

5.1.2 Análisis Paramétrico de la Tecnología 1 - Incorporación de Vapor Re-comprimido

El proceso de la tecnología 1 - Incorporación de Vapor Comprimido se realiza a partir de los parámetros operativos de la planta base, de manera que el análisis paramétrico es necesario en las secciones donde la tecnología incorpora equipos adicionales en el proceso.

5.1.2.1 Sección Contactora – Tecnología 1.

La tecnología 1 mantiene la configuración y equipos de la planta base en la sección contactora, por lo cual, el resultado de la influencia de los parámetros sobre el proceso es similar que la planta base. Los parámetros de la simulación se presentan en la Tabla 5.12.

Tabla 5.12 Parámetros de la Sección Contactora – Tecnología 1

Parámetro	Valor	Unidad
Numero de Platos de la Torre Contactora T-100	20,0	-
Presión Amina Pobre	1212,0	psia
Temperatura de Amina Pobre	124.60	°F
Presión de Alimentación	1214,0	psia
Temperatura de Alimentación	86,2	°F
Presión de Operación de la Torre Contactora T-100	1212-1214	psia

Fuente: Elaboración propia, datos obtenidos de la *Simulación en Hysys V8.8*.

5.1.2.2 Sección Intercambiador de Calor – Tecnología 1.

La tecnología 1, utiliza el mismo intercambiador de calor amina – amina de la planta base con las mismas condiciones de operación en la simulación. A diferencia de la planta base, la amina pobre (corriente 211A) sale a menor temperatura de la torre contactora, lo que implica menor gasto energético en el reboiler y menor aporte de calor a la corriente de amina rica (corriente 204), por lo cual, la corriente solo alcanza los 185°F como se ve en la tabla 5.13.

Similar a la planta base, la variable de operación es la temperatura de la corriente 204', su análisis paramétrico produce los mismos efectos al proceso que la temperatura de la corriente 104' que se vio en el análisis paramétrico de la planta base.

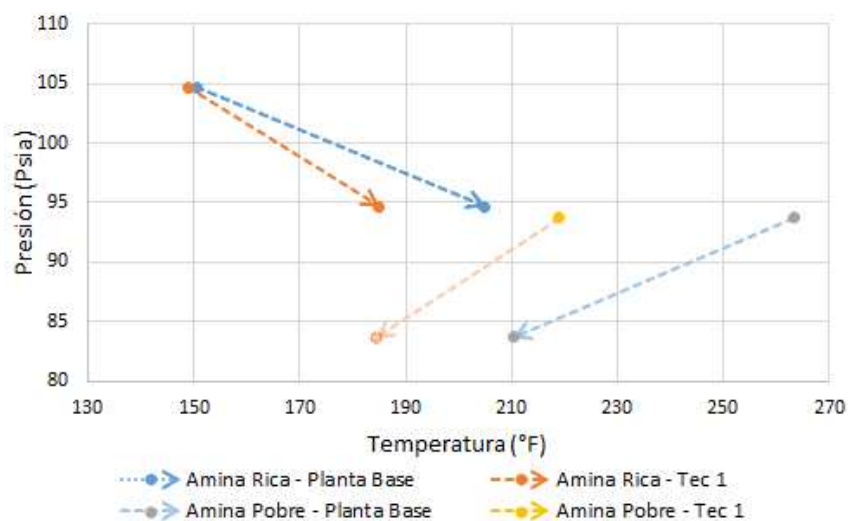
En la Figura 5.11, se muestra las corrientes que entran en contacto en el intercambiador de la planta base y la tecnología 1 en las mismas condiciones de presión de entrada y salida, lo que permite comparar la temperatura de la corriente de amina pobre que se dirige a la torre contactora, esta temperatura es menor en la tecnología 1, donde el aerofriador debe retirar menor calor de la corriente para que ingrese a la torre regeneradora, lo cual se traduce en un ahorro energético en el acondicionamiento de la corriente.

Tabla 5.13 Parámetros de la Sección Intercambiador de Calor – Tecnología 1

Corriente de Entrada	Temperatura [°F]	Corriente de Salida	Temperatura [°F]
204	148.8	204'	185.00
211A	219.1	211B	184.4

Fuente: Elaboración propia, datos obtenidos de la *Simulación en Hysys V8.8*.

Figura 5.11 Entradas y Salidas del intercambiador de Calor para la planta Base y la Tecnología 1



Fuente: Elaboración propia, con datos obtenidos de la *Simulación en Hysys V8.8*.

5.1.2.3 Sección Regeneradora – Tecnología 1.

El proceso incorpora un compresor K-200 y una válvula VLV-20 en la sección regeneradora, los parámetros de operación de la simulación se presentan en la Tabla 5.14.

Tabla 5.14 Parámetros de la Sección Regeneradora – Tecnología 1

Parámetro	Unidad	Valor
Numero de Platos Torre Regeneradora R-200	-	20
Presión de Operación de la Torre R-200 Cabeza	psia	25
Presión de Operación de la Torre R-200 Fondo	Psia	32
Flujo Molar de Reflujo	lbmol/hr	264,5
Presión de Salida del Compresor K-200	psia	32
Presión de Salida de la Válvula VLV-202	psia	14,7

Fuente: Elaboración propia, datos obtenidos de la *Simulación en Hysys V8.8*.

Varios de los parámetros de la Tabla 5.14 se analizaron para la planta base, el resultado del impacto al proceso es el mismo para la tecnología 1. Los parámetros adicionales para el análisis son; la presión de salida del compresor K-200 y la presión de la salida de la válvula VLV-202, la patente sugiere los valores hasta 32 psia y 20 psia respectivamente, de manera que el análisis se realiza a partir de estos valores.

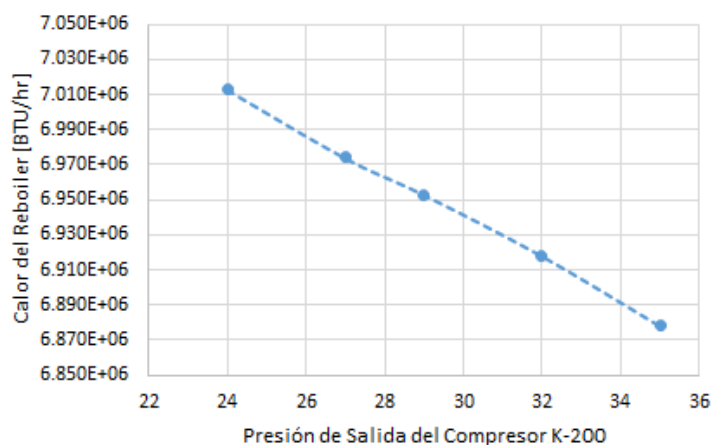
La presión de salida del compresor K-200 tiene directa relación con la potencia requerida por el equipo para producir dicha presión y efecto proporcional en la temperatura de salida del gas a ser comprimido. Como se ve en la Tabla 5.15, el incremento de la temperatura del vapor de amina pobre o corriente 210A se da por la interacción entre las moléculas de gas por efecto de la compresión, al ingresar la corriente 210A en la torre regeneradora aporta el calor ganado y en consecuencia reduce el requerimiento de calor en el reboiler como se muestra en la Figura 5.12.

Considerando la composición molar de la corriente 210A es 99.95 % de vapor de agua no se tiene pérdida de la amina por degradación. La presión máxima a la salida del compresor K-200 es de 32 psia.

Tabla 5.15 Presión de Salida del Compresor K-200 – Impacto al Proceso Tecnología 1

Presión de Salida K-200 [psia]	24	27	29	32	35
Temperatura Corriente 210A [°F]	332.4	361.4	379.4	404.5	427.8
Calor del Reboiler [BTU/hr]	7.013E+06	6.974E+06	6.953E+06	6.918E+06	6.878E+06
K-200 Potencia [Hp]	61.09	76.91	86.72	100.6	113.4

Fuente: Elaboración propia, datos obtenidos de la *Simulación en Hysys V8.8*.

Figura 5.12 Efecto de la Presión de Salida de K-200 en el Reboiler – Tecnología 1

Fuente: Elaboración propia, con datos obtenidos de la *Simulación en Hysys V8.8*.

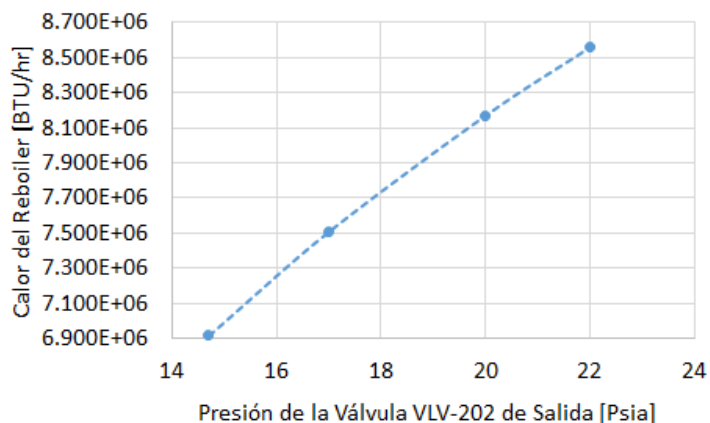
La válvula VLV-202 se instala en la salida del fondo de la torre regeneradora, controla la presión y caudal de amina pobre que ingresa al separador V-203. A medida que aumenta la presión de salida de la válvula, la presión en la torre regeneradora incrementa produciendo los efectos señalados en el apartado 5.1.1.3, el separador recibe menor caudal de amina pobre, por lo cual, reduce la fracción de vapor y en consecuencia el flujo molar al compresor como se muestra en la Tabla 5.16. La reducción de flujo molar repercute en el flujo molar de la corriente 210A que ingresa a la torre, reduciendo el aporte calor en la torre y elevando el calor en el reboiler (Figura 5.13) para mantener la temperatura de regeneración de la amina.

Tabla 5.16 Presión de Salida de la Válvula VLV-202 – Impacto al Proceso Tecnología 1

Presión de Salida de la Válvula VLV-202 [psia]	14.7	17	20	22
Cantidad de Flujo al Compresor K-200 [lbmol/hr]	167.50	139	105.7	85.39
Calor del Reboiler [BTU/hr]	6.918E+06	7.510E+06	8.170E+06	8.558E+06

Fuente: Elaboración propia, datos obtenidos de la *Simulación en Hysys V8.8*.

Figura 5.13 Efecto de la Presión de Salida de VLV-202 en el Reboiler – Tecnología 1



Fuente: Elaboración propia, con datos obtenidos de la *Simulación en Hysys V8.8*.

5.1.3 Análisis Paramétrico de la Tecnología 2 - Incorporación de Vapor Re-comprimido y Corrientes separadas.

El proceso de la tecnología 2 - Incorporación de Vapor Comprimido y Corrientes separadas, se realiza a partir de los parámetros operativos de la planta base, de manera que el análisis paramétrico es necesario en las secciones donde la tecnología incorpora equipos adicionales en el proceso.

5.1.3.1 Sección Contactora – Tecnología 2.

La tecnología 2, adiciona la corriente de amina semi-pobre que recibe el mismo acondicionamiento de la amina pobre para ingresar a la torre contactora, por lo cual se adiciona un aero-enfriador y una bomba en la sección contactora.

El análisis paramétrico de la temperatura de la amina semi-pobre, produce los mismos efectos al proceso que la corriente de amina pobre que se vio en el análisis paramétrico de la planta base juntamente a los demás parámetros de la Tabla 5.17.

El proceso se limita a las condiciones de la planta base, por lo cual, la temperatura de amina semi-pobre no debe sobrepasar la temperatura de amina pobre para no alterar el funcionamiento de la torre contactora. Los parámetros de la simulación se presentan en la Tabla 5.17.

Tabla 5.17 Parámetros de la Sección Contactora – Tecnología 2

Parámetro	Valor	Unidad
Numero de Platos de la Torre Contactora T-200	20,0	-
Presión Amina Pobre	1212,0	psia
Temperatura de Amina Pobre	125,20	°F
Temperatura Amina Semi-Pobre	125,20	°F
Presión de Alimentación	1214,0	psia
Temperatura de Alimentación	86,2	°F
Presión de Operación de la Torre Contactora T-100	1212-1214	psia

Fuente: Elaboración propia, datos obtenidos de la *Simulación en Hysys V8.8*.

5.1.3.2 Sección Intercambiador de Calor – Tecnología 2.

La tecnología 2, incorpora al proceso una caja fría LNG -300 que permite el intercambio de calor de tres corrientes; amina rica (corriente 304-304'), amina pobre (corriente 311A-311B) y amina semi-pobre (corriente 312-312A), Como se muestra en la Tabla 5.18, la temperatura de la amina rica alcanza los 216.60°F (mucho más caliente que en la planta base que alcanza los 205°F), por tanto la corriente aporta calor a su ingreso en la torre regeneradora al igual que la corriente 310', reduciendo el gasto energético en el reboiler.

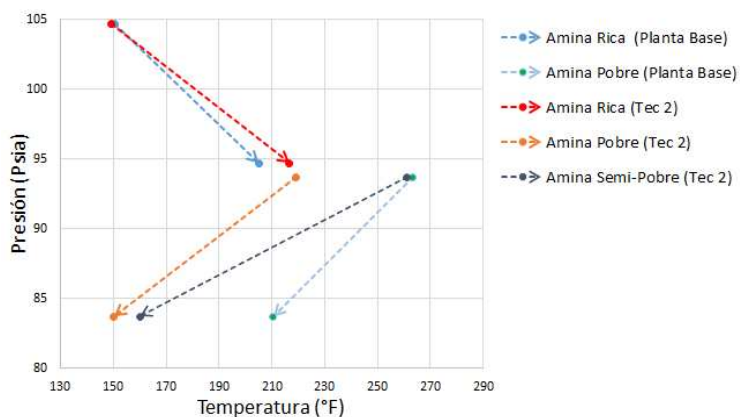
Similar a la planta base, la variable de operación es la temperatura de la corriente 304', su análisis paramétrico produce los mismos efectos al proceso que la temperatura de la corriente 104' que se vio en el análisis paramétrico de la planta base.

En la Figura 5.14, se muestra las corrientes que entran en contacto en el intercambiador de la planta base y la tecnología 2 en las mismas condiciones de presión de entrada y salida, lo que permite comparar la temperatura de la corriente de amina pobre que se dirige a la torre contactora, esta temperatura es mucho menor en la tecnología 2, donde el aero-enfriador debe retirar menor calor de la corriente para que ingrese a la torre regeneradora, lo cual se traduce en un ahorro energético en el acondicionamiento de la corriente. Adicionalmente la corriente de amina semi-pobre sale del intercambiador a 160°F y requiere de un acondicionamiento propio.

Tabla 5.18 Parámetros de la Sección Intercambiador de Calor – Tecnología 2

Corriente de Entrada	Temperatura [°F]	Corriente de Salida	Temperatura [°F]
304	149.20	304'	216.60
311A	219.20	311B	150.10
312	261.10	312A	160.00

Fuente: Elaboración propia, datos obtenidos de la *Simulación en Hysys V8.8*.

Figura 5.14 Entradas y Salidas al Intercambiador de Calor para la Planta Base y la Tecnología 2

Fuente: Elaboración propia, con datos obtenidos de la *Simulación en Hysys V8.8*.

5.1.3.3 Sección Regeneradora – Tecnología 2.

La tecnología 2 incorpora en la configuración del proceso una tee (TEE-300) y mantiene los equipos de la tecnología 1 en la sección regeneradora, por lo cual, el resultado de la influencia de los parámetros en el proceso es semejante al análisis realizado para la tecnología 1. Los parámetros de la simulación se presentan en la Tabla 5.19.

Tabla 5.19 Parámetros de la Sección Regeneradora – Tecnología 2

Parámetro	Unidad	Valor
Numero de Platos Torre Regeneradora R-300	-	20
Presión de Operación de la Torre R-300 Cabeza	psia	25
Presión de Operación de la Torre R-300 Fondo	psia	32
Flujo Molar de Reflujo	lbmol/hr	257.5
Presión de Salida del Compresor K-300	psia	32
Presión de Salida de la Válvula VLV-302	psia	14,7
Proporción de la Corriente hacia el Intercambiador de Calor	-	0,10
Proporción de la Corriente hacia el Compresor	-	0,90

Fuente: Elaboración propia, datos obtenidos de la *Simulación en Hysys V8.8*.

Varios de los parámetros de la Tabla 5.19 se analizaron para la planta base y la tecnología 1, el resultado del impacto al proceso es el mismo para la tecnología 2, sin embargo, la TEE-300 que divide la corriente 309 (amina pobre) en las corrientes 309A (fluye al Intercambiador de Calor) y 309B (fluye al Compresor) con una proporción de flujo en cada corriente, es un parámetro de análisis en esta sección.

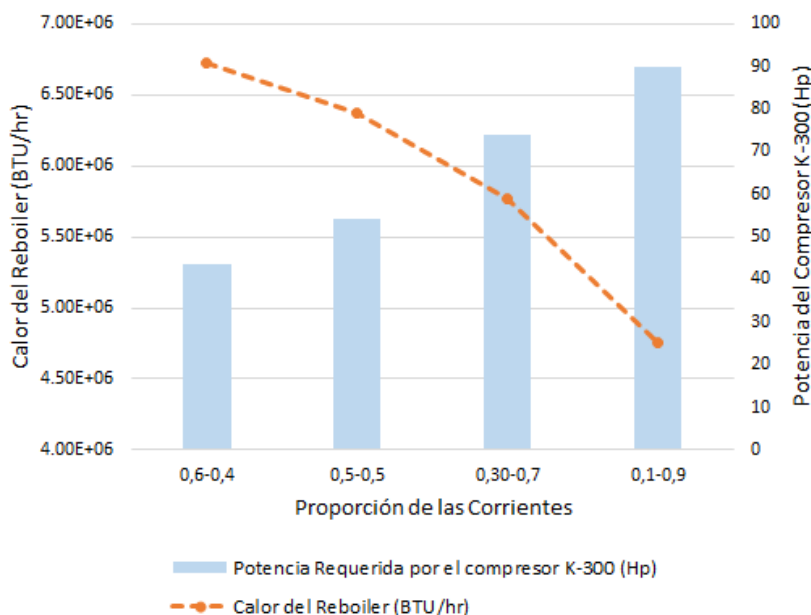
El análisis se realiza a partir de la variación de proporción de flujo al Intercambiador de calor – Compresora como se muestra en la Tabla 5.20 y la Figura 5.15. La reducción significativa del calor en el reboiler se consigue a mayor flujo que debe pasar por el compresor, para ingresar a la torre regeneradora y aportar el calor ganado por efecto de la compresión, incrementando la potencia en el compresor como se ve en la Figura 5.15.

Tabla 5.20 Proporción de las Corrientes – Impacto al Proceso Tecnología 2

Proporción de las Corrientes	0,6-0,4	0,5-0,5	0,30-0,7	0,1-0,9
Potencia Requerida por el compresor K-300 [Hp]	43.53	54.16	73.78	89.90
Calor del Reboiler [BTU/hr]	6.72E+06	6.37E+06	5.77E+06	4.75E+06

Fuente: Elaboración propia, datos obtenidos de la *Simulación en Hysys V8.8*.

Figura 5.15 Efecto de la Proporción de las Corrientes en el Reboiler – Tecnología 2



Fuente: Elaboración propia, con datos obtenidos de la *Simulación en Hysys V8.8*.

La presión de salida del compresor K-300 es de 32 psia con una proporción de flujo al Intercambiador de calor – Compresora de 0.1 y 0.9 respectivamente. La temperatura que puede alcanzar la corriente 310', no compromete la degradación de la amina por componerse de 99.94 % molar de vapor de agua.

5.1.4 Análisis Paramétrico de la Tecnología 3 - Procedimiento mejorado de Flujo Dividido.

El proceso de la tecnología 3 - Procedimiento mejorado de Flujo Dividido, se realiza a partir de los parámetros operativos de la planta base y la tecnología 2, de manera que el análisis paramétrico es necesario en las secciones donde la tecnología incorpora equipos adicionales en el proceso.

5.1.4.1 Sección Contactora – Tecnología 3.

La tecnología 3, adiciona la corriente de amina semi-pobre que recibe el mismo acondicionamiento de la amina pobre para ingresar a la torre contactora, por lo cual se adiciona un aero-enfriador y una bomba, además, se instala una tee (TEE-400) después del separador de la corriente de amina rica para llevar dos corrientes al intercambiador de calor.

La única variable operativa es la temperatura de la amina semi-pobre, el cual, produce los mismos efectos al proceso que la corriente de amina pobre que se vio en el análisis paramétrico de la planta base juntamente a los demás parámetros de la Tabla 5.21.

Tabla 5.21 Parámetros de la Sección Contactora – Tecnología 3

Parámetro	Valor	Unidad
Numero de Platos de la Torre Contactora T-400	20,0	-
Presión Amina Pobre	1212,0	psia
Temperatura de Amina Pobre	125.20	°F
Temperatura Amina Semi-Pobre	125.30	°F
Presión de Alimentación	1214,0	psia
Temperatura de Alimentación	86,2	°F
Presión de Operación de la Torre Contactora T-100	1212-1214	psia

Fuente: Elaboración propia, datos obtenidos de la *Simulación en Hysys V8.8*.

El proceso se limita a las condiciones de la planta base, por lo cual, la temperatura de amina semi-pobre no debe sobrepasar la temperatura de amina pobre para no alterar el funcionamiento de la torre contactora. Los parámetros de la simulación se presentan en la Tabla 5.21.

5.1.4.2 Sección Intercambiador de Calor – Tecnología 3.

La tecnología 3, incorpora al proceso una caja fría LNG -400 que permite el intercambio de calor de cuatro corrientes:

- Amina Rica porción A (404A-404A´)
- Amina Rica porción B (404B-404B´)
- Amina Pobre (408´-408A)
- Amina Semi-pobre (406´-406A)

Como se muestra en la Tabla 5.22, la temperatura de la amina rica A y B alcanzan los 210°F y 246°F respectivamente (mucho más caliente que en la planta base que alcanza los 205°F), por tanto, las corrientes aportan mayor calor al ingresar en las torres regeneradoras, reduciendo el gasto energético en el reboiler respectivo.

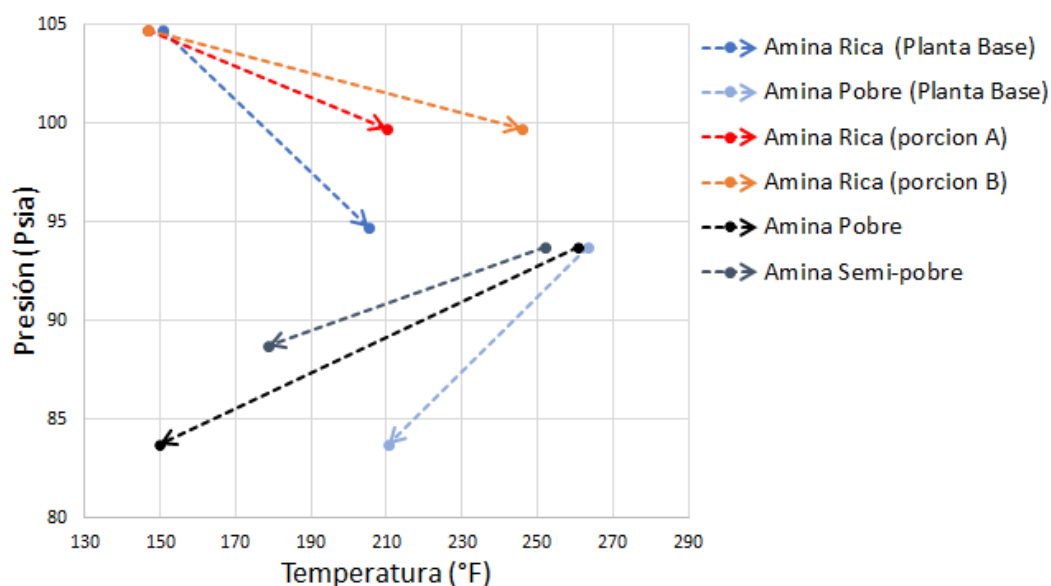
Similar a la planta base, la variable de operación es la temperatura de la corriente que ingresa a la regeneradora, en este caso son las corrientes 404A´ y 404B´- 412, cada una de las variables producen los mismos efectos al proceso que la temperatura de la corriente 104´ que se vio en el análisis paramétrico de la planta base.

En la Figura 5.16, se muestra las corrientes que entran en contacto en el intercambiador de la planta base y la tecnología 3, lo que permite comparar la temperatura de la corriente de amina pobre que se dirige a la torre contactora, esta temperatura es mucho menor en la tecnología 3, donde el aero-enfriador debe retirar menor calor de la corriente para que ingrese a la torre regeneradora, lo cual se traduce en un ahorro energético en el acondicionamiento de la corriente. Adicionalmente la corriente de amina semi-pobre sale del intercambiador a 178.6°F y requiere de un acondicionamiento propio.

Tabla 5.22 Parámetros de la Sección Intercambiador de Calor – Tecnología 3

Corriente de Entrada	Temperatura [°F]	Corriente de Salida	Temperatura [°F]
404A	146,70	404A'	210,00
404B	146,70	404B'	246,00
408'	260,60	408A	149,70
406'	251,80	406A	178,60

Fuente: Elaboración propia, datos obtenidos de la *Simulación en Hysys V8.8*.

Figura 5.16 Entradas y Salidas al Intercambiador de Calor para la Planta Base y la Tecnología 2

Fuente: Elaboración propia, con datos obtenidos de la *Simulación en Hysys V8.8*.

5.1.4.3 Sección Regeneradora – Tecnología 3.

La tecnología 3 incorpora equipos adicionales al proceso; una torre adicional R-400 con la mitad de platos en las mismas condiciones de presión que la torre principal como sugiere la patente y una bomba P-400 de amina semi-pobre que sale de la torre R-400. En la configuración del proceso se integra dos mezcladores de flujo; el MIX 401 (une las corrientes 404B y 412) y MIX 402 (une las corrientes 405 y 407) que se describen en el apartado 4.5.3. Los parámetros de la simulación se presentan en la Tabla 5.19.

Tabla 5.23 Parámetros de la Sección Regeneradora – Tecnología 3

Parámetro	Unidad	Valor
Numero de Platos Torre Regeneradora R-401	-	20
Numero de Platos Torre Regeneradora R-400	-	10
Presión de Operación de la Torre R-401 Cabeza	psia	25
Presión de Operación de la Torre R-401 Fondo	Psia	32
Presión de Operación de la Torre R-400 Cabeza	Psia	25
Presión de Operación de la Torre R-400 Fondo	Psia	32
Flujo Molar de Reflujo de R-400	lbmol/hr	107.90
Flujo Molar de Reflujo de R-401	lbmol/hr	172.80

Fuente: Elaboración propia, datos obtenidos de la *Simulación en Hysys V8.8*.

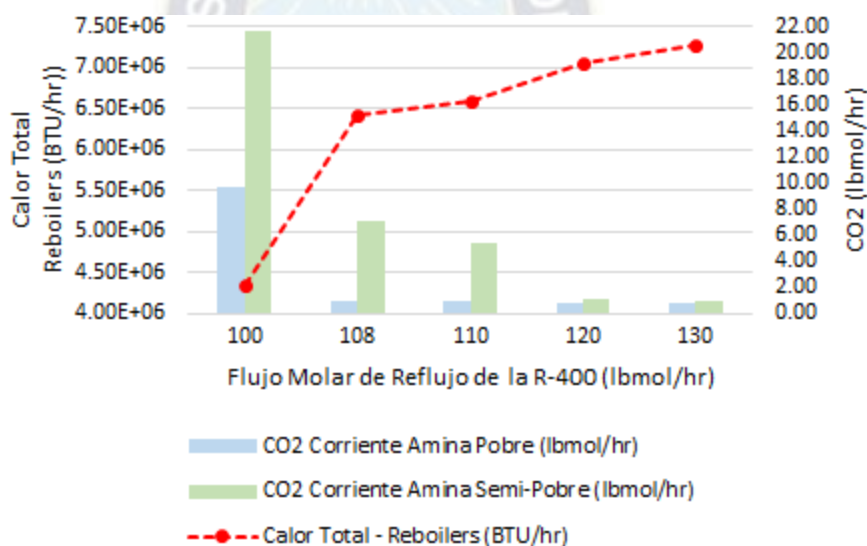
El análisis de varios de los parámetros de la Tabla 5.23 tienen impacto en el proceso de la tecnología 3 de modo similar a la planta base, de manera que no se realiza el análisis nuevamente, sin embargo, la presión de operación de la torre R-400 y el Flujo Molar de Reflujo de R-400 que es el flujo de la corriente de gas ácido que sale por el tope de la torre R-400 (corriente 405), son variables que requieren del análisis debido a incidir en el proceso de la torre principal R-401.

El Flujo Molar de Reflujo de la torre R-400 afecta de forma directa el gasto energético en el reboiler de la torre R-400 y R-401. El incremento de reflujo en la torre R-400 favorece la pérdida de calor en la torre que se compensa con mayor calor en el reboiler, también a causa del incremento, la corriente arrastra mayor contenido de gases ácidos que deben ser separados en la torre R-401 a dispendio de mayor calor en el reboiler, el total de calor requerido en los reboilers se muestran en la Tabla 5.24 para cada caso. El proceso es mucho más sensible al efecto del calor del reboiler en las torres, por ejemplo, el flujo molar de CO₂ en la amina pobre y semi-pobre que salen del fondo de la torre R-401 y R-400 respectivamente varía de manera drástica como se observa en la Figura 5.17 para los valores de 100 y 107.9 lbmol/hr con el riesgo de obtener un gas dulce fuera de especificación para valores menores a 107.9 lbmol/hr.

Tabla 5.24 Flujo Molar de Reflujo de R-400 – Impacto al Proceso Tecnología 3

Flujo Molar de Reflujo de la R-400 (lbmol/hr)	100	108	110	120	130
CO ₂ Corriente Amina Pobre (lbmol/hr)	11.3919	0.6743	0.2989	0.2438	0.1968
CO ₂ Corriente Amina Semi-Pobre (lbmol/hr)	16.3087	5.8091	3.2890	0.3496	0.2845
Reboiler Regeneradora R-400 (BTU/hr)	2.3020E+06	3.2520E+06	3.5020E+06	3.8560E+06	4.0210E+06
Reboiler Regeneradora R-401 (BTU/hr)	2.0630E+06	3.1140E+06	3.1250E+06	3.3020E+06	3.4860E+06
Calor Total - Reboilers (BTU/hr)	4.3650E+06	6.3660E+06	6.6270E+06	7.1580E+06	7.5070E+06

Fuente: Elaboración propia, datos obtenidos de la *Simulación en Hysys V8.8*.

Figura 5.17 Efecto del Flujo Molar de Reflujo de R-400 en el Reboiler – Tecnología 3

Fuente: Elaboración propia.

La presión de operación de la torre regeneradora R-400 se analiza para diferentes presiones de cabezal-fondo como se muestra en la Tabla 5.25. El aumento de la presión en la torre principalmente se relaciona con el incremento de calor en el reboiler que eleva no solo la presión de vapor de agua, sino también la temperatura en la torre para favorecer la captura de CO₂ y obtener una corriente de amina semi-pobre con menor contenido de CO₂ por el fondo como se muestra en la Tabla 5.25, y por el cabezal la corriente 405 arrastra mayor contenido de gases ácidos que deben ser separados en la

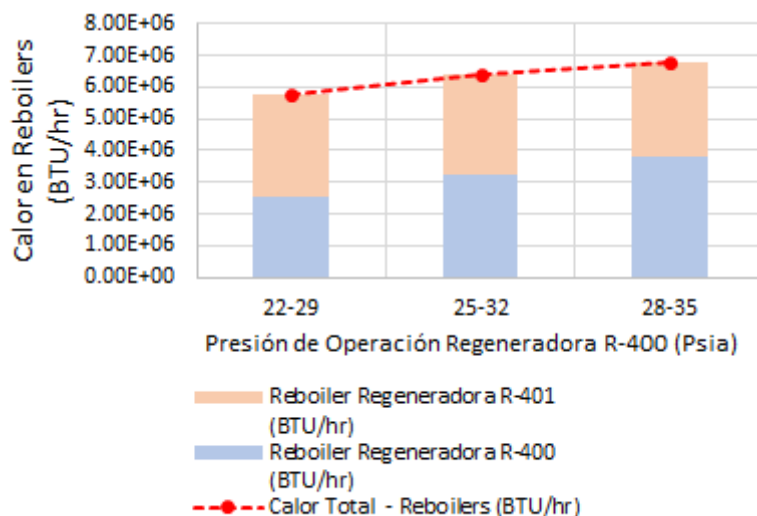
torre R-401 a expendio de mayor calor en el reboiler (Tabla 5.25). Por otro lado, bajas presiones de operación en la torre reducen el calor en el reboiler de la torre R-400 y R-401 como se muestra en la Figura 5.18 con el riesgo de obtener un gas dulce fuera de especificación para valores menores de 22-29 psia de presión en la torre (Tabla 5.25).

Tabla 5.25 Presión de Operación Regeneradora R-400 – Impacto al Proceso Tecnología 3

Presión de Operación Regeneradora R-400 (Psia)	22-29	25-32	28-35
CO ₂ en la Corriente Amina Pobre (lbmol/hr)	22-29	25-32	28-35
CO ₂ en la Corriente Amina Semi-Pobre (lbmol/hr)	0.2602	0.6743	1.9839
Reboiler Regeneradora R-400 (BTU/hr)	12.3107	5.8091	0.7822
Reboiler Regeneradora R-401 (BTU/hr)	2.559E+06	3.240E+06	3.814E+06
Calor Total - Reboilers (BTU/hr)	3.187E+06	3.180E+06	2.975E+06

Fuente: Elaboración propia, datos obtenidos de la *Simulación en Hysys V8.8*.

Figura 5.18 Efecto del Presión de Operación Regeneradora R-400 en el Reboiler – Tecnología 3



Fuente: Elaboración propia, con datos obtenidos de la *Simulación en Hysys V8.8*.

Considerando la sensibilidad del proceso a las variables operativas con el riesgo de obtener un gas dulce fuera de especificación, la convergencia óptima del proceso se alcanza con 125.2°F y 125.3°F de temperatura de la amina pobre y amina semi-pobre respectivamente al ingreso a la torre contactora, además de los parámetros de la Tabla 5.23.

5.1.5 Análisis Paramétrico de la Tecnología 4 – Intercambio de Calor Interno.

El proceso de la tecnología 4 – Intercambio de Calor Interno, se realiza a partir de los parámetros operativos de la planta base, de manera que el análisis paramétrico es necesario en las secciones donde la tecnología incorpora equipos adicionales en el proceso.

5.1.5.1 Sección Contactora – Tecnología 4.

La tecnología 4 mantiene la configuración y equipos de la planta base en la sección contactora, por lo cual, el resultado de la influencia de los parámetros sobre el proceso es similar que la planta base. Los parámetros de la simulación se presentan en la Tabla 5.26.

Tabla 5.26 Parámetros de la Sección Contactora – Tecnología 4

Parámetro	Valor	Unidad
Numero de Platos de la Torre Contactora T-500	20,0	-
Presión Amina Pobre	1212,0	Psia
Temperatura de Amina Pobre	125,20	°F
Presión de Alimentación	1214,0	Psia
Temperatura de Alimentación	86,2	°F
Presión de Operación de la Torre Contactora T-500	1212-1214	Psia

Fuente: Elaboración propia, datos obtenidos de la *Simulación en Hysys V8.8*.

5.1.5.2 Sección Intercambiador de Calor – Tecnología 4.

La tecnología 1, utiliza el mismo intercambiador de calor amina – amina de la planta base con las mismas condiciones de operación en la simulación. A diferencia de la planta base, la amina pobre (corriente 512) sale a menor temperatura de la torre contactora (250°F) lo que implica menor gasto energético en el reboiler y permite que la corriente de amina rica (corriente 504´) alcance los 204°F como máximo (Tabla 5.27).

Similar a la planta base, la variable de operación es la temperatura de la corriente 504´, su análisis paramétrico produce los mismos efectos al proceso que la temperatura de la corriente 104´ que se vio en el análisis paramétrico de la planta base.

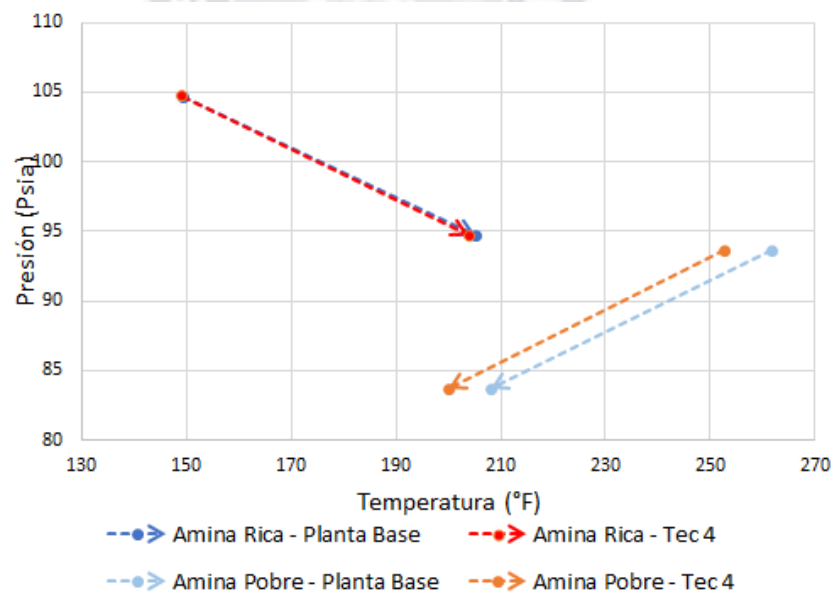
En la Figura 5.11, se muestra las corrientes que entran en contacto en el intercambiador de la planta base y la tecnología 4 en las mismas condiciones de presión de entrada y salida, lo que permite comparar la temperatura de la corriente de amina pobre que se dirige a la torre contactora, esta temperatura es menor en la tecnología 4, donde el aerofriador debe retirar menor calor de la corriente para que ingrese a la torre regeneradora, lo cual se traduce en un ahorro energético en el acondicionamiento de la corriente.

Tabla 5.27 Parámetros de la Sección Intercambiador de Calor – Tecnología 4

Corriente de Entrada	Temperatura [°F]	Corriente de Salida	Temperatura [°F]
504	149.20	504'	204.00
512	252.60	512A	200.00

Fuente: Elaboración propia, datos obtenidos de la *Simulación en Hysys V8.8*.

Figura 5.19 Entradas y Salidas del intercambiador de Calor para la planta Base y la Tecnología 4



Fuente: Elaboración propia, con datos obtenidos de la *Simulación en Hysys V8.8*.

5.1.5.3 Sección Regeneradora – Tecnología 4.

La tecnología 4 incorpora al proceso una torre adicional R-501 de 10 platos que opera juntamente con la torre R-500 también de 10 platos a través de un intercambiador de calor E-501. Los parámetros de la simulación se presentan en la Tabla 5.28 y 5.29.

Tabla 5.28 Parámetros de la Sección Regeneradora – Tecnología 4

Parámetro	Unidad	Valor
Numero de Platos Torre Regeneradora R-500	-	10
Numero de Platos Torre Regeneradora R-501	-	10
Presión de Operación de la Torre R-500 Cabeza	Psia	25
Presión de Operación de la Torre R-500 Fondo	Psia	28
Presión de Operación de la Torre R-501 Cabeza	Psia	28
Presión de Operación de la Torre R-501 Fondo	Psia	32
Flujo Molar de Reflujo de la R-500	lbmol/hr	240,00
Flujo Molar de Reflujo de la R-501	lbmol/hr	252,40

Fuente: Elaboración propia, datos obtenidos de la *Simulación en Hysys V8.8*.

Tabla 5.29 Parámetros del Intercambio de Calor de la Sección Regeneradora – Tecnología 4

Corriente de Entrada	Temperatura [°F]	Corriente de Salida	Temperatura [°F]
507	251.80	507A	252.20
509	261.30	509A	252.30

Fuente: Elaboración propia, datos obtenidos de la *Simulación en Hysys V8.8*.

El análisis de los parámetros de la Tabla 5.28 tienen impacto en el proceso de la tecnología 4 de modo similar a la planta base, de manera que no se realiza el análisis nuevamente, sin embargo, el Flujo Molar de Reflujo de R-500 que se refiere al flujo de la corriente de gas ácido que sale por el tope de la torre R-500 (corriente 506), es una variable que requieren del análisis debido a incidir en el proceso de la torre principal R-501.

La Figura 5.20 presenta gráficamente los valores de la Tabla 5.30, donde se observa el gasto energético del reboiler de la torre R-500 y R-501 para diferentes valores de Flujo Molar de Reflujo de R-500. A medida el reflujo de la torre R-500 incrementa, el calor del reboiler aumenta para compensar la leve caída de temperatura, lo cual, eleva la temperatura de la corriente 507 (amina semi-pobre) que es cada vez más ácida por el incremento de reflujo. La función del intercambiador de calor E-501 es mantener, o en lo posible elevar la temperatura de la corriente 507 que ingresa por el cabezal de la torre R-501, la temperatura y la carga ácida de la corriente influyen en el reboiler de la torre R-501 como se muestra en la Figura 5.20.

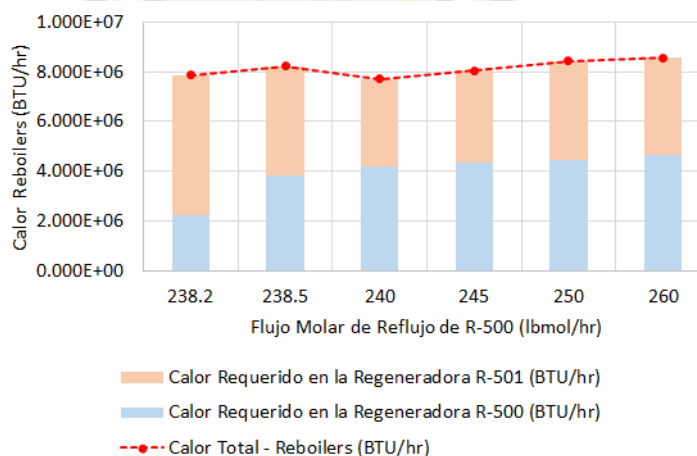
Considerando el gasto energético total en el reboiler de ambas torres y la conservación de la temperatura de la corriente 507 en el intercambiador de calor (Tabla 5.28), la convergencia óptima del proceso se alcanza con los parámetros de la Tabla 5.28.

Tabla 5.30 Flujo Molar de Reflujo de R-500 – Impacto al Proceso Tecnología 4

Flujo Molar de Reflujo de R-500 (lbmol/hr)	238.2	238.5	240	245	250	260
Calor Requerido en la Regeneradora R-500 (BTU/hr)	2.207E+06	3.855E+06	4.190E+06	4.330E+06	4.439E+06	4.653E+06
Calor Requerido en la Regeneradora R-501 (BTU/hr)	5.669E+06	4.381E+06	3.522E+06	3.709E+06	3.997E+06	3.923E+06
Calor Total - Reboilers (BTU/hr)	7.876E+06	8.236E+06	7.712E+06	8.039E+06	8.436E+06	8.576E+06

Fuente: Elaboración propia, datos obtenidos de la *Simulación en Hysys V8.8*.

Figura 5.20 Efecto del Flujo Molar de Reflujo de R-500 en el Reboiler – Tecnología 4



Fuente: Elaboración propia, con datos obtenidos de la *Simulación en Hysys V8.8*.

5.2 Evaluación Energética de las Tecnologías.

La evaluación energética se realiza a partir de la comparación del gasto energético en el proceso de remoción de CO₂ de las tecnologías con la planta base de Yapacaní. El gasto energético de cada uno de los procesos se concentra principalmente en el calor requerido

en el reboiler de la sección regeneradora y las potencias requeridas por las bombas y compresoras del proceso.

5.2.1 Calor requerido en el Reboiler.

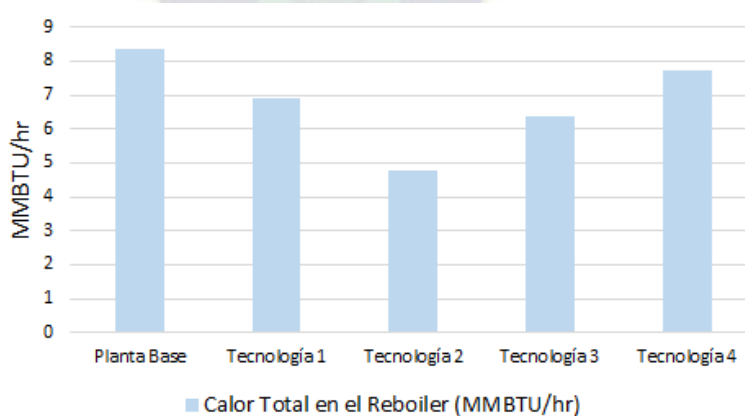
El resultado del consumo de energía utilizada en el reboiler de la columna de regeneración para cada uno de los procesos se presenta en la Tabla 5.31. La tecnología 3 y 4 emplean dos torres regeneradoras, por lo cual, se considera el total de calor requerido en el proceso para elaborar la Figura 5.21.

Tabla 5.31 Consumo Energético del Reboiler

Tecnología	Regeneradoras	Calor Requerido (MMBTU/hr)	Total (MMBTU/hr)
Planta Base	R-100	8,339	8,339
Tecnología 1	R-200	6,918	6,918
Tecnología 2	R-300	4,753	4,753
Tecnología 3	R-400	3,252	6,366
	R-401	3,114	
Tecnología 4	R-500	4,190	7,712
	R-501	3,522	

Fuente: Elaboración propia, datos obtenidos de la *Simulación en Hysys V8.8*.

Figura 5.21 Consumo Energético del Reboiler por Tecnología



Fuente: Elaboración propia, con datos obtenidos de la *Simulación en Hysys V8.8*.

Como se muestra en la Figura 5.21, cada tecnología tiene impacto en la reducción de la potencia del reboiler de la sección regeneradora, sin embargo, el menor consumo

energético del reboiler en el proceso de remoción de CO₂ se consigue con la tecnología 2.

5.2.2 Potencia en Compresores y Bombas.

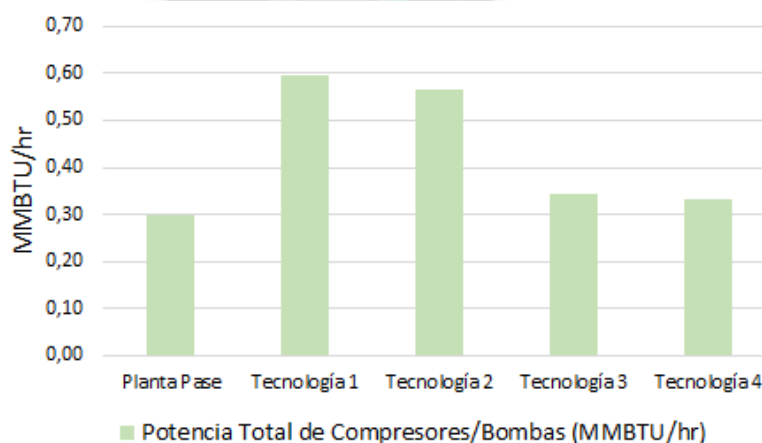
En la Tabla 5.32 y Figura 5.22 se presentan las potencias requeridas en los compresores y bombas incorporadas al proceso de remoción de CO₂ para la optimización energética conforme a cada tecnología.

Tabla 5.32 Potencia en Compresores y Bombas

Tecnología	Numero de Bombas	Potencia Total de las Bombas (Hp)	Numero de Compresores	Potencia Total de los Compresores (Hp)	Potencia Total (Hp)	Potencia Total (MMBTU/hr)
Base	3	117,44	0	0,00	117,44	0,30
Tecnología 1	3	132,72	1	100,60	233,32	0,59
Tecnología 2	5	132,42	1	89,90	222,32	0,57
Tecnología 3	5	135,53	0	0,00	135,53	0,34
Tecnología 4	3	130,80	0	0,00	130,80	0,33

Fuente: Elaboración propia, datos obtenidos de la *Simulación en Hysys V8.8*.

Figura 5.22 Potencia en Compresores y Bombas por Tecnología



Fuente: Elaboración propia, con datos obtenidos de la *Simulación en Hysys V8.8*.

Como se muestra en la Figura 5.22, las tecnologías 1 y 2 requieren de mayor potencia debido a incorporar al proceso una compresora, no obstante, la potencia total de los compresores y bombas no difiere de gran manera entre las tecnologías y la planta base.

5.2.3 Resultados de la Evaluación Energética.

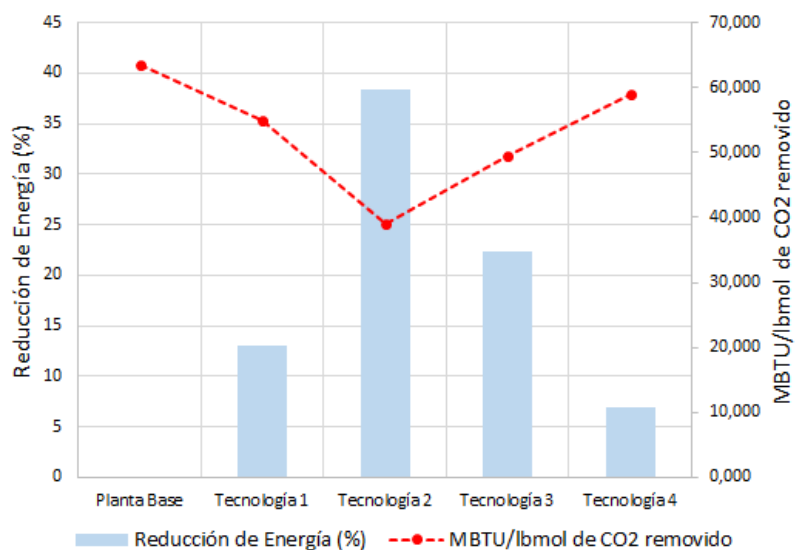
El gasto energético total de cada uno de los procesos, resulta de la sumatoria de la potencia total del reboiler (Tabla 5.31) con la potencia total de compresores y bombas (Tabla 5.32), de la relación de la potencia total con el CO₂ removido en cada proceso se obtiene la cantidad de energía en BTU que se requiere para remover 1 lbmol de CO₂, además, con relación a la potencia total de la planta base se puede calcular el porcentaje de reducción de energía que se alcanza con cada tecnología como se muestra en la Tabla 5.33 y la Figura 5.23.

Tabla 5.33 Gasto Energético Total de los Procesos

Tecnología	Potencia Total (MMBTU/hr)	CO ₂ Removido (lbmol/hr)	MBTU/lbmol de CO ₂ removido	Reducción de Energía (%)
Planta Base	8,64	135,9823	63,522	-
Tecnología 1	7,51	136,5776	55,000	13,037
Tecnología 2	5,32	136,5169	38,961	38,425
Tecnología 3	6,71	135,7152	49,449	22,308
Tecnología 4	8,04	136,5466	58,917	6,865

Fuente: Elaboración propia, datos obtenidos de la *Simulación en Hysys V8.8*.

Figura 5.23 Reducción y Requerimiento de Energía de Remoción de CO₂



Fuente: Elaboración propia, con datos obtenidos de la *Simulación en Hysys V8.8*.

La tecnología con menor gasto energético es la Tecnología 2, con un índice de remoción de 38,961 MBTU por lbmol de CO₂ removido y una potencial total del proceso de 5,32 MMBTU/hr que representa una reducción de energía del 38,425 % con respecto a la Planta Base de Yapacaní.



CAPÍTULO 6

EVALUACIÓN ECONÓMICA

La evaluación económica es una herramienta que permitirá establecer la conveniencia o inconveniencia técnico-económica de la implementación de las alternativas tecnológicas aplicadas a la optimización energética del proceso de remoción de CO₂ de la planta de Yapacaní mediante el estudio financiero, recolección de información para documentar las alternativas bajo evaluación y selección de la alternativa más conveniente según indicadores financieros (Serrano., 2013, p. 22).

Según Sapag (2007) la necesidad de evaluar las alternativas tecnológicas surge de la existencia de procesos con altos costos de inversión, pero con bajos costos de operación o viceversa (p. 35), por lo cual, en este capítulo se cuantifica el beneficio de cada una de las tecnologías y se evalúan en relación al proceso convencional de remoción con amina (Planta base) con el enfoque de costo-eficiencia considerando los costos de inversión (CAPEX) costos operativos (OPEX) y el cargo por depreciación.

6.1 Costos de inversión (CAPEX).

Es la parte del estudio financiero que abarca el costo relacionado a los activos que se requieren para la realización de cada proceso (Sapag., 2007, p. 337), están constituidos por los costos directos o costos fijos de inversión y costos indirectos.

Los costos de inversión para la Planta Base se extraen de la propuesta económica de la empresa Exterran para la instalación planta de amina en Yapacaní y se presentan en la Tabla 6.1, además, se asume que los costos de provisión, montaje y puesta en marcha de cada equipo corresponde a equipos con las dimensiones determinadas en el simulador Aspen Hysys V8.8.

Las alternativas tecnológicas mantienen la mayoría los equipos empleados en la Planta Base con los mismos parámetros de operación, por lo cual se consideran los mismos

costos, sin embargo, también se incorporan nuevos equipos cuyas dimensiones se determinan con el simulador y se estiman los costos del equipo, montaje y puesta en marcha con Aspen Process Economic Analyzer V8.8 que es una extensión de Aspen Hysys V8.8.

En la Tabla 6.2 se muestra los costos de inversión CAPEX para la Planta Base y las Tecnologías con los totales de costos directos e indirectos.

Tabla 6.1 Costos CAPEX de la Planta Base.

Descripción del Servicio		[USD]
Costo Directo		10.069.990,94
Provisión de Equipo/Montaje y Puesta en Marcha	Total - Aero.enfriador	1.453.677,14
	Total - Intercambiador de Calor	543.639,50
	Total - Bomba	1.546.021,39
	Total - Separador	2.301.159,00
	Torre Regeneradora	1.974.975,30
	Reboiler	522.042,87
	Torre Contactora	1.728.475,74
Costo Indirecto		1.772.037,29
Ingeniería & Gerenciamiento del Proyecto		1.693.777,29
Transporte - Nacionalización		78.260,00
TOTAL CAPEX		11.842.028,23

Fuente: Elaboración propia, datos obtenidos del *Data Book Exterran Holding*, 2011.

Tabla 6.2 Costos CAPEX.

CAPEX	Planta Base	Tecnología 1	Tecnología 2	Tecnología 3	Tecnología 4
Descripción de Servicio	[USD]	[USD]	[USD]	[USD]	[USD]
Costo Directo/Costo Fijo de Inversión					
Provisión de Equipo/Montaje y Puesta en Marcha	10.069.990,94	11.842.851,50	12.904.586,90	14.391.552,65	13.497.153,96
Costo Indirecto					
Ingeniería & Gerenciamiento del Proyecto	1.693.777,29	1.693.777,29	1.693.777,29	1.693.777,29	1.693.777,29
Transporte - Nacionalización	78.260,00	78.260,00	78.260,00	78.260,00	78.260,00
TOTAL	11.842.028,23	13.614.888,79	14.676.624,19	16.163.589,94	15.269.191,25

Fuente: Elaboración propia, datos obtenidos del *Data Book Exterran Holding* y *Aspen Process Economic Analyzer V8.8*.

6.2 Costos operacionales (OPEX).

Los costos OPEX son la totalidad de costos operacionales en que se debe incurrir para llevar a cabo la producción en un proceso (Cohen., 2017). En la Tabla 6.3 se resumen los costos operativos asociados al proceso de la Planta Base y las Tecnologías.

Tabla 6.3 Costos OPEX.

Descripción de Servicio	Planta Base [USD/Año]	Tecnología 1 [USD/Año]	Tecnología 2 [USD/Año]	Tecnología 3 [USD/Año]	Tecnología 4 [USD/Año]
Servicios e Insumos	1.208.022,40	1.073.731,31	770.576,75	948.225,12	1.132.853,73
Mantenimiento de Equipos	210.589,56	251.880,84	237.265,13	239.499,27	292.314,22
Amina	29.700,00	29.700,00	29.700,00	29.700,00	29.700,00
Sueldo del Personal	121.206,84	121.206,84	121.206,84	121.206,84	121.206,84
Beneficios y Aportes del Personal	43.634,45	43.634,45	43.634,45	43.634,45	43.634,45
Seguridad Industrial	2.047,41	2.047,41	2.047,41	2.047,41	2.047,41
Costos Varios	9.482,76	9.482,76	9.482,76	9.482,76	9.482,76
Costos OPEX	1.624.683,42	1.531.683,61	1.213.913,34	1.393.795,85	1.631.239,41

Fuente: Elaboración propia, datos obtenidos del *Data Book Exterran Holding y Aspen Process Economic Analyzer V8.8*.

Entre los costos de servicios e insumos de la Tabla 6.3, se contempla los costos del consumo de energía eléctrica y combustible que requiere cada proceso y se determinan partir del precio de energía eléctrica que establece el Tarifario de la Cooperativa Rural de Electrificación R.L (CRE R. L.) y el precio del diésel recabada de la Agencia Nacional de Hidrocarburos (ANH) para obtener los precios en dólar por unidad de kWh y BTU como se muestra en la Tabla 6.4, los cuales se afectan al consumo energético total resultantes de la simulación de los procesos y de esa manera conocer el requerimiento anual de los insumos de electricidad y diésel como se muestra en la Tabla 6.5.

En la Tabla 6.6, se muestra los costos totales de los servicios e insumos asociados a la Planta Base y las Tecnologías.

Tabla 6.4 Precio de Insumos.

Detalle	Valor	Unidad	Valor	Unidad
Electricidad				
Costo en bolivianos	0,433	Bs/kWh		
1 USD	6.96	Bs	0,062	USD/kWh
Diesel Oil				
Costo en bolivianos	3,72	Bs/l		
Costo en Dólares	0,534	USD/l		
Densidad (15°C)	0,85	kg/l	1,5678E-05	USD/BTU
Poder Calorífico	42275	kJ/kg		
Poder Calorífico	40071,09	BTU/Kg		

Fuente: Elaboración propia, datos obtenidos de *Cooperativa Rural de Electrificación R.L (CRE R. L.)* y *Agencia Nacional de Hidrocarburos (ANH)*.

Tabla 6.5 Costos Anual de Electricidad y Diesel de los Proceso.

	Electricidad [KWh]	Diesel Oil [BTU/h]	Electricidad [USD/h]	Diesel Oil [USD/h]	Electricidad [USD/año]	Diesel Oil [USD/año]
Planta Base	104,90	8.339.000,00	6,50	130,74	56.940,00	1.145.282,40
Tecnología 1	218,02	6.918.000,00	13,52	108,46	118.435,20	950.109,60
Tecnología 2	209,07	4.753.000,00	12,96	74,52	113.529,60	652.795,20
Tecnología 3	127,01	6.366.000,00	7,87	99,81	68.941,20	874.335,60
Tecnología 4	125,42	7.712.000,00	7,78	120,91	68.152,80	1.059.171,60

Fuente: Elaboración propia, con datos obtenidos de la *Simulación en Hysys V8.8*

Tabla 6.6 Servicio e Insumos.

	Planta Base	Tecnología 1	Tecnología 2	Tecnología 3	Tecnología 4
Descripción de Servicio/Insumo	[USD/Año]	[USD/Año]	[USD/Año]	[USD/Año]	[USD/Año]
Electricidad	56.940,00	118.435,20	113.529,60	68.941,20	68.152,80
Diesel Oil	1.145.282,40	950.109,60	652.795,20	874.335,60	1.059.171,60
Agua	3.600,00	2.986,51	2.051,95	2.748,32	3.329,33
Otros (limpieza, teléfono, etc.)	2.200,00	2.200,00	2.200,00	2.200,00	2.200,00
Servicios e Insumos	1.208.022,40	1.073.731,31	770.576,75	948.225,12	1.132.853,73

Fuente: Elaboración propia, con datos obtenidos de la *Simulación en Hysys V8.8*.

Para los costos de mantenimiento de los equipos de la Tabla 6.3, se considera el mantenimiento preventivo que se refiere al mantenimiento programado de los equipos y se estiman como el 1% del costo neto de los equipos, además el mantenimiento correctivo que se estima como el 5% del costo neto de los equipos en caso de falla o avería de un equipo. Los costos anuales de mantenimiento se detallan en la Tabla 6.7.

Tabla 6.7 Mantenimiento.

Ítem		Planta Base	Tecnología 1	Tecnología 2	Tecnología 3	Tecnología 4
		[USD]	[USD]	[USD]	[USD]	[USD]
Mantenimiento Preventivo	1,0%	4.713,00	5.637,10	5.310,00	5.360,00	6.542,00
Mantenimiento Correctivo	5,0%	23.565,00	28.185,50	26.550,00	26.800,00	32.710,00
Mantenimiento de Equipos		210.589,56	251.880,84	237.265,13	239.499,27	292.314,22

Fuente: Elaboración propia, datos obtenidos del *Data Book Exterran Holding*, 2011.

El costo del reactivo como se muestra en la Tabla 6.3 es igual para la Planta Base y las Tecnologías, debido a que la cantidad de la solución de amina no varía en los diferentes procesos, El precio para las cantidades anuales de amina requerida se presenta en la Tabla 6.8.

Tabla 6.8 Costos Anual de Amina.

Reactivo	Cantidad [l/Año]	Precio [USD/l]	Precio [USD/Año]
Amina	300,00	99,00	29.700,00

Fuente: Elaboración propia, con datos obtenidos de *SIGMA-ALDRICCH Company*.

Los costos operativos que no se ven afectados por la implementación de las tecnologías, son los costos en salarios del personal operativo, los costos destinados a los beneficios y aportes del personal, el costo de la seguridad industrial y costos varios que se detallan en las Tablas 6.9, 6.10, 6.11 y 6.12 respectivamente.

Tabla 6.9 Personal Operativo.

Personal	Cantidad	Sueldo Unitario [Bs/Mes]	Total [Bs/Mes]	Total [USD/Mes]	Total [USD/Año]
Supervisor de Operadora	1	7.000,00	7.000,00	1.005,75	12.069,00
Supervisor de Servicio	1	6.800,00	6.800,00	977,01	11.724,12
Químico Instrumentista	2	5.500,00	11.000,00	1.580,46	18.965,52
Operador de Planta	4	5.000,00	20.000,00	2.873,56	34.482,72
Operador de DCS	2	4.500,00	9.000,00	1.293,10	15.517,20
Mecánico	2	4.500,00	9.000,00	1.293,10	15.517,20
Personal de Apoyo	3	2.500,00	7.500,00	1.077,59	12.931,08
Sueldo del Personal	15,00	35.800,00	70.300,00	10.100,57	121.206,84

Fuente: Elaboración propia, datos obtenidos de *Anuario YPFB Andina*, 2015.

Tabla 6.10 Beneficios y Aportes del Personal.

Ítem		Total [USD/Año]
Previsiones/Aguinaldos	16%	19.393,09
Otros/Antigüedad	4%	4.848,27
AFP	12%	14.544,82
Caja de Salud	4%	4.848,27
Beneficios y Aportes del Personal		43.634,45

Fuente: Elaboración propia, datos obtenidos de *Anuario YPFB Andina*, 2015.

Tabla 6.11 Seguridad Industrial.

	Total [Bs/Año]	Total [USD/Año]
Seguridad Industrial	14.250,00	2.047,41

Fuente: Elaboración propia, datos obtenidos de *Anuario YPFB Andina*, 2015.

Tabla 6.12 Costos Varios.

	Total [Bs/Mes]	Total [USD/Mes]	Total [USD/Año]
Material de Escritorio	500,00	71,84	862,08
Otros	5.000,00	718,39	8.620,68
Costos Varios	5.500,00	790,23	9.482,76

Fuente: Elaboración propia, datos obtenidos de *Anuario YPFB Andina*, 2015.

El gasto por depreciación de equipos es un gasto operativo por tanto su valor debe incluirse en los costos OPEX (Cohen., 2017), por otro lado, los gastos por depreciación

constituyen un gasto no desembolsable que influye en los impuestos e indirectamente en el flujo de caja, por lo cual se presentan independientemente en la Tabla 6.13 considerando una vida útil contable de 20 años para los procesos.

Tabla 6.13 Depreciación.

	Planta Base [USD/Año]	Tecnología 1 [USD/Año]	Tecnología 2 [USD/Año]	Tecnología 3 [USD/Año]	Tecnología 4 [USD/Año]
Costo Capital [USD]	11.842.028,23	13.614.888,79	14.542.576,09	16.163.589,94	15.269.191,25
Tiempo [Año]	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00
Depreciación	592.101,41	680.744,44	727.128,80	808.179,50	763.459,56

Fuente: Elaboración propia, datos obtenidos del *Data Book Exterran Holding*, 2011.

6.3 Evaluación de las alternativas tecnológicas.

Los ingresos económicos de las alternativas tecnológicas son iguales que la Planta Base por el procesamiento de 16 MMPCD en todos los casos, debido a que los ingresos son los mismos y por tanto irrelevantes de ser considerados, por lo que debe seleccionarse la alternativa que tenga el menor valor actualizado de sus costos (Sapag., 2007, p. 35). Por tanto, para la evaluación desde un enfoque costo-eficiencia no se valora los beneficios, si no solo los costos involucrados (Lefort., 2007, p. 15). De esta manera, cada alternativa dispondrá de balances que son propios con el fin de construir los flujos correspondientes con los costos de inversión y operación proyectado para veinte años como se muestra en la Tabla 6.14.

Tabla 6.14 Flujo de Caja de las Tecnologías.

	AÑO 0	AÑO 1 - 18	AÑO 19	AÑO 20
CAPEX				
Total CAPEX - Planta Base	(11.842.028,23)			
Total CAPEX - Tecnología 1	(13.614.888,79)			
Total CAPEX - Tecnología 2	(14.542.576,09)			
Total CAPEX - Tecnología 3	(16.163.589,94)			
Total CAPEX - Tecnología 4	(15.269.191,25)			
OPEX				
Total OPEX - Planta Base		(1.624.683,42)	(1.624.683,42)	(1.624.683,42)

Total OPEX - Tecnología 1	(1.531.683,61)	(1.531.683,61)	(1.531.683,61)
Total OPEX - Tecnología 2	(1.213.913,34)	(1.213.913,34)	(1.213.913,34)
Total OPEX - Tecnología 3	(1.393.795,85)	(1.393.795,85)	(1.393.795,85)
Total OPEX - Tecnología 4	(1.631.239,41)	(1.631.239,41)	(1.631.239,41)

Depreciación			
Depreciación - Planta Base	(592.101,41)	(592.101,41)	(592.101,41)
Depreciación - Tecnología 1	(680.744,44)	(680.744,44)	(680.744,44)
Depreciación - Tecnología 2	(727.128,80)	(727.128,80)	(727.128,80)
Depreciación - Tecnología 3	(808.179,50)	(808.179,50)	(808.179,50)
Depreciación - Tecnología 4	(763.459,56)	(763.459,56)	(763.459,56)

Resultados antes de impuestos			
Planta Base	(2.216.784,83)	(2.216.784,83)	(2.216.784,83)
Tecnología 1	(2.212.428,05)	(2.212.428,05)	(2.212.428,05)
Tecnología 2	(1.941.042,14)	(1.941.042,14)	(1.941.042,14)
Tecnología 3	(2.201.975,35)	(2.201.975,35)	(2.201.975,35)
Tecnología 4	(2.394.698,97)	(2.394.698,97)	(2.394.698,97)

Impuesto			
Impuesto - Planta Base	354.685,57	354.685,57	354.685,57
Impuesto - Tecnología 1	353.988,49	353.988,49	353.988,49
Impuesto - Tecnología 2	310.566,74	310.566,74	310.566,74
Impuesto - Tecnología 3	352.316,06	352.316,06	352.316,06
Impuesto - Tecnología 4	383.151,83	383.151,83	383.151,83

Resultados después de impuestos			
Planta Base	(1.862.099,26)	(1.862.099,26)	(1.862.099,26)
Tecnología 1	(1.858.439,56)	(1.858.439,56)	(1.858.439,56)
Tecnología 2	(1.630.475,40)	(1.630.475,40)	(1.630.475,40)
Tecnología 3	(1.849.659,29)	(1.849.659,29)	(1.849.659,29)
Tecnología 4	(2.011.547,14)	(2.011.547,14)	(2.011.547,14)

Depreciación			
Depreciación - Planta Base	592.101,41	592.101,41	592.101,41
Depreciación - Tecnología 1	680.744,44	680.744,44	680.744,44
Depreciación - Tecnología 2	727.128,80	727.128,80	727.128,80
Depreciación - Tecnología 3	808.179,50	808.179,50	808.179,50
Depreciación - Tecnología 4	763.459,56	763.459,56	763.459,56

Flujo de Caja Neto			
Planta Base	(11.842.028,23)	(1.269.997,85)	(1.269.997,85)
Tecnología 1	(13.614.888,79)	(1.177.695,12)	(1.177.695,12)
Tecnología 2	(14.542.576,09)	(903.346,60)	(903.346,60)
Tecnología 3	(16.163.589,94)	(1.041.479,79)	(1.041.479,79)
Tecnología 4	(15.269.191,25)	(1.248.087,58)	(1.248.087,58)

Fuente: Elaboración propia.

6.3.1 Valor Actualizado de Costos (VAC).

El valor actual de costo, VAC, es un indicador utilizado para la evaluación de proyectos bajo un enfoque costo-eficiencia que resume todos los costos del proyecto, tanto de inversión, como operación y mantenimiento (Lefort., 2007, p. 15).

El VAC, permite comparar alternativas de igual vida útil contable. Se calcula de acuerdo a la siguiente formula:

$$VAC = I_0 + \sum_{t=1}^n \frac{C_t}{(1+r)^t}$$

Donde:

I_0 : inversión inicial.

C_t : costos incurridos durante el periodo t .

n : periodos contables.

r : rentabilidad deseada o tasa de descuento.

Según Sapag (2007), una alternativa puede tener altos costo de capital, también denominados costos de inversión, y bajos costos operativos, en circunstancias en las que la otra tecnología tiene menores inversiones, pero mayores costos de operación. Por esto, el valor actualizado de costos se modificará con variaciones en la tasa de descuento utilizada. Por lo cual, la evaluación las tecnologías se realiza a partir de los VAC para distintas tasas de descuento. La Tabla 6.15 muestra los valores actuales de costo de las alternativas para distintas tasas de descuento.

Tabla 6.15 Valor Actual de Costo (VAC).

Tasa de Descuento	5%	10%	11%	12%
Valor Actual de Costo (VAC)				
VAC - Planta Base	(27.669.008,58)	(22.654.235,85)	(21.955.437,82)	(21.328.205,58)
VAC - Tecnología 1	(28.291.573,13)	(23.641.271,26)	(22.993.261,47)	(22.411.616,12)
VAC - Tecnología 2	(25.800.271,46)	(22.233.274,95)	(21.736.221,48)	(21.290.072,61)
VAC - Tecnología 3	(29.142.730,11)	(25.030.294,47)	(24.457.235,21)	(23.942.864,49)
VAC - Tecnología 4	(30.823.121,16)	(25.894.864,37)	(25.208.122,15)	(24.591.711,05)

Fuente: Elaboración propia.

El criterio de utilizar el VAC es elegir la tecnología que presente el menor valor actual de costos (Lefort., 2007, p. 15). Por tanto, la Tecnología 2 es la más conveniente desde el punto de vista técnico-económico.

6.3.2 Indicadores de Rentabilidad.

La rentabilidad de las alternativas tecnológicas se determina mediante los indicadores del Valor Actual Neto (VAN) y la Tasa de Retorno (TIR), los cuales se calculan a partir del Flujo de Costos Diferenciales de la Tabla 6.16.

Tabla 6.16 Flujo de Costos Diferenciales.

	AÑO 0	AÑO 1 - 18	AÑO 19	AÑO 20
Planta Base	0,00	0,00	0,00	0,00
Tecnología 1	(1.772.860,56)	92.302,73	92.302,73	92.302,73
Tecnología 2	(2.700.547,86)	366.651,25	366.651,25	366.651,25
Tecnología 3	(4.321.561,71)	228.518,06	228.518,06	228.518,06
Tecnología 4	(3.427.163,02)	21.910,27	21.910,27	21.910,27

Fuente: Elaboración propia.

El flujo de costos diferenciales de la Tabla 6.16 resulta de la resta del Flujo de Caja Neto de las alternativas tecnológicas y Flujo de Caja Neto de la Planta Base de la Tabla 6.14.

6.3.2.1 Valor Actual Neto (VAN)

El valor actual neto, VAN, mide la rentabilidad de un proyecto en valores monetarios que exceden a la rentabilidad deseada después de recuperar toda la inversión (Sapag, 2007, p. 344). Se calcula de acuerdo a la siguiente formula:

$$VAN = -I_0 + \sum_{t=1}^n \frac{BN_t}{(1+r)^t}$$

Donde:

I_0 : inversión inicial.

BN_t : costos incurridos durante el periodo t .

n : periodos contables.

r : rentabilidad deseada o tasa de descuento.

A partir de la Tabla 6.16 se determina el VAN de las alternativas tecnológica para diferentes tasas de descuento y se presentan en la Tabla 6.17.

Tabla 6.17 Valor Actual Neto (VAN).

Tasa de Descuento	5%	10%	11%	12%
	Valor Actual Neto (VAN)			
VAN - Planta Base	0,00	0,00	0,00	0,00
VAN - Tecnología 1	(622.564,55)	(987.035,41)	(1.037.823,65)	(1.083.410,54)
VAN - Tecnología 2	1.868.737,12	420.960,91	219.216,34	38.132,97
VAN - Tecnología 3	(1.473.721,53)	(2.376.058,61)	(2.501.797,39)	(2.614.658,92)
VAN - Tecnología 4	(3.154.112,58)	(3.240.628,51)	(3.252.684,32)	(3.263.505,47)

Fuente: Elaboración propia.

El criterio de utilizar el VAN es el siguiente:

- Si el VAN es positivo: es conveniente ejecutar el proyecto.
- Si el VAN es igual a 0: es indiferente ejecutar el proyecto.
- Si el VAN es negativo: no es conveniente ejecutar el proyecto.

Por tanto, la Tecnología 2 es la más rentable desde el punto de vista económico.

6.3.2.2 Tasa Interna de Retorno (TIR).

La Tasa Interna de Retorno, TIR, representa la tasa de interés más alta que un inversionista podría pagar sin perder dinero. Este criterio es equivalente a hacer el VAN igual a cero y determinar la tasa que permita al flujo actualizado ser cero (Sapag, 2007, p. 344). Se calcula de acuerdo a la siguiente formula:

$$-I_0 + \sum_{t=1}^n \frac{BN_t}{(1 + TIR)^t} = 0$$

Donde:

I_0 : inversión inicial.

BN_t : costos incurridos durante el periodo t .

n : periodos contables.

Con los valores de la Tabla 6.16 se determina el TIR de las alternativas tecnológicas y se presentan en la Tabla 6.18.

Tabla 6.18 Tasa Interna de Retorno (TIR).

Tasa Interna de Retorno (TIR)	
TIR - Planta Base	0,00%
TIR - Tecnología 1	0,39%
TIR - Tecnología 2	12,22%
TIR - Tecnología 3	0,54%
TIR - Tecnología 4	-14,69%

Fuente: Elaboración propia.

El criterio de utilizar el TIR es el siguiente:

- Si el TIR es mayor que la tasa de descuento: es conveniente ejecutar el proyecto.
- Si el TIR es igual que la tasa de descuento: es indiferente ejecutar el proyecto.
- Si el TIR es menor que la tasa de descuento: no es conveniente ejecutar el proyecto.

Por tanto, la Tecnología 2 es la más rentable desde el punto de vista económico para una tasa de descuento menor al 12.22%, por lo cual, la tasa de descuento más conveniente y aceptable es del 10% para obtener un VAC y VAN definitivo de las Tablas 6.15 y 6.17.

6.4 Resultados de la Evaluación económica.

La alternativa tecnológica que ofrece el mayor beneficio económico es la Tecnología 2. A pesar de que esta opción es más elevada en inversión que la Planta Base, es el más eficiente en costos operativos que las tecnologías evaluadas. El ahorro por este concepto compensa sobradamente la mayor inversión, pues presenta un valor actualizado de 22.233.274,95 dólares que generan ahorros netos anuales de 420.960,91 dólares, equivalentes a una rentabilidad del 12.22% anual.

CAPÍTULO 7

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1 CONCLUSIONES

Lo expuesto a lo largo de este trabajo permite arribar a las siguientes conclusiones:

1. La evaluación económica de las tecnologías en relación al proceso convencional de remoción con Amina, se realizó con el enfoque de costo-eficiencia, de manera que, se valoró solo los costos involucrados en los procesos. Por consiguiente, el indicador relevante fue el valor actual de costo (VAC) para una tasa de descuento del 10%. Los resultados establecen que la más conveniente es la Tecnología 2, posteriormente la Tecnología 1 y 3, finalmente la Tecnología 4 desde el punto de vista financiero.
2. El consumo de energía del proceso de remoción de CO₂ de la Planta de Yapacaní viene dado en forma de combustible y electricidad, los cuales expresados en cantidades monetarias se estimó en 1.208.022,40 dólares americanos en adquisición de insumos anualmente. La aplicación de las alternativas tecnológicas redujo el requerimiento de dichos insumos y en consecuencia los costos relacionado a los mismos. Con la Tecnología 1 se reduce el costo anual de adquisición de insumos en 11%, con la Tecnología 2 en 36 %, con la Tecnología 3 en 22 % y con la Tecnología 4 en 6%.
3. Los costos de inversión de la Planta Base, es de 11.842.028,23 dólares americanos, de acuerdo a información extraída de la propuesta económica de la empresa Exterran. La estimación de los costos de inversión de las alternativas tecnológicas requirió de Aspen Process Economic Analyzer V8.8, que es una extensión de Aspen Hysys V8.8, para determinar los costos de los equipos adicionales que incorporan las tecnologías. Los costos de inversión de la

Tecnología 1 es mayor a la Planta Base en 15%, la Tecnología 2 en 23 %, la Tecnología 3 en 36 % y la Tecnología 4 en 29%.

4. Mediante la simulación del proceso de remoción de CO₂ de la Planta de Yapacaní en Aspen Hysys V8.8, se cuantificó el gasto energético del proceso en 66.16 MBTU para remover 1 lbmol de CO₂. La aplicación de las alternativas tecnológicas permitió el uso más eficiente de la energía en distintas magnitudes, los cuales se determinaron con la Evaluación Energética. Aplicando la Tecnología 1 el gasto energético del proceso se reduce en 13,04 %, con la Tecnología 2 en 38,42 %, con la Tecnología 3 en 22,31 % y con la Tecnología 4 en 6,86%.
5. Con enfoque en el gasto energético del proceso de remoción de CO₂, el análisis paramétrico permitió establecer que la mayor demanda de energía del proceso ocurre en el reboiler de la sección regeneradora. En ese entendido, con el análisis de las variables operativas de la sección correspondiente, se obtuvo los valores óptimos de los parámetros en la simulación de cada una de las alternativas tecnológicas.
6. Las condiciones óptimas de operación de la unidad de aminas de la Planta de Yapacaní, están dadas por los parámetros que utilizó la empresa Exterran para el diseño estándar del proceso. Empleando los parámetros establecidos, se realizó la simulación del proceso como Planta Base utilizando el simulador Aspen Hysys V8.8. A partir de la Planta Base fue posible desarrollar la simulación con la aplicación de cuatro tecnologías que permitan la menor demanda de energía del proceso, tales como: Tecnología 1, la Incorporación de vapor re-comprimido; Tecnología 2, Incorporación de vapor re-comprimido y corrientes separadas; Tecnología 3, Procedimiento mejorado del flujo dividido; y Tecnología 4, el Intercambio de calor interno.
7. La información de la empresa Exterran (empresa encargada del diseño, provisión de equipos y puesta en marcha de la unidad de aminas de la Planta de Yapacaní) permitió identificar la Sección Contactora, donde se realiza el despojamiento del

CO₂ del gas a procesar; la Sección Intercambiadora de Calor, en la que se realiza el intercambio de calor entre la amina rica y amina pobre; la Sección Regeneradora, donde se recupera la amina pobre. En ese entendido, se desarrolló la descripción del proceso, la cual corresponde a un proceso estándar con amina por la disposición de los equipos que intervienen en la unidad de endulzamiento de la Planta de Yapacaní.

8. Con los resultados de la evaluación técnica y económica de las alternativas tecnológicas se seleccionó la Tecnología 2, Incorporación de vapor re-comprimido y corrientes separadas; como la mejor alternativa para optimización energética del proceso de remoción de CO₂ de la Planta de Yapacaní.
9. La Incorporación de vapor re-comprimido y corrientes separadas permitió el ahorro energético de 3.32 MMBTU/hr en el proceso de remoción de CO₂ de la Planta de Yapacaní, que se traduce en la reducción de los costos operativos y menor impacto al medio ambiente sin variar la capacidad (16 MMPCD) y calidad (eficiencia de remoción de CO₂ de 98.21%) del proceso. La aplicación de la tecnología es financieramente factible y rentable ya que genera ahorros netos anuales de 420.960,91 dólares, equivalentes a una rentabilidad del 12.22%. Por tanto, de las alternativas tecnológicas evaluadas, es la más conveniente.

7.2 RECOMENDACIONES

De lo anteriormente expuesto, se recomienda lo siguiente:

- Realizar un estudio que pueda determinar el contenido de CO₂ mínimo aceptable que debiera tener el gas dulce que produce la Planta de Yapacaní, dado que purificar excesivamente el producto no es necesario, mientras se alcance el contenido de CO₂ permisible (2% molar). Esta medida, permitirá disminuir el reflujo de la torre regeneradora y con ello, los requerimientos de energía en el reboiler. Se debe mencionar también, que el gas dulce que produce la unidad de aminas de la Planta de Yapacaní se mezcla con el gas dulce de otras formaciones

como Petaca y Yantata, lo cual, podría reducir la exigencia del proceso y aminorar la demanda energética.

- Evaluar la aplicación de la Tecnología 2 (Incorporación de vapor re-comprimido y corrientes separadas) en los estudios de pre-factibilidad de nuevos proyectos de Plantas de acondicionamiento de gas natural que consideren un proceso con aminas para el endulzamiento.
- Realizar Auditorías Energéticas de los procesos de endulzamiento con Amina existentes en Bolivia, para identificar oportunidades de mejoramiento o aplicación de alternativas tecnológicas que permitan el uso adecuado y eficiente de la energía.
- Implantar sistemas de Gestión de Energía con la mirada en la certificación ISO 50001 por parte de las empresas operadoras de las Plantas de Acondicionamiento y Tratamiento de gas natural en el territorio Nacional, para que las organizaciones puedan cumplir y lograr el uso eficiente y sostenible de la energía.
- Evaluar otras propuestas tecnológicas emergentes enfocadas en la optimización energética del proceso de endulzamiento con amina, ampliando en el Análisis Paramétrico las variables operativas como la composición y caudal de la solución de amina, la temperatura y presión del gas de alimentación.