

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE
INGENIERIA**

FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA Y TEXTIL



**“APLICACIÓN DE SOLVER
EN UN PROCESO DE ABSORCIÓN - DESORCIÓN”**

INFORME DE SUFICIENCIA

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO QUÍMICO

**POR LA MODALIDAD DE ACTUALIZACIÓN DE
CONOCIMIENTOS**

PRESENTADO POR:

ROSSINI CHENIES, JUSTINO MARIANO

LIMA - PERU

2004

El trabajo se lo dedico a mi Madre,
que es la persona que día a día me entrega todo su
amor y su comprensión,
a mi hermana Giovanna que esta lejos físicamente,
pero muy cerca de mi corazón,
de igual modo a la mujer que amo mucho Edith
que es una mujer maravillosa que me apoya en
todo momento, a ellas que son la columna
vertebral de mi vida.

Agradecer a los docentes de la Universidad que día a día van forjando hombres para un Perú mejor y con esperanza.

Pues solo el conocimiento nos hará libres de verdad.

RESUMEN

El presente trabajo tiene como objetivo Aplicar Solver® a la optimización de un proceso de absorción-desorción para la separación de compuestos orgánicos volátiles de una corriente gaseosa.

Los Compuestos Orgánicos Volátiles (COVs) son sustancias tóxicas perjudiciales a la salud, así también para el medio ambiente, debido a la destrucción de la capa de ozono. Algunos de ellos son solventes que se utilizan en la industria química como el benceno, tolueno, metil etil benceno, etc.

El proceso absorbedor-stripper consiste de un absorbedor en donde el solvente extrae el COVs para luego ser separado por destilación; en este proceso se determinan las ecuaciones, las variables, usando balance de masa, balanza de energía, Ecuación de diseño de los equipos, propiedades físicas de los compuestos gaseosos y líquidos que intervienen en el proceso. Se determinaron 40 ecuaciones y 45 variables.

Luego se realiza una simulación en estado estacionario y se determinan las variables y restricciones para optimizar el proceso.

La optimización sigue el modelo no lineal en donde se calculan las variables optimas de la función objetivo, siguiendo el modelo de maximización de la función objetivo sujeto a ciertas restricciones procedentes de la simulación.

Para encontrar la solución de la función objetivo utilizamos una herramienta de programación no lineal llamado SOLVER de Microsoft Excel.

Esta librería SOLVER es un programa realizado en Visual Basic, el cual nos permite resolver de una manera sencilla problemas de programación no lineal.

La formulación de la función objetivo es maximizar la ganancia, el cual se plantea como la diferencia entre los ingresos de la venta de COVs recuperado y los egresos de los costos operativos(servicios) mas el retorno de la inversión.

INDICE

DEDICATORIA	2
AGRADECIMIENTO	3
RESUMEN	4
OBJETIVO	7
I) INTRODUCCIÓN	8
II) DESARROLLO DE LOS CONCEPTOS	9
2.1 Compuestos orgánicos volátiles	9
2.2 Fuentes de COVs	10
2.3 Tecnologías de control de COVs	10
2.3.1 Tecnologías en desarrollo	11
2.3.2 Estudios a escala de laboratorio	11
2.4 Operaciones unitarias controladas por transferencia de masa	12
2.4.1 Absorción de gas	12
2.4.2 Destilación	12
2.5 Operaciones unitarias controladas por transmisión de calor	13
2.5.1 Evaporación	13
2.5.2 Condensación	13
2.6 Transferencia de calor	13
2.7 Intercambiador de calor	14
2.8 Bombas	14
2.9 Solver®	14
2.9.1 Cálculos que realiza Solver®	15
2.9.2 Limitaciones de Solver®	16
2.9.3 Funcionamiento de SOLVER®	16
III) DESARROLLO DEL TEMA	23
3.1 Diagrama de flujo del proceso absorción y separación del COVs	23
3.2 Balance de masa global para determinar el solvente fresco	24
3.3 Determinación de las variables de diseño	24

3.4	Balance de masa	25
3.5	Número total de unidades de transferencia en la fase gaseosa en el absorbedor (Nog)	26
3.6	Altura equivalente de una unidad de transferencia	27
3.7	Altura del empaque	27
3.8	Área del absorbedor	28
3.9	Potencia en una bomba	29
3.10	Balance de energía	29
3.11	Ecuación de diseño en el intercambiador	30
3.12	Diámetro del stripper	33
3.13	Reflujo mínimo	34
3.14	Número mínimo del equilibrio	35
3.15	Determinación de la fracción molar x_2 del VOCs	39
3.16	Determinación de la fracción molar x_3 del VOCs	40
3.17	Determinación térmica de la alimentación al stripper	41
3.18	Determinación de la fracción molar x_1 que sale de los fondos del absorbedor	41
3.19	Resumen de las ecuaciones halladas en el proceso absorción-stripper para plantear el diseño óptimo	43
3.20	Función objetivo	46
3.21	Elección de las variables independientes para iniciar el proceso	46
3.22	Elaboración de los diagramas de flujo	47
3.23	Corrida del programa para determinar la función objetivo utilizando la herramienta Solver® de Microsoft Excel	57
3.24	Simulación mediante la herramienta escenarios de Microsoft Excel	62
3.25	Interpretación de los resultados de las corridas del programa	77
3.26	Dificultades que se tiene en el uso de Solver®	78
IV)	CONCLUSIONES	83
V)	BIBLIOGRAFÍA	84

OBJETIVO:

Aplicar Solver® a la optimización de un proceso de absorción-desorción para la separación de compuestos orgánicos volátiles de una corriente gaseosa.

I INTRODUCCIÓN

La industria de los procesos químicos ha traído como consecuencia la contaminación del medio ambiente.

Una de estas emisiones son los llamados VOCs, muchos de ellos son tóxicos que perjudican a los seres vivos, y otros dañan a la capa de ozono.

Por ello en la última década se ha dado una gran importancia a procesos para recuperar o minimizar la emisión de los llamados VOCs.

Uno de estos procesos utilizados es de absorbedor – stripper, que opera a condiciones atmosféricas.

Podemos encontrar las variables óptimas de este proceso mediante la optimización. Para ello utilizamos la herramienta de solución de programación no lineal llamado SOLVER de Microsoft Excel, que es una librería muy útil y de fácil aplicación para resolver problemas de optimización no lineal.

En la actualidad existen software específicos y muy complicados para programación no lineal, de alto costo; por ello el SOLVER es una herramienta que puede ser utilizado fácilmente y cuya aplicación en la optimización de procesos da resultados aceptables en comparación con programas rigurosos.

II DESARROLLO DE LOS CONCEPTOS

2.1 Compuestos Orgánicos volátiles (COVs)

Una categoría de sustancias contaminantes de importancia creciente en las últimas décadas es la de los compuestos orgánicos volátiles (COVs) recoge miles de especies químicas que son tóxicas para la salud o bien precursoras de oxidantes fotoquímicos responsables del "smog", que contribuyen al efecto invernadero y/o a la degradación de la capa de ozono estratosférico. No existe una definición internacionalmente adoptada para este tipo de compuestos, la mayoría de las acepciones se basan en descripciones estrictamente químicas. La más aceptada es la de la Comisión Económica para Europa de las Naciones Unidas del año 1991, que textualmente los define como "*compuestos orgánicos volátiles, distintos del metano, de naturaleza antropogénica capaces de producir oxidantes fotoquímicos en presencia de luz solar por reacción con óxidos de nitrógeno*". Esta reacción química implica una eliminación del contaminante primario por transformación del mismo en compuestos a veces de mayor carácter tóxico (contaminación secundaria).

De acuerdo con los criterios más ampliamente aceptados, en el término Compuestos Orgánicos Volátiles se agrupan todas aquellas sustancias de base carbono presentes en la atmósfera, que tengan una presión de vapor superior a 0,14 mmHg a 25°C. Generalmente tienen un número de átomos de carbono entre 2 y 12.

La necesidad de vigilar las concentraciones de COVs en la atmósfera se deriva fundamentalmente de tres factores:

- Su propia toxicidad
- El papel clave que los más reactivos juegan en la formación de oxidantes fotoquímicos
- Su importancia como precursores de partículas finas en áreas urbanas, especialmente los hidrocarburos aromáticos y sus productos de oxidación

2.2 Fuentes de COVs

Las principales fuentes de COVs están relacionadas directa o indirectamente con el petróleo y sus derivados: vapores de automóviles por combustión incompleta (aromáticos, olefinas y parafinas), industrias de pinturas, tintas, lacas y esmaltes (alcanos y cicloalcanos), vapores de gasolinas emitidos desde los tanques de almacenamiento, disolventes empleados en pinturas y operaciones de desengrasado y limpieza (hexano, ciclohexano y aromáticos derivados del tolueno y xileno), adhesivos (metil-etil cetona, derivados tipo nafta, tricloroetano), aerosoles, industrias de plásticos (compuestos clorados).

2.3 Tecnologías de control de COVs

TECNOLOGÍAS DE CONTROL DE COV

Tecnología	Fuente emisora	Categoría de COV	Concentración de COV, ppmv
Oxidación térmica	PV, ST, TO, WW	AHC, HHC, A, K	20-1000
Oxidación catalítica	PV, ST, TO, WW	AHC, HHC*, A, K	50-10.000
Encendido	F, PV, ST, TO, WW	AHC, A, K	
Condensación	PV, ST, TO,	AHC, HHC*, A, K	5-12.000
Adsorción	PV, ST,	AHC, HHC, A	20-20.000
Absorción	PV, ST, TO	A, K	1.000-20.000
Hervidores y Procesos de calentado	PV	AHC, A, K	
Biofiltración	PV, WW	AHC, HHC*, A, K	500-2.000
Membranas de separación	PV, TO	AHC, HHC, A, K	0-1000
Oxidación UV	PV	AHC, HHC, A, K	

Leyenda:

Fuente emisiones: F = fugitivas; PV = procesos venteo; ST = tanques;

TO = operación de transferencia; WW = operaciones

Con aguas de desecho.

Categorías COV : AHC = hidrocarburos alifáticos y aromáticos

HHC = hidrocarburos halogenados (* = aplicabilidad limitada);

A = alcoholes, glicoles, éteres, epóxidos y fenoles;

K = cetonas y aldehídos

2.3.1 Tecnologías en desarrollo

Las tecnologías citadas a continuación no son disponibles comercialmente.

* Tecnología de destrucción de corona: mediante la cual se generan electrones energéticos en un reactor de alta intensidad que chocan con los COVs produciendo compuestos no reactivos tales como CO₂ y H₂O. Aparentemente no se producen intermediarios peligrosos. Opera a temperatura ambiente, no requiere de combustible auxiliar y puede tratar compuestos halogenados y no halogenados.

* Tecnología de plasma : aun no muy bien conocida como supresora de COVs. En Europa y U.S.A. se adelantan investigaciones y desarrollos.

2.3.2 Estudios a escala de laboratorio

Recientemente se esta trabajando en la preparación de monolitos en forma de panal de abeja a partir de materias primas comunes como arcillas, desechos cerámicos, alumina, etc. Sobre los que se incorpora una fase metálica, obteniéndose así un monolito catalítico con miras ha ser usado en la descomposición de COVs.

2.4 Solver

SOLVER® de Microsoft Excel es una herramienta que nos permite resolver problemas de cálculo variacional y de programación lineal.

La programación lineal es una parte de las matemáticas cuyo objetivo es ayudar en la resolución de los problemas de análisis en los que intervienen múltiples variables y condiciones.

Los requisitos mínimos para utilizar SOLVER® son los siguientes:

- Saber introducir fórmulas en Excel
- Saber expresar condiciones, haciendo uso de los operadores lógicos (>, mayor que; <, menor que; >=, mayor o igual que, etc.)
- Estar familiarizado con la terminología propia de Solver.

Entre los más importantes tenemos:

CONCEPTO	DEFINICIÓN
Precedentes de Fórmula	Celdas que contienen un valor utilizado por la fórmula seleccionada.
Celda ajustable	Celda cuyo contenido (dato numérico) se podrá variar para resolver el problema planteado. Si hay varias celdas ajustables o rangos de celdas habrá que utilizar un separador.
Restricciones (o condiciones)	Excepción lógica que deberá cumplir la solución encontrada. Recuerde que para expresar una condición deberá utilizar algunos de los operadores lógicos mencionados anteriormente.
Celda Objetivo	Celda cuyo contenido se hará máximo o mínimo (puede ser un valor o una fórmula)
Solución	Respuesta hallada por Solver al problema planteado y que cumple todas las restricciones impuestas.
Intento	Respuesta hallada por Solver al problema planteado y que no cumple con todas las condiciones impuestas.
condición vinculante	Es aquella que se cumple en toda su extensión. Por ejemplo, si se plantea la condición "Interés \leq 10%" y la solución encontrada se da para "Interés = 10%", la condición será vinculante (se utiliza el valor extremo y se cumple la condición en toda su extensión)
Condición no vinculante	Aquella que no se cumple en toda su extensión. Si la condición impuesta es la anterior y la solución encontrada se da para "interés = 8%", la condición será no vinculante (no se utiliza el valor extremo).

Los cálculos que se pueden realizar con la Solver®, dependen del software que se emplee.

Los software de Solver® son los siguientes:

Linear Programming Problems

Quadratic Programming Problems

Integer and Constraint Programming Problems

Smooth Nonlinear Optimization Problems

Global Optimization Problems

Nonsmooth Optimization Problems

Para citar un caso, en lo que respecta a **Programación Lineal**

SOLVER® (VERSIÓN)	VARIABLES	RESTRICCIONES
Basic Large-Scale LP Solver	4000	4000
Large-Scale LP Solver	16000	16000
Ext. Large-Scale LP Solver	65000	65000
Large-Scale SQP Solver	100000	100000
XPRESS Solver Engine	200000	20000

En programación lineal los cálculos que se realizan es maximizar o minimizar una función. Respetando las restricciones que se den para el problema.

Las limitaciones que tiene Solver® es que los resultados no son satisfactorios siempre, depende de los datos iniciales que se dan al problema. Para tener respuestas satisfactorias es preciso realizar una simulación.

Cuándo $Re^2 \ll Gr$,

Re = Número de Reynolds

Gr = Número de Grashoff

$$Gr = \frac{g\beta(T_p - T_\infty)D^3\rho^2}{\mu^2}$$

$D^3 \gg L^3$ (magnitud significativa)

se debe entender que los factores de “convección libre” como las diferencias de temperaturas y densidad, tienen una influencia importante.

3.-RADIACION.- es la transferencia de calor desde un cuerpo a otro, que no se encuentra en contacto con el , por medio del movimiento ondulatorio a través del espacio.

2.7 Intercambiador de calor.

Un cambiador es un equipo que consiste en un limite sólido, buen conductor, que se intercambia energía por transmisión de calor.

2.8 Bombas.

Es un equipo que proporciona energía a un líquido con el objeto de superar las perdidas por fricción que normalmente ocurren en un sistema de transferencia de líquidos y/o llenar un líquido a una elevación mayor.

2.9 Solver ®

Solver® de Microsoft Excel es una herramienta que nos permite resolver problemas de calculo variacional y de programación lineal.

La programación lineal es una parte de las matemáticas cuyo objetivo es ayudar en la resolución de los problemas de análisis en los que intervienen múltiples variables y condiciones.

Los requisitos mínimos para utilizar Solver® son los siguientes:

- Saber introducir formulas en Excel
- Saber expresar condiciones, haciendo uso de los operadores lógicos (>, mayor que; <, menor que; >=, mayor o igual que, etc.)
- Estar familiarizado con la terminología propia de Solver.

Entre los mas importantes tenemos:

CONCEPTO	DEFINICIÓN
Precedentes de formula	Celdas que contienen un valor utilizado por la formula seleccionada.
Celda ajustable	Celda cuyo contenido (dato numérico) se podrá variar para resolver el problema planteado. Si hay varias celdas ajustables o rangos de celdas habrá que utilizar un separador.
Restricciones (o condiciones)	Excepción lógica que deberá cumplir la solución encontrada. Recuerde que para expresar una condición deberá utilizar algunos de los operadores lógicos mencionados anteriormente.
Celda Objetivo	Celda cuyo contenido se hará máximo o mínimo (puede ser un valor o una formula)
solución	Respuesta hallada por Solver al problema planteado y que cumple todas las restricciones impuestas.
Intento	Respuesta hallada por Solver al problema planteado y que no cumple con todas las condiciones impuestas.
condición vinculante	Es aquella que se cumple en toda su extensión. Por ejemplo, si se plantea la condición "Interés \leq 10%" y la solución encontrada se da para "Interés = 10%", la condición será vinculante (se utiliza el valor extremo y se cumple la condición en toda su extensión)
Condición no vinculante	Aquella que no se cumple en toda su extensión. Si la condición impuesta es la anterior y la solución encontrada se da para "interés = 8%", la condición será no vinculante (no se utiliza el valor extremo).

2.9.1 Cálculos que realiza Solver®

Los cálculos que se pueden realizar con la Solver®, depende del software que se emplee.

El software de Solver® permite solucionar:

Linear Programming Problems

Quadratic Programming Problems

Integer and Constraint Programming Problems

Smooth Nonlinear Optimization Problems

Global Optimization Problems

Nonsmooth Optimization Problems

Para citar un caso, en lo que respecta a **Programación Lineal**

SOLVER® (VERSIÓN)	VARIABLES	RESTRICCIONES
Basic Large-Scale LP Solver	4000	4000
Large-Scale LP Solver	16000	16000
Ext. Large-Scale LP Solver	65000	65000
Large-Scale SQP Solver	100000	100000
XPRESS Solver Engine	200000	20000

En programación lineal los cálculos que realiza Solver® es maximizar o minimizar una función.

2.9.2 Limitaciones de Solver®

Las limitaciones que tiene Solver® es que los resultados no son satisfactorios siempre, depende de los datos iniciales que se dan al problema. Para tener respuestas satisfactorias es preciso realizar una simulación.

2.9.3 Funcionamiento de Solver®

Con Solver®, puede buscarse el valor óptimo para una celda, denominada celda objetivo, en una hoja de cálculo. Solver® funciona en un grupo de celdas que estén relacionadas, directa o indirectamente, con la fórmula de la celda objetivo. Solver® ajusta los valores en las celdas cambiantes que se especifiquen, denominadas celdas ajustables, para generar el resultado especificado en la fórmula de la celda objetivo. Pueden aplicarse restricciones para restringir los valores que puede utilizar Solver® en el modelo y las restricciones pueden hacer referencia a otras celdas a las que afecte la fórmula de la celda objetivo.

USO DE SOLVER DE MICROSOFT EXCEL

Solver tiene muchas capacidades de optimización:

Se pueden resolver problemas de programación lineal y no lineal.

Veamos paso a paso a través de un ejemplo

Maximizar $Z = X_1 + 3X_2$

Sujeto a las siguientes restricciones:

$$2X_1 + X_2 \leq 4$$

$$X_1 - 2X_2 \leq 1$$

$$X_1, X_2 \geq 0$$

1.- Se ingresa los datos en la hoja de calculo de Microsoft Excel de la siguiente manera.

The screenshot shows a Microsoft Excel spreadsheet titled "EJEMPLO 1: Maximizar una función lineal". The spreadsheet is set up to solve a linear programming problem. The data is organized as follows:

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	EJEMPLO 1: Maximizar $Z = X_1 + 3X_2$								
2	Sujeto a las siguientes restricciones:								
3	$2X_1 + X_2 \leq 4$								
4	$X_1 - 2X_2 \leq 1$								
5	$X_1, X_2 \geq 0$								
6									
7		Variables							
		X_1	X_2						
8	valores iniciales de las variables	i	i						
9									
10									
11									
12									
13	Coefficientes de la función objetivo	1	3						
14									
15									
16	Coefficientes de la restricción 1	2	1						
17	Coefficientes de la restricción 2	1	-2						
18									

The Solver Parameters dialog box is visible, showing the objective function cell (E7) and the variable cells (B7:C7). The constraints are listed as follows:

Restricción	Celda de la restricción	Operador	Celda del objetivo
1	\$B\$7:\$C\$7	<=	\$E\$7
2	\$B\$8:\$C\$8	<=	\$E\$8

The spreadsheet also shows the initial values for variables (B8:C8) and the coefficients for the objective function (B13:C13) and constraints (B16:C17). The Solver Parameters dialog box is open, showing the objective function cell (E7) and the variable cells (B7:C7). The constraints are listed as follows:

Las celdas B8 y C8 contienen los valores iniciales de las variables X_1, X_2

La función objetivo se encuentra en la celda D13, el cual contiene la formula: $B13*B8+C13*C8$.

Las restricciones están dadas en las celdas D16 y D17

La celda D16 contiene la formula: $B16*B8+C16*C8$

La celda D17 contiene la formula: $B17*B8+C17*C8$

2.- En la barra de Menú, elija Herramientas y seleccione Solver con un clic.

The screenshot shows the Microsoft Excel interface with the Solver tool menu open. The spreadsheet contains the following data:

EJEMPLO 1: Maximizar $Z = X_1 + 3X_2$			
Sujeto a las siguientes restricciones:			
$2X_1 + X_2 \leq 4$			
$X_1 - 2X_2 \leq 1$			
$X_1, X_2 \geq 0$			
		Variables	
		X_1	X_2
Valores iniciales de las variables		1	1
		Función	
		Objetivo	
		Z	
Coeficientes de la función objetivo		1	3
		RESTRICCIONES	
Coeficientes de la restricción 1		2	1
Coeficientes de la restricción 2		1	-2

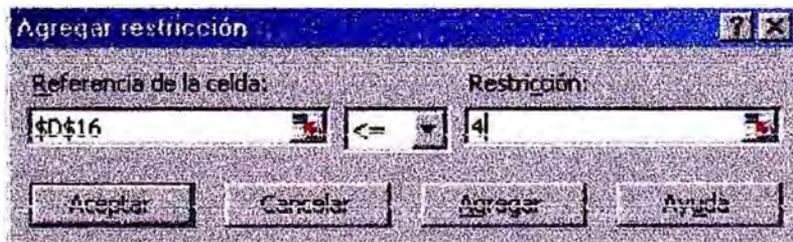
The Solver menu is open, showing options: Buscar objetivo..., Macro, Complementos..., Personalizar..., and Opciones... The 'Herramientas' menu is selected.

3.- Aparece la ventana Parámetros de Solver.

- En el casillero celda objetivo, ingrese la celda de la función objetivo \$D\$13.
- Elija la opción máximo en valor de la celda objetivo
- En el casillero cambiando las celdas, ingrese las celdas de los valores iniciales de X_1, X_2 (\$B\$8:\$C\$8)

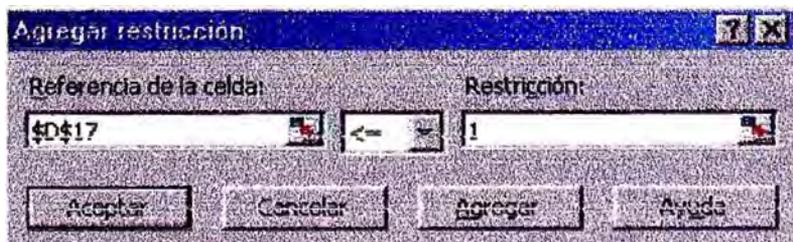


- ### 4.- En el casillero Sujetas a las siguientes restricciones, realice un clic en Agregar. Aparece la ventana agregar restricción. En el casillero Referencia de la celda, digite \$D\$16 y en el casillero Restricción digite 4.



haga clic en Agregar.

En el casillero Referencia de la celda, digite \$D\$17 y en el casillero Restricción digite 1.



haga clic en aceptar

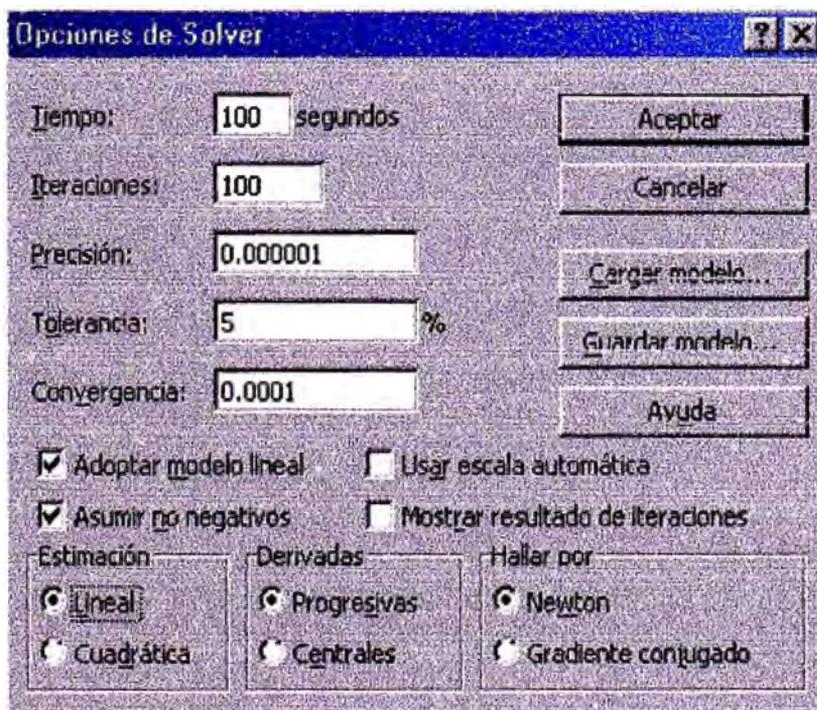
5.- Aparece la ventana Parámetros de Solver



haga clic en Opciones.

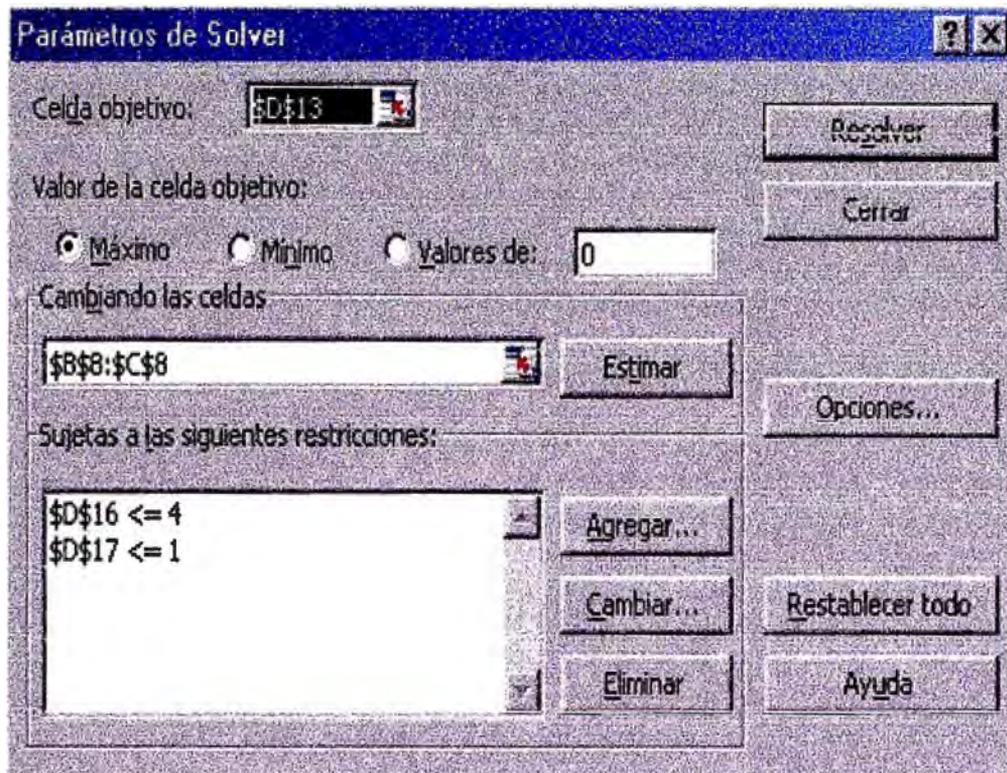
6.- Aparece la ventana Opciones de Solver.

Ingresc los datos tal como se señala en la ventana.



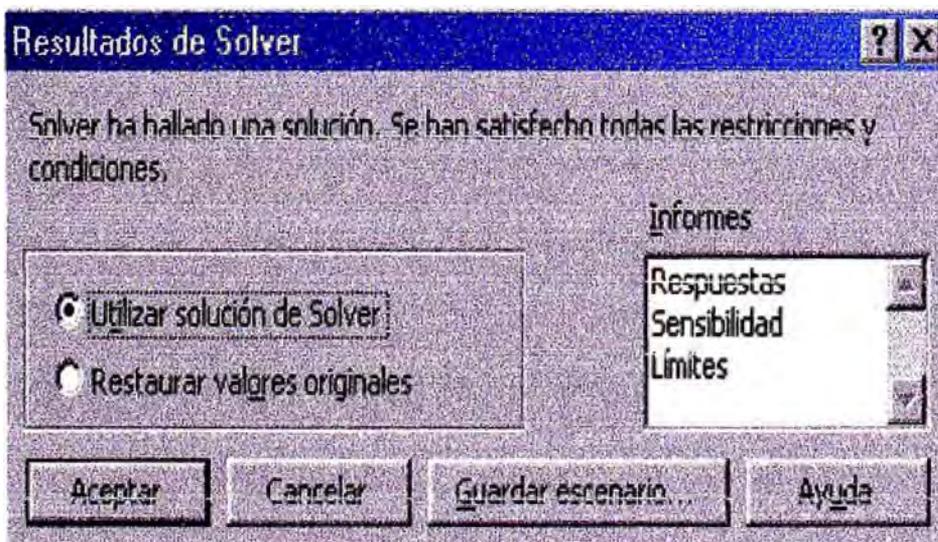
haga clic en aceptar.

7.- Aparece la ventana Parámetros de Solver.



haga clic en Resolver.

8.- Aparece la ventana Resultados de Solver



haga clic en aceptar.

9.- Si ha realizado los pasos correctamente la hoja de calculo debe mostrarse de la siguiente manera.

Microsoft Excel - EJEMPLO 1 Maximizar una función lineal

Archivo Edición Ver Insertar Formato Herramientas Datos Ventana ?

Arial 10

E7 =

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	EJEMPLO 1: Maximizar $Z = X_1 + 3X_2$								
2	Sujeto a las siguientes restricciones:								
3	$2X_1 + X_2 \leq 4$								
4	$X_1 - 2X_2 \leq 1$								
5	$X_1, X_2 \geq 0$								
6			Variables						
7		X_1	X_2						
8	Valores iniciales de las variables		0	4					
9									
10									
11									
12									
13	Coeficientes de la función objetivo		1	3					
14									
15									
16	Coeficientes de la restricción 1		2	1					
17	Coeficientes de la restricción 2		1	-2					
18									

Hoja1 Hoja2 Hoja3

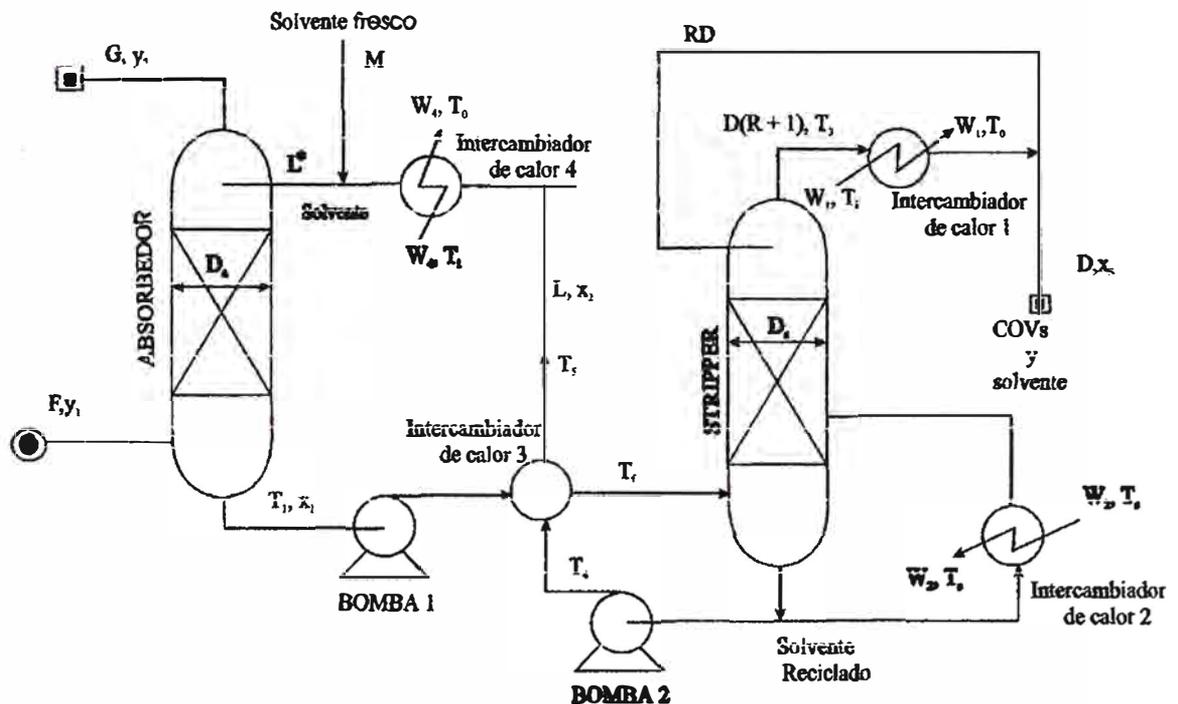
Listo

Inicio USO DE... EJEM... PROCE Dibujo 06:27 p.m.

Es decir, el valor que toman las variables X_1 , X_2 es 0 y 4 respectivamente.
 $Z = 12$ (valor máximo)

III DESARROLLO DEL TEMA

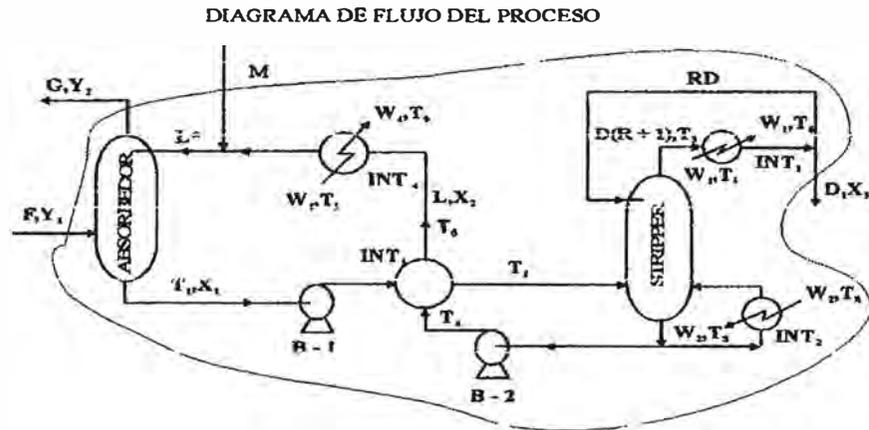
3.1 DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROCESO DE ABSORCIÓN - SEPARACIÓN DEL COVs.



El gas de la alimentación entra a la absorbidora, que es una columna vertical en la que el gas pasa hacia arriba y el solvente líquido hacia abajo.

El solvente agotado entra por la parte superior de la columna y fluye a contracorriente del gas.

En el momento en que el gas ha alcanzado la parte superior con el solvente; el gas limpio pasa hacia la atmósfera o hacia usos posteriores. El solvente cargado, que ahora contiene la mayor parte del componente (COVs.) que se está extrayendo del gas, pasa a la separadora (stripper), la cual normalmente se opera a una temperatura mucho más alta o a una presión mucho más baja, o ambas cosas. A esta temperatura mas alta o presión mas baja, o ambas, la solubilidad del gas en el solvente selectivo se reduce mucho, de modo que ese gas se sale de la solución. En seguida, se enfría y envía hacia el almacenamiento o algún uso posterior. El solvente agotado, o empobrecido, se envía de regreso a la columna absorbidora.



3.2 Balance de masa global para determinar el solvente fresco (de la figura mostrada)

Haciendo un balance de masa global del sistema absorción – stripper

Se tiene:

$$F + M = G + D$$

El Flujo del destilado es D como se observa el diagrama.

La composición del VOCs en el destilado es x_3

La composición del solvente en el destilado es $(1-x_3)$

Luego; el flujo del solvente en el destilado es $D(1-x_3)$

Para que el proceso absorción-stripper opere en forma continua el flujo de reposición del solvente M debe ser $D(1-x_3)$,

Por lo tanto $M=D(1-x_3)$

3.3 Determinación de las variables de diseño

Para ello realizaremos las operaciones de:

Balance de Masa Global y por componente

Balance de Energía

Ecuación de diseño, etc

Es decir todas las operaciones que se pueden establecer en el sistema a fin de encontrar las variables que puedan ser manejados para optimizar el proceso.

3.4 Balance de masa

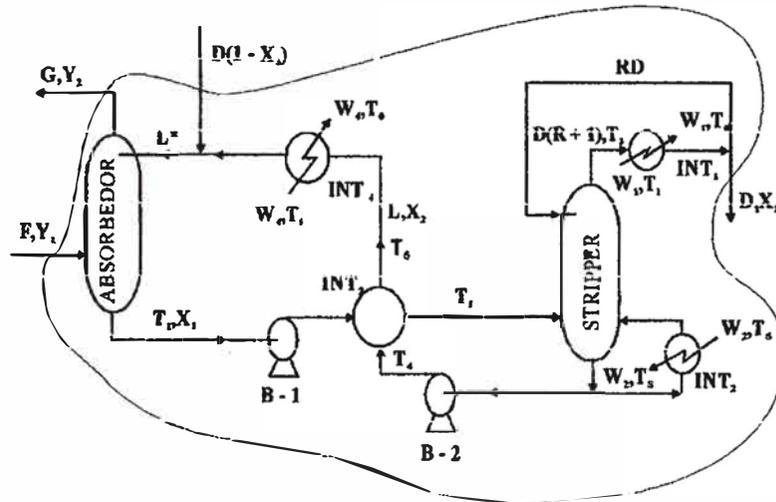


figura 1

Balance de masa global (figura 1)

$$F + D(1 - X_3) = G + D$$

$$F + D - DX_3 = G + D$$

$$G + D = F + D - DX_3$$

$$G + D - D = F - DX_3 = 0$$

$$G + 0 = F - DX_3$$

$$G = F - DX_3 \quad \text{Ecuación N}^\circ 1$$

Balance de masa global (figura 2)

$$B = L + D$$

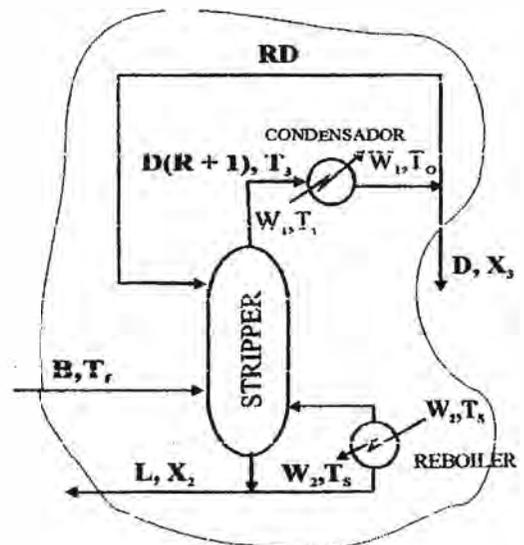
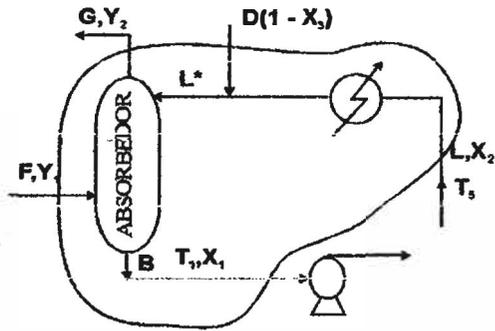


figura 2



Balace de masa por componente del soluto (figura 3)

$$Fy_1 + LX_2 + D(1 - X_3) \cdot 0 = Gy_2 + (L + D)X_1$$

$$Gy_2 + (L + D)X_1 - Fy_1 + LX_2$$

$$Gy_2 = Fy_1 + L \cdot X_2 - (L + D)X_1$$

$$y_2 = (Fy_1 + LX_2 - (L + D)X_1) / G \quad \text{Ecuación N° 2}$$

3.5 Calculo de Nog (número total de unidades de transferencia en la fase gaseosa) en el absorbedor

Ley de Henry

$$m = \frac{y_i}{x_i} = \frac{H}{P} \quad N_{og} = \int_{y_1}^{y_2} \frac{(1-y)_{mf} dy}{(1-y)(y-y^*)}$$

Los cambios en las velocidades del flujo de gas y en la fracción mol del gas inerte son tan pequeños que pueden despreciarse esto da como resultado.

$$N_{og} = \int_{y_1}^{y_2} \frac{dy}{(y-y^*)} + \frac{1}{2} \log \frac{1-y_2}{1-y_1}$$

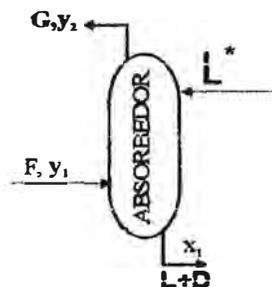


Figura 4

Para soluciones diluidas (Manual de Perry), se obtiene

$$N_{og} = \frac{1}{1 - (mG/L^*)} \text{Ln} \left[\left\{ 1 - \left(\frac{mG}{L^*} \right) \right\} \left\{ \frac{y_1 - mx_2}{y_2 - mx_1} + \frac{mG}{L^*} \right\} \right] \quad \text{Ecuación N° 3}$$

3.6 Altura equivalente de una unidad de transferencia

Hog , es la altura de una unidad de transferencia para la fase gaseosa

Hg y Hl son las unidades de transferencia de fase gas y liquido

Según (Henley Seader)

$$Hog = Hg + \left(\frac{HG}{PL^*} \right) Hl, \text{ reemplazando } m = H/P, \text{ se obtiene}$$

$$Hog = Hg + \frac{mG}{L^*} Hl \quad \text{Ecuación N° 4}$$

según(E. Ferreira), establece la siguiente correlación de Hg

$$Hg = \alpha \left(\frac{FM_g}{Aa} \right)^\beta \sqrt{SC_g} / \left(\frac{(L+D)M_l}{Aa} \right)^\gamma$$

donde: $\alpha = 0.557$, $\beta = 0.32$, $\gamma = 0.51$

reemplazando los valores de los parámetros α, β, γ

$$Hg = 0.557 \left(\frac{FM_g}{Aa} \right)^{0.32} \sqrt{SC_g} / \left(\frac{(L+D)M_l}{Aa} \right)^{0.51} \quad \text{Ecuación N° 5}$$

de igual manera para Hl, define

$$Hl = \left(\frac{(L+D)M_l}{Aa\mu_l} \right)^\sigma \phi \sqrt{SC_l}$$

donde: $\sigma = 0.22$, $\phi = 0.00235$

reemplazando el parámetro de σ, ϕ y haciendo las conversiones

$$Hl = \left(\frac{(L+D)M_l}{Aa\mu_l 3600} \right)^{0.22} \cdot 0.00235 \sqrt{SC_l} \quad \text{Ecuación N° 6}$$

3.7 Altura del empaque (Z)

$$Z = Hog \cdot Nog \quad \text{Ecuación N° 7}$$

3.8 Área del absorbedor

$$Aa = \frac{\pi Da^2}{4} \quad \text{Ecuación N° 8}$$

Da = Diámetro del absorbedor

Asumiendo que velocidad de vapor es 75% de la velocidad de inundación

Donde : Gf tiene como unidades $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$

$$0.75 Aa Gf \cdot 3600 = GMg$$

$$0.75 \frac{\pi Da^2}{4} Gf \cdot 3600 = GMg$$

$$Da^2 = \frac{4GMg}{0.75\pi Gf \cdot 3600}$$

$$Da = \sqrt{\frac{4GMg}{0.75\pi Gf \cdot 3600}} \quad \text{Ecuación N° 9}$$

según (Tomio Umeda), establece la siguiente correlación:

$$\text{Log} Gf^2 \left(\frac{a_p}{\epsilon^3} \right) \left(\frac{1}{g\rho_g\rho_l} \right) \left(\frac{\mu_l}{\mu_g} \right)^{0.2} = 1.74 \left(\frac{L^*}{G} \right)^{0.25} \left(\frac{\rho_l}{\rho_g} \right)^{-0.125}$$

$$Gf^2 \left(\frac{a_p}{\epsilon^3} \right) \left(\frac{1}{g\rho_g\rho_l} \right) \left(\frac{\mu_l}{\mu_g} \right)^{0.2} = 10^{1.74} \left(\frac{L^*}{G} \right)^{0.25} \left(\frac{\rho_l}{\rho_g} \right)^{-0.125}$$

$$\left(\frac{a_p}{\epsilon^3} \right) \left(\frac{1}{g\rho_g\rho_l} \right) \left(\frac{\mu_l}{\mu_g} \right)^{0.2} = 10^{1.74} \left(\frac{L^*}{G} \right)^{0.25} \left(\frac{\rho_l}{\rho_g} \right)^{-0.125}$$

$$Gf = \sqrt{\frac{10^{1.74} \left(\frac{L^*}{G} \right)^{0.25} \left(\frac{\rho_l}{\rho_g} \right)^{-0.125}}{\left(\frac{a_p}{\epsilon^3} \right) \left(\frac{1}{g\rho_l\rho_g} \right) \left(\frac{\mu_L}{\mu_g} \right)^{0.2}}} \quad \text{Ecuación N° 10}$$

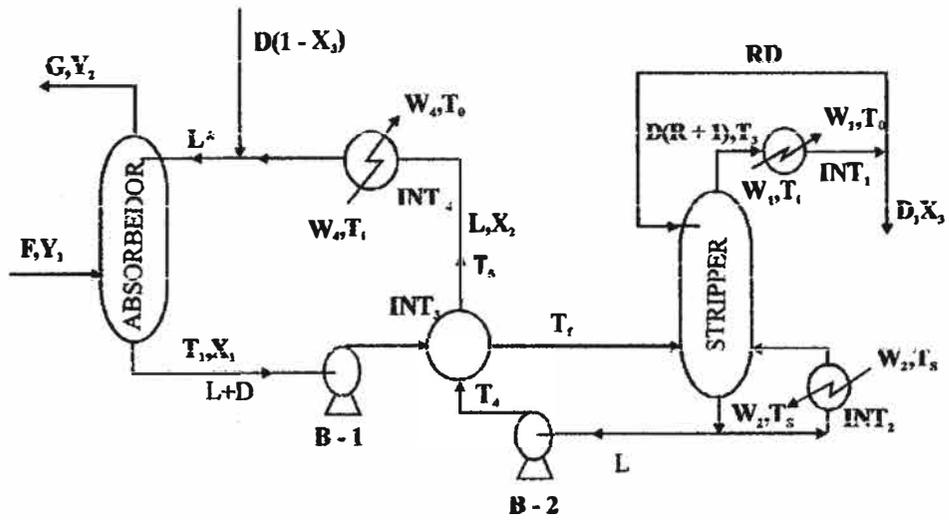


Figura 5

3.9 Potencia en una bomba

Potencia de la bomba 1 (flujo al stripper)

$$HP_1 = (L + D)KP_1N \quad \text{Ecuación N}^\circ 11$$

Potencia de la bomba (flujo al absorbedor)

$$HP_2 = KP_2LZ \quad \text{Ecuación N}^\circ 12$$

3.10 Balance de energía

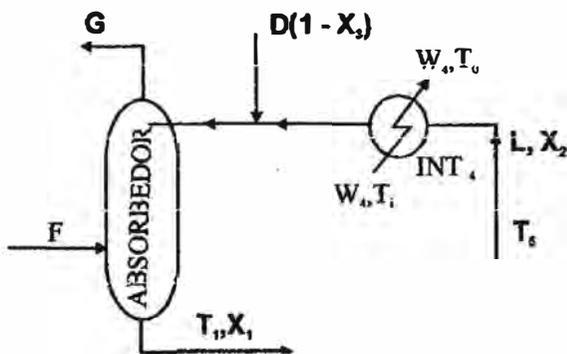


Figura 6

Del grafico mostrado tenemos dos consideraciones:

1. El absorbedor es isotérmico
2. El solvente fresco ingresa a la temperatura T_1

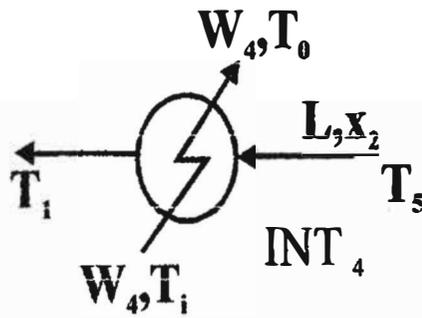


Figura 7

Balance de energía en la línea que va al absorbedor (figura 7)

$$Q_4 = M_1 LC_P (T_5 - T_1)$$

$$(T_5 - T_1) = M_1 LC_P (T_5 - T_1) / Q_4$$

$$T_5 = M_1 LC_P (T_5 - T_1) / Q_4 + T_1 \quad \text{Ecuación N° 13}$$

Balance de energía en la línea del agua (figura 7)

$$Q_4 = w_4 C_{Pw} (T_0 - T_1) \quad \text{Ecuación N° 14}$$

3.11 Ecuación de diseño en el intercambiador N° 4 (figura 7)

$$Q_4 = U_4 A_4 \Delta T_{ml4}$$

$$A_4 = Q_4 / (U_4 \Delta T_{ml4}) \quad \text{Ecuación N° 15}$$

$$\Delta T_{ml4} = \frac{(T_5 - T_0) - (T_1 - T_i)}{\ln \left[\frac{T_5 - T_0}{T_1 - T_i} \right]} \quad \text{Ecuación N° 16}$$

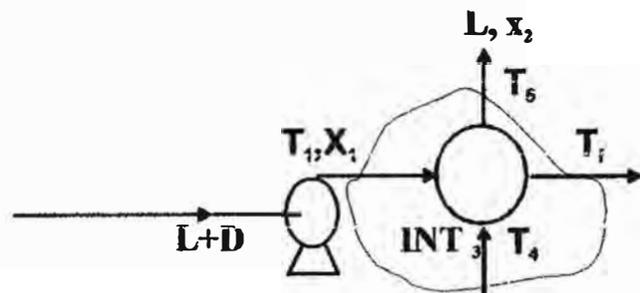


Figura 8

Balance de energía en la línea de alimentación al stripper (figura 8)

$$Q_3 = M_l(L + D)C_p(T_f - T_1)$$

$$(T_f - T_1) = Q_3 / (M_l(L + D))$$

$$T_f = Q_3 / (M_l C_p (L + D)) + T_1 \quad \text{Ecuación N° 17}$$

Balance de energía en la línea que va al absorbedor (figura 8)

$$Q_3 = M_l L C_p (T_4 - T_5) \quad \text{Ecuación N° 18}$$

Ecuación de diseño en el intercambiador N° 3 (figura 8)

$$Q_3 = U_3 A_3 \Delta T_{ml3}$$

$$A_3 = Q_3 / (U_3 \Delta T_{ml3}) \quad \text{Ecuación N° 19}$$

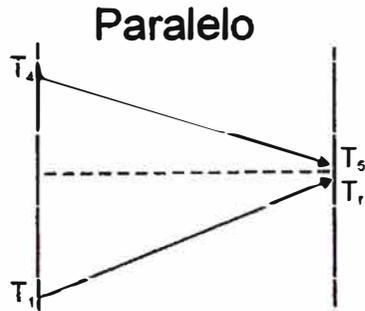


Figura 9a

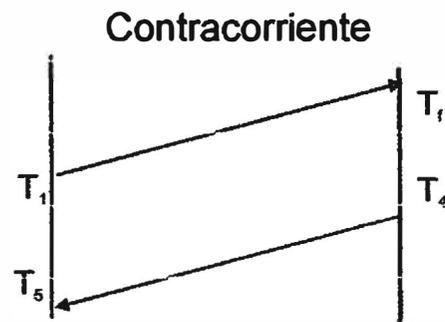


Figura 9b

$$\Delta T_{ml3} = \frac{(T_1 - T_5) - (T_f - T_4)}{\ln \left[\frac{T_1 - T_5}{T_f - T_4} \right]}$$

$$\Delta T_{ml3} = \frac{(T_5 - T_1) - (T_4 - T_f)}{\ln \left[\frac{T_5 - T_1}{T_4 - T_f} \right]}$$

Ecuación N° 20

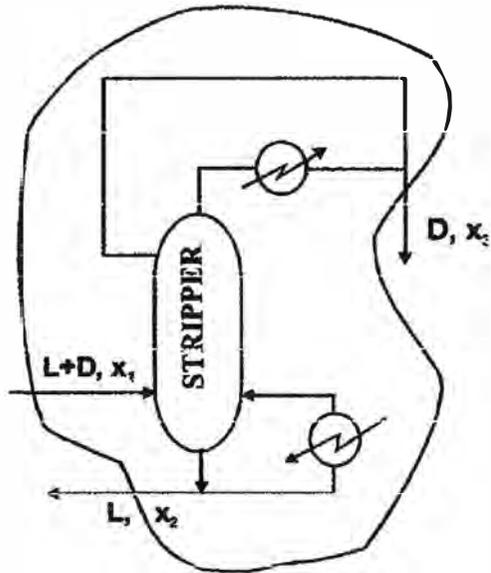


Figura 10

Balance de masa por componente del soluto (figura 10)

$$(L + D)X_1 = DX_3 + LX_2$$

$$L X_1 + DX_1 - LX_2 = DX_3$$

$$L (X_1 - X_2) = D(X_3 - X_1)$$

$$L = D(X_3 - X_1) / (X_1 - X_2) \quad \text{Ecuación N° 21}$$

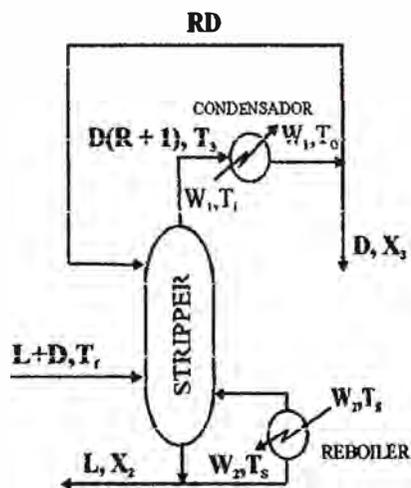


Figura 11

Balance de energía en el Stripper (figura 7)

$$M_l(L + D)C_p(T_f - T_{ref}) + Q_2 = M_lDC_p(T_3 - T_{ref}) + M_lLC_p(T_4 - T_{ref}) + Q_1$$

simplificando se obtiene:

$$M_l(L + D)C_pT_f + Q_2 = M_lDC_pT_3 + M_lLC_pT_4 + Q_1$$

$$M_l(L + D)C_pT_f + Q_2 = M_lDC_pT_3 + M_lLC_pT_4 + Q_1$$

$$Q_2 = M_lDC_pT_3 + M_lLC_pT_4 + Q_1 - M_l(L + D)C_pT_f$$

$$Q_2 = M_lC_p(DT_3 + LT_4 - (L + D)T_f) + Q_1 \quad \text{Ecuación N° 22}$$

3.12 Diámetro del stripper

según (3)

$$V = \frac{Q_2}{\lambda} V_{sp}$$

V = Carga de vapor en el Stripper

Q₂ = Calor en el reboiler

V_{sp} = Volumen específico Molar

λ = Calor latente

a condiciones normales

$$\frac{P_{CN}V_{CN}}{T_{CN}} = \frac{P_4V_4}{T_4}; \text{ donde } CN = \text{Condiciones normales}$$

reemplazando los valores respectivos se obtiene:

$$V = \frac{22.4T_4}{273.2}, \text{ además } V_{sp} = V / Ml$$

Ml = peso molecular

reemplazando se obtiene:

$$V = \frac{Q_2}{\lambda} \frac{22.4T_4}{273.2Ml} \quad \text{Ecuación (I)}$$

según (3)

$$U = k \left(\frac{\rho_l - \rho_g}{\rho_g} \right)^{\frac{1}{2}} \quad U = \text{velocidad lineal en el stripper (m/s)}$$

llevando a (m/hr) multiplicamos por 3600

$$U = k \left(\frac{\rho_l - \rho_g}{\rho_g} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot 3600 \quad (\text{II}) \quad A = \frac{\pi D_s^2}{4}$$

dividiendo (I) con (II), miembro a miembro se tiene

$$\frac{V}{U} = \frac{22.4 Q_2 T_4}{273.2 \times 3600 \lambda M_1 k \sqrt{(\rho_l - \rho_g) / \rho_g}}$$

pero, $A = \frac{\pi D_s^2}{4}$ reemplazando se tiene

$$\frac{\pi D_s^2}{4} = \frac{22.4 Q_2 T_4}{273.2 \times 3600 \lambda M_1 k \sqrt{(\rho_l - \rho_g) / \rho_g}}$$

$$D_s^2 = \frac{(4)(22.4 Q_2 T_4)}{\pi 273.2 \times 3600 \lambda M_1 k \sqrt{(\rho_l - \rho_g) / \rho_g}}$$

$$D_s = \sqrt{\frac{(4)(22.4 Q_2 T_4)}{\pi 273.2 (3600) \lambda M_1 k \sqrt{(\rho_l - \rho_g) / \rho_g}}} \quad \text{Ecuación N° 23}$$

3.13 reflujo mínimo

Reflujo mínimo: alimentación $q = 0$

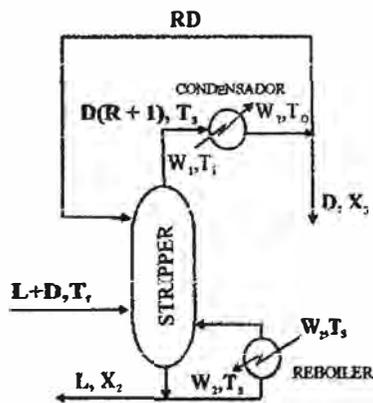


Figura 12

R = razón de reflujo

$$\alpha_{ij} = \frac{k_i}{k_j} = a = \text{volatilidad relativa}$$

$$R_{\min} = \frac{\frac{X_{i,D}}{X_{i,\infty}} - a \frac{X_{j,D}}{X_{j,\infty}}}{a-1}$$

donde Rmin = reflujo mínimo

Rmin= es la relación máxima que requiere un numero infinito de platos para lograr la separación deseada

$$x_{i,D} = x_3 \quad x_{j,D} = 1 - x_3$$

$$x_{i,\infty} = x_1 \quad x_{j,\infty} = 1 - x_1$$

reemplazando se obtiene

$$R_{\min} = \frac{1}{a-1} \left[\frac{X_3}{X_1} - a \frac{(1-X_3)}{(1-X_1)} \right] \quad \text{Ecuación N° 24}$$

3.14 Número mínimo de etapas del equilibrio

$$N_{\min} = \frac{\log \left(\frac{X_{i,N+1}}{X_{i,1}} \right) \left(\frac{X_{j,1}}{X_{j,N+1}} \right)}{\log \alpha_{ij}}$$

donde Nmin = es el numero mínimo de etapas

$$N_{\min} = \frac{\log \left[\left(\frac{x_3}{x_2} \right) \left(\frac{1-x_2}{1-x_3} \right) \right]}{\log a}$$

$$N_{\min} = \frac{\text{Ln} \left[\left(\frac{x_3}{1-x_3} \right) \left(\frac{1-x_2}{x_2} \right) \right]}{\text{Ln}(a)} \quad \text{Ecuación N° 25}$$

Ecuación de Guilliland

$$y_T = 0.75 - 0.75x^{0.5668} = 0.75(1 - x^{0.5668})$$

$$y_T = \frac{N - N_{\min}}{N + 1}, \quad X = \frac{R - R_{\min}}{R + 1}$$

$$y_T = 0.75 \left[1 - \left(\frac{R - R_{\min}}{R + 1} \right)^{0.5668} \right]$$

$$Y_T = X$$

$$X = \frac{N - N_{\min}}{N + 1} \quad \text{Ecuación N° 26}$$

$$X = 0.75 \left[1 - \left(\frac{R - R_{\min}}{R + 1} \right)^{0.5668} \right]$$

$$X / 0.75 = \left[1 - \left(\frac{R - R_{\min}}{R + 1} \right)^{0.5668} \right]$$

$$\left[1 - \left(\frac{R - R_{\min}}{R + 1} \right)^{0.5668} \right] = X / 0.75$$

$$1 - X / 0.75 = \left(\frac{R - R_{\min}}{R + 1} \right)^{0.5668}$$

$$(1 - X / 0.75)^{\frac{1}{0.5668}} = \left(\frac{R - R_{\min}}{R + 1} \right)$$

$$\text{Haciendo } A = (1 - X / 0.75)^{\frac{1}{0.5668}}$$

$$A = \left(\frac{R - R_{\min}}{R + 1} \right)$$

$$AR + A = R - R_{\min}$$

$$R - AR = R_{\min} + A$$

$$R(1-A)=R_{\min} + A$$

$$R = (R_{\min} + A)/(1-A)$$

Reemplazando se tiene:

$$R = (R_{\min} + (1 - X/0.75)^{0.5668}) / (1 - (1 - X/0.75)^{0.5668}) \quad \text{Ecuación N° 27}$$

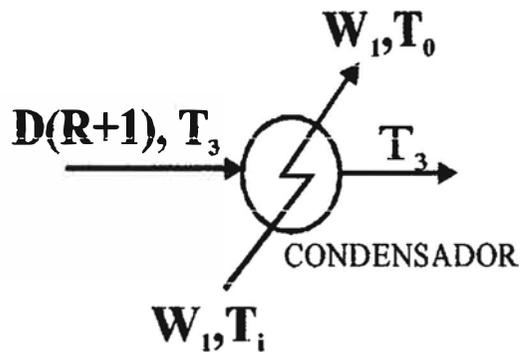


Figura 13

Balance de energía de la línea del flujo $D(R+1)$ (figura 13)

Como es un condensador

- Sólo hay cambio de fase a través del fluido
- La temperatura de salida del fluido es T_3

$$Q_1 = D(R+1)\lambda M_f$$

$$D(R+1)\lambda M_f = Q_1$$

$$D = Q_1 / ((R+1)\lambda M_f) \quad \text{Ecuación N° 28}$$

Balance de energía por el lado del agua (figura 13)

$$Q_1 = W_1 C_{PW} (T_o - T_i)$$

$$W_1 C_{PW} (T_o - T_i) = Q_1$$

$$W_1 = Q_1 / C_{PW} (T_o - T_i) \quad \text{Ecuación N° 29}$$

Ecuación de diseño del condensador (figura 13)

$$Q_1 = U_1 A_1 \Delta T_{ml1} \quad \text{Ecuación N° 30}$$

$$\Delta T_{ml1} = \frac{(T_3 - T_0) - (T_3 - T_i)}{\ln \left[\frac{T_3 - T_0}{T_3 - T_i} \right]} \quad \text{Ecuación N° 31}$$

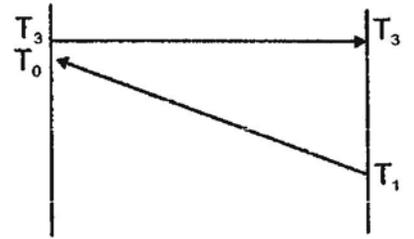


Figura 14

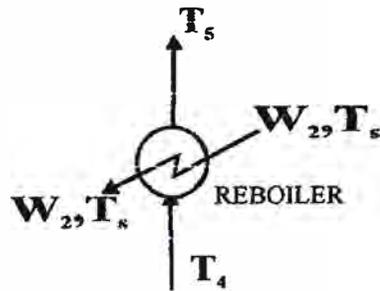


Figura 15

Balance de energía por el lado del agua (figura 15)

$$Q_2 = W_2 \lambda_w$$

$\lambda_w =$ Calor latente

$$W_2 = \frac{Kg}{hr}$$

$$W_2 \lambda_w = Q_2$$

$$W_2 = Q_2 / \lambda_w \quad \text{Ecuación N° 32}$$

Ecuación de diseño en el reboiler

$$Q_2 = U_2 A_2 \Delta T_{ml2}$$

$$U_2 A_2 \Delta T_{ml2} = Q_2$$

$$A_2 = Q_2 / (U_2 \Delta T_{ml2}) \quad \text{Ecuación N° 33}$$

$$\Delta T_{ml2} = T_s - T_4 \quad \text{Ecuación N° 34}$$

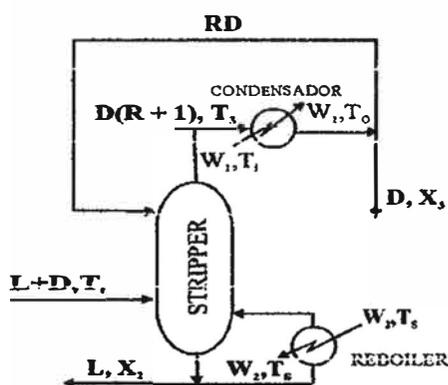


Figura 16

3.15 Determinación de la fracción molar x_2 del VOCs(figura 16)

Por August, la ecuación de la presión de vapor esta dada por

$$Lnp = A - \frac{B}{T}, \text{ Antoine alteró ligeramente introduciendo una tercera}$$

constante. $Lnp = A - \frac{B}{T + C}$, (Ferreira utiliza para fines prácticos).

$$Lnp = A - \frac{B}{T + T_{ref}}, \quad \text{Raoult define: } \frac{Pv_i}{P} = \frac{y_i}{x_i}$$

$$\text{luego se tiene: } \frac{Pv_1}{P} = \frac{y_1}{x_1}; \quad \frac{Pv_2}{P} = \frac{y_2}{x_2}$$

$x_1 = x_2^1 =$ fracción molar del solvente

$x_2 = x_1^1 =$ fracción molar de la línea que contiene el VOCs

$$y_1 + y_2 = 1$$

$$\frac{Pv_1 x_1^1}{P} + \frac{Pv_2 x_2^1}{P} = 1$$

reemplazando, se tiene

$$Pv_1 x_2 + Pv_2 x_1 = P$$

$$x_2 Pv_1 + x_1 Pv_{21} = P$$

$$x_2 P v_1 + (1 - x_2) P v_2 = P$$

$$x_2 P v_1 + P v_2 - x_2 P v_2 = P$$

$$x_2 (P v_1 - P v_2) = P - P v_2$$

$$x_2 = (P - P v_1) / (P v_2 - P v_1)$$

$$x_2 = (P - e^{(A_2 - B_2 / (T_4 + T_{ref}))}) / (e^{(A_1 - B_1 / (T_4 + T_{ref}))} - e^{(A_2 - B_2 / (T_4 + T_{ref}))}) \text{ Ecuación N}^\circ 35$$

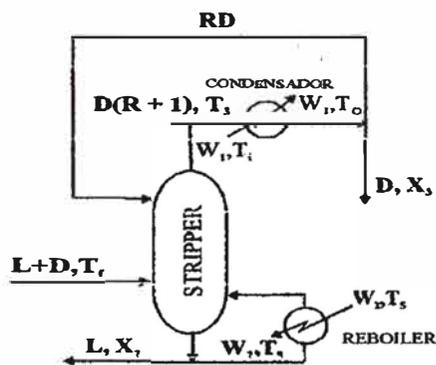


Figura 17

3.16 Determinación de la fracción molar \$x_3\$ del VOCs (de la figura 17)

\$X_3\$ = Fracción molar en fase vapor

Se tiene:

$$\sum x_i = 1$$

$$x_1 + x_2 = 1$$

$$x_1 \frac{y_1}{y_1} + x_2 \frac{y_2}{y_2} = 1$$

$$\frac{P y_1}{P v_1} + \frac{P y_2}{P v_2} = 1$$

\$X_3 = y_1 \quad y_2 = 1 - X_3\$, sistema binario

$$\frac{P x_3}{P v_1} + \frac{P(1 - x_3)}{P v_2} = 1$$

$$\frac{Px_3}{e^{(A_1 - B_1 / (T_3 + T_{ref}))}} + \frac{P(1 - x_3)}{e^{(A_2 - B_2 / (T_3 + T_{ref}))}} = 1$$

$$\frac{Px_3}{e^{(A_1 - B_1 / (T_3 + T_{ref}))}} + \frac{P(1 - x_3)}{e^{(A_2 - B_2 / (T_3 + T_{ref}))}} - 1 = 0 \quad \text{Ecuación N° 36}$$

3.17 Determinación térmica de la alimentación al stripper (figura 17)

$$q = \frac{H^{sat} - hF}{H^{sat} - hliq^{sat}}$$

$$q - 1 = \frac{H^{sat} - hF - H^{sat} + hliq^{sat}}{H^{sat} - hliq^{sat}}$$

$$q - 1 = \frac{hliq^{sat} - hF}{H^{sat} - hliq^{sat}} =$$

$$q - 1 = \frac{hliq^{sat} - hF}{\lambda}$$

$$q - 1 = \frac{CpT_f - CpT_2}{\lambda}$$

$$q - 1 = \frac{Cp(T_f - T_2)}{\lambda}$$

$$q = 1 + \frac{(T_f - T_2)Cp}{\lambda} \quad \text{Ecuación N° 37}$$

3.18 Determinación de la fracción molar x_1 que sale de los fondos del absorbedor

$$y_1 + y_2 = 1$$

$$\frac{Pv_1x_1}{P} + \frac{Pv_2x_2}{P} = 1$$

$$Pv_1x_1 + Pv_2x_2 = P$$

$$x_1Pv_1 + (1 - x_1)Pv_2 = P$$

$$x_1 P v_1 + P v_2 - x_1 P v_2 = P$$

$$x_1 (P v_1 - P v_2) + P v_2 = P$$

$$x_1 (P v_1 - P v_2) = P - P v_2$$

$$x_1 = (P - P v_2) / (P v_1 - P v_2)$$

$$x_1 = (P - e^{(A_2 - B_2 / (T_2 + T_{ref}))}) / (e^{(A_1 - B_1 / (T_2 + T_{ref}))} - e^{(A_2 - B_2 / (T_2 + T_{ref}))}) \quad \text{Ecuación N}^\circ 38$$

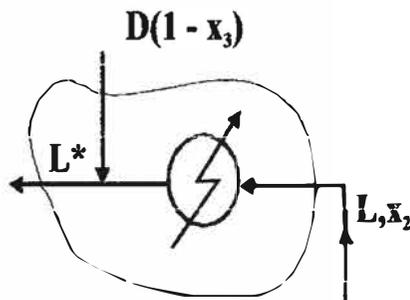


Figura 18

Balance de masa por componente del soluto (figura 18)

$$L X_2 + D(1 - X_3) = L^* X_2^*$$

$$[L + D(1 - X_3)] X_2^* = L X_2$$

$$X_2^* = \frac{L X_2}{L + D(1 - X_3)} \quad \text{Ecuación N}^\circ 39$$

Balance de masa global (figura 18)

$$L + D(1 - X_3) = L^*$$

$$L^* = L + D(1 - X_3) \quad \text{Ecuación N}^\circ 40$$

3.19 Resumen de las ecuaciones halladas en el proceso absorción – stripper para plantear el diseño optimo

$$G - F - DX_3 \quad \text{Ecuación N}^\circ 1$$

$$y_2 = (Fy_1 + LX_2 - (L + D)X_1)/G \quad \text{Ecuación N}^\circ 2$$

$$N_{og} = \frac{1}{1 - (mG/L^*)} L n \left[\left\{ 1 - \left(\frac{mG}{L^*} \right) \right\} \left\{ \frac{y_1 - mx_2}{y_2 - mx_1} + \frac{mG}{L^*} \right\} \right] \quad \text{Ecuación N}^\circ 3$$

$$H_{og} = H_g + \frac{mG}{L^*} H_l \quad \text{Ecuación N}^\circ 4$$

$$H_g = 0.557 \left(\frac{FM_g}{Aa} \right)^{0.32} \sqrt{SC_g} / \left(\frac{(L + D)M_l}{Aa} \right)^{0.51} \quad \text{Ecuación N}^\circ 5$$

$$H_l = \left(\frac{(L + D)M_l}{Aa\mu_l 3600} \right)^{0.22} .00235 \sqrt{SC_l} \quad \text{Ecuación N}^\circ 6$$

$$Z = H_{og} \cdot N_{og} \quad \text{Ecuación N}^\circ 7$$

$$Aa = \frac{\pi D a^2}{4} \quad \text{Ecuación N}^\circ 8$$

$$Da = \sqrt{\frac{4GM_g}{0.75\pi G_f \cdot 3600}} \quad \text{Ecuación N}^\circ 9$$

$$Gf = \sqrt{\frac{10^{1.74} \left(\frac{L^*}{G} \right)^{0.25} \left(\frac{\rho_l}{\rho_g} \right)^{-0.125}}{\left(\frac{a_p}{\epsilon^3} \right) \left(\frac{1}{g\rho_l\rho_g} \right) \left(\frac{\mu_L}{\mu_g} \right)^{0.2}}}} \quad \text{Ecuación N}^\circ 10$$

$$HR_1 = (L + D)KR_1N \quad \text{Ecuación N}^\circ 11$$

$$HP_2 = KP_2LZ \quad \text{Ecuación N}^\circ 12$$

$$T_5 = M_l LC_p (T_5 - T_1) / Q_4 + T_1 \quad \text{Ecuación N}^\circ 13$$

$$Q_4 = w_4 C_{pw} (T_0 - T_1) \quad \text{Ecuación N}^\circ 14$$

$$A_4 = Q_4 / (U_4 \Delta T_{ml4}) \quad \text{Ecuación N}^\circ 15$$

$$\Delta T_{ml4} = \frac{(T_5 - T_0) - (T_1 - T_i)}{\text{Ln} \left[\frac{T_5 - T_0}{T_1 - T_i} \right]} \quad \text{Ecuación N° 16}$$

$$T_f = Q_3 / (M_l C_p (L + D)) + T_1 \quad \text{Ecuación N° 17}$$

$$Q_3 = M_l L C_p (T_4 - T_5) \quad \text{Ecuación N° 18}$$

$$A_3 = Q_3 / (U_3 \Delta T_{m13}) \quad \text{Ecuación N° 19}$$

$$\Delta T_{ml3} = \frac{(T_5 - T_1) - (T_4 - T_f)}{\text{Ln} \left[\frac{T_5 - T_1}{T_4 - T_f} \right]} \quad \text{Ecuación N° 20}$$

$$L = D(X_3 - X_1) / (X_1 - X_2) \quad \text{Ecuación N° 21}$$

$$Q_2 = M_l C_p (DT_3 + LT_4 - (L + D)T_f) + Q_1 \quad \text{Ecuación N° 22}$$

$$D_s = \sqrt{\frac{(4)(22.4Q_2T_4)}{\pi 273.2(3600)\lambda M_l k \sqrt{(\rho_l - \rho_g) / \rho_g}}} \quad \text{Ecuación N° 23}$$

$$R_{\min} = \frac{1}{a-1} \left[\frac{X_3}{X_1} - a \frac{(1-X_3)}{(1-X_1)} \right] \quad \text{Ecuación N° 24}$$

$$N_{\min} = \frac{\text{Ln} \left[\left(\frac{x_3}{1-x_3} \right) \left(\frac{1-x_2}{x_2} \right) \right]}{\text{Ln}(a)} \quad \text{Ecuación N° 25}$$

$$X = \frac{N - N_{\min}}{N + 1} \quad \text{Ecuación N° 26}$$

$$R = (R_{\min} + (1 - X/0.75)^{0.5668}) / (1 - (1 - X/0.75)^{0.5668}) \quad \text{Ecuación N° 27}$$

$$D = Q_1 / ((R + 1)\lambda M_l) \quad \text{Ecuación N° 28}$$

$$W_1 = Q_1 / C_{pw} (T_o - T_i) \quad \text{Ecuación N° 29}$$

$$Q_1 = U_1 A_1 \Delta T_{m1} \quad \text{Ecuación N° 30}$$

$$\Delta T_{ml1} = \frac{(T_3 - T_0) - (T_3 - T_i)}{\text{Ln} \left[\frac{T_3 - T_0}{T_3 - T_i} \right]} \quad \text{Ecuación N° 31}$$

$$W_2 = Q_2 / \lambda_w \quad \text{Ecuación N° 32}$$

$$A_2 = Q_2 / (U_2 \Delta T_{ml2}) \quad \text{Ecuación N° 33}$$

$$\Delta T_{ml2} = T_s - T_4 \quad \text{Ecuación N° 34}$$

$$x_2 = (P - e^{(A_2 - B_2 / (T_4 + T_{ref}))}) / (e^{(A_1 - B_1 / (T_4 + T_{ref}))} - e^{(A_2 - B_2 / (T_4 + T_{ref}))}) \quad \text{Ecuación N° 35}$$

$$\frac{Px_3}{e^{(A_1 - B_1 / (T_3 + T_{ref}))}} + \frac{P(1 - x_3)}{e^{(A_2 - B_2 / (T_3 + T_{ref}))}} - 1 = 0 \quad \text{Ecuación N° 36}$$

$$q = 1 + \frac{(T_f - T_2)Cp}{\lambda} \quad \text{Ecuación N° 37}$$

$$x_1 = (P - e^{(A_2 - B_2 / (T_2 + T_{ref}))}) / (e^{(A_1 - B_1 / (T_2 + T_{ref}))} - e^{(A_2 - B_2 / (T_2 + T_{ref}))}) \quad \text{Ecuación N° 38}$$

$$X_2^* = \frac{LX_2}{L + D(1 - X_3)} \quad \text{Ecuación N° 39}$$

$$L^* = L + D(1 - X_3) \quad \text{Ecuación N° 40}$$

3. 20 Función Objetivo

se define:

Función Objetivo – Ingreso por venta del Producto – (costo de la alimentación + costo del solvente fresco + costo del agua en el condensador + costo del agua en el enfriador + costo del agua en el reboiler + retorno de inversión)

La formulación de la función objetivo es maximizar la ganancia

$$F_{obj} = Pp.D.Ml.x3 - (Cg.F.Mg + Cl.DMl.(1-x_3) + Cw(w1+w4) + Cs.w2 + Ce(HP_1 + HP_2) + Inv * ROI)$$

Donde la inversión se establece a través de la siguiente función.

$$Inv = Cz.Z.Da + Cn.N.Ds^{1.085} + Ca(A_1^{0.556} + A_2^{0.556} + A_3^{0.556} + A_4^{0.556}) + Chp(HP_1^{0.3} + HP_2^{0.3})$$

3. 21 Elección de las variables independientes para iniciar el proceso

Del desarrollo de las operaciones anteriores se determino 40 ecuaciones

Se asume datos de entrada (ver tabla de datos Pág 61)

Se tiene entonces 45 variables.

Para establecer el procedimiento debemos de elegir 5 variables que nos permitan la solución óptima del diseño, para ello se debe de realizar una simulación.

Como la función Objetivo es maximizar la ganancia, el diseño del proceso debe de estar en relación con los costos de los equipos y los costos de los servicios.

En lo que respecta a los equipos, los que tienen mayor costo son

El absorvedor, el stripper y el intercambiador de calor; las variables de diseño que están ligadas directamente con estos equipos son Temperatura, Numero de etapas y Área respectivamente.

En lo que respecta a los servicios, tenemos al agua y la energía que requiere el proceso, las variables que están ligadas directamente con estos equipos son el flujo de agua de enfriamiento y la temperatura.

Elegimos a:

T_4, T_2, W_4, N, A_1

Debido que tiene que condensar, y puesto que los vapores necesita un mayor área, encarece los costos.

Las variables elegidas nos permiten maximizar la función objetivo, ya que esta ligado directamente con ella.

3.22 Elaboración de los diagramas de Flujo

Para optimizar el proceso establecemos diagramas de flujo con el fin de encontrar y diseñar un procedimiento adecuado.

a) Diagrama 1

Diagrama de flujo global para optimizar la función objetivo

Este diagrama nos determina el algoritmo de cálculo de las variables óptimas de la librería Solver®

b) Diagrama 2

Diagrama de flujo paso a paso para cada variable para optimizar la función objetivo paso a paso

Este diagrama nos determina el algoritmo de cálculo de todas las variables del proceso.

c) Diagrama 3

Diagrama de flujo para el método complejo

Este diagrama determina el procedimiento de búsqueda de la solución óptima a partir de puntos iniciales

DIAGRAMA 1

DIAGRAMA DEL FLUJO GLOBAL PARA OPTIMIZAR LA FUNCION OBJETIVO

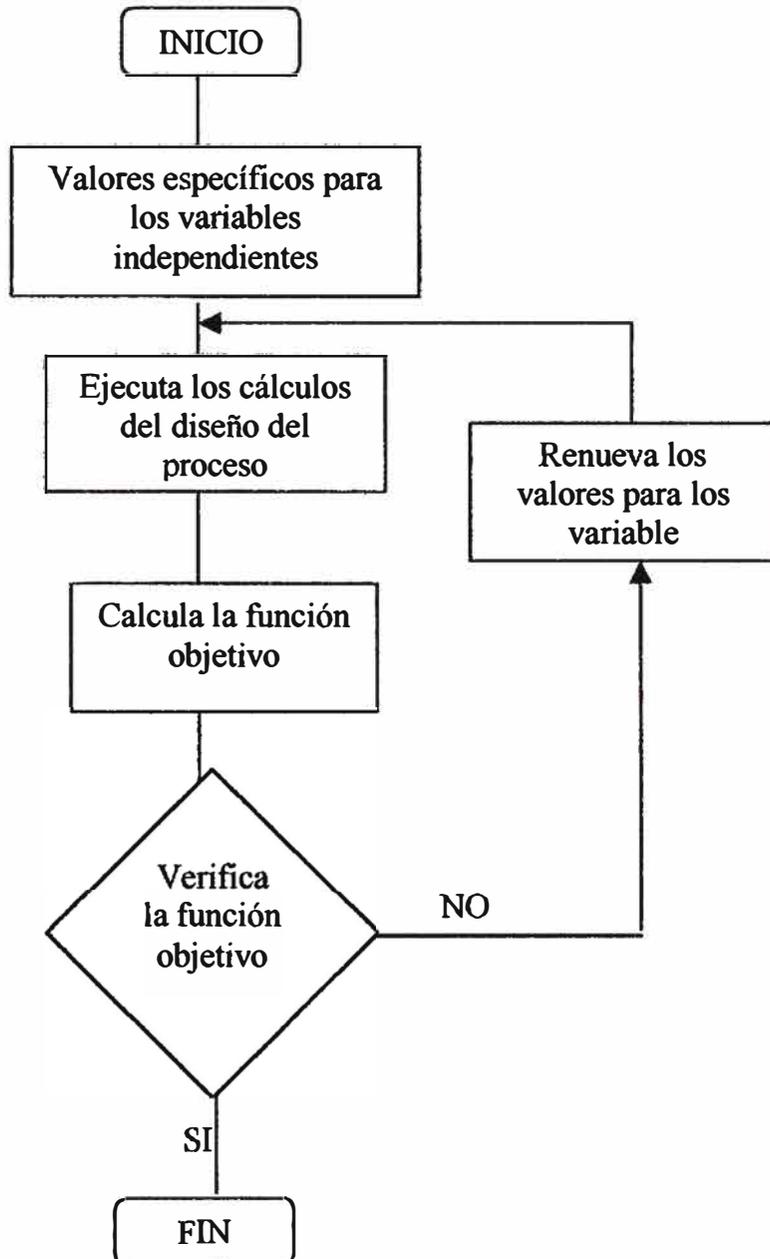
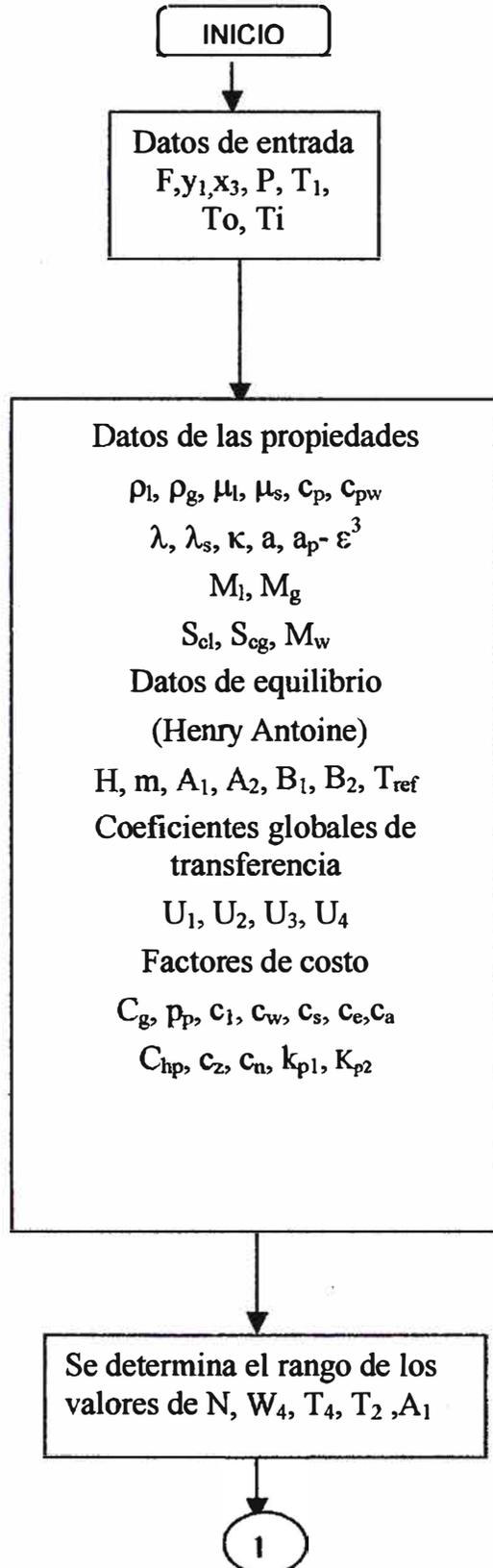


DIAGRAMA 2

DIAGRAMA DEL FLUJO PASO A PASO PARA CADA VARIABLE PARA OPTIMIZAR LA FUNCION OBJETIVO



1

Se ingresa valores
iniciales a
 N, W_4, T_4, T_2, A_1
En el rango determinado

Se determina Q_4 con
la ecuación N° 14

Se determina Δt_{ml_2} con
la ecuación N° 34

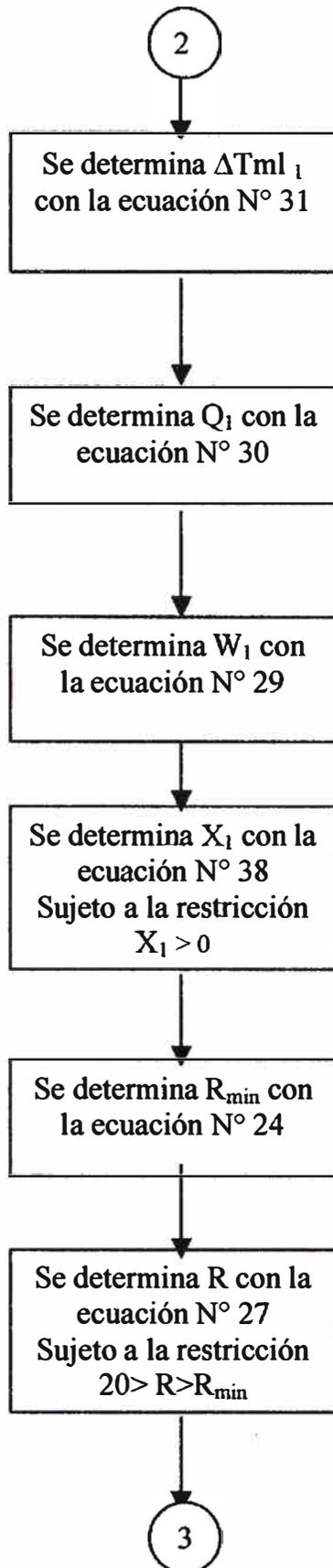
Se determina X_2 con la
ecuación N° 35

Se determina N_{min} con
la ecuación N° 25

Se determina X con la
ecuación 26
sujeto a la restricción
 $X \leq 0.75$

Se determina T_3 con
la ecuación N° 36

2



3

Se determina D con la ecuación N° 28
Sujeto a la restricción
 $D < F$

Se determina G con la ecuación N° 1

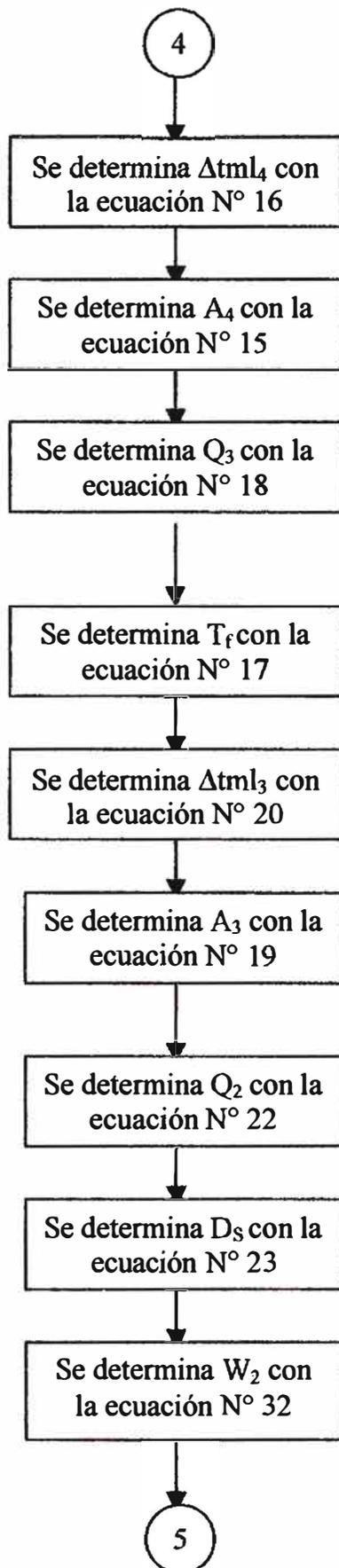
Se determina L con la ecuación N° 21
Sujeto a la restricción
 $L < F$

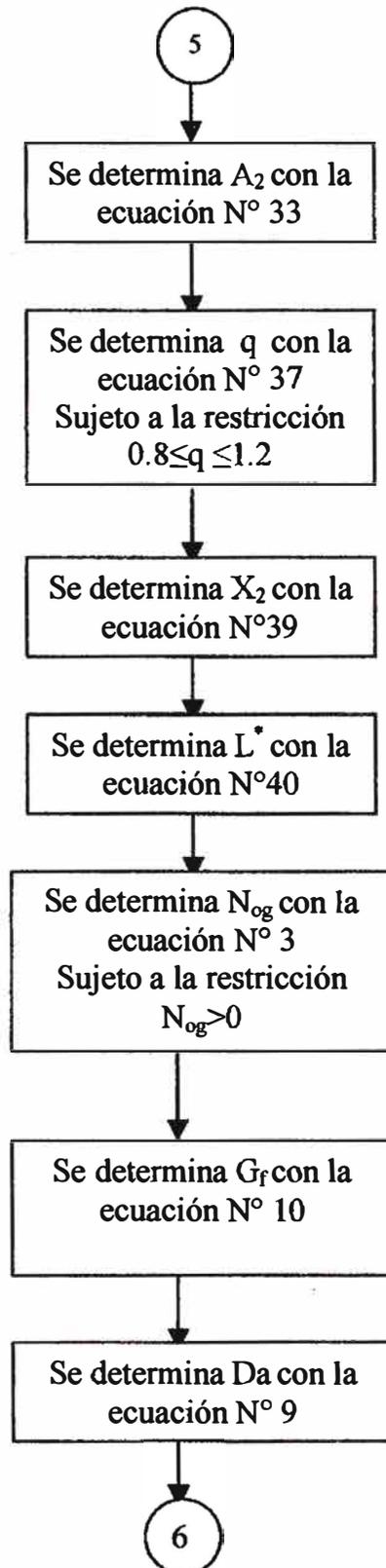
Se determina y_2 con la ecuación N° 2

Se determina HP_1 con la ecuación N° 11

Se determina T_5 con la ecuación N° 13
Sujeto a la restricción
 $T_5 > T_0$

4





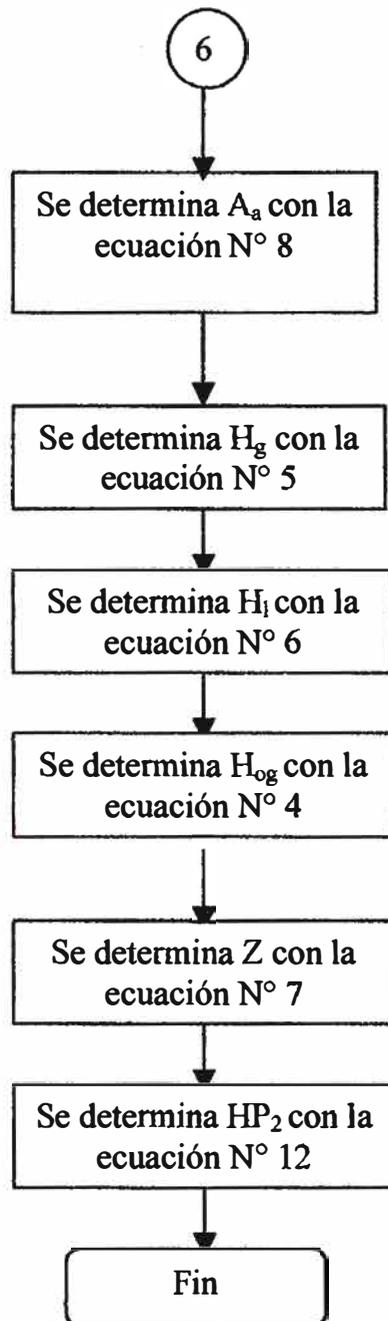
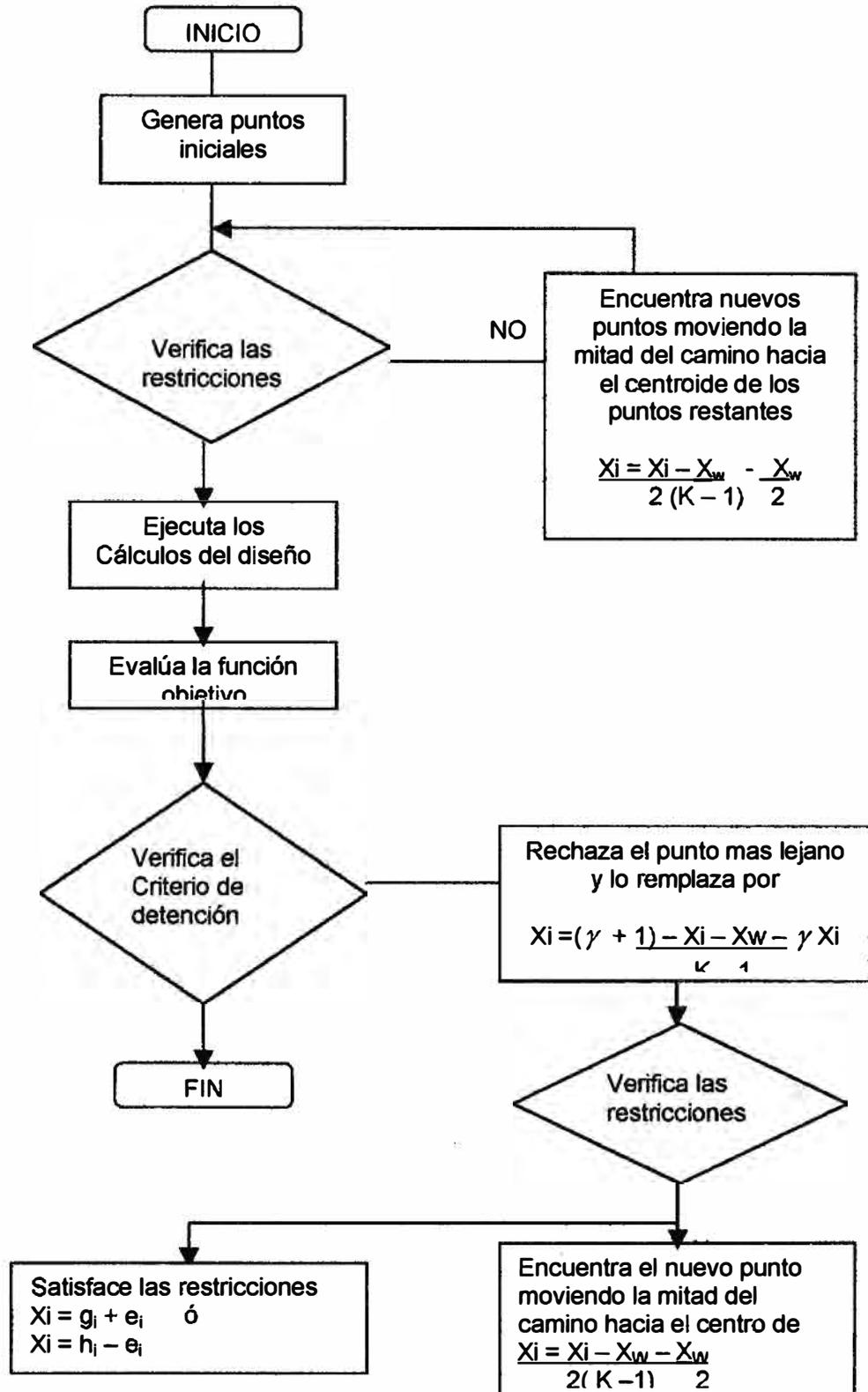


DIAGRAMA 3

DIAGRAMA DE FLUJO PARA EL METODO COMPLEX



3.23 Corrida del programa para determinar la función objetivo utilizando la librería SOLVER de Microsoft Excel

Para efectuar el diseño previamente se ha determinado 40 ecuaciones y 45 variables independientes, por lo tanto el sistema tiene 5 grados de libertad.

Luego para hallar la solución se establece la función objetivo:

Esta es una optimización económica, así el objetivo es maximizar la ganancia(ahorro), el cual es la diferencia entre los ingresos de la venta(ahorro) de COVs recuperado y el capital anual y los costos de operación del sistema.

$$F_{obj} = P_p * D * m_1 * x_3 - (C_g * F * m_g + C_l * D * (1 - _3) * m_1 + C_w * (w_1 + w_4) + C_s * w_2 + C_e * (HP_1 + HP_2) + Inv * ROI)$$

Donde la inversión se establece a través de la siguiente función.

$$Inv = C_z * Z * D_a + C_n * N * D_s^{1.085} + C_a * (Area1^{0.556} + Area2^{0.556} + Area3^{0.556} + Area4^{0.556}) + C_{hp} * (HP_1^{0.3} + HP_2^{0.3})$$

Para optimizar se sigue el siguiente procedimiento:

PRIMERO: Se ingresa los datos según la tabla de datos de entrada (Pág 61)

SEGUNDO: Se da valores iniciales a las variables escogidas previa simulación (N, W₄, T₄, T₂ y Area1) de acuerdo al rango permitido.

N	W 4	T 4	T 2	Area1	
					Valor inicial
0	0	314.42	314.42	0	Limite inferior
100	1000	350.64	350.64	200	Limite superior

Para determinar los límites de la temperatura se emplea la ecuación de Antoine a una presión y temperatura (en este caso P = 1 atm y T_{REF} = 230 °K)

$$B_1 / (A_1 - \ln(P)) - T_{REF} \leq T_4 \leq B_2 / (A_2 - \ln(P)) - T_{REF}$$

$$B_1 / (A_1 - \ln(P)) - T_{REF} \leq T_2 \leq B_2 / (A_2 - \ln(P)) - T_{REF}$$

Donde: A₁, A₂, B₁, B₂ son constantes

TERCERO: Se calcula la temperatura T₃ por la ecuación 36.

dada por:

$$T_3 = P \cdot x_3 / \exp(A_1 - B_1 / (T_3 + T_{REF})) + P \cdot (1 - x_3) / \exp(A_2 - B_2 / (T_3 + T_{REF})) - 1$$

Es una ecuación no lineal.

CUARTO: Se establece la siguiente secuencia de cálculos:

Nº

ecuación	Variable	Asignación
14	Q ₄	w ₄ *cpw*(To-Ti)
34	DTml2	Ts-T ₄
35	x ₂	(P-EXP(A ₂ -B ₂ /(T ₄ +TREF)))/(EXP(A ₁ -B ₁ /(T ₄ +TREF))-EXP(A ₂ -B ₂ /(T ₄ +TREF)))
25	Nm	LN(x ₃ /(1-x ₃))*(1-x ₂)/x ₂ /LN(a)
26	X	(N-Nm)/(1+N)
36	I12	T ₃
31	DTml1	((T ₃ -To)-(T ₃ -Ti))/LN((T ₃ -To)/(T ₃ -Ti))
30	Q ₁	U ₁ *Area1*DTml1
29	W ₁	Q ₁ /cpw/(To-Ti)
38	x ₁	(P-EXP(A ₂ -B ₂ /(T ₂ +TREF)))/(EXP(A ₁ -B ₁ /(T ₂ +TREF))-EXP(A ₂ -B ₂ /(T ₂ +TREF)))
24	Rm	1/(a-1)*(x ₃ /x ₁ -a*(1-x ₃)/(1-x ₁))
27	Rr	SI(X<0.75,(Rm+(1-X/0.75)^(1/0.5668))/(1-(1-X/0.75)^(1/0.5668)),0)
28	D	Q ₁ /lambda/(Rr+1)/m ₁
1	G	F-D*x ₃
21	L	D*(x ₃ -x ₁)/(x ₁ -x ₂)
2	Y ₂	(F*y ₁ +L'*x ₂ -(L'+D)*x ₁)/G
11	HP ₁	kp1*(L'+D)*N
13	T ₅	Q ₄ /(m ₁ *cp*L')+T ₁
16	DTml4	((T ₅ -To)-(T ₁ -Ti))/LN((T ₅ -To)/(T ₁ -Ti))
15	Area4	Q ₄ /U ₄ /DTml4
18	Q ₃	L'*cp*m ₁ *(T ₄ -T ₅)
17	Tf	Q ₃ /(m ₁ *cp*(L'+D))+T ₁

20	DTml3	$((T_5-T_1)-(T_4-T_f))/LN((T_5-T_1)/(T_4-T_f))$
19	Area3	$Q_3/U_3/DTml3$
22	Q_2	$m_1*cp*(D*T_3+L*T_4-(L+D)*T_f)+Q_1$ $RAIZ(4*22.4*T_4*Q_2/273.2/3600/m_1/PI()/lambda/k/RAIZ$
23	Ds	$((ro_l-ro_g)/ro_g)$
32	w_2	$Q_2/lambda_s$
33	Area2	$Q_2/U_2/DTml2$
37	Q	$1+(T_f-T_2)*cp/lambda$
39	x2_	$L*x_2/(L+D*(1-x_3))$
40	L_	$L+D*(1-x_3)$
3	Nog	$SI(B32>0,1/(1-m*G/L_)*LN(B32),0)$ $RAIZ(10^(1.74*(L_*m_1/G/m_g)^0.25*(ro_l/ro_g)^$
10	Gf	$(-0.125))/ap_e3*9.8*ro_l*ro_g/(miu_l/miu_g)^0.2)$
9	Da	$RAIZ(4/0.75/PI()*G*m_g/Gf/3600)$
8	Aa=	$0.25*PI()*Da^2$
5	Hg	$0.557*(F*m_g/Aa)^0.32*RAIZ(Sc_g)/((L+D)*m_1/Aa)^0.51$
6	Hl	$((L+D)*m_1/Aa/miu_l/3600)^0.22*0.00235*RAIZ(Sc_l)$
4	Hog	$hg+Hl*m*G/L_$
7	Z	$Nog*Hog$
12	HP_2	$kp2*Z*L'$

QUINTO: Para dar un resultado optimo se señala las siguientes restricciones

$$0 \leq D \leq F$$

$$0 \leq \text{Eficiencia} \leq 100$$

$$L \leq 300$$

$$X \leq 0.75$$

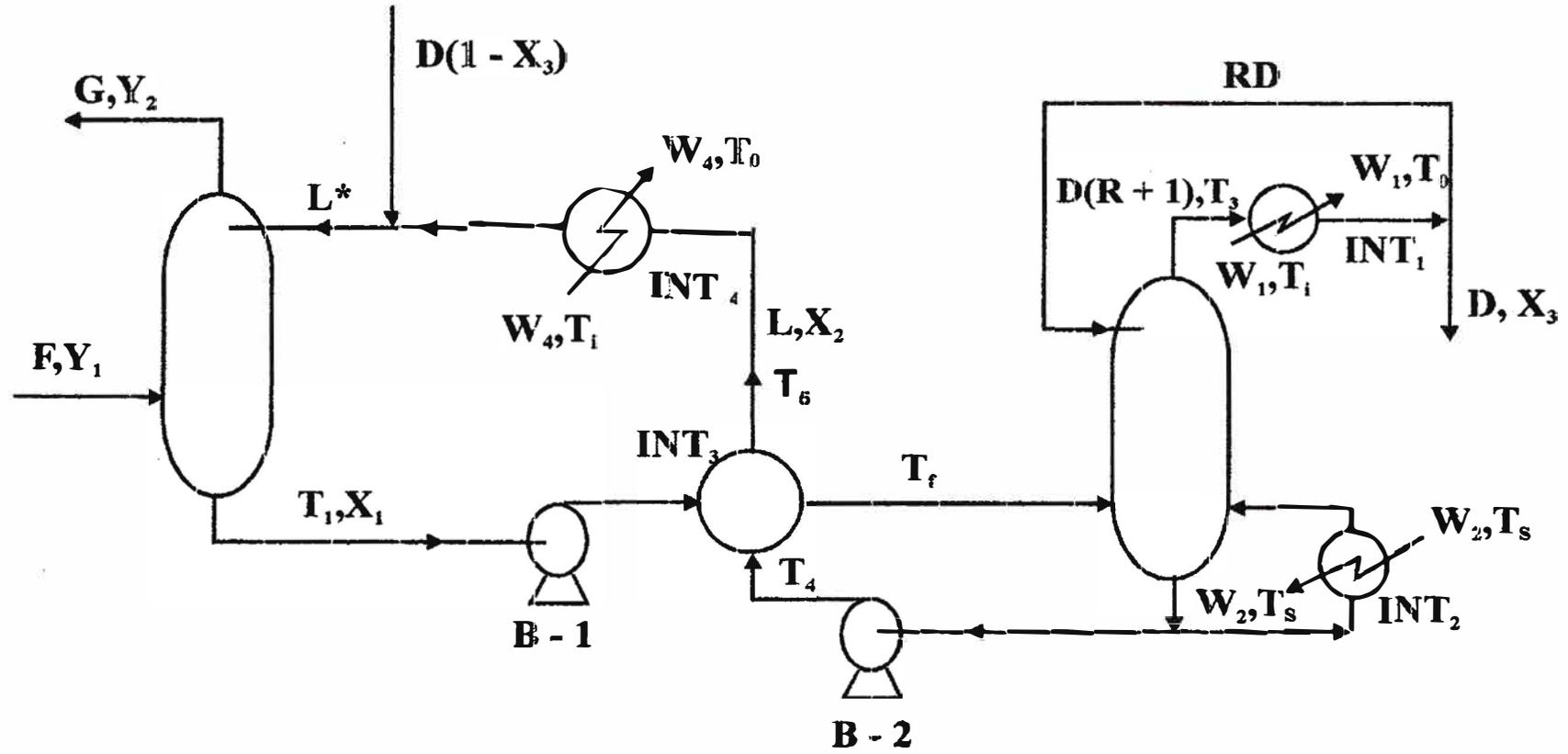
$$0.8 \leq q \leq 1.2$$

$$T_5 > T_0$$

$$(1-m*G/L_)*((y_1-m*x2_)/(y_2-m*x2_))+m*G/L_ \geq 0$$

$$Nog > 0$$

RECUPERACIÓN DE SOLVENTES



INGRESO DE DATOS

Designacion de valores

F	y₁	x₃	P	T₁	T_i	T_o	T_s
60	0.4	0.99	760	303	293	298	393
kgmol/hr			mmHg	°K	°K	°K	°K

Propiedades

ρ_L	ρ_G	M_L	M_G	c_p	c_{pw}	λ	λ_w
1500	5	154	58	0.2	1	50	500
kg/m ³	kg/m ³	kg/kgmol	kg/kgmol	kcal/kg/K	kcal/kg/K	kcal/kg	kcal/kg
μ_L	μ_G	D_L	D_G	Sc_L	Sc_G	M_w	
0.001	1.85E-05	2.00E-09	2.20E-05	3.33E+02	1.68E-01	18	
kg/ms	kg/ms	m ² /s	m ² /s			kg/kgmol	

Otros datos

k	a	a_p/ε³
0.10	2	490
m/s		m ² /m ³

Datos de Equilibrio

H	m=H/P	A₁	A₂	B₁	B₂	T_{REF}
608	0.80	32.9	30.4	14300	13800	230
mmHg				°K	°K	°K

Coefficientes globales de transferencia

U₁	U₂	U₃	U₄
300	500	100	200
kcal/m ² .hr.K	kcal/m ² .hr.K	kcal/m ² .hr.K	kcal/m ² .hr.K

Factores de costo

ROI= 0.14 (=1/7)											
Alimentacion F	Producto DX3	Solvente	Agua	Vapor (reboiler)	Electricidad	Intercambio de calor	Bombas	Torre de Absorcion	Stripper	Bomba 1	Bomba 2
C_g	P_p	C_i	C_w	C_s	C_e	C_a	C_{hp}	C_z	C_n	k_{p1}	k_{p2}
50	20	5	0.0635	35.2	89.7	350	1000	600	363	0.1	0.05
\$/hr/año.kg	\$/hr/año.kg	\$/hr/año.kg	\$/hr/año.kg	\$/hr/año.kg	\$/año.hp	\$/m ²) ^{0.556}	\$/hp) ^{0.30}	\$/m ²	\$/((N).m) ^{1.08} _s	hp.hr/(kgmol) (N)	hp.hr/(kgmol) (m altura)

3.24 Simulación mediante la herramienta escenarios de Microsoft Excel

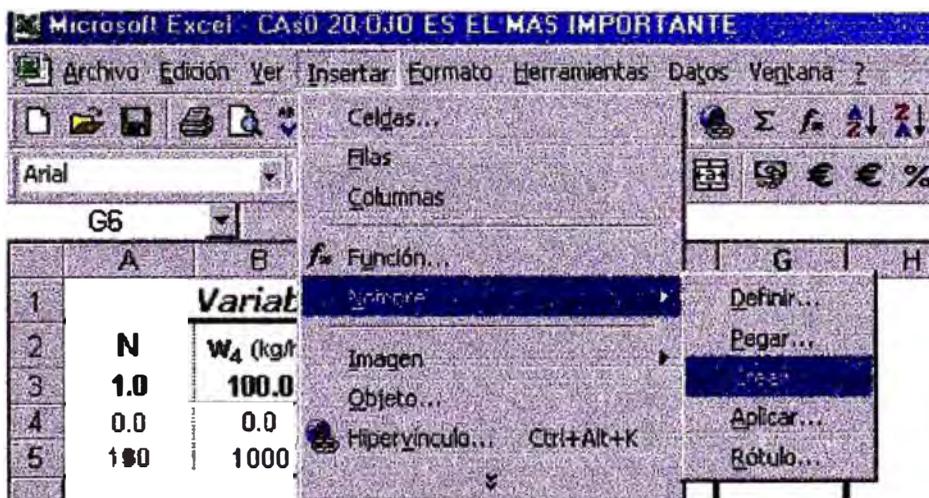
Con esta herramienta podemos observar como variarían los resultados cuando varían los datos iniciales.

Un escenario es, pues, el conjunto de variables y sus valores que definen una determinada prueba, más el conjunto de resultados que esos valores generan.

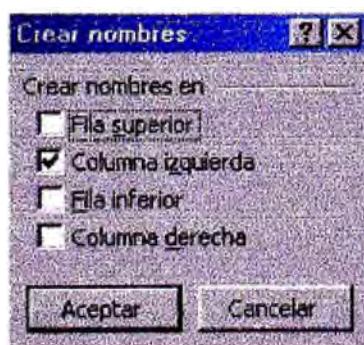
Para ello se realiza el siguiente procedimiento:

1.- Se selecciona el rango que contiene los datos numéricos que van a variar A2:E3

2.- Se ejecuta el mandato Insertar / Nombre /Crear tal como se muestra



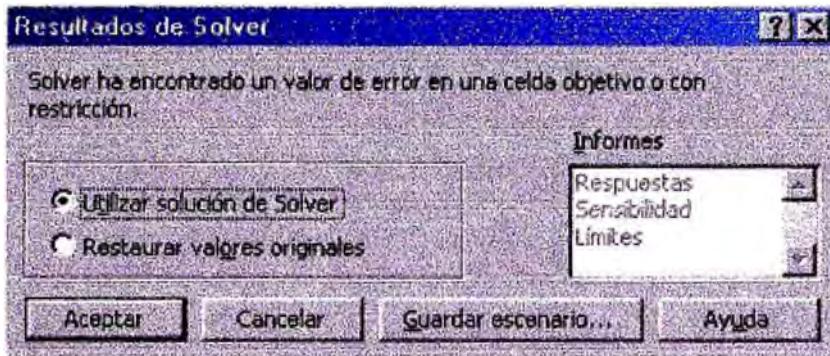
3.- luego aparece la siguiente ventana



haga un clic en aceptar

4.- Se repite los pasos 2, 3 para el rango de celdas A3:E3

5.- Para la creación de escenarios, ejecute la primera corrida ingresando los datos iniciales y aparece la siguiente ventana.

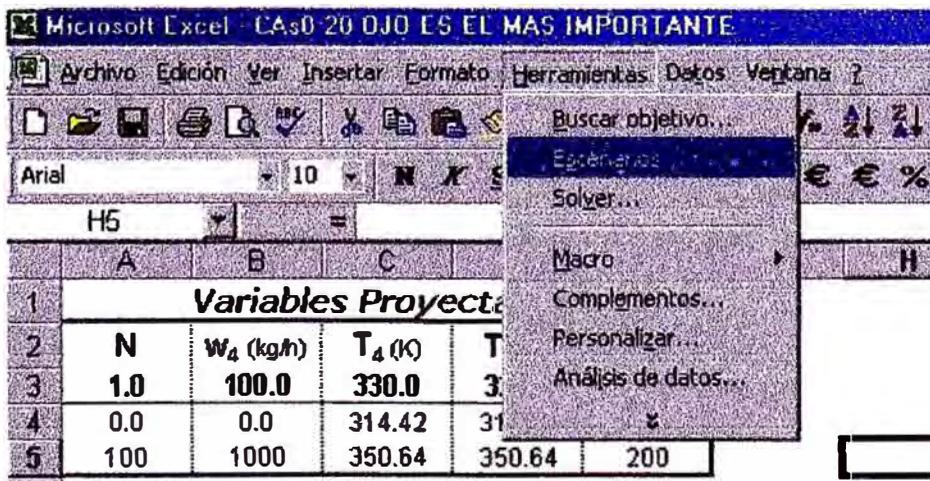


haga un clic en Guardar escenario, y aparece la siguiente ventana, asigne un nombre o un numero en Guardar escenario



6.- Repita el paso 5 para las corridas que usted crea conveniente, asignando nombres o números diferentes para cada corrida.

7.- Luego se elige Herramienta / Escenarios



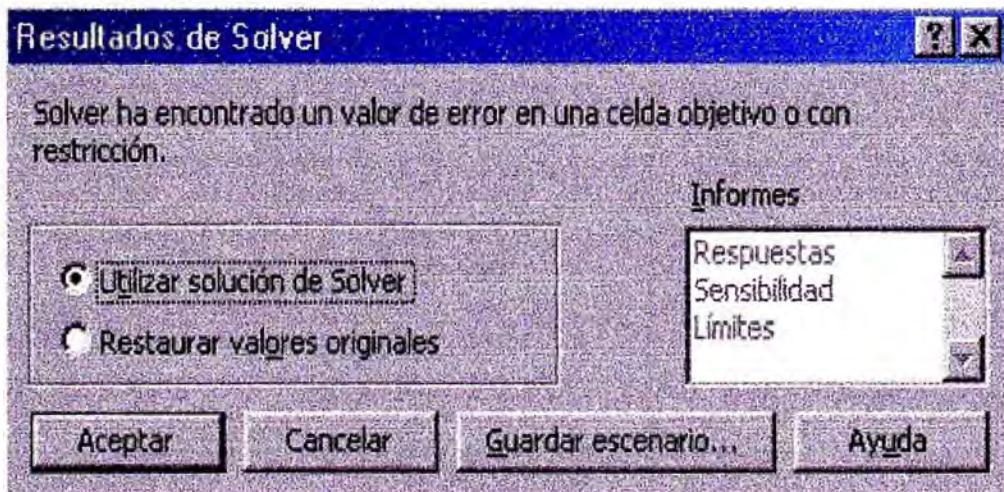
PARA VISUALIZAR LOS RESULTADOS DEBEMOS DE TENER PRESENTE LO SIGUIENTE

EJEMPLO 1:

Si se introduce los datos tal como se muestra:

N	W_4 (kg/h)	T_4 (K)	T_2 (K)	A_1 (m ²)
1	100	330	320	10

Al ejecutar SOLVER, se visualiza lo siguiente:



Si se realiza un clic en aceptar, se obtiene el siguiente resultado.

Variables Proyectadas				
N	W ₄ (kg/h)	T ₄ (K)	T ₂ (K)	A ₁ (m ²)
4.0	100.0	322.9	329.1	0.0
0.0	0.0	314.42	314.42	0.0
100	1000	350.64	350.64	200

Funcion Objetivo	
Inv.=	#jDIV/0!
O.F.=	#jDIV/0!

Computando T₃ (optimizar)			
eq. (36) =	1.95E-04	T ₃ =	315.2

**Ejecutando la
solucion optima**

Eq. #	Variable	Valor	Unidades
14	Q ₄ =	500	kcal/h
35	x ₂ =	0.583	
26	X=	-0.419	
31	ΔT _{m1} =	19.6	°K
29	w ₁ =	0	kg/h
24	R _m =	2.593	
28	D=	0.0	kmol/h
21	L=	0.0	kmol/h
11	HP ₁ =	0.0	hp
16	ΔT _{m4} =	#jDIV/0!	°K
18	Q ₃ =	#jDIV/0!	kcal/h
20	ΔT _{m3} =	#jDIV/0!	°K
22	Q ₂ =	#jDIV/0!	kcal/h
32	w ₂ =	#jDIV/0!	kg/h
37	q=	#jDIV/0!	
40	L* =	0.0	kmol/h
10	G _r =	8.22	kg/(m ² .s)
8	A _a =	0.1568	m ²
6	H _i =	0.000	m
7	Z=	#jDIV/0!	m

Eq. #	Variable	Valor	Unidades
34	ΔT _{m2} =	70.1	°K
25	N _m =	6.148	
36	T ₃ =	315.2	°K
30	Q ₁ =	0	kcal/h
38	x ₁ =	0.377	
27	R=	-4.026	
1	G=	60.00	kmol/h
2	y ₂ =	0.4000	
13	T ₅ =	#jDIV/0!	°K
15	A ₄ =	#jDIV/0!	m ²
17	T _r =	#jDIV/0!	°K
19	A ₃ =	#jDIV/0!	m ²
23	D _s =	#jDIV/0!	m
33	A ₂ =	#jDIV/0!	m ²
39	x ₂ *=	#jDIV/0!	
3	N _{og} =	#jDIV/0!	
9	D _a =	0.45	m
5	H _g =	#jDIV/0!	m
4	H _{og} =	#jDIV/0!	m
12	HP ₂ =	#jDIV/0!	hp

Restricciones

Nog > 0 #jDIV/0!	0 < D < F = 60 0.00	0 < x ₁ < 1 0.38	Efficiencia >= 0% η = 0.0
y ₂ > mx ₂ * 0.4000 #jDIV/0!	0.8 < q < 1.2 #jDIV/0!	Rmin < R < 20 2.593 -4.026	1-mG/L* #jDIV/0!

Funcion Objetivo	
Inv.=	#jDIV/0!
O.F.=	#jDIV/0!

**Computando la
solucion optima**

$$F_{obj} = P_p D M_1 x_3 - [C_g F M_g + C_1 D (1-x_3) M_1 + C_w (w_1 + w_4) + C_s w_2 + C_e (HP_1 + HP_2) + Inv F_c]$$

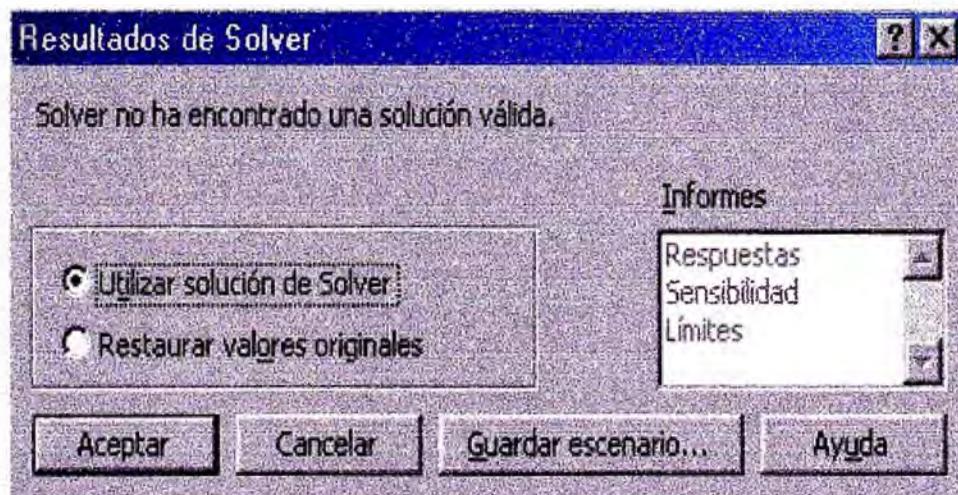
$$Inv = C_z Z D_a + C_n N D_s^{1.085} + C_a (A_1^{0.556} + A_2^{0.556} + A_3^{0.556} + A_4^{0.556}) + C_{hp} (HP_1^{0.3} + HP_2^{0.3})$$

EJEMPLO 2:

Si se introduce los datos tal como se muestra:

N	W ₄ (kg/h)	T ₄ (K)	T ₂ (K)	A ₁ (m ²)
2	100	330	320	10

Al ejecutar SOLVER, se visualiza lo siguiente:



Si se realiza un clic en aceptar, se obtiene el siguiente resultado.

Variables Proyectadas				
N	W ₄ (kg/h)	T ₄ (K)	T ₂ (K)	A ₁ (m ²)
4.7	100.0	326.1	325.3	3.6
0.0	0.0	314.42	314.42	0.0
100	1000	350.64	350.64	200

Funcion Objetivo	
Inv.=	# _i NUM!
O.F.=	-\$999,999

Computando T₃ (optimizar)			
eq. (36) =	1.95E-04	T ₃ =	315.2

**Ejecutando la
solucion optima**

Eq. #	Variable	Valor	Unidades
14	Q ₄ =	500	kcal/h
35	x ₂ =	0.469	
26	X=	-0.375	
31	ΔT _{m1} =	19.6	°K
29	w ₁ =	4,245	kg/h
24	R _m =	1.959	
28	D=	-1.0	kmol/h
21	L=	-18.4	kmol/h
11	HP ₁ =	-9.1	hp
16	ΔT _{m4} =	6.6	°K
18	Q ₃ =	-13,573	kcal/h
20	ΔT _{m3} =	# _i NUM!	°K
22	Q ₂ =	21,360	kcal/h
32	w ₂ =	43	kg/h
37	q=	1.002	
40	L [*] =	-18.4	kmol/h
10	G _f =	# _i NUM!	kg/(m ² .s)
8	A _a =	# _i NUM!	m ²
6	H _f =	# _i NUM!	m
7	Z=	# _i NUM!	m

Eq. #	Variable	Valor	Unidades
34	ΔT _{m2} =	66.9	°K
25	N _m =	6.808	
36	T ₃ =	315.2	°K
30	Q ₁ =	21,226	kcal/h
38	x ₁ =	0.495	
27	R=	-3.828	
1	G=	60.96	kmol/h
2	y ₂ =	0.4095	
13	T ₅ =	302.1	°K
15	A ₄ =	0.38	m ²
17	T _f =	325.8	°K
19	A ₃ =	# _i NUM!	m ²
23	D _s =	0.12	m
33	A ₂ =	0.64	m ²
39	x ₂ [*] =	0.4689	
3	N _{og} =	0.0	
9	D _a =	# _i NUM!	m
5	H _g =	# _i NUM!	m
4	H _{og} =	# _i NUM!	m
12	HP ₂ =	# _i NUM!	hp

Restricciones

Nog > 0 -0.01	0 < D < F = 60 -0.97	0 < x ₁ < 1 0.50	Efficiencia >= 0% η = -4.0
y ₂ > mx ₂ [*] 0.4095 0.3751	0.8 < q < 1.2 1.002	Rmin < R < 20 1.959 -3.828	1 - mG/L [*] 3.65

Funcion Objetivo	
Inv.=	# _i NUM!
O.F.=	-\$999,999

**Computando la
solucion optima**

$$F_{obj} = P_p D M_1 x_3 - [C_g F M_g + C_1 D (1 - x_3) M_1 + C_w (w_1 + w_4) + C_s w_2 + C_c (HP_1 + HP_2) + Inv F_c]$$

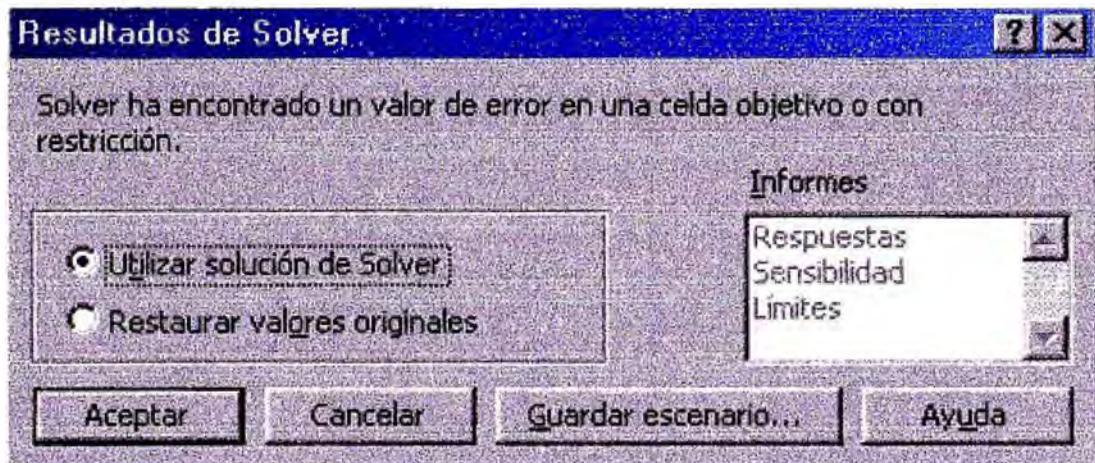
$$Inv = C_z Z D_a + C_n N D_s^{1.085} + C_a (A_1^{0.556} + A_2^{0.556} + A_3^{0.556} + A_4^{0.556}) + C_{hp} (HP_1^{0.3} + HP_2^{0.3})$$

EJEMPLO 3:

Si se introduce los datos tal como se muestra:

N	W_4 (kg/h)	T_4 (K)	T_2 (K)	A_1 (m ²)
17	100	330	320	10

Al ejecutar SOLVER, se visualiza lo siguiente:



Si se realiza un clic en aceptar, se obtiene el siguiente resultado.

Variables Proyectadas				
N	W ₄ (kg/h)	T ₄ (K)	T ₂ (K)	A ₁ (m ²)
5.8	100.5	285.6	324.0	25.1
0.0	0.0	314.42	314.42	0.0
100	1000	350.64	350.64	200

Funcion Objetivo	
Inv.=	#jNUM!
O.F.=	#jNUM!

Computando T₃ (optimizar)			
eq. (36) =	1.95E-04	T ₃ =	315.2

Ejecutando la solucion optima	
--------------------------------------	--

Eq. #	Variable	Valor	Unidades
14	Q ₄ =	502	kcal/h
35	x ₂ =	5.278	
26	X=	#jNUM!	
31	ΔT _{mi1} =	19.6	°K
29	w ₁ =	29,559	kg/h
24	R _m =	1.786	
28	D=	#jNUM!	kmol/h
21	L=	#jNUM!	kmol/h
11	HP ₁ =	#jNUM!	hp
16	ΔT _{mi4} =	#jNUM!	°K
18	Q ₃ =	#jNUM!	kcal/h
20	ΔT _{mi3} =	#jNUM!	°K
22	Q ₂ =	#jNUM!	kcal/h
32	w ₂ =	#jNUM!	kg/h
37	q=	#jNUM!	
40	L*=	#jNUM!	kmol/h
10	G _r =	#jNUM!	kg/(m ² .s)
8	A _a =	#jNUM!	m ²
6	H ₁ =	#jNUM!	m
7	Z=	#jNUM!	m

Eq. #	Variable	Valor	Unidades
34	ΔT _{mi2} =	107.4	°K
25	N _m =	#jNUM!	
36	T ₃ =	315.2	°K
30	Q ₁ =	147,796	kcal/h
38	x ₁ =	0.541	
27	R=	#jNUM!	
1	G=	#jNUM!	kmol/h
2	y ₂ =	#jNUM!	
13	T ₅ =	#jNUM!	°K
15	A ₄ =	#jNUM!	m ²
17	T _r =	#jNUM!	°K
19	A ₃ =	#jNUM!	m ²
23	D _s =	#jNUM!	m
33	A ₂ =	#jNUM!	m ²
39	x ₂ *=	#jNUM!	
3	N _{og} =	#jNUM!	
9	D _a =	#jNUM!	m
5	H _g =	#jNUM!	m
4	H _{og} =	#jNUM!	m
12	HP ₂ =	#jNUM!	hp

Restricciones

Nog > 0 #jNUM!	0 < D < F = 60 #jNUM!	0 < x ₁ < 1 0.54	Efficiencia >= 0% η = #jNUM!
y ₂ > mx ₂ * #jNUM! #jNUM!	0.8 < q < 1.2 #jNUM!	Rmin < R < 20 1.786 #jNUM!	1-mG/L* #jNUM!

Funcion Objetivo	
Inv.=	#jNUM!
O.F.=	#jNUM!

Computando la solucion optima	
--------------------------------------	--

$$F_{obj} = P_p D M_1 x_3 - [C_g F M_2 + C_1 D (1 - x_3) M_1 + C_w (w_1 + w_4) + C_s w_2 + C_e (HP_1 + HP_2) + Inv F_c]$$

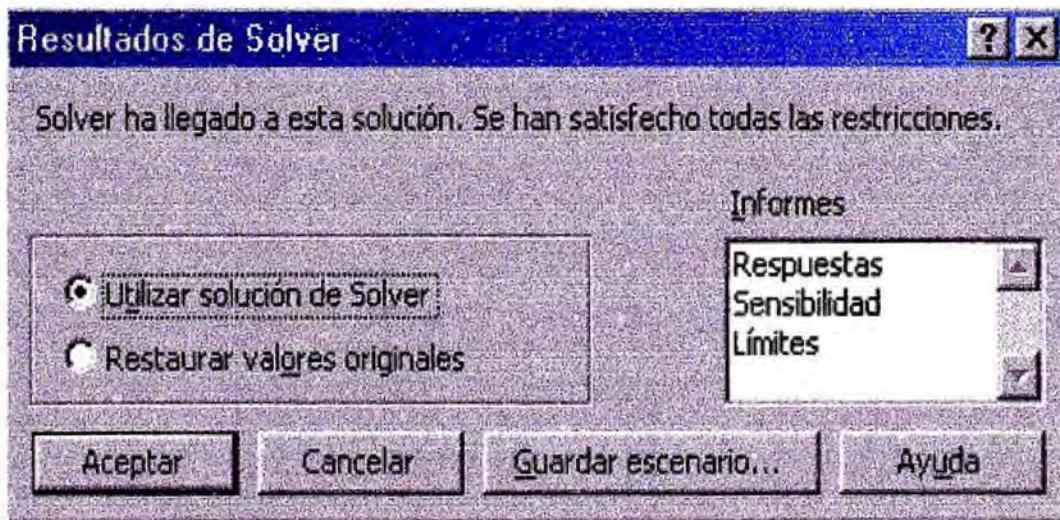
$$Inv = C_z Z D_a + C_n N D_s^{1.085} + C_a (A_1^{0.556} + A_2^{0.556} + A_3^{0.556} + A_4^{0.556}) + C_{hp} (HP_1^{0.3} + HP_2^{0.3})$$

EJEMPLO 4:

Si se introduce los datos tal como se muestra:

N	W_4 (kg/h)	T_4 (K)	T_2 (K)	A_1 (m ²)
22	100	330	320	10

Al ejecutar SOLVER, se visualiza lo siguiente:



Si se realiza un clic en aceptar, se obtiene el siguiente resultado.

Variables Proyectadas				
N	W ₄ (kg/h)	T ₄ (K)	T ₂ (K)	A ₁ (m ²)
26.3	130.5	343.4	326.5	78.0
0.0	0.0	314.42	314.42	0.0
100	1000	350.64	350.64	200

Funcion Objetivo	
Inv.=	\$21,495
O.F.=	-\$172,408

Computando T₃ (optimizar)	
eq. (36) =	1.95E-04
T ₃ =	315.2

**Ejecutando la
solucion optima**

Eq. #	Variable	Valor	Unidades
14	Q ₄ =	652	kcal/h
35	x ₂ =	0.086	
26	X=	0.596	
31	ΔT _{m1} =	19.6	°K
29	w ₁ =	91,649	kg/h
24	R _m =	2.132	
28	D=	17.8	kmol/h
21	L=	25.7	kmol/h
11	HP ₁ =	114.4	hp
16	ΔT _{m4} =	7.7	°K
18	Q ₃ =	31,263	kcal/h
20	ΔT _{m3} =	5.4	°K
22	Q ₂ =	465,600	kcal/h
32	w ₂ =	931	kg/h
37	q=	0.999	
40	L*=	25.8	kmol/h
10	G _f =	24.88	kg/(m ² .s)
8	A _a =	0.0366	m ²
6	H _f =	0.466	m
7	Z=	6.2	m

Eq. #	Variable	Valor	Unidades
34	ΔT _{m2} =	49.6	°K
25	N _m =	10.046	
36	T ₃ =	315.2	°K
30	Q ₁ =	458,246	kcal/h
38	x ₁ =	0.457	
27	R=	2.337	
1	G=	42.34	kmol/h
2	y ₂ =	0.1498	
13	T ₅ =	303.8	°K
15	A ₄ =	0.42	m ²
17	T _f =	326.3	°K
19	A ₃ =	58.33	m ²
23	D _s =	0.59	m
33	A ₂ =	18.77	m ²
39	x ₂ *=	0.0850	
3	N _{og} =	9.8	
9	D _a =	0.22	m
5	H _g =	0.019	m
4	H _{og} =	0.629	m
12	HP ₂ =	7.9	hp

Restricciones

Nog > 0 0.05	0 < D < F = 60 17.83	0 < x1 < 1 0.46	Efficiencia >= 0% η = 73.6
y ₂ > mx ₂ * 0.1498 0.0680	0.8 < q < 1.2 0.999	Rmin < R < 20 2.132 2.337	1 - mG/L* -0.31

Funcion Objetivo	
Inv.=	\$21,495
O.F.=	-\$172,408

**Computando la
solucion optima**

$$F_{obj} = P_p D M_1 x_3 - [C_g F M_g + C_l D (1 - x_3) M_1 + C_w (w_1 + w_4) + C_s w_2 + C_c (HP_1 + HP_2) + Inv F_s]$$

$$Inv = C_z Z D_a + C_n N D_s^{1.085} + C_a (A_1^{0.556} + A_2^{0.556} + A_3^{0.556} + A_4^{0.556}) + C_{hp} (HP_1^{0.3} + HP_2^{0.3})$$

TABLA 1

SE INGRESA LOS SIGUIENTES DATOS INICIALES

w_4 (kg/h)	T_4 (K)	T_2 (K)	A_1 (m ²)
100	330	320	10

Variamos el valor de N y mantenemos constante los datos iniciales de W_4 , T_4 , T_2 , A_1

VARIANDO	RESULTADOS					
	N	W_4 (kg/h)	T_4 (K)	T_2 (K)	A_1 (m ²)	F.O.
1	4.0	100.0	322.9	329.1	0.0	#jDIV/0!
2	4.7	100.0	326.1	325.3	3.6	-\$999,999
3	6.2	99.9	328.5	325.2	6.8	-\$999,999
4	6.1	99.9	328.9	325.0	7.3	-\$999,999
5	6.1	99.9	329.5	325.7	7.2	-\$999,999
6	5.8	99.9	330.3	325.6	5.0	-\$999,999
7	5.9	99.9	329.6	325.7	9.0	-\$999,999
8	8.8	100.0	333.5	327.5	4.1	-\$176,048
9	8.5	100.0	332.2	326.3	4.8	-\$176,343
10	29.0	100.0	331.1	326.4	0.0	#jDIV/0!
11	20.4	100.0	344.7	327.8	0.0	#jDIV/0!
12	26.3	121.0	343.3	326.5	77.8	-\$172,410
13	26.4	148.2	343.1	326.5	77.6	-\$172,407
14	26.3	103.6	343.3	326.5	78.3	-\$172,412
15	26.6	100.0	335.2	327.2	0.0	#jDIV/0!
16	22.8	99.9	341.8	326.6	1.2	-\$174,356
17	5.8	100.5	285.6	324.0	25.1	#iNUM!
18	26.3	103.9	343.2	326.5	77.7	-\$172,412
19	23.3	87.1	351.3	326.8	-222.2	#iNUM!
20	39.6	99.4	357.1	326.7	49.9	#iNUM!
21	40.9	139.5	383.3	327.4	-360.8	#iNUM!
22	26.3	130.5	343.4	326.5	78.0	-\$172,408
23	40.4	98.6	359.5	326.8	-313.4	#iNUM!
24	26.2	140.8	343.1	326.5	78.1	-\$172,407
25	40.3	99.3	363.4	327.0	61.7	#iNUM!
26	26.2	156.3	343.1	326.5	77.8	-\$172,406
27	37.9	95.6	357.2	326.6	149.0	#iNUM!
28	26.1	132.6	343.1	326.5	77.8	-\$172,408
29	26.3	162.4	343.3	326.5	78.1	-\$172,405
30	26.2	144.5	343.1	326.5	78.2	-\$172,406

TABLA 2

SE INGRESA LOS SIGUIENTES DATOS INICIALES

w_4 (kg/h)	T_4 (K)	T_2 (K)	A_1 (m ²)
100	330	320	20

Variamos el valor de N y mantenemos constante los datos iniciales de w_4 , T_4 , T_2 , A_1

VARIANDO
N
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30

RESULTADOS

N	w_4 (kg/h)	T_4 (K)	T_2 (K)	A_1 (m ²)	F.O.	
1	3.8	100.0	251.3	373.7	-22.9	#¡NUM!
2	9.2	100.0	335.9	326.5	6.2	-\$172,910
3	-574.0	100.0	376.4	277.1	66.5	#¡NUM!
4	6.7	100.1	334.0	325.9	11.4	-\$999,999
5	6.7	100.1	333.6	326.0	11.6	-\$999,999
6	6.4	99.9	329.4	325.7	18.9	-\$999,999
7	6.5	99.9	329.7	325.6	18.5	-\$999,999
8	8.6	100.0	332.5	326.2	5.1	-\$176,410
9	9.0	100.0	334.7	326.4	5.9	-\$176,784
10	8.8	100.0	333.9	326.3	5.6	-\$176,670
11	2.0	100.0	354.8	358.5	17.3	-\$999,999
12	186.6	100.2	424.6	326.4	748.8	-\$999,999
13	26.2	135.1	343.3	326.5	77.6	-\$172,408
14	26.4	147.7	343.4	326.5	78.7	-\$172,406
15	26.3	110.6	343.3	326.5	77.6	-\$172,411
16	26.3	108.8	343.4	326.5	78.8	-\$172,411
17	26.3	155.3	343.3	326.5	78.5	-\$172,405
18	26.3	144.9	343.4	326.5	77.9	-\$172,407
19	40.0	100.0	360.2	327.0	53.2	#¡NUM!
20	26.3	111.1	343.3	326.5	77.8	-\$172,411
21	21.0	128.6	352.1	326.6	-160.2	#¡NUM!
22	26.4	99.8	343.3	326.5	78.3	-\$172,412
23	51.7	99.9	375.8	327.5	118.6	#¡NUM!
24	61.2	99.7	402.7	328.1	213.1	#¡NUM!
25	26.3	162.5	343.3	326.5	78.1	-\$172,405
26	26.3	163.6	343.3	326.5	78.2	-\$172,405
27	76.1	96.1	403.4	328.2	652.0	#¡NUM!
28	26.3	102.2	343.3	326.5	78.1	-\$172,412
29	26.3	159.4	343.2	326.5	78.2	-\$172,405
30	26.4	112.5	343.4	326.5	78.1	-\$172,411

TABLA 3

SE INGRESA LOS SIGUIENTES DATOS INICIALES

w_4 (kg/h)	T_4 (K)	T_2 (K)	A_1 (m ²)
100	330	320	30

Variamos el valor de N y mantenemos constante los datos iniciales de W_4 , T_4 , T_2 , A_1

VARIANDO
N
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30

RESULTADOS

N	W_4 (kg/h)	T_4 (K)	T_2 (K)	A_1 (m ²)	F.O.	
1	2.9	100.0	239.5	370.3	-1.2	#jNUM!
2	9.7	100.0	336.1	334.2	0.0	#jDIV/0!
3	-603.5	100.0	379.0	276.4	62.5	#jNUM!
4	-603.5	100.0	379.0	276.4	62.5	-\$999,999
5	7.3	100.1	334.4	325.0	24.0	-\$999,999
6	6.7	99.9	329.9	325.7	27.8	-\$999,999
7	6.7	99.9	329.9	325.7	27.8	-\$999,999
8	9.2	100.0	334.9	330.1	0.0	#jDIV/0!
9	9.1	100.0	334.6	329.7	0.0	#jDIV/0!
10	8.3	100.0	331.0	327.7	0.0	#jDIV/0!
11	55229.9	2572.7	50799.5	2578.4	306857.1	#jNUM!
12	55229.9	2572.7	50799.5	2578.4	306857.1	#jNUM!
13	26.3	167.3	343.3	326.5	78.2	-\$172,405
14	26.5	115.8	343.3	326.5	77.9	-\$172,410
15	26.4	106.6	343.3	326.5	78.4	-\$172,411
16	28.3	8.8	380.8	327.4	-640.8	#jNUM!
17	52.4	100.1	390.9	327.5	81.6	#jNUM!
18	41.0	100.1	360.2	326.7	81.2	#jNUM!
19	26.3	103.9	343.2	326.5	77.9	-\$172,412
20	26.4	153.5	343.2	326.5	77.8	-\$172,406
21	26.4	117.0	343.2	326.5	78.2	-\$172,410
22	26.4	104.2	343.3	326.5	78.0	-\$172,412
23	26.5	115.2	343.4	326.5	78.2	-\$172,410
24	26.3	167.4	343.3	326.5	78.2	-\$172,405
25	16.8	100.0	350.8	439.6	25.0	#jNUM!
26	20.0	100.0	351.9	436.6	22.0	#jNUM!
27	26.3	105.5	343.3	326.5	78.1	-\$172,411
28	42.6	106.9	362.8	327.2	241.8	#jNUM!
29	26.5	151.7	343.4	326.5	78.2	-\$172,406
30	26.3	102.2	343.3	326.5	78.1	-\$172,412

TABLA 4

SE INGRESA LOS SIGUIENTES DATOS INICIALES

w_4 (kg/h)	T_4 (K)	T_2 (K)	A_1 (m ²)
100	330	320	40

Variamos el valor de N y mantenemos constante los datos iniciales de w_4 , T_4 , T_2 , A_1

VARIANDO
N
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30

RESULTADOS

N	w_4 (kg/h)	T_4 (K)	T_2 (K)	A_1 (m ²)	F.O.	
1	2.1	100.0	233.0	368.9	15.4	#¡NUM!
2	9.4	100.0	336.8	326.5	6.4	-\$176,993
3	-614.1	100.0	379.9	276.2	64.8	#¡NUM!
4	6.6	100.0	329.4	325.4	39.1	-\$999,999
5	6.8	100.0	329.3	321.7	39.8	-\$999,999
6	6.9	100.0	330.6	321.9	39.2	-\$999,999
7	6.7	99.9	330.3	325.6	36.5	-\$999,999
8	9.3	100.0	336.1	327.7	0.0	#¡DIV/0!
9	8.4	100.0	331.5	326.9	0.0	#¡DIV/0!
10	9.3	100.0	336.7	326.6	6.3	-\$176,957
11	9.0	100.0	334.7	326.5	0.0	#¡DIV/0!
12	-81.0	94.8	205.0	315.7	-521.0	#¡NUM!
13	56.7	100.0	230.0	285.2	53.7	#¡NUM!
14	46.7	100.0	238.9	298.9	53.8	#¡NUM!
15	-13.7	100.0	449.3	389.0	24.1	#¡NUM!
16	7.9	100.0	378.0	360.2	34.2	#¡NUM!
17	14.1	100.0	353.8	344.8	37.4	#¡NUM!
18	14.7	100.0	366.7	364.3	36.3	#¡NUM!
19	17.0	100.0	360.2	360.6	37.2	#¡NUM!
20	18.7	100.0	356.9	359.2	37.7	#¡NUM!
21	20.1	100.0	354.7	358.3	38.0	#¡NUM!
22	21.3	100.0	353.2	357.8	38.3	#¡NUM!
23	22.5	100.0	352.1	357.5	38.4	#¡NUM!
24	23.6	100.0	351.3	357.2	38.6	#¡NUM!
25	24.7	100.0	350.7	357.1	38.7	#¡NUM!
26	26.0	100.0	327.3	314.9	40.2	-\$999,999
27	27.0	100.0	327.4	314.9	40.1	-\$999,999
28	28.0	100.0	327.4	314.9	40.1	-\$999,999
29	29.0	100.0	327.4	314.9	40.1	-\$999,999
30	29.9	100.0	327.5	315.0	40.1	-\$999,999

TABLA 5

SE INGRESA LOS SIGUIENTES DATOS INICIALES

w_4 (kg/h)	T_4 (K)	T_2 (K)	A_1 (m ²)
100	330	320	50

Variamos el valor de N y mantenemos constante los datos iniciales de W_4 , T_4 , T_2 , A_1

VARIANDO	RESULTADOS					
	N	W_4 (kg/h)	T_4 (K)	T_2 (K)	A_1 (m ²)	F.O.
1	1.5	100.0	229.0	368.4	29.7	#jNUM!
2	7.9	100.0	329.1	326.5	0.0	#jDIV/0!
3	-618.8	100.0	380.3	276.2	70.0	#jNUM!
4	6.7	100.0	329.0	325.1	49.9	-\$999,999
5	6.7	100.0	328.8	320.4	50.3	-\$999,999
6	7.7	100.2	334.5	324.7	45.0	-\$999,999
7	6.7	99.9	329.7	325.7	48.4	-\$999,999
8	8.6	100.0	332.6	327.1	0.0	#jDIV/0!
9	8.4	100.0	331.6	326.6	0.0	#jDIV/0!
10	8.2	100.0	330.3	327.5	0.0	#jDIV/0!
11	8.1	100.0	329.9	326.7	0.0	#jDIV/0!
12	15.3	100.0	323.7	315.0	50.5	-\$999,999
13	14.1	100.0	326.1	314.9	50.3	-\$999,999
14	10.2	100.0	354.3	360.8	48.7	#jNUM!
15	15.2	100.0	327.7	315.0	50.1	-\$999,999
16	16.0	100.0	328.0	314.9	50.0	-\$999,999
17	17.0	100.0	328.2	315.0	50.0	-\$999,999
18	18.0	100.0	328.4	315.0	50.0	-\$999,999
19	19.0	100.0	328.5	315.0	50.0	-\$999,999
20	19.0	100.0	329.3	315.0	48.4	-\$999,999
21	19.9	100.0	329.5	315.0	48.0	-\$999,999
22	21.4	100.0	329.2	315.0	48.7	-\$999,999
23	22.1	100.0	329.6	315.0	47.4	-\$999,999
24	23.2	100.0	329.6	315.0	47.4	-\$999,999
25	24.4	100.0	329.5	315.0	47.4	-\$999,999
26	26.0	100.0	328.8	315.2	49.9	-\$999,999
27	27.0	100.0	328.8	315.2	49.9	-\$999,999
28	28.0	100.0	328.8	315.2	49.9	-\$999,999
29	29.0	100.0	328.8	315.2	49.9	-\$999,999
30	30.0	100.0	328.8	315.2	49.9	-\$999,999

3.25 Interpretación de los resultados de las corridas del programa

de las simulaciones realizadas, tal como se muestra en las tablas 1 al 5. se observa que los resultados óptimos para la maximización de la función objetivo se alcanza cuando los valores de las variables toman los siguientes valores, tal como se muestra:

N	W ₄ (kg/h)	T ₄ (K)	T ₂ (K)	A ₁ (m ²)	F.O.
26.2	156.3	343.1	326.5	77.8	-\$172,406
26.3	162.4	343.3	326.5	78.1	-\$172,405
26.2	144.5	343.1	326.5	78.2	-\$172,406
26.4	147.7	343.4	326.5	78.7	-\$172,406
26.3	155.3	343.3	326.5	78.5	-\$172,405
26.3	162.5	343.3	326.5	78.1	-\$172,405
26.3	163.6	343.3	326.5	78.2	-\$172,405
26.3	159.4	343.2	326.5	78.2	-\$172,405
26.4	153.5	343.2	326.5	77.8	-\$172,406
26.3	167.4	343.3	326.5	78.2	-\$172,405
26.5	151.7	343.4	326.5	78.2	-\$172,406

De modo que se puede establecer la siguiente tabla:

	N	W ₄ (kg/h)	T ₄ (K)	T ₂ (K)	A ₁ (m ²)	F.O.
valor promedio	26.3	156.8	343.3	326.5	78.2	-\$172,405
Mínimo	26.2	144.5	343.1	326.5	77.8	-\$172,405
Máximo	26.5	167.4	343.4	326.5	78.7	-\$172,406

Cabe señalar que de acuerdo a las tablas 1 al 5 mientras la variable A₁ se va incrementando los resultados no son satisfactorios.

La temperatura T₂ se mantiene en un valor constante en los resultados óptimos, así como T₄ con una ligera variación.

Del mismo modo N varía ligeramente, pero para fines prácticos se considera como constante.

Se concluye que las variables elegidas nos permiten realizar un diseño óptimo, ya que W₄ también varía razonablemente y su control es aceptable.

3.26 Dificultades que se tiene en el uso de Solver®

1. Fijar las variables para determinar un diseño optimo, maximización, etc
Tiene una dificultad muy grande ya que se necesita un conocimiento de los equipos y procesos que intervienen.
Esto se logra realizando una selección adecuada de las variables mas importantes que tiene cada equipo o servicio en el proceso.
También es necesario realizar una simulación para seleccionar adecuadamente.
2. Fijar el rango de las variables
También tiene una dificultad importante, pero esto se reduce con las simulaciones. De allí que se puede ajustar el rango de las variables.
3. Establecer las restricciones
Es importante, pues de lo contrario las respuestas que se obtendrán serán totalmente diferentes y no tendríamos un criterio de convergencia. Por dicha razón es preciso establecer restricciones para determinar soluciones validas o consistentes, dependiendo de la funcion objetivo
4. Convergencia de los resultados
Que criterios debe establecerse para la convergencia.
Nos permite establecer que tan sensibles son las variables, además de establecer soluciones optimas
5. Base de datos complejos
La base de datos es muy importante en un proceso, ya que con ello se facilita la simulación.
6. Conocimiento de Visual Basic
Es necesario conocer para mejorar las respuestas. Ya que se puede establecer vínculos con el Microsoft Excel

Nomenclatura

A_1	=	Área de transferencia de calor de un condensador o una constante en la ecuación de Antoine.
A_2	=	Área de transferencia de calor de un reboiler o una constante en la ecuación de Antoine.
A_3	=	Área de transferencia de calor en un intercambiador de calor.
A_4	=	Área de transferencia de calor en un enfriador.
a	=	Volatilidad relativa.
B_1, B_2	=	Constantes en la ecuación de Antoine.
C_g	=	Factor de costo en la alimentación (\$./hr/año.Kg)
C_l	=	Factor de costo en el uso del solvente (\$./hr/año.Kg)
C_s	=	Factor de costo en el uso del agua (\$./hr/año.Kg)
C_w	=	Factor de costo en el uso de vapor (\$./hr/año.Kg)
C_e	=	Factor de costo en el consumo de la electricidad (\$./año.hp)
C_a	=	Factor de costo en la instalación del intercambiador de calor (\$./m ²) ^{0.556})
C_{bp}	=	Factor de costo en las bombas (\$./hp) ^{0.30})
C_n	=	Factor de costo en la instalación del Stripper ((\$./N(m) ^{1.085})
C_z	=	Factor de costo en la instalación de la torre de absorción (\$/m ²).
C_p	=	Capacidad calorífica (Kcal/(Kg.°K))
C_{pw}	=	Capacidad calorífica del agua (Kcal/(Kg.°K))
D	=	Producto tope en el stripper (separador)
F	=	Flujo de alimentación en el absorbedor (Kg mol/hr)
F_c	=	Factor de retorno de la inversión de la planta.(ROI)
G	=	Flujo del gas de salida por los topes del absorbedor (Kg mol/hr)
G_f	=	Velocidad de desbordamiento de una empaquetadura.
g_c	=	Factor de conversión (entre la masa y la fuerza).
g_i	=	Restricción más baja para x.
H_g	=	Unidad de transferencia de fase del gas.
H_l	=	Unidad de transferencia de fase del liquido.

H_{og}	=	H.T.U.
HP_1	=	Caballo de fuerza de una bomba para alimentación.
HP_2	=	Caballo de fuerza de una bomba para un stripper (separador)
h_f	=	Calor latente de alimentación a un stripper (separador)
h_i	=	Restricción superior para calor latente x.
h_k	=	Restricción superior para x
K	=	constante para diseño
Kp_1	=	Factor de costo de la bomba N°1 (hp.hr/(kgmol)(N)
Kp_2	=	Factor de costo de la bomba N°1 (hp.hr/(kgmol)(N)
L	=	velocidad de flujo de un absorbente
L_{max}	=	límite superior para L (velocidad de flujo de un absorbente)
M	=	constante en la línea de operación de stripper (separador)
m	=	constante de Henry
N	=	número de placas
N_{og}	=	N.T.U.
P	=	presión total de un stripper (separador)
P_p	=	Factor de costo en el destilado del VOCs (\$.hr/año.kg)
Q_i	=	carga de calor
Q_c	=	carga de calor de un condensador
Q_{cooler}	=	carga de calor de un refrigerante
Q_r	=	carga de calor de un reboiler (calentador)
q	=	valor q
q_{max}	=	valor q máximo
q_{min}	=	valor q mínimo
R_{min}	=	reflujo mínimo
R_{max}	=	Restricción superior para R
T_1	=	temperatura de operación en el absorbedor
T_2	=	temperatura de alimentación de un stripper (separador)
T_3	=	punto de condensación de un producto tope
T_4	=	punto de burbujeo (gaseoso) el producto (efecto) desde un stripper (separador)

T_s	=	temperatura de entrada a un refrigerante
t_i	=	temperatura de entrada de agua enfriada
t_o	=	temperatura de salida de agua refrigerante
t_f	=	temperatura a la placa de alimentación de un stripper (separador)
t_s	=	temperatura saturada de vapor de un reboiler (calentador)
U	=	velocidad lineal de un stripper (separador)
U_{hi}	=	coeficiente de transferencia de calor total
U_1	=	coeficiente de transferencia de calor total de un condensador
U_2	=	coeficiente de transferencia de calor total en un reboiler
U_3	=	coeficiente de transferencia de calor total en un intercambiador de calor
U_4	=	coeficiente de transferencia de calor total en el enfriador
V	=	carga total en un stripper
V_{sp}	=	volumen molar específico
W_i	=	consumo de agua enfriada en el condensador
W_2	=	consumo de agua enfriada en el enfriador
x_1, x_f	=	composición de la alimentación en el stripper
$x_2,$	=	composición de un absorbente alimentado en un absorbedor (composición de fondo de un stripper)
x_3	=	composición pura del solvente (arriba)
x_i	=	variable independiente
y_1	=	composición de alimentación de un absorbedor
y_2	=	composición del gas en la salida del absorbedor
y_c	=	ver sección "restricción en la inecuación"
Z	=	altura del absorbedor

LETRAS GRIEGAS

α, β = constante en la ecuación de los datos de costo

γ = factor de reflexión en el método Complex

ε – sección vacía en una empaquetadura

μ_g = viscosidad del gas a vapor

μ_l = viscosidad del líquido

μ_w = viscosidad del agua

ρ_g = densidad del gas o vapor

ρ_l = densidad del líquido

IV CONCLUSIONES

1. En los procesos donde se utiliza absorbedor-stripper pueden ser usados para la remoción de VOCs tanto en la recuperación como en el control de las emisiones atmosféricas esto se logra fijando la concentración de VOCs a la salida del destilado (x_3)
2. Antes de optimizar un proceso se debe simular dicho proceso para obtener las variables y restricciones que influyen en el proceso.
3. La librería SOLVER por su gran versatilidad y facilidad de uso se puede utilizar como cálculo preliminar de aproximación a la solución óptima de un proceso. Y así evitar realizar complicados programas utilizando software de alto precio.
4. La librería SOLVER de Microsoft Excel optimiza un proceso donde intervienen ecuaciones no lineales. Sujeto a ciertas restricciones, maximizando o minimizando la función objetivo.
5. Es posible controlar la precisión dentro del cual las restricciones son unidas, y el criterio de convergencia para las soluciones, automatizando el proceso creando MACRO en Excel. Esto se realiza invocando al registro de Macro. Esto nos permite ahorrar una serie de comandos en el Visual Basic.

V BIBLIOGRAFÍA

1. Manual de Perry sección 14 pagina 21
2. Henley Seader capitulo 16 pagina 727
3. Chemical Engineering January 2001 pag 94-97
4. I&EC Proces Design And Development Volumen 8 N° 3 July 1969
Pag 311
5. Transferencia de Masa J. Treybal
6. Físico Química Castellán
7. Físico Química Oscar Almenara
8. Optimización de Procesos Químicos Himmelblaud