haz, se genera una proyección de bidimensional de la muestra, la cual depende de la densidad y el espesor de la muestra de polvo. Si se utiliza un orificio objetivo que solo permite que los electrones transmitidos contribuyan, y a su vez excluye a todos los electrones difractados, se genera una imagen llamada imagen de campo claro. Para las vistas de bajo aumento se prefiere este modo de imágenes. Solo si los electrones difractados son recogidos, los cuales están ligeramente fuera de eje del haz transmitido, y mientras que el haz central no difractado se excluya por el orificio, entonces se obtiene una imagen de campo oscuro. Para los catalizadores soportados las imágenes de campo oscuro muestran un mejor contraste sobre las partículas de metal.

3.9.4 Espectroscopia fluorescente de rayos X

La muestra es expuesta a la radiación de rayos X de alta energía, los cuales lideran a la excitación de los electrones desde el núcleo orbital del elemento testado. El principal mecanismo de relajación es que los electrones de una orbital energéticamente más alta llene la vacante, lo que resulta en la generación de la radiación de (rayos X fluorescentes) o en la expulsión de un electrón (desde otro nivel) por el llamado efecto Auger.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

En la siguiente tabla se describen brevemente una serie de métodos de caracterización que sirve como una guía para la caracterización de tamices moleculares.

Técnica	Sinónimo	Estructura	Tamaño de poro	Composición Química	Grupos funcionales
Microscopía de electrones	HRTEM SEM EDX	x	X	x	
Resonancia magnética nuclear (giro de ángulo mágico)	MAS-NMR		X	x	x
Sorción de moléculas de sonda			X		x
Modelos de reacción			X	x	x
Termogravimetría, calorimetría diferencial de barrido	TGA/DSC		X	x	x
Desorción a temperatura programada	TPD			x	x
Espectroscopía vibracional		x	X	x	x
Espectroscopía de absorción de rayos x	XAS	x		x	
Difracción de rayos X	XRD	x		x	
Espectroscopía de fluorescencia de rayos X	XRF			x	
Espectroscopía de fotoelectrones de rayos X	XPS			x	x

Tabla 5 Compilación de técnicas de Caracterización (Jentys & Lercher, 2001).

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

4. APLICACIONES DE LAS ZEOLITAS

4.1 Aplicaciones generales

En los procesos químicos industriales los tamices adsorbentes moleculares han sido usados como materiales de separación y purificación de residuos radioactivos, tratamiento del agua, filtración y extracción de metales pesados, tratamiento de aguas residuales, extracción de amonio en lodos y aguas residuales municipales. Direcciones establecidas en los años 90's incluyeron aplicaciones ambientales y bio-farmacéuticas las cuales han recibido actualmente mucha atención, a mediados de los 90s se tuvo una tendencia a la catálisis la cual incluyó: un continuo y acelerado descubrimiento de nuevos materiales catalíticos, un uso expansivo en la refinación de petróleo particularmente en el área de alto octanaje de gasolina y en el desarrollo de reformulación de gasolina, desarrollo comercial en la conversión de recursos alternativos para combustibles de motor y químicos base, también como insumos intermedios o finales para productos químicos orgánicos. En los finales de la década de 1990 la amplia aplicación de las zeolitas como intercambiadores de iones en detergentes se estabilizó en la demanda de Norte América, Oeste de Europa y Japón. Pero continuó creciendo durante le década del 2000 particularmente en Asia, Australia y América Latina. Otras aplicaciones usadas en una menor escala en el mercado mundial de los materiales de tamiz molecular son: intercambiadores de iones en la industria nuclear , almacenamiento de residuos radioactivos y limpieza, y en remoción y recuperación de metales , (Flanigen, 2001).

El uso de las zeolitas es bastante amplio ya que se usan en diferentes áreas y demostradas anteriormente .Sin embargo debe hacerse notar que de todas las estructuras zeolíticas que existen solo 12 son utilizadas en la industria o tienen significativo potencial industrial las cuales se muestran en la tabla 4 (Pelayo Alvarado, 2011).

Tipo de estructura	Aplicación
LTA	Detergentes, secado y separación
FAU,MOR	Adsorción y catálisis
LTL	Catálisis: aromatización
MFI	Adsorción y catálisis
BEA	Catálisis

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

CHA (silicoaluminofosfato)	Catalisis: conversión de metanos en olefinas
FER	Catalisis: isomerización de n-butenos
AEL (silicoaluminofosfato),TON	Catálisis: isomerización de parafinas
MTW	Catálisis

Tabla 6 Tipos de estructuras zeolíticas con potencial industrial o ya en uso (Pelayo Alvarado, 2011)

4.1.1 Zeolitas en el secado de gases

El agua a baja temperatura forma hidratos que ocasionan taponamientos en las tuberías, es corrosiva y en procesos petroquímicos catalíticos suele ser veneno para los mismos, o promueve reacciones laterales indeseables. Por otra parte, un método usual de regeneración consiste en calentar directamente el reactor que contiene la zeolita impregnada de agua, entre 200 y 300 °C. Por lo que una de las propiedades más importantes de las zeolitas, que las hace de uso obligado en muchos procesos de deshidratación, es su gran estabilidad térmica y el aumento de su capacidad de adsorción con la temperatura (Bosh & Shifter, 1997).

4.1.2 Otros usos de las zeolitas

Absorbentes industriales:

Absorbentes para aceites y derrames, Separaciones de gases, Su uso a nivel industrial es basado en las propiedades de adsorción de líquidos y vapores por lo que es un limpiador ideal de estructura granular para la limpieza de derrames de aceites y químicos; es estable químicamente y seguro para su uso (Lenntech BV, 2016).

Residuos radioactivos:

Remediación/re contaminación, las zeolitas son utilizadas para absorber Cs y Sr de residuos de laboratorios. Isótopos radioactivos pueden absorberse con zeolitas por intercambio iónico, y la zeolita puede transformarse en vidrio para capturar permanentemente el residuo para su eliminación segura (Mumpton, 1999).

Tratamiento del agua: Filtración, Extracción de metales pesados, Piscinas,

Tratamiento de aguas residuales: Extracción de amonio en lodos y aguas residuales municipales, Extracción de metales pesados, Campos de lixiviados sépticos (pozos negros).

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

4.2 Zeolitas y su importancia en las aplicaciones energéticas

Se han investigado diferentes fuentes bibliográficas para tener como referencia en los procesos de síntesis y caracterización y sus potenciales en energía, los diferentes tipos de síntesis y caracterización que se mencionaron anteriormente hacen parte de diferentes procesos para diversas aplicaciones de las zeolitas, en este trabajo se tomaron las aplicaciones de zeolitas correspondientes a las aplicaciones energéticas como celdas de combustible, reducción de agentes contaminantes como SO₂ y NO₂, mejoramiento de combustibles y las aplicaciones en refrigeración.

En Colombia desde el 2002 se ha venido adelantando una serie de acciones con miras a lograr el mejoramiento de la calidad de los combustibles en el país, y con el fin de llevar la calidad de los mismos a los más altos estándares internacionales y cooperar así con el mejoramiento de la calidad del aire y el desarrollo sostenible del país (Ministerio de minas y energía, 2010).

Con el fin mejorar los combustibles, se han desarrollado del mejoramiento de combustibles se han desarrollado numerosos estudios e investigaciones donde las zeolitas juegan un papel crucial en dicho proceso, un estudio de (Duan et al., 2015). Donde se analizó la Síntesis de una nueva zeolita W y sus aplicación de hidro-mejoramiento en un catalizador de la gasolina FCC, mostró que el catalizador exhibió los mejores rendimientos catalíticos tanto para HDS (98,2%) y la preservación octanaje (1,22 unidades de la pérdida de RON). El excelente rendimiento de desulfuración, isomerización, aromatización y preservación RON pueden atribuirse a los efectos de sinergia de las propiedades físico-químicas de zeolita L W y que podría ajustar el balance de la funcionalidad en la gasolina FCC procesos hidro-mejoramiento. La síntesis y aplicación de nueva zeolita W proporcionarán una luz de esperanza para los procesos industriales en el futuro.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

4.3 Zeolitas y sus aplicaciones en refrigeración

Uno de elementos contaminantes de la capa de ozono que contribuyen al incremento de las emisiones de CO₂ son los refrigerantes como los clorofluorocarbonos (CFC) e hidroclofluorocarbonos (HCFC). Estos son serios problemas desafiantes para la comunidad científica, la dependencia de combustibles fósiles debe de ser reducida y es necesario explorar alternativas amigables con el medio ambiente, en este aspecto los sistemas de adsorción de vapor dan un alcance para el de fuentes de energía de bajo grado, es decir paneles solares para la generación de enfriamiento el cual es denominado como una energía de alto grado debido a su tecnología de compresión (Shaikh & Morabiya, 2013). Debido a la capacidad de absorción de sustancias, las zeolitas son utilizadas en procesos de refrigeración, esta propiedad es una de las más relevantes de las zeolitas lo cual lo hace un material de un gran potencial energético. De las propiedades más relevantes de las zeolitas es su capacidad de adsorción, esto lo hace un material aprovechable en los sistemas de refrigeración.

El ciclo de refrigeración más común es el de compresión de vapor (refrigeración tradicional). Sin embargo, existe otra alternativa para suplir las necesidades de refrigeración utilizando como principio la adsorción, la cual utiliza sustancias que no generan impacto ambiental puesto que permite el aprovechamiento de energías alternativas como la solar, la biomasa o la utilización del biogás como combustible (Jänchen, Ackermann, Weiler, Stach, & Brösicke, 2004).

Los sistemas de refrigeración basados en el principio de adsorción son una alternativa de gran interés debido a su simple tecnología y fácil funcionamiento. La principal diferencia con los sistemas de refrigeración convencionales radica en la sustitución del compresor por un generador; esta diferencia tiene grandes implicaciones que no están presentes en los sistemas convencionales, tales como: adsorción de agua en los materiales compuestos y en la zeolita, también el fluido de trabajo no solo sufre cambios de volumen específico debido al cambio de fase, sino también variaciones de presión y temperatura debido al proceso de adsorción y desorción. Debido a los cambios anteriores no es posible representar el proceso de refrigeración por adsorción con los mismos diagramas de P vs. V y T vs. S. El ciclo de un sistema de refrigeración por adsorción es discontinuo debido a que el lecho adsorbente fijo en el generador necesariamente opera de esta forma. El generador puede ser calentado a través de la energía térmica por lo que esta clase de sistemas pueden ser alimentados por energía solar (Cortés Correa, 2009).

La refrigeración por adsorción puede ser vista como una tecnología de enfriamiento amistosa con el medio ambiente sin potencial de agotamiento del ozono y calentamiento global. Este tipo de refrigeración es un potencial candidato para remplazar los sistemas de refrigeración convencionales basados en compresión de vapor, específicamente los basados en adsorción de zeolita-gel.

En el siguiente gráfico se enseña un sistema de refrigeración con generador y lecho de zeolitas:

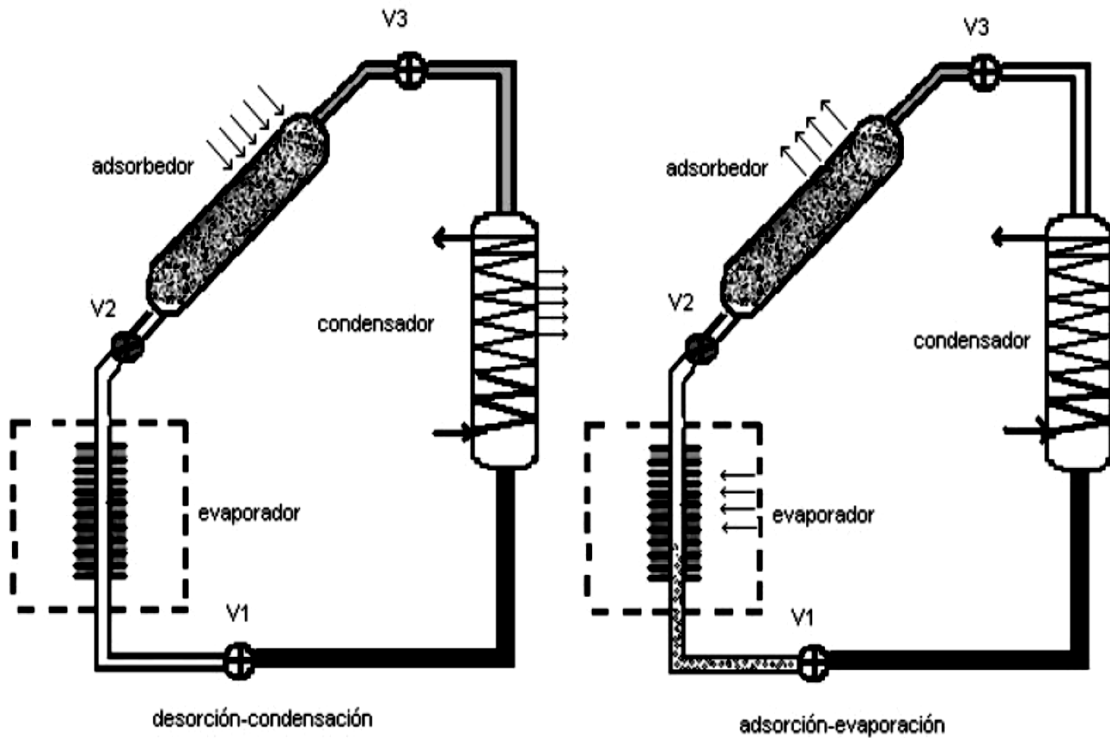


Ilustración 2 Ciclo de refrigeración por adsorción y desorción (Cortés Correa, 2009).

Un ciclo teórico típico de refrigeración por adsorción, comprende cuatro etapas:

1. Una etapa de evaporación-adsorción, en la cual se obtiene el efecto refrigerante.
2. Una etapa de calentamiento isostérico (cantidad adsorbida constante) en el generador.
3. Una etapa de desorción-condensación.
4. Una etapa de enfriamiento isostérico en el generador.

El comportamiento descrito en cada una de las etapas en los sistemas de refrigeración se puntualiza a continuación:

Etapa 1: Comportamiento isobárico, la cantidad adsorbida aumenta mientras la temperatura del sistema disminuye, el paso representa la adsorción del fluido en el adsorbente. Es en esta etapa que se logra el efecto frigorífico deseado.

Etapa 2: Existe un calentamiento isostérico con aumento en la presión del sistema, este es el fenómeno transitorio para llegar al punto de desorción del adsorbato.

Etapa 3: Se produce la desorción del adsorbato. En este paso se observa el calentamiento isobárico del sistema, propiciando una disminución de la cantidad adsorbida por el efecto de la desorción. El material desorbido es condensado.

Etapa 4: Existe un enfriamiento isostérico del sistema con disminución de la presión, debido a la disipación de calor del sistema al ambiente. La tecnología adsorción de sílice agua-gel está en auge en las últimas décadas debido a su idoneidad para las fuentes de calor de bajo grado, comparado

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

con la refrigeración por absorción, otro método de refrigeración que puede ser alimentado por calor. La refrigeración por adsorción de zeolita-gel no experimenta los problemas de corrosión, cristalización y destilación, sin embargo debe confrontar desafíos de baja capacidad enfriamiento (SCP) y bajo coeficiente de rendimiento (COP), por lo tanto, se han hecho muchos esfuerzos en la mejora de la tecnología de refrigeración por adsorción de gel-agua (Cortés Correa, 2009).

En su trabajo Wu y Col. (2011) analizaron el rendimiento de una zeolita 13X modificada para refrigeración por adsorción de agua alimentado por el calor residual de un escape, donde demostraron cómo un sistema de refrigeración de reducido tamaño con un módulo de refrigeración por adsorción tuvo un buen rendimiento y puede tener las ventajas de una estructura simple, la ausencia de partes en movimiento o control de válvulas, además de incorporar un sistema de refrigeración condensador/evaporador.

El aire acondicionado de un automóvil funciona a través de sistemas de refrigeración por compresión de vapor, pero los refrigerantes en los sistemas de refrigeración por compresión de vapor son principalmente HCFCs y HFCs, los cuales no son amigables con el medio ambiente, y el compresor usa una significativa porción de la potencia del motor. El sistema de refrigeración por adsorción utiliza refrigerantes ecológicos y puede ser impulsado por el calor residual del motor del automóvil, por lo tanto, los últimos años han sido testigos de un creciente interés en el uso potencial de refrigeración por adsorción como aire acondicionado de los automóviles.

Es así como diferentes investigadores han desarrollado sistemas para esta aplicación, entonces llevar esta tecnología a aplicaciones realmente prácticas es un gran reto y es por eso que autores como Hu y Col. (2009) analizaron como era el rendimiento de una zeolita 13X compuesta con espuma de aluminio en la recuperación de la masa de agua en un sistema de refrigeración por adsorción impulsado por el calor de escape de un motor. Los autores lograron resultados que demuestran que la zeolita compuesta de espuma / aluminio puede mejorar en gran medida los valores de COP y SCP en el tiempo de ciclo corto comparado con la zeolita sin carga ya que el ciclo de recuperación de masa fue capaz de acortar el tiempo de los procesos de presurización y despresurización y mejorar los valores de COP y SCP en tiempo de ciclo corto. Las condiciones de trabajo del motor de un automóvil pueden afectar en gran medida el rendimiento de la refrigeración por adsorción, por lo tanto, un sistema de refrigeración de adsorción es más conveniente para los automóviles que por lo general se conducen en carreteras, tales como los autos de larga distancia o camiones.

Es de gran importancia la generación de nuevos sistemas de refrigeración, además que estos sistemas sean alimentados por fuentes renovables en este caso energía solar que brinda una ventaja enorme pues además de ser renovable es una fuente de energía que se puede aprovechar en los lugares más remotos del planeta.

La refrigeración solar es una aplicación importante de este tipo de energía debido a la excelente relación entre el alto brillo del sol y los requerimientos de refrigeración. Esta relación depende de materiales capaces de acumular energía térmica y liberarla de una manera reversible con grandes

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

variaciones de presión, lo cual es un parámetro deseable para la refrigeración por adsorción. Una de las mejores y más confiables reacciones químicas para la acumulación de calor de baja temperatura es la de la deshidratación, la evaporación de agua se asocia con el consumo de 2260 kJ/kg de energía y esto ofrece el mejor parámetro específico para la acumulación de energía. Como las reacciones de hidratación y deshidratación son bien reversibles, este aspecto permite el diseño de sistemas de acumulación de calor de múltiples usos. Los tres tipos de sistemas que pueden sufrir reacciones reversibles de hidratación-deshidratación son zeolitas, hidratos cristalinos e hidróxidos. La adsorción de agua por estos materiales se asocia con la formación de enlaces químicos de fuerza moderada y por lo tanto puede actuar como el almacenamiento térmico. De los tres tipos de materiales enumerados, las limitaciones tales como la fluidización de los hidratos cristalinos y la inestabilidad de hidróxidos en CO₂ restringe sus aplicaciones ,pero las zeolitas con estructura porosa abierta son capaces de adsorber grandes cantidades de vapor de agua hasta (30-35 at%) a temperatura ambiente y si las zeolitas son luego calentadas en un sistema cerrado, ellas desorben vapor de agua en altas presiones considerables, lo cual puede facilitar el remplazo de el compresor mecánico usualmente encontrado en la refrigeración y sistemas de bombas de calor (Cindrella & Dyer, 2009).

En su trabajo, Cidrella y Col. (2009) demuestran el uso Zeolitas para refrigeración solar con intercambio de iones y sales de hidratos-encapsulados, concluyendo que la zeolita es un material muy prometedor y fascinante para el almacenamiento de energía, la aplicación de bomba de calor y refrigeración solar, ya que permiten la adsorción de gases y la encapsulación de los hidratos de sal sin perder su integridad y entramado básico.

Los sistemas de almacenamiento en frío por adsorción han llamado la atención del sector industrial y científico por su gran capacidad de almacenamiento y por su poca pérdida de energía durante dicho proceso de almacenamiento. La energía de almacenamiento es muy importante en gran variedad de aplicaciones de ingeniería térmica, ya que en muchos casos la energía entregada no corresponde con la energía demandada, de tal forma que una cantidad considerable de energía puede ser almacenada para un uso posterior. Así mismo se hace en el campo del almacenamiento de frío donde las zeolitas también tienen su lugar (Lu, Wang, Zhang, & Jiangzhou, 2003).

Un sistema de almacenamiento en frío por adsorción con un par de trabajo zeolita-agua usado para el aire acondicionado de una locomotora ha sido desarrollado por Lu y col. (2003). Encontrando que las combinaciones de adsorbente-adsorbato tienen grandes capacidades de almacenamiento de frío. El almacenamiento en frío por adsorción puede hacer uso de la energía térmica de bajo grado, sin contaminación y sin pérdidas de energía en frío. El proceso de descarga en frío se puede llevar a cabo cuando el lecho adsorbente es enfriado por aire o es adiabático. Se puede considerar que tuvo éxito la aplicación de un sistema almacenamiento en frío por adsorción con el par de trabajo de agua -zeolita en el aire acondicionado de la locomotora. Este sistema es simple y puede ser manejado fácilmente en comparación con otros sistemas de adsorción de multi-lecho. Además, el proceso de funcionamiento del sistema está en conformidad con el tiempo de funcionamiento de la locomotora. Se obtiene una potencia media de refrigeración alrededor de 4,1 kW, lo que es

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

suficiente para que la cabina del conductor este bastante cómoda. Sin embargo, la transferencia de masa y calor del adsorbente debe mejorarse para conseguir mejor rendimiento. Finalmente se encuentra tal sistema de almacenamiento de frío por adsorción como un dispositivo competitivo para proporcionar una capacidad de refrigeración en rangos del campo de la utilización de energía térmica de bajo grado (Lu et al., 2003).

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

4.4 Zeolitas y sus aplicaciones en las celdas de combustible

Durante más de dos décadas los principales países desarrolladores de tecnología han indagado en la creación de nuevas alternativas de generación de energía eléctrica más limpias, uno de los dispositivos bandera a raíz de estas investigaciones han sido las celdas de combustible, un dispositivo generador de potencia a pequeña y gran escala el cual ya está siendo utilizado en los dispositivos espaciales como fuente de generación de potencia pero no vendido a nivel comercial debido a su alto costo. Las zeolitas debido a sus propiedades de intercambio iónico tienen un rol crucial, donde se ha tenido un interés en ellas, por ejemplo para reducir los contenidos de azufre y cumplir con las regulaciones ambientales internacionales.

Las pilas de combustible son sistemas electroquímicos en los que la energía de una reacción química entre un combustible y un oxidante se convierte directamente en electricidad. A diferencia de la pila eléctrica o batería, una pila de combustible no se acaba ni necesita ser recargada, funciona mientras le sean suministrados los reactivos. La pila está constituida por un ánodo en el que se inyecta el combustible, comúnmente hidrógeno, y un cátodo en el que se introduce un oxidante, normalmente aire u oxígeno. Los dos electrodos de la pila están separados por una interfase (un electrólito iónico conductor o una membrana) que permite el intercambio de cargas eléctricas (iones) (Francesconi, Laborde, Borio, & Marozzi, 2008).

Una celda de combustible es un sistema de flujo estable, en el cual el combustible y el oxidante se suministran desde una fuente externa que provee un medio para transformar energía química en eléctrica sin combustión y sin contaminar el aire ni el agua en un proceso continuo y directo mediante reacciones de reducción y oxidación en presencia de un catalizador, y elimina los productos de la reacción. De manera ideal, no hay cambio en la composición química del electrolito o de ambos electrodos (Acuña Garrido & Yi, 2001).

En la siguiente ilustración se detallan las partes y el principio de funcionamiento de una celda de combustible tipo PEM.

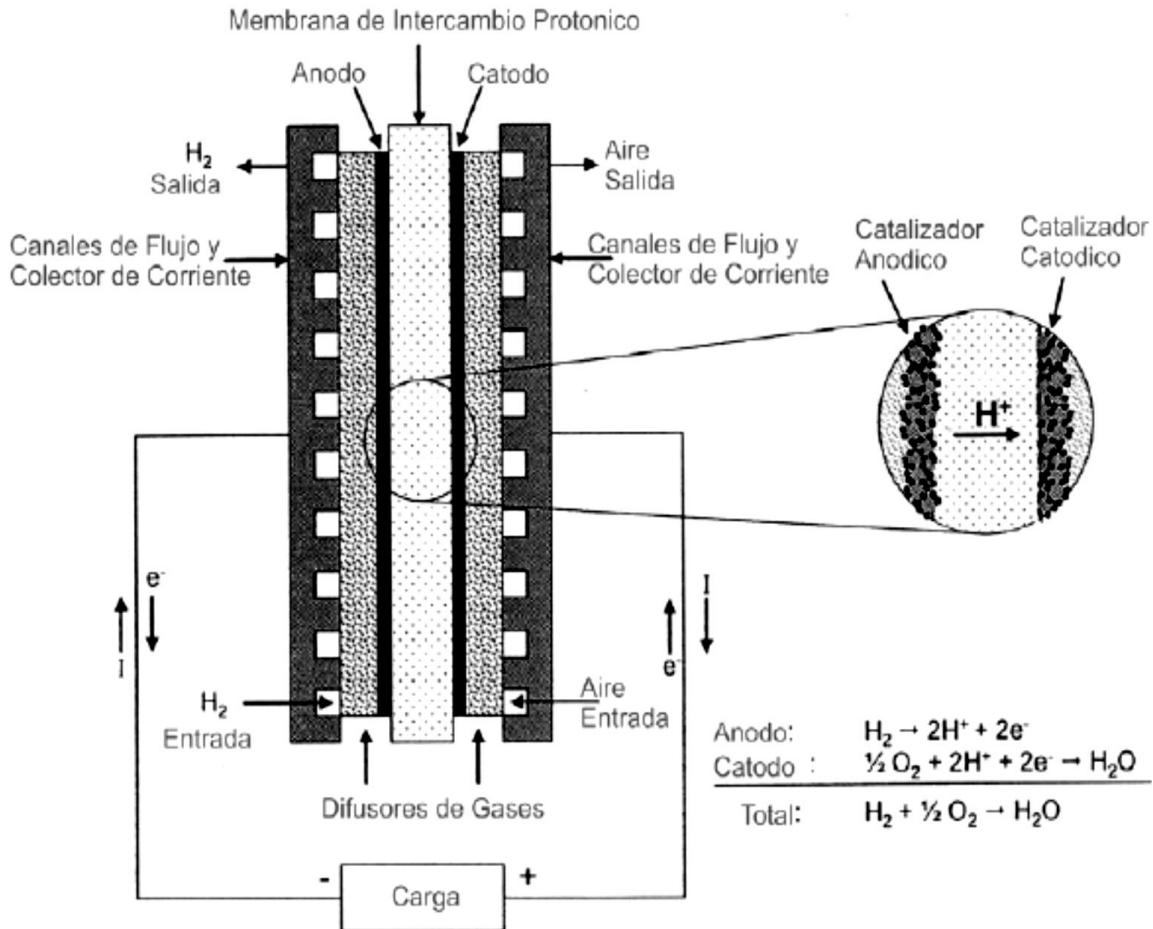


Ilustración 3 Principio de funcionamiento de una pila de combustible de hidrógeno y oxígeno (Francesconi et al., 2008).

En una celda de combustible, el oxidante y el combustible tienen una reacción isotérmica, lo cual produce una reacción de cada electrodo por separado. En la superficie de un electrodo ocurre una reacción que ioniza el combustible y envía los electrones liberados a un circuito eléctrico externo, en la superficie del otro electrodo ocurre una reacción que recibe electrones del circuito externo que cuando se combina con el oxidante crean iones. Los iones se combinan en el electrolito para completar la reacción total. Luego el electrolito, que no es conductor eléctrico, transporta los iones entre los electrodos, para completar el circuito y seguir con el flujo de electrones. (Acuña Garrido & Yi, 2001)

La reacción química que ocurre en la celda de combustible es isotérmica y continua. Las celdas de combustión no están limitadas por el Principio de Carnot, porque en teoría pueden alcanzar una mayor eficiencia en la conversión de energía, mientras que las reacciones de combustión involucran grandes variaciones de temperatura, lo cual genera energía como calor o calor y trabajo. Las

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

pérdidas excesivas que se producen en los sistemas de conversión de energía de varias etapas pueden evitarse mediante el uso de celdas de combustible que hacen la conversión en un proceso de una sola etapa.

Las celdas de combustible son muy versátiles y útiles, sobre todo en áreas remotas como granjas, barcos, lugares extremos, bases militares o incluso estaciones espaciales. Las celdas de combustible basadas en consumo de hidrogeno pueden ser pequeñas, livianas y además no tienen partes móviles, debido a que en el proceso de generar energía eléctrica también se genera calor, y pensando en un uso doméstico, las celdas de combustible son multipropósito ya que el calor mencionado se podría usar por ejemplo para calentar agua o calefaccionar la casa. Hay quienes pronostican que incluso será posible comercializar el excedente de energía eléctrica (a través del tendido eléctrico) (Ried & Flores, 2013).

Los avances en investigación con zeolitas también ha facilitado el desarrollo y mejoramiento de las celdas de combustible, el tratamiento de zeolitas en este campo abarca temas como la reducción de azufre en celdas de combustible, purificación del H₂, eliminación de tetrahidrotiofeno (THT) y terbutilmercaptano (TBM).

Los combustibles de hidrocarburos son fuente ideal de hidrógeno para las celdas de combustible. Sin embargo, los combustibles líquidos de hidrocarburos usualmente contienen compuestos de sulfuro que envenenan los catalizadores y los electrodos en las celdas de combustible. Por lo tanto, los componentes de sulfuro en los combustibles líquidos de hidrocarburos deben ser reducidos a menos de 0.1 ppmw (Lin, Zhang, Zhang, & Lu, 2011). Para dicha reducción son utilizadas las zeolitas debido a sus propiedades de adsorción, Lin y Col. (2011) estudiaron de comportamiento adsorción y desorción de disolvente en las zeolitas Y modificadas por intercambio de iones durante la eliminación del azufre para aplicaciones de celdas de combustible, demostrando que la capacidad de adsorción de azufre tiofénico se dio en el orden de: CEY>Agy>NaY donde la capacidad de adsorción de CEY fue la mayor y la NaY la menor. En todos los casos la concentración de azufre de salida es menor a la concentración inicial correspondiente. El perfil de concentración del disolvente de lavado durante el proceso de desorción mostro que la mayoría de componentes de azufre pueden ser recuperados en la etapa inicial de desorción. Los niveles de desorción de las zeolitas Y siguieron un orden de NaY > AgY > CeY, el cual es inverso al orden encontrado en los niveles de adsorción.

La remoción de azufre es importante para los combustibles utilizados como fuente de hidrógeno para aplicaciones de celdas de combustible para evitar el envenenamiento por azufre de los catalizadores utilizados en el mismo. Para dicha remoción del azufre se han propuesto nuevas membranas de matriz mixta (MMMs) con canales de transporte bien definidos (Lin, Wang, Zhang, Dong, & Zhang, 2012).

En un estudio de Lin y Col. (2012) buscaron crear una nueva membrana de matriz mixta para la eliminación de azufre en aplicaciones de celdas de combustible donde los resultados mostraron que las zeolitas funcionales se incorporaron en la red tridimensional y la capacidad de adsorción de

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

MMMs llegó a 8,6 y 9,5 mg S g⁻¹ para las especies de tiofeno y dibenzotiofeno, respectivamente. Adicionalmente, el comportamiento de regeneración sugiere que las membranas pueden recuperar aproximadamente entre el 88% y el 96% de la capacidad de desulfuración a través de lavado con disolvente y tratamiento de la regeneración térmica respectivamente. Los debates relacionados ofrecen algunas sugerencias generales en la promoción de las novedosas aplicaciones de MMMs en la separación de mezclas orgánicas, y una alternativa potencial para la producción de una fuente de hidrógeno libre de azufre para aplicaciones de celdas de combustible.

A nivel científico ha crecido el interés sobre los materiales que cuentan con propiedades como la conductividad de protones debido a sus potenciales aplicaciones en varios dispositivos electroquímicos como las celdas de combustible, baterías, sensores y dispositivos de visualización electroquímicos. Actualmente considerables esfuerzos se están dedicando a la síntesis y caracterización de materiales híbridos inorgánicos-orgánicos, los cuales forman una nueva clase de sólidos con propiedades que combinan la alta estabilidad química y térmica de la parte inorgánica con la alta funcionalidad y simple procesamiento de la parte orgánica (Ahmad, Zaidi, Rahman, & Ahmed, 2006).

Aprovechando las propiedades de conductividad de protones de las zeolitas es posible transportar pequeñas partículas como es el caso protones sólidos. Ahmad y Col. (2006) estudiaron las síntesis y conductividad de protones de heteropoliácidos (HPA's) cargados en una zeolita tipo Y como conductores de protones sólidos en aplicaciones de celdas de combustible, donde los resultados del estudio de lixiviación confirmaron que el material lixiviado a través del experimento fue menos del 10% de la cantidad inicial cargada. Por lo tanto se aseguró una carga casi completa de HPA's dentro de las estructuras de la zeolitas Y .La conductividad de protones del materia preparado se halló dependiente de la cantidad de heteropoliácidos presentes y se vio fuertemente afectado por la presencia de agua en la muestra. La conductividad de protones más alta fue de 11.0 mS/cm obtenida con un 50 wt.% de MPA cargado en la zeolita Y. Desde que se observó que la conductividad podía ser excepcionalmente alta en presencia del agua se confirmó que estos nuevos conductores de protones se pueden utilizar en el desarrollo de las membranas conductoras de protones para celdas tipo PEMFC, especialmente celdas de combustible de metanol directo.

Siendo las celdas de combustible una fuente de energía amigable con el medio ambiente, aun es necesario aumentar su eficiencia así lo demuestran Devrim y Col.(2015) que apoyando sus estudios en las cualidades de adsorción de las zeolitas estudiaron el incremento del rendimiento de celdas de combustible tipo PEM a altas temperaturas y bajas humedades, por medio del ensamble una membrana de electrodos de alto rendimiento basada en membranas de zeolitas/Nafion, demostrando que las membranas compuestas de zeolitas/Nafion muestran un aumento de la adsorción de agua y de las propiedades de conductividad de protones debido a las propiedades de retención de agua de la zeolita y la interacción entre el polímero Nafion y partículas de zeolita. Las pruebas realizadas a la celda PEMFC a diferentes temperaturas de funcionamiento y en condiciones de baja humedad indicaron que la membrana compuesta zeolita/Nafion tuvo un mejor rendimiento que la membrana a base de Nafion. El compuesto de zeolita/Nafion tiene el potencial para ser

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

utilizado como material base para la membrana alternativa en un celdas tipo PEMFC, con el fin de conservar el comportamiento de conducción de protones a temperaturas elevadas (Devrim & Albostan, 2015).

En el caso de las celdas de combustible tipo PEM, el combustible utilizado es hidrógeno el cual debe ser purificado para una mejor reacción en la celda combustible. Utilizando las cualidades catalizadoras de la zeolitas Watanabe y Col. (2003) estudiaron la purificación de hidrógeno para celdas de combustible: oxidación selectiva de monóxido de carbono en catalizador de zeolitas de Pt-Fe, demostrando que el compuesto de Modernita/Pt-Fe es un catalizador extremadamente prometedor para la limpieza de CO en reformados y presenta grandes impactos para la aplicación práctica de las PEFC en los vehículos eléctricos o sistemas de cogeneración residenciales, por ejemplo, una mayor eficiencia de combustible, amplias condiciones operacionales tales como temperatura y GHSV.

Las celdas de combustible de membrana de intercambio de protones (PEMFC) operan a altas temperaturas (es decir, 150, 200 °C) tienen las ventajas de una rápida cinética electroquímica y mayor tolerancia catalizadora para el envenenamiento por CO, manejo de agua común y del calor incluso la posibilidad de usar catalizadores de metales no preciosos. Por lo tanto, el diseño de una celda de combustible más eficiente y de una operación más simple puede ser realizado con una significativa reducción de costos. Sin embargo, el transporte de protones en la membrana de ácido perfluorosulfónico (PFSA) se realiza el agua líquida y esto limita su temperatura práctica de funcionamiento por debajo de 80°C. Esto se ha agravado por los desequilibrios de agua causados por la fricción de electro-ósmosis y difusión de retroceso en la membrana PFSA (Han, Kwan, & Yeung, 2012). Por lo tanto, hay una investigación activa en el desarrollo de membranas que podría retener y gestionar el agua mediante el proceso de auto-humidificación. Las zeolitas se utilizan cada vez más en las celdas de combustible, a partir de la conversión del combustible y el acondicionamiento de los aditivos de la membrana, así como en el apoyo a electrocatalizadores. Han y col. (2012) estudiaron como una de las aplicaciones de zeolita en celdas de combustible ayuda a la gestión del agua y la conductividad de protones demostrando que es posible a través del confinamiento mejorar el rendimiento de las celdas de combustible de membrana con intercambio de protones (PEMFC) incluso bajo duras condiciones operacionales, simultáneamente se reforzó la membrana y se redujo las cantidades de PFSA en la membrana compuesta. La operación a alta temperatura permitiría a la PEMFC tolerar menor pureza del H₂ permitiendo que sean explorados sistemas de producción de hidrogeno más prácticos (Han et al., 2012).

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

4.5 Zeolitas y sus aplicaciones en la reducción de agentes contaminantes en la Combustión

El incremento de las concentraciones de los gases de efecto invernadero (GHGs) en la atmósfera es un peligro global, las actividades humanas son la mayor causa de incremento de las concentraciones de CO₂ en la atmósfera, en la reciente década dos tercios de los gases de efecto invernadero fueron causados por las actividades humanas Songolzadeh y Col.(2014). La captura y almacenamiento de carbón (CCs) es la mayor estrategia que puede ser utilizada para reducir la emisión de (GHGs), actualmente se conocen tres métodos para (CCs): captura de pre-combustión, proceso de ox-combustión, y captura de post-combustión. La captura de post-combustión es la más importante, ya que ofrece flexibilidad y puede ser fácilmente agregado a las unidades de operación, estos métodos de captura de (GHGS) utilizan varias tecnologías y algunas de estas incluyen métodos de absorción, adsorción, destilación criogénica y membrana de separación (Songolzadeh et al., 2014).

Luego del CO₂ y CH₄, la emisión de N₂O (óxido nitroso) es la tercera fuente de contaminación dentro de los gases de efecto invernadero. El N₂O tiene un potencial de contaminación de 310, es decir, en una escala de tiempo de 100 años el óxido nitroso es 310 veces más eficaz por kg en atrapar los rayos del sol en la atmosfera que el CO₂ Van den Brink y Col.(2001). Una fuente importante de N₂O es la agricultura, estas emisiones son muy difíciles de tratar debido a su difusa naturaleza. Una segunda fuente importante de N₂O se encuentra en los procesos industriales, principalmente en la producción de precursores de nylon (especialmente ácido adípico) y ácido nítrico, el cual es un producto químico clave en la industria de fertilizantes, dichas emisiones de los procesos industriales químicos se concentran predominantemente en un número limitado de grandes fuentes de óxido nitroso Van den Brink y Col. (2001). Muchos estudios se ha focalizado en la descomposición catalítica del N₂O en nitrógeno y oxígeno Kapteijin y Col. (1996). Los catalizadores utilizados son zeolitas debido a sus propiedades de intercambio de iones con Cu, Co, Fe, Rh o Ru y catalizadores soportados con Cu, Rh, Pd y Ru (Pieterse, van den Brink, Booneveld, & de Bruijn, 2004). También una de las principales fuentes generadoras de contaminantes al aire son los procesos de combustión, en ciertas áreas del país donde se concentran la mayor densidad de población y de vehículos automotores, factores atmosféricos y de altitud restan eficiencia a los procesos de combustión generando importantes emisiones contaminantes; en el caso de las industrias, la utilización de carbón con alto contenido de azufre genera importantes emisiones de material particulado, razón por la cual se hace necesario tomar medidas relacionadas con la calidad técnica y con la calidad ambiental de los combustibles (Ministerio de minas y Energía de Colombia, 2010).

Una atmósfera contaminada puede dañar la salud y calidad de vida de las personas y afectarlas condiciones de los ecosistemas de las plantas y los animales. Además, los cambios que se producen en la composición química de la atmósfera pueden cambiar el clima, producir lluvia ácida o destruir el ozono, fenómenos todos ellos de una gran importancia global (Echarri, 2007).

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

La reducción de gases de efecto invernadero y componentes de la lluvia ácida, es de vital importancia para la disminución de la contaminación ambiental. Debido a esto existen diferentes estudios donde se evalúa el rendimiento de zeolitas en la reducción agentes contaminantes, como lo demuestran Ohtsuka y Col.(1999), que presentan un estudio del efecto de vapor de agua en la desactivación de los catalizadores zeolita-Pd para la reducción catalítica selectiva de óxidos de nitrógeno por medio del metano donde se encontró que para la reducción selectiva de óxidos de nitrógeno (NOx) a través del metano, el catalizador de Modernita/Pd mostró una actividad estable en la ausencia de vapor de agua a 450°C por más de 30 min. Mientras que en presencia de vapor de agua demostró una gradual disminución en la conversión de NOx. El compuesto de ZSM-5/Pd mostró una gradual disminución en la conversión de NOx incluso en la ausencia de vapor de agua y casi pierde la actividad en 20 h en la presencia de vapor de agua. Las mediciones de adsorción de CO revelaron que el compuesto de ZSM-5/Pd probado en la presencia de agua sufrió grandes disminuciones en la dispersión de Pd. Mediciones de Raman indicaron claramente que en la muestras desactivadas se formó PdO ,estos resultados sugieren que la desactivación del compuesto de zeolita/Pd es causado Por la aglomeración de Pd y su forma resultante en PdO causada por la aglomeración debido al vapor de agua (Ohtsuka & Tabata, 1999).

Van y Col. (2001) se basaron en la propiedades catalíticas de las zeolitas para estudiar la eliminación catalítica del N₂O en un modelo de gases de combustión de una planta de ácido nítrico utilizando una zeolita con Fe promovido, usando tres método de remoción de N₂O por medio de la catálisis en la zeolita ZSM-5 con Fe promovido, se obtuvieron resultados en la descomposición catalítica y la reducción catalítica selectiva (SCR) usando propano y metano como agente reductante, la descomposición catalítica de N₂O se llevó a cabo a temperaturas sobre los 400°C y a una velocidad espacial de 10.000 h⁻¹. La adición de propano disminuye la temperatura para la conversión de N₂O en aproximadamente 100°C en la reducción catalítica selectiva (SCR) de N₂O con propano asistido las emisiones de hidrocarburos sin reaccionar son bajas y también hay reducción de NOx. El Metano es más difícil de ser activado por la catálisis, el cual causa una baja eficiencia de destrucción de N₂O y metano sin reaccionar resultante. En todos los casos se obtiene una mayor conversión de N₂O a altas presiones (van den Brink et al., 2001).

Las cenizas volantes de carbón (CFA) son un subproducto de las plantas energéticas de carbón, las cenizas de carbón son generalmente almacenadas en las centrales o en vertederos. Generalmente 1 tonelada de CFA es producida en una planta de energía a través de un consumo de 4 toneladas de carbono (2010 China Fly Ash Survey), estas CFAs toman mucho espacio y son perjudiciales para la salud debido a que contiene trazas de concentración de metales pesados y otras sustancias, por lo tanto, la efectiva utilización de las CFA ha sido un problema a nivel mundial. Usualmente, las CFA's pueden ser usada como material de construcción y de carretera como ladrillos de cenizas volantes, panel de pared y aditivo para el concreto, pero estos usos solo se aplican en un área determinada. El costo de transportación es muy alto con respecto al precio de las CFA's, entonces el CFA es dejado

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

sin ningún manejo por lo que se deben diseñar métodos de utilización de CFA's más realistas con un valor agregado (Wang et al., 2014).

Las CFA's contienen abundante Si y Al, lo que la hace una fuente disponible para la síntesis de zeolitas. Wang y Col. (2014) realizaron un estudio aprovechando las zeolitas en las CFA's para la eliminación de mercurio de gas derivado del carbón, atreves de una síntesis hidrotérmica, encontrando que la síntesis hidrotérmica supercrítica era un método factible para la formación de zeolita de CFA's debido a las propiedades de transporte de gas-líquido y muy baja tensión superficial del agua supercrítica. La temperatura de reacción óptima fue de 400 ° C y el tiempo de 5 minutos. La relación media de masas de SiO₂ / Al₂O₃ y el bajo contenido de Fe₂O₃ + CaO fueron beneficiosos para la síntesis de la zeolita de CFA en agua supercrítica. Cuando la concentración de NaOH es 2-4 mol/, es fácil formar zeolita cancrinita. Sodalita se puede producir cuando hay presencia de una gran concentración de NaOH (8 mol/l). Las zeolitas CFA sintetizados pueden ser bien utilizadas como sorbentes para la eliminación de Hg del gas de carbón simulado, en el que la sodalita y zeolitas cancrinita son los principales cristales activos y su eficacia de eliminación de Hg puede ser mantenido por encima de 75% y 60% durante al menos 450min a 100 ° C (Wang et al., 2014).

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

4.6 Zeolitas y sus aplicaciones en el mejoramiento de combustibles

A raíz del aumento de la rigurosidad en las legislaciones que regulan las emisiones de gases, los procesos de hidrotratamiento y en especial de la ultra hidrodesulfuración se observa que en la última década estos procesos han sido de interés para la protección del medio ambiente. La importancia de los procesos de hidrotratamiento en las refinerías para reducir los contenidos de azufre y cumplir con las regulaciones ambientales internacionales, se estudia de forma tangencial. Así como las nuevas formulaciones catalíticas que empleen metales de transición, soportes como carbón, dióxido de titanio y óxidos mixtos, agentes presulfurantes novedosos y la relación sulfuro de hidrogeno-hidrogeno, diferente a la comúnmente empleada (Barbosa, Vega, & De Rio Amador, 2014).

En Colombia desde el 2002 se han venido adelantando una serie de acciones con miras a lograr el mejoramiento de la calidad de los combustibles en el país, con el fin de llevar la calidad de los mismos a los más altos estándares internacionales y así contribuir con el mejoramiento de la calidad del aire y el desarrollo sostenible del país (Ministerio de minas y Energía de Colombia, 2010).

El crudo de petróleo es una sustancia basada en una mezcla compleja de hidrocarburos (HC), los cuales además de tener átomos de carbono e hidrógeno en diferente relación, también contienen elementos como azufre (S), oxígeno (O), nitrógeno (N) y metales pesados, principalmente hierro (Fe), níquel (Ni), y vanadio (V), en su estructura molecular Ramírez y Col. (2007). Los procesos de refinación permiten la separación y clasificación de estas moléculas, en cortes según el punto de ebullición, obteniéndose productos de alto valor agregado como: gas natural licuado (GNL), gasolina, diesel, jet fuel, lubricantes , ceras, entre otros (Gary, Kaiser, & Handwerk, 2007).

El consumo de petróleo a nivel mundial se incrementó de 63.12 millones de barriles por día (MMBPD) en 1980 a 88.94 MMBPD en 2012, representando un incremento del 41%. El consumo total de petróleo en Colombia alcanzó los 287.2 miles de barriles por día (MBPD) en 2012, alcanzando un incremento del 78.7% desde 1980 (160.7 MBPD) (U.S.Energy Information Administration, 2013). El hidrotratamiento (HDT) es actualmente, uno de los procesos químicos más importantes en las refinerías, debido al constante aumento en el uso de crudos pesados y la disminución gradual de los crudos ligeros. El proceso consiste en la adición de hidrógeno para inducir las reacciones de hidrogenación e hidrogenólisis, con el fin de saturar los compuestos aromáticos o remover elementos como azufre, nitrógeno y metales pesados, presentes en mayor proporción en los crudos pesados y cuyos elementos u óxidos son definidos como tóxicos en términos ambientales. Los procesos de HDT se pueden subdividir en hidrodesaromatización (HDA), hidrodesnitrógenación (HDN), hidrodesmetalización (HDM), hidrodesoxigenación (HDO) e hidrodesulfuración (HDS) dependiendo de los compuestos a saturar o elementos a remover. En la actualidad las regulaciones ambientales a nivel mundial, como la EPA-2004 y la Euro IV, definieron que los productos derivados del petróleo, en especial los combustibles fósiles utilizados en los automóviles, deben tener niveles ultra bajos de azufre, 15 partes por millón en peso (ppmp) máximo para diésel según la American Fuel & Petrochemical Manufactures (AFPM) en su publicación en línea “Diesel Sulfur” y 10 ppmp máximo para diesel y gasolina según la Directiva 2009/30/CE del

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Parlamento Europeo y del Consejo, haciendo que los objetivos principales de la industria petrolera en los procesos de HDS sean: la modernización y expansión de las unidades existentes, mejorar la calidad de crudo alimentado, incrementar las condiciones de reacción, temperatura - presión y el desarrollo de catalizadores más resistentes a los efectos desactivantes (Schacht et al., 2002).

Con el fin del mejoramiento de combustibles sea han desarrollado numerosos estudios e investigaciones, donde las zeolitas desempeñan un papel crucial en dicho proceso. En un estudio de Duan y Col. (2015) se analizó la síntesis de una nueva zeolita W y su aplicación en el catalizador para el hidromejoramiento de FCC de gasolina, demostrando que cuando la relación de zeolita W y L fue de 1:1 el catalizador exhibió los mejores rendimientos catalíticos tanto para HDS (98,2%) y la preservación octanaje (1,22 unidades de la pérdida de RON). El excelente rendimiento de desulfuración, isomerización, aromatización y preservación RON pueden atribuirse a los efectos de la sinergia de las propiedades físico-químicas de zeolita L/W la cual podría ajustar el balance de funcionalidad en la proceso de hidro-mejoramiento en FCC de gasolina. La síntesis y aplicación de nueva zeolita W proporcionarán una luz de esperanza para los procesos industriales en el futuro (Duan et al., 2015).

El proceso de (FCC) o craqueo catalítico de fluidos en la gasolina es el principal contribuyente de olefinas cuando este es aplicado en la gasolina. Tales compuestos usualmente presentan una forma inestable, la cual es fácil de oxidar por reacción fotoquímica, conduciendo a un incremento del ozono troposférico, de ahí que el equivalente en agua de los compuestos olefinicos son forzados a un valor superior límite de 18 vol.% según la regulación de Europa IV para el vehículo estándar de la gasolina sin plomo. Varios estudios sobre la hidrogenación selectiva para la reducción de olefinas han sido propuestos y algunos de ellos han sido llevados a cabo y desarrollados en operaciones a una escala piloto, sin embargo esta técnica sigue enfrentando problemas con el bajo rendimiento de la gasolina y la pérdida de octanos (RON). Kiatkittipong y Col. (2011) analizaron el mejoramiento de gasolina por auto-eterificación con etanol a través de una beta-zeolita modificada, demostrando que la zeolita beta con un relación Si/Al de 27 modificada a través de intercambio iónico con Cu muestra un rendimiento excepcional, que proporciona una alta conversión del etanol y alto consumo de olefinas 55,1 y 62,4%, respectivamente, en un caso de 20% de etanol en la alimentación. Al aumentar la fracción de etanol en la alimentación hasta un 30 vol. %, la reacción se puede seguir mejorando, la alta conversión de etanol significa que más etanol podría ser suplementado en la gasolina y habría menos etanol libre restante. Esta técnica propuesta puede efectivamente mejora la cantidad de RON sin un incremento del contenido de aromáticos (Kiatkittipong et al., 2011).

El biogás es una mezcla compuesta aproximadamente de 55-70% CH₄, 30-45% CO₂ y pequeñas cantidades de NH₃ (80-100 ppm), H₂S (1000-3000 ppm) e hidrocarburos (<100 ppm) producido en una descomposición anaeróbica de materia orgánica. Trazas de cantidades de hidrogeno (H₂), nitrógeno (N₂), monóxido de carbono (CO), carbohidratos saturados y oxígeno (O₂) están ocasionalmente presentes en el biogás, del mismo modo, la mezcla de gas es saturada con vapor de agua y dependiendo de su origen (residuos municipales que con tienen jabones y detergentes)

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

puede también contener partículas de polvo y siloxanos, por lo general en una cantidad por debajo de 100 mg/m³ (Alonso-Vicario et al., 2010).

El método común de valorización de biogás es la producción de calor y energía eléctrica, la principal desventaja de usar motores de gas o centrales térmicas de tipo bloque es la reducción de la recuperación de la energía contenida en el biogás, diferentes opciones para utilizar el biogás son la purificación hasta grado de gas natural para su uso como combustible de automóviles o un sustituto de gas natural (gas bio-natural) y la producción de hidrogeno mediante reformado para celdas de combustible, otra alternativa para la valorización del biogás es la producción de gas de síntesis para ser utilizado como la base de una plataforma para la fabricación de productos químicos valiosos. Alonso y Col. (2010) demostraron como las zeolitas intervienen y ayudan en el proceso de purificación y mejoramiento del biogás mediante adsorción a través del cambio de presión en zeolitas sintéticas y naturales, donde los resultados experimentales indican que la clinoptilolita es la mejor elección de material, ya que es a la vez adecuado tanto para la purificación y el mejoramiento del biogás. La alta capacidad de adsorción de CO₂ observada (173,9 mg CO₂/g Clinoptilolita) hace posible el ajuste de la relación de CH₄/CO₂ en el biogás. Además, clinoptilolita es completamente regenerable y estable a través de varios ciclos de adsorción-desorción que junto con su abundancia y bajo costo hacen que este proceso altamente atractivo desde el punto económico. Finalmente, este estudio demuestra la importancia de la selección del método de activación óptima de zeolitas naturales a fin de compensar composición variable y de baja pureza a menudo responsables de rendimiento de separación más pobre en comparación con las zeolitas sintéticas (Alonso-Vicario et al., 2010).

En la última década, los requisitos para la concentración de las sustancias nocivas en los gases de escape en motores de gasolina y diesel se siguen haciendo más estrictos. Esta tendencia conduce a estrictos requerimientos para la calidad del combustible para motores de combustión interna. De acuerdo con la directiva de la Unión Europea a partir desde el 2010 el combustible diesel en Europa no debería contener más de 50 ppm de azufre (ultra bajo contenido de azufre-diesel-ULSD, EURO-V) y no más del 10% de sustancias aromáticas. De acuerdo con las regulaciones de U.S las concentraciones de sulfuro en el diesel no deben exceder 15 ppm a partir de junio del 2006. Todo el combustible diesel producido en Rusia debe cumplir los estándares de EURO-IV desde el 2010.

Ismagilov y Col. (2009) demuestran en un estudio sobre desulfuración profunda de los combustibles diesel, a través de un catalizador de zeolita Pt monolítica nanoestructurada bifuncional. Confirmando una vez más que las zeolitas Pt son catalizadores muy activos para la hidrosulfuración de tiofeno y la hidrogenación de benceno con alta tolerancia al azufre. El catalizador zeolita-Pt demostró una alta eficiencia en la desulfuración ultra profundas de la DLCO. El buen comportamiento del catalizador se puede explicar por la arquitectura de espacio favorable de los poros, la ubicación y el estado de los grupos de Pt. El catalizador tiene dos tipos de poros bien conectados (micro y meso, macro). Como ya se ha mencionado antes, la ultra-profunda desulfuración de los combustibles para el transporte ha ganado mucha atención en todo el mundo

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

desde que el gobierno encomendó especificaciones estrictas para el azufre en los aceites combustibles debido al daño causado al medio ambiente.

En China, las refinerías requieren reducir el nivel de azufre en el diesel y la gasolina a menos de 15 ppm para el año 2010. Los intereses en la ultra baja desulfuración de combustibles son también conducidos por las aplicaciones de las celdas de combustible. El proceso de hidrodesulfuración (HDS) es muy eficaz en la eliminación de compuestos que contienen azufre de los combustibles, el cual ha estado disponible a nivel mundial. En su proceso, se requieren importantes condiciones de operación, tales como alta temperatura, alta presión, y un alto consumo de hidrogeno para conseguir la desulfuración de combustibles. Actualmente, las especificaciones de ultra bajo contenido de azufre de los combustibles implican que cada vez mas de los refractarios de “azufre duro” necesiten ser convertidos (Gong, Dou, Kang, Li, & Hu, 2009).

Siendo este proceso uno más donde las zeolitas encuentran un rol, Gong y Col.(2009) mostraron que tan efectiva es una desulfuración profunda de la gasolina usando zeolitas de intercambio iónico: Cu (I) - y beta Ag (I) , demostrando que las propiedades físico-químicas de los absorbentes obtenidos mostraron que la cristalinidad, el área superficial BET y el volumen de poro disminuyeron con el incremento de los cationes de metal intercambiados en la estructura, la relación optimizada de SiO₂/AlO₃ de la zeolita beta fue de 10-30 lo que afectó el rendimiento de desulfuración. Excepto para la complejación π-, la capacidad de desulfuración depende de una serie de factores tales como la interacción ácido-base, especialmente acides de Lewis sobre el marco y las propiedades de textura de la zeolita. Para la adsorción modelo de gasolina, se encontró que la capacidad de avance de la zeolita Cu (I) - y la zeolita beta Ag (I) es 0,239 mmol S / g y 0,237 mmol S / g, respectivamente. Los adsorbentes se regeneran bien y la capacidad de avance después de 9 veces que se regeneró básicamente mantiene un poco de reducción por debajo de 5%, causado principalmente por la primera regeneración. Para la gasolina real, la capacidad de desulfuración se reduce en aproximadamente 30% en comparación con la del modelo de gasolina utilizado, debido a la adsorción competitiva de compuestos de tiofeno e hidrocarburos insaturados en la gasolina real. Generalmente, las zeolitas beta Cu (I) - y Ag (I) podrían ser adsorbentes alternativos para la desulfuración profunda de la gasolina en condiciones ambientales. La mejora adicional de la capacidad de adsorción de azufre y selectividad podría ser el punto clave que conduce a la aplicación de este enfoque para la desulfuración profunda para la gasolina real (Gong et al., 2009).

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

5. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO

- Con el fin de demostrar el potencial energético de las zeolitas en aplicaciones como la refrigeración por adsorción, celdas de combustible, reducción de contaminantes y mejoramiento de combustibles se recopiló información que se encuentra bastante disgregada en las bases de datos. Con estos textos se demostró que las zeolitas son un material promisorio, ya que en cada aplicación consultada la zeolita tiene un rol crucial como catalizador, material adsorbente o filtro de agentes contaminantes, entre otras; como lo demuestran Cindrella y Col. en el 2009, que según sus hallazgos confirman que las zeolitas son un material prometedor y fascinante para el almacenamiento de energía, aplicaciones en bombas de calor y refrigeración solar, ya que permiten la adsorción de gases y la encapsulación de hidratos de sal sin perder su integridad y entramado básico. También se muestran otras aplicaciones importantes como en el caso de las celdas de combustibles donde las zeolitas resultaron ser un material catalizador prometedor para la limpieza de CO y presenta grandes impactos para las aplicaciones de las PEFC en vehículos eléctricos o sistemas de cogeneración residenciales. El uso de zeolitas en el campo de reducción de contaminantes también es exitoso ya que debido a su constitución física porosa y a sus propiedades de adsorción son utilizadas como sorbentes para la eliminación de Hg manteniendo una alta eficiencia. En otros campos como en el mejoramiento de combustibles las zeolitas ofrecen una gran capacidad de adsorción de azufre y selectividad lo que la hace un material clave para la desulfuración de combustibles. Es recomendable hacer una mayor indagación acerca del estado actual de los estudios científicos sobre las zeolitas en Colombia, ya que para este ejercicio la información encontrada para el tema fue escasa.
- A raíz de la anterior revisión bibliográfica se ofrece un cúmulo de artículos de corte científico que aportan información importante y detallada sobre las propiedades y su potencial energético de las zeolitas. Se aporta así un texto de revisión científica de actualidad en español que contribuye una información seleccionada acerca de un mineral de gran interés. Por lo tanto este trabajo aporta un texto al alcance de la comunidad estudiantil cuyo campo de estudios estén relacionados con la eliminación de agentes de contaminantes, celdas de combustible, refrigeración por adsorción y mejoramiento de combustibles. También se ofrece una tabla donde se resumen múltiples resultados de investigación en las diferentes aplicaciones energéticas;

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

siento una útil para la consulta ya que sintetiza los hallazgos expuestos en los artículos científicos sobre zeolitas.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

6. REFERENCIAS

- Acuña Garrido, F., & Yi, V. M. (2001). celdas de combustible: una alternativa amigable con el medio ambiente para la generación e potencia y su impacto en el desarrollo sostenible de Colombia en el siglo XXI. *Ingeniería Y Desarrollo, Universidad de Norte*.
- Ahmad, M. I., Zaidi, S. M. J., Rahman, S. U., & Ahmed, S. (2006). Synthesis and proton conductivity of heteropolyacids loaded Y-zeolite as solid proton conductors for fuel cell applications. *Microporous and Mesoporous Materials*, 91(1–3), 296–304. <http://doi.org/10.1016/j.micromeso.2005.10.029>
- Alonso-Vicario, A., Ochoa-Gómez, J. R., Gil-Río, S., Gómez-Jiménez-Aberasturi, O., Ramírez-López, C. A., Torrecilla-Soria, J., & Domínguez, A. (2010). Purification and upgrading of biogas by pressure swing adsorption on synthetic and natural zeolites. *Microporous and Mesoporous Materials*, 134(1–3), 100–107. <http://doi.org/10.1016/j.micromeso.2010.05.014>
- Armbruster, T., & Gunter, M. . (2001). Crystal structure of natural zeolites: Occurrence, Properties, Applications. In D. . Bish & D. . Ming (Eds.), *Reviews in Mineralogy and Geochemistry* (45th ed., pp. 1–67). Washington, D.C: Mineralogical Society of America.
- Barbosa, A. L., Vega, A. F., & De Rio Amador, E. (2014). Hidrodesulfuración de crudos de petróleo :base para el mejoramiento de combustibles. Una revisión, 5(3), 37–60.
- Barrer, R. M. (1983). Journal of Molecular Structure. *Journal of Molecular Structure*, 99(3–4), 318.
- Bosh, P., & Shifter, I. (1997). *La zeolita una piedra que hierve*. Retrieved from http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen1/ciencia2/55/htm/sec_1.html
- Breck, D. W. (1974). *Zeolite Molecular Sieves: Structure, Chemistry and Use*. (J. Wiley, Ed.) (1st ed.). New York.
- Cindrella, L., & Dyer, A. (2009). Ion-exchanged and salt hydrates-encapsulated zeolites for solar refrigeration. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 93(2), 161–166. <http://doi.org/10.1016/j.solmat.2008.09.057>
- Colella, C. (2005). Natural zeolites. In *Studies in Surface Science and Catalysis* (Vol. 157, pp. 13–40). [http://doi.org/10.1016/S0167-2991\(05\)80004-7](http://doi.org/10.1016/S0167-2991(05)80004-7)
- Cortés Correa, F. B. (2009). *Adsorción de agua en materiales compuestos y en zeolitas*. Universidad nacional de colombia.
- Cundy, C. S. (2005). Synthesis of zeolites and zeotypes. In *Studies in Surface Science and Catalysis* (Vol. 157, pp. 65–90). [http://doi.org/10.1016/S0167-2991\(05\)80006-0](http://doi.org/10.1016/S0167-2991(05)80006-0)
- Demuth, T., Benco, L., Hafner, J., & Toulhoat, H. (2000). Adsorption of water in mordenite An ab initio study. *International Journal of Quantum Chemistry*, 84(1), 110–116. <http://doi.org/10.1002/qua.1312>
- Devrim, Y., & Albostan, A. (2015). Enhancement of PEM fuel cell performance at higher

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

temperatures and lower humidities by high performance membrane electrode assembly based on Nafion/zeolite membrane. *International Journal of Hydrogen Energy*. <http://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.02.078>

Duan, A., Li, T., Niu, H., Yang, X., Wang, Z., Zhao, Z., ... Pan, H. (2015). Synthesis of a novel zeolite W and application in the catalyst for FCC gasoline hydro-upgrading. *Catalysis Today*, 245, 163–171. <http://doi.org/10.1016/j.cattod.2014.05.030>

Echarri, L. (2007). Contaminación de la atmósfera. *Población, Ecología Y Ambiente-Universidad de Navarra*, 22.

Energia, M. de minas y. (2010). Mejoramiento de la calidad de los combustibles en el país. Retrieved May 15, 2015, from <http://www.minminas.gov.co/documents/10180/486365/CALIDAD+DE+COMBUSTIBLES.pdf/1d7c32b6-e4ec-48a4-be15-b0d7c3bfc594>

Escobar, M. (2013). Zeolita, mineral promisorio que el país podría explotar. *UN Periodico*, 172. Retrieved from <http://www.unperiodico.unal.edu.co/en/dper/article/zeolita-mineral-promisorio-que-el-pais-podria-explotar.html>

Flanigen, E. M. (2001). Chapter 2 Zeolites and molecular sieves: An historical perspective. *Studies in Surface Science and Catalysis*, 137, 11–35. [http://doi.org/10.1016/S0167-2991\(01\)80243-3](http://doi.org/10.1016/S0167-2991(01)80243-3)

Francesconi, J. A., Laborde, M. A., Borio, D. O., & Marozzi, C. A. (2008). Modelado, Síntesis y Optimización del Proceso de Reformado de Bioetanol para la Producción de Hidrógeno Grado PEM.

Gary, J. ., Kaiser, M. ., & Handwerk, G. . (2007). *Petroleum Refining: Technology and Economics* (5th ed.). CRC Press.

Gelves, J. F., Gallego, G. S., & Marquez, M. A. (2016). Mineralogical characterization of zeolites present on basaltic rocks from Combia geological formation, La Pintada (Colombia). *Microporous and Mesoporous Materials*, 235, 9–19. <http://doi.org/10.1016/j.micromeso.2016.07.035>

Gong, Y., Dou, T., Kang, S., Li, Q., & Hu, Y. (2009). Deep desulfurization of gasoline using ion-exchange zeolites: Cu(I)- and Ag(I)-beta. *Fuel Processing Technology*, 90(1), 122–129. <http://doi.org/10.1016/j.fuproc.2008.08.003>

Han, W., Kwan, S. M., & Yeung, K. L. (2012). Zeolite applications in fuel cells: Water management and proton conductivity. *Chemical Engineering Journal*, 187, 367–371. <http://doi.org/10.1016/j.cej.2012.01.102>

Hu, P., Yao, J.-J., & Chen, Z.-S. (2009). Analysis for composite zeolite/foam aluminum–water mass recovery adsorption refrigeration system driven by engine exhaust heat. *Energy Conversion and Management*, 50(2), 255–261. <http://doi.org/10.1016/j.enconman.2008.09.022>

Ismagilov, Z. R., Yashnik, S. A., Startsev, A. N., Boronin, A. I., Stadnichenko, A. I., Kriventsov, V. V., ... Moulijn, J. A. (2009). Deep desulphurization of diesel fuels on bifunctional monolithic

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

- nanostructured Pt-zeolite catalysts. *Catalysis Today*, 144(3–4), 235–250. <http://doi.org/10.1016/j.cattod.2009.01.030>
- Jänchen, J., Ackermann, D., Weiler, E., Stach, H., & Brösicke, W. (2004). Thermochemical Storage of Low Temperature Heat By Zeolites ; Sapó ' S and Impregnated Active Carbon. *October*, (October), 8–12.
- Jentys, A., & Lercher, J. A. (2001). Chapter 8 Techniques of zeolite characterization. *Studies in Surface Science and Catalysis*, 137, 345–386. [http://doi.org/10.1016/S0167-2991\(01\)80250-0](http://doi.org/10.1016/S0167-2991(01)80250-0)
- Jorge, C. (2014). Tectosilicatos con características especiales: Las zeolitas naturales. madrid: Fundacion Gomez-Pardo.
- Kapteijn, F., Rodriguez-Mirasol, J., & Moulijn, J. A. (1996). Heterogeneous catalytic decomposition of nitrous oxide. *Applied Catalysis B: Environmental*, 9(1–4), 25–64. [http://doi.org/10.1016/0926-3373\(96\)90072-7](http://doi.org/10.1016/0926-3373(96)90072-7)
- Kiatkittipong, W., Wongsakulphasatch, S., Tintan, N., Laosiripojana, N., Praserttham, P., & Assabumrungrat, S. (2011). Gasoline upgrading by self-etherification with ethanol on modified beta-zeolite. *Fuel Processing Technology*, 92(10), 1999–2004. <http://doi.org/10.1016/j.fuproc.2011.05.024>
- Lee, E., Kim, J. H., Whang, D., & Kim, K. (2001). Angew.Chem. *Angew.Chem Int*, 113(40), 399–402.
- Lenntech BV. (2016). Aplicaciones de las Zeolitas. Retrieved from <http://www.lenntech.es/zeolitas-aplicaciones.htm>
- Leofanti, G., Tozzola, G., Padovan, M., Petrini, G., Bordiga, S., & Zecchina, A. (1997). Catalyst characterization: characterization techniques. *Catalysis Today*, 34, 307–327.
- Lin, L., Wang, A., Zhang, L., Dong, M., & Zhang, Y. (2012). Novel mixed matrix membranes for sulfur removal and for fuel cell applications. *Journal of Power Sources*, 220, 138–146. <http://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2012.07.086>
- Lin, L., Zhang, Y., Zhang, H., & Lu, F. (2011). Adsorption and solvent desorption behavior of ion-exchanged modified Y zeolites for sulfur removal and for fuel cell applications. *Journal of Colloid and Interface Science*, 360(2), 753–9. <http://doi.org/10.1016/j.jcis.2011.04.075>
- Löwenstein, W. (1954). *the distribution of aluminum in the tetrahedra of silicate and aluminates* (39th ed.).
- Lu, Y. Z., Wang, R. Z., Zhang, M., & Jiangzhou, S. (2003). Adsorption cold storage system with zeolite–water working pair used for locomotive air conditioning. *Energy Conversion and Management*, 44(10), 1733–1743. [http://doi.org/10.1016/S0196-8904\(02\)00169-3](http://doi.org/10.1016/S0196-8904(02)00169-3)
- Meier, W. M. (1968). Zeolites structures. In *Molecular Sieves* (pp. 10–27). london: Society of Chemical Industry.
- Meier, W. M., Olson, D., & Baerlocher, C. (1996). *Atlas of zeolite structure types* (4th ed.). london: Elsevier.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

- Morell, I. (2001). Procesos de adsorción. Retrieved from <http://www.agua.uji.es/hq/lecciones07.html>
- Mumpton, F. A. (1999). La roca mágica: Uses of natural zeolites in agriculture and industry, *96*, 3463–3470.
- Ohtsuka, H., & Tabata, T. (1999). Effect of water vapor on the deactivation of Pd-zeolite catalysts for selective catalytic reduction of nitrogen monoxide by methane. *Applied Catalysis B: Environmental*, *21*(2), 133–139. [http://doi.org/10.1016/S0926-3373\(99\)00014-4](http://doi.org/10.1016/S0926-3373(99)00014-4)
- Pelayo Alvarado, I. (2011). Síntesis y Caracterización de un Nuevo Material Micro Poroso Derivado del Ácido 4-Aminobenzoico y Bromhidrato de 4 - Bromometilpiridina, *90*.
- Pieterse, J. A. Z., van den Brink, R. W., Booneveld, S., & de Bruijn, F. A. (2004). *Recent Advances in the Science and Technology of Zeolites and Related Materials, Proceedings of the 14th International Zeolite Conference. Studies in Surface Science and Catalysis* (Vol. 154). Elsevier. [http://doi.org/10.1016/S0167-2991\(04\)80519-6](http://doi.org/10.1016/S0167-2991(04)80519-6)
- Ramírez-corredeores, M. ., & Abhijeet, P. . (2007). Chapter 2 Conventional refining processes. In M. . Ramírez-corredeores & P. . Abhijeet (Eds.), *Studies in Surface Science and Catalysis* (pp. 9–63). United States: Elsevier.
- Ried, E., & Flores, M. (2013). celdas de combustible y sus aplicaciones. Retrieved from <http://servicios.ried.cl/ondas/2/>
- Schacht, P., Hernandez, G., Cedeño, L., Mendoza, J. H., Ramirez, S., Garcia, L., & Ancheyta, J. (2002). Hydrodesulfurization Activity of CoMo Catalysts Supported on Stabilized TiO₂. In *Energy & Fuels* (1st ed., pp. 81–86). Ciudad de México.
- Servin R, J. L. (2011). Metalurgia de Minerales No Metálicos, Zeolitas. Retrieved from <http://e-ciencia.com/recursos/monografias/quimica/metalurgia-de-minerales-no-metalicos-zeolitas.html>
- Shaikh, T., & Morabiya, Y. J. (2013). REVIEW OF SOLAR ABSORPTION REFRIGERATION SYSTEM USING LiBr-WATER AND SIMULATE THE Address for Correspondence. *International Journal of Advanced Engineering Research and Studies*, *II*(E-ISSN2249–8974), 57–60.
- Songolzadeh, M., Soleimani, M., Takht Ravanchi, M., & Songolzadeh, R. (2014). Carbon dioxide separation from flue gases: A technological review emphasizing reduction in greenhouse gas emissions. *The Scientific World Journal*, *2014*(Figure 1). <http://doi.org/10.1155/2014/828131>
- St. Claire Deville, H. (1962). Comptes Rendus des Séances de l'Académie des Sciences. *Compt. Rend. Hebd. Séances Acad. Sci.*, *54*, 324.
- U.S., (Energy Information Administration). (2013). International energy statistics. Retrieved from <http://www.eia.gov/cfapps/ipdbproject/iedindex3.cfm?tid=5&pid=5&aid=2&cid=ww,&syid=1980&eyid=2012>
- Valencia D, B., Giraldo O, G., & Veléz, N. (1989). *Estudio sobre zeolitas*. Medellín.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

- van den Brink, R. ., Booneveld, S., Pels, J. ., Bakker, D. ., & Verhaak, M. J. F. . (2001). Catalytic removal of N₂O in model flue gases of a nitric acid plant using a promoted Fe zeolite. *Applied Catalysis B: Environmental*, 32(1–2), 73–81. [http://doi.org/10.1016/S0926-3373\(00\)00294-0](http://doi.org/10.1016/S0926-3373(00)00294-0)
- Villaquirán-Caicedo, M. A., Mejía-De Gutiérrez, R., Gordillo-Suárez, M., & Constanza-Gallego, N. (2016). Producción de zeolitas de baja sílice a partir de caolín colombiano. *Ingeniería, Investigación Y Tecnología*, 17(1), 109–118. <http://doi.org/10.1016/j.riit.2016.01.010>
- Wang, J., Li, D., Ju, F., Han, L., Chang, L., & Bao, W. (2014). Supercritical hydrothermal synthesis of zeolites from coal fly ash for mercury removal from coal derived gas. *Fuel Processing Technology*. <http://doi.org/10.1016/j.fuproc.2014.10.020>
- Watanabe, M., Uchida, H., Ohkubo, K., & Igarashi, H. (2003). Hydrogen purification for fuel cells: selective oxidation of carbon monoxide on Pt–Fe/zeolite catalysts. *Applied Catalysis B: Environmental*, 46(3), 595–600. [http://doi.org/10.1016/S0926-3373\(03\)00322-9](http://doi.org/10.1016/S0926-3373(03)00322-9)
- Weitkamp, J., & Puppe, L. (1999). *Catalysis and zeolites : fundamentals and applications*.
- Wilson, S. T., Lock, B. M., Messina, C. A., Cannan, T. R., & Flanigen, E. M. (1982). Journal of the American Chemical Society. *Journal of the American Chemical Society*, (104), 114.
- Woodford, C. (2009). Zeolites. Retrieved from <http://www.explainthatstuff.com/zeolites.html>
- Wu, W.-D., Zhang, H., & Men, C. (2011). Performance of a modified zeolite 13X-water adsorptive cooling module powered by exhaust waste heat. *International Journal of Thermal Sciences*, 50(10), 2042–2049. <http://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2011.05.005>
- Yu, J. (2007). Chapter 3 – Synthesis of Zeolites. In *Studies in Surface Science and Catalysis* (Vol. 168, pp. 39–103). [http://doi.org/10.1016/S0167-2991\(07\)80791-9](http://doi.org/10.1016/S0167-2991(07)80791-9)

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

7. APÉNDICE

Apéndice 1

Esta tabla contiene las fuentes consultas para la realización de este trabajo 100 articulo científicos acerca de las sus propiedades de las zeolitas y sus aplicaciones en el campo energético, en la cual se mencionan brevemente el tipo de zeolitas usados los resultados obtenidos durante el estudio y la aplicación energética.

#	Referencia	Aplicación	Tipo de zeolita	Resultados
1	(Susanto, Nasikin, & Wiyo, 2014)	Mejoramiento de combustibles	clinoptilolita	El porcentaje promedio de masa de compuesto oxigenado en el producto fue de menos de 50%.
2	(Jianqing Li, Pengjie Miao, Zhuo Li, Tao He, Dezhi Han†, Jingli Wu, Zhiqi Wang, 2014)	conversión y gestión de la energía	ZSM-5	Condujo a una menor concentración de compuestos aromáticos y un mayor contenido isoparafina en los productos de gasolina
3	(Duan et al., 2015)	Mejoramiento de combustibles	Zeolita W	Condujo al mejoramiento del rendimiento de desulfuración, isomerización, aromatización y presentación RON.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

4	(P. Wang, Shen, & Gao, 2007)	Mejoramiento de combustibles	MAZ/ZSM-5	El catalizador mostró una evidente actividad catalítica en la aromatización del proceso de FCC de gasolina.
5	(Kiatkittipong et al., 2011)	Mejoramiento de combustibles	Beta-zeolita	La zeolita beta mostró un rendimiento excepcional; que proporciona una alta conversión del etanol y alto consumo de olefina
6	(Ahmadpour & Taghizadeh, 2015)	Combustibles renovables	ZSM-5	La zeolia ZSM-5 mostró una mejora significativa en la vida útil del catalizador y un aumento relativo en selectividad del propileno.
7	(Hanaoka, Miyazawa, Shimura, & Hirata, 2015)	Combustibles renovables	Zeolita cargada con Pt.	Condujo a un rendimiento máximo de combustible.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

8	(Taufiqurrahmi, Mohamed, & Bhatia, 2011)	combustibles renovables	Zeolita Y nanocristalina.	La zeolita Y dio el mayor rendimiento de fracción de gasolina.
9	(Feyzi & Khajavi, 2014)	Biocombustibles	ZSM-5/Sr ZSM-5/Ba-Sr	Se logró un rendimiento máximo de biodiesel de 87.7%.
10	(Susanto et al., 2014)	Combustibles renovables	Zeolita clinoptilolita	Se logró obtener con éxito una conversión de ácido oleico a diésel renovable con bastante similitud a un diésel estándar.
11		Biocombustibles		

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

	(Y.-Y. Wang, Wang, Chuang, Chen, & Lee, 2014)		Zeolita MCM-22 y Zeolita Beta	La catálisis de la zeolita beta aumento la transesterificación.
12	(H. Wu, Zhang, Wei, Zheng, & Zhang, 2013)	Biocombustibles	zeolita YNa, zeolita KL y zeolita ZSM-5/Na	El catalizador parece prometedor para producción de biodiesel.
13	(Ahmad et al., 2014)	Biocombustibles	CZA-Z	Se presentó una alta deshidratación de metanol y alta selectividad.
14	(Liu, Li, & Hao, 2010)	Mejoramiento de combustibles	SnO ₂ / Al ₂ O ₃	El catalizador presentó una alta actividad de reducción debido a su alta de área de superficie y fuerte interacción.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

15	(Ito et al., 1995)	Mejoramiento de combustibles	ZSM-5 y modernita	La zeolita utilizada en este estudio parece ser de una gran capacidad de adsorción de HN3.
16	(Burch & Millington, 1996)	Reducción de agentes contaminantes	Cu-ZSM-5	Los catalizadores de sílice soportada sin más activos que los materiales basados en alúmina.
17	(Ohtsuka & Tabata, 1999)	Reducción de agentes contaminantes	zeolita con Pd	Mostraron una actividad estable en ausencia de vapor de agua a 450°C durante más de 30 h, mientras que mostró una disminución gradual en la conversión de NOx en la presencia de vapor de agua.
18	(Xu, McCabe, & Hammerle, 2002)	Reducción de agentes contaminantes.	Cu-zeolita catalizador	Los catalizadores desactivados mostraron una disminución en la cantidad de adsorción de CO y el grado de la disminución de la cantidad de adsorción de CO.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

19	(Myrdal & Kolboe, 1989)	Reducción de agentes contaminantes	zeolita NaX (Linde 13-X)	El catalizador muestra una elevada actividad catalítica y selectividad para la reducción de NO.
20	(Čapek, Novoveská, Sobalík, & Wichterlová, 2005)	Reducción de agentes contaminantes	Zeolita Ag-ZSM-5, Cu, Co, Fe.	Zeolita reveló diferencias sustanciales entre las especies adsorbidas de propano, por un lado, y el propano o el octano, por otro lado mientras fue usado en SCR-NO.
21	(Zhang, He, Liu, Fan, & Li, 2007)	Reducción de agentes contaminantes	zeolita conmpuesta CoH-FBZ	Las especies -NOy se adsorbieron de manera más estable en los sitios de Co y con el posiblemente CH4 activado bajo las condiciones de reacción, induciendo la formación de intermedios activos que mejoran la actividad catalítica del SCR de CH4.
22	(Song et al., 2013)		Zeolita NaY	Los resultados indican que CuIcElVY no sólo tiene una

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

		Reducción de agentes contaminantes		capacidad de adsorción de azufre similares a Cu Y sino que también tiene una alta selectividad para los compuestos de azufre similares a CeIVY.
23	(Xue, Meng, Wei, Nakaso, & Fukai, 2014)	Combustibles renovables	Zeolite 13X	Los resultados numéricos demuestran que el proceso de precalentamiento con vapor de agua a baja temperatura es un método eficaz para alcanzar el equilibrio local de forma rápida.
24	(Alonso-Vicario et al., 2010)	Mejoramiento de combustibles	Zeolita 5A y 13X	Los resultados experimentales indican que la clinoptilolita es la mejor elección de material, ya que es a la vez adecuado tanto para la purificación y la mejora de biogás.
25	(Milina, Mitchell, & Pérez-Ramírez, 2014)	Mejoramiento de combustibles	Ferrierita (FER), ZSM-5 (IMF), mordenita (MOR), beta (BEA), y (FAU) zeolitas de faujasita	Los beneficios de introducir mesoporosidad secundario a través de desmetalización en medios alcalinos son notables por medio de poro ZSM-5 debido a las limitaciones de difusión aliviadas, mientras que el rendimiento mejorado de faujasita jerárquica es menos pronunciada, pero todavía apreciable.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

26	(Junaid et al., 2012)	Introducción de agentes contaminantes	Zeolita natural (NZ)	Estos catalizadores ofrecen ventajas económicas y operativas significativas sobre las técnicas de mejoramiento de térmicas convencionales.
27	(Lin, Zhang, Zhang, & Lu, 2011)	Celdas de combustible	Zeolita NaY	Las isothermas de adsorción y las imágenes tomadas por simulación desde el ordenador de densidad de distribución confirmaron la adsorción competitiva entre tiofeno y n-heptano.
28	(Rosso, Galletti, Saracco, Garrone, & Specchia, 2004)	Celdas de combustible	Zeolitas tipo A con diferentes tamaños de poro	Los catalizadores soportados Ru y Pd no llegaron a una conversión completa, mientras que los catalizadores con Pt mostraron el mayor CO-conversión y selectividad.
29	(Lee, Ko, Lee, Kim, & Park, 2008)	Celdas de combustible	Zeolitas AgNa-Y	THT adsorbido en sitios Na + con resistencia suficientemente alta absorción, por lo que una introducción de Ag + en sitios de Na-Y a través de intercambio catiónico se tradujo en un aumento neto en el avance de captación de THT.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

30	(Lin, Wang, Zhang, Dong, & Zhang, 2012)	Celdas de combustible	Zeolita NaY	Los resultados muestran que las zeolitas funcionales se incorporan en la red tridimensional y la capacidad de adsorción de MMMs llega a 8,6 y 9,5 mg g ⁻¹ S para las especies de tiofeno y dibenzotiofeno, respectivamente.
31	(Wu, Zhang, & Men, 2011)	Refrigeración por adsorción	Zeolita 13X	Se demostró que, como un sistema de refrigeración diminuto, el módulo de refrigeración de adsorción presentado tiene un buen rendimiento, y tiene las ventajas de la estructura simple, ausencia de partes en movimiento o el control de válvulas, que incorpora condensador / evaporador, buen sellado, etc.
32	(Zhong, Critoph, & Thorpe, 2006)	Refrigeración por adsorción	gel de sílice, MD263 y sílice HPV, y zeolita, que incluía zeolita 3A, 4A, 13X y NA-Y	Las mediciones de las características de porosidad muestran que dióxido de carbono se adsorbe bien por una amplia gama de adsorbentes.
33	(Cindrella & Dyer, 2009)	Refrigeración por adsorción	Zeolita 4A, zeolita X y zeolita Y.	Los resultados ponen de manifiesto la idoneidad mejorada de las zeolitas de sal

				encapsulada para la refrigeración solar.
34	(Hu, Yao, & Chen, 2009)	Refrigeración por adsorción	Zeolita 13x y zeolita/ aluminio espuma	El compuesto de zeolita / espuma de aluminio puede mejorar los valores de COP y SCP en gran medida en el tiempo de ciclo corto en comparación con zeolita.
35	(M. I. Ahmad, Zaidi, Rahman, & Ahmed, 2006)	Celdas de combustible	Zeolita Y CT-417 (forma H)	Dado que la conductividad en la presencia de agua se encontró que era excepcionalmente alta, estos nuevos conductores de protones sólidos se pueden utilizar en el desarrollo de membranas conductoras de protones para PEMFC especialmente para células de combustible de metanol directo.
36	(Samant & Fernandes, 2004)	Celdas de combustible	Zeolita HY	Los catalizadores sintetizados exhibieron con apoyo de zeolita HY una mejoría significativamente de la actividad electro catalítica.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

37	(Jingtao Wang et al., 2008)	Celdas de combustibles	Zeolita 3A,4A,5A,13X,Modernita, HZSM-5	La relación Si / Al de la zeolita significativamente influyó las características de volumen libre de CS en las membranas híbridas. La permeabilidad al metanol de la membrana híbrida se redujo con el incremento del tamaño de partícula de zeolita, más probablemente debido al aumento de la resistencia a la difusión.
38	(Eguizábal, Lemus, & Pina, 2013).	Celdas de combustibles	NH4BEA y NaY	Los resultados muestran que estas membranas sobre la base de cuatro componentes (H3PO4, PBI, NaY, IL3) son muy prometedores para su uso en HTPEMFC (intercambio de protones de membrana a alta temperatura)
39	(Han, Kwan, & Yeung, 2012)	Celdas de combustible	HZSM-5	Hemos demostrado con éxito que es posible a través de confinamiento para lograr un rendimiento mejorado PEMFC incluso bajo condiciones de funcionamiento duras, simultáneamente fortalecer la membrana y reducir la cantidad de PFSA en el compuesto de la membrana.
40	(Lin et al., 2014)	Celdas de combustible	HZSM-5	Las zeolitas comerciales y catalizadores Cu / ZnO / Al2O3 eran adecuados para el reformado con vapor de DME.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

41	(Devrim & Albostan, 2015)	Celdas de combustible	Zeolita(SiO ₂ /Al ₂ O ₃ =52)	En este estudio las membranas compuestas Nafion / zeolita muestran el aumento de la absorción de agua y de las propiedades conductividad de protones debido a las propiedades de retención de agua de la zeolita y la interacción entre el polímero Nafion y partículas de zeolita.
42	(Bhandari et al., 2006)	Reducción de agentes contaminantes	Zeolitas Na-Y	Los resultados con el modelo de diesel que contiene los compuestos de azufre refractario importante, tales como benzotiofeno, dibenzotiofeno y dibenzotiofeno 4,6-dimetil han demostrado una alta capacidad de desulfuración de la orden de azufre 42 mg por gramo de adsorbente.
43	(Ismagilov et al., 2009)	Mejoramiento de combustibles	Zeolita ZSM-5 Pt	Las zeolitas-Pt son catalizadores muy activos para la hidrosulfuración de tiofeno y la hidrogenación de benceno con alta tolerancia al azufre.
44	(Nasir Uddin, Wan Daud, & Abbas, 2015)	Biocombustibles	Zeolita Y	Un rendimiento máximo de carbono de 614,25 y 157,54 gc / INB se obtuvo después de final de la reacción completa a 600° C, con 30 y 15% de catalizador Ni

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

				/ zeolita, respectivamente. Los aumentos iniciales de descomposición del metano de tasas con VHSV y tiene un reverso y relevancia no lineal con el peso de Ni / Y catalizador de zeolita.
45	(Gong, Dou, Kang, Li, & Hu, 2009)	Mejoramiento de combustibles	Zeolita Beta	Zeolitas beta podrían ser adsorbentes alternativos para la desulfuración profunda de la gasolina en condiciones ambientales.
46	(King & Li, 2006)	Mejoramiento de combustibles	Zeolita Y	Hemos observado que la zeolita Y Cu (I) es eficaz en la eliminación de tiofeno de iso-octano, el rendimiento de adsorción sin embargo la presencia de olefina añadido y compuestos aromáticos resultó en significativamente comprometida en nuestras pruebas de adsorción por lotes.
47	(Hernández-Maldonado, Yang, Qi, & Yang, 2005)	Mejoramiento de combustibles	Zeolita H-Y, zeolita 13-X	Las zeolitas Y Cu (I) deben ser activadas bajo de humedad libre y condiciones libres de oxígeno para evitar la re-oxidación de las especies cuproso y, por lo tanto, maximizar la capacidad de desulfuración. Para Ni (II) - y Zn (II) -zeolitas, sin embargo, las especies catiónicas son bastante estables simplificar el proceso general de desulfuración.
48			Zeolita A, Zeolita X,	

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

	(Igarashi, Uchida, Suzuki, Sasaki, & Watanabe, 1997)	Mejoramiento de combustibles		Los catalizadores de zeolita Pt soportados-propuestos pueden oxidar monóxido de carbono mucho más selectivamente en un gran exceso de hidrógeno con la adición de una baja concentración de oxígeno de un catalizador convencional soportado sobre alúmina-Pt.
49	(Coker, Steen, & Miller, 2007)	Celdas de combustible	Zeolita X	Estos materiales poseen grupos Pt que son más pequeños y más mono dispersa que la mayoría de otros reportados hasta la fecha, y el sustrato de carbono contiene micro y meso-poros. Un Promedio de tamaños de los grupos de Pt en el electro catalizador está en el rango de 1,4 a 2,0 nm, dependiendo de las condiciones de preparación. XRD y TEM muestran periodicidad en los catalizadores inferiores cargados-Pt (<17wt.-% Pt), que es coherente con sus altos volúmenes de micro-poro.
50	(Tian, Shen, Fu, Wu, & Jia, 2014)	mejoramiento de combustibles	Zeolita Y	Mejoró el rendimiento de desulfuración.
51	(Wang et al., 2015)	Reducción de agentes contaminantes	Zeolita de CFA (coal flyash)	La zeolita CFA demostró ser un buen sorbente para la eliminación de Hg del gas de carbón.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

52	(Guaya, Valderrama, Farran, Armijos, & Cortina, 2015)	Reducción de agentes contaminantes	Zeolita natural (Z-N)	La zeolita (Z-N) Proporcionó mayores rangos de recuperación de amonio que de fosfato.
53	(Fedosov, Smirnov, Shkirskiy, Voskoboynikov, & Ivanova, 2015)	Mejoramiento de combustibles	Zeolita NaA	Demostró un alto rendimiento de separación y resistencia termina en la deshidratación del metanol.
54	(Liu, Zhang, Jia, Gao, & Yu, 2015)	Mejoramiento de combustibles	Zeolita ZSM-5	Dió lugar a una mejora del octano y una pérdida mínima de la gasolina.
55	(Ding & Sartaj, 2015)		Zeolita Natural(clinoptilita)	Puede ser un material alternativo de bajo costo para la

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

		Reducción de agentes contaminantes		remoción de amoniaco desde soluciones acuosas.
56	(Watanabe, Uchida, Ohkubo, & Igarashi, 2003)	Celdas de combustible	Modernita	Demostró se un catalizador extremadamente prometedor para la limpieza de CO.
57	(van den Brink, Booneveld, Pels, Bakker, & Verhaak, 2001)	Reducción de agentes contaminantes	ZSM-5-NH4	Se obtuvo una conversión de N2O superior al 90%.
58	(Lu et al., 2013)	Refrigeración por adsorción	sílice gel-agua	El débil rendimiento de transferencia de calor y masa del material adsorbente fue el principal cuello de botella que resultó en gran tamaño, bajo rendimiento y alto costo.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

59	(Loh, El-Sharkawy, Ng, & Saha, 2009)	Refrigeración por adsorción	CF (A-15)/ethanol, ACF (A-20)/ ethanol, Silica gel/agua.	La zeolita de gel /agua dio el valor mas alto del efecto de enfriamiento.
60	(Lu & Wang, 2014)	Refrigeración por adsorción	Sílice gel	La capacidad de refrigeración se mejoró un 6,3% mientras que el COP se mejoró un 27,3%.
61	(Youssef, Mahmoud, & AL-Dadah, 2015)	Refrigeración por adsorción.	silice-gel,AQSOA-Z02	Resultados indican que el uso de sistema combinado de gel de sílice y zeolitas puede cubrir una amplia gama de temperatura de evaporación para lograr mejor combinación de refrigeración y la desalación de agua.
62	(Brancato, Frazzica, Sapienza, Gordeeva, & Freni, 2015)	Refrigeración por adsorción	Carbón activado	Los resultados han demostrado el potencial de los adsorbentes seleccionados para la utilización en sistemas de enfriamiento de adsorción.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

63	(Y. Z. Lu, Wang, Zhang, & Jiangzhou, 2003)	Refrigeración por adsorción	Zeolita 13X	Las combinaciones de adsorbentes adsorbato tienen grandes capacidades de almacenamiento en frío.
64	(Rutkowska, Díaz, Palomares, & Chmielarz, 2015)	Reducción de agentes contaminantes.	MCM-22, ITQ-2 y MCM-36	Cuando la zeolitas fueron cargadas de cobre y hierro se encontró que son catalizadores activos y selectivos.
65	(Jabłońska et al., 2015)	Reducción de agentes contaminantes	Zeolitas NaY -HY	Las diferencias en el comportamiento catalítico de estos sistemas se atribuyeron a diversas cantidades de especies de Pd agregadas.
66	(Santasnachok, Kurniawan, & Hinode, 2015)	Reducción de agentes contaminantes	zeolite Na-A y Zeolita Na-X	Se demostró que la zeolita muestra sintetizadas desde RHOA tienen una alta capacidad

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

				de eliminación de cerca de uno comercial.
67	(Zhenyan, 1998)	Refrigeración por adsorción	zeolita 13x-carbon activado (CZACA)	Mejóro la transferencia de calor en el lecho adsorbente mediante la absorción de la energía solar directamente y disminuye el tiempo de ciclo de desorción en un sistema de refrigeración solar.
68	(El-Sharkawy et al., 2015)	Refrigeración por adsorción	KOH4-PR y KOH6-PR	Se encuentra que el par etanol / KOH4-PR tiene una cinética de adsorción notablemente alta en el rango más bajo de temperaturas de adsorción.
69	(Ouchi, Hamamoto, Mori, Takata, & Etoh, 2014)	Refrigeración por adsorción	Alúmina	Hemos encontrado que el tipo de película fue superior a la partícula bajo la condición dada. Por lo tanto, debe ser examinada para sintetizar gel de sílice o zeolita como adsorbente película sobre la placa de intercambiador de calor de adsorción en la máquina de adsorción o sistema de deshumidificación desecante.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

70	(Jansson, Suárez, Garcia-Garcia, & Sánchez, 2015)	Reducción de agentes contaminantes	Zeolita Y, Zeolita ZSM-5	El compuesto híbrido zeolita/TiO ₂ exhiben excelentes actuaciones fotocatalíticas para la degradación de ambos, el formaldehído y el tricloroetileno en fase gaseosa.
71	(Veses, Puértolas, Callén, & García, 2015)	Mejoramiento de combustibles	ZSM-5	Fueron probados todos los catalizadores, el uso de cualquiera de Ni-ZSM-5 o Sn-ZSM-5 como catalizadores parece ser alternativas prometedoras ya que una mejora de la producción de hidrocarburos se ha conseguido manteniendo al mismo tiempo las tasas de formación de coque de baja.
72	(LI et al., 2015)	Mejoramiento de combustibles	Zn	Cuando la masa de carga Zn fue del 3%, el contenido de oxígeno de la bio-petróleo era 10.67%, HHV fue 36,76 MJ / kg, y el valor del pH era 5,85. La calidad de los combustibles de bio-aceite se mejoró obviamente.
73	(Ayodele, Abbas, & Daud, 2014)	Mejoramiento de combustibles	NiMoFOx	El efecto de los parámetros del proceso en el rendimiento objetivo de las fracciones de (YTF) mostró que el aumento de temperatura, presión y la carga del catalizador NiMoFOx / Zeol aumenta inicialmente YTF hasta un punto en el incremento adicional no podía mejorarlo, se

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

				observó en lugar de reducción en el YTF.
74	(Fan, Lin, Shi, Liu, & Bao, 2007)	Mejoramiento de combustibles	Zeolita ZSM-5 foma H	Los resultados mostraron que el catalizador con el ácido sola (HCl o ácido cítrico) tratada HZSM-5 zeolita como soporte presentó las actividades de hidroisomerización y de aromatización pobres debido a su muy fuerte acidez Bronsted atribuido a la incapacidad de estos tratamientos para eliminar el marco de zeolitas HZSM-5 .
75	(Al-Shammari et al., 2014)	Mejoramiento de combustibles	HZSM-5, Modenita, y compuesto (MFI/MOR)	Patrones de XRD y las mediciones revelaron la presencia de (MFI / MOR) sobrecrecimiento zeolita de material compuesto sobre la recristalización de H-mordenita en presencia de bromuro de tetrapropilamonio.
76	(Arribas, Martínez, & Sastre, 2002)	Mejoramiento de combustibles	ZSM-5 (CBV3020, forma H), mordenite (CBV20A, forma NH4) and beta (CP811, forma H)	Entre las zeolitas de poro grande, beta y USY que tiene una estructura de poros tri-dimensional produjo mayores rendimientos de ROP que mordenita que poseen un sistema de poros unidimensional. El rendimiento máximo de ROP de tetralina se obtuvo para el catalizador Pt / beta.
77	(Fan, Lei, Shi, & Bao, 2006)	Mejoramiento de combustibles	Zeolita ZSM-5/SAPO-11.	Marcadamente se mejoro el rendimiento de reacción de la gasolina FCC del compuesto catalizador derivado de hidro-actualización. De este modo,

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

				proporciona un catalizador con actividades equilibradas HDS, hidroisomerización y de aromatización que contribuyeron a la preservación RON, líquido de alto rendimiento y una buena estabilidad en el caso de la reducción de olefinas y azufre.
78	(Q. Lu, Zhang, Wang, Dong, & Liu, 2014)	Mejoramiento de combustibles	ZrO ₂ , TiO ₂ y SiO ₂ (SBA-15)	Se exhibió capacidad prometedora para convertir los oligómeros derivados de la lignina en compuestos fenólicos monoméricos, que era esencial para todos los vapores de la pirólisis rápida de biomasa actualización.
79	(Majhi, Sharma, Bal, Behera, & Kumar, 2013)	Mejoramiento de combustibles	Pd/Al ₂ O ₃ Ca	El contenido de carbono de fraccionado bio-aceite, es de 87,1% en peso. Es muy similar al de combustible convencional. Características fisicoquímicas de cedro del Himalaya mejorado y pino bio-aceite confirmam que oxígeno de cedro del Himalaya y pinos bioaceites han disminuido significativamente, es decir, el contenido de oxígeno del HT-DBO y HT-PBO se reduce al 1,98% y 1,54% de 43,64% y 41,58%, respectivamente.
80	(Patel, Baldanza, Teixeira da Silva, & Bridgwater, 2013)	Mejoramiento de combustibles	Carbonita 20 wt.% Mo ₂ C/Al ₂ O ₃	El pH de la bio-aceite se mejoró marginalmente. Los azúcares se reducen sustancialmente lo que resulta en un aumento de compuestos furánicos y fenólicos. No se observó de-oxigenación. Estas propiedades bio-aceite mejoradas son importantes si bio-aceite líquido se va a mejorar aún más debido a que su menor viscosidad facilita el flujo en un hidrotatamiento operado en régimen de lecho percolador.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

81	(Yan, Yu, Cai, & Zhang, 2012)	Mejoramiento de combustibles	Zeolita ZSM-5	Se encontró que el catalizador tiene relativamente alta actividad y selectividad en la producción de hidrocarburos líquidos cuando se ejecuta con gas de síntesis de nitrógeno enriquecido.
82	(F. Wang et al., 2010)	Mejoramiento de combustibles	Zeolita Si/Al	Los resultados de revalorización revelaron que el catalizador preparado por la mayor relación Si / Al de la zeolita NaY de partida tenía una mayor conversión tetralina y un mejor rendimiento hidro-mejoramiento para FCC LCO
83	(Pang, Zhang, Sun, Liu, & Gao, 2007)	Mejoramiento de combustibles	Zeolita USY	Los resultados de la evaluación indicaron que la USY modificado con Cu dio lugar a la deposición de coque grave en el catalizador debido a su alta capacidad de deshidrogenación, mientras que las zeolitas USY modificados con Zn y V sólo ligeramente mayor rendimiento de coque, y la zeolita modificada V-redujo el azufre contenidos obviamente. La USY modificado con la combinación de RE y V dio el catalizador superior que mostró tanto reducción de rendimiento alto contenido de azufre y la selectividad del producto deseable.
84	(Ayodele, Abbas, & Daud, 2014)	Mejoramiento de combustibles	Zeolita A	El resultado reutilización del catalizador muestra excelentes cualidades con pérdida marginal de sólo el 2% de la actividad después de la tercera

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

				reutilización debido al protocolo de síntesis mejorada que emplea precursor organometálico. Los resultados están fuertemente alentadores para futuros estudios hacia la industrialización del proceso de HDO
85	(Fan, Lin, Shi, Liu, & Bao, 2007)	Mejoramiento de combustibles	ZSM-5 forma H	Las evaluaciones de los resultados catalíticos de los diferentes catalizadores de zeolita soportada para el hidromejoramiento de FCC gasolina revelaron que el catalizador soportado zeolita HZSM-5 vapor / ácido tratada con ácido cítrico tenía actividades equilibradas inicial ya largo plazo en la hidrosulfuración, hidroisomerización y aromatización, de alto rendimiento líquido y la mejora de la gasolina octanaje carretera.
86	(Al-Shammari et al., 2014)	Mejoramiento de combustibles	ZSM-5, Modernita H	El craqueo catalítico de nafta pesada fue mayor sobre HZSM-5, frente a mordenita -H (94,4 en peso.% frente a 76,5 en peso.%). Los estudios de modelos cinéticos indican que la tasa de craqueo de hidrocarburos varía con la naturaleza de los compuestos modelo y la estructura de zeolita.
87	(Arribas, Martínez, & Sastre, 2002)	Mejoramiento de combustibles	ZSM-5, Modernita y zeolita Beta.	Se obtuvo el máximo rendimiento de la ROP de tetralina para el catalizador Pt /beta. Sin embargo, Pt / USY fue más eficaz que Pt / beta para la apertura del anillo de los reactivos aromáticos más voluminosos que podrían estar presentes en los alimentos diesel reales.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

88	(Fan, Lei, Shi, & Bao, 2006)	Mejoramiento de combustibles	zeolita compuesta ZSM-5/SAPO-11	La comparación de los rendimientos catalíticos de la mezcla mecánica y los catalizadores basados en compuestos de Ni-Mo para el hidromejoramiento de gasolina FCC mostraron que, debido a las ventajas anteriores del material compuesto, el catalizador correspondiente proporcionó un mejor alcance de número para la gasolina, de alto rendimiento líquido, una buena actividad de desulfuración y la cantidad de coque inferior y por lo tanto podría ser considerado como un sistema de catalizador potencial para la mejora de hidro-gasolina de FCC.
89	(Q. Lu, Zhang, Wang, Dong, & Liu, 2014)	Mejoramiento de combustibles	ZrO ₂ , TiO ₂ y SiO ₂ (SBA-15)	ZrO ₂ fue eficaz para convertir los oligómeros derivados de la lignina en compuestos fenólicos monoméricos. Además, era capaz de disminuir los Anhidros, aldehídos lineales y ácidos lineales, y mientras tanto, aumentar las cetonas lineales, hidrocarburos y ciclopentanonas. El TiO ₂ meso porosa ordenada también fue capaz de mejorar las propiedades del combustible de los productos pirolíticos, mientras que la SBA-15 no era tan prometedor.
90	(Yan, Yu, Cai, & Zhang, 2012)	Mejoramiento de combustibles	ZSM-5 Fe/Pd	El catalizador ZSM-5 Fe/ Pd muestra relativamente alta actividad y selectividad en la producción de hidrocarburos líquidos cuando se ejecuta con gas de síntesis ricos en nitrógeno. La conversión de CO, la selectividad de hidrocarburos y la distribución de hidrocarburos como función de la temperatura, presión, GHSV, composición de la alimentación,

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

				y el tiempo de reacción se examinan.
91	(F. Wang et al., 2010)	Mejoramiento de combustibles	Zeolita Na Y	Revalorización de los resultados mostraron que el catalizador preparado por una mayor relación de Si / Al de la zeolita NaY tiene mayor conversión tetralina y un mejor rendimiento de hidro-mejoramiento para FCC LCO.
92	(Pang, Zhang, Sun, Liu, & Gao, 2007)	Mejoramiento de combustibles	zeolita Y (USY)	Los resultados mostraron que el metal (RE) de tierras raras puede estabilizar el catalizador y aumentar la conversión, pero no puede aumentar la selectividad a compuestos de tiofeno; V puede reducir el contenido de azufre por 36,3 m%, pero disminuye la conversión global en comparación con el catalizador de base.
93	(Ackley, 2003)	Mejoramiento de combustibles	Zeolitas naturales, clinoptilolita y chabazita	Clinoptilolita y chabazita son juzgados los más versátiles, mientras que también ofrece características únicas de adsorción. Métodos eficaces y eficientes para la detección de todos los tipos de adsorbentes se presentan para diversas separaciones de gases. Zeolitas naturales deben demostrar un rendimiento única o superior para ser serios contendientes en las separaciones comerciales.
94	(Li et al., 2014)	Mejoramiento de combustibles	compuesto Micro /mesoporosa SBA-L-15 (LS)	El catalizador correspondiente CoMo / LS-c-Al ₂ O ₃ (CoMo / LSA) se introdujo en el proceso de la reacción de hidro-mejoramiento de la gasolina FCC, y exhibió un excelente

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

				rendimiento de hidrosulfuración y una buena capacidad de conservación de número de octanos.
95	(Montes de Correa, Córdoba, & Bustamante, 2000)	Mejoramiento de combustibles	Zeolita ZSM-5 /Pd	La disminución observada de la reducción de NOx en catalizadores zeolitas cargadas con Pd cuando SO2 y coexisten H2O en la corriente de alimentación puede ser debido a la inhibición de agua mejorada y el envenenamiento sitio presumiblemente activa.
96	(Martínez-Hernández, Fuentes, & Gómez, 2015)	Mejoramiento de combustibles	ZSM5 Co	Se encontró que la solución numérica de este modelo en buena concordancia con los datos experimentales, lo que sugiere que las reordenaciones de CO en ambas zeolitas por promoción H2O se produjeron bajo el mismo mecanismo.
97	(Iwasaki, Yamazaki, & Shinjoh, 2011)	Mejoramiento de combustibles	MFI, BEA, FER, LTL, MOR	Actividad SCR disminuyó con el aumento de relación de zeolita Si / Al2. Este fenómeno se atribuyó a un menor número de sitios ácidos de Brønsted disponible para la formación de sitios activos, de iones intercambiados Fe.
98		Mejoramiento de combustibles	SSZ-13	Debido al cobre intercambiado en zeolitas de poros pequeños,

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

	(Fickel, D'Addio, Lauterbach, & Lobo, 2011)			estas tienen alta reactividad entre 150 y 500°C y se muestran a ser mucho más hidrotérmicamente estables que la zeolita de poro medio, Cu-ZSM-5.
99	(Čapek, Dědeček, Sazama, & Wichterlová, 2010)	Mejoramiento de combustibles	Zeolitas Beta.	Esta zeolita con una alta concentración de átomos de Al aislados (60% de marco Al) es capaz de estabilizar una alta concentración de especies Co-oxo altamente activos. A medida que estas especies no se adsorben moléculas básicas y en consecuencia también las moléculas de agua, con ellos se obtienen conversiones altas de NOx en las corrientes de bienes de NOx que contienen 10% de vapor de agua.
100	(Chang, Lu, Guo, Wang, & Guo, 2013)	Reducción de agentes contaminantes	Zeolitas Beta H	Los resultados indican también que los NOx se absorbe fácilmente en muestras de Ca-beta con el NO3, NO2 y NO especies, entre las cuales la concentración de NO3 especies en el Ca-beta es la más alta y la segunda es la absorción de NO2.

FIRMA ESTUDIANTES _____

FIRMA ASESOR _____

FECHA ENTREGA: _____

FIRMA COMITÉ TRABAJO DE GRADO DE LA FACULTAD _____

RECHAZADO ___ ACEPTADO ___ ACEPTADO CON MODIFICACIONES _____

ACTA NO. _____

FECHA ENTREGA: _____

FIRMA CONSEJO DE FACULTAD _____

ACTA NO. _____

FECHA ENTREGA