

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA

INSTITUTO DE INGENIERÍA

MAESTRÍA Y DOCTORADO EN CIENCIAS E INGENIERÍA



**“METODOLOGÍA PARA RESOLVER EL MODELO MATEMÁTICO
DE LOS SISTEMAS AVANZADOS DE ENFRIAMIENTO POR
ABSORCIÓN”**

TESIS

Que para obtener el grado de:

DOCTOR EN CIENCIAS

Presenta:

YAIR CASTRO GARCIA

Directores:

Dr. Nicolás Velázquez Limón

Dr. Rafael Villa Angulo

Mexicali, B. C.

Agosto de 2014

Dedicatoria

Culmina una etapa en mi vida,

*desde que la inicié he tenido la
fortuna de convivir con
personas de diferentes culturas y
grados de estudio, me han
brindado sus consejos, ideas,
apoyo, motivación, amor,
valores, formación, ayuda, ...*

*soy un fruto de su experiencia,
todos están en mi memoria,
les doy las gracias por su
herencia y les dedico mi
trabajo final como
estudiante.*

*Gente bonita, gente de San Miguel Tulancingo. Oax.
¡Ahora, en mi recorrido por el mundo, me toca estar en su lugar!.*

*... La meta que dio inicio cuando comencé a dirigir mi vida, culmina
con la presente etapa, y es el cimiento para la siguiente, en donde
estará mi compañera de vida..., también a ti te dedico el presente
trabajo, junto con la familia futura.*

AGRADECIMIENTOS

Al Dr. Nicolás Velázquez Limón

Por la formación y su tiempo que me ha dedicado.

Al Dr. Rafael Villa Angulo

Por sus ideas esenciales, por su apoyo en momentos complicados, consejos y su muestra de amistad.

Al Dr. Daniel Saucedo Carvajal

Por sus consejos, su ayuda constante y su amistad invaluable.

Al Dr. Nicola Radnev Nedev

Por su buena y pronta disposición en la resolución de dudas.

Al Dr. Carlos Villa Angulo

Por su disposición para brindarme consejos, visión e ideas.

Al Dr. Roumen Zlatev

Por contribuir con ideas que llevan a la resolución del problema que aborda el presente trabajo.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología

En representación del pueblo de México.

A todos gracias por dedicar una parte de su vida a la mía.

RESUMEN

La problemática de acondicionamiento térmico de espacios surge en regiones con climas cálidos que reciben alta radiación solar durante gran parte del año, elevando la temperatura ambiente. En estas circunstancias es indispensable cubrir las necesidades de acondicionamiento térmico de espacios en los sectores residencial, comercial e industrial.

Los sistemas de enfriamiento por absorción avanzados representan una alternativa para ayudar a contrarrestar la problemática, sin embargo tienen una configuración compleja porque cuentan con múltiples componentes y corrientes en forma de recirculación (ciclos) en las que se intercambia materia y/o energía, provocando que el modelo matemático que los representa esté compuesto por ecuaciones algebraicas, diferenciales parciales o diferenciales ordinarias y que tienen la característica de ser no lineales, lo cual complica la simulación de operación de los sistemas de éste tipo.

En el presente trabajo se desarrolla una metodología para resolver el modelo matemático con las características descritas, de dichos sistemas. Los ciclos se representan como un grafo descendente en donde los nodos representan a los componentes del ciclo y las aristas a la compatibilidad entre ellos, un algoritmo computacional de “búsqueda hacia atrás” (backtracking) recorre el grafo y aplica un procedimiento de resolución a cada componente hasta obtener soluciones para el ciclo.

Se efectúa la simulación de un ciclo de simple efecto para validar la metodología y la de un ciclo GAX avanzado por ser representativo de los ciclos complejos de su tipo, la finalidad es mostrar que la metodología desarrollada resuelve adecuadamente las ecuaciones presentes en el modelo matemático de dichos ciclos bajo diferentes condiciones de operación.

En la validación se encontró un error de 0.6% en el peor de los casos, por lo tanto, la metodología es útil para aplicarla a los ciclos de absorción desarrollados por diferentes grupos de ingenieros e investigadores. Se concluye que la metodología resuelve satisfactoriamente el modelo matemático que representa a los ciclos de enfriamiento por absorción, también, el sistema GAX es una buena opción para acondicionamiento térmico de espacios localizados en regiones con climas cálidos extremos a pesar de que muestra disminución en su eficiencia, ya que comparado con sistemas convencionales sigue teniendo alta eficiencia (COP de 0.7).

ABSTRACT

The problem of space thermal conditioning arises in regions with warm climates that receive high solar radiation during most of the year, increasing the ambient temperature. Under these circumstances it is essential to cover the needs of thermal conditioning spaces in the residential, commercial and industrial sectors.

The advanced absorption cooling systems represent an alternative to solve the problem, however they have a complex configuration because of their multiple components and streams in recirculation form (cycles) in which material and / or energy is exchanged. The mathematical model that represents this situation is composed by nonlinear equations as algebraic, partial differential *or* ordinary differential, which complicates their simulation.

In this paper a methodology has been developed for solving the mathematical model with the system described characteristics. The cycles are represented as a downward graph where the nodes represent the cycle components and the edges their compatibility. The graph is traversed by a computational backtracking algorithm applying an appropriated resolution method for each component to obtain solutions for the entire cycle.

Simulation of a single effect cycle is performed to validate the methodology and an advanced GAX cycle as representative of these complex cycles. The goal is to demonstrate that the methodology developed solves properly the mathematical model equations of such cycles under different operating conditions.

The validation shows a 0.6% error in the worst case, therefore the method is useful for application to absorption cycles developed by different researchers and engineers groups. It is concluded that the methodology successfully solves the mathematical model which represents the absorption cooling cycles. Despite showing decrease in space efficiency, the GAX system is a good choice for thermal conditioning located in areas with extreme warm climates, as compared to conventional systems still having high efficiency (COP of 0.7).

CONTENIDO

RESUMEN	III
ABSTRACT	IV
LISTA DE FIGURAS.....	VII
LISTA DE TABLAS	VIII
NOMENCLATURA.....	IX
SÍMBOLOS GRIEGOS.....	X
1 Introducción	1
1.1 Problemática y justificación.....	1
1.1.1 El problema	4
1.1.2 Formulación del problema	6
1.1.3 Discusión.....	7
1.2 Antecedentes.....	8
1.3 Objetivos.....	13
1.3.1 Objetivo principal	13
1.3.2 Objetivos específicos	13
1.4 Organización del trabajo	13
2 Sistemas de enfriamiento por absorción	14
2.1 Evolución de los sistemas por absorción	14
2.2 Fluidos de trabajo.....	16
2.3 Descripción de dos ciclos de enfriamiento por absorción.....	17
2.3.1 Ciclo de absorción de simple efecto.....	18
2.3.2 Ciclo de absorción avanzado tipo GAX.....	19
2.4 Clasificación de los sistemas de absorción avanzados.....	23
2.5 Modelo termodinámico de los sistemas de absorción.....	26
2.6 Enfoques de simulación	29
2.6.1 Enfoque orientado a ecuaciones.....	30
2.6.2 Enfoque modular secuencial	31
2.6.3 Enfoque híbrido.....	32

CONTENIDO (Continuación)

3 Metodología para resolver el problema de los ciclos de absorción	33
3.1 Técnica de computación para modelar el problema.....	33
3.1.1 Problemas de satisfacción de restricciones (CSP).....	33
3.1.2 Representación de los CSP en grafos.....	34
3.1.3 Algoritmo backtracking para la búsqueda de soluciones en los CSP.....	35
3.2 Desarrollo de la metodología.....	37
3.2.2 Modelo matemático.....	38
3.2.3 Estrategia para resolver el modelo matemático de un componente	41
3.2.4 Representación de los ciclos en grafos.....	45
3.2.5 Algoritmo backtracking para encontrar soluciones de los ciclos	47
3.3 Síntesis de la metodología	53
4 Simulación y resultados.....	55
4.1 Configuración de la simulación	55
4.1.1 Ciclo de simple efecto.....	56
4.1.2 Ciclo GAX	56
4.2 Análisis e interpretación de los resultados.....	58
4.2.1 Ciclo de simple efecto.....	62
4.2.2 Ciclo GAX	64
5 Conclusiones y trabajo futuro	74
5.1 Conclusiones.....	74
5.2 Aportaciones.....	76
5.3 Trabajo futuro	76
Bibliografía.....	77
Apéndice A.....	85
Apéndice B.....	87
Apéndice C.....	90
Apéndice D.....	91
Apéndice E.....	93
Apéndice F.....	98
Apéndice G.....	106
Apéndice H.....	116

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Componentes de un sistema solar térmico.	3
Figura 2. Esquema del sistema de refrigeración por absorción de simple efecto.	18
Figura 3. Esquema del ciclo avanzado por absorción tipo GAX.	20
Figura 4. Esquema del ciclo avanzado GAX.	22
Figura 5. Ciclo GBG-GAX representado en un grafo dirigido.	34
Figura 6. Representación general de un ciclo como una gráfica descendente.	35
Figura 7. Control del algoritmo backtracking.	36
Figura 8. Recorrido del algoritmo backtracking en profundidad.	37
Figura 9. Etapas de la metodología.	38
Figura 10. Componente GBG del ciclo GAX.	39
Figura 11. Estrategia de Solución (ES) para resolver el modelo matemático de un componente. ...	42
Figura 12. Representación del componente GBG con sus soluciones.	45
Figura 13. Ejemplo de una Secuencia S_q del ciclo GBG-GAX, con longitud $n=15$	45
Figura 14. Representación de un ciclo de absorción como una gráfica descendente.	46
Figura 15. Ejemplo de una solución completa de un ciclo (SCC).	48
Figura 16. Ejemplo de soluciones compatibles.	51
Figura 17. Diagrama de la metodología para encontrar soluciones en el modelo matemático.	54
Figura 18. Múltiples resultados generados por los parámetros de la metodología.	59
Figura 19. Análisis por componentes de los resultados.	60
Figura 20. Convergencia de la metodología desarrollada.	66
Figura 21. Tiempo de simulación del ciclo GAX con la metodología desarrollada.	68
Figura 22. Dispersión de las variables iterativas con respecto a la temperatura Lift.	68
Figura 23. Calor transferido en el generador.	69
Figura 24. Dispersión de la eficiencia con respecto a la temperatura Lift.	70
Figura 25. Calor transferido en las unidades principales del ciclo GAX.	71
Figura 26. Eficiencia del ciclo GAX con respecto a la temperatura Lift.	72
Figura 27. Clase de problemas.	86
Figura 28. Sistema de ecuaciones lineales con una incógnita y su solución.	88
Figura 29. Sistema de ecuaciones no lineales de 2×2 con sus dos soluciones.	89
Figura 30. Ejemplo de soluciones compatibles.	95
Figura 31. Abrir la aplicación SIMSABA 1.0.sln con Visual Studio.	106
Figura 32. Abrir el archivo Ciclo_Gax_GN_Yair_EV.cs.	107
Figura 33. Configuración de parámetros para simular al ciclo.	108
Figura 34. Acceso al código fuente de los componentes.	109
Figura 35. En el generador se modifica el rango del calor que se suministra al sistema.	110
Figura 36. Indicar el criterio de paro del algoritmo backtracking.	111
Figura 37. Nombre de la carpeta en donde se guardan los resultados de la simulación.	112
Figura 38. Abrir el archivo CicloGAX.xml.	113
Figura 39. Algoritmo Genético.	114
Figura 40. Ruta en donde se guardan los resultados de la simulación.	115
Figura 41. Archivos que contienen las soluciones completas del ciclo y de los componentes.	116

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Clasificación de algunos ciclos de absorción avanzados.....	25
Tabla 2. Ejemplo de variables iterativas en el componente GBG del ciclo GAX.	43
Tabla 3. Parámetros de la metodología aplicada al ciclo GAX.	57
Tabla 4. Condiciones de operación para simular el ciclo GAX.....	58
Tabla 5. Promedio de las variables iterativas con diferentes parámetros.	61
Tabla 6. Dispersión de las variables iterativas con diferentes parámetros.	62
Tabla 7. Validación de las soluciones arrojadas por la metodología para el ciclo de simple efecto.	63
Tabla 8. Casos en los que no encuentra solución la metodología,.....	66
Tabla 9. Resultados de la simulación para el ciclo avanzado GAX	73

NOMENCLATURA

Símbolo	Definición	Unidades
CP_{Agua}	Calor específico	Kj/Kg
$CP_{Agua_{pr}}$	Calor específico promedio	Kj/Kg
dp	Diferencial de presión	bar
Ef	Eficiencia	$(-)$
h	Entalpia	Kj/Kg
h_L	Entalpia parte liquida	Kj/Kg
h_v	Entalpia parte vapor	Kj/Kg
Hr	Humedad relativa	$(-)$
L_{Sup}	Límite superior	$(-)$
L_{Inf}	Límite inferior	$(-)$
m	Flujo másico	Kg/min
m_L	Flujo másico parte liquida	Kg/min
m_v	Flujo másico parte vapor	Kg/min
p	Presión	kW
Q	Calor transferido en el equipo	Kg/min
T	Temperatura	$^{\circ}C$
T_{Sat}	Temperatura saturada	$^{\circ}C$
V_{esp}	Volumen específico	m^3/Kg
Vi	Variable iterativa	$(-)$
x	Concentración fase liquido	Kg/Kg
x_L	Concentración parte liquida	Kg/Kg
y	Concentración fase vapor	Kg/Kg
y_v	Concentración parte vapor	Kg/Kg
z	Concentración en dos fases	Kg/Kg
$\%_L$	Porcentaje liquido	$(-)$

SÍMBOLOS GRIEGOS

Símbolo	Definición	Unidades
ΔT	Diferencia de temperaturas entre corrientes	°C
Δ_i	incremento de la variable iterativa i	(-)
ε	Tolerancia de error	(-)
ω	Error porcentual	(-)

Capítulo 1

Introducción

El presente trabajo se enfoca en desarrollar una metodología para resolver el modelo matemático que representa el comportamiento operativo de los sistemas avanzados de enfriamiento por absorción. El modelo implica ecuaciones no lineales y se convierte en un problema no trivial por la dificultad de convergencia, consecuentemente, se estimula la sinergia entre personal con formación en múltiples disciplinas, principalmente en Ciencias de la Computación, Ingeniería Química y Energías Renovables.

1.1 Problemática y justificación

La problemática de acondicionamiento térmico de espacios surge en regiones con climas cálidos que reciben alta radiación solar durante gran parte del año, elevando la temperatura ambiente alrededor de los 50 °C y provocando que se altere el confort humano, un ejemplo, es la ciudad de Mexicali, B. C., México localizada geográficamente en los 32° 38' Norte y 115° 20' Oeste. Bajo las circunstancias descritas, es indispensable cubrir las necesidades de acondicionamiento térmico de espacios en el sector residencial, sector comercial y sector industrial, por medio de sistemas de aire acondicionado y sistemas de conservación de alimentos perecederos. Para lograrlo, tradicionalmente se utiliza tecnología que involucra sistemas convencionales de enfriamiento/refrigeración por compresión de vapor (Ahamed *et al.*, 2011), el empleo de éstos sistemas es cómodo y aparentemente limpio, sin embargo, su uso masivo demanda gran cantidad de energía eléctrica.

La energía eléctrica es la más empleada y con mayor impacto en la sociedad debido a que está en casi todas partes por sus diversas aplicaciones prácticas en la industria, ciudad, servicios, hogar, comunicaciones, entre otras. Sin embargo, gran parte se deriva de otras formas de energías finitas denominadas energías no renovables (Pérez, 2001a; Sardón y García, 2003; Roldán y Vilorio, 2008 y Velasco, 2009) como el carbón, petróleo, gas natural o energía nuclear. Precisamente, en el proceso de transformación se genera una serie de problemas que de acuerdo a

Velasco, (2009) se clasifican en tres categorías: *problemas medio-ambientales*, como el calentamiento global debido al efecto invernadero provocado por el incremento en la concentración de bióxido de carbono en la atmósfera, las emisiones de los fluidos refrigerantes empleados en los equipos de climatización por compresión de vapor y los desechos de grandes núcleos de población, de seguir así, se espera que para el año 2050 la temperatura media suba entre 1 y 2 °C, lo cual es suficiente para causar catástrofes principalmente en la agricultura, ganadería y confort humano, provocando que estos últimos requieran mayor demanda energética. Una segunda categoría son los *problemas de sostenibilidad* que están relacionados al agotamiento de las fuentes energéticas tradicionales. Finalmente, los *problemas sociales y políticos*, generados por la dependencia extrema que padecen las sociedades desarrolladas debido a los combustibles fósiles, además no se puede ignorar las guerras y tensiones continuas provocadas por las fuentes energéticas localizadas en puntos conflictivos del planeta.

Para ayudar a contrarrestar la problemática de acondicionamiento térmico de espacios en el sector residencial y los problemas descritos, en forma simultánea, es necesario migrar hacia sistemas de enfriamiento sustentables que utilicen formas de energía limpia en lugar de la convencional. En este sentido, los sistemas de enfriamiento/refrigeración y que trabajan por el efecto de absorción (Ziegler, 1999; Wu y Eames, 2000; Srihirin *et al.*, 2001 y Velázquez, 2002) representan una alternativa interesante porque además de producir el efecto frigorífico deseado (Meinel y Meinel, 1982 y Cano, 2001) tienen bajo consumo de energía eléctrica dentro y fuera de las horas pico debido a que utilizan calor residual (Morán y Shapiro, 2004), incrementan la eficiencia de los sistemas de cogeneración al generar energía térmica y frigorífica en forma simultánea (Colonna y Gabrielli, 2003 y Liu y Zhang, 2007), tienen ausencia de ruidos y vibraciones, solicitan bajo mantenimiento, son confiables, durables y redituables en un promedio de 5 años (Zacarias, 2004; Morán y Shapiro 2004 y Horuz y Callander, 2004), pueden ser activados con energías renovables (Sardón y García, 2003), tales como geotérmica, solar térmica o biogás (Morán y Shapiro, 2004), éste tipo de energías son sostenibles, respetuosas con el medio ambiente y emiten bajas cantidades de gases contaminantes. En el Capítulo 2 se describen con mayor detalle éstos sistemas.

La Figura 1 ilustra un sistema térmico aplicado al sector residencial, a su vez involucra a otro de refrigeración por absorción activado con energía solar, la configuración es interesante porque coinciden las horas en que se necesita mayor refrigeración con las que se dispone de mayor radiación solar. El circuito que recibe la radiación suministra energía al sistema de absorción para que el refrigerante se separe del absorbente y pueda proporcionar el efecto frigorífico en el evaporador, posteriormente en el absorbedor se retira el calor ganado por el refrigerante y se mezcla con el absorbente nuevamente, el fenómeno se repite consecutivamente en forma de ciclo, razón por la se les conoce indistintamente como *sistemas* o *ciclos*. Esta es una explicación a “*grosso modo*” del ciclo de enfriamiento por absorción, en donde radica el problema que aborda el presente trabajo, en la Sección 2.3.2 se describe un ciclo con mayor detalle.

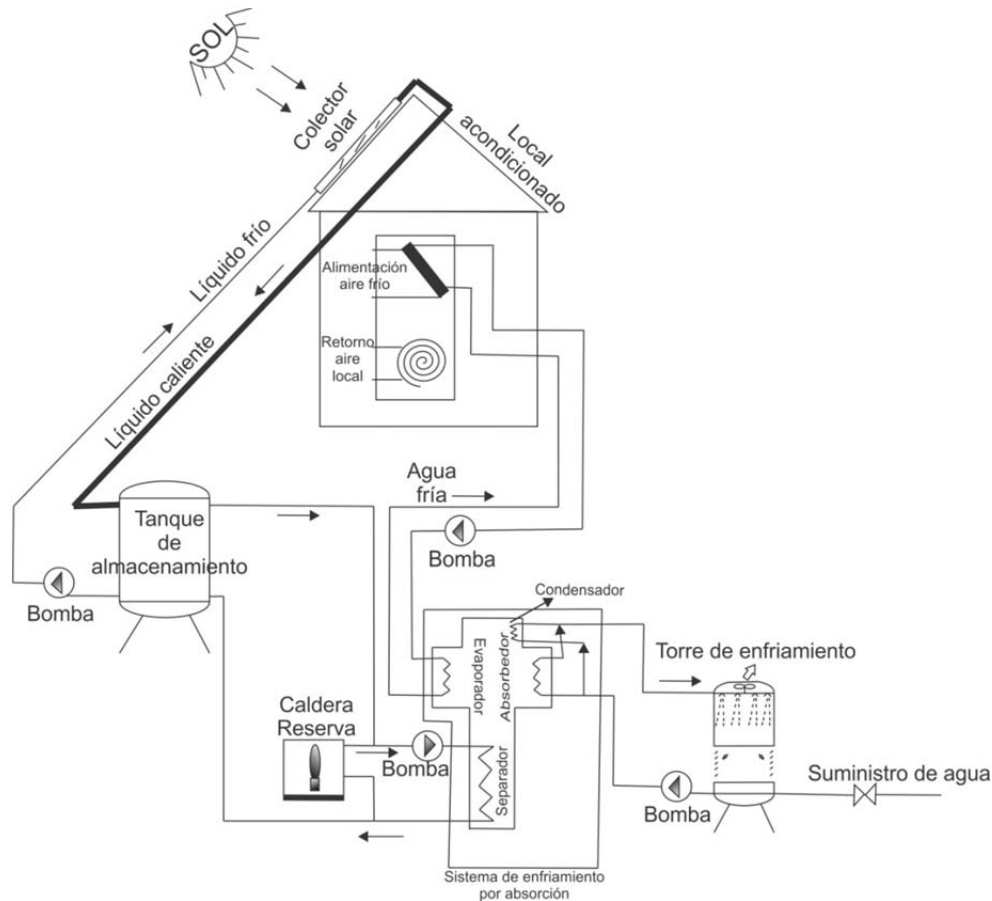


Figura 1. Componentes de un sistema solar térmico.

Aunque de éstos sistemas se pueden destacar como principales desventajas, la inversión inicial, los problemas para almacenar la energía captada y el espacio físico para su instalación (Salas, 2006), los investigadores están interesados en el desarrollo de nuevas configuraciones, nuevas combinaciones de fluidos de trabajo (Karamangil *et al.*, 2010 y Sun *et al.*, 2012), mejorar la integración energética interna, así como mayor eficiencia en la transferencia de masa y calor (Gordon y Choon, 1995; Engler *et al.*, 1997 y Wu y Eames 2000). Prácticamente, a la fecha no existen comercialmente equipos de absorción con alta eficiencia energética que cubran la demanda de aire acondicionado del sector residencial, sin embargo, se espera que en el futuro tengan un papel importante debido a sus ventajas de ahorro de energía (Sun *et al.*, 2012), lo cual representa un área de oportunidad.

Los sistemas de enfriamiento por absorción avanzados muestran ventajas sobre los sistemas de absorción básicos por su alta integración energética, sin embargo tienen una configuración compleja (Grossman *et al.*, 1991 y Jawahar y Saravanan, 2010) y no es recomendable experimentar con ellos directamente desde el punto de vista económico o ingenieril, como alternativa se cuenta con la simulación que permite trabajar con el modelo matemático que los representa (Scenna, 1999). Sin embargo, Hlaváček, (1977) menciona cuatro factores con mayor importancia que complican la simulación de sistemas: *a)* la presencia de ciclos, *b)* necesidad de emplear métodos iterativos para los cálculos, *c)* componentes del sistema en los que se encuentren soluciones en contracorriente, y *d)* especificaciones de corrientes internas o de salida. Dichos problemas están presentes en los sistemas de absorción.

1.1.1 El problema

Para que los ciclos avanzados de enfriamiento por absorción logren mayor integración energética, es necesario que cuenten con múltiples componentes y corrientes en recirculación, esto genera procesos en contracorriente y una red compleja compuesta por ciclos internos en los que se intercambia materia y/o energía (Véase un ejemplo en §2.3.2), los procesos de intercambio provocan que el modelo matemático (§3.2.2) que los representa esté compuesto por ecuaciones no lineales (Véase el Apéndice B). Por lo tanto, el problema consiste en resolver el modelo matemático compuesto por ecuaciones no lineales que representa a los sistemas avanzados de enfriamiento por absorción.

Probablemente se trate de resolver el modelo matemático en forma simultanea bajo el Enfoque Basado en Ecuaciones (Pierucci *et al.*, 1982; Lucia y Macchietto, 1983; Chen y Stadtherr, 1985; Grossman y Wilk, 1994; Scenna, 1999 y Ishii y Otto, 2008) que se caracteriza por lograr convergencia rápida, no obstante Shacham, (1984) identificó una serie de dificultades por las que el enfoque no se puede aplicar a problemas de gran escala que involucren optimización y diseño, la mayor dificultad radica en proporcionar un gran número de buenos valores iniciales cercanos a la raíz para lograr una solución (§2.6.1), también se incrementa la desconfianza en la solución conforme se incrementa la complejidad (Apéndice A), además de que es abstracto y pierde la estructura natural del ciclo.

Otra opción para resolverlo, es a la manera en que lo hace tradicionalmente la ingeniería para los procesos que siguen una configuración secuencial, en donde se asume que para cada componente del sistema se conocen las variables de las corrientes de entrada y se deben calcular las variables de salida (§2.6.2), para ello se aplica un método iterativo hasta lograr convergencia a una solución, este Enfoque Modular Secuencial (Chen y Stadtherr, 1985) tiene la ventaja de que cada conjunto de ecuaciones se resuelve por un método factible, pero el mayor inconveniente es que tiene dificultad para encontrar convergencia en sistemas complejos que contienen ciclos desordenados, aunque se aplique un método de partición (Chen y Stadtherr, 1985 y Scenna, 1999) o rasgado de corrientes (Lin y Mah, 1978) con recirculación para obtener una secuencia acíclica la convergencia generalmente es lenta, los errores se concentran en las variables de ruptura y si el método numérico falla, es difícil localizar la fuente de error.

En este punto se tiene una idea del problema y su dificultad inherente, por lo tanto se percibe la necesidad de contar con una estrategia que asegure la convergencia y que sea capaz de encontrar la mejor solución del modelo matemático que representa a los ciclos avanzados de absorción, bajo diferentes condiciones de operación y/o diseño. En este sentido, el presente trabajo está orientado a desarrollar una metodología (conjunto de procedimientos) que ayude a resolver el problema de convergencia en el modelo matemático que representa a los sistemas avanzados de enfriamiento por absorción. La metodología puede ayudar en el estudio del comportamiento operativo de los ciclos bajo diferentes configuraciones de interés, así como diseñar, desarrollar e impulsar la creación de nuevos sistemas que requieran una inversión inicial

razonable, bajo costo de operación y mantenimiento. De esta manera, los sistemas tendrán alta posibilidad de éxito comercial y se estaría contribuyendo en la solución de la problemática (§1.1), también se impulsa a las energías renovables, se contribuye en mejor calidad de vida de la sociedad y mejora de su economía.

1.1.2 Formulación del problema

Formalmente, el problema inherente al modelo matemático que representa a los sistemas de enfriamiento por absorción se define como sigue.

Dada $F: R^n \rightarrow R^n$, donde R^n denota el espacio Euclidiano de dimensión n , el modelo matemático que gobierna el comportamiento operativo de los sistemas de absorción está formado por las ecuaciones de diseño (1):

$$F(x) = \begin{bmatrix} f_1(x) \\ f_2(x) \\ \vdots \\ f_m(x) \end{bmatrix} = 0 \quad (1)$$

donde $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ se refiere a n variables, y $f_1(x), \dots, f_m(x)$ son m funciones no lineales (algunas de las ecuaciones pueden ser lineales, pero no todas).

El problema es encontrar solución (convergencia) para $F(x)$, es decir encontrar el conjunto de valores de las variables, tal que cada ecuación en el sistema de ecuaciones no lineal sea 0.

Aunque se considera que los ciclos de absorción pueden tener varias soluciones debido a la no linealidad, el mayor problema al momento de resolverlo, es encontrar al menos una solución (Seider *et al.*, 1991), además se introducen restricciones de tipo desigualdad en afán de asegurar que la solución sea factible (solución física), pero se incrementa la complejidad del problema. De acuerdo a Engler *et al.*, (1997), estas pueden ser las razones por la que se han publicado pocos estudios de simulación. En el Apéndice B se muestran los conceptos de sistemas de ecuaciones lineales y no lineales, estos últimos son de nuestro interés porque están inmersos en el modelo matemático que representa a los sistemas avanzados de enfriamiento por absorción.

1.1.3 Discusión

El primer problema que surge a la hora de resolver el modelo matemático que considera ecuaciones no lineales, es que involucra un número significativamente mayor de incógnitas que de ecuaciones, siendo su diferencia los grados de libertad que se deben especificar para definir un sistema compatible (igual número de incógnitas que de ecuaciones), además de que el sistema de ecuaciones tiende a ser escaso en el sentido de que no todas las variables están presentes en todas las ecuaciones.

Es posible que la linealidad de un sistema de ecuaciones permita a los investigadores hacer ciertas suposiciones matemáticas y aproximaciones, permitiendo un cálculo sencillo de los resultados, por ejemplo las soluciones de los sistemas de ecuaciones lineales pueden ser generalmente descritas como una superposición de otras soluciones de la misma ecuación, en cambio las ecuaciones no lineales tienen mayor complejidad y mayor dificultad para entenderlas por la falta de soluciones simples superpuestas, además de que los sistemas no lineales no son iguales a la suma de sus partes y son difíciles de modelar (Hern-Shann y Stadther, 1985).

Algunos sistemas de ecuaciones no lineales tienen soluciones exactas o integrables, mientras que otros tienen comportamiento caótico, esto los vuelve complejos y con requerimiento importante de cálculo, por lo tanto no se pueden reducir a una forma simple ni se pueden resolver o se evita aproximándolo a un sistema lineal, si es posible. En muchos casos, manipulando una ecuación no lineal algebraicamente se puede dar una fórmula explícita para la obtención de la solución o soluciones, por ejemplo para la ecuación de segundo grado se dispone de una fórmula analítica que da su solución. Cuando esto no resulta satisfactorio hay que abordar el problema directamente aplicando los diferentes métodos disponibles. Sin embargo en ocasiones es difícil obtener la solución exacta de la ecuación por métodos algebraicos, incluso imposible en la mayor parte de los casos. Por lo tanto, es necesario recurrir a métodos aproximados o iterativos para obtener una solución aproximada con un error permitido.

En resumen, los sistemas de ecuaciones no lineales son complejos, los métodos matemáticos para resolverlos no son vastos porque requieren de un volumen importante de

cálculo, el éxito depende tanto del método elegido como de los problemas numéricos involucrados y de la habilidad del analista.

1.2 Antecedentes

A continuación se presenta algunos estudios teóricos de los sistemas de enfriamiento por absorción que contribuyen a la solución de la problemática, se hace énfasis en la estrategia utilizada para resolver el modelo matemático y en el ciclo avanzado con intercambio de calor entre el Generador y el Absorbedor (GAX, por sus siglas en inglés) ya que es representativo en el problema que se aborda.

El enfriamiento producido por absorción de vapor y la vaporización de un líquido lo produjo por primera vez Faraday en 1824, utilizando amoníaco líquido y cloruro de plata, sin embargo Ferdinand Carré inventa el sistema de refrigeración por absorción de operación continua y lo patenta en 1860. En 1913 Altenkirch investiga la posibilidad de recuperar calor interno en el ciclo de absorción básico, de esta forma se sientan las bases para el desarrollo de una nueva generación de ciclos avanzados por absorción tipo GAX, éstos ciclos se caracterizan por su alta eficiencia debido a la integración energética interna. Por su parte, Tomich, (1970) presenta un método para simular columnas de absorción y destilación con múltiples entradas, resuelve los balances de materia con un algoritmo de matriz tridiagonal y todas las ecuaciones las resuelve simultáneamente. Pho y Lapidus (1973) da a conocer una estrategia para resolver el problema de rasgado de corrientes, simplemente por repetir la reducción de corrientes no deseadas y arcos en doble sentido, cuando esto falla, se aplica un método de rama y poda (branch and bound) para garantizar la convergencia. El rasgado consiste en identificar las corrientes con recirculación de un sistema, lo cual ayuda a partir al sistema en subsistemas y transformarlo en una secuencia lineal con la finalidad de que su resolución sea más sencilla. Crowe y Nishio, (1975) presentan una extensión del método del eigenvalor dominante con el propósito de acelerar el cálculo del problema no lineal de punto fijo presente en simulaciones de procesos de ingeniería, mejoran la capacidad de convergencia para casos en los que no se había logrado. Upadhye y Grens, (1975) desarrollan un método para seleccionar el conjunto de corrientes a rasgar presentes en la simulación de procesos, que permiten converger con el método de sustitución directa y con un menor número de iteraciones. Lin y Mah, (1978) presentan un método de particionado y rasgado

de corrientes que tiene como propósito minimizar el número de variables que deben ser atendidas simultáneamente en cada subsistema de ecuaciones sin comprometer la convergencia. En el trabajo de Brousse *et al.*, (1983) modelan un sistema de absorción que trabaja con el fluido amoníaco agua para aire acondicionado, en la simulación simplifican el modelo matemático o toman en cuenta únicamente las ecuaciones básicas, su metodología es específica para resolver su propio sistema. Ziegler y Trepp, (1984) presentan las propiedades termodinámicas del amoníaco y las ecuaciones de equilibrio, estas ecuaciones garantizan precisión en rangos de presión baja y temperatura, necesarias en los sistemas de enfriamiento por absorción. Posteriormente, en el trabajo de Kaushik y Chandra, (1985) presentan la evaluación de un ciclo de refrigeración por absorción de doble efecto basado en el análisis termodinámico, para obtener las condiciones de operación óptimas del sistema modelan varios componentes con resolución simultánea, investigan la influencia de las temperaturas de los componentes, efectividad del intercambiador de calor en los coeficientes de desempeño y la razón de transferencia de calor de los componentes. Chen y Stadtherr, (1985) desarrollan un método para simular los sistemas de ingeniería química, basado en el enfoque híbrido simultáneo-modular, para ello consideran un algoritmo de particionado y rasgado en las corrientes con recirculación, también desarrollan un simulador (SIMMOD) de propósito general. Phillips, (1990) propone que un ciclo GAX con amoníaco-agua como fluido de trabajo, es el más aceptable para el acondicionamiento de espacios del sector residencial, con una eficiencia de 1.03 en modo de enfriamiento y 2.03 en modo de calentamiento. Grossman *et al.*, (1991) desarrollan un código para simular de sistemas de absorción (ABSIM) en estado estable, el código se basa en subrutinas que contienen las ecuaciones que gobiernan al ciclo las cuales se resuelven de forma simultánea, y subrutinas que contienen las propiedades termodinámicas de los fluidos de trabajo. Herold *et al.*, (1991) reporta diferentes tipos de ramificaciones (recirculaciones) en los sistemas de absorción con las cuales se logran eficiencias de 30% mayores a la del ciclo GAX simple. Grossman y Wilk, (1994) estudian a través de simulación numérica varias configuraciones de ciclos de absorción que operan con los fluidos de trabajo bromuro de litio-agua y amoníaco-agua, mejoran la capacidad de convergencia de ABSIM para ciclos complejos, en relación a versiones anteriores. Engler *et al.*, (1997) efectúan un estudio en donde se compara el desempeño de varios ciclos que trabajan con la solución amoníaco-agua, bajo diferentes condiciones de operación y parámetros de diseño, a los ciclos se les agrega gradualmente componentes comenzando desde un ciclo básico y llegando

hasta un ciclo GAX con diferentes ramificaciones, el estudio ayuda a investigar la influencia de cada componente agregado en los ciclos, la simulación la realizan con ABSIM y mencionan que mejoran la convergencia en dicho simulador, reportan que el ciclo GAX enfriado por agua tiene una eficiencia de 1.0. Kang *et al.*, (1999) desarrollan un ciclo tipo GAX, hacen un análisis paramétrico del ciclo con el que estudian el efecto del calor residual en la temperatura de entrada y salida, para modelar el ciclo utilizan ABSIM-OSU, que es una modificación de ABSIM. En el trabajo de Kang *et al.*, (2000) presentan una revisión de los ciclos avanzados por absorción desde el punto de vista de su eficiencia y la diferencia de temperatura entre el condensador y evaporador (temperatura Lift), concluyen que el ciclo que utiliza amoníaco-agua como fluido de trabajo es mejor para aplicaciones de baja temperatura. Fernández-Seara y Vázquez, (2001) presentan los resultados de un estudio sobre la temperatura óptima del generador de un sistema de absorción de simple efecto que utiliza amoníaco agua como fluido de trabajo, la simulación del modelo se lleva a cabo en estado estable y se basa en el enfoque modular secuencial, demuestran la existencia de la temperatura óptima del generador que provoca la máxima eficiencia. Los autores, Grossman y Zaltash, (2001) presentan formalmente el código ABSIM para simular sistemas de absorción que operan con diferentes fluidos de trabajo, los sistemas de ecuaciones se resuelven en forma simultánea, mejoran la capacidad de convergencia para ciclos complejos como el GAX, sin embargo para ciertas condiciones de operación siguen teniendo problemas de convergencia. Joudi y Lafta, (2001) simulan un sistema de absorción de simple efecto disponible comercialmente, simulan a los componentes principales de manera independiente y bajo múltiples condiciones de operación con la finalidad de observar su desempeño, posteriormente lo hacen con el sistema completo, comparan los resultados en forma cualitativa y cuantitativa con los datos de manufactura y con otros trabajos, logrando buena aceptación. Velázquez y Best, (2002) proponen el diseño del ciclo Solar-GAX para climatización residencial en lugares con climas de temperaturas de 40°C, desarrollan una metodología que permite estudiar su desempeño y encontrar las mejores condiciones de operación, debido a la no linealidad del sistema de ecuaciones la metodología contempla una secuencia de cálculo para las corrientes externas y un procedimiento iterativo para las corrientes internas, en el estudio de simulación encuentran una eficiencia de 0.86 para enfriamiento y de 1.86 para calentamiento. Por su parte, Kang *et al.*, (2004) desarrollan un ciclo híbrido GAX (HGAX) compuesto por uno ciclo de absorción y otro de compresión de vapor que utiliza amoníaco-agua como fluido de trabajo, con la finalidad de

mejorar la eficiencia realizan un análisis paramétrico que contempla la presión y los componentes del sistema, el ciclo es modelado con ABSIM. Pelayo, (2007) propone una metodología híbrida que consta de un algoritmo genético con métodos tradicionales para resolver numéricamente los sistemas de enfriamiento por absorción, los resultados de simulación muestran es una buena opción para resolver el problema, sin embargo, tiene problemas para encontrar soluciones cuando se cambian las condiciones de operación o parámetros de diseño. Posteriormente, Kumar y Udayakumar, (2007) presentan el estudio teórico sobre un ciclo (amoniac-agua) híbrido de absorción-compresión con intercambio de calor entre el generador y el absorbedor (GAXAC) para aire acondicionado; comparan el ciclo híbrido con un ciclo GAX convencional y encuentran que el ciclo híbrido es 30% más eficiente. Gómez *et al.*, (2008) evalúan en forma teórica y experimental, el prototipo de un sistema de enfriamiento tipo GAX (GAX-PCS) que utiliza amoniac agua como fluido de trabajo y energizado con fuego indirecto, el sistema está diseñado para aire acondicionado en ambientes con temperaturas de 40 °C, utilizan el simulador Aspen Plus (ambiente para modelar procesos) para predecir el comportamiento del sistema, comparan las propiedades de amoniac-agua con la base de datos NIST (Refprop, 2002), concluyen que el sistema tiene potencial para competir técnicamente en el mercado Mexicano de aire acondicionado. Ishii y Otto, (2008) proponen un algoritmo basado en el enfoque de ecuaciones para simular procesos en columnas de separación que involucran recirculaciones, el algoritmo es una extensión del algoritmo Pseudo-Binary-Mixture (PBM) para simular unidades de una columna y con multi-etapas de separación, los sistemas de ecuaciones son divididos por tipo en sub-matrices para mayor manipulación, cada sub-matriz se resuelve por separado por medio de operaciones algebraicas. Park *et al.*, (2008) desarrollan un ciclo tipo GAX que puede proporcionar enfriamiento y agua caliente simultáneamente, estudian el efecto la eficiencia de enfriamiento y calentamiento, utilizan ABSIM para simularlo. En el trabajo de Darwish *et al.*, (2008) utilizan el simulador Aspen Plus para analizar un sistema comercial de refrigeración por absorción que utiliza amoniac-agua, fabricada por ROBUR, reconocen que las corrientes en recirculación incrementan el problema de convergencia en el simulador y lo resuelven trabajando inicialmente con ciclos abiertos (rasgan las corrientes con recirculación). Rameshkumar *et al.*, (2009) reportan el modelo de transferencia de calor de un ciclo GAXAC (generator-absorber-exchange absorption compresion), lo simulan con el enfoque orientado a ecuaciones en el software que resuelve ecuaciones ingenieriles EES (Engineering Equation

Solver), concluyen que la transferencia de calor en el absorbedor y las altas temperaturas en el generador tiene impacto en el COP y en la capacidad del ciclo. Karamangil *et al.*, (2010) estudian el desempeño de un sistema de refrigeración por absorción de simple efecto que trabaja con fluidos convencionales, para ello desarrollan un software amigable con el usuario, pero no mencionan el método con que resuelven el modelo matemático. Hong *et al.*, (2010) proponen un ciclo novedoso de refrigeración por absorción con un expansor-compresor, el propósito es mejorar el ciclo de refrigeración por absorción de simple efecto, simulan el sistema por medio de un programa que tiene convergencia relativa con 0.1% de tolerancia en el error, los resultados muestran que la eficiencia del ciclo es mucho más alto que el del ciclo de simple efecto y que un ciclo de doble efecto. Jawahar y Saravanan, (2010) hacen una revisión de diferentes ciclos avanzados tipo GAX, explican a detalle sus diferentes configuraciones, enfatizan la ventaja de su alto desempeño comparado con los ciclos de absorción convencionales de simple efecto que trabajan con el fluido amoníaco-agua, remarcan la importancia del ciclo GAX con respecto al escenario energético actual. Yari *et al.*, (2011) efectúan el análisis de energía y exergía de los ciclos de absorción GAX e híbrido-GAX que trabajan con amoníaco-agua, utilizan el software EES para realizar un estudio paramétrico en el que investigan el efecto de la temperatura y presión en los componentes principales de los sistemas. Fayad *et al.*, (2011) realizan un estudio analítico del uso de energía solar para enfriamiento de espacios usando un sistema de enfriamiento por absorción, las simulaciones efectuadas en el software Matlab (lenguaje de computación de alto nivel) ilustran los cambios de temperatura en los componentes principales iniciando en el colector en donde los cambios de temperatura se afectan debido al flujo de calor emitido por el sol, optimizan todas las partes de la máquina de absorción, principalmente los intercambiadores de calor. El ciclo de refrigeración por absorción EAX (Evaporator-Absorber-Exchange) propuesto por Hong *et al.*, (2011) puede usar el calor del vapor separado del generador para refrigerar, los resultados de la simulación muestran que la eficiencia es 40% más alta que el de un ciclo convencional de simple efecto bajo las mismas condiciones.

En la revisión de los antecedentes se observa que los ciclos de enfriamiento por absorción han evolucionado a través del tiempo, volviéndose cada vez más complejos en su configuración, una meta constante es mejorar su eficiencia, simultáneamente se han desarrollado métodos para simularlos a través de su modelo matemático, sin embargo, presentan problemas de convergencia.

En afán de contribuir y superar tal problema, el presente trabajo se enfoca en desarrollar una metodología que asegure la convergencia bajo diferentes condiciones de operación y diseño de los ciclos avanzados.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo principal

Plantear un modelo matemático que represente apropiadamente el comportamiento operativo de los sistemas avanzados de enfriamiento por absorción, así como desarrollar una metodología para resolverlo y con capacidad para encontrar las mejores condiciones de operación.

1.3.2 Objetivos específicos

1. Estudiar y analizar el problema que involucra el modelo matemático que representa a los sistemas avanzados de enfriamiento por absorción.
2. Expresar formalmente el problema de los sistemas de enfriamiento por absorción.
3. Proponer estrategias y/o algoritmos que contribuyan a resolver el problema.
4. Desarrollar la metodología con base a las estrategias y/o algoritmos propuestos.
5. Aplicar la metodología a un sistema avanzado de absorción representativo.
6. Validar la metodología desarrollada.

1.4 Organización del trabajo

En el Capítulo 2 se presenta la evolución de los ciclos de absorción hasta llegar a los ciclos complejos, se describe a detalle un ciclo de simple efecto y uno de tipo GAX avanzado, se presentan los conceptos para determinar su modelo termodinámico y se describen los enfoques de simulación. En el Capítulo 3 se describen las técnicas de computación que se utilizan para desarrollar la metodología, además, se describe a detalle el desarrollo de la misma, Posteriormente, en el Capítulo 4 se simulan los dos ciclos mencionados, se hace un estudio y análisis de los resultados. Finalmente, en el Capítulo 5 se presentan las conclusiones, se mencionan las aportaciones y se propone el trabajo futuro.

Capítulo 2

Sistemas de enfriamiento por absorción

En el presente capítulo se describe el progreso de los sistemas de absorción con base en sus componentes y los procesos que se llevan a cabo dentro de dichos sistemas, se hace énfasis en los sistemas avanzados porque su modelo matemático presenta mayor dificultad para resolverlo en comparación con los sistemas de simple efecto, se expone un ejemplo de cada uno, finalmente, se resumen los enfoques de simulación que se aplican tradicionalmente para abordar el problema.

2.1 Evolución de los sistemas por absorción

Los sistemas de refrigeración por absorción son un medio para producir frío, el principio en que se basan consiste en aprovechar la propiedad que puede tener algún fluido de trabajo (mezcla) compuesto por dos sustancias, una para absorber (absorbente) a otra (refrigerante), en el proceso de miscibilidad se puede acumular o transportar energía, por ejemplo, a 0 °C el agua absorbe alrededor 1000 veces su volumen de amoníaco y sobre 700 veces a 15 °C.

No se pretende cubrir la descripción de todos los ciclos de enfriamiento por absorción debido a la amplia variedad reportada en la literatura (Ziegler, 1999; Wu y Eames, 2000 y Srihirin *et al.*, 2001), en cambio, se describe de manera general algunos componentes y los procesos que se llevan a cabo dentro de dichos sistemas. Se parte de un sistema de simple efecto y se incrementa paulatinamente su complejidad al agregar nuevos componentes; esta presentación permite notar el grado de recuperación de calor interno en el sistema. En el trabajo desarrollado por Wu y Eames (2000) presentan una revisión de los ciclos de absorción tomando como referencia el número de efectos. En los trabajos de Velázquez, (2002) y Pelayo, (2007) se hace una descripción de los componentes que integran a los sistemas de absorción.

El *ciclo de absorción básico* o *de simple efecto* (CBSE) está compuesto por un evaporador, absorbedor, generador (desorbedor), condensador, rectificador, intercambiador de calor de la solución, bomba de solución y válvula de expansión. Lo más sobresaliente que tiene

en términos de ahorro de energía (integración energética) es un intercambiador de solución que permite el intercambio de calor entre las soluciones débil y fuerte, disminuyendo tanto el calor externo requerido en el generador como las necesidades de enfriamiento en el absorbedor. En la Sección 2.3.1 se describe con mayor detalle un ciclo de este tipo.

El mismo CBSE con la adición de un pre-enfriador (algunas veces conocido como intercambiador de calor de la línea de succión) se convierte en el *ciclo de simple efecto con pre-enfriador* (CSEP). Este sistema al igual que el anterior tiene una recuperación mínima de calor interno del proceso. El pre-enfriador es un intercambiador de calor que extrae calor de la corriente de refrigerante condensado para ser utilizado en la evaporación de líquido remanente de la corriente que sale del evaporador, el refrigerante condensado al ceder calor se sub-enfría provocando que después de pasar por la válvula de expansión esté en condiciones de evaporarse aprovechando el calor latente, y por consecuencia se incrementa el efecto frigorífico.

El CSEP con la adición de dos recuperadores de calor de solución (uno en el absorbedor y otro en el generador) se convierte en el *ciclo con intercambio de calor entre las soluciones* (CICES). Estos equipos se clasifican como *ciclos avanzados* porque emplean la solución que sale del absorbedor y generador para enfriarse y calentarse por sí mismos en cada uno de sus respectivos componentes, logrando mayor recuperación de calor interno. Este ciclo puede tener dos presentaciones, con o sin intercambiador de calor entre las soluciones débil y fuerte.

El mismo CICES con la adición de intercambio de calor entre el absorbedor y generador, cuando el traslape de temperaturas entre los dos lo permite, resulta en otro ciclo que se conoce como ciclo con intercambio de calor absorbedor-generador (CICAG), en inglés Generator-Absorber heat eXchange (ciclo tipo GAX). La característica particular de este ciclo es el traslape parcial de temperaturas entre generador y absorbedor, asociado con el amplio cambio de concentraciones, lo cual lleva a la alta posibilidad de recuperar calor del absorbedor y emplearlo para calentar parcialmente el generador. Para lograr mayor rendimiento en los ciclos GAX avanzados se deben incorporar componentes, lo cual genera que el ciclo tenga mayor complejidad. Se han propuesto varias configuraciones del mismo ciclo para llevar acabo el efecto GAX (Phillips, 1990 y Velázquez y Best, 2002).

El ciclo GAX con la adición de una bomba y una línea de ramificación (recirculación) para recircular parte de la solución del absorbedor al generador, se convierte en el *ciclo Ramificado GAX*, lo anterior es con el fin de igualar la cantidad de calor y obtener un equilibrio entre lo que el absorbedor o generador puede ceder y lo que el generador o absorbedor puede aceptar, esto reduce la cantidad de calor externo de alta temperatura requerido para operar el ciclo (Scharfe *et al.*, 1986; Carmody y Shelton, 1993 y Garimella *et al.*, 1994). De lo anterior se deduce que si es mayor sea el traslape de temperaturas entre absorbedor y generador entonces es mayor el potencial del ciclo propuesto. La finalidad es obtener una operación económica del sistema, tomando en cuenta que un calentamiento externo de alta temperatura propicia una mayor integración energética interna en este tipo de ciclos. Esta mejora en el ciclo GAX implica aparte de la bomba para recircular el fluido, el requerimiento de un control para determinar la cantidad a recircular. Herold *et al.*, (1991) ilustra diferentes ramificaciones.

Existen otros ciclos avanzados, como el *ciclo Regenerativo GAX* (RGAX) (Dao, 1990), *ciclo poli-ramificado Regenerativo GAX* (Staicovici, 1995), *ciclo con Intercambio de Vapor GAX* (VX GAX) (Rane y Erickson, 1994 y Erickson y Anand, 1996), ciclo GAX con recuperación de calor desechado (WGAX) (Kang *et al.*, 1999), Jawahar y Saravanan, (2010) y Velázquez, (2002) hacen una revisión de las variantes de los ciclos GAX avanzados y ramificados.

2.2 Fluidos de trabajo

Existen múltiples combinaciones de fluidos de trabajo refrigerantes-absorbentes, por ejemplo, Macriss y Zawacki, (1989) publicaron una lista de 40 fluidos refrigerantes posibles y 200 absorbentes, cada combinación es importante porque el rendimiento de un sistema de enfriamiento por absorción depende fuertemente de las propiedades físico-químicas de los fluidos (Srikhirin *et al.*, 2001; Perez-Blanco, 1984 y Karamangil *et al.*, 2010). Sun *et al.*, (2012) presentan un compendio de fluidos de trabajo para los ciclos de absorción clasificados en cinco series de acuerdo a los diferentes absorbentes. De acuerdo a Sun, (1998) y Ziegler, (1999), la investigación actual en fluidos de trabajo tiene dos combinaciones principales, la de agua (refrigerante)-bromuro de litio (absorbente) que presenta problemas difíciles de resolver relacionados a la corrosión y baja transferencia de calor, y la combinación compuesta por amoníaco (refrigerante)-agua (absorbente), a pesar de que preocupa la agregación de

componentes para decrementar la presión y purificación (Goríbar, 2002), esta combinación es amigable con el medio ambiente, de bajo costo y se aplica tanto para propósitos de enfriamiento como para calefacción porque el amoníaco tiene alto calor latente en fase de vapor, el cual es requisito para para la eficiencia del sistema, sus propiedades termodinámicas se pueden obtener de Ziegler y Trepp, (1984); Pátek y Klomfar, (1995) y Srihirin *et al.*, (2001).

En general, se pretende que el fluido de trabajo sea no corrosivo, ambientalmente amigable, de bajo costo, químicamente estable, no toxico, no explosivo, el rango de ebullición debe ser tan grande como sea posible, el refrigerante debe tener alto calor de vaporización y alta concentración dentro del absorbente para mantener baja circulación entre el separador y el absorbedor por unidad de capacidad de enfriamiento (Darwish *et al.*, 2008), además las propiedades de transporte (e.g., viscosidad, conductividad térmica, coeficiente de difusión) que influyen en la transferencia de masa y calor debes ser favorables (Srihirin *et al.*, 2001).

Las primeras aplicaciones industriales de los principios termodinámicos de la absorción de un vapor por un líquido, con el fin de conseguir la refrigeración de otro líquido, datan de los primeros años 30's, pero han tenido poca difusión principalmente por el valor inferior de su desempeño en los sistemas de amoníaco-agua (Cano, 2001), comparado con los sistemas de compresión. Actualmente, la mayoría de los ciclos se encuentran en la etapa de investigación o desarrollo a nivel planta piloto (Srihirin *et al.*, 2001; Goríbar, 2002 y Yokozeki, 2005). A continuación se exponen dos diseños.

2.3 Descripción de dos ciclos de enfriamiento por absorción

En la presente sección se describen dos ciclos orientados a satisfacer las necesidades de climatización de espacios en el sector residencial, el primero es de simple efecto y el segundo es de tipo GAX avanzado, la finalidad es ejemplificar el principio de absorción implementado en los ciclos de enfriamiento que trabajan con el fluido amoníaco-agua, también es importante ilustrar la diferencia en la complejidad generada a partir de la cantidad de componentes presentes en cada uno de los ciclos y por los ciclos desordenados que son consecuencia de las corrientes en recirculación.

2.3.1 Ciclo de absorción de simple efecto

El diagrama de la Figura 2 corresponde a un ciclo comercial de simple efecto, los números encerrados indican un punto de estado (corriente) y las letras identifican a los componentes. El ciclo se compone de un condensador (CO), un evaporador (EV), una columna en el generador dividida en un generador (GEN) y un rectificador (RE), un intercambiador de calor de solución (PE), un absorbedor (AB), dos válvulas de expansión que dividen la zona de baja presión con la de alta (VER y VES), y por una bomba de solución (BS). El intercambiador de calor por solución permite recuperar el calor interno, esto reduce la cantidad de energía que se evacua en el absorbedor y la energía que se suministra en el desorbedor, utiliza energía solar como fuente motriz en el generador, es enfriado con la solución agua-etilenglicol, utiliza amoníaco-agua como fluido de trabajo y su aplicación está orientada a proporcionar enfriamiento residencial.

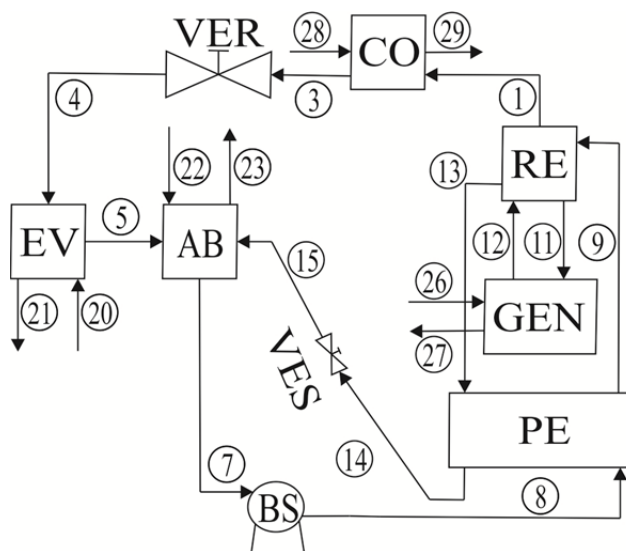


Figura 2. Esquema del sistema de refrigeración por absorción de simple efecto.

A continuación se hace su descripción operativa. El refrigerante a presión alta (3) que proviene del condensador pasa a través de una válvula causando el fenómeno de expansión y entra al evaporador, el vapor se debe comprimir (6) para que se pueda reinyectar al condensador (1), el vapor (6) se absorbe en la solución débil (15) en el absorbedor y después, se comprime al pasar por una bomba (8), el desorbedor separa parcialmente el amoníaco del agua para completar el ciclo, el intercambiador de calor por solución permite recuperar el calor interno y esto reduce la cantidad de energía que se evacua en el absorbedor y la energía que se suministra en el

desorbedor, las soluciones (11) y (12) fluyen en el desorbedor a través de un sistema termosifón. Para información detallada se debe consultar el trabajo de Le Lostec *et al.*, (2012).

2.3.2 Ciclo de absorción avanzado tipo GAX

Se elige describir al ciclo GBG-GAX por varias razones, (1) es un ciclo avanzado representativo del resto por su complejidad originada en las corrientes con recirculación, (2) un ciclo con esta complejidad representa una buena prueba para la metodología en términos de convergencia, (3) se dispone de los datos de diseño por completo y (4) es un ciclo con potencial en el mercado.

El ciclo se compone por un condensador (CO), un evaporador (EV), un pre-enfriador (PE), una columna del generador dividida en un rectificador (RE), un intercambiador calentado con solución (GHX), también se incorpora una fuente de energía motriz a partir de biogás (GBG) que es la única diferencia con el propuesto por Velázquez y Best, (2002), una columna del absorbedor integrada por un intercambiador de calor entre el absorbedor y generador (GAX), un intercambiador de calor enfriado por la solución (AHX) y la sección del absorbedor (AB), y por dos válvulas de expansión que dividen la zona de alta y baja presión (VER y VES), la Figura 3 ilustra su configuración.

Al dividir el generador y el absorbedor, se obtiene mayor integración energética interna con el PE, GHX, AHX y GAX, se refleja en la disminución de los requerimientos de calentamiento externo en el generador activado con biogás generado a partir de los desechos orgánicos de las viviendas (Maghanaki *et al.*, 2013), y las necesidades de servicios de enfriamiento externo en el absorbedor, otra característica es que utiliza aire como medio de enfriamiento del absorbedor, condensador y rectificador, en lugar de agua de una costosa torre de enfriamiento, se considera que la torre de enfriamiento no es práctica, ni viable económicamente para máquinas chicas, al enfriar con aire se reduce el costo de mantenimiento (limpieza mecánica y química), costos de operación y el espacio requerido por el sistema, por último, el sistema puede trabajar en modo de enfriamiento en verano y calentamiento en invierno porque utiliza amoníaco-agua como fluido de trabajo, además de adaptar un circuito de tuberías o ductos de aire.

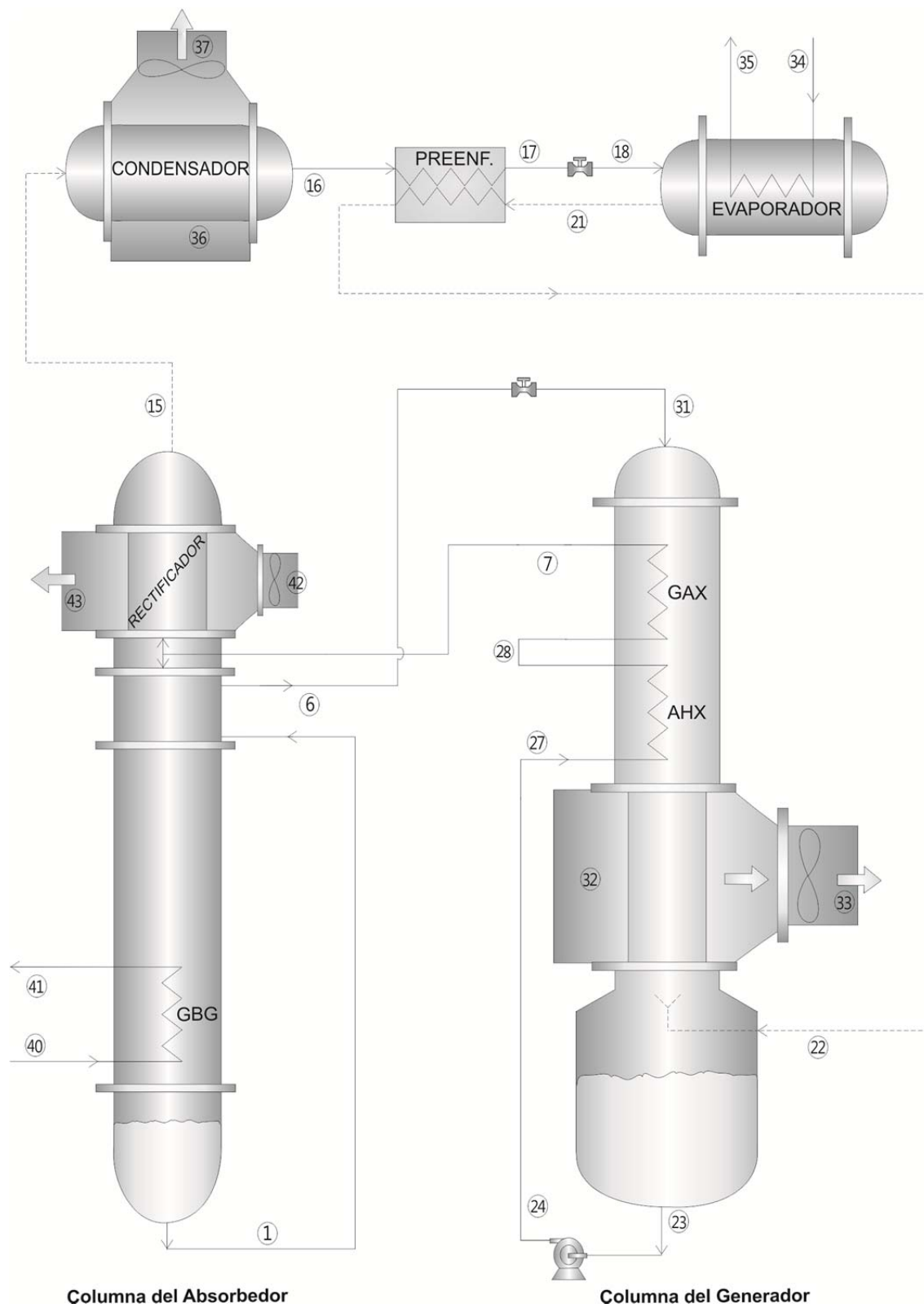


Figura 3. Esquema del ciclo avanzado por absorción tipo GAX. Adaptado para enfriamiento y activado con biogás, cortesía de Velázquez y Best, (2002).

2.3.2.1 Descripción operativa

Se utiliza la Figura 4 para explicar los procesos que se llevan dentro de los componentes del ciclo GBG-GAX, se han creado tres componentes adicionales debido al fenómeno que se efectúa cuando la corriente GAX entra en la columna del generador, el SEP recibe la corriente que entra del GAX compuesta por líquido-vapor, la parte de vapor se une en el MEV con el vapor que proviene del GHX, y la parte de líquido se une en el MEL con el líquido que proviene del RE para entrar en el GHX.

En el estado 15 sale vapor de amoníaco saturado a la presión alta del sistema y se condensa en el condensador para salir como líquido saturado (16); se subenfria en el pre-enfriador (17) y se expande (dos fases) al reducir la presión en la válvula de estrangulamiento (18); el refrigerante recibe calor del agua a enfriar en el evaporador y termina de convertirse en vapor, produciendo el efecto frigorífico deseado y sale en forma de vapor saturado (21) o en algunos casos con un poco de líquido, este líquido se termina de evaporar en el pre-enfriador (22); el vapor frío entra luego a la columna absorbedor-GAX donde se absorbe en tres diferentes etapas por medio de una solución acuosa caliente; en el absorbedor se retira el calor de la reacción exotérmica (generada por el fluido de amoníaco-agua) por medio de aire de enfriamiento y por usar la misma solución fría que deja el absorbedor; la solución acuosa con alto porcentaje de amoníaco en agua (solución fuerte) sale de la columna absorbedor-GAX (23) y entra en la bomba (24); a presión alta del sistema se introduce a la sección media de la columna (AHX), donde recibe calor del absorbedor, saliendo en el estado 28, posteriormente entra en la parte más caliente del absorbedor (GAX), en donde al recibir calor de absorción de alta calidad, alcanza el punto de saturación e inicia el proceso de cambio de fase (liberación de amoníaco), sale en el estado 7, como fluido vapor-líquido entra en la cámara de separación de la columna generador-rectificador, en donde la parte líquida se incorpora al vapor condensado proveniente del rectificador (11) y entran al generador (10), en donde se agrega calor para terminar de extraer el amoníaco de la solución; el líquido caliente (solución débil), sale por el fondo de la columna generador-rectificador (1); posteriormente la solución caliente se introduce de nuevo a la columna para que caliente la sección GHX del generador, saliendo en el estado 6, luego reduce su presión al pasar por una válvula, para salir en el estado 31; la solución acuosa todavía caliente entra a la columna absorbedor-GAX por la parte superior, en donde se pone en contacto en contra corriente

con el vapor de amoníaco a absorber; regresando al generador, la liberación del amoníaco en forma de vapor se realiza en tres etapas y sale del generador (12), pasando a la cámara de separación en donde se une con la fase vapor proveniente de la columna absorbedor-GAX (13); la corriente de vapor ascendente, sale de la cámara de separación y entra al rectificador en donde se le retira calor, saliendo después amoníaco de alta pureza en el estado 15. De esta manera se completa la operación del ciclo.

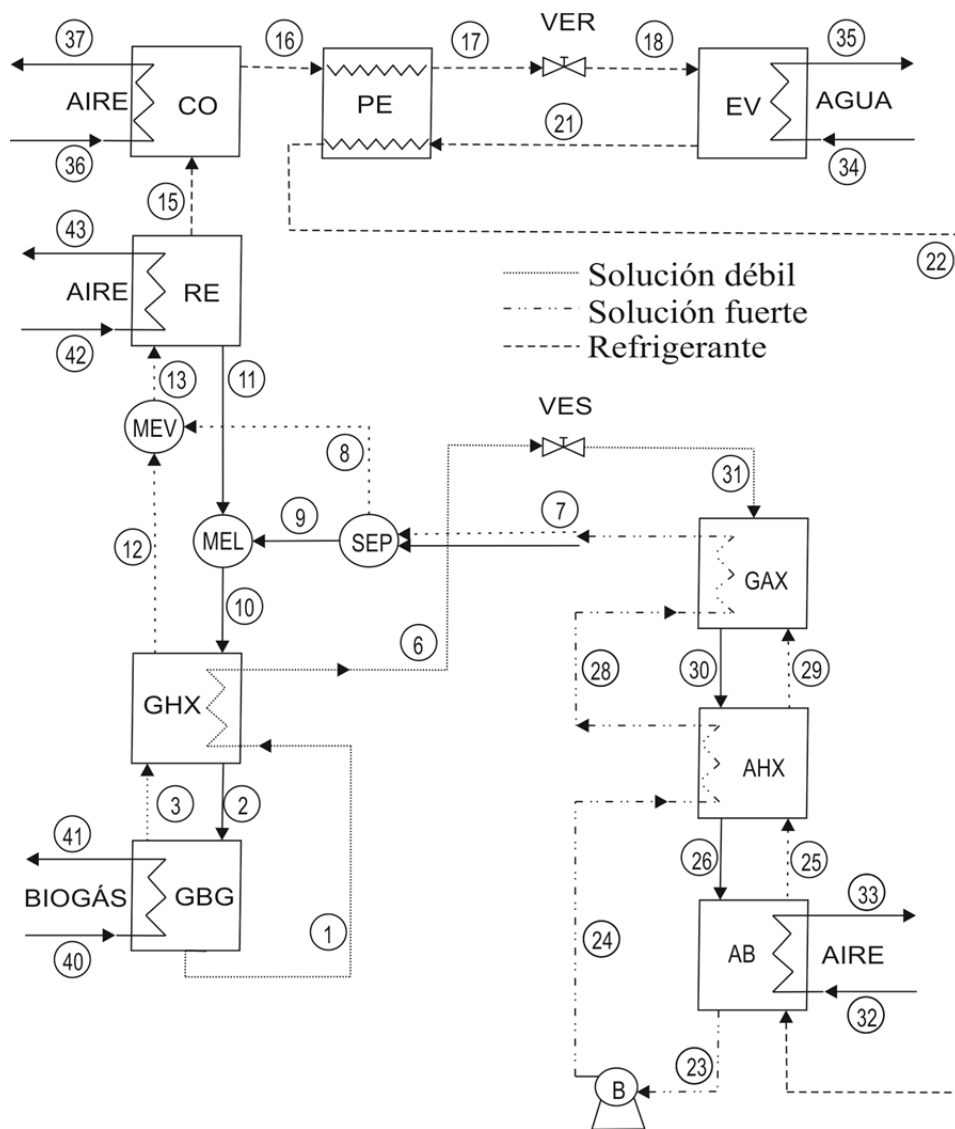


Figura 4. Esquema del ciclo avanzado GAX.

Las consideraciones que se enumeran enseguida, aplican cuando se pretende hacer un estudio energético integral del sistema o se desea disminuir el costo computacional del modelo:

1. El sistema de absorción opera en el estado estable.
2. Las soluciones amoníaco-agua se encuentran en equilibrio.
3. La presión alta del sistema, es la presión de saturación que corresponde a la temperatura del refrigerante a la salida del condensador y es igual a la presión en el generador.
4. La presión baja en el sistema, es la presión de saturación que corresponde a la temperatura del refrigerante (amoníaco) en la salida del evaporador, y es igual a la presión en el absorbedor.
5. No existe caída de presión debido a la fricción excepto en la válvula de expansión
6. El proceso de expansión de los fluidos al pasar por las válvulas del sistema se considera isoentálpicos.
7. se desprecian los cambios en la energía potencial y energía cinética
8. Los equipos; generador, condensador, evaporador y absorbedor trabajan en condiciones de saturación.
9. Fuera de lo especificado, el sistema se considera adiabático.

2.4 Clasificación de los sistemas de absorción avanzados

Los sistemas de absorción se pueden catalogar con base en la función específica para la que se crean, la clasificación que hace Kang *et al.*, (2000) es una de las más aceptadas por la comunidad de ingenieros e investigadores.

Bomba de calor por absorción (BCA) TIPO I: son los sistemas de absorción con mayor frecuencia en la práctica y se utilizan para calefacción y/o enfriamiento. El objetivo de la bomba es subir de categoría una fuente de calor de bajo nivel, usando una segunda fuente de calor con mayor nivel, como consecuencia se obtiene calor a un nivel intermedio entre ellas, esto significa que la temperatura del generador y la del condensador son más altas que las temperaturas del absorbedor y la del evaporador, por lo tanto, en un ciclo de absorción convencional la presión de separación (presión en el generador y en el condensador) es más alta que la presión de mezclado (presión en el absorbedor y en el evaporador). Un caso común en la práctica, se presenta cuando se disipa calor en el condensador y absorbedor a un mismo sumidero (la temperatura en el condensador es igual a la del absorbedor), otro caso poco frecuente, sucede cuando el sumidero

de calor del condensador está a un nivel térmico más bajo que el del absorbedor (la temperatura en el condensador es menor que la del absorbedor).

Bomba de calor por absorción TIPO II: son los sistemas de absorción usados para recuperar calor de desecho de los procesos industriales, también se conocen como transformadores térmicos o termotransformadores porque aumentan la calidad energética de una fuente de energía de bajo nivel. Su objetivo es subir de categoría a una fuente de calor de nivel intermedio, por medio de la degradación de una segunda fuente de calor de un nivel similar, esto significa que la temperatura del absorbedor y la del evaporador son más altas que las temperaturas en el generador y la del condensador. Para un ciclo de absorción convencional, la presión de separación (presión en el generador y en el condensador) es más baja que la presión de mezclado (presión en el absorbedor y en el evaporador).

Bombas de calor por absorción TIPO III: Estos sistemas son una combinación de los dos anteriores, y por ello tienen la capacidad de realizar las funciones.

Se han desarrollado diversos ciclos de absorción avanzados para calentamiento, enfriamiento y aplicaciones industriales. Sin embargo, es difícil comparar y hacer una evaluación de las características de cada ciclo porque se expresan en formas distintas. Sin embargo, se pueden clasificar en tres grupos principales de acuerdo a su propósito primario: mejora de rendimiento, aumento de la temperatura Lift (diferencia de temperatura entre el condensador y evaporador) y reducción de la presión del condensador. El grupo de mejora de rendimiento se caracteriza por los métodos de recuperación de calor o integración energética interna: recuperación de calor de condensación, recuperación de calor de absorción, recuperación de calor de condensación/absorción, aumento de calor de evaporación, entre otros. En la Tabla 1 se presenta dicha clasificación. El número de efectos se refiere a la cantidad de procesos de generación de refrigerante, el número de etapas hace referencia a la cantidad de circuitos de solución para un evaporador-absorbedor establecido, el número de fluidos de trabajo es la cantidad de fluidos de trabajo diferentes que no son mezclados, la temperatura Lift es la diferencia entre la temperatura del condensador y la temperatura del evaporador, finalmente, la reabsorción se presenta en un ciclo doble, donde el refrigerante generado en el generador de baja

temperatura es directamente absorbido en el absorbedor de alta temperatura sin proceso de condensación.

Tabla 1. Clasificación de algunos ciclos de absorción avanzados de acuerdo a su propósito primario.

Propósito Primario	Tipo de integración energética interna	Número de fluidos de trabajo				
		Uno			Dos	Tres
		Una etapa	Dos etapas	Tres etapas	Dos etapas	Tres etapas
Mejora de rendimiento.	Recuperación de calor de absorción.	GAX (Varios) RA	Doble efecto Semi GAX RA avanzado	Triple		
	Recuperación de calor de condensación.	Doble efecto Triple efecto Cuádruple Séxtuple	Triple efecto		Doble	
	Recuperación de calor de absorción/condensación.			Reabsorción	Ciclo doble Triple Cuádruple Quíntuple Séxtuple	Triple Siete
	Aumento del calor de evaporación.	Ciclo de refrigerante complementario	Reabsorción			
Otros.		Tipo III				
Aumento de la temperatura Lift		SRATA	Dos Etapas Absorción Reabsorción			

2.5 Modelo termodinámico de los sistemas de absorción

Para plantear el modelo termodinámico del sistema y efectuar la simulación de un sistema de enfriamiento por absorción, se aplica el “*principio de conservación de la materia*” y la “*primera ley de la termodinámica*” (Faires y Simmang, 1990). El primero indica que la masa en flujo que entra al sistema menos la masa en flujo que sale del sistema es igual a cambio de la masa almacenada en el sistema.

$$\dot{m}_{entr.} - \dot{m}_{sal.} = \Delta \dot{m}_{atm.} \quad (2)$$

donde el flujo másico ($\dot{m}$) medido en Kg/s, es la intensidad másica con respecto al tiempo dm/dt . La ley, también conocida como “*principio de conservación de la energía*”, establece que “*si se realiza trabajo sobre un sistema o bien éste intercambia calor con otro, la energía interna del sistema también cambia*”. Esta ley permite definir el calor como la energía necesaria que debe intercambiar un sistema para compensar las diferencias entre trabajo y energía interna, es decir:

$$Q_{entr.} + W_{entr.} = Q_{sal.} + W_{sal.} \quad (3)$$

donde el trabajo (W) medido en Kj/Kg, es energía en transición. El calor (Q) medido en kW es energía en transición desde un cuerpo o sistema hasta otro, debido sólo a la diferencia de temperaturas entre los sistemas.

El termino eficiencia, hace referencia a la capacidad que tiene un sistema para retirar calor del medio a enfriar entre la cantidad de energía suministrada, bajo parámetros de diseño constantes y condiciones estables (capacidad, temperatura ambiente y temperatura de agua para enfriamiento). Se sabe que a mayor eficiencia, el equipo consume menor cantidad de energía para el mismo trabajo (Goríbar, 2002). Aquí se hace referencia al COP:

El coeficiente de operación para enfriamiento (COP_{Enf}) se denota como el cociente entre la carga de calor y la energía suministrada en forma de calor al fluido de trabajo (solución) en el generador.

$$COP_{Enf} = \frac{Q_{EV}}{Q_{GBG}} \quad (4)$$

El coeficiente de operación para calentamiento (COP_{cal}) se denota como la suma del calor rechazado en el rectificador, condensador y absorbedor entre el calor suministrado en el generador.

$$COP_{cal} = \frac{Q_{RE} + Q_{CO} + Q_{AB}}{Q_{GBG}} \quad (5)$$

La temperatura Lift es la diferencia de temperatura a la que se encuentra el condensador con la del evaporador.

$$T_L = T_{CO} - T_{EV} \quad (6)$$

Las propiedades termodinámicas de la mezcla amoniaco-agua en fase líquido y vapor en saturación se obtienen con las correlaciones de Patek y Klomfar, (1995):

$$T(p, x) = T_0 \sum_i a_i (1 - x)^{m_i} \left[\ln \left(\frac{p_0}{p} \right) \right]^{n_i}, i = \{1, 2, 3, \dots, 14\} \quad (7)$$

$$T_0 = 100 \text{ K}, p_0 = 2 \text{ Mpa}$$

$$T(p, y) = T_0 \sum_i a_i (1 - y)^{m_i/4} \left[\ln \left(\frac{p_0}{p} \right) \right]^{n_i}, i = \{1, 2, 3, \dots, 17\} \quad (8)$$

$$T_0 = 100 \text{ K}, p_0 = 2 \text{ Mpa}$$

$$y(p, x) = 1 - \exp \left[\ln(1 - x) \sum_i a_i \left(\frac{p}{p_0} \right)^{m_i} x^{\frac{n_i}{3}} \right], i = \{1, 2, 3, \dots, 14\} \quad (9)$$

$$p_0 = 2 \text{ Mpa}$$

$$h_L(T, x) = h_0 \sum_i a_i \left(\frac{T}{T_0} - 1 \right)^{m_i} x^{n_i}, i = \{1, 2, 3, \dots, 16\} \quad (10)$$

$$h_0 = 100 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}, T_0 = 273.16 \text{ K}$$

$$h_V(T, y) = h_0 \sum_i a_i \left(1 - \frac{T}{T_0} \right)^{m_i} (1 - y)^{n_i/4}, i = \{1, 2, 3, \dots, 17\} \quad (11)$$

$$h_0 = 1000 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}, T_0 = 324 \text{ K}$$

Los coeficientes a_i , los exponentes n_i y m_i , y las condiciones de referencia de las ecuaciones (7) - (11), correspondientes a cada ecuación, se presentan en las Tablas 1 a 5 de los mismos autores.

Para obtener las propiedades de entalpia de la mezcla amoniaco-agua en condiciones no saturadas, se aplican las ecuaciones de Ziegler y Trepp, (1984).

Para obtener la entalpia especifica molar del agua y el amoniaco como fluidos puros:

$$h = RT_B T_R^2 \left[\frac{\partial}{\partial T_r} \left(\frac{G_r}{T_r} \right) \right]_{P_r} \quad (12)$$

Para la fase liquida:

$$\begin{aligned} \left[\frac{\partial}{\partial T_r} \left(\frac{G_r}{T_r} \right) \right]_{P_r} = & \frac{h_{r_0}^L}{T_r} + \frac{B_1}{T_r} \left(\frac{T_{r_0}}{T_r} - 1 \right) - \frac{B_3}{3} \left(T_r - \frac{T_{r_0}^3}{T_r^2} \right) + \left(A_4 - \frac{A_1}{T_r^2} \right) (P_r - P_{r_0}) \\ & - \left[\frac{A_2 (h_r^2 - P_{r_0})}{2 T_r^2} \right] \end{aligned} \quad (13)$$

Para la fase vapor:

$$\begin{aligned} \left[\frac{\partial}{\partial T_r} \left(\frac{G_r}{T_r} \right) \right]_{P_r} = & \frac{1}{T_r^2} \left\{ h_{r_0}^V + C_1 (P_r - P_{r_0}) + 4C_1 \left(\frac{P_r}{T_r^3} - \frac{P_{r_0}}{T_{r_0}^3} \right) \right. \\ & + 12C_3 \left(\frac{P_r}{T_r^{11}} - \frac{P_{r_0}}{T_{r_0}^{11}} \right) + 3C_4 \left(\frac{P_r^3}{T_r^{11}} - \frac{P_{r_0}^3}{T_{r_0}^{11}} \right) + D_1 (T_r - T_{r_0}) \\ & \left. + D_2 \left(\frac{P_r^2}{2} - T_{r_0}^2 + \frac{T_{r_0}^2}{2} \right) + D_3 \left(\frac{P_r^3}{3} - \frac{T_{r_0}^3}{2} + \frac{T_{r_0}^3}{6} \right) \right\} \end{aligned} \quad (14)$$

Efectuando sustituciones se obtiene el valor de la entalpia para las fases liquido o vapor para el agua y amoniaco como fluidos puros, los coeficientes y las condiciones de referencias se encuentran en el mismo artículo en que se reportan las ecuaciones.

La entalpia de la mezcla se obtiene de la siguiente forma:

Para la fase liquida:

$$h_m^L = \bar{x} h_a^L + (1 - \bar{x}) h_w^L + h^E \quad (15)$$

Para la fase vapor:

$$h_m^V = \bar{y}h_a^V + (1 - \bar{y})h_w^V \quad (16)$$

donde h^E :

$$h^E = -RT_B T_R^2 \left[\frac{\partial}{\partial T_r} \left(\frac{G_r^E}{T_r} \right) \right]_{P_r, \bar{x}} \quad (17)$$

a la vez que:

$$\begin{aligned} \left[\frac{\partial}{\partial T_r} \left(\frac{G_r^E}{T_r} \right) \right]_{P_r} &= \left[\frac{-\bar{x}(1 - \bar{x})}{T_r^2} \right] \left\{ E_1 + E_2 P_r + 2 \frac{E_5}{T_r} + 3 \frac{E_6}{T_r} \right. \\ &\quad + (2\bar{x} - 1) \left(E_7 + E_8 P_r + 2 \frac{E_{11}}{T_r} + 3 \frac{E_{12}}{T_r^2} \right) \\ &\quad \left. + (2\bar{x} - 1)^2 \left(E_{13} + E_{14} P_r + 2 \frac{E_{15}}{T_r} + 3 \frac{E_{16}}{T_r^2} \right) \right\} \end{aligned} \quad (18)$$

Para obtener las propiedades de volumen específico y calor específico para los fluidos puros, agua, amoniaco y el aire como gas estándar, se utiliza el polinomio de Ashrae:

$$f(T) = AT^6 + BT^5 + CT^4 + DT^3 + ET^2 + FT^1 + GT^0 \quad (19)$$

donde T está en °C y los coeficientes A, B, C, D, E, F y G se listan en Pelayo, (2007).

2.6 Enfoques de simulación

La mayoría de los sistemas que se desea estudiar son grandes y complejos, por lo que no es conveniente experimentar con ellos directamente. De acuerdo a Shannon, (1975) la simulación es una alternativa porque permite diseñar el modelo de un sistema real y conducir experimentos, su propósito es analizar y entender el comportamiento del sistema bajo diversas condiciones de acción o decisión. En un mundo cada vez más competitivo, la simulación se ha convertido en una herramienta indispensable para resolver problemas complejos. Existen multiples razones para utilizar la simulación en el análisis de sistemas:

1. Se pueden probar nuevos diseños, distribuciones, entre otros. sin necesidad de invertir recursos para su implementación.
2. La simulación se utiliza para evaluar el mejoramiento de un sistema existente, así como para evaluar el desempeño de un sistema completamente nuevo.
3. Es posible identificar cuellos de botella en flujos de información, material y producto, así como probar nuevas opciones para incrementar las tasas de los flujos.
4. Permite probar hipótesis acerca de cómo y porqué ocurre algún fenómeno en un sistema.
5. Es posible hacer una predicción de cómo se comporta u operará un sistema.
6. Ayuda a tener un mejor entendimiento sobre un sistema y por consiguiente poder sugerir estrategias que mejoren su operación y eficiencia.
7. A través de un estudio de simulación, se pueden encontrar a las variables críticas para el desempeño del sistema y establecer el control automático del mismo.
8. Se puede experimentar con situaciones nuevas, sobre las cuales se tiene poca o ninguna información.

En las secciones siguientes se describen los principales aspectos vinculados a la arquitectura de un sistema típico de simulación de procesos químicos.

2.6.1 Enfoque orientado a ecuaciones

Bajo el enfoque de la simulación global u orientada a ecuaciones, se plantea el modelo matemático que representa al proceso, construyendo un gran sistema de ecuaciones algebraicas que representa a todo el conjunto o planta a simular. De esta forma el problema se traduce en resolver un gran sistema de ecuaciones algebraicas, por lo general altamente no lineales.

El principal problema asociado a la filosofía de resolución global u orientada a ecuaciones es la convergencia del sistema y la consistencia de las soluciones que se encuentran. En efecto, los sistemas altamente no lineales como los que corresponden a modelos de plantas químicas pueden, por ejemplo, producir múltiples soluciones. Además, la solución numérica para grandes sistemas, exige inicializaciones apropiadas, es decir próximas a un entorno de la solución, de lo contrario pueden presentarse serios inconvenientes. Históricamente, estas dificultades han sido la causa que ha limitado el desarrollo de este tipo de simuladores en forma masiva. Una de las

críticas fundamentales para la operatividad de los mismos es que se realizaba a menudo por parte de usuarios no entrenados, era la imposibilidad de identificar los sectores de la planta en correspondencia con el sistema de ecuaciones que lo representa, dado que una vez que se hubo armado el sistema total, éste está integrado y se pierde la correspondencia biunívoca entre el equipo y el subsistema de ecuaciones que lo representa. De esta manera, si existieran inconvenientes durante la simulación, resulta difícil asignar el problema a un sector específico de la planta, o bien inicializar convenientemente.

Este enfoque tiene varias ventajas: puede lograrse una velocidad de convergencia cuadrática, se puede incorporar fácilmente las expresiones de restricción para definir problemas de optimización en forma directa ya que solo basta con plantear las restricciones y la función de optimización, cada equipo se representa por las ecuaciones que lo modelan, desaparece la distinción entre variables de proceso y parámetros operativos, por lo tanto se simplifican los problemas de diseño, resolución simultánea del sistema de ecuaciones algebraicas (no lineales) resultante, mayor velocidad de convergencia. Sin embargo, necesita una mejor inicialización (mejor cuanto mayor sea el problema a resolver), a mayor complejidad, menor confiabilidad en los resultados y más problemas de convergencia (soluciones sin sentido físico), también es difícil de usar por "no especialistas".

2.6.2 Enfoque modular secuencial

En esta filosofía se tiene como ventaja el hecho que cada sistema de ecuaciones es resuelto con una metodología que resulta adecuada para el mismo, ya que es posible analizar bajo todas las circunstancias posibles, el comportamiento del método de resolución propuesto, esto es sistemas ideales, no ideales, topología diversas del equipo, distintas variantes, etc.

Los simuladores desarrollados bajo este enfoque se basan en componentes de simulación independientes que siguen aproximadamente la misma filosofía que las operaciones unitarias, es decir, cada equipo: bomba, válvula, intercambiadores, por mencionar algunos, se representan a través de modelos específicos para los mismos y además, el sentido de la información coincide con el flujo físico en la planta. De manera que para representar un equipo real de la planta, es necesaria la conexión de varios componentes disponibles en una biblioteca de equipos del

simulador. Dado que se puede analizar específicamente el desempeño de los distintos métodos de resolución es factible lograr un modelo robusto y eficiente para cada componente específico. Para cada componente de simulación se debe plantear su modelo matemático. Para obtener la solución de cualquier sistema de ecuaciones deben diferenciarse los valores conocidos (variables de diseño) y los que deben calcularse, todo esto teniendo en cuenta los grados de libertad; es decir, el número de ecuaciones menos el número de incógnitas, a fin de obtener un sistema con solución única. El enfoque en la teoría secuencial modular por definición supone que se conocen (especifican) las variables de las corrientes de entrada, o sea las alimentaciones a los equipos, mientras que deben calcular las corrientes de salida y los correspondientes parámetros de operación. Esto impone cierta rigidez que sacrifica, según sea el caso, la posibilidad de encontrar asignaciones tales que minimicen el tiempo de cómputo (secuencias acíclicas de resolución del sistema de ecuaciones asociado). Sin embargo, esto resulta conveniente desde otro punto de vista, ya que de esta manera se impone una dirección al flujo de información entre módulos. Por otra parte, el análisis de los grados de libertad, las combinaciones posibles de especificación de variables son muy amplias, incrementándose en forma dramática la cantidad de módulos a disponer si se quisiera cubrir todas las posibilidades.

2.6.3 Enfoque híbrido

Los simuladores basados en una estrategia híbrida con respecto a las filosofías descritas, ya que combinan la estrategia modular y la orientada a ecuaciones de forma tal que se aprovechen los aspectos positivos de ambas. Para ello se selecciona un grupo de variables sobre las cuales se procede según la filosofía global, esto es, se resuelve simultáneamente, mientras que para el resto se mantiene la filosofía modular, es decir, se trata de encontrar una secuencia acíclica que suministre los valores de las variables en cada iteración

Capítulo 3

Metodología para resolver el problema de los ciclos de absorción

En éste Capítulo se presentan los conceptos con enfoque computacional que contribuyen en el desarrollo y estructura de una metodología orientada a resolver el problema de los ciclos de enfriamiento por absorción avanzados.

3.1 Técnica de computación para modelar el problema

La combinación de métodos numéricos y computadoras constituye una herramienta para el análisis matemático, ya que son capaces de manejar no linealidades, modelos asociados a geometrías complejas y sistemas de ecuaciones acopladas que son necesarios para el modelado eficiente de muchos sistemas presentes en ingeniería. Sin embargo, no todo sistema de ecuaciones puede resolverse fácilmente, al menos desde el punto de vista analítico.

La computación vista como disciplina, ha ganado aceptación en diversas áreas gracias al incremento en la velocidad de cálculo y herramientas algorítmicas. Un gran esfuerzo computacional está orientado a estudiar y desarrollar métodos que tienen impacto en la simulación de procesos complejos. Aquí, se recurre a la ayuda de una rama de la computación conocida como inteligencia artificial, en la siguiente sección se habla sobre una de sus ramas que son los problemas de satisfacción de restricciones.

3.1.1 Problemas de satisfacción de restricciones (CSP)

Los *Problemas de Satisfacción de Restricciones* o *Constraint Satisfaction Problems* (CSP) son una familia de problemas representados por un modelo general, que ha tomado mucha importancia en inteligencia artificial debido a que implementa estrategias únicas que se pueden explotar para llegar a soluciones particulares de problemas complejos. De manera general, los CSP están compuestos por un conjunto finito de variables, cada una de las cuales se asocia con un dominio finito, y un conjunto finito de restricciones que acota los valores que pueden tomar las variables de forma simultánea, la meta es asignar un valor a cada variable de tal forma que todas

las restricciones se satisfagan en forma simultánea, como lo indica Tsang, (1993). El problema que se plantea en el presente trabajo (§1.1.1) cuenta con las características descritas, por lo tanto se puede abordar como un CSP. La asignación de cada valor del dominio a cada variable tomando en cuenta las restricciones es un problema complejo de resolver porque se deben considerar todas las opciones posibles (combinaciones).

En el Apéndice se definen algunos conceptos importantes de los CSP, la finalidad es evitar ambigüedades y comprender la forma en que se va estructurando la metodología que se plantea como objetivo (§1.3).

3.1.2 Representación de los CSP en grafos

La teoría de grafos (Tsang, 1993) es un campo de estudio de las Ciencias de la Computación por ser de suma importancia en los CSP. Los grafos son una herramienta esencial para el estudio y modelado de muchos problemas de Ingeniería, Sociología, Biología y de la Computación misma, por mencionar algunos ejemplos. En el Apéndice se presentan los conceptos relacionados a los grafos.

Existen múltiples representaciones para los grafos como la simbólica, la numérica y como grafo mismo. El valor de ésta última reside en que permite una representación visual de los problemas. En la Figura 5 se visualiza al ciclo de enfriamiento por absorción GAX como un grafo dirigido, en donde los nodos representan a los componentes del ciclo y las aristas representan sus corrientes, esto ayuda a percibir la complejidad de la red compuesta por ciclos.

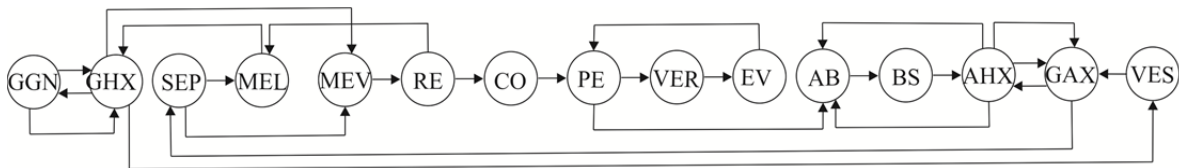


Figura 5. Ciclo GBG-GAX representado en un grafo dirigido.

Las gráficas descendentes permiten representar al mismo ciclo GAX como un grafo no dirigido y su espacio de soluciones. Aquí los niveles representan una secuencia predefinida de componentes del ciclo, esta secuencia de longitud n (número de componentes del ciclo) no

necesariamente refleja la adyacencia de los componentes en el ciclo, sin embargo anula a los ciclos internos, como lo hace el enfoque modular secuencial. Debido a que el modelo matemático de cada componente contiene ecuaciones no lineales, sus soluciones múltiples se representan por nodos en cada nivel. Las aristas no representan a las corrientes del ciclo, si no a la posible compatibilidad de una solución de un nodo con la solución de otro nodo adyacente en la secuencia. Una solución parcial del ciclo está formada por una secuencia de nodos, donde cada par de nodos adyacentes en la secuencia está conectado por una arista, y una ruta en profundidad de longitud n a través de todos los niveles (sin tomar en cuenta dos veces un mismo nivel) representa una solución completa. Por ejemplo, en la Figura 6 se aprecia una gráfica con cuatro niveles (componentes del algún ciclo), cada uno con diferente número de nodos (soluciones de cada componente). Las líneas punteadas indican la posible compatibilidad entre las soluciones, y las líneas continuas representan a una solución completa compuesta por el 1^{er} nodo del nivel uno, el 2^{do} nodo del nivel dos, el 2^{do} nodo del nivel tres y el 1^{er} nodo del nivel cuatro.

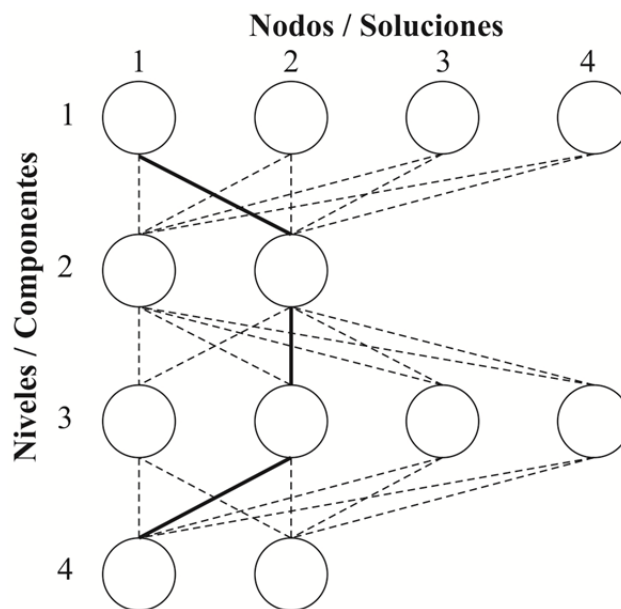


Figura 6. Representación general de un ciclo como una gráfica descendente.

3.1.3 Algoritmo backtracking para la búsqueda de soluciones en los CSP

Parte del esfuerzo de CSP se enfoca en desarrollar algoritmos para búsqueda de soluciones. El *algoritmo backtracking* (Bitner y Reingold, 1975) es una estrategia de fuerza bruta

refinada, efectúa una búsqueda sistemática entre todas las opciones posibles para encontrar soluciones a problemas.

El algoritmo trabaja de la siguiente manera, partiendo del nivel 1 (gráfica 6), se toma una variable en un instante y se le asigna un valor dentro del dominio de esa variable, después se verifica que el valor asignado a la variable sea compatible con todos los valores de variables asignados hasta el momento. Si el valor asignado a la variable viola ciertas restricciones, entonces se toma otro valor alternativo, dentro de su dominio, hasta lograr la compatibilidad. Una vez asignando un valor compatible a la variable, se desciende al siguiente nivel de la gráfica (lo cual corresponde a seleccionar otra variable) y se le asigna un valor dentro de su dominio; de igual forma se verifica que el valor asignado sea compatible con todos los valores de variables asignados hasta el momento. Si el valor asignado viola ciertas restricciones entonces se toma otro valor alternativo, dentro de su dominio, hasta lograr la compatibilidad. Este proceso se repite de forma iterativa descendiendo de nivel en la gráfica, hasta lograr que todas las variables se encuentren asignadas, con lo cual se habrá conseguido la solución, y el problema estará resuelto. Si en alguna etapa no se pueden asignar valores a las variables sin violar alguna restricción, entonces se regresa a un nivel anterior y se asigna un nuevo valor, dentro de su dominio, a la variable correspondiente a ese nivel, se verifica su compatibilidad y se desciende de nuevo al nivel siguiente para continuar. El proceso continúa hasta encontrar una solución o se han probado todas las combinaciones de las etiquetas y han fracasado. El procedimiento general se ilustra en la Figura 7, y un ejemplo más específico se muestra en la Figura 8.

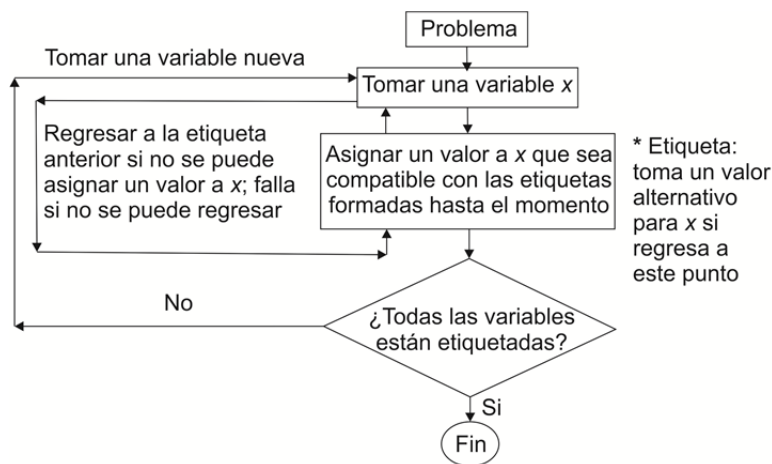


Figura 7. Control del algoritmo backtracking.

En la Figura 8 se ilustra el proceso exploratorio del algoritmo sobre una gráfica descendente, las flechas ilustran las rutas que va siguiendo el algoritmo buscando compatibilidad entre los nodos, las flechas segmentadas en negritas representan una solución completa y las flechas segmentadas tenues representan el espacio que falta por explorar. La exploración inicia en el 1^{er} nodo del nivel 1, busca compatibilidad con algún nodo del nivel 2 y la encuentra con el 2^{do} nodo, efectúa el mismo procedimiento con el nivel 3, cuando encuentra compatibilidad con el 2^{do} nodo inmediatamente se pasa al nivel 4, encuentra compatibilidad con el 1^{er} nodo pero no con el 2^{do}.

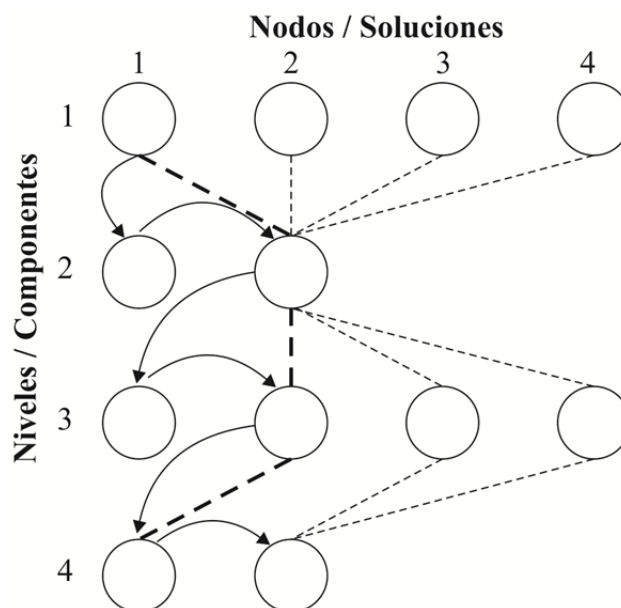


Figura 8. Recorrido del algoritmo backtracking en profundidad.

3.2 Desarrollo de la metodología

La presente sección describe a detalle el desarrollo de la metodología utilizando los conceptos descritos en la Sección 3.1. La Figura 9 muestra las etapas que conforman a la metodología. Primero se obtiene el modelo matemático que representa al ciclo, después se define una secuencia considerando todos los componentes en forma de gráfica descendente, y finalmente se aplica el algoritmo backtracking sobre la gráfica para realizar la búsqueda de soluciones completas del ciclo. En este trabajo se resuelve el ciclo GAX, de la Figura 4, con el cual se ejemplifica el desarrollo de la metodología, “sin pérdida de generalidad”, se puede aplicar a cualquier otro ciclo por absorción.

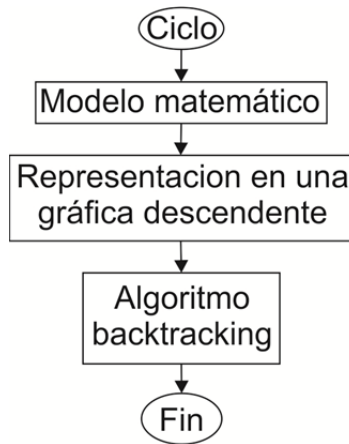


Figura 9. Etapas de la metodología.

3.2.2 Modelo matemático

La meta de esta etapa es obtener el modelo matemático que representa el comportamiento operativo de los sistemas de enfriamiento por absorción, junto con sus restricciones. Se explica para el componente GBG que se ilustra en la Figura 10, por ser un caso ilustrativo. De las tres corrientes internas, la número (2) contiene mayor concentración de amoníaco en el fluido que se encuentra en estado líquido saturado, dicha corriente baja por el efecto de la gravedad, conforme desciende entra en contacto con la zona de mayor temperatura (provocada por el calor que agrega la corriente (40)), el calor transferido de la zona de mayor temperatura hacia el fluido que tiene menor temperatura provoca que se libere el amoníaco junto con una menor cantidad de agua (proceso de rectificación), ambos salen por la corriente (3) en forma de vapor saturado, como el agua se condensa con mayor facilidad tiende a bajar en forma líquida, este proceso de rectificación se debe a que las partes superiores de la columna del generador se encuentran a menor temperatura, finalmente, en la corriente (1) sale el fluido como líquido saturado con baja concentración de amoníaco y con alta temperatura, esta corriente entrega su calor en el componente GHX para seguir con el proceso de rectificación en niveles superiores de la columna del generador. En la corriente externa (40) entran los gases de combustión y agregan calor por contacto indirecto, por la corriente (41) se desechan los gases,

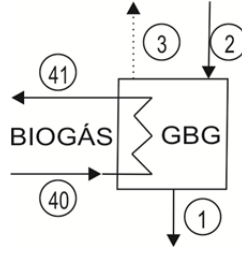


Figura 10. Componente GBG del ciclo GAX.

El modelo matemático comprende las ecuaciones termodinámicas de conservación de masa, conservación de energía, transferencia de calor, equilibrio de líquido-vapor, y como se considera que el ciclo opera en condiciones estables, no hay acumulación, por lo tanto la entrada es igual a la salida.

Balance de materia total:

Por la parte interna
$$m_2 = m_3 + m_1 \quad (20)$$

Por la parte externa
$$m_{40} = m_{41} \quad (21)$$

Balance de materia por componente:

Por la parte interna
$$m_2 x_2 = m_3 y_3 + m_1 x_1 \quad (22)$$

Balance de energía:

Por la parte interna
$$Q_{GBG} + m_2 h_2 = m_3 h_3 + m_1 h_1 \quad (23)$$

Por la parte externa
$$m_{40} h_{40} = m_{41} h_{41} + Q_{GBG} \quad (24)$$

Balance de cantidad de movimiento:

$$p_{40} = p_{41} \quad (25)$$

$$p_2 = p_3 \quad (26)$$

$$p_1 = p_3 \quad (27)$$

Ecuaciones de propiedades:

$$T_1 = f(p_1, x_1) \quad (28)$$

Temperaturas en saturación $T_2 = f(p_2, x_2) \quad (29)$

$$T_3 = f(p_3, y_3) \quad (30)$$

$$h_1 = f(T_1, x_1) \quad (31)$$

Entalpias en Saturación $h_2 = f(T_2, x_2) \quad (32)$

$$h_3 = f(T_3, y_3) \quad (33)$$

Ecuaciones especiales:

Delta de T. de aprox. $\Delta_{ac} = T_{41} - T_2 \quad (34)$

Delta de T. de desequilibrio $\Delta_{de} = T_2 - T_3 \quad (35)$

Restricciones:

Por masa $m_1 < m_2 \quad (36)$

$$0 < m_3 < m_2 \quad (37)$$

$$T_1 \geq T_2 \quad (38)$$

Por temperatura $T_1 \geq T_3 \quad (39)$

$$T_2 < T_{40} \quad (40)$$

$$T_{41} \leq T_{40} \quad (41)$$

$$0 \leq x_1 \leq 1 \quad (42)$$

Por concentración $0 \leq x_2 \leq 1 \quad (43)$

$$0 \leq y_3 \leq 1 \quad (44)$$

$$\Delta_{cac} \geq 0 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (45)$$

Por deltas $\Delta_{ac} \geq 5 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (46)$

$$\Delta_{de} \geq 0 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (47)$$

Parámetros de diseño:

$$p_1 \quad (48)$$

$$T_{40} \quad (49)$$

$$m_{40} \quad (50)$$

$$p_{40} \quad (51)$$

$$\Delta_{cac} \quad (52)$$

$$\Delta_{de} \quad (53)$$

$$x_1 \quad (54)$$

Ahora se procede a ordenar el modelo matemático en forma descendente, en donde “*descendente*” se refiere a resolver con mayor prioridad aquellas variables que se conocen o que se pueden calcular de forma directa, posponiendo aquellas variables que se deben obtener a través de un método o en función de otras variables. De acuerdo a la disponibilidad de los datos, parámetros de diseño o metas que se persigan, pueden surgir diferentes ordenamientos. Por lo general se tiene la meta de disminuir la energía suministrada al sistema, entonces se toma el calor Q_{GBG} como una variable para estudiar su comportamiento. En la Sección 3.2.3 se muestra un ejemplo de resolución del modelo matemático del GBG en el que se encuentra implícito su ordenamiento.

3.2.3 Estrategia para resolver el modelo matemático de un componente

En la presente sección se explica la Estrategia de Solución (ES) que resuelve el modelo matemático que representa el comportamiento operativo de un componente en específico. La estrategia inicia calculando las variables del modelo matemático (previamente ordenado) únicamente por sustituir valores (en forma directa) disponibles o calcularlas con ayuda de algún método matemático factible, la meta es asignar un valor a la mayor cantidad de variables con el menor número de operaciones. Si ya no restan variables para calcular (todas las variables tienen un valor asignado), se procede a verificar que en el modelo matemático se cumplan las restricciones y la igualdad de las ecuaciones con una tolerancia de error (ϵ) tratando de aproximar la raíz con el grado de precisión deseado. En este punto se cuenta con una solución factible y la estrategia termina, en caso de que falte calcular algunas variables, se identifica un conjunto de variables iterativas (V_i), un dominio (D_i) factible para cada una de ellas y un incremento (Δ_i) para

recorrer cada dominio. Las variables iterativas deben permitir que se calculen otras variables a partir de ellas, el dominio se define con base a los límites inferiores y superiores (L_{Inf} , L_{Sup}) que no pueden exceder las variables iterativas, y el incremento se debe seleccionar acorde al impacto que cause en la igualdad de las ecuaciones del modelo matemático. Utilizando Δ_i , se asigna un valor a cada variable iterativa (combinación de valores), pueden surgir diferentes conjuntos de variables iterativas, sin embargo es mejor elegir el que contiene menor cantidad de ellas porque de esta manera se generan menos combinaciones. En consecuencia, es posible calcular las variables restantes y se procede a verificar la igualdad de las ecuaciones en el modelo matemático, si no se satisface, entonces se asigna una combinación nueva de valores a las variables iterativas (previamente se verifica que el dominio sea válido) hasta que se obtenga una solución del componente. La Estrategia de Solución finaliza cuando se obtiene una solución del componente o cuando se ha agotado el dominio válido de las variables iterativas, se ilustra en la Figura 11.

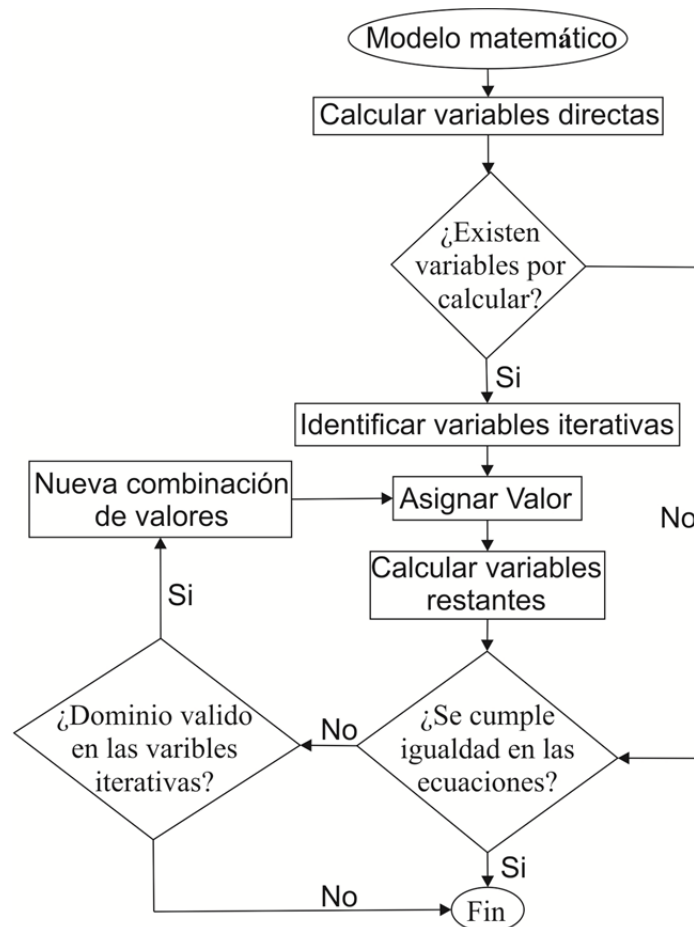


Figura 11. Estrategia de Solución (ES) para resolver el modelo matemático de un componente.

Enseguida se ejemplifica la estrategia ES con el modelo matemático del componente GBG (el resto de los componentes se ilustra en el Apéndice). En la resolución se encuentra implícito el ordenamiento del modelo con los criterios descritos en la Sección 3.2.2.

Por diseño se conoce x_1 , m_{40} , p_{40} , la presión p_1 es la presión alta del sistema y se obtiene de $f(T_{36}, y_{15})$, donde T_{36} es la temperatura ambiente que se conoce y, y_{15} es la pureza del refrigerante (concentración en saturación) con que debe salir del RE, con éstas variables ahora es posible calcular de forma directa las siguientes:

$$m_{41} = m_{40} \quad (55)$$

$$p_{41} = p_{40} \quad (56)$$

$$T_1 = f(p_1, x_1) \quad (57)$$

$$h_1 = f(T_1, x_1) \quad (58)$$

$$T_{40} = T_1 + \Delta_{40,1} \quad (59)$$

$$p_2 = p_3 = p_1 \quad (60)$$

$$T_{40} = T_1 - T_{41} \quad (61)$$

Hasta este punto ya no es posible calcular otras variables, por lo tanto se procede a definir variables iterativas, el dominio y el incremento para cada una, como se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2. Ejemplo de variables iterativas en el componente GBG del ciclo GAX.

V_i	D_i	Δ_i
Q_{GBG}	$L_{inf} < D_{GBG} \leq L_{Sup}$	Δ_{GBG}
T_2	$L_{inf} < D_{T2} \leq L_{Sup}$	Δ_{T2}

Se sustituye una combinación de valores en las variables iterativas, para ello se recomienda efectuar el recorrido de cada dominio de menor a mayor o viceversa con el fin de hacerlo en forma estructurada (evitar una función aleatoria). Ahora, ya es posible calcular el resto de las variables.

$$x_2 = f(T_2, P_2) \quad (62)$$

$$h_2 = f(T_2, x_2) \quad (63)$$

$$T_3 = T_2 \quad (64)$$

$$y_3 = f(T_3, P_3) \quad (65)$$

$$h_3 = f(T_3, y_3) \quad (66)$$

$$m_1 = \frac{Q_{GBG}}{\left(h_1 - \left(h_2 \times \left(1 + \frac{x_1 - x_2}{x_2 - y_3} \right) \right) + \left(h_3 \times \left(\frac{x_1 - x_2}{x_2 - y_3} \right) \right) \right)} \quad (67)$$

$$m_3 = \frac{m_1 \times (x_1 - x_2)}{(x_2 - y_3)} \quad (68)$$

$$m_2 = m_1 + m_3 \quad (69)$$

$$T_{41} = \frac{T_{40} - Q_{GGN}}{m_{40} \times C_{esp40}} \quad (70)$$

Enseguida se procede a verificar que se cumplan las igualdades de los balances con la tolerancia de error (ϵ) definida, lo mismo con las restricciones.

$$\epsilon_r = m_1 + m_3 - m_2 \quad (71)$$

$$\epsilon_r = m_1 \times x_1 + m_3 \times y_3 - m_2 \times x_2 \quad (72)$$

$$\epsilon_r = m_1 \times h_1 + m_3 \times h_3 - m_2 \times x_2 - Q_{GBG} \quad (73)$$

Si se cumple lo anterior, la estrategia obtiene una solución, de lo contrario se regresa a proponer una nueva combinación de valores en las variables iterativas. Si ya se probaron todas las combinaciones posibles entonces finaliza la Estrategia de Solución por completo.

Con la estrategia, el modelo matemático no se resuelve de forma simultánea, si no únicamente por “*sustituir valores en las variables*” de cada corriente, esto evita cuadrar el sistema si se quisiera resolver con el enfoque orientado a ecuaciones. Con ella también se puede obtener todas las soluciones factibles de un componente determinado, lo cual es equivalente a decir que se resuelve el SENL. La Figura 12 muestra la representación del componente GBG con sus soluciones, la misma representación se puede extender para el resto de los componentes del ciclo GAX (§2.3.2).

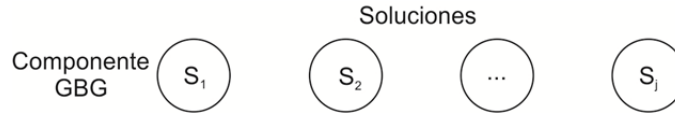


Figura 12. Representación del componente GBG con sus soluciones.

Los resultados permiten conocer la temperatura, entalpía, flujo másico, concentración, carga de calor en cada componente, presión y fracción de vapor en cada corriente,

3.2.4 Representación de los ciclos en grafos

Los sistemas de enfriamiento avanzados por absorción se pueden representar en gráficas descendentes, esto permite visualizar simultáneamente las soluciones de todos los módulos e implementar un algoritmo para la búsqueda de soluciones completas del problema.

Previo a realizar la representación, es necesario definir una *Secuencia* S_q que involucra a todos los componentes del ciclo como lo muestra la Figura 13, se define con base a los datos disponibles en el modelo matemático de cada componente como se describe en la Sección 3.2.2, la meta es resolver primero aquellos componentes que cuentan con mayor cantidad de datos conocidos o que se pueden calcular de forma directa, por lo tanto la secuencia no necesariamente refleja la adyacencia de los componentes dentro del ciclo. El tamaño (n) de la Secuencia está determinado por el número de componentes que la integran. En la Figura 13 se representa una secuencia con los 15 componentes del ciclo. Dependiendo de la disponibilidad de los datos u objetivos que se persiguen, se pueden obtener diferentes secuencias, pero la longitud se mantiene constante. De acuerdo a Hlaváček, (1977), es complicado manipular el modelo matemático de gran tamaño con métodos numéricos, una buena opción para abordar dichos modelos, es partir el conjunto de ecuaciones en conjuntos menores, con la representación en la Secuencia S_q es posible porque no se aborda el modelo matemático completo, si no de cada componente por separado.

1	2	3	...											15
EV	CO	PE	VER	GBG	GHX	SEP	MEV	MEL	RE	VES	GAX	BS	AHX	AB

Figura 13. Ejemplo de una Secuencia S_q del ciclo GBG-GAX, con longitud $n=15$.

Ahora es posible representar al ciclo como una gráfica descendente (§3.1.2) basada en una Secuencia $S_q = \{M_1, M_2, M_3, \dots, M_n\}$, cada componente M_i de la secuencia representa a un nivel de la gráfica (se hace referencia a ellos de manera indistinta), cada nodo SM_{ik} representa a una solución de $M_i = \{SM_{ij}, SM_{ik}, \dots\}$, y las aristas representan la “*posible compatibilidad*” entre las soluciones de los componentes adyacentes en S_q . De esta manera es posible representar el espacio de soluciones, las soluciones parciales y completas como se aprecia en la Figura 14.

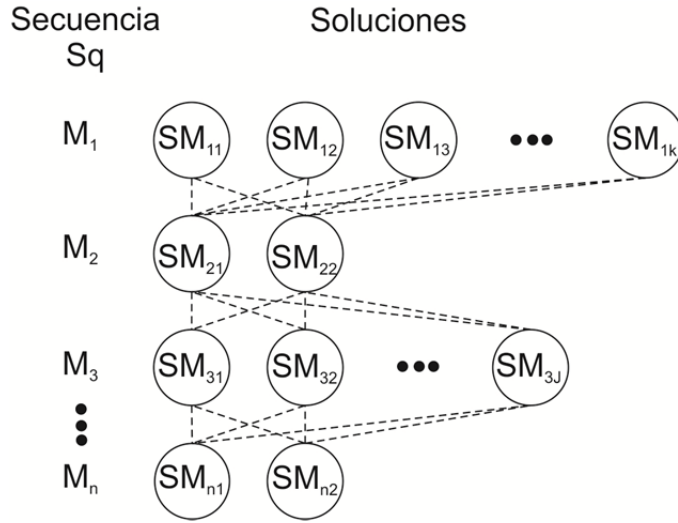


Figura 14. Representación de un ciclo de absorción como una gráfica descendente.

Enseguida se define el término compatibilidad.

Definición 1. Dados los módulos M_i y M_j , la SM_{ik} es *compatible* con la SM_{jl} si y solo si para cada corriente h compartida por ambos módulos, h tiene valores idénticos en las variables de las soluciones SM_{ik} y SM_{jl} .

Se explica ésta definición con los componentes del ciclo GBG-GAX. Considérese que se aplica la Estrategia de Solución (§3.2.3) para encontrar la solución SM_{ik} del componente GBG y de manera independiente también se aplica para encontrar la solución SM_{jl} del componente GHX. Ambos componentes comparten las corrientes 1, 2 y 3, entonces se debe verificar que los valores de las variables en las tres corrientes sean exactamente los mismos por parte de los dos

componentes, es decir, existe compatibilidad. El mismo principio se puede aplicar hasta el nodo n en afán de encontrar soluciones completas para el ciclo, sin embargo existe una opción mejor.

Encontrar la solución SM_{ik} del componente M_i , y verificar la compatibilidad con la solución SM_{jl} del componente M_j , ambas encontradas sin relación alguna, puede ser costoso computacionalmente porque se deben comparar múltiples valores de todas las variables compartidas entre ambos componentes, si no coinciden de manera exacta se puede definir un error como tolerancia, sin embargo se genera un error acumulativo a lo largo del proceso de resolución completa. La **Definición 2** evita lo anterior y reduce significativamente el espacio de soluciones porque ya no es necesario comparar una solución SM_{ik} con cada solución SM_{jl} .

Definición 2. Dados los módulos M_i y M_j , la *compatibilidad heredada* se genera cuando la SM_{jl} está en función de la SM_{ik} .

3.2.5 Algoritmo backtracking para encontrar soluciones de los ciclos

La representación del problema en gráficas descendentes (§3.1.2) permite implementar el algoritmo backtracking (§3.1.3) para efectuar una búsqueda sistemática de las soluciones. Esto se consigue construyendo soluciones parciales hasta encontrar la solución completa del ciclo bajo la siguiente idea básica. Se selecciona el nivel uno de la gráfica, y para cada una de sus soluciones se efectúa una búsqueda a través de la gráfica en forma descendente, nivel por nivel, aplicando la definición de compatibilidad heredada entre las soluciones. Enseguida se define una solución completa para el ciclo.

Definición 3. Dada la Secuencia $S_q = \{M_1, M_2, M_3, \dots, M_n\}$, una solución completa del ciclo se representa como un vector de enteros $SCC = \{SM_{1,j}, SM_{2,k}, \dots, SM_{n,l}\}$, tal que cada $SM_{i,k}$ representa la $k^{ésima}$ solución del componente i , y todos los pares de soluciones en el vector son mutuamente compatibles.

La restricción de *compatibilidad mutua* es necesaria para resolver el problema de ciclos dentro del ciclo mayor (circuito de enfriamiento), es decir cada $SM_{i,k}$ permanece incluida si y

solo si las variables comparten los mismos valores con las $n-1$ soluciones restantes que se encuentran en el vector SCC .

En el ejemplo de la Figura 15, el primer nivel (M_1) contiene cuatro SM, para buscar una SCC con el algoritmo backtracking, se selecciona la primera solución ($SM_{1,1}$), después se selecciona el segundo nivel y se resuelve ($SM_{2,2}$) en función de la $SM_{1,1}$, se realiza el mismo procedimiento sobre el tercer y cuarto nivel dando como resultado $SCC = \{1,2,2,1\}$.

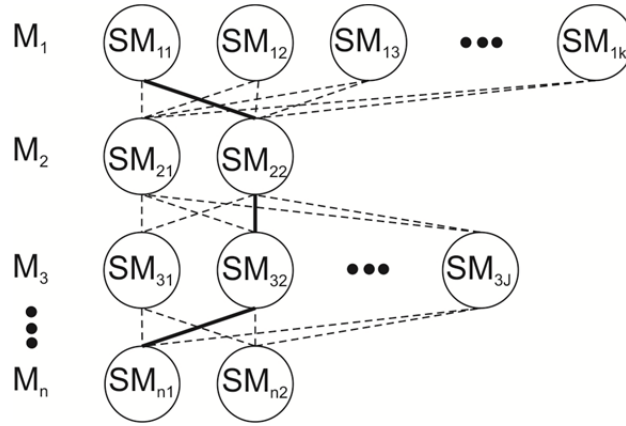


Figura 15. Ejemplo de una solución completa de un ciclo (SCC). Las líneas continuas muestran que la primera SM del componente uno, es compatible con la segunda SM del componente dos, tres, y con la primera SM del componente cuatro.

Para encontrar todas las SCC , se debe repetir los pasos descritos para cada SM_{ik} , entonces el problema de *enumerar todas las Soluciones Completas del Ciclo* se puede ver como un problema de búsqueda de rutas validas en un grafo descendente. Dicha búsqueda se efectúa con el algoritmo backtracking, enseguida se describe el pseudocódigo poniendo atención especial en dos procedimientos, *rechazar(P, c)* y *siguiente(P, s)*, que son las partes más complicadas del algoritmo. En el Apéndice se propone la versión recursiva.

Antes de llamar al procedimiento $bt(SCC)$, primero se extrae del nivel 1 todas las SM, después, para cada SM se llama $bt(SCC)$ dando como entrada la lista SCC con un elemento que corresponde a la SM del nivel 1. El procedimiento $bt(SCC)$ inicia generando una variable llamada Nx a la que se le asigna la longitud vigente de SCC , que corresponde al apuntador del último nivel en la lista.

Procedimiento $bt(SCC)$

$Nx \leftarrow longitud(SCC)$

Mientras $Nx \neq \wedge$ **hacer**

Si

$l \leftarrow rechazar(s_q, SCC, cmpt)$ //Busca soluciones compatibles entre niveles.

SI $l = \wedge$ **Entonces** $Nx \leftarrow Nx - 1$ // regresa a un nivel anterior

Entonces

$regresar(SCC, l)$ //Inserta la solución recién encontrada, en SCC.

$primero(Sq)$ //Avanza al nivel siguiente.

Si

$aceptar(Sq, SCC)$ //Verifica si SCC ya es una solución completa.

Entonces

$siguiente(SCC, Sq)$ // Recorre el ultimo nivel en busca de SCCs.

$Nx \leftarrow Nx - 1$

Fin Mientras

Fin procedimiento

Enseguida se llama al procedimiento $rechazar(s_q, SCC, cmpt)$ que tiene la función de apuntar al siguiente nivel del grafo (apuntador llamado Ny) y resolver dicho nivel en función de la solución del nivel Nx , de esta manera se transfiere la compatibilidad ($cmpt$) entre ambos niveles. El pseudocódigo es el siguiente:

Procedimiento $rechazar(s_q, SCC, cmpt)$

$Ny = s_q(Nx + 1)$ //Apuntador a un siguiente nivel.

Si existe Ny **entonces** //Verifica que no exceda la longitud de la Secuencia Sq .

Para D_{Ny} **hacer** //Recorre todo el dominio del nivel que se está explorando.

Si $ES(Ny, cmpt)$ **entonces** //Implementa la Estrategia de Solución.

$D_{Ny} \leftarrow D_j + \Delta$ //Guarda el dominio válido para la sig. iteración.

$return\ l(SM_{Ny, D_j}), D_{Ny}$ //Regresa la solución compatible y dominio.

Si no //Dejar reiniciado el dominio para buscar nueva compatibilidad

$D_{Ny} \leftarrow reiniciar(D)$ //con una nueva solución en el nivel anterior.

$return\ \Lambda$

Fin Para

Si no

$return\ \Lambda$

Fin Procedimiento

La Figura 16 con dos niveles, ayuda a explicar cómo trabaja el algoritmo. El nivel 1 contiene dos SM , mientras que el nivel 2 contiene tres SM . Cuando se llama al procedimiento $bt(SCC)$ con $SCC = (SM_{1,1})$, se marca a $Nx=1$ y se entra al ciclo *Mientras* para llamar al procedimiento $rechazar(s_q, SCC, cmpt)$ que primero genera un apuntador al siguiente nodo de la secuencia Sq con $Ny = Nx + 1 = 2$, después, la cláusula *SI*, verifica si existe el nivel 2, en caso de que no exista se regresa Λ , lo cual significa que no hay un nodo más haya de Nx . El ciclo *Para* recorre el dominio de Ny (D_{Ny}), si la estrategia de solución ES (§3.2.3) encuentra una solución tomando en cuenta la solución recibida del nodo Nx , se reasigna $D_{Ny} \leftarrow D_j + \Delta$ indicando que la próxima solución se empezara a buscar a partir de un delta después de la solución que se acaba de encontrar, se regresa el apuntador $l = (1)$ y la nueva D_{Ny} , en caso de

haber recorrido todo el dominio D_{Ny} y no encontrar alguna solución compatible entre Nx y Ny se reinicia el dominio $D_{Ny} \leftarrow reiniciar(D)$ para que la próxima compatibilidad entre una nueva solución de Nx se empiece a buscar desde el principio del dominio de Ny , también se regresa Λ .

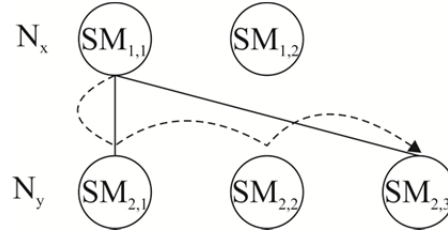


Figura 16. Ejemplo de soluciones compatibles.

El procedimiento $regresar(SCC, l)$ es un procedimiento sencillo que regresa la misma lista SCC con el último nodo compatible encontrado con $rechazar(Sq, SCC, cmpt)$.

Procedimiento $regresar(SCC, l)$

$regresar\ SCC([1], [2], [3], \dots, [k + 1[l]])$ //Actualiza la solución parcial

Fin procedimiento

El procedimiento $aceptar(P, Sq, SCC)$ es otro procedimiento sencillo que pregunta si la $longitud(SCC)$ es igual al número total de elementos en la secuencia Sq . Si es el caso, entonces se regresa SCC como salida, indicando que se ha encontrado una SCC .

Procedimiento $aceptar(Sq, SCC)$

$k \leftarrow longitud(SCC)$

Si $k = Sq(n)$ entonces

$regresar\ SCC$

Fin Si

El procedimiento *salida(SCC)* imprime la ruta completa indicando que es una solución del ciclo.

Procedimiento *salida(SCC)*

imprimir(SCC)

regresar Λ

Fin Si

La función *primero(Sq)* regresa el apuntador Nx después de haberlo colocado en el siguiente nivel.

Función *primero(Sq)*

$k \leftarrow Nx$

regresar $Nx \leftarrow Sq(k + 1)$

Fin Función

Finalmente, se llama al procedimiento *siguiente(SCC, Sq)* para recorrer todos los nodos del último nivel. El procedimiento imprime cada ruta completa que se va encontrando y las declara como soluciones del ciclo.

Procedimiento *siguiente(SCC, Sq)*

$k \leftarrow Sq(n)$

Hacer D_{Ny} **para**

salida(P, SCC)

SI *ES(Ny, cmpt)* //Busca todas las soluciones en el último nivel **Entonces**

$SCC \leftarrow (k[SM_{Ny, D_j}])$

Fin Si

Fin Hacer

$D_{Ny} \leftarrow reiniciar(D)$

return Λ

Fin Procedimiento

Siguiendo el ejemplo de la Figura 16, el procedimiento $rechazar(s_q, SCC, cmpt)$ regresa $l = (1)$ y $D_{Ny} = 2$. Cuando se llama al procedimiento $siguiente(SCC, Sq)$, k apunta al último valor en la lista de entrada SCC , después entra al ciclo *Hacer*, y por medio de la estrategia ES pregunta en la cláusula *SI* la existencia de más soluciones, imprimiendo todas las soluciones completas que encuentra, cuando recorre todo el dominio, se sale del ciclo y reinicia el dominio dejándolo preparado para una nueva búsqueda. En el ejemplo, cuando se llama a $siguiente(SCC, Sq)$ por primera vez, $s = [1] = 1$, cuyo valor se actualiza a través del procedimiento $primero(Sq)$. Después, el ciclo *Hacer* reemplaza el ultimo valor en la última posición conforme va encontrando las soluciones completas, en total se tiene $SCC = \{1, 1\}$ y $SCC = \{1, 3\}$.

3.3 Síntesis de la metodología

La Figura 17 ilustra la metodología para resolver el modelo matemático que representa a los ciclos avanzados de enfriamiento por absorción.

La metodología inicia ordenando el modelo matemático del ciclo (§3.2.2), después obtiene la Secuencia S_q de componentes, enseguida el algoritmo backtracking inicializa el contador (i) con el valor 1 y selecciona el componente M_i de S_q , aplica la Estrategia de Solución ES (§3.2.3) asumiendo que el ordenamiento del modelo matemático, el cálculo de las variables en forma directa y la identificación de las variables iterativas se hace solamente una vez, en lugar de que finalice la Estrategia de Solución, el algoritmo (§3.2.5) guarda la solución del componente en el vector SCC de longitud máxima n , en donde cada posición en el vector corresponde a la solución de cada componente (M_i), posteriormente verifica si el componente actual (M_i) es el último ($i=n$?) en la Secuencia, si es así, imprime la solución completa del ciclo (SCC), si no se ha recorrido el dominio de todas las variables iterativas del componente n , se sigue aplicando la estrategia ES, en caso de que $i \neq n$, se verifica que no se haya agotado el dominio del componente actual y se incrementa el contador i para aplicar la estrategia ES al siguiente componente de la Secuencia S_q , de lo contrario se reinicia el dominio de las variables iterativas ($RD(M_i)$) y se decrementa el contador i para seguir aplicando la estrategia ES al componente anterior en S_q , para el caso en que se haya recorrido todo el dominio en el componente n (después de imprimir una solución), se verifica si también se ha recorrido todo el dominio del primer

componente ($D(M_i)$), si es así, el algoritmo termina porque ya se ha recorrido todo el espacio de soluciones, de lo contrario se reinicia el dominio de las variables iterativas del componente actual ($RD(M_i)$) y se decrementa el contador i , posteriormente se verifica si se ha recorrido todo el dominio ($D(M_i)$) del componente i , si es así, se sigue aplicando la estrategia ES al componente en curso, de lo contrario, se reinicia su dominio y se decrementa el contador i para regresar al componente anterior dentro de la Secuencia S_q .

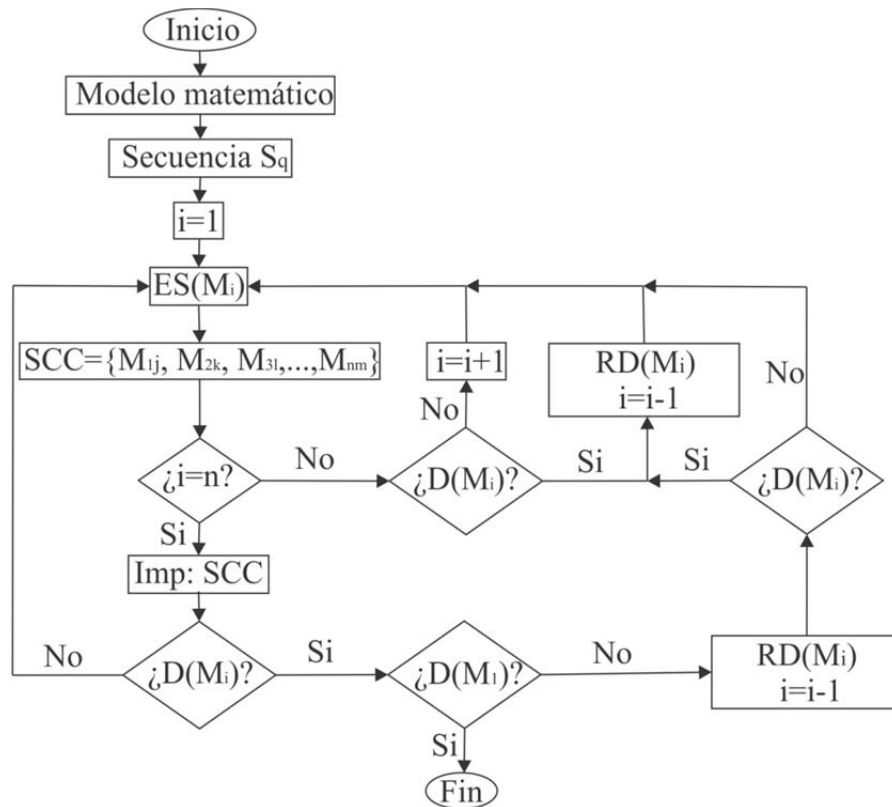


Figura 17. Diagrama de la metodología para encontrar soluciones en el modelo matemático que representa a los ciclos de absorción.

Capítulo 4

Simulación y resultados

El presente capítulo se enfoca en mostrar que la metodología desarrollada resuelve adecuadamente el modelo matemático que representa el comportamiento operativo de los sistemas de enfriamiento por absorción. La metodología se aplica a un ciclo básico y aun ciclo avanzado tipo GAX, con el primero se valida la metodología, y con los resultados de la simulación del segundo se efectúa un análisis paramétrico y estudio termodinámico.

4.1 Configuración de la simulación

En la literatura no se han encontrado resultados experimentales para la configuración del ciclo GAX que se presenta en la Figura 4, por lo tanto se decide aplicar la metodología al ciclo básico descrito en el estudio experimental de Le Lostec *et al.*, (2012) que se describe en la Sección 2.3.1, la finalidad es validar la metodología desarrollada.

Por otra parte, se aplica la metodología al ciclo avanzado tipo GAX por ser representativo de los ciclos de absorción con mayor complejidad, ya que son una variante del mismo o cuentan con algunas corrientes adicionales y se considera que no representan mayor problema para resolver su modelo matemático correspondiente. De igual forma, se asume que los ciclos de menor complejidad no representan problema para resolverse porque se pueden abordar con los métodos tradicionales como lo realiza Pelayo, (2007). El ciclo GAX (§2.3.2) trabaja con el fluido amoníaco-agua, es activado con biogás, tiene una capacidad de enfriamiento de 10.5 kW (3 Ton), 97% de líquido a la entrada del evaporador, la concentración del refrigerante en la solución débil a la salida del generador es de 4% y la concentración del refrigerante en el vapor que entra al condensador es de 99.3%.

4.1.1 Ciclo de simple efecto

La finalidad de simular al ciclo básico, es validar la metodología desarrollada. Como parte del proceso de validación, se efectúa una comparación entre los resultados del ciclo modelado con la metodología y los resultados experimentales, lo deseable es que ambos resultados concuerden de manera exacta. La exactitud denota la proximidad entre el valor encontrado a través de la simulación y el valor verdadero, depende de los errores sistemáticos que intervienen en el proceso de simulación. También interviene la precisión que se refiere a la dispersión del conjunto de valores obtenidos de mediciones repetidas de una magnitud, cuanto menor es la dispersión mayor la precisión. Los estudios de validación son importantes porque se demuestra que existe concordancia entre los valores comparados, y por lo tanto, se acepta que la metodología desarrollada se utilice por distintos grupos de ingenieros e investigadores en sus propios ciclos.

Para tal efecto, se comparan los resultados de las pruebas que se presentan en el trabajo de Le Lostec *et al.*, (2012) con los resultados que se obtienen de aplicar la metodología al mismo ciclo, de las 18 pruebas que presentan se toman los resultados de la #1, #4, #7 y #13. La secuencia Sq que resulta de aplicar la metodología al ciclo es: EV, CO, VER, GEN, RE, AB, VES, PE, BS, y las variables iterativas son: T11, T12, T15 y T7 con incrementos en el dominio (Δ_i) de 0.1 °C y la tolerancia de error en los balances (ϵ) es de 0.001, la capacidad de enfriamiento del ciclo es de 10 kW con un COP de 0.6 en condiciones de operación estándar (especificaciones de manufactura), el vapor que sale de la columna de purificación está en estado saturado y la concentración del amoníaco varía entre 0.993 y 0.997.

4.1.2 Ciclo GAX

La Tabla 3 describe los parámetros que surgen después de aplicar la metodología al ciclo GAX. La Secuencia Sq considera $n=15$ componentes, resultan tres variables iterativas (V_i) y como se desea estudiar el calor suministrado al ciclo, entonces se genera una V_i más (Q_{GBG}), la finalidad es encontrar la solución que requiere menos energía suministrada. Para evitar una variable iterativa adicional se hace un balance de masa tomando en cuenta los componentes RE, MEL, MEV y SEP. Cada variable iterativa tiene definido el límite inferior y superior, así como el

incremento (Δ_i), para cada uno de ellos se considera diferentes tolerancias de error (ϵ) en los balances. En total son $2 \times 2 = 4$ casos de parámetros que se estudian.

Tabla 3. Parámetros de la metodología aplicada al ciclo GAX.

$L_{inf} \leq V_i \leq L_{Sup}$	Δ_i	ϵ
$T15_{CO} \leq T2_{GBG} \leq T1_{GBG} (^{\circ}C)$	0.1	0.001 y 0.0001
	0.15	0.001 y 0.0001
$T15_{CO} \leq T12_{GHX} \leq T3_{GBG} (^{\circ}C)$	0.1	0.001 y 0.0001
	0.15	0.001 y 0.0001
$T22_{PE} \leq T25_{AHX} \leq T31_{VES} (^{\circ}C)$	0.1	0.001 y 0.0001
	0.15	0.001 y 0.0001
$0.1 \leq Q_{GBG} \leq 26 \text{ (kW)}$	0.1	
Sq n=15	EV-CO-PE-VER-GBG-RE-MEL-MEV-SEP-GHX-VES-GAX-BS-AHX-AB	

En la Tabla 4 se muestra la información para efectuar el estudio paramétrico, se cambia una condición de operación en forma gradual mientras el resto de los parámetros se mantienen fijos. El rango de la temperatura ambiente (aire) que se estudia es de 20 a 50 °C con incrementos de 5 °C, resultan 7 casos, y para cada uno de ellos se cambia la temperatura del agua fría que sale del evaporador en el rango de -2 a 10 °C con incrementos de 3 °C, en total resultan 35 casos de estudio, en todos ellos se mantiene fija la capacidad de enfriamiento del sistema de 3 Ton, se contempla a las temperaturas ambiente de 45 y 50 °C para abordar la problemática del acondicionamiento de espacios en el sector residencial localizados en regiones con climas cálidos (§1.1). En total son $7 \times 5 = 35$ casos, la meta es mostrar que la metodología es capaz de encontrar soluciones del ciclo avanzado bajo diferentes condiciones de operación. La simulación consta de $35 \times 4 = 140$ casos. En el Apéndice se explica la secuencia de pasos para efectuar la simulación sobre el simulador SIMSABA.

Tabla 4. Condiciones de operación para simular el ciclo GAX.

T. Amb. (°C)		T. agua fría (°C)			
20	-2	1	4	7	10
25	-2	1	4	7	10
30	-2	1	4	7	10
35	-2	1	4	7	10
40	-2	1	4	7	10
45	-2	1	4	7	10
50	-2	1	4	7	10

4.2 Análisis e interpretación de los resultados

Como se menciona en la Sección 1.1.1, el modelo matemático que representa a los ciclos de absorción está compuesto por ecuaciones no lineales, es decir, es posible que tengan múltiples soluciones reales bajo las mismas condiciones de operación. Por esta razón, la metodología está desarrollada (Capítulo 3) con capacidad para encontrar todas las soluciones posibles, sin embargo, es importante notar que el incremento de las variables iterativas (Δ) y la tolerancia de error (ϵ) permitida en los balances, dan lugar a que se generen resultados en los que se encuentran “*aproximaciones a las soluciones*” y las “*soluciones*” mismas.

En la Figura 18 se muestra el número de resultados (posibles soluciones y aproximaciones) de los experimentos generados con cuatro combinación de parámetros (Δ y ϵ), la finalidad es mostrar que se genera diferente número de resultados. Se observa que al fijar el parámetro $\epsilon = 0.001$ e incrementar Δ de 0.1 a 0.15 y al fijar $\epsilon = 0.0001$ e incrementar Δ de 0.1 a 0.15 el número de resultado disminuye en 2.6% y 5.6%, correspondientemente, de manera similar, existe una diferencia notable de 74.6% con las combinaciones de parámetros que arrojan mayor y menor número de resultados. El número de resultados y la tendencia esta ejemplificada con los resultados de simular al ciclo GAX en condiciones de operación de temperatura ambiente de 40 °C y la temperatura salida de agua fría en el evaporador de 7 °C, sin embargo, el comportamiento se mantiene para el resto de los casos que se ilustran en la Tabla 4.

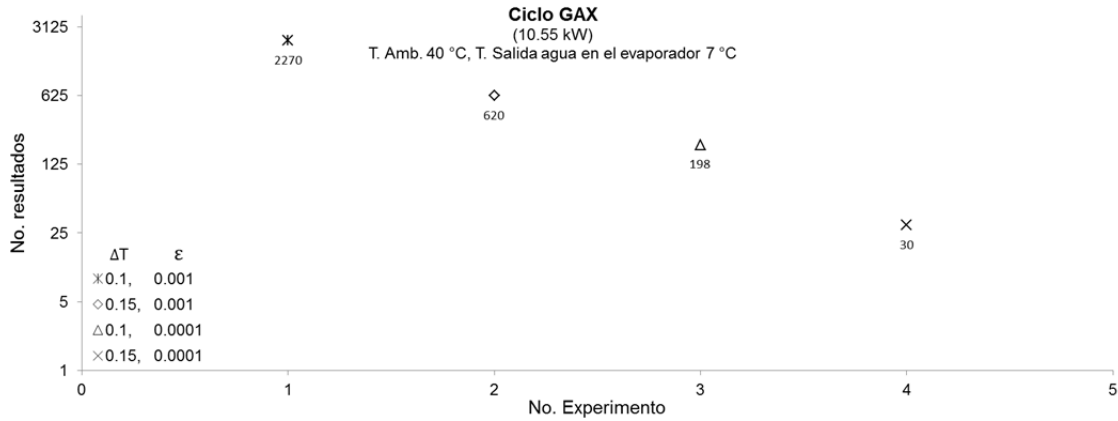
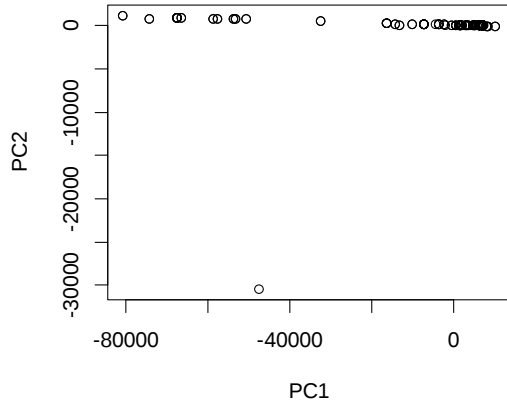


Figura 18. Múltiples resultados generados por los parámetros de la metodología.

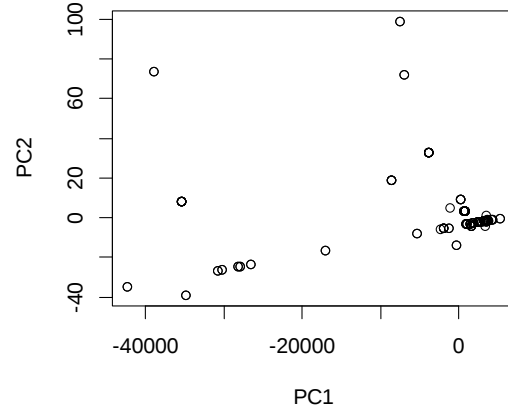
Hasta el punto descrito, está claro que el número de resultados tiende a disminuir conforme se incrementa la rigurosidad con el parámetro ϵ y se incrementa Δ para recorrer el dominio de las variables iterativas, y surge la incógnita si “*los resultados encontrados con cada par de parámetros son diferentes*”, o expresado de otra manera, se debe identificar si los resultados contienen “*múltiples soluciones o es una solución con múltiples aproximaciones*”.

Se sabe que una solución de cualquier ciclo, en este caso del GAX, está compuesta por un valor asignado a todas las variables de cada corriente y que a su vez, éstas pertenecen a un componente diferente, por lo tanto, no es recomendable verificar valor por valor de cada variable (800 aproximadamente) para decidir si los 30, 198, 620 y 2270 resultados son soluciones diferentes o es una solución con múltiples aproximaciones. Por lo tanto, se recurre a pruebas estadísticas que ayuden a decidir si los resultados son diferentes. La Figura 19 ilustra el análisis por componentes principales (PCA por sus siglas en inglés, Apéndice H) en función de las combinaciones de los parámetros con diferentes valores, dicha técnica considera a cada resultado como un vector y aplica operaciones matemáticas para representar un número de dimensiones grande a dos dimensiones, una característica principal de PCA es que agrupa (cúmulos) a los vectores de soluciones con base a su similitud, no importando la forma de dichas agrupaciones. Precisamente, en cada inciso a), b), c) y d) correspondiente a la Figura 19 se observan agrupaciones principales que surgen con cada combinación de parámetros, es decir, los vectores se encuentran cercanos porque comparten alto grado de similitud, en otras palabras, los resultados con cada par de parámetros son semejantes. Los ejes para PC1 y PC2 no reflejan la escala de

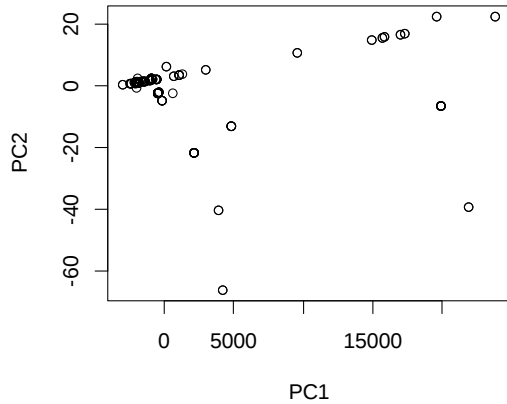
diferencia, más bien tiene que ver con las cargas (transformaciones) propias del PCA, por lo tanto, los puntos alejados de los cúmulos no son significativamente diferentes a los que se encuentran dentro de los cúmulos.



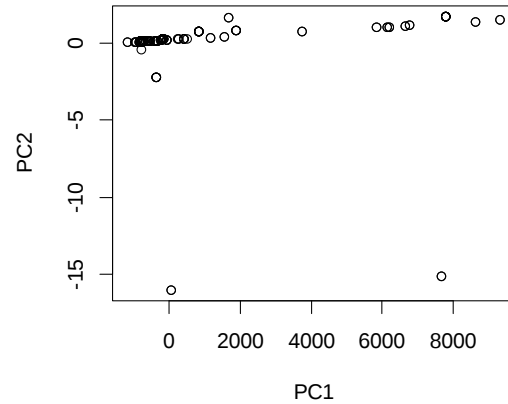
a) $\varepsilon = 0.001, \Delta = 0.1$



b) $\varepsilon = 0.001, \Delta = 0.15$



c) $\varepsilon = 0.0001, \Delta = 0.1$



d) $\varepsilon = 0.0001, \Delta = 0.15$

Figura 19. Análisis por componentes de los resultados. La simulación está realizada con las condiciones de operación: temperatura ambiente 40 °C y temperatura de salida agua en el evaporador 7 °C.

Como el PCA no refleja cuantitativamente la diferencia entre los resultados, entonces se hace un estudio estadístico basado en la media aritmética (promedio) y desviación estándar. La técnica se ha aplicado a todas las variables, una por una y considerando todos los resultados que

se obtienen de la simulación con las mismas condiciones de operación arriba descritas, pero debido a la gran cantidad de variables se he decidido presentar el resultado de las variables iterativas porque son las que causan la verdadera variación en los resultados, el resto de ellas se calculan en forma directa o dependen de dichas variables iterativas. La Tabla 5 muestra el promedio de cada variable iterativa por cada combinación de parámetros, se observa que la diferencia entre las cuatro combinaciones de parámetros está en el orden de las centésimas para el calor y de las decimas para la temperatura. Por un lado, el análisis indica que los múltiples resultados son variaciones (aproximaciones) cercanas a una solución numérica, y por otro lado, un cambio en tales ordenes no se consideran significativos en el campo aplicado y se refleja en la baja variación entre los cuatro promedios del COP de enfriamiento.

Tabla 5. Promedio de las variables iterativas con diferentes parámetros.

ε	Δ_i	$\overline{Q_{GBG}}$	$\overline{T2_{GBG}}$	$\overline{T12_{GHX}}$	$\overline{T25_{AHX}}$	$\overline{COP_{Enf}}$
0.001	0.1	12.0894714	137.857995	116.632957	80.6536709	0.87278188
0.001	0.15	12.0951613	137.825831	116.643468	80.6369768	0.87237254
0.0001	0.1	12.0642857	137.973121	116.608457	80.6662257	0.87461184
0.0001	0.15	11.9	138.8722	116.9725	80.597057	0.8865954

En la Tabla 6 se presenta la desviación estándar (DS) correspondiente a cada promedio, se observa que la dispersión de los datos no es grande para las variables iterativas ni para el COP, lo cual coincide con la baja dispersión de las agrupaciones que se muestran en el PCA.

Con base al análisis estadístico efectuado con PCA y a la baja variación en el promedio y en la desviación, se concluye que todas las combinaciones de parámetros encuentran los mismos resultados y se trata de múltiples aproximaciones que representan a una solución única. Tal conclusión permite entender la razón por la que en los trabajos de literatura se reportan soluciones únicas para las mismas condiciones de operación. La conclusión se adopta para efectuar el estudio y análisis subsiguiente.

Tabla 6. Dispersión de las variables iterativas con diferentes parámetros.

ϵ	Δ_i	Q_{DS}	$T2_{DS}$	$T12_{DS}$	$T25_{DS}$	SD_{COP}
0.001	0.1	0.11697051	0.62509812	0.35109726	0.42129736	0.008439
0.001	0.15	0.11781262	0.62681598	0.30579726	0.41479936	0.00850569
0.0001	0.1	0.12309777	0.65656248	0.34941642	0.40310739	0.00879907
0.0001	0.15	3.5527E-15	8.5265E-14	0.12247449	0.43084585	5.5511E-16

4.2.1 Ciclo de simple efecto

La Tabla 7 muestra los resultados para cada prueba que se obtienen de aplicar la metodología (M) desarrollada al ciclo de simple efecto y se comparan con los resultados experimentales (EE) del trabajo de Le Lostec *et al.*,(2012), la aproximación entre ambos resultados está dada por el error relativo y se presenta en forma de porcentaje (ω), se toma como caso base el estudio experimental, y de los resultados de simular al ciclo con la metodología se toma la solución más próxima a los resultados experimentales.

El calor que presenta mayor error se encuentra en el condensador con 3.1, 2.8, 3.8 y 3.6% correspondientemente con cada prueba (#1, #4, #7 y #13), tal diferencia se debe a que el calor en dicho componente se calcula a través del balance de energía, en cambio, el calor en el resto de los componentes se asignan directamente como se encuentran reportados en el estudio experimental, por eso es que la diferencia es 0%, entonces, se deduce que el error en el calor del condensador se debe a los errores acumulados o por redondeo de programación que se van generando durante los cálculos de cada variable que interviene en el balance. De forma similar, se suministran los valores T2 y T28, por ello el error es 0%, sin embargo, los errores en las temperaturas T23 y T29 se debe al cálculo efectuado por los métodos utilizados y a que la concentración de etilenglicol es una buena aproximación pero no es exactamente como en el estudio experimental, aun así, la diferencia es de 0.6% en el peor de los casos. Las temperaturas T20 y T21 tienen 0% de error porque se suministra la temperatura del agua que entra al evaporador (T20) y la salida se calcula de forma exacta por medio de un delta de diferencia. Las variables T7 y T15 se iteran en el absorbedor, entonces, las aproximaciones dan lugar al error (§4.2) de 1.6 y 3.6% en el peor de los casos, correspondientemente, la misma explicación se brinda para las variables T11 y T12 en el

generador. Las presiones alta y baja del sistema se proporcionan por defecto desde, por eso no existe error. Las variables T1 y T3 se calculan en forma directa, entonces, la diferencia porcentual se debe a los errores acumulados al momento de calcularlas. Las variables T4, T8, T9, T13 y T14 se calculan en función de otras variables previamente calculadas, por lo tanto, es normal que su error se deba al error de cálculo y acumulado. El COP es la razón del calor en el evaporador con el calor del generador, como lo muestra la Ecuación (4), el mayor error se presenta en la prueba #13 con 2.1% equivalente a 0.01 kW. El mayor error con valor de 3.8% lo presentan las variables del calor en el condensador y la variable T13 en las pruebas #7 y #13, correspondientemente.

Tabla 7. Validación de las soluciones arrojadas por la metodología para el ciclo de simple efecto.

Componente	Prueba	1			4			7			13		
	Método	EE	M	ω (%)	EE	M	ω (%)	EE	M	ω (%)	EE	M	ω (%)
Circuito de enfriamiento	T22, T28 (°C)	22	22	0.0	22	22	0.0	22	22	0.0	22	22	0.0
	T23, T29 (°C)	31	30.8	0.6	29	28.7	1	33	32.8	0.6	32	32.2	0.6
Condensador	P(kW)	9.6	9.9	3.1	6.9	7.1	2.8	7.7	8.0	3.8	11	10.6	3.6
Absorbedor	P(kW)	15.9	15.9	0.0	12.6	12.6	0.0	11.9	11.9	0.0	15.9	15.9	0.0
Generador	P(kW)	17.1	17.1	0.0	13	13	0.0	13.4	13.4	0.0	19.4	19.4	0.0
Evaporador	T20 (°C)	19	19	0.0	19	19	0.0	19	19	0.0	20	20	0.0
	T21 (°C)	15	15	0.0	16	16	0.0	14	14	0.0	16	16	0.0
	P(kW)	10.5	10.5	0.0	8.1	8.1	0.0	7.5	7.5	0.0	9.4	9.4	0.0
Ciclo de absorción	T1	64	63.6	0.6	58	58.4	0.6	61	60.7	0.5	59	58.9	0.1
	T3	30	29.9	0.3	26	26.2	0.7	32	31.7	0.9	32	31.8	0.6
	T4	8	8.2	2.5	8	8.3	3.8	11	10.7	2.8	13	13.3	2.3
	T5	11	10.8	1.8	12	12.3	2.5	14	13.9	0.7	14	14.1	0.7
	T7	25	24.9	0.4	25	25.3	1.2	25	24.6	1.6	23	23	0.0
	T8	25	24.9	0.4	25	25.5	2.0	25	24.6	1.6	24	23.6	1.6
	T9	62	63.2	1.9	56	57.2	2.1	58	57.7	0.5	51	52.3	2.5
	T11	69	68.7	0.4	62	62.2	0.3	65	64.9	0.1	66	65.8	0.3
	T12	79	79.3	0.4	68	67.7	0.4	71	69.9	1.5	76	73.2	3.7
	T13	70	72.4	3.4	62	63.5	2.4	65	66.7	2.6	66	68.5	3.8
	T14	30	30.4	1.3	30	29.6	1.3	29	29.4	1.3	37	37.4	1.1
	T15	30	30.9	3.0	30	29.4	2.0	30	31.1	3.6	34	34.4	1.8
	HP (bar)	13	13	0.0	12.5	12.5	0.0	14	14	0.0	14	14	0.0
	BP (bar)	5.3	5.3	0.0	4.4	4.4	0.0	6.3	6.3	0.0	6.6	6.6	0.0
	COP	0.6	0.6	0.0	0.6	0.6	0.0	0.54	0.54	0.0	0.47	0.48	2.1

En general, los errores descritos se deben principalmente a un error acumulado por cálculos de cómputo, tolerancia de error en las ecuaciones e incremento, lo cual se puede corregir

aumentando el nivel de rigurosidad de los parámetros en la metodología. Por lo tanto, se considera que dichos errores son relativamente débiles y permiten que la metodología desarrollada se acepte por diferentes grupos de ingenieros e investigadores como una herramienta para resolver el modelo matemático de los ciclos de absorción que desarrollen, evalúen o analicen.

4.2.2 Ciclo GAX

En la presente sección se describen los resultados de la simulación del ciclo GAX, y con ellos se muestra la capacidad de la metodología para encontrar soluciones en los ciclos avanzados, también se descarta al conjunto de parámetros que generan mayor cantidad de aproximaciones y se recomienda a la dupla con la que se encuentran las soluciones en todos los casos. Por facilidad de análisis, presentación y mayor comprensión, todos los resultados de la simulación se muestran en función de la Temperatura Lift (diferencia de temperatura del condensador con el evaporador).

En la Figura 20 se presenta el número de resultados de la simulación con las cuatro combinaciones de valores que toman los parámetros Δ y ε , en función de la misma Temperatura Lift. Se observa que la metodología desarrollada no encuentra soluciones bajo las temperaturas de 49 y 54 °C con la dupla $\varepsilon = 0.0001$ y $\Delta = 0.1$, de manera similar no se encuentran soluciones con los valores de $\varepsilon = 0.0001$ y $\Delta = 0.15$ en las Temperaturas Lift 35, 38, 52 y 54 °C, respectivamente, con estos resultados se confirma la discusión que se hace en la Sección 4.2, es decir, a mayor incremento en las variables iterativas y mayor rigurosidad en la tolerancia de error, se generan menos aproximaciones, al grado de no encontrar soluciones en algunos casos. Ahora, la metodología siempre encuentra soluciones para el ciclo GAX en los casos que $\varepsilon = 0.001$ y en combinación con $\Delta = 0.1$ y 0.15 , sin embargo, existe una diferencia en el número de aproximaciones con cada una de ellas, por ejemplo, en la Temperatura Lift de 23 °C, la combinación $\varepsilon = 0.001$ con $\Delta = 0.1$ presenta mayor cantidad de aproximaciones, equivalente al 215% de la combinación $\varepsilon = 0.001$ y $\Delta = 0.15$, un incremento similar de 242% se presenta en la temperatura Lift de 56 °C bajo la misma combinación de parámetros.

La forma en que se presentan los resultados en la misma figura permite mostrar que el número de aproximaciones decrece conforme se incrementa la Temperatura Lift, previamente no se tenía conocimiento de dichas tendencias, también se observa que cada tendencia generada por un par de parámetros se mantiene constante por encima o debajo de las otras tendencias, según sea el caso. Este comportamiento permite generalizar la discusión realizada en la Sección 4.2 para los parámetros Δ y ε (a mayor incremento en las variables iterativas y mayor rigurosidad en la tolerancia de error, se generan menos aproximaciones). Por otra parte, se muestran resultados para 30 Temperaturas Lift y no se muestran para mayores a 56 °C, es decir, la metodología no encuentra solución con alguno de los cuatro pares de valores de parámetros propuestos para las cinco condiciones de operación que se muestran en la Tabla 8, la razón no se debe a que la metodología no encuentre las soluciones, si no a que las temperaturas ambiente de 45 °C con la temperatura de la salida de agua fría en el evaporador menores a 4 °C ya no permiten que se genere el efecto GAX en el ciclo, la explicación es la siguiente, la temperatura ambiente influye en la presión alta del sistema y la temperatura de salida de agua fría en el evaporador influye en la presión de baja, además el modelo matemático y las restricciones están planteadas considerando que en todo momento se debe llevar a cabo el efecto GAX con las corrientes internas saturadas en las columnas del absorbedor y del generador, entonces, al incrementar la temperatura ambiente de 45 a 50 °C y disminuir la temperatura de la salida de agua de 4 a -2 °C se generan presiones de tal forma que afecta a la temperatura de saturación evitando que se lleve a cabo el efecto GAX, sin embargo, no se descarta la posibilidad de que exista soluciones para otras condiciones y otro modelo matemático planteado.

Con los argumentos descritos, se concluye que la metodología tiene capacidad para encontrar soluciones (converger) en el ciclo GAX avanzado bajo múltiples condiciones de operación y debido a que es representativo de los ciclos de su tipo en cuanto a complejidad, se puede aplicar la metodología para resolverlos.

Los parámetros que se recomiendan para encontrar dichas soluciones son $\varepsilon = 0.001$ y $\Delta = 0.15$ porque no arrojan demasiadas aproximaciones, además son representativas de las que se pueden obtener con otras combinaciones de parámetros, sin embargo, se debe tener cuidado

porque dichos parámetros se pueden ver afectados por el ambiente de programación, errores acumulados en los cálculos o el cálculo de propiedades termodinámicas.

Debido a que no existen diferentes soluciones, se continúa haciendo el estudio y análisis únicamente con los resultados de los parámetros que se recomiendan, es decir, se eliminan los resultados con los parámetros que no encuentran soluciones en todas las condiciones de operación y los que muestran exceso de aproximaciones. A continuación se hace un estudio del tiempo de procesamiento y de las variables iterativas con los parámetros recomendados.

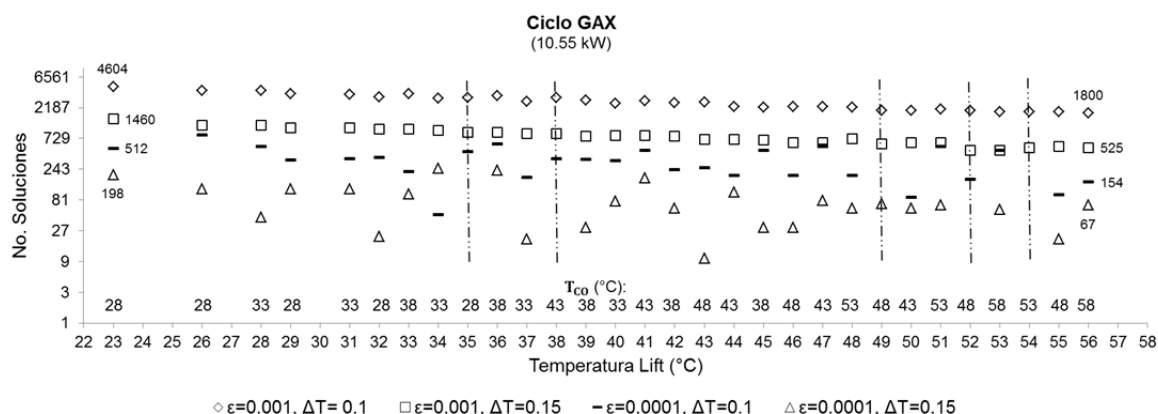


Figura 20. Convergencia de la metodología desarrollada bajo diferentes condiciones de operación.

Tabla 8. Casos en los que no encuentra solución la metodología,

Temperatura del ambiente	Temperatura de la salida de agua fría en el evaporador	Temperatura Lift
45	1	57
45	-2	60
50	4	59
50	1	62
50	-2	65

La metodología desarrollada incluye al algoritmo backtracking, el cual se caracteriza por realizar una búsqueda exhaustiva en el espacio de soluciones, efectuar dicha tarea implica tiempo de ejecución considerable. La simulación está realizada en una estación de trabajo (Workstation) Dell Presicion T7500, CPU Intel Xeon 2.40 GHz. En la Figura 21 se presenta el tiempo de

procesamiento total que tarda el algoritmo en recorrer todo el espacio de soluciones, dicho tiempo comienza a contar desde el instante en que se ejecuta la metodología hasta que se termina de recorrer el dominio de todas las variables iterativas (hasta que termina), también se presenta el tiempo de procesamiento promedio que tarda en encontrar todas las aproximaciones que incluyen a la solución, ambos en función de la Temperatura Lift. Se observa que el algoritmo recorre todo el espacio de soluciones en el rango de tiempo que está entre 5 y 7 horas, el tiempo que se obtiene podría ser mayor, pero su rango se debe en buena medida a la Definición 2 de compatibilidad que se define para la metodología, pero comparado con los tiempos que se obtienen cuando se aplica el enfoque orientado a ecuaciones (prácticamente es resolución instantánea) puede parecer extremoso, sin embargo se considera adecuado en los casos que no se tiene algún indicio acerca de las soluciones en diseños nuevos de ciclos complejos, la diferencia es que la metodología desarrollada tiene la capacidad para efectuar una búsqueda exhaustiva de todas las soluciones posibles bajo algunas condiciones de operación dadas y no se tiene el problema de proponer valores iniciales a las variables desconocidas. De igual forma, se observa que el tiempo de procesamiento promedio (media aritmética) en que se encuentran todas las aproximaciones junto con la solución misma está en el rango de 2 a 4 horas y prácticamente es la mitad del tiempo total de procesamiento, lo cual indica que el tiempo de simulación se puede reducir una vez que se conocen los rangos de las variables iterativas y del calor (Véase la Tabla 3), rangos en los que se encuentra las soluciones para el ciclo GAX, la desviación estándar del tiempo de procesamiento (dispersión de las aproximaciones con respecto al promedio) no se percibe porque está en el rango de 0.00278 a 0.02928, la cual es demasiado chica comparada con las 2 ó 4 horas, sin embargo, permite corroborar que las aproximaciones se encuentran cercanas a la solución porque no hay una diferencia significativa en el tiempo que se requiere para encontrarlas a todas y la desviación se debe en mayor medida a los procesos de guardar los resultados durante la simulación. En ambos tiempos de procesamiento se observa que la tendencia es constante, lo cual significa que el tiempo de procesamiento total o promedio no depende de las condiciones de operación que se definan para el ciclo, por lo tanto dependen del número y rango que tomen las variables iterativas.

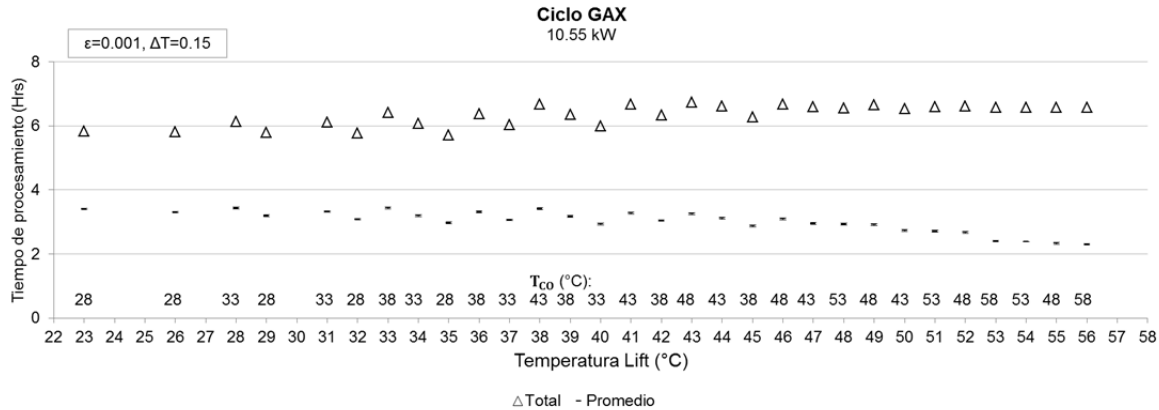


Figura 21. Tiempo de simulación del ciclo GAX con la metodología desarrollada.

Es importante realizar un estudio sobre las variables iterativas porque al conocer el rango en que se encuentran sus valores permite reducir el tiempo de procesamiento. La Figura 22 muestra la temperatura de cada variable iterativa con respecto a la Temperatura Lift, se observa que la temperatura en el componente GBG siempre es mayor que la del AHX, a la vez que ambas son mayores que la del AHX, dichas relaciones ayudan a confirmar que las soluciones obtenidas con la metodología desarrollada son congruentes, ya que dentro de la columna del generador siempre está más caliente la parte en donde se suministra energía (parte inferior) que la parte en donde se efectúa el intercambio de calor (sección media), de manera similar, la columna del absorbedor debe estar a menor temperatura que la del generador para que se efectué la absorción del refrigerante.

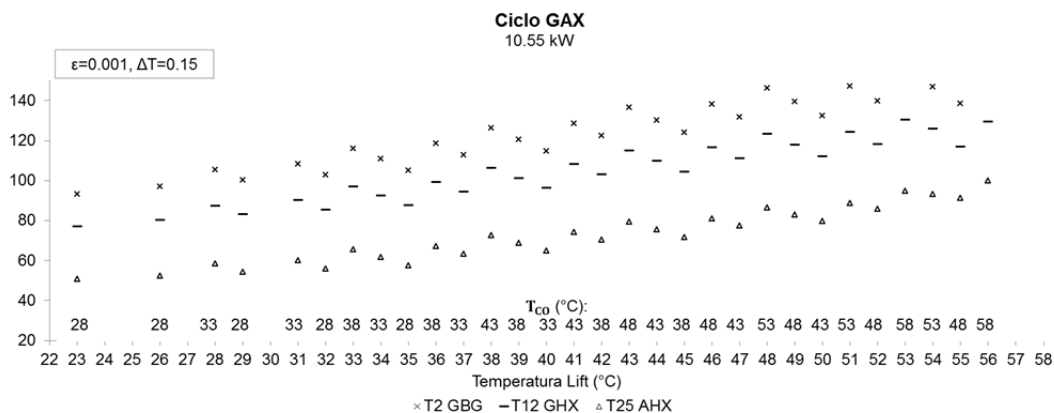


Figura 22. Dispersión de las variables iterativas con respecto a la temperatura Lift.

Al conocer los valores en que oscilan las temperaturas las variables en estudio, permite que se restrinjan los rangos en simulaciones futuras, ya que la desviación estándar para el componente GBG está en el rango de 0.49 a 0.88, la del GHX es de 0.25 y 0.44 y para el AHX es de 0.40 y 0.47, desviaciones que son de bajo impacto en las aplicaciones ya que los cambios se consideran a partir de 1 °C, por lo tanto, al acotar las variables iterativas en el rango que dicta la desviación tiene como beneficio la reducción del tiempo de procesamiento,

La razón de definir al calor en el generador como una variable iterativa, es encontrar a la solución que requiere menor cantidad de energía para suministrar al sistema y que genere el COP mayor, sin embargo, en las discusiones arriba descritas se determina que existe una solución única, por lo tanto es la que requiere menor calor, sin embargo, resta analizar su impacto en el tiempo de procesamiento. La Figura 23 muestra al calor que se suministra al generador en función de la Temperatura Lift, la cual permite conocer su valor exacto bajo las condiciones de operación que generan dichas Temperaturas Lift, de tal manera que en simulaciones futuras no sea necesario definir un valor alejado del rango de 8 a 15 kW o en el mejor de los casos dejarla como una variable conocida, de esta forma se reduce el tiempo de procesamiento. La desviación estándar se encuentra en el rango de 0.108 a 0.149 (no perceptible, prácticamente), entonces, además de corroborar que las múltiples aproximaciones representan a una solución, indica que seleccionar algún valor en el rango descrito no provoca un cambio significativo en la aplicación. También se observa que el calor tiende a ser mayor conforme se incrementa la Temperatura Lift, esto se debe a que la temperatura ambiente tiende a ser mayor y en consecuencia, la carga de calor que se debe retirar también es mayor, por lo tanto se necesita mayor energía para lograr la capacidad de enfriamiento.

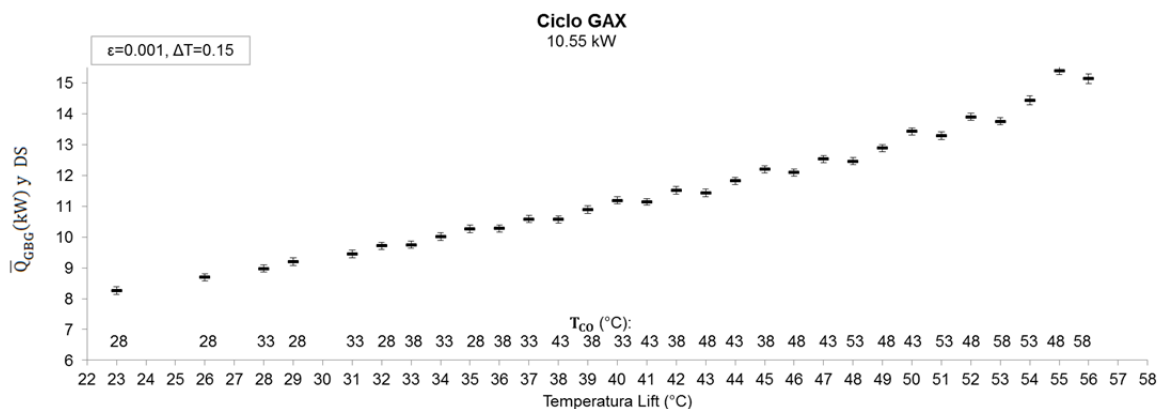


Figura 23. Calor transferido en el generador

En la Figura 24 se representa el promedio del coeficiente de operación para enfriamiento (COP) y la desviación estándar (DS) de todas las aproximaciones, con respecto a la Temperatura Lift. Se observa que el COP tiende a disminuir conforme incrementa la Temperatura Lift, lo cual es congruente con la tendencia del calor ya que son inversamente proporcionales, es decir, para lograr la capacidad de enfriamiento, se suministra mayor calor al sistema y el coeficiente de operación disminuye, lo anterior es una correspondencia bien conocida y que se puede verificar en Herold *et al.*, (1991), estos resultados ayudan a corroborar que las soluciones arrojadas por la metodología son congruentes. La desviación estándar se encuentra en un rango de 0.0052 a 0.019, por lo tanto, cualquier valor en dicho rango no causa impacto en las aplicaciones.

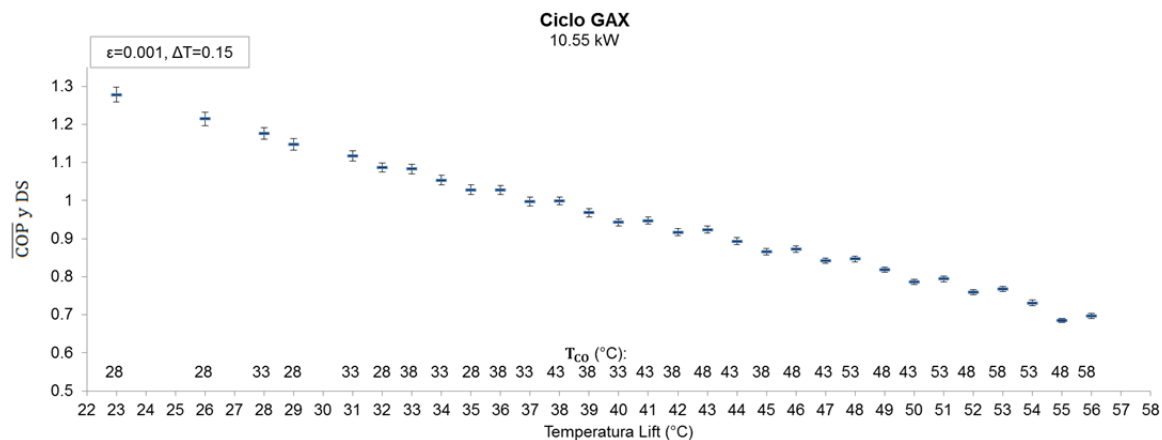


Figura 24. Dispersión de la eficiencia con respecto a la temperatura Lift.

A continuación se presenta el estudio termodinámico del ciclo GAX para las condiciones estándar en el evaporador (7 y 12 °C a la salida - entrada del agua, correspondientemente) y que se representan con las Temperaturas Lift de 26, 31, 36, 41, 46, 51 y 56 °C. En la Figura 25 se observa la variación del calor transferido en los componentes principales del ciclo. Al pasar de la Temperatura Lift de 26 a la de 56 °C, el calor del generador y del absorbedor se incrementa en 72.4% y 69.5%, respectivamente, tal comportamiento se debe a que al suministrar mayor energía en el generador también se debe retirar mayor energía en el absorbedor para que se logre la miscibilidad del fluido de trabajo compuesta por amoníaco y agua. Con el fin de abordar la problemática que se describe en la Sección 1.1, es importante estudiar el comportamiento de ambos calores en el rango de temperatura ambiente de 40 a 50 °C, que les corresponden las

temperaturas Lift de 46 y 56°C, en dichos casos, el calor del generador y del absorbedor se incrementa en 25% y 29.2%, el calor retirado en el sistema por las unidades CO, RE y AB es de 19.3 kW (temperatura Lift de 26 °C), 22.4 kW (temperatura Lift de 46 °C) y 25 kW (temperatura Lift de 56 °C), el cual se puede aprovechar para procesos (por ejemplo, sacado de frutos) que se establecen cerca de los espacios residenciales.

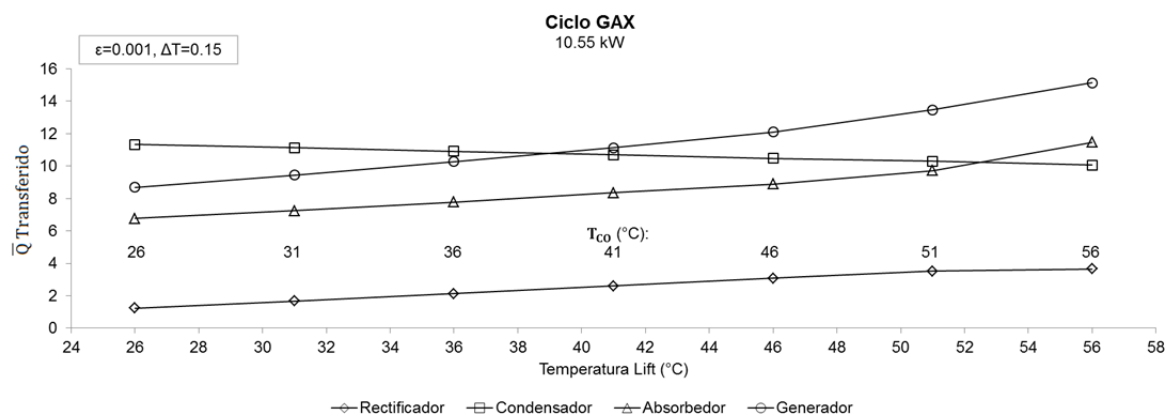


Figura 25. Calor transferido en las unidades principales del ciclo GAX.

De manera similar al calor, en la Figura 26 se muestra el COP de enfriamiento y calentamiento en función de la Temperatura Lift, en la Tabla 9 se presentan el resto de los resultados de la simulación. Ambos COP disminuyen conforme incrementa la Temperatura Lift, se observa una disminución de 72.8% en modo de operación de enfriamiento y 32.1% en modo de calentamiento. Tomando el rango de temperaturas ambiente de 40 a 50°C (Temperaturas Lift de 46 y 56°C) como parte de la problemática que se aborda, se observa una disminución de 24.3% en modo de operación de enfriamiento y 10.7% en modo de calentamiento. Esto se debe a que el incremento de la temperatura del aire de enfriamiento (ambiente) y respetando un gradiente de temperatura con respecto al refrigerante en el condensador, se provoca un incremento en la presión del sistema en la zona de alta, esto dificulta la liberación del refrigerante en el generador, requiriendo mayor suministro de energía, e impactando directamente en la eficiencia del sistema.

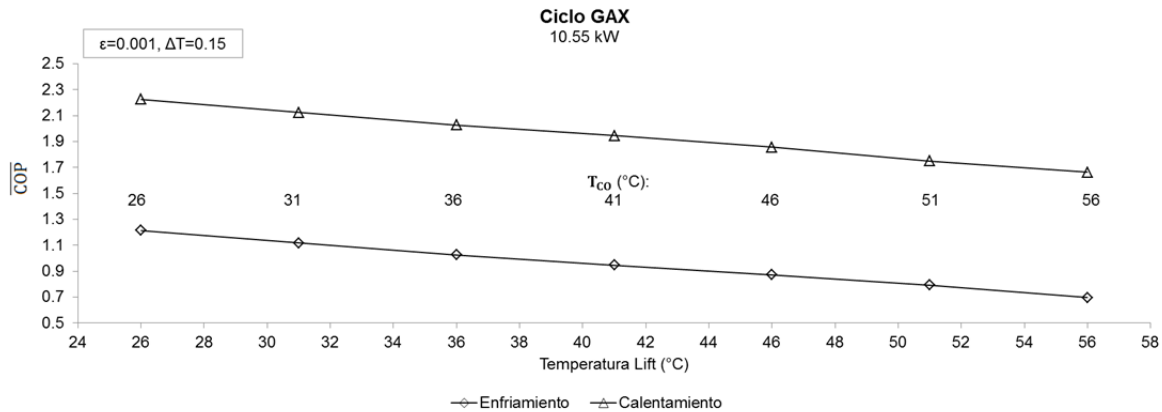


Figura 26. Eficiencia del ciclo GAX con respecto a la temperatura Lift.

De acuerdo al análisis termodinámico del ciclo GAX se determina que la temperatura ambiente influye de manera importante en el comportamiento operativo del sistema en modo de enfriamiento, debido a que la eficiencia disminuye en 42.1% al pasar de 20 a 50 $^{\circ}C$. En el caso de las temperaturas Lift de 46 y 56 $^{\circ}C$, la eficiencia disminuye en 19.5% en modo de enfriamiento y 9.8% en modo de calentamiento. El sistema de enfriamiento GAX operado a 50 $^{\circ}C$ (regiones con climas cálidos extremos), es una buena opción a pesar de que muestra disminución en su eficiencia comparada con el caso de temperatura Lift de 46 $^{\circ}C$, ya que para la unidad de 10.5 kW (3 Ton) de enfriamiento se logra una integración energética de 17 kw, lo cual representa 13.3% más de la energía que se suministra en el generador, además de que se tiene un COP (0.7) mayor que en cualquier otro sistema convencional con coeficiente de operación de 0.6. Los resultados del estudio termodinámico que contempla a las Temperaturas Lift de 46 a 56 $^{\circ}C$ se reportan en el trabajo de Castro-García *et al.*, (2014).

Tabla 9. Resultados de la simulación para el ciclo avanzado GAX bajo diferentes condiciones de operación.

T. Lift	26	31	36	41	46	51	56	T. Lift	26	31	36	41	46	51	56
	CONDENSADOR								EVAPORADOR						
T15 (°C)	56.1	59.5	62.8	66.1	69.4	72.7	75.9	T18 (°C)	2	2	2	2	2	2	2
T16 (°C)	28	33	38	43	48	53	58	T21 (°C)	6	6	6	6	6	6	6
T36 (°C)	20	25	30	35	40	45	50	T34 (°C)	12	12	12	12	12	12	12
T37 (°C)	27.5	32.3	37	42	46.9	51.8	56.6	T35 (°C)	7	7	7	7	7	7	7
QCO (kW)	11.3	11.1	10.9	10.7	10.5	10.3	10.1	QEV	10.6	10.6	10.6	10.6	10.6	10.6	10.6
m16 (Kg/Min)	0.54	0.54	0.54	0.54	0.54	0.55	0.55		RESTO DEL CICLO GAX						
	ABSORBEDOR							T6, T31 (°C)	86.4	96.3	105.4	114.2	122.6	130.3	135.4
T22 (°C)	22	27	32	37	42	47	52	T7 a T13 (°C)	80.4	90.3	99.4	108.2	116.6	124.3	129.4
T23 (°C)	28	33	38	43	48	53	58	T17 (°C)	10.2	11.5	12.8	13.8	17.3	21.7	26.2
T25, T26 (°C)	52.1	59.7	66.9	73.8	81.4	88.4	99.6	T24 (°C)	28	33	38	43	48	53	58
T32 (°C)	20	25	30	35	40	45	50	T28 (°C)	58.2	69.3	80.5	91.8	103.2	114.7	126.3
T33 (°C)	26	31	36	41	46	51	56	T29, T30 (°C)	64.2	75.3	86.5	97.8	109.2	120.7	132.3
m23 (Kg/Min)	0.99	1.07	1.15	1.24	1.34	1.44	1.56	QPE (kW)	0.8	0.9	1.1	1.3	1.4	1.4	1.5
QAB (kW)	6.8	7.3	7.8	8.4	8.9	9.7	11.5	QRE (kW)	1.2	1.7	2.1	2.6	3.1	3.5	3.7
	GBG							QGAX (kW)	7.2	6.9	6.4	5.8	4.9	3.8	1.3
T1 (°C)	171.7	178.5	185.2	191.9	198.7	205.4	212.1	QAHX (kW)	2.2	2.9	3.6	4.5	5.6	6.8	8.2
T2, T3 (°C)	96.9	107.9	118.2	128.2	137.8	146.9	153.5	QGHX (kW)	2.7	3.1	3.5	3.9	4.5	5.2	6.1
T40 (°C)	211.7	218.5	225.2	231.9	238.7	245.4	252.1	PAI (bar)	11.2	12.9	14.9	17.1	19.5	22.2	25.2
T41 (°C)	177.7	181.5	185.1	188.5	191.5	193.5	192.9	PBI (bar)	4.7	4.7	4.7	4.7	4.7	4.7	4.7
m1 (Kg/Min)	0.45	0.53	0.61	0.70	0.79	0.90	1.01	COPEnf	1.21	1.12	1.03	0.95	0.87	0.79	0.70
QGBG (kW)	8.7	9.5	10.3	11.1	12.1	13.3	15.1	COPCal	2.22	2.12	2.02	1.95	1.86	1.77	1.68

Capítulo 5

Conclusiones y trabajo futuro

5.1 Conclusiones

En el presente trabajo se plantea un modelo matemático que representa apropiadamente el comportamiento operativo de los sistemas avanzados de enfriamiento por absorción, así como el desarrollo de una metodología para resolverlo y que posee capacidad para encontrar las mejores condiciones de operación, para lograr dicho objetivo, en la Sección 1.1.1 se estudia y analiza el problema que involucra el modelo matemático que representa a los sistemas avanzados de enfriamiento por absorción y se observa que dicho problema consiste en resolver el modelo matemático compuesto por ecuaciones algebraicas, diferenciales parciales o diferenciales ordinarias que tienen la característica de ser no lineales y se expresa formalmente en la Sección 1.1.2.

Se decide abordar el problema como parte de la familia de problemas de satisfacción de restricciones (Sección 3.1) debido a que ya existe un conjunto de estrategias como lo son las gráficas descendentes para la representación (Sección 3.1.2) y el algoritmo de búsqueda en retroceso “backtracking” para la búsqueda de soluciones (Sección 3.1.3), ambos ya bien definidos en la literatura y que contribuyen a resolver el problema planteado en el presente trabajo.

Con lo anterior, se desarrolla una metodología (Sección 3.2) para resolver el modelo matemático que representa el comportamiento operativo de los sistemas avanzados de enfriamiento por absorción y que involucra ecuaciones algebraicas, diferenciales parciales o diferenciales ordinarias con la característica de ser no lineales.

Se plantea el modelo matemático que representa apropiadamente el modelo matemático de un ciclo de simple efecto y de igual forma para uno de tipo GAX avanzado (Sección 3.2.2), a los cuales se aplica la metodología para resolverlo. En los resultados de la simulación bajo diferentes condiciones de operación (Sección 4.1.1 y 4.1.2, respectivamente) se obtienen aproximaciones múltiples, las cuales representan a una solución única (Sección 4.2). En la

validación con el primer ciclo se obtienen errores de 0.6% en el peor de los casos, y se considera que dichos errores son relativamente débiles, permitiendo que se acepte a la metodología desarrollada como apropiada para resolver el modelo matemático de los ciclos de absorción desarrollados por diferentes grupos de ingenieros e investigadores (Sección 4.1.1). Con el segundo ciclo se hace un estudio de los parámetros propios de la metodología, y se recomienda utilizar el valor de 0.001 para el error permitido en los balances de masa y 0.15 para el incremento en las variables iterativas de temperatura, sin embargo, se debe tener cuidado porque dichos parámetros se pueden ver afectados por el ambiente de programación, errores acumulados en los cálculos o correlaciones en el cálculo de propiedades termodinámicas (Sección 4.2.2). También, se observa que el tiempo de procesamiento promedio en que se encuentran todas las aproximaciones junto con la solución misma está en el rango de 2 a 4 horas y prácticamente es la mitad del tiempo total de procesamiento, sin embargo, dichos tiempos se pueden reducir al restringir los valores de las variables iterativas a los rangos en que oscilan.

En el estudio termodinámico del ciclo GAX en condiciones estándar se observa que al pasar de la Temperatura Lift de 26 a la de 56 °C, el calor del generador y del absorbedor se incrementa en 72.4% y 69.5%, respectivamente, y para el COP se observa una disminución de 72.8% en modo de operación de enfriamiento y 32.1% en modo de calentamiento.

Con base en lo anterior queda cubierto el objetivo principal (Sección 1.3.1) del presente trabajo y se concluye que la metodología desarrollada resuelve satisfactoriamente el modelo matemático que representa a los ciclos de enfriamiento por absorción y resulta viable para aplicarla en la evaluación, diseño, optimización de ciclos avanzados lo cual hace posible el estudio de su comportamiento bajo múltiples condiciones de operación. Con respecto al análisis termodinámico del sistema GAX es una buena opción para acondicionamiento térmico de espacios localizados en regiones con climas cálidos extremos a pesar de que muestra disminución en su eficiencia, ya que comparado con sistemas convencionales sigue teniendo alta eficiencia (COP de 0.7).

5.2 Aportaciones

Este trabajo establece una forma nueva de resolver el modelo matemático de los ciclos avanzados de enfriamiento por absorción, dando lugar a un enfoque en el que se explora el espacio de soluciones a través de una estrategia de búsqueda voraz (búsqueda exhaustiva por el algoritmo backtracking), restringiendo la resolución de las variables al imponer un nivel de aproximación (establecimiento de un incremento (Δ) para la exploración del dominio de las variables), el algoritmo logra obtener solución altamente aproximadas en el plano matemático-teórico, y totalmente aceptables en el plano práctico.

Análisis termodinámico del ciclo GAX para acondicionamiento térmico de espacios localizados en regiones con climas cálidos extremos como la ciudad de Mexicali, B. C., México, reportado en el trabajo Castro-García *et al.*, (2014).

5.3 Trabajo futuro

Aplicar la metodología desarrollada a ciclos de absorción avanzados que utilicen diferentes fluidos de trabajo para extender su aplicación.

Implementar algún método o algoritmo que sea capaz de dirigirse más rápido hacia la solución, con el fin de evitar las variables iterativas o disminuir el tiempo de procesamiento.

Integrar el procedimiento que se desarrolle en una aplicación de software gráfica para ser utilizado por la comunidad de especialistas en diseño de ciclos avanzados de enfriamiento por absorción, con motivos de estudios tanto teóricos como prácticos, de tal forma que facilite la simulación y que agilice su disponibilidad comercial.

Bibliografía

- Ahamed**, J. U., R. Saidur, and H. H. Masjuki. 2011. "A Review on Exergy Analysis of Vapor Compression Refrigeration System." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15 (3): 1593–1600.
- Allgower**, Eugene L., and Kurt Georg. 1990. "Computational Solution of Nonlinear Systems of Equations". *American Mathematical Soc.*
- Altenkirch**, E. 1913. "Reversible Absorptionsmaschinen." In , Heft 1: pp.1–9, Heft 6: pp.114–119, Heft 8: pp.150–161. Jahrgang.
- Bitner**, James R., and Edward M. Reingold. 1975. "Backtrack Programming Techniques." *Commun. ACM* 18 (11): 651–56.
- Brousse**, E., B. Claudel, and J. P. Martine. 1983. "Solar Operated Water-Ammonia Absorption Heat Pump for Air-Conditioning: Modelling and Simulation." *Applied Energy* 14 (2): 131–42.
- Cano**, Marcos J. M. 2001. "Refrigeración Por Absorción. Interés Energético E Impacto Ambiental."
- Carmody**, S.A., and S.V. Shelton. 1993. "Analysis of Generator-Absorber Heat Recovery for an Ammonia-Water Absorption Cycle." *Thermodynamics and the Design, Analysis, and Improvement of Energy Systems* , AES-Vol. 30 / HTD-Vol. 266, ASME.
- Castro-García**, Y., N. Velázquez-Limón, R. Villa-Angulo, and D. Saucedo-Carbajal. 2014. "Análisis Termodinámico de Un Sistema de Absorción Tipo GAX Enfriado Por Aire, Para Acondicionamiento Térmico de Espacios En Climas Cálidos Extremos." *Inf. Tec.* 25 (3).
- Chen**, Hern-Shann, and M. A. Stadtherr. 1985. "A Simultaneous-Modular Approach to Process Flowsheeting and Optimization. Part I: Theory and Implementation." *AIChE Journal* 31 (11): 1843–56.

- Colonna**, Piero, and Sandro Gabrielli. 2003. "Industrial Trigeneration Using Ammonia–water Absorption Refrigeration Systems (AAR)." *Applied Thermal Engineering* 23 (4): 381–96.
- Cormen**, Thomas, Charles Leiserson, Ronald Rivest, and Clifford Stein. 2003. *Introduction to Algorithms*. 2nd ed. McGraw-Hill Science/Engineering/Math.
- Crowe**, C. M, and M. Nishio. 1975. "Convergence Promotion in the Simulation of Chemical Processes—the General Dominant Eigenvalue Method." *AIChE Journal* 21 (3): 528–33. doi:10.1002/aic.690210314.
- Dao**, Kim. 1990. "Advanced Regenerative Absorption Refrigeration Cycles". Piedmont, CA.
- Darwish**, N. A., S. H. Al-Hashimi, and A. S. Al-Mansoori. 2008. "Performance Analysis and Evaluation of a Commercial Absorption–refrigeration Water–ammonia (ARWA) System." *International Journal of Refrigeration* 31 (7): 1214–23.
- Engler**, M, G Grossman, and H.-M Hellmann. 1997. "Comparative Simulation and Investigation of Ammonia-Water: Absorption Cycles for Heat Pump Applications." *International Journal of Refrigeration* 20 (7): 504–16.
- Erickson**, D. C., and G. Anand. 1996. "VX GAX Cycle Development." In Montreal.
- Faires**, V. M., and C. M. Simmang. 1990. *Termodinamica*. 6ta ed. México, D. F.: UTEHA.
- Fayad**, Sahar, Rafic Younes, and Said Abboudi. 2011. "Numerical Simulation of Solar Absorption Machine." *Energy Procedia* 6: 130–35.
- Fernández-Seara**, José, and Manuel Vázquez. 2001. "Study and Control of the Optimal Generation Temperature in NH₃–H₂O Absorption Refrigeration Systems." *Applied Thermal Engineering* 21 (3): 343–57.
- Garimella**, S., D. Lancy, and R. E. Stout. 1994. "Heat Transfer to Falling Liquid Films and Film Breakdown Subcooled Liquid Films." *J. Heat Mass Transfer* 21: 97–108.

- Gómez, V. H., A. Vidal, R. Best, O. García-Valladares, and N. Velázquez.** 2008. “Theoretical and Experimental Evaluation of an Indirect-Fired GAX Cycle Cooling System.” *Applied Thermal Engineering* 28 (8–9): 975–87.
- Gordon, J. M., and Kim Choon.** 1995. “A General Thermodynamic Model for Absorption Chillers: Theory and Experiment.” *Heat Recovery Systems and CHP* 15 (1): 73–83.
- Goríbar, Eduardo Hernández.** 2002. *Fundamentos de aire acondicionado y refrigeración*. Editorial Limusa.
- Grossman, G., K. Gommed, and D. Gadoth.** 1991. “Computer Model for Simulation of Absorption Systems in Flexible and Modular Form”. Oak Ridge, TN,.
- Grossman, G., and M. Wilk.** 1994. “Advanced Modular Simulation of Absorption Systems.” *International Journal of Refrigeration* 17 (4): 231–44.
- Grossman, Gershon, and Abdi Zaltash.** 2001. “ABSIM — Modular Simulation of Advanced Absorption Systems.” *International Journal of Refrigeration* 24 (6): 531–43.
- Hern-Shann, C., and M. A.. Stadther.** 1985. “A Simultaneous-modular Approach to Process Flowsheeting and Optimization. Part II: Performance on Simulation Problems.” *AIChE Journal* 31 (11): 1857 – 1867.
- Herold, K.E., X He, D.C. Erickson, and M.V. Rane.** 1991. “The Branched GAX Absorption Heat Pump Cycle”,” In , 127–32. Tokyo, Japan: Society of Refrigeration.
- Hlaváček, V.** 1977. “Analysis of a Complex Plant-Steady State and Transient Behavior.” *Computers & Chemical Engineering* 1 (1): 75–100.
- Hong, D.L., G.M. Chen, L.M. Tang, and Y.J. He.** 2011. “Simulation Research on an EAX (Evaporator-Absorber-Exchange) Absorption Refrigeration Cycle.” *Energy* 36 (1): 94–98.
- Hong, Daliang, Limin Tang, Yijian He, and Guangming Chen.** 2010. “A Novel Absorption Refrigeration Cycle.” *Applied Thermal Engineering* 30 (14–15): 2045–50.

- Horuz, I,** and T.M.S Callander. 2004. “Experimental Investigation of a Vapor Absorption Refrigeration System.” *Int. Journal of Refrigeration* 27 (1): 10–16.
- Ishii, Yoshikazu,** and Fred D. Otto. 2008. “Novel and Fundamental Strategies for Equation-Oriented Process Flowsheeting: Part I: A Basic Algorithm for Inter-Linked, Multicolumn Separation Processes.” *Computers & Chemical Engineering* 32 (8): 1842–60.
- Jawahar, C. P.,** and R. Saravanan. 2010. “Generator Absorber Heat Exchange Based Absorption cycle—A Review.” *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 14 (8): 2372–82.
- Joudi, Khalid A,** and Ali H Lafta. 2001. “Simulation of a Simple Absorption Refrigeration System.” *Energy Conversion and Management* 42 (13): 1575–1605.
- Kang, Y. T,** Y Kunugi, and T Kashiwagi. 2000. “Review of Advanced Absorption Cycles: Performance Improvement and Temperature Lift Enhancement.” *International Journal of Refrigeration* 23 (5): 388–401.
- Kang, Y. T.,** A. Akisawa, and T. Kashiwagi. 1999. “An Advanced GAX Cycle for Waste Heat Recovery: WGAX Cycle.” *Applied Thermal Engineering* 19 (9): 933–47.
- Kang, Yong Tae,** Hiki Hong, and Kyoung Suk Park. 2004. “Performance Analysis of Advanced Hybrid GAX Cycles: HGAX.” *International Journal of Refrigeration* 27 (4): 442–48.
- Karamangil, M. I.,** S. Coskun, O. Kaynakli, and N. Yamankaradeniz. 2010. “A Simulation Study of Performance Evaluation of Single-Stage Absorption Refrigeration System Using Conventional Working Fluids and Alternatives.” *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 14 (7): 1969–78.
- Kaushik, S.C.,** and S. Chandra. 1985. “Computer Modeling and Parametric Study of a Double Effect Generation Absorption Refrigeration Cycle.” *Energy Conversion and Management* 25 (1): 9–14.
- Le Lostec, Brice,** Nicolas Galanis, and Jocelyn Millette. 2012. “Experimental Study of an Ammonia-Water Absorption Chiller.” *International Journal of Refrigeration*, no. 0.

- Lin**, T. D., and R. S. H. Mah. 1978. "A Sparse Computation System for Process Design and Simulation: Part I. Data Structures and Processing Techniques." *AIChE Journal* 24 (5): 830–39.
- Liu**, Meng, and Na Zhang. 2007. "Proposal and Analysis of a Novel Ammonia–water Cycle for Power and Refrigeration Cogeneration." *Energy* 32 (6): 961–70.
- Lucia**, Angelo, and Sandro Macchietto. 1983. "New Approach to Approximation of Quantities Involving Physical Properties Derivatives in Equation-Oriented Process Design." *AIChE Journal* 29 (5): 705–
- Macriss**, R. A., and T. S. (Institute of Gas Technology Zawacki. 1989. *Absorption Fluids Data Survey: 1989 Update*.
- Maghanaki**, M. Mohammadi, B. Ghobadian, G. Najafi, and R. Janzadeh Galogah. 2013. "Potential of Biogas Production in Iran." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 28 (December): 702–14.
- Meinel**, Aden B., and Marjorie Pettit Meinel. 1982. *Aplicaciones de la Energía Solar*. Reverte.
- Morán**, Michael J., and Howard N. Shapiro. 2004. *Fundamentos de termodinámica técnica*. Reverte.
- Park**, Chan Woo, Junemo Koo, and Yong Tae Kang. 2008. "Performance Analysis of Ammonia Absorption GAX Cycle for Combined Cooling and Hot Water Supply Modes." *International Journal of Refrigeration* 31 (4): 727–33.
- Pátek**, J, and J Klomfar. 1995. "Simple Functions for Fast Calculations of Selected Thermodynamic Properties of the Ammonia-Water System." *International Journal of Refrigeration* 18 (4): 228–34.
- Pelayo**, Ricardo. 2007. "Desarrollo de Una Metodología Híbrida Para La Solución Numérica de Los Sistemas de Enfriamiento TermoSolar Por Absorción". Mexicali, B.C.: Universidad Autónoma de Baja California.

- Pérez**, Emilio Menéndez. 2001. *Energías Renovables, Sustentabilidad Y Creación de Empleo: Una Economía Impulsada Por El Sol*. Los Libros de la Catarata.
- Perez-Blanco**, H. 1984. "Absorption Heat Pump Performance for Different Types of Solutions." *International Journal of Refrigeration* 7 (2): 115–22.
- Phillips**, B. A. 1990. *Development of a High-Efficiency, Gas-Fired, Absorption Heat Pump for Residential and Small-Commercial Applications Phase 1 Final Report: Analysis of Advanced Cycles and Selection of the Preferred Cycle*. Oak Ridge, TN: Oak Ridge National Laboratory.
- Pho**, T. K., and L. Lapidus. 1973. "Topics in Computer-Aided Design: Part I. An Optimum Tearing Algorithm for Recycle Systems." *AIChE Journal* 19 (6):
- Pierucci**, S. J., E. M. Ranzi, and G. E. Biardi. 1982. "Solution of Recycle Problems in a Sequential Modular Approach." *AIChE Journal* 28 (5): 820–27.
- Rameshkumar**, A., M. Udayakumar, and R. Saravanan. 2009. "Heat Transfer Studies on a GAXAC (generator-Absorber-Exchange Absorption Compression) Cooler." *Applied Energy* 86 (10): 2056–64.
- Rane**, M. V., and D. C. Erickson. 1994. "Advanced Absorption Cycle: Vapor Exchange GAX." In New Orleans.
- Refprop**. 2002. *Reference Fluid Thermodynamic and Transport Properties*. NIST Standard Reference Database (version 7.0).
- Roldán**, José, and José Roldán Vilorio. 2008. *Fuentes de Energía*. Editorial Paraninfo.
- Salas**, Benjamín Valdez. 2006. *Tecnología en la UABC/ Technology in the University of Baja California*. UABC.
- Sardón**, José María de Juana, and Adolfo de Francisco García. 2003. *Energías renovables para el desarrollo*. Editorial Paraninfo.

- Scenna, J.** 1999. *Modelado, Simulación Y Optimización de Procesos Químicos*. Primera. Universidad Tecnológica Nacional.
- Scharfe, J., F. Ziegler, and R. Radermacher.** 1986. "Analysis of Advantages and Limitations of Absorber-Generator Heat Exchange." *International Journal of Refrigeration* 9 (6): 326–33.
- Seider, Warren D, David D Brengel, and Soemantri Widagdo.** 1991. "Nonlinear Analysis in Process Design." *AIChE Journal* 37 (1): 1–38.
- Shacham, Mordechai.** 1984. "Decomposition of Systems of Nonlinear Algebraic Equations." *AIChE Journal* 30 (1): 92–99.
- Shannon, Robert E.** 1975. *Systems Simulation: The Art and Science*. Prentice-Hall.
- Srikuhirin, Pongsid, Satha Aphornratana, and Supachart Chungpaibulpatana.** 2001. "A Review of Absorption Refrigeration Technologies." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 5 (4): 343–72.
- Staicovici, M.D.** 1995. "Polybranched Regenerative GAX Cooling Cycles." *International Journal of Refrigeration* 18 (5): 318–29.
- Sun, Da-Wen.** 1998. "Comparison of the Performances of NH₃-H₂O, NH₃-LiNO₃ and NH₃-NaSCN Absorption Refrigeration Systems." *Energy Conversion and Management* 39 (5–6): 357–68.
- Sun, Jian, Lin Fu, and Shigang Zhang.** 2012. "A Review of Working Fluids of Absorption Cycles." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16 (4): 1899–1906.
- Tomich, John F.** 1970. "A New Simulation Method for Equilibrium Stage Processes." *AIChE Journal* 16 (2): 229–32.
- Tsang, Edward.** 1993. *FOUNDATIONS OF CONSTRAINT SATISFACTION*. Academic Press Limited. San Diego, CA. <http://dces.essex.ac.uk/Research/CSP/papers/Tsang-Fcs1993.pdf/Tsang-Fcs1993-Toc.pdf>.

- Upadhye**, Ravindra S., and Edward A. Grens. 1975. "Selection of Decompositions for Chemical Process Simulation." *AIChE Journal* 21 (1): 136–43.
- Velasco**, Jaime González. 2009. *Energías renovables*. Reverte.
- Velázquez**, N., and R. Best. 2002. "Methodology for the Energy Analysis of an Air Cooled GAX Absorption Heat Pump Operated by Natural Gas and Solar Energy." *Applied Thermal Engineering* 22 (10): 1089–1103.
- Velázquez**, N. L. 2002. "ESTUDIO DE SISTEMAS DE ABSORCIÓN AVANZADOS PARA OPERAR CON GAS NATURAL ASISTIDOS POR ENERGÍA SOLAR". México, D. F.: UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO.
- Wu**, Shenyi, and Ian W. Eames. 2000. "Innovations in Vapour-Absorption Cycles." *Applied Energy* 66 (3): 251–66. doi:10.1016/S0306-2619(99)00128-2.
- Yari**, Mortaza, Arash Zarin, and S. M. S. Mahmoudi. 2011. "Energy and Exergy Analyses of GAX and GAX Hybrid Absorption Refrigeration Cycles." *Renewable Energy* 36 (7): 2011–20.
- Yokozeiki**, A. 2005. "Theoretical Performances of Various Refrigerant–absorbent Pairs in a Vapor-Absorption Refrigeration Cycle by the Use of Equations of State." *Applied Energy* 80 (4): 383–99.
- Zacarias**, Santiago A. 2004. "ESTUDIO EXPERIMENTAL DE UN SISTEMA DE REFRIGERACION POR ABSORCION OPERANDO A CARGAS PARCIALES". DF. México.: Instituto Politecnico Nacional.
- Ziegler**, B, and Ch Trepp. 1984. "Equation of State for Ammonia-Water Mixtures." *International Journal of Refrigeration* 7 (2): 101–6.
- Ziegler**, Felix. 1999. "Recent Developments and Future Prospects of Sorption Heat Pump Systems." *International Journal of Thermal Sciences* 38 (3): 191–208.

Apéndice A

Clasificación de los problemas de acuerdo a su complejidad

La Teoría de la Complejidad Computacional (Cormen *et al.*, 2003) es la rama de la Computación que estudia de manera teórica la complejidad inherente a la resolución de un problema tratable. Los problemas que tienen solución con orden de complejidad constante son aquellos que no importando la cantidad de datos como entrada, algún algoritmo o método de solución tarda siempre una unidad de tiempo en resolver el problema. Los problemas que tienen una solución con orden de complejidad lineal son los problemas que se resuelven en un tiempo que se relaciona linealmente con su tamaño; por ejemplo, para un problema con un dato se requiere una unidad de tiempo, con dos datos se requieren dos unidades de tiempo, así sucesivamente. Actualmente, las computadoras resuelven problemas mediante algoritmos que tienen como máximo una complejidad o costo computacional polinómico, es decir, la relación entre el tamaño del problema y su tiempo de ejecución es polinómica.

La Figura 27 describe la complejidad de problemas de acuerdo a la clasificación de (Cormen et al. 2003):

1. La clase P consiste de aquellos problemas que se pueden resolver en tiempo polinomial. Es decir, son problemas que se pueden resolver en tiempo $O(n^k)$ para alguna constante k y una entrada de tamaño n .
2. La clase NP consiste de aquellos problemas que son *verificables* en tiempo polinomial. Es decir, si se proporciona una solución (certificado) de una solución, entonces, se puede verificar que el certificado es correcto en tiempo polinomial en función del tamaño de la entrada del problema.
3. Un problema C se encuentra en la clase NP – *competo* si: C está en NP y todo problema en NP se puede reducir en forma polinomial en C .
4. La clase de problemas NP – *difícil* (NP – *hard*) es el conjunto de problemas de decisión que contiene los problemas H tales que todo problema L en NP se puede transformar de manera polinomial en H .

La relación entre las clases de complejidad P y NP es una pregunta que aún no ha respondido la teoría de la computación. En esencia, la pregunta ¿es $P = NP$? significa: ¿si es posible "verificar" rápidamente soluciones positivas a un problema del tipo SI/NO (donde "rápidamente" significa "en tiempo polinomial"), es que entonces también se pueden "obtener" las respuestas rápidamente?.

Los problemas que pertenecen a la clase NP-difícil no son todos NP : los problemas NP -completo significa que son problemas *completos* en NP , es decir, los más difíciles de resolver en NP ; NP -difícil quiere decir *al menos* tan complejo como NP (pero no necesariamente en NP).

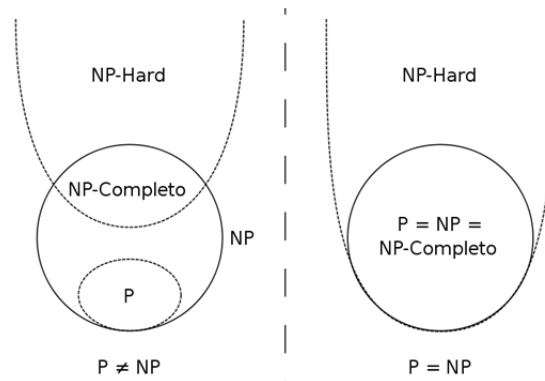


Figura 27. Clase de problemas. Representación de los problemas P , NP , NP -completo, y NP -difícil (NP -hard) tomando en cuenta que los problemas P son diferentes de NP o que son iguales.

Sin pérdida de generalidad, los CSP pertenecen a la clase de problemas NP – *hard* (Tsang, 1993), sin embargo cada CSP es único, lo cual permite desarrollar técnicas especializadas para explotar las características específicas o individuales de cada CSP. Este es el caso para el problema planteado en el presente trabajo.

Apéndice B

Sistemas de ecuaciones lineales y no lineales

Se presentan conceptos básicos de los sistemas de ecuaciones lineales y no lineales, la finalidad es comprender gradualmente la diferencia entre ambos y notar que los últimos tienen mayor grado de dificultad para resolverlos.

Un *Sistema de Ecuaciones Lineales* (SEL) es un sistema de ecuaciones en donde cada ecuación es de primer grado (Allgower y Georg, 1990). En general, un SEL con m ecuaciones lineales y n incógnitas se describe de la siguiente forma:

$$\begin{aligned} a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \cdots + a_{1n}x_n &= b_1 \\ a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \cdots + a_{2n}x_n &= b_2 \\ \dots & \dots \dots \dots \dots \\ a_{m1}x_1 + a_{m2}x_2 + \cdots + a_{mn}x_n &= b_m \end{aligned} \tag{74}$$

donde $x_1, \dots, x_n$ son las incógnitas y los números $a_{ij} \in \mathbb{k}$ son los coeficientes del sistema sobre el campo $\mathbb{k} = [\mathbb{R}, \mathbb{C}, \dots]$. El problema de los SEL radica en encontrar los valores desconocidos de las n variables $x_1, x_2, \dots, x_n$ que satisfacen las m ecuaciones.

Un sistema con n incógnitas se puede representar en el n – *espacio* correspondiente. Por ejemplo, en los sistemas con 2 incógnitas, el universo del sistema es el plano bidimensional, mientras que cada una de las ecuaciones se representa por una recta, si es lineal, o por una curva, si no lo es. La solución es el punto (o línea) donde se intersequen todas las rectas y curvas que representan a las ecuaciones (Figura 28). Si no existe ningún punto en el que se intersequen al mismo tiempo todas las líneas, el sistema es incompatible, o lo que es lo mismo, no tiene solución. En el caso de un sistema con 3 incógnitas, el universo es el espacio tridimensional, siendo cada ecuación un plano dentro del mismo. Si todos los planos intersecan en un único punto, las coordenadas de este serán la solución al sistema. Si, por el contrario, la intersección de todos ellos es una recta o incluso un plano, el sistema tiene soluciones infinitas, que son las coordenadas de los puntos que forman dicha línea o superficie. Para sistemas de 4 ó más

incógnitas, la representación gráfica no existe, por lo que dichos problemas no se enfocan desde esta óptica.

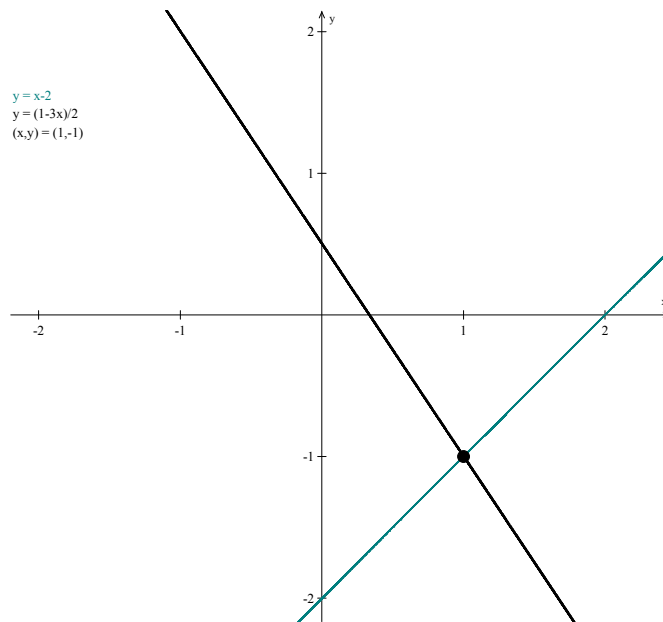


Figura 28. Sistema de ecuaciones lineales con una incógnita y su solución (punto de cruce de las rectas).

Los sistemas de ecuaciones se clasifican de acuerdo al número de soluciones que presentan:

1. *Sistema incompatible* si no tiene solución, es decir se caracterizan por (hiper)planos o rectas que se cruzan sin cortarse.
2. *Sistema compatible* si tiene solución, en este caso además puede distinguirse entre:
 - a. *Sistema compatible determinado* cuando tiene una solución única, es decir se caracterizan por un conjunto de (hiper)planos o rectas que se cortan en un único punto.
 - b. *Sistema compatible indeterminado* cuando admite un conjunto infinito de soluciones, es decir se caracterizan por (hiper)planos que se cortan a lo largo de una recta.

En el trabajo de Scenna, (1999) se mencionan diversos métodos bien definidos para encontrar soluciones en los SEL, método de Bisección, método de Newton-Raphson, sustitución directa, aproximaciones sucesivas, Wegtein, por mencionar algunos.

Los *Sistemas de Ecuaciones no Lineales* (SENL) son de interés en el campo de la ciencia y tecnología debido a que la mayoría de los problemas físicos son implícitamente no lineales por naturaleza. Un sistema físico/matemático es no lineal cuando las ecuaciones de movimiento, evolución o que regulan su comportamiento no son lineales, también cuando sus componentes interactúan de tal forma que se da una continua influencia mutua o relación causal que se retroalimenta, como es el caso de los ciclos avanzados de absorción. Aunque algunos sistemas no lineales y ecuaciones de interés general han sido extensamente estudiados, la vasta mayoría son escasamente comprendidos.

En los SENL aparecen ecuaciones en las que hay incógnitas de grado mayor a 1. En el caso de sistemas de dos ecuaciones de dos incógnitas, las ecuaciones ya no son dos líneas rectas, una de ellas o las dos, pueden ser parábolas, elipses y/o hipérbolas, la solución son los puntos en los que las dos ecuaciones se cortan (Figura 29).

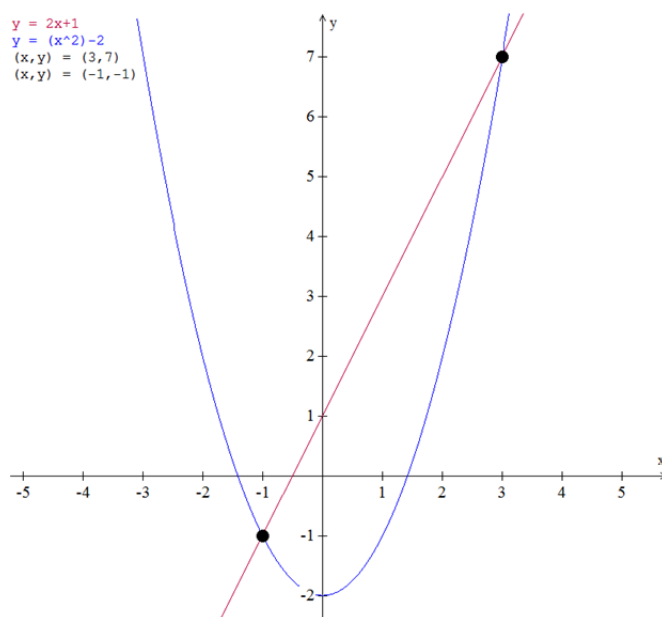


Figura 29. Sistema de ecuaciones no lineales de 2x2 con sus dos soluciones (puntos de corte entre las funciones). Una ecuación es lineal y otra cuadrática.

De manera general, un sistema de n ecuaciones no lineales con n incógnitas se representa mediante la definición de una función F con forma:

$$F(x_1, x_2, \dots, x_n) = \begin{bmatrix} f_1(x_1, x_2, \dots, x_n) \\ f_2(x_1, x_2, \dots, x_n) \\ \vdots \\ f_n(x_1, x_2, \dots, x_n) \end{bmatrix} \quad (75)$$

Formalmente el problema de SENL se describe como una función $\vec{f}: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^n$, se busca al menos un $\vec{x} \in \mathbb{R}^n$ que satisfaga $\vec{f}(\vec{x}) = 0$, donde $\vec{x}$ es una raíz de la ecuación (75) o un cero de $\vec{f}$. Con esto se entiende que se debe encontrar convergencia del sistema de ecuaciones. En múltiples casos aplicados, se desea encontrar al menos una solución al problema, sin embargo, dicha solución no suele ser la mejor opción debido a que no representa una eficiencia considerada como suficiente, es decir se desea encontrar la mejor solución para el problema (optimizar), denotado como $\vec{f}(\vec{x}^*) = 0$.

En el trabajo de Scenna, (1999) se hace referencia a diversos métodos para resolver los SENL tales como el método Newton-Raphson, matrices tridiagonales, por mencionar algunos ejemplos. Por su parte Pelayo, (2007) aplica los métodos de sustitución directa, Wegstein y Broyden para resolver los sistemas de enfriamiento por absorción básicos, pero se dificulta la resolución de los sistemas avanzados.

Apéndice C

Conceptos de problemas de satisfacción de restricciones

Se definen algunos conceptos importantes de los CSP estándar para evitar ambigüedades y para comprender la forma en que se va estructurando la metodología.

Definición 4. El *dominio* real D_x de una variable x (para el caso finito), es un conjunto de todos los valores posibles que se pueden asignar a la variable.

Definición 5. Una *etiqueta* (asignación) $\langle x, v \rangle$ donde $v \in D_x$ es una dupla variable-valor que representa la asignación del valor a la variable.

Definición 6. Una *etiqueta compuesta* $\langle x_1, v_1, x_2, v_2, \dots, x_n, v_n \rangle$ es la asignación simultánea de un valor (vacío posiblemente) a un conjunto de valores.

Definición 7. Una *restricción* C_S sobre un conjunto de variables S , es conceptualmente un conjunto de etiquetas compuestas para delimitar a las variables.

Definición 8. Si las variables de la etiqueta compuesta X son los mismos elementos en la etiqueta compuesta de restricciones C , entonces *satisface* a C si y solo si X es un elemento de C :

$$(\langle x_1, v_1, x_2, v_2, \dots, x_k, v_k \rangle), C_{x_1, x_2, \dots, x_k} \equiv (\langle x_1, v_1, x_2, v_2, \dots, x_k, v_k \rangle), \in C_{x_1, x_2, \dots, x_k}$$

Definición 9. Un *problema de satisfacción de restricciones* $CSP(P)$ es una triplete:

$$(Z, D, C)$$

donde $Z = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$; $D: Z \rightarrow$ *conjunto finito de objetos*, D_{x_i} es el conjunto de objetos mapeados de x_i por D . Los objetos son los posibles valores de x_i y el conjunto D_{x_i} el dominio de x_i ; C es un conjunto finito (posiblemente vacío) de restricciones sobre un subconjunto arbitrario de variables en Z .

Definición 10. Una *tupla solución* para un CSP es una etiqueta compuesta para todas aquellas variables que satisfacen todas las restricciones:

$$\begin{aligned} \forall csp((Z, D, C)): \forall x_1, x_2, \dots, x_n \in Z: (\forall v_1 \in D_{x_1}, v_2 \in D_{x_2}, \dots, v_n \in D_{x_n}: \\ \text{tupla solución}((\langle x_1, v_1 \rangle \langle x_2, v_2 \rangle \dots \langle x_n, v_n \rangle), (Z, D, C)) \equiv \\ ((Z = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}) \wedge (\forall c \in C: \text{satisface}((\langle x_1, v_1 \rangle \langle x_2, v_2 \rangle \dots \langle x_n, v_n \rangle), c))) \end{aligned}$$

Apéndice D

Teoría de grafos

Definición 11. Un *grafo no dirigido* G es una tupla (V, E) , V es un conjunto de nodos, donde un *nodo* puede ser un objeto de cualquier tipo y E es un conjunto de *aristas*, donde cada una es una colección de dos elementos en V exactamente.

Definición 12. Para todos los grafos (V, E) , un nodo x es *adyacente* al nodo y si y solo si (x, y) está en E :

$$\forall \text{ grafo } ((V, E)): (\forall x, y \in V: \text{adyacente}(x, y, (V, E)) \equiv (x, y) \in E)$$

Definición 13. Una *ruta* en un grafo es una secuencia de nodos, donde cada par de nodos adyacentes en la secuencia está conectado por una arista en el grafo:

$$\begin{aligned} &\forall \text{ grafo } ((V, E)): \\ &\forall x_1, x_2, \dots, x_k \in V: \\ &(\text{ruta}((x_1, x_2, \dots, x_k), (V, E)) \equiv ((x_1, x_2) \in E) \wedge \dots \wedge ((x_{k-1}, x_k) \in E))) \end{aligned}$$

Definición 14. Una *ruta de longitud n* es una ruta que atraviesa $n - 1$ (no necesariamente distinto) nodos:

$$\text{longitud_ruta}((x_1, x_2, \dots, x_k)) \equiv k - 1$$

Definición 15. Un nodo y es *accesible* desde otro nodo x si existe alguna ruta de x a y :

$$\begin{aligned} &\forall \text{ grafo } ((V, E)): (\forall x, y \in V \\ &\quad \text{accesible}(x, y, (V, E)) \equiv \\ &\quad ((x, y) \in E \vee (\exists z_1, z_2, \dots, z_k: y), (V, E)))) \end{aligned}$$

Definición 16. Un grafo es *conectado* si existe una ruta entre cada par de nodos:

$$\begin{aligned} &\forall \text{ grafo } ((V, E)): \\ &(\text{conectado}((V, E)) \equiv (\forall x, y \in V: \text{accesible}(x, y, (V, E)))) \end{aligned}$$

Definición 17. Un *ciclo* es una ruta sobre la cual coincide el punto inicial con el final:

$$\begin{aligned} &\forall \text{ grafo } ((V, E)): (\forall x_0, x_1, x_2, \dots, x_k \in V: \\ &\quad (\text{ciclo}((x_0, x_1, x_2, \dots, x_k), (V, E)) \equiv \\ &\quad (\text{ruta}((x_0, x_1, x_2, \dots, x_k), (V, E)) \wedge x_0 = x_k))) \end{aligned}$$

Definición 18. Un grafo acíclico es un grafo en el que no existen ciclos:

$$\forall \text{ grafo}(G): (\text{acíclico}(G) \equiv (\nexists \text{ruta}(p, G): \text{ciclo}(p, G)))$$

Apéndice E

Algoritmo backtracking recursivo para ciclos de absorción

Una implementación frecuente del algoritmo backtracking (*bt*) aplica procedimientos de recursividad, el pseudocódigo es el siguiente:

Antes de llamar al procedimiento *bt(SCC)*, primero se extrae del nivel 1 todas las SM, después, para cada SM se llama *bt(SCC)* dando como entrada la lista SCC con un elemento que corresponde a la SM del nivel 1. El procedimiento *bt(SCC)* inicia generando una variable llamada *Nx* a la que se le asigna la longitud vigente de *SCC*, que corresponde al apuntador del último nivel en la lista.

Procedimiento *bt(SCC)*

Nx ← longitud(*SCC*)

Si

rechazar(s_q, SCC, cmpt) //Busca soluciones compatibles entre niveles.

Entonces

regresar(SCC, l) //Inserta la solución recién encontrada, en SCC.

Si

aceptar(S_q, SCC) //Verifica si SCC ya es una solución completa.

Entonces

salida(SCC) //Imprime la SCC completa.

$s \leftarrow primero(Sq)$ //Avanza al nivel siguiente.

Mientras $s < longitud(Sq(n))$ **hacer**

$bt(s)$ //Aplica el algoritmo en forma recursiva.

$s \leftarrow siguiente(SCC, Sq)$ // Recorre el ultimo nivel en busca de SCCs.

Fin Mientras

Fin procedimiento

Enseguida se llama al procedimiento $rechazar(s_q, SCC, cmpt)$ que tiene la función de apuntar al siguiente nivel del grafo (apuntador llamado Ny) y resolver dicho nivel en funcion de la solucion del nivel Nx , de esta manera se transfiere la compatibilidad ($cmpt$) entre ambos niveles. El pseudocodigo es el siguiente:

Procedimiento $rechazar(s_q, SCC, cmpt)$

$Ny = s_q(Nx + 1)$ //Apuntador a un siguiente nivel.

Si existe Ny **entonces** //Verifica que no exceda la longitud de la Secuencia Sq.

Para D_{Ny} **hacer** //Recorre todo el dominio del nivel que se está explorando.

Si $ES(Ny, cmpt)$ **entonces** //Implementa la Estrategia de Solución.

$D_{Ny} \leftarrow D_j + \Delta$ //Guarda el dominio válido para la sig. iteración.

$return l(SM_{Ny, D_j}, D_{Ny})$ //Regresa la solución compatible y dominio.

Si no //Dejar reiniciado el dominio para buscar nueva compatibilidad

$D_{Ny} \leftarrow reiniciar(D)$ //con una nueva solución en el nivel anterior.

$return \Lambda$

Fin Para

Si no

$return \Lambda$

Fin Procedimiento

La Figura 30 con dos niveles ayuda a explicar cómo trabaja el algoritmo. El nivel 1 contiene dos SM , mientras que el nivel 2 contiene tres SM . Cuando se llama al procedimiento $bt(SCC)$ con $SCC = (SM_{1,1})$, se maraca a $Nx=1$ y se llama al procedimiento

$rechazar(s_q, SCC, cmpt)$ que primero genera un apuntador al siguiente nodo de la secuencia Sq con $Ny = Nx + 1 = 2$, después, la cláusula SI , verifica si existe el nivel 2, en caso de que no exista se regresa Λ , lo cual significa que no hay un nodo más haya de Nx . El ciclo *Para* recorre el dominio de Ny (D_{Ny}), si la estrategia de solución ES (S) encuentra una solución tomando en cuenta la solución recibida del nodo Nx , se reasigna $D_{Ny} \leftarrow D_j + \Delta$ indicando que la próxima solución se empezara a buscar a partir de un delta después de la solución que se acaba de encontrar, se regresa el apuntador $l = (1)$ y la nueva D_{Ny} , en caso de haber recorrido todo el dominio D_{Ny} y no encontrar alguna solución compatible entre Nx y Ny se reinicia el dominio $D_{Ny} \leftarrow reiniciar(D)$ para que la próxima compatibilidad entre una nueva solución de Nx se empiece a buscar desde el principio del dominio de Ny , también se regresa Λ .

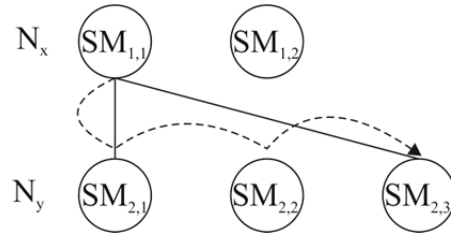


Figura 30. Ejemplo de soluciones compatibles.

El procedimiento $regresar(SCC, l)$ es un procedimiento sencillo que regresa la misma lista SCC con el último nodo compatible encontrado con $rechazar(S_q, SCC, cmpt)$.

Procedimiento $regresar(SCC, l)$

$k \leftarrow longitud(SCC)$

Si

$k = Sq(n)$ //Verifica que no se exceda la longitud de la Secuencia Sq.

Entonces

$regresar \Lambda$

Si no

$regresar SCC([1], [2], [3], \dots, [k + 1[l]])$ //Actualiza la solución parcial

Fin Si //insertando la solución compatible recién encontrada.

Fin procedimiento

El procedimiento $aceptar(P, Sq, SCC)$ es otro procedimiento sencillo que pregunta si la $longitud(SCC)$ es igual al número total de elementos en la secuencia Sq . Si es el caso, entonces se regresa SCC como salida, indicando que se ha encontrado una SCC .

Procedimiento $aceptar(Sq, SCC)$

$k \leftarrow longitud(SCC)$

Si $k = Sq(n)$ **entonces**

$regresar SCC$

Fin Si

El procedimiento $salida(SCC)$ imprime la ruta completa indicando que es una solución del ciclo, la sentencia $regresar \wedge$ ayuda a que el algoritmo regrese a un paso anterior en la recursividad.

Procedimiento $salida(SCC)$

$imprimir(SCC)$

$regresar \wedge$

Fin Si

La función $primero(Sq)$ regresa el apuntador Nx después de haberlo colocado en el siguiente nivel.

Función $primero(Sq)$

$k \leftarrow Nx$

SI $k = Sq(n)$ **Entonces** $regresar \wedge$

Si no $regresar Nx \leftarrow Sq(k + 1)$

Fin Función

Finalmente, se llama al procedimiento *siguiente*(*SCC*, *Sq*) para recorrer todos los nodos del último nivel. El procedimiento imprime cada ruta completa que se va encontrando y las declara como soluciones del ciclo.

Procedimiento *siguiente*(*SCC*, *Sq*)

$k \leftarrow Sq(n)$

Para D_{Ny} **hacer**

Si

$ES(Ny, cmpt)$ //Busca todas las soluciones en el último nivel.

Entonces

$SCC \leftarrow (k[SM_{Ny, D_j}])$

$salida(P, SCC)$

Fin Si

Fin Para

$D_{Ny} \leftarrow reiniciar(D)$

$return \wedge$

Fin Procedimiento

Siguiendo el ejemplo de la Figura 30, el procedimiento *rechazar*($s_q, SCC, cmpt$) regresa $l = (1)$ y $D_{Ny} = 2$. Cuando se llama al procedimiento *siguiente*(*SCC*, *Sq*), k apunta al último valor en la lista de entrada *SCC*, después entra al ciclo *Para*, y por medio de la estrategia ES pregunta en la cláusula *SI* la existencia de más soluciones, imprimiendo todas las soluciones completas que encuentra, cuando recorre todo el dominio, se sale del ciclo y reinicia el dominio dejándolo preparado para una nueva búsqueda. En el ejemplo, cuando se llama a *siguiente*(*SCC*, *Sq*) por primera vez, $s = [1] = 1$, cuyo valor se actualiza a través del procedimiento *primero*(*Sq*). Después, el ciclo *Para* reemplaza el ultimo valor en la posición n conforme va encontrando las soluciones completas, en total se tiene $SCC = \{1, 1\}$ y $SCC = \{1, 3\}$.

Apéndice F

Modelo matemático ordenado, Secuencia y resolución de los componentes que integran al ciclo GAX

Por diseño se conoce x_1 , m_{40} , p_{40} , la presión p_1 es la presión alta del sistema y se obtiene de $f(T_{36}, y_{15})$, donde T_{36} es la temperatura ambiente que se conoce y y_{15} es la pureza del refrigerante (concentración en saturación) con que debe salir del RE. Con éstas variables ahora es posible calcular de forma directa las siguientes.

EV

T_{35} = condición de operación

z_{18} = Parámetro de diseño

Q_{EV} = Parámetro de diseño

$$T_{34} = T_{35} + \Delta T_{18y35}$$

$$CP_{Agua_{34}} = f(T_{34})$$

$$CP_{Agua_{35}} = f(T_{35})$$

$$CP_{Agua_{Pr}} = (CP_{34} + CP_{35}) / 2$$

$$p_{35} = p_{34}$$

$$m_{34} = Q_{PE} / (CP_{Promedio} * (T_{34} - T_{35}))$$

$$m_{35} = m_{34}$$

$$T_{18} = T_{35} - \Delta T_{18y35}$$

// Inicia ciclo *for* para m_{18}

Para ($L_{Sup} < m_{18} < 0$) hacer

$$p_{18} = f(\%L_{18})$$

$$xL_{18} = f(T_{18}, p_{18})$$

$$yV_{18} = f(T_{18}, p_{18})$$

$$T_{21} = T_{18} + \Delta T_{18y21}$$

$$P_{21} = P_{18}$$

$$z_{21} = z_{18}$$

$$\begin{aligned}
x_{21} &= f(T_{21}, P_{21}) \\
hL_{21} &= f(T_{21}, x_{21}) \\
yV_{21} &= f(T_{21}, P_{21}) \\
h_{21} &= f(T_{21}, y_{21}) \\
\%L_{18} &= f(18) \\
mL_{18} &= (\%L_{18} * m_{18}) / 100 \\
mV_{18} &= m_{18} - mL_{18} / 100 \\
h_{18} &= (mL_{18} * hL_{21} + mV_{18} * hL_{21}) / m_{18} \\
\varepsilon &= (mL_{18} * xL_{18}) + (mV_{18} * yV_{18}) - (m_{18} * z_{18}) \\
m_{21} &= m_{18} \\
x_{21} &= (m_{18} * x_{18}) / m_{21} \\
\%L_{21} &= f(21) \\
mL_{21} &= (\%L_{21} * m_{21}) / 100 \\
mV_{21} &= m_{21} - mL_{21} \\
\varepsilon &= (m_{18} * h_{18} + Q_{EV}) - (m_{21} * h_{21}) \\
// \text{ Finaliza ciclo for } m_{18}
\end{aligned}$$

CO

Se asignan las variables calculadas previamente.

$$\begin{aligned}
m_{15} &= m_{18} \\
y_{15} &= z_{18} \\
p_{15} &= f(T_{36}, y_{15})
\end{aligned}$$

Ahora se procede a calcular las variables restantes.

$$\begin{aligned}
m_{16} &= m_{15} \\
m_{37} &= m_{36} \\
p_{16} &= p_{15} \\
p_{37} &= p_{36} \\
T_{16} &= T_{36} + \Delta T_{16y37} \\
T_{15} &= f(p_{15}, y_{15})
\end{aligned}$$

$$h_{15} = f(T_{15}, y_{15})$$

$$x_{16} = y_{15}$$

$$h_{16} = f(T_{16}, x_{16})$$

$$Q_{CO} = m_{15} * (h_{15} - h_{16})$$

$$CPAire = f(T_{36}, Hr_{36})$$

$$T_{37} = f(37) // \text{ calcular con un método iterativo.}$$

PE

Se asignan las variables calculadas previamente, las variables de 16 son las mismas que las del CO, las variables de la corriente 21 son las mismas que las del EV, entonces se procede a calcular las variables restantes.

$$T_{22} = T_{16} - \Delta T_{16y22}$$

$$T_{Sat} = f(p_{22}, y_{22})$$

$$\%L_{22} = f(22)$$

Si *EstadoTermico*₂₂ = *MezclaLiquidoVapor*

entonces

$$yV_{22} = f(T_{22}, p_{22})$$

$$xL_{22} = f(T_{22}, p_{22})$$

$$hL_{22} = f(T_{22}, xL_{22})$$

$$hV_{22} = f(T_{22}, yV_{22})$$

$$mL_{22} = (\%L_{22} * m_{22}) / 100$$

$$mV_{22} = m_{22} - mL_{22}$$

$$h_{22} = (mV_{22} * hV_{22} + mL_{22} * hL_{22}) / m_{22}$$

// Fin Si *EstadoTermico*₂₂ = *MezclaLiquidoVapor*

Si *EstadoTermico*₂₂ = *VaporSobrecalentado*

entonces

$$h_{22} = f(T_{22}, y_{22})$$

$$hV_{22} = h_{22}$$

```

 $m_{22} = m_{21}$ 
 $mV_{22} = m_{21}$ 
 $yV_{22} = y_{21}$ 
// Fin Si  $EstadoTermico_{22} = VaporSobrecalentado$ 
Si  $EstadoTermico_{22} = VaporSaturado$  entonces
 $h_{22} = f(T_{22}, y_{22})$ 
// Fin Si  $EstadoTermico_{22} = VaporSaturado$ 
 $Q_{PE} = (m_{22} * h_{22}) - (m_{21} * h_{21})$ 
 $h_{17} = ((m_{16} * h_{16}) - Q_{PE}) / m_{17}$ 
 $T_{17} = f(17)$  // calcular con un método iterativo.

```

VER

Se asignan las variables calculadas previamente, las variables de 16 son las mismas que las de la corriente 17 del CO y las variables de la corriente 18 son las mismas que las del EV, entonces se procede a verificar la igualdad en las ecuaciones.

```

 $\Delta p = p_{17} - p_{18}$ 
 $\varepsilon = m_{17} - m_{18}$ 
 $\varepsilon = m_{18} - mL_{18} - mV_{18}$ 
 $\varepsilon = (m_{17} * x_{17}) - (m_{18} * y_{18})$ 
 $\varepsilon = (m_{18} * x_{18}) - (mL_{18} * xL_{18}) - (mV_{18} * yV_{18})$ 
 $\varepsilon = (m_{17} * h_{17}) - (m_{18} * h_{18})$ 
 $\varepsilon = (m_{18} * h_{18}) - (mL_{18} * hL_{18}) - (mV_{18} * hV_{18})$ 

```

GHX

Se asignan las variables calculadas previamente, las variables de las corrientes 1, 2 y 3 son las mismas del GGN (GGB), entonces se procede a calcular algunas variables restantes.

```

// Inicia ciclo for para  $T_{12}$ 

```

Para ($T_3 < T_{12} < T_{15}$) hacer

$$T_{10} = T_{12}$$

$$T_6 = T_{10} + \Delta T_{6y10}$$

$$T_{10} = f(T_{10}, P_{10})$$

$$T_{12} = f(T_{12}, P_{12})$$

$$h_{10} = f(T_{10}, x_{10})$$

$$h_{12} = f(T_{12}, y_{12})$$

$$h_6 = f(T_6, x_6)$$

$$m_{12} = (m_3 * (y_3 - x_{10}) + m_2 * (x_{10} - x_2)) / (y_{12} - x_{10})$$

$$m_{10} = m_2 + m_{12} - m_3$$

$$Q_{GHX} = m_1 * h_1 - m_6 * h_6$$

$$\varepsilon = Q_{GHX} + m_3 * h_3 + m_{10} * h_{10} - m_2 * h_2 -$$

$$m_{12} * h_{12}$$

// Finaliza ciclo *for* T_{12}

SEP

Para evitar una variable iterativa se hace u balance de masa y energía agrupando en un bloque los componentes: RE, MEL, MEV Y SEP, cortando las corrientes: 7, 15, 12 y 10.

$$m_7 = m_{15} + m_{10} - m_{12}$$

$$z_7 = f(T_{36} + \Delta T_{32y23}, p_{18})$$

$$T_7 = T_{12}$$

$$p_7 = p_{12}$$

El resto de los cálculos se hacen para la corriente 7 en sus diferentes estados térmicos: mezcla liquido-vapor, líquido saturado o vapor.

MEV

La corriente 12 es la misma del GHX y la corriente 8 es la del SEP. Los cálculos restantes son los siguientes.

$$m_{13} = m_8 + m_{12}$$

$$T_{13} = T_8$$

$$y_{13} = (y_8 * m_8 + y_{12} * m_{12}) / m_{13}$$

$$h_{13} = (h_8 * m_8 + h_{12} * m_{12}) / m_{13}$$

$$p_{13} = p_{12}$$

MEL

La corriente 9 es la misma del SEP y la corriente 10 es la del GHX. Los cálculos restantes son los siguientes.

$$m_{11} = m_{10} - m_9$$

$$x_{11} = (m_{10} * x_{10} - m_9 * x_9) / m_{11}$$

$$h_{11} = (m_{10} * h_{10} - m_9 * h_9) / m_{11}$$

$$p_{11} = p_9$$

$$T_{11} = f(p_{11}, x_{11})$$

RE

La corriente 15 es la misma del CO, la corriente 11 es la misma del MEL y la corriente 13 es la misma del MEV. Se verifican la igualdad en las ecuaciones y se calcula el calor.

$$\varepsilon = m_{13} - m_{11} - m_{15}$$

$$\varepsilon = m_{13} * y_{13} - m_{11} * x_{11} - m_{15} * y_{15}$$

$$Q_{GHX} = (m_{13} * h_{13}) - (m_{11} * h_{11}) - (m_{15} * h_{15})$$

VES

Se asignan las variables calculadas previamente, las variables de 6 son las mismas que las del GHX y la presión de 31 es la misma que la corriente 21.

GAX

Se asignan las variables calculadas previamente, las variables de 31 son las mismas que las de la VES y las variables de 7 son las mismas que las del SEP.

$$T_{28} = f(p_{28}, x_{28})$$

$$p_{29} = p_{31}$$

$$T_{29} = T_{28} + \Delta T_{7y31}$$

$$y_{29} = f(T_{29}, p_{29})$$

$$h_{98} = f(T_{29}, y_{29})$$

$$p_{30} = p_{29}$$

$$T_{30} = T_{29}$$

$$x_{30} = f(T_{30}, p_{30})$$

$$h_{30} = f(T_{30}, x_{30})$$

$$m_{30} = (y_{29} - T_{31}) * m_{31} / (y_{29} - x_{30})$$

$$m_{29} = m_{30} - m_{31}$$

$$Q_{GAX} = (m_7 * h_7) - (m_{28} * h_{28})$$

$$\varepsilon = m_{31} * x_{11} + m_{29} * y_{29} - m_{30} * x_{30}$$

$$\varepsilon = m_{31} * h_{11} + m_{29} * h_{29} - m_{30} * h_{30}$$

BS

A la corriente 24 se le asignan las variables posibles del SEP, y simultáneamente las variables que se puedan de la salida a la entrada. El resto de las variables se calculan como sigue.

$$T_{23} = T_{32} + \Delta T_{32y23}$$

$$h_{23} = f(T_{23}, p_{23})$$

$$Vesp_{23} = f(T_{23}, x_{23})$$

$$dp = p_{24} - p_{23}$$

$$w = dp * Vesp_{23} / Ef$$

$$h_{24} = h_{23} + w$$

AHX

A la corriente 24 se le asignan las mismas variables del líquido que sale de la bomba BS, las corrientes 28, 29 y 30 son las mismas que las del GAX. El resto de las corrientes se calcula como sigue.

// Inicia ciclo *for* para T_{25}

Para ($T_{22} < T_{25} < T_{31}$) hacer

$$T_{26} = T_{25}$$

$$y_{25} = f(T_{25}, p_{25})$$

$$x_{26} = f(T_{26}, p_{26})$$

$$h_{25} = f(T_{25}, y_{25})$$

$$h_{26} = f(T_{26}, x_{26})$$

$$m_{26} = (m_{29} * (y_{29} - y_{25}) + m_{30} * (y_{25} - x_{30})) / (y_{25} - x_{26})$$

$$m_{25} = m_{26} + m_{29} - m_{30}$$

$$Q_{AHX} = (m_{28} * h_{28}) - (m_{24} * h_{24})$$

$$\varepsilon = Q_{AHX} - m_{30} * h_{30} + m_{25} * h_{25} - m_{26} * h_{26} - m_{29} * h_{29}$$

// Finaliza ciclo *for* T_{25}

AB

Al llegar a este componente, ya se conocen los valores de todas las variables, únicamente hay que verificar la igualdad en las ecuaciones y obtener el calor.

$$\varepsilon = m_{22} + m_{26} - m_{23} - m_{25}$$

$$\varepsilon = mL_{22} * x_{L22} + mV_{22} * y_{V22} + m_{62} * x_{26} -$$

$$m_{23} * x_{23} - m_{25} * y_{25}$$

$$Q_{AHX} = mL_{22} * h_{L22} + mV_{22} * h_{V22} + m_{26} * h_{26} -$$

$$m_{23} * h_{23} - m_{25} * h_{25}$$

$$T_{33} = T_{32} + \Delta T_{32y33}$$

Apéndice G

Implementación de la metodología en el simulador SIMSABA.

Se explica la manera para ejecutar la metodología que se encuentra implementada en el simulador SIMSABA desarrollado por Pelayo, (2007).

La Figura 31 indica que se debe abrir la aplicación SIMSABA 1.0.sln con el editor Visual Studio de Microsoft.

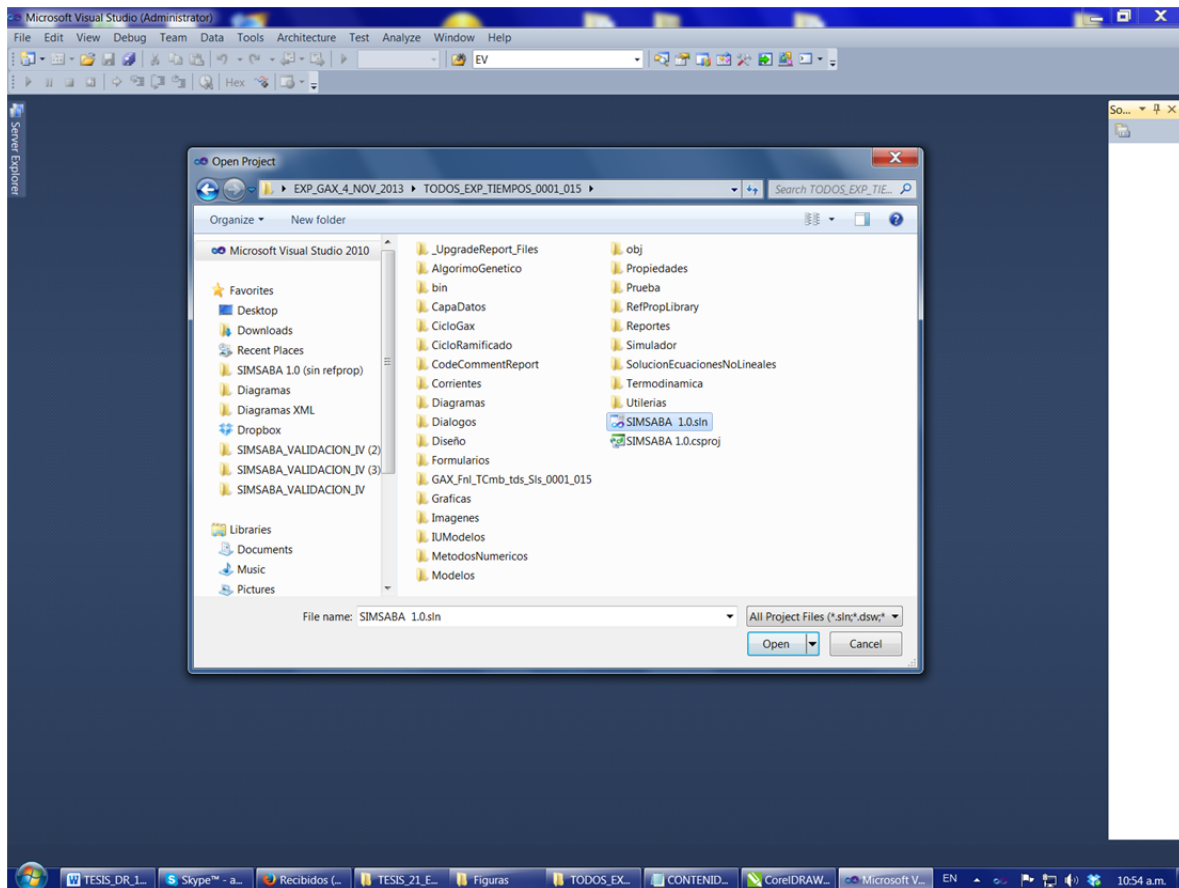


Figura 31. Abrir la aplicación SIMSABA 1.0.sln con Visual Studio.

Una vez que se tenga abierta la solución, se abre el archivo Ciclo_Gax_GN_Yair_EV.cs, con ello se muestra la función principal (public double FuncionObjetivo(Individuo ind) que contiene la secuencia principal y llamada a las funciones que representan a los componentes. Con el menú desplegable que emerge con el botón secundario sobre SIMSABA 1.0 (en negritas) se indica que se asigna como proyecto principal (Figura 32).

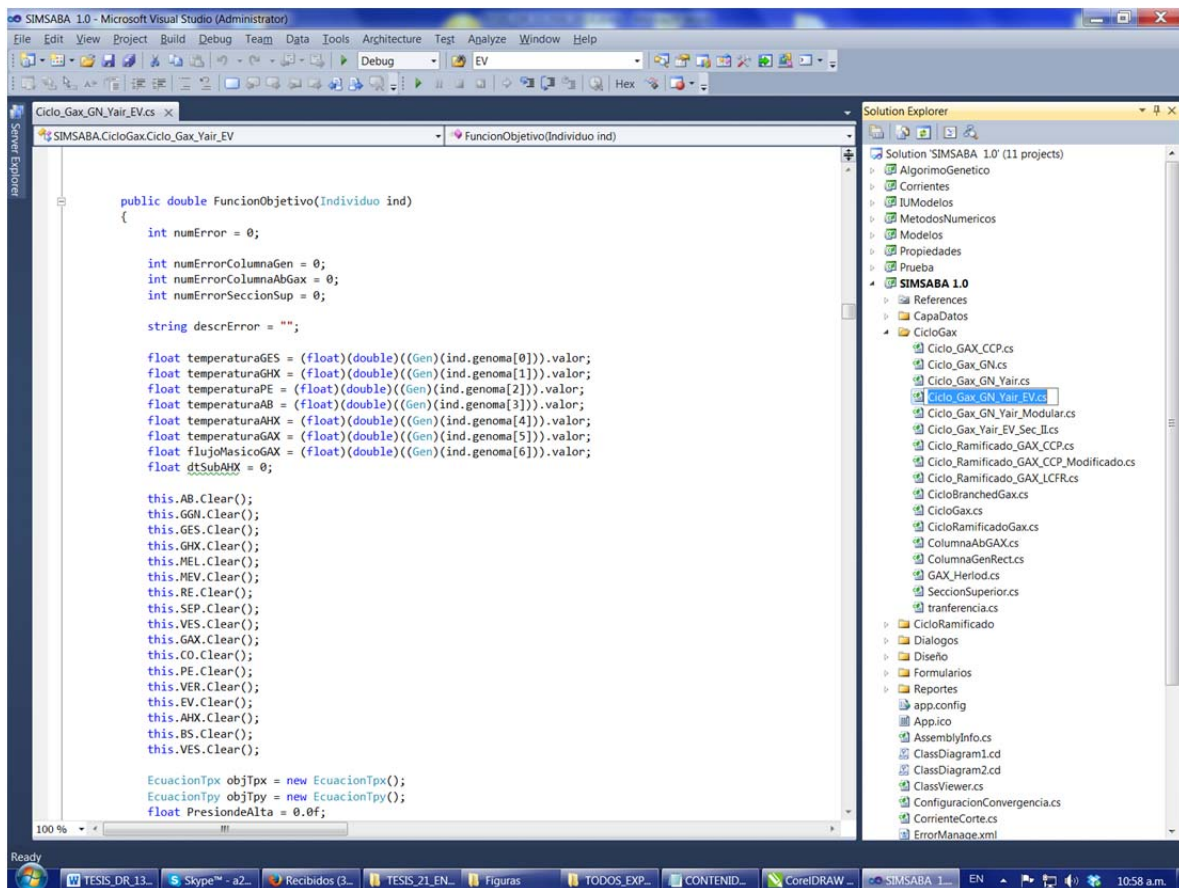


Figura 32. Abrir el archivo Ciclo_Gax_GN_Yair_EV.cs

En la Figura 33 se observa que dentro del mismo archivo Ciclo_Gax_GN_Yair_EV.cs se pueden configurar el rango de la capacidad de enfriamiento del ciclo, el rango de las condiciones de operación (temperatura agua y aire) con que se desea simular al ciclo, es un rango porque se indica un límite inferior o superior y su respectivo incremento. De igual manera se indica el incremento de la temperatura (cambio_Temp) con que se recorre el dominio de cada temperatura (variables iterativas) y el error permisible en los balances (error_permisible_balances).

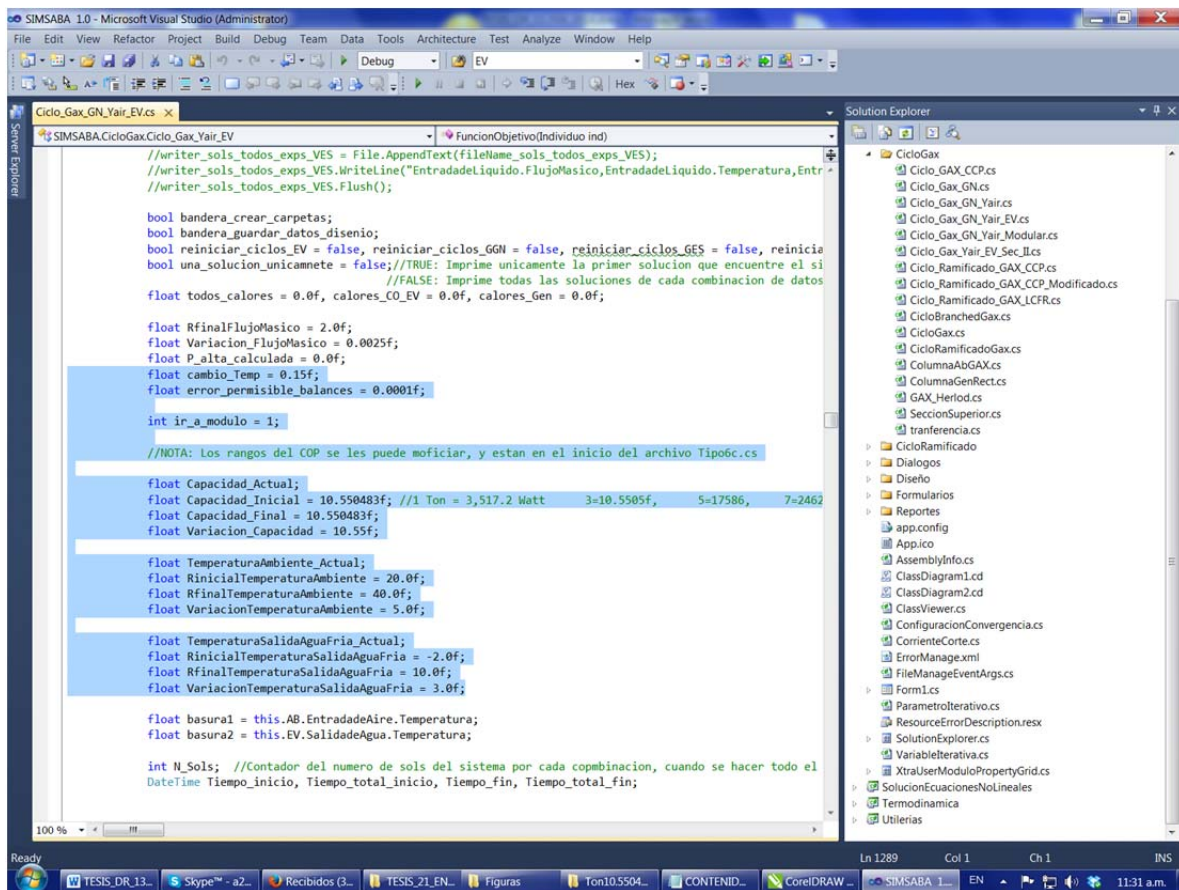


Figura 33. Configuración de parámetros para simular al ciclo.

Con la opción “*ir a definición*” (Go to definition) del menú desplegable se puede acceder al código de cada componente (*case:1* hasta *case:16*), ahí se encuentra programado el modelo matemático de cada componente y sus restricciones, en la Figura 34 se ejemplifica para el componente GGN que es equivalente al GBG del ciclo GAX.

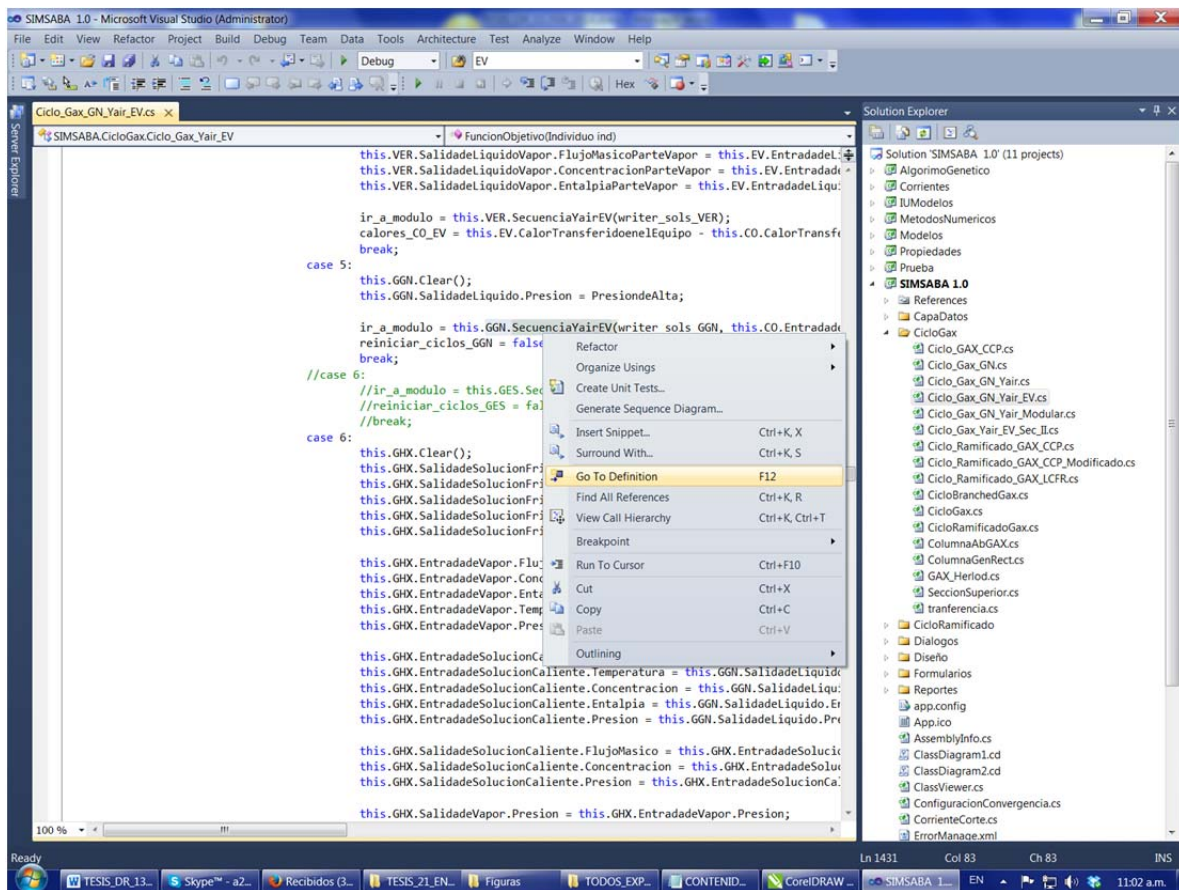


Figura 34. Acceso al código fuente de los componentes.

El código del componente GGN (Figura 35) es interesante porque es la parte en donde se modifica el rango del calor que se suministra al sistema (Rng_Sup_Calor y Rng_Inf_Calor), ya que es una variable importante en los estudios del ciclo.

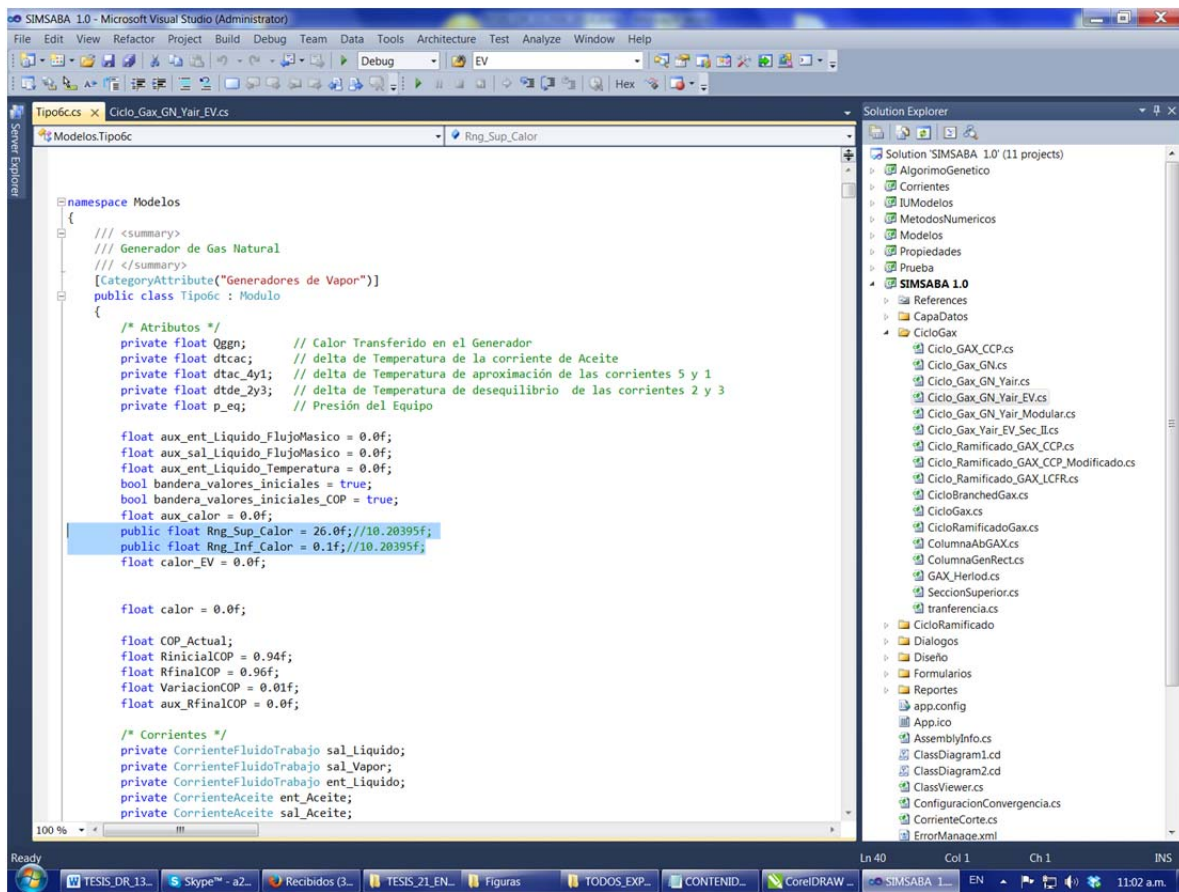


Figura 35. En el código del generador se modifica el rango del calor que se suministra al sistema.

También se debe indicar el criterio de paro para el algoritmo backtracking, la Figura 36 indica la sección de código en donde se asigna false o true, la primera asignación indica que el algoritmo imprime todas las soluciones que se encuentren en el espacio de soluciones, y con true termina cuando encuentra la primer solución, es decir no recorre todo el espacio.

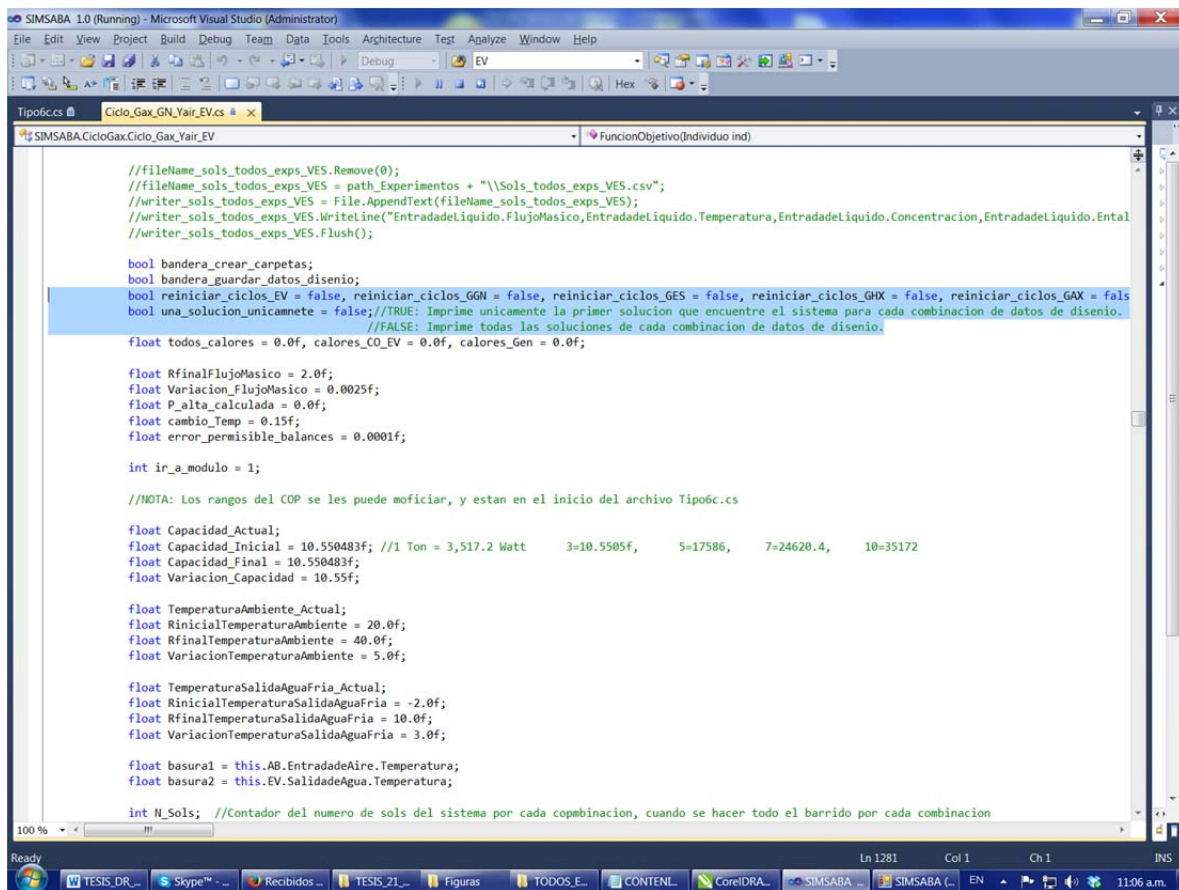


Figura 36. Indicar el criterio de paro del algoritmo backtracking.

Una vez que se ha configurado la simulación por completo, se procede a indicar la carpeta en donde se guardaran todos los resultados, en la Figura 37 se indica la sección de código en donde se indica el nombre de dicha carpeta, por defecto se crea en la misma ruta que contiene a SIMSABA 1.0.sln. La ejecución de la simulación se inicia con el icono *Start Debugging* o F5 de Visual Studio.

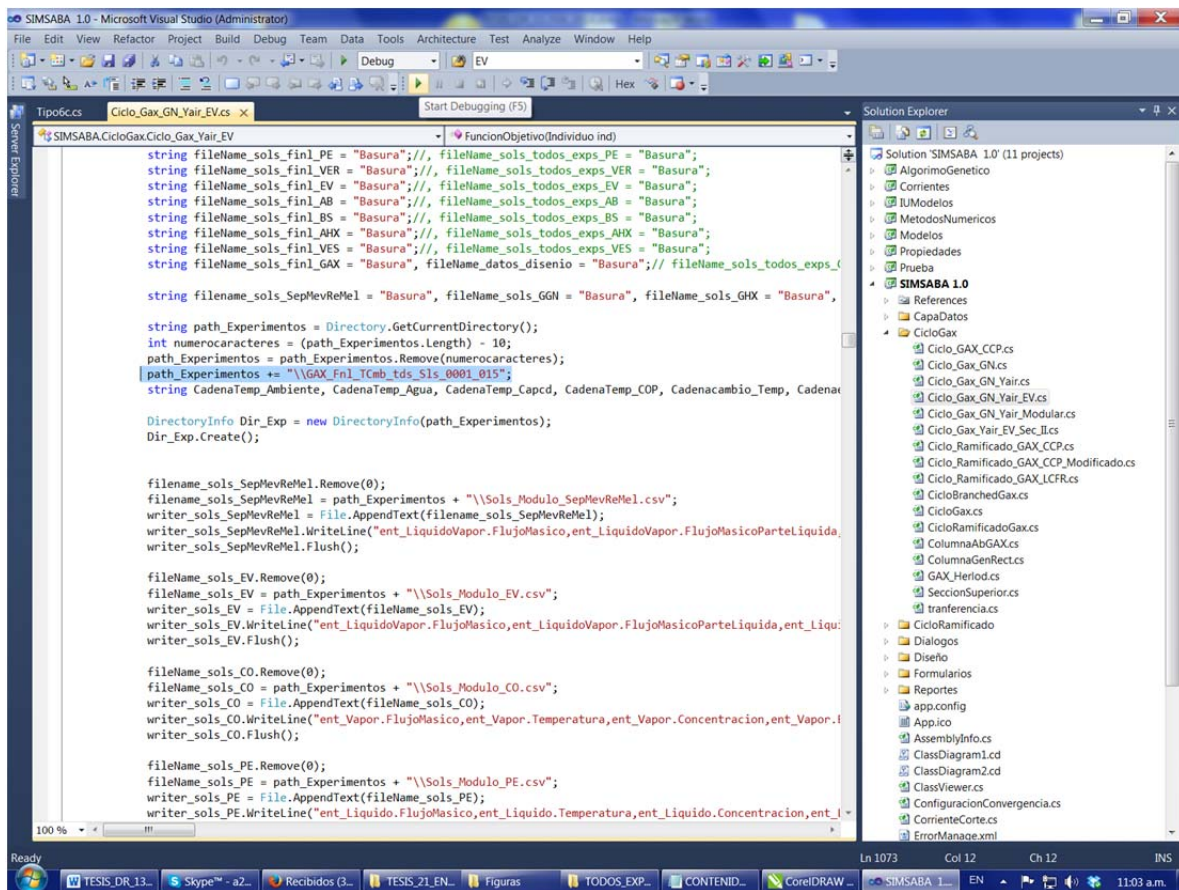


Figura 37. Nombre de la carpeta en donde se guardan los resultados de la simulación.

Con la ejecución de SIMSABA se despliega la interfaz de dicho simulador que en la parte superior izquierda muestra al icono *Abrir* (carpeta) con el que se tiene acceso al archivo *CicloGAX.xml*, al abrir éste archivo se despliega el ciclo en pantalla. Nota: para simular la metodología sobre el simulador no se requiere alterar ningún parámetro en las opciones. En la Figura 38 se ilustra el procedimiento para abrir el archivo.

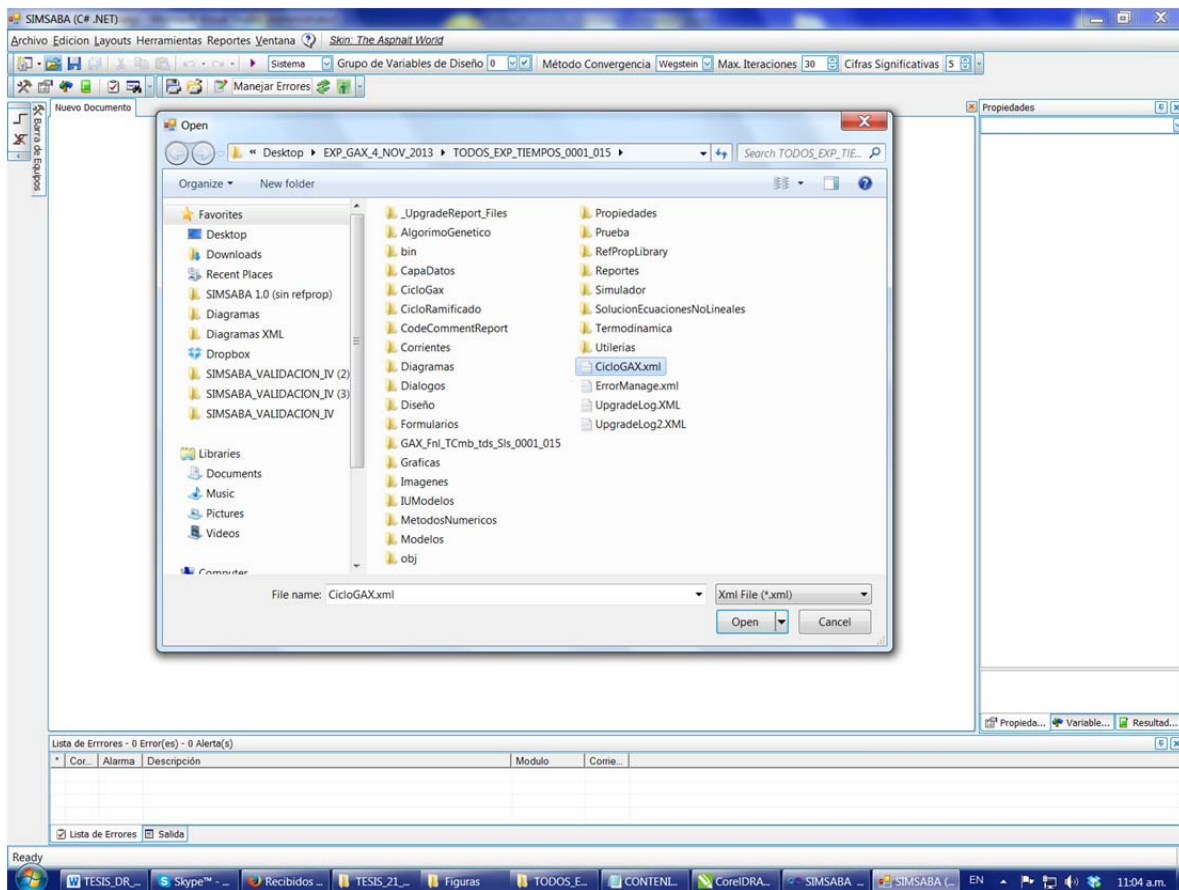


Figura 38. Abrir el archivo CicloGAX.xml.

Inmediatamente se selecciona el botón que representa la opción *Algoritmo Genético*, que a su vez despliega una ventana con una lista denominada *Función Objetivo*, ahí se debe seleccionar la opción *Ciclo_Gax_Yair_EV*, el icono *Iniciar* indica que se puede iniciar la simulación (Figura 39).

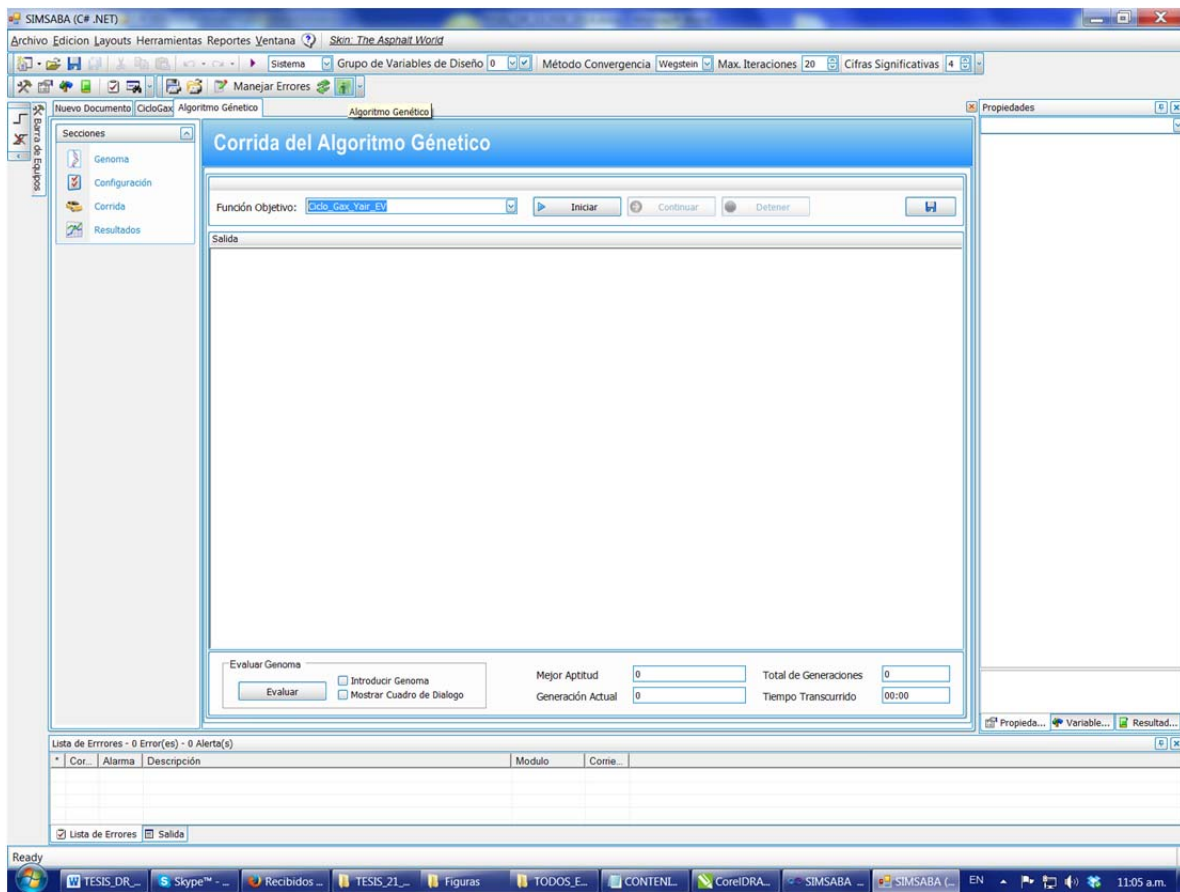


Figura 39. En la opción *Algoritmo Genético* se debe seleccionar *Ciclo_Gax_Yair_EV* para *Iniciar* la simulación.

Los resultados de la simulación se guardan en la ruta indicada y en carpetas cuyos nombres creados automáticamente, están compuestos por las la capacidad, temperatura ambiente, temperatura de salida agua en el evaporador, eficiencia, parámetro de que indica el incremento en las variables iterativas y el error permitido en las ecuaciones, por ejemplo, en la Figura 40 se ilustra una carpeta con el nombre:

Ton10.55048_Tam20_TSalag1_COP1.110584_CambTemp0.15_ErrPerm0.0001.

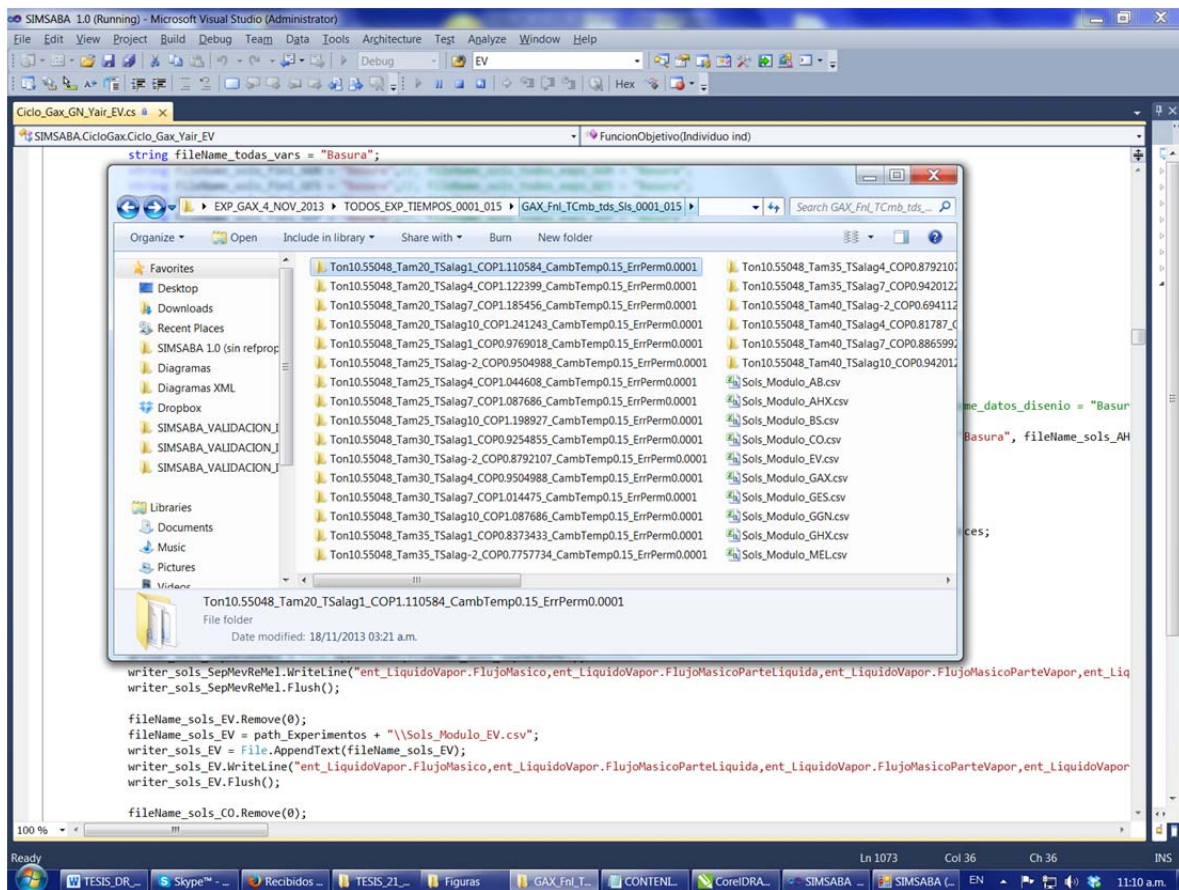


Figura 40. Ruta en donde se guardan los resultados de la simulación.

Dentro de cada carpeta creada, como se muestra en la Figura 41, se encuentran 20 archivos creados automáticamente, todos con extensión *.csv para que el contenido de los archivos se pueda manipular con el paquete estadístico R o con Excell. El archivo Datos_Disenio.csv contiene los datos de diseño principales del ciclo y el tiempo de ejecución del algoritmo backtracking, el archivo Sols_completas_sistema.csv contiene cada una de las soluciones del ciclo encontradas con la metodología, en ella se indican los componentes y los valores de cada una de las variables pertenecientes a cada corriente, los archivos Sols_todas_vars.csv y Sols_vars_temp.csv contienen información acomodada para mayor facilidad al momento de graficar la información, finalmente, el resto de los archivos contienen las soluciones de cada componente del ciclo.

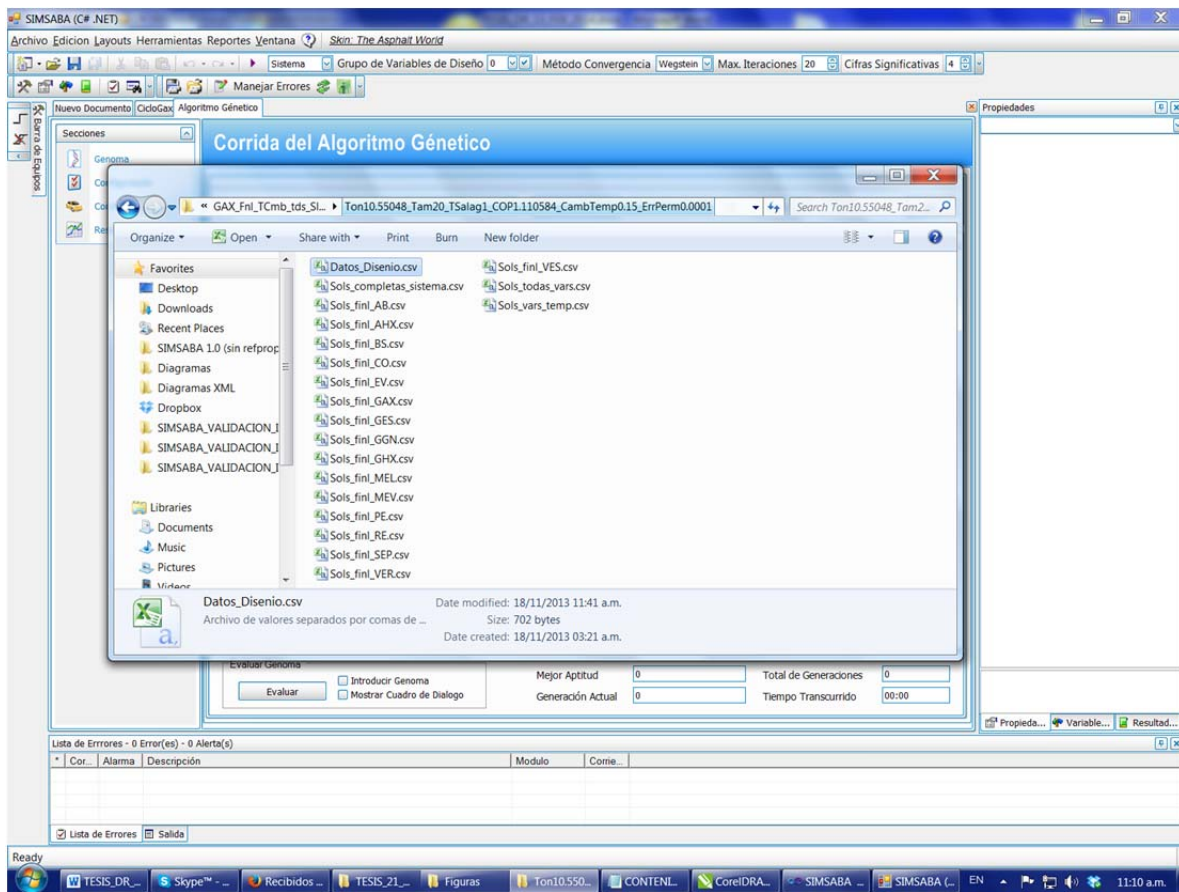


Figura 41. Archivos que contienen las soluciones completas del ciclo y de los componentes.

Apéndice H

Análisis de componentes principales

En estadística, el análisis de componentes principales (Principal component analysis, PCA) es una técnica utilizada para reducir la dimensionalidad de un conjunto de datos. Intuitivamente la técnica sirve para hallar las causas de la variabilidad de un conjunto de datos y ordenarlas por importancia, se emplea sobre todo en análisis exploratorio de datos y para construir modelos predictivos. Busca la proyección según la cual los datos queden mejor representados en términos de mínimos cuadrados.

Construye una transformación lineal que escoge un nuevo sistema de coordenadas para el conjunto original de datos en el cual la varianza de mayor tamaño del conjunto de datos es

capturada en el primer eje (llamado el Primer Componente Principal), la segunda varianza más grande es el segundo eje, y así sucesivamente. Para construir esta transformación lineal debe construirse primero la matriz de covarianza o matriz de coeficientes de correlación. Debido a la simetría de esta matriz existe una base completa de vectores propios de la misma. La transformación que lleva de las antiguas coordenadas a las coordenadas de la nueva base es precisamente la transformación lineal necesaria para reducir la dimensionalidad de datos. Además las coordenadas en la nueva base dan la composición en factores subyacentes de los datos iniciales. Una de las ventajas del PCA para reducir la dimensionalidad de un grupo de datos, es que retiene aquellas características del conjunto de datos que contribuyen más a su varianza, manteniendo un orden de bajo nivel de los componentes principales e ignorando los de alto nivel. El objetivo es que esos componentes de bajo orden a veces contienen el aspecto "más importante" de esa información.