

Diseño de un proceso sostenible para la captura de CO₂ utilizando líquidos eutécticos profundos

Daniel Ulises Alvarez¹, Miguel Ángel Arévalo Ramírez², Ana Elisa Domínguez Vargas³, Leonardo Daniel Lozano Alvarado⁴, Vianey Margarta Rodríguez Montejo⁵, Estefanía Segovia Hernández⁶, Juan Gabriel Segovia Hernández⁷.

^{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7}Universidad de Guanajuato

du.alvarezcruz@ugto.mx¹

ma.arevaloramirez@ugto.mx²

ae.dominguezvargas@ugto.mx³

ld.lozanoalvarado@ugto.mx⁴

vm.rodriguezmontejo@ugto.mx⁵

e.segoviahernandez@ugto.mx⁶

gsegovia@ugto.mx⁷

Resumen

Nuestro planeta se ha calentado debido a las emisiones de gases de efecto invernadero debido a la actividad humana y quema de combustibles fósiles, a consecuencia de esto se tienen temperaturas atmosféricas cada vez más altas. Este trabajo aborda la propuesta de que la industria realice un proceso en el cual se absorba el CO₂ que regularmente es liberado en la atmósfera, generalmente este proceso se realiza con el uso de Monoetanolamina (MEA) pero se ha estudiado que de esta manera el impacto ambiental es más severo. Los líquidos eutécticos profundos (DES) son una alternativa pues se ha discutido que estos pueden ser utilizados como disolventes “verdes”.

Haciendo uso de la simulación de una termoeléctrica en la cual se usan distintos combustibles (Biogás, Gas Natural, Gas Asociado y Carbón) se utilizan DES y MEA para realizar un análisis de la flexibilidad que tiene el proceso, pues si estos no fueran flexibles requerirían de equipos de control estrictos y esto elevaría los costos de producción, lograr tener procesos flexibles permite cierta libertad, logrando el producto deseado. Se observa que la flexibilidad al utilizar MEA es mayor que con el uso de DES al momento de modificar el flujo del solvente, además a flujos menores se consigue capturar menor CO₂, por otro lado, la flexibilidad al alterar el reflujo y la carga térmica en el caso de MEA se reduce mucho, al contrario que en el caso de DES donde se observa un poco de flexibilidad.

Palabras clave: Captura de CO₂, Líquidos eutécticos profundos (DES), Monoetanolamina (MEA).

Introducción

De manera natural, la atmósfera está compuesta en un 78.1% de nitrógeno, un 20.9% de oxígeno, y el restante 1% por otros gases, entre los que se encuentran el argón, el helio, y algunos gases de efecto invernadero. En los últimos trescientos años la cantidad de dióxido de carbono aumentó de 280 a 368 miligramos por metro cúbico (mg/m³ o partes por millón); la de metano, de 0.7 a 1.75 mg/m³; y la de óxido nítrico, de 0.27 a 0.316 mg/m³.

El efecto ambiental de los gases de efecto invernadero considera que el dióxido de carbono (CO₂) contribuye en un 60% a los efectos del calentamiento global (Olajire, 2010).

El CO₂ es producido por varios procesos industriales como la combustión de combustibles fósiles para producir electricidad y en el sector del transporte. Para frenar el cambio climático, es necesario desarrollar alternativas sostenibles para la producción de electricidad, así como alternativas para mitigar las emisiones de CO₂, que sean solo sostenibles y amigables con el ambiente.

Una alternativa viable es el proceso de captura del CO₂, tradicionalmente este proceso se hace con monoetanolamina (MEA), proceso ampliamente utilizado a nivel industrial, pero éste es un proceso contaminante, no sostenible y no verde. A pesar de su alta eficiencia, bajo costo y la facilidad de

implementación a las centrales eléctricas existentes, MEA se considera altamente tóxico por lo que su implementación conlleva un alto impacto ambiental.

El proceso de captura de CO₂ mediante MEA se puede utilizar como punto de referencia para un análisis riguroso de las variables de proceso que impactan directamente en el consumo de energía, la degradación de aminas y la huella ambiental.

Se ha empezado a proponer nuevos solventes para generar un proceso verde que es el caso de los líquidos eutécticos profundos. Los líquidos eutécticos son una mezcla homogénea de al menos dos compuestos que tienen un punto de fusión más bajo que cada uno de sus compuestos individuales. En un diagrama de fases, el punto eutéctico se encuentra en la relación molar de los componentes de la mezcla, que presenta la temperatura de fusión más baja (Pätzold et al., 2019).

Lo que se conoce como disolventes eutécticos profundos o DES (por sus siglas en inglés "Deep Eutectic Solvents") son mezclas eutécticas basadas en las interacciones de enlace de hidrógeno entre un donante de enlaces de hidrógeno y un aceptor de enlaces de hidrógeno (Luo et al., 2021), los cuales conducen a una depresión "profunda" del punto de fusión, siendo que se reducen considerablemente (>50°C) a comparación de los componentes individuales (Smink et al., 2020).

Una de las razones de este aumento continuo de la atención prestada a los DES se debe al hecho de que pueden diseñarse como líquidos no tóxicos, no volátiles, no inflamables o incluso biodegradables. Por ello, los DES se consideran con frecuencia una clase de disolvente "verde" (Pätzold et al., 2019). Los resultados reportados por Luo (2021) muestran que los líquidos eutécticos profundos son una prometedora alternativa ecológica para los disolventes amínicos orgánicos tradicionales para su uso en el proceso de captura de CO₂ a nivel industrial.

Por otra parte, debido a la cantidad de grados de libertad, así como las variables de proceso, la optimización de procesos ha demostrado ser una herramienta muy importante en el diseño de procesos de captura de CO₂. La optimización aplicada directamente a los procesos de captura puede proporcionar una solución adecuada en la búsqueda de maximizar la captura de CO₂ y minimizar el uso de energía para ese proceso. Finalmente, la química verde tiene como objetivo hacer una química más amigable con la salud y el medio ambiente. La idea de este concepto consiste en introducir en la fase de diseño y desarrollo de nuevas sustancias, productos o procesos, sobre su potencial impacto en la salud y el medio ambiente desarrollando alternativas que minimicen dicho impacto.

Un proceso se considera flexible si soporta variaciones de una variable de entrada y el valor nominal de la composición se mantiene muy estable a altas variaciones y no es flexible si con mínimos cambios en la variable de entrada el proceso rápidamente empieza a modificarse.

De acuerdo con esto, en este trabajo se propone el estudio de un proceso verde basado en los líquidos eutécticos para la captura del CO₂ proveniente de una planta termoeléctrica, se estudiará que tan flexible es el proceso, ya que como se menciona la flexibilidad está asociada a la operabilidad del proceso a nivel industrial, que tan fácil es operarlo y que tan fácil se perturba lo cual es un problema muy importante en la industria ya que un proceso no flexible se perturba rápidamente y esto no es algo que se quiera en la industria pues se considera muy inestable, además de que conlleva desperdicios de energía, esto se puede corregir con sistemas de control, pero esto implica altos costos, pero si hay un bien superior y se genera un proceso limpio y sostenible vale la pena, pues no impacta de manera negativa al ambiente.

Metodología

Con el fin de analizar la flexibilidad del proceso se presentaron dos casos.

Caso 1: Haciendo uso de líquidos eutécticos profundos (DES)

Caso 2: Utilizando Monoetanolamina (MEA).

En cada uno de estos casos se utilizaron cuatro combustibles diferentes, algunos de los más utilizados en las centrales termoeléctricas, los cuales fueron: biogás, gas natural, gas asociado y carbón, la simulación de la central se llevó a cabo en el simulador de procesos Aspen Plus V8.8 utilizando como modelo termodinámico *NRTL* para el proceso donde se utiliza DES y *ELECNRTL* para el proceso que utiliza MEA.

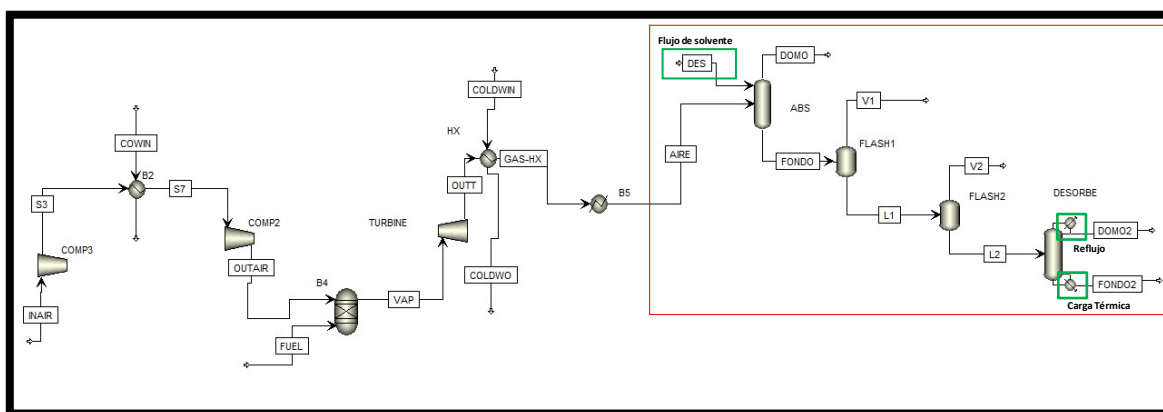


Figura 1. Diagrama de flujo del proceso de una central termoeléctrica utilizando DES.

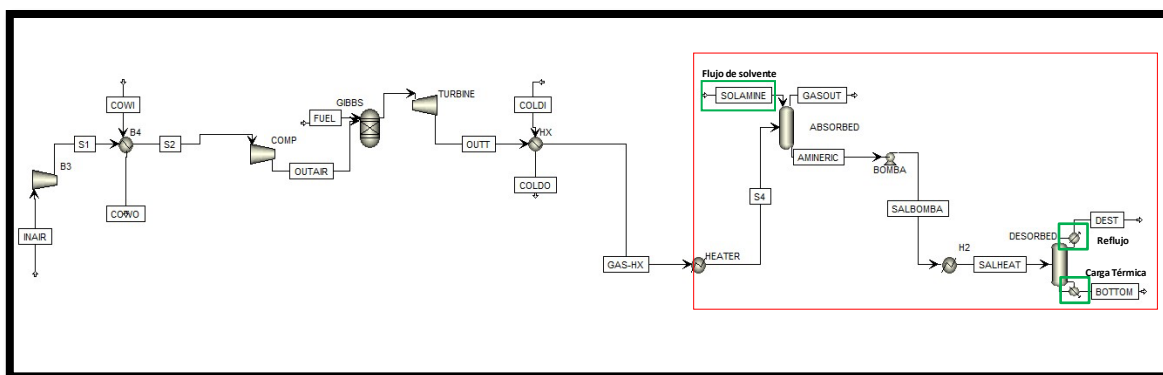


Figura 2. Diagrama de flujo del proceso de una central termoeléctrica utilizando MEA.

Con el propósito de analizar este comportamiento se realizó el acoplamiento de un proceso de captura de CO_2 como semuestra en el recuadro rojo de la Figura 1 y Figura 2, modificando el valor de ciertas variables. Las variables que se eligieron para ser perturbadas para medir la flexibilidad desde el punto de vista del diseño y modelado de sistemas fueron tres: flujo del solvente reflujo y la carga térmica; ya que, en una torre de destilación las variables que más impactan son el reflujo y la carga térmica, mientras que en una torre de absorción es el flujo del solvente. En la Figura 3 se presenta el diagrama de flujo del procedimiento que se llevó a cabo para realizar las perturbaciones de las variables antes mencionadas, a su vez en la Tabla 1 se presentan las composiciones molares del gas que entra al absorbedor.

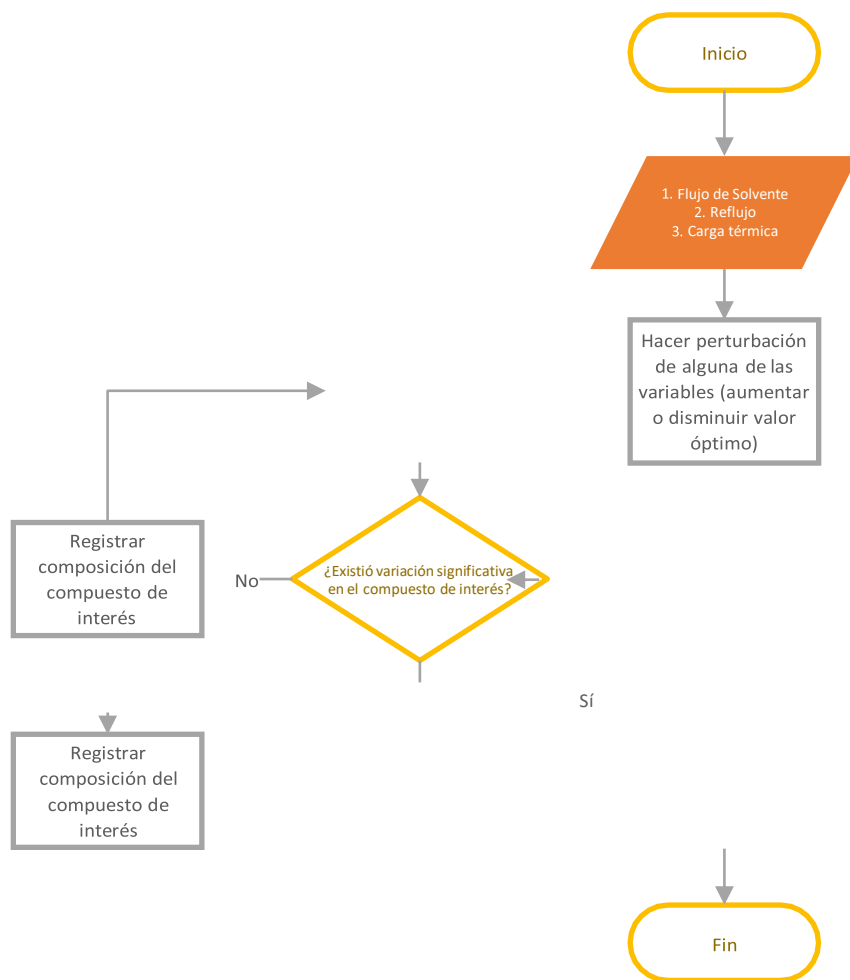


Figura 3. Diagrama de flujo del procedimiento general de las pruebas de flexibilidad.

Tabla 1. Composición molar del gas de entrada a la torre de absorción para cada tipo de combustible.

Combustible	Agua	CO ₂	N ₂	O ₂
Biogás	0.0882322	0.0543179	0.7472625	0.1101873
Gas Natural	0.0969838	0.0490042	0.7515977	0.1024142
Gas asociado	0.0806763	0.0417409	0.7582708	0.1193118
Carbón	0.08	0.124	0.766	0.03

Resultados

A continuación, se muestran los resultados obtenidos para cada caso de estudio donde se simuló el uso de 4 tipos de combustible comúnmente utilizados dentro de una central termoeléctrica ya mencionados, para cada combustible se implementaron dos solventes, DES y MEA respectivamente como absorbente en la torre de absorción.

En cada Tabla se presenta las perturbaciones realizadas a cada una de las variables, así como el porcentaje de variación de la composición molar del compuesto de interés con respecto del valor óptimo. Siendo que para el caso del flujo del solvente en la torre de absorción es el porcentaje de variación de la fracción molar de CO₂ en el domo, para el reflujo en la torre de desorción es el porcentaje de variación de la fracción molar de CO₂ en el domo y finalmente para la carga térmica en el fondo de la columna de desorción es el porcentaje de variación de la fracción molar del solvente (DES o MEA).

Caso 1.

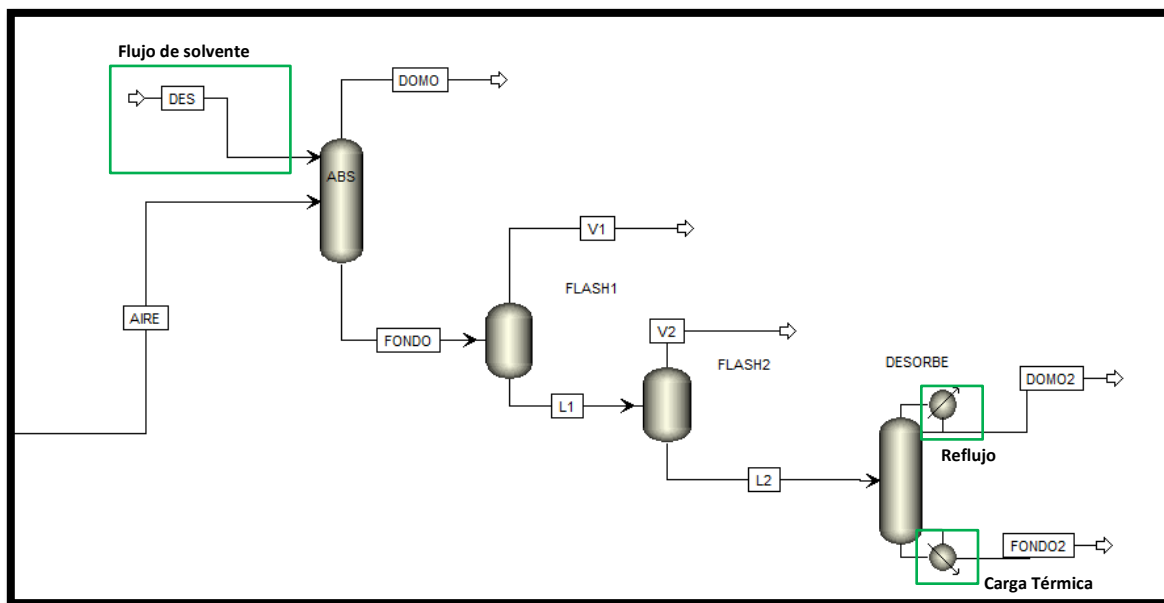


Figura 3. Diagrama de flujo del proceso de captura del CO₂ dentro de la planta termoeléctrica mediante DES.

Tabla 2. Variación del porcentaje molar de CO₂ y porcentaje molar de DES con respecto a las variables de diseño usando como combustible biogás.

Flujo del solvente (Kmol/h)	% variaciónCO ₂	Reflujo	% variaciónCO ₂	Carga térmica (KW)	% variaciónDES
50000	2790.961575	0.75	68.19395047	31149.9	0.053998832
55000	483.3333333	0.8	0.105997785	41150	0
57000	187.9992429	0.85	0.076343162	81150	0
59000	42.13515048	0.9	0.046512591	121150	0
59500	19.25042589	0.95	0.019664869	161150	0
60000	0	1	0	166724.081	0
60100	3.473405262	1.2	0.005174966	166870	0
60300	10.0889646	1.4	0.002069986	166970	0
60500	15.9568427	1.6	0.002069986	167170	0
60700	21.54079122	1.8	0.006209959	167370	0
61000	29.30153322	2	0.010349931	167429.9	0

Para este caso de estudio donde el combustible es el biogás, se encontró que la torre de absorción es muy poco flexible, como se observa en los datos del flujo de solvente en la Tabla 2, al modificar el flujo del DES, se alteran considerablemente los valores del CO₂ que salen por el domo de la columna. Para la torre de desorción, se observa que esta puede soportar perturbaciones arriba del valor óptimo en el reflujo, sin embargo, cuando el valor del reflujo es menor al óptimo el porcentaje de variación del CO₂ aumenta considerablemente a comparación del valor óptimo. Finalmente, para la carga térmica en el fondo del desorbedor se puede ver que es muy flexible con el aumento o decremento respecto del valor óptimo.

Tabla 3. Variación del porcentaje molar de CO₂ y porcentaje molar de DES con respecto a las variables de diseño usando como combustible gas natural.

Flujo del solvente (kmol/h)	% variaciónCO ₂	Reflujo	% variaciónCO ₂	Carga térmica (KW)	% variación DES
64100	11.99093532	0.5	0.014945069	100000	0.29225471
64200	5.8230032	0.6	0.007064268	150000	0.044461021
64250	2.869383029	0.7	0.003482086	160000	0.022968527
64270	1.711597364	0.8	0.001742169	165000	0.014076323
64290	0.567238973	0.9	0.00061634	170000	0.006228143
64300	0	1	0	175014.977	0
64320	1.124850843	1.1	0.000407141	180000	0.109838522
64330	1.682462714	1.2	0.000714185	200000	1.502026487
64340	2.236907775	1.3	0.001021229	350000	7.075998465
64350	2.788186026	1.4	0.001123577	450000	11.72413719
64400	5.497328479	1.5	0.001328273	500000	14.20985026

Para el caso en el que se usa gas natural como combustible en el proceso usando DES, se puede observar en la Tabla 3 que en la torre de absorción donde lo que se varia es el flujo del solvente, este es poco flexible ya que los datos obtenidos del porcentaje de variación de CO₂ son muy altos. En la torre de destilación las variables más importantes a monitorear son el reflujo y la carga térmica, en el caso del reflujo de puede observar que se perturba muy poco por lo que es una variable muy flexible. La última variable es la carga térmica, ésta es muy poco flexible lo que se considera inestable.

Tabla 4. Variación del porcentaje molar de CO₂ y porcentaje molar de DES con respecto a las variables de diseño usando como combustible gas asociado.

Flujo del solvente (Kmol/h)	% variación CO ₂	Reflujo	% variación CO ₂	Carga térmica (KW)	% variación DES
8400	12.1934	-	-	23302.84957	0.03264
8800	10.4727	-	-	24014.60557	0.00987
9200	7.4854	-	-	24433.28557	0.00001
9400	5.6861	-	-	24475.15357	0.00001
9800	1.8923	-	-	24580.66093	0.00001
10000	0.0000	0.7	0.00000	24581.07961	0.00000
10200	1.8538	0.88	0.00021	24582.33565	0.00001
10600	5.4079	1.08	0.00425	25423.88245	6.41763
10800	7.1013	1.16	0.00607	25465.75045	8.19720
11200	10.3208	1.32	0.00975	26135.63845	27.24690
11400	11.8503	1.4	0.01162	26303.11045	30.72476

Al hacer uso de gas asociado como combustible, observamos en la Tabla 4 que al realizar perturbaciones en el flujo del solvente vemos valores poco flexibles, pero ligeramente más flexibles a los casos anteriores observados. Al perturbar el reflujo vemos que hay un pequeño rango de operación donde si hay flexibilidad, sin embargo, este rango no se extiende a valores más pequeños. Por último, la carga térmica presenta una gran estabilidad y flexibilidad, principalmente al bajar su valor.

Tabla 5. Variación del porcentaje molar de CO₂ y porcentaje molar de DES con respecto a las variables de diseño usando como combustible carbón.

Flujo del solvente (kmol/h)	% variaciónCO ₂	Reflujo	% variaciónCO ₂	Carga térmica (KW)	% variaciónDES
65888.5	26.171	0.4	0.007317576	267250	0.000214874
65988.5	21.389	0.6	0.001824298	267350	0.000179061
66088.5	16.791	0.7	0.000998778	267550	0.000143249
66288.5	8.130	0.8	0.000519772	268000	0.000107437
66388.5	4.408	0.9	0.000214024	268600	0.0000358123
66488.5	0.000	1	0	268673.724	0
66588.5	4.041	1.1	0.000152874	268680	0
66688.5	7.363	1.5	0.000346515	268690	0
66888.5	14.125	2	0.00057073	268699.9	0
67188.5	22.768	2.4	0.000580922	268700	0
67288.5	26.184	3	0.000591113	267250	0

Al usar carbón como combustible, observamos en la Tabla 5 que al alterar el valor del flujo obtenemos valores ligeramente flexibles, el reflujo hacia arriba es muy flexible, pero hacia abajo lo es poco y al alterar la carga térmica observamos una ligera flexibilidad.

Caso 2.

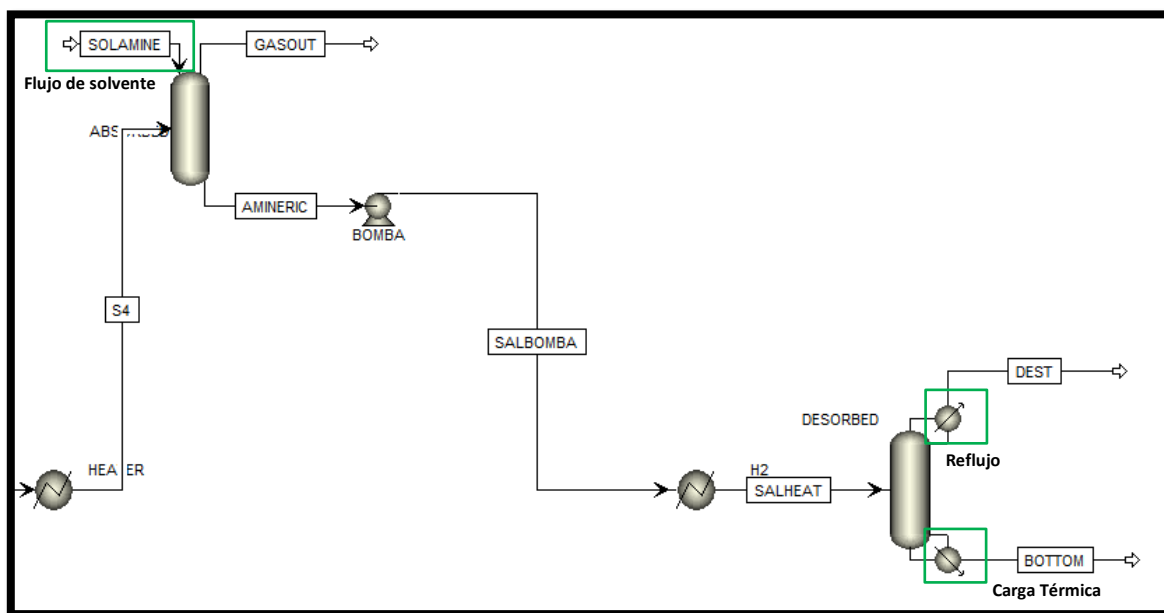


Figura 4. Diagrama de flujo del proceso de captura del CO₂ dentro de la planta termoeléctrica mediante MEA.

Tabla 6. Variación del porcentaje molar de CO₂ y porcentaje molar de MEA con respecto a las variables de diseño usando como combustible biogás.

Flujo del solvente (kmol/h)	% variaciónCO ₂	Reflujo	% variaciónCO ₂	Carga térmica(KW)	% variaciónMEA
40500	8.897200023	3.45	20.33959127	128500	0.106494164
40700	8.30349431	3.46	10.76450688	129000	0.070215932
41000	7.430545656	3.49	0.061066113	129500	0.048881091
42000	4.586963631	3.5	0.051183795	130000	0.026466005
43000	1.836462587	3.52	7.804417426	130400	0.008191859
43681	0	3.53544017	0	130576.785	0
43700	0.050733327	3.54	0.008911107	131000	0.019624453
43800	0.320752027	3.56	7.75319358	131500	0.043029763
44050	0.97567316	3.57	0.086397686	132000	0.047710826
44056.9	0.994121643	3.58	7.123298479	133000	0.047710826
44057	0.994121643	3.6	47.09023327	134000	0.047710826

Para este caso de estudio utilizando el biogás como combustible, se observó que la torre de absorción es más flexible en comparación con la de DES, puesto que soporta mayores variaciones en el flujo del solvente (MEA). Para la torre de desorción, se observa que es muy poco flexible en el reflujo debido a que se presentan perturbaciones considerables ante el mínimo aumento o disminución de esta variable. Finalmente, para la carga térmica en el fondo de la columna de desorción, se encontró que es muy flexible al igual que en el caso de la columna de desorción utilizando como solvente el DES.

Tabla 7. Variación del porcentaje molar de CO₂ y porcentaje molar de MEA con respecto a las variables de diseño usando como combustible gas natural.

Flujo del solvente (kmol/h)	% variaciónCO ₂	Reflujo	% variaciónCO ₂	Carga térmica (KW)	% variaciónMEA
38500	0	2	16.70951317	95000	1.105369663
38900	0	2.1	13.33865274	100000	0.223286516
39000	10.60306112	2.2	9.73758819	100500	0.153313574
40000	8.07367293	2.25	7.779457179	101000	0.04775492
43000	1.112947163	2.3	5.598232444	101100	0.028855772
43504.63237	0	2.317101936	0	101256	0
44000	1.068772854	2.3172	4.743377941	101300	0.008020614
45000	3.180959237	2.32	4.595043812	101400	0.026090043
45100	3.390378181	2.4	2.070682166	102000	0.130542406
45200	3.597752019	2.45	2.070682166	105000	0.609658847
45500	4.217419402	2.5	2.070682166	108000	1.054849014

Para el caso en el que se usa gas natural como combustible en el proceso usando MEA, en la torre de absorción se puede observar que en comparación con el proceso utilizando DES, este sigue siendo muy poco flexible, en este caso es más flexible cuando se aumenta el valor con respecto al valor óptimo. Con respecto al reflujo, en este caso se encuentra que es una variable poco flexible ya que como se muestra en los datos obtenidos de la Tabla 7, incrementa mucho la variación de porcentaje de CO₂ teniendo este un mínimo cambio en la variación del valor de reflujo. Por

último, analizamos la carga térmica donde podemos observar que esta variable es muy estable ya que no se perturba mucho, aunque la variación de esta es grande.

Tabla 8. Variación del porcentaje molar de CO₂ y porcentaje molar de MEA con respecto a las variables de diseño usando como combustible gas asociado.

Flujo del solvente(kmol/h)	% variaciónCO ₂	Reflujo	% variaciónCO ₂	Carga térmica(KW)	% variaciónMEA
36509.206158	0.00027504	2.0581534466	42.4552	136084.2585	5.7457
37509.206158	0.000269701	2.2581534466	38.4376	136167.9945	5.8706
39509.206158	0.000260177	2.8581534466	25.9576	136335.4665	6.1150
40509.206158	0.000255846	3.0581534466	21.5843	136419.2025	6.2349
42509.206158	0.000247788	3.4581534466	12.1618	136586.6745	6.4695
43509.206158	0.000244006	3.6581534466	0.0000	136628.5425	0.0000
44509.206158	0.000240336	3.68	5.7718	136712.2785	6.6425
46509.206158	0.000233355	3.7	5.0476	136837.8825	6.8127
48509.206158	0.000226712	3.72	4.2154	136963.4865	6.9804
49509.206158	0.000223493	3.74	3.1747	137089.0905	7.1457
50509.206158	0.000220331	3.75	1.9922	137172.8265	7.2547

En la Tabla 8 haciendo uso de gas asociado como combustible observamos que al variar el solvente tenemos una gran flexibilidad, todo lo contrario, al cambiar los valores al reflujo donde la flexibilidad es nula, por último, al alterar la carga térmica observamos que no hay nada de flexibilidad y el valor a utilizar es muy específico.

Tabla 9. Variación del porcentaje molar de CO₂ y porcentaje molar de MEA con respecto a las variables de diseño usando como combustible carbón.

Flujo del solvente (kmol/h)	% variaciónCO ₂	Reflujo	% variaciónCO ₂	Carga térmica(KW)	% variaciónMEA
30258.062817	16.962	2.15	3.729366615	50000	5.817896724
33258.062817	12.852	2.2	1.69994632	55000	2.29542684
36258.062817	8.698	2.21	1.265525093	56000	1.606534845
39258.062817	4.685	2.22	0.849426616	57000	0.93641215
42258.062817	1.078	2.23	0.412840859	58000	0.293465839
43258.062817	0.000	2.23888653	0	58472.776	0
44258.062817	1.011	2.24	0.032965796	59000	0.318393817
47258.062817	3.613	2.25	0.493696888	60000	0.894963278
50258.062817	5.578	2.26	0.965055823	61000	1.429301811
53258.062817	6.951	2.27	1.452464751	62000	1.923266797
56258.062817	7.815	2.3	3.058513747	63000	2.380181964

Con el carbón haciendo uso de MEA observamos en la Tabla 9 una ligera flexibilidad al cambiar los valores del solvente, muy poca flexibilidad al mover el reflujo y una ligera flexibilidad al cambiar la carga térmica.

Conclusión

Para los casos de estudio donde se utiliza el Biogás como combustible, se llevó a cabo un cambio en las variables de entrada con el fin de analizar la flexibilidad con cada una de ellas, y como se observó en los resultados para el caso de DES, en la columna de absorción se requiere un control estricto para mantener el flujo del solvente, mientras que, para el caso del reflujo de la torre de desorción, no se requiere un control tan estricto y para la carga térmica de este equipo no es necesario el control ya que es muy flexible ante alguna modificación, por lo tanto, muy estable. Para el caso con MEA se observó prácticamente la misma situación, este caso es un poco más estable, debido a que en la columna de absorción no se requiere un control muy estricto, pues soporta muy bien las modificaciones en el flujo del solvente, mientras que en la torre de desorción se requiere un control muy estricto en el reflujo, debido a que es muy poco flexible y se tiene grandes variaciones a las mínimas perturbaciones, al igual que el caso de DES, la carga térmica es muy estable y no requiere algún control.

Para el caso de estudio donde se utiliza el Gas natural como combustible se puede observar que el mejor caso es donde se utiliza MEA, ésta es más flexible ya que solo el reflujo requiere de un mayor control, las otras 2 variables que son el flujo del solvente y carga térmica tienen menores perturbaciones a comparación del caso donde se utiliza DES donde el flujo del solvente y el aumento de la carga térmica requieren de un control más estricto ya que el reflujo no sufre perturbaciones considerables por lo que es más flexible.

En el caso de gas asociado, el cambio del flujo de disolvente es mucho más flexible usando MEA y no se necesita un control muy estricto, pues la flexibilidad permite cierta estabilidad, en cambio al usar DES el control debe ser muy riguroso, pero pasa todo lo contrario en el reflujo, donde al usar MEA no hay nada de flexibilidad es difícil comparar ya que en el caso de usar DES el rango es pequeño, pero se pudiera decir que es flexible y se utilizaría un control menos estricto para mantenerlo en ese rango. En el caso de la carga térmica con DES se observa un buen rango donde es un poco flexible, pero se nota como el valor de la carga térmica con MEA debe ser controlado y específico pues sufre grandes perturbaciones teniendo un cambio mínimo.

Para el caso del Carbón con MEA se observó que es más flexible al momento de modificar el flujo pues el rango es más grande y no se requiere un control muy estricto comparado con el uso de DES donde con un cambio ligero se perturba la flexibilidad, por lo cual aquí sí es necesario un control estricto. Usando DES se observa que la flexibilidad para reflujos pequeños disminuye considerablemente, por lo cual se requiere un control poco estricto, para MEA, a pequeñas modificaciones en el reflujo, se perturba la flexibilidad, por lo cual es necesario un control estricto. No hay una flexibilidad notoria al momento de modificar la carga térmica en ambos casos, por lo cual para esta variable es bastante necesario un control estricto y específico que mantenga el valor estable.

Finalmente se concluye que el comportamiento para los líquidos eutécticos, conforme se disminuye la composición del CO_2 en el gas de entrada del absorbedor, se mejora la flexibilidad de la torre, por otro lado, para la MEA conforme disminuye la composición de CO_2 se hace menos flexible para su control. Todo va a depender del tipo de combustible, para un flujo de gas de combustión con mayor composición de CO_2 , se necesitará un sistema de control un poco más complejo. El control para el proceso con MEA es más simple, pero más contaminante, por lo cual es preferible invertir en un buen control para un proceso sostenible.

De esta manera y con conocimiento previo, se sabe que, aunque utilizar MEA es una opción más viable ésta impacta en el consumo de energía y huella ambiental, por lo que utilizar DES es la mejor opción para considerarse ya que a nivel global un proceso verde que es lo que se busca, por lo tanto, se llega a la conclusión que la mejor opción es utilizar DES e implementar un sistema de control para que éste sea más estable.

Referencias

- Smink, D., Kersten, S. R. A., & Schuur, B. (2020). Comparing multistage liquid–liquid extraction with cold water precipitation for improvement of lignin recovery from deep eutectic solvents. *Separation and Purification Technology*, 252, 117395. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2020.117395>
- Luo, F., Liu, X., Chen, S., Song, Y., Yi, X., Xue, C., ... Li, J. (2021). Comprehensive Evaluation of a Deep Eutectic Solvent Based CO₂ Capture Process through Experiment and Simulation. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 9(30), 10250–10265. doi:10.1021/acssuschemeng.1c02722
- Pätzold, M., Siebenhaller, S., Kara, S., Liese, A., Syldatk, C., & Holtmann, D. (2019). Deep Eutectic Solvents as Efficient Solvents in Biocatalysis. *Trends in Biotechnology*, 37(9), 943–959. <https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2019.03.007>
- GreenFacts: Acerca del Dossier sobre el Cambio Climático Actualización 2007. (2007, 27 marzo). GreenFacts. Recuperado 18 de julio de 2021, de <https://www.greenfacts.org/es/cambio-climatico-ie4/acerca-cambio-climatico-ie4.htm>
- Romero, A.G, Mora, C., Chargoy, J.P., Ramírez, N., Sánchez, E., Segovia, J, G. (2022). Implementing CO₂ capture process in power plants: Optimization procedure and environmental impact. *ELSEVIER*. 180 (232-242).