SIMULACIÓN DE UNA CALDERA BAGACERA MEDIANTE EL SOFTWARE ASPEN PLUS PARA DETERMINAR SU DESEMPEÑO ENERGÉTICO

JAIME A. CONTRERAS JAIMES

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BUCARAMANGA
INGENIERÍA EN ENERGÍA
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECÁNICAS
BUCARAMANGA
2019

SIMULACIÓN DE UNA CALDERA BAGACERA MEDIANTE EL SOFTWARE ASPEN PLUS PARA DETERMINAR SU DESEMPEÑO ENERGÉTICO

JAIME A. CONTRERAS JAIMES

PROYECTO DE GRADO PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO EN ENERGÍA

Director del Proyecto
LUIS EDUARDO JAIMES REATIGA
Ingeniero Químico, .M.SC

Co-Director del Proyecto
LEONARDO ESTEBAN PACHECO SANDOVAL
Ingeniero Mecánico, PhD

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BUCARAMANGA
INGENIERÍA EN ENERGÍA
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECÁNICAS
BUCARAMANGA
2019

NOTA DE ACEPTACIÓN

_____

_____

_____

_____
Director

_____
Jurado Evaluador

_____
Jurado Evaluador

Bucaramanga, Noviembre de 2019.

DEDICATORIA

AGRADECIMIENTOS

ABSTRACT

The present project of degree deals with the problems of energy efficiency in a steam generator from biomass. These types of boilers have a high fuel consumption and, in most cases, they work under standardized operating conditions. The DUCARDO LEON VALENCIA master's thesis is taken as a reference, to obtain standard operating conditions for the steam generation system.

The degree thesis proposes simulation of the steam generation system in the Aspen Plus V10 software, varying input conditions (load and air flow), with these operating conditions directly influencing the steam generator.

Once simulated, three scenarios are developed, including the base case, varying air flow and varying load factors. Each scenario is analyzed taking into account temperature profiles of the combustion gases in each heat exchange equipment and the overall efficiency of the system.

CONTENIDO

INTRODUCCION 12
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA 14
2. OBJETIVOS 16
2.1 OBJETIVO GENERAL 16
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS 16
3. MARCO TEÓRICO 17
3.1 COGENERACIÓN 17
3.1.1 Tipos de cogeneración 17
3.2 CALDERA 18
3.2.1 Tipos de Calderas 20
3.2.2 Clasificación de las Calderas 21
3.2.3 Parámetros principales Caldera Bagacera. 22
3.2.4 Bagazo 23
3.2.5 Impacto ambiental en calderas 24
3.3 SOFTWARE ASPEN PLUS 25
3.3.1 Modelos simples de operaciones unitarias 26
3.3.2 Cambiadores de calor 29
3.3.3 Reactores en Aspen Plus V10 31
3.3.4 Componentes de simulación en Aspen Plus V10 32
4. ESTADO DEL ARTE 33
4.1 Proyectos de Simulación en Aspen Plus 33
5. METODOLOGIA 38
6. DESARROLLO 40
6.1 Analizar y utilizar las unidades de proceso adecuadas que permitan modelar el sistema de generación de vapor en Aspen Plus. 40
6.2 Simulación del sistema de generación de vapor en Aspen plus. 45
6.2.1 Flujos de materia y calor 45
6.2.2 Tamaño de las partículas del combustible 45
6.2.3 Definición de la corriente de entrada de Bagazo 46

6.2.4 Bloque Ryield (Especificaciones) 46
6.2.5 Combustión 47
6.2.6 Especificaciones de bloque SSPLIT (Con unidad SSPLIT) 47
6.2.7 Especificaciones del bloque Hierarchy (Hogar) 47
6.2.8 Especificaciones del bloque SUPERHEATERS (SUP-HE12) 48
6.2.9 Precalentadores de aire primario y secundario 49
6.2.10 Economizador 51
7. RESULTADOS 52
7.1 Comparación de los datos obtenidos por la simulación con la data real de la generadora de vapor. 52
7.2 Análisis de sensibilización de parámetros y analizar cómo estos afectan el sistema de generación de vapor. 55
7.2.1 Análisis energético - Escenario 1 (Variando el factor de aireación) 55
7.2.2 Eficiencia energética (Escenario 1) 60
7.2.3 Análisis ambiental (Escenario 1) 62
7.2.4 Análisis energético Escenario 2 (Variando flujo de combustible) 64
7.2.5 Eficiencia energética (Escenario 2) 69
7.2.6 Análisis ambiental (Escenario 2) 70
7.2.7 Indicadores energéticos en el generador de vapor 71
8. CONCLUSIONES 75
9. RECOMENDACIONES 77
10. REFERENCIAS 78
11. ANEXOS 82

Lista de Figuras

Figura 1. esquema simplificado del generador de vapor 19
Figura 2 Caldera acuotubular moderna.....20
Figura 3. Caldera pirotubular moderna.....21
Figura 4. Mezclador de corrientes.....27
Figura 5. Divisor de corrientes 27
Figura 6. Separadores de componentes, Sep, múltiples salidas, Sep2 dos salidas 27
Figura 7. Bomba 29
Figura 8. Esquema de un intercambiador de doble tubo 30
Figura 9. Esquema de un intercambiador de carcasa y tubos de paso simple 30
Figura 10. Generador de vapor real. 40
Figura 11. Diagrama de bloques proceso de generación de vapor. 41
Figura 12. Diagrama de flujo del proceso de generación de vapor en Aspen Plus V10. 43
Figura 13. Diagrama de flujo del proceso de generación de vapor (Hogar, paredes y nariz) en Aspen Plus V10.....43
Figura 14. Diagrama de flujo del proceso de generación de vapor unidades de sobrecalentamiento en Aspen Plus V10. 44
Figura 15. Coeficientes numéricos para el modelo HCOALGEN.....45
Figura 17. Análisis próximo y análisis último del bagazo.....46

Lista de Gráficas

Gráfica 1. Comportamiento de los gases exhaustos saliendo del hogar. 57
Gráfica 2. Comportamiento de los gases exhaustos saliendo del IC1**.**.....57
Gráfica 3. Comportamiento de los gases exhaustos saliendo del sobrecalentador 2. 58
Gráfica 4. Comportamiento de los gases exhaustos saliendo del sobrecalentador 1. 58
Gráfica 5. Comportamiento de los gases exhaustos saliendo del precalentador de aire 1. 59
Gráfica 6. Comportamiento de los gases exhaustos saliendo del precalentador de aire 2. 59
Gráfica 7. Comportamiento de los gases exhaustos saliendo del economizador. 60
Gráfica 8. Eficiencia energética escenario 1. 61
Gráfica 9. Emisiones de CO2 variando el factor de aireación. 62
Gráfica 10.Emisiones de CO variando el factor de aireación. 63
Gráfica 11. Comportamiento de los gases exhaustos saliendo del Intercambiador de calor 1.....66
Gráfica 12. Comportamiento de los gases exhaustos saliendo del sobrecalentador de vapor 2.....66
Gráfica 13. Comportamiento de los gases exhaustos saliendo del sobrecalentador de vapor 1.....67
Gráfica 14. Comportamiento de los gases exhaustos saliendo del precalentador de aire 1. 67
Gráfica 15. Comportamiento de los gases exhaustos saliendo del precalentador de aire 2. 68
Gráfica 16. Comportamiento de los gases exhaustos saliendo del economizador (gases de escape). 68
Gráfica 16. Índice de eficiencia energética escenario 2. 73
Gráfica 17. Consumo de combustible para la producción de un kg de vapor vivo. 74

Lista de Tablas

Tabla 1. Características del generador de vapor 23
Tabla 2. Equipos de transmisión de calor. 31
Tabla 3. Requerimientos para los reactores en Aspen Plus 31
Tabla 4. Descripción de los componentes utilizados en las simulaciones en Aspen Plus 32
Tabla 5. Tabla de identificación de líneas de fluidos. 44
Tabla 6. Condiciones de entrada aire en estado muerto 50
Tabla 7. Condiciones de entrada aire en estado muerto 51
Tabla 8. Condiciones de entrada del agua al economizador. 51
Tabla 9. Resultados obtenidos en el software Aspen Plus para entrada y salida de gases exhaustos. 52
Tabla 10. Resultados obtenidos en el software Aspen Plus para entrada y salida de del componente AGUA. 53
Tabla 11. Resultados obtenidos en el software Aspen Plus para entrada y salida de del componente AIRE. 53
Tabla 12. Tabla de comparación de datos obtenidos en la simulación con la generadora de vapor real. 54
Tabla 13. Análisis de sensibilidad variando el factor de aireación. 56
Tabla 14. Factor de aireación y relación A/C. 56
Tabla 15. Análisis de sensibilidad variando la entrada de combustible. 64
Tabla 16. Relación de aire-combustible. 65
Tabla 17. Indicador de vapor generado por cantidad de combustible utilizado escenario 1. 72
Tabla 18. Índice de aprovechamiento de la capacidad de vapor escenario 1 - 2. . 72
Tabla 19. Índice de eficiencia energética escenario 2. 73

INTRODUCCION

De acuerdo al operador del sistema interconectado nacional y administrador del mercado de energía mayorista de Colombia (conocido como XM), para 2018 la demanda de energía eléctrica en Colombia aumentó en 3,3%, con un total de 69.120 GWh en comparación con los 66.893 GWh que se entregaron a la red en 2017 (XM & SIN, 2017); siendo los sectores de agricultura, ganadería, caza, pesca, seguido de los sectores transporte, almacenamiento y explotación de minas, los que más influyeron en el aumento de la demanda [1].

La industria eléctrica colombiana, depende en su mayoría de la hidroelectricidad, lo cual la hace vulnerable a los cambios climáticos que ocurren en la región como el fenómeno del niño [2]. El uso de gas natural como fuente energética debería servir de respaldo de los sistemas de generación, sin embargo, las plantas de gas no han podido obtener contratos de gas a largo plazo con precios competitivos [3]. En general, el mercado eléctrico colombiano está sujeto a un alto nivel de incertidumbre, por lo cual es de gran importancia incentivar los métodos alternos de generación de energía eléctrica. Bajo este panorama cobra especial importancia el proceso de cogeneración que se realiza en los ingenios azucareros, donde durante el proceso de producción de azúcar y etanol, se produce simultáneamente energía térmica y eléctrica [1].

La industria de la caña de azúcar representa una de las actividades agro-industriales más importantes de Colombia, produciendo azúcar para los mercados nacional e internacional. A esta actividad industrial, se suma la producción conjunta de energía eléctrica y térmica para autoabastecer energéticamente los procesos industriales en los ingenios azucareros, mediante la implementación de sistemas de cogeneración que usan bagazo de caña de azúcar como combustible principal. El incremento en la demanda de energía y el impacto ambiental asociado al uso de combustibles

fósiles, han originado políticas de ahorro de energía y conservación del medioambiente. Por lo tanto, los sistemas de cogeneración a partir de bagazo de caña de azúcar son una gran alternativa para la producción conjunta de energía térmica y eléctrica [4].

Los generadores de vapor en la industria azucarera son equipos críticos, pues proveen tanto la energía térmica para el proceso, como la potencia necesaria para el accionamiento de los equipos y maquinarias involucrados. Sirven también, para generar y suministrar energía sobrante a la red pública, produciendo nuevos ingresos por este servicio a través de la cogeneración [5].

La cuantificación energética y ambiental producida por una caldera, permite contar con un conocimiento previo para la regulación de las emisiones o contaminantes producidos en procesos industriales, identificando las zonas donde existen altas pérdidas o degradaciones de la energía y por lo tanto, determinando así el costo temo-ecológico al ambiente, con el fin de cumplir con la normativa de control y regulación de agentes contaminantes de la atmosfera terrestre [6].

En este trabajo de grado es utilizado un simulador de procesos académico ASPEN PLUS 10.0 para simular una planta de generación de vapor (Caldera Bagacera), comparando datos reales con datos obtenidos en la simulación. También, se requiere analizar el comportamiento de la caldera de generación de vapor variando parámetros de entrada al sistema.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Generalmente en un ingenio azucarero, la generación de vapor tiene como fin primordial suministrar energía a los procesos de fabricación de edulcorantes y sus derivados; si existen excedentes de dicha energía éstos se colocan en el mercado nacional en forma de energía eléctrica [7]. La fuente principal de energía en el ingenio azucarero es la biomasa, que se deriva del bagazo y que es producto de la fibra de la caña de azúcar molida; este recurso se aprovecha directamente para la combustión en los generadores de vapor o calderas [8]. Los generadores de vapor al ser máquinas de un alto consumo de combustible implican un control riguroso de parámetros y variables de operación relacionadas directamente con la eficiencia general del sistema.

Para el caso del ingenio azucarero que se quiere analizar, es fundamental *determinar el comportamiento de los gases de combustión y la eficiencia final del sistema sin que ello implique detener los procesos de producción establecidos*; es por ello que se plantea como solución un *método de simulación*, aproximado al sistema real de generación de vapor, basado en parámetros de entrada reales tales como *temperatura*, *presión*, *flujo másico de combustible*, *flujo másico de aire* y *flujo másico de agua*, permitiendo calcular variables en procesos intermedios (condiciones de salida de los gases exhaustos de cada etapa del proceso) y la variable final del proceso representada en la *eficiencia energética* del sistema.

De manera general, se debe analizar el sistema de generación de vapor, involucrando variables de entrada al proceso como lo son el factor de aireación (flujo de aire de combustión) y flujo de agua de alimentación, los cuales influyen directamente en la eficiencia energética del sistema. En este contexto, una solución tipo software (**Aspen Plus V10**) es clave en el modelado y simulación del comportamiento del sistema de generación de vapor a condiciones que

normalmente en la industria azucarera no se presentan y que pueden mejorar la eficiencia del sistema, contribuyendo en ello de manera significativa.

También se debe realizar un análisis de sensibilidad de parámetros para analizar el comportamiento del proceso de producción de vapor a diferentes condiciones de operación. Para el análisis de la caldera bagacera, la misma es divida en siete (7) bloques o unidades de proceso que simulan condiciones reales de operación.

Mediante el software se puede obtener un perfil de temperaturas de los gases de combustión a través de cada equipo de intercambio de calor, a partir de datos de operación de la caldera tales como: tipo y características de combustible, temperatura del aire circundante, producción de vapor, etc. Las emisiones ambientales producidas por la caldera de generación de vapor simulada permitirán regular las emisiones o contaminantes producidos en procesos industriales idénticos, con el fin de cumplir con la normatividad de control y regulación de agentes contaminantes de la atmosfera terrestre [10].

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GENERAL

Simular una caldera bagacera mediante el software Aspen Plus para determinar el desempeño energético.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar variables de entrada a la simulación a partir de datos reales de la caldera bagacera que influirán en la producción de vapor.

- Comparar los datos obtenidos por la simulación, con los datos reales de la caldera bagacera.

- Evaluar el desempeño energético de la caldera bagacera mediante el software Aspen plus a distintos factores de aireación y flujo de agua de alimentación.

- Determinar indicadores de desempeño energético-ambiental con respecto a la relación consumo de energía/producción de vapor.

3. MARCO TEÓRICO

3.1 COGENERACIÓN

Cogeneración es la producción combinada de energía eléctrica (o mecánica) y energía térmica (calor y/o frío) obtenida por el uso secuencial de energía a partir de un mismo combustible. En otras palabras, la cogeneración se basa en el principio natural de conservación de la energía: “La energía no se crea ni se destruye, tan solo se transforma”. Además, implica una racionalidad termodinámica y económica, ya que niveles más elevados de eficiencia inciden en la reducción significativa del consumo de combustible y de los demás costos asociados, incluyendo el costo ambiental [4].

Este proceso corresponde a la generación de energía como parte del proceso productivo, bien sea de azúcar o de etanol. Los ingenios desde sus inicios han utilizado el bagazo de la caña (combustible renovable) como combustible para alimentar sus calderas y utilizar el vapor como energía para el funcionamiento de sus procesos [13]. La cogeneración entonces utiliza la energía en forma de calor producida por el bagazo para generar vapor y luego mediante el uso de turbogeneradores, la energía eléctrica. El vapor de escape del turbogenerador entonces va al proceso productivo mientras que la electricidad es mayoritariamente utilizada para su consumo propio y una porción se vende a la red nacional. Parte del bagazo también se utiliza en la industria papelera como fuente de fibra, lo cual evita la tala de árboles [14]

3.1.1 Tipos de cogeneración

Existen dos tipos de ciclos básicos de cogeneración para producción conjunta de energía térmica y eléctrica definidos en función de la secuencia de utilización de la energía del combustible [4]:

- **Topping Cycle**

En este ciclo la generación de electricidad toma un lugar precedente sobre la producción de calor. Por lo tanto, la energía del combustible es usada para producir energía eléctrica o mecánica y el calor remanente es recuperado y convertido en vapor y/o agua caliente para la utilización en los procesos industriales. Estos ciclos son los más usados en la industria azucarera.

- **Bottoming Cycle**

En este ciclo la generación de calor es la prioridad. La energía del combustible es usada para producir vapor y suministrar de energía térmica los procesos industriales. El calor desechado en el proceso industrial es recuperado y utilizado para la producción de energía eléctrica o mecánica en una turbina.

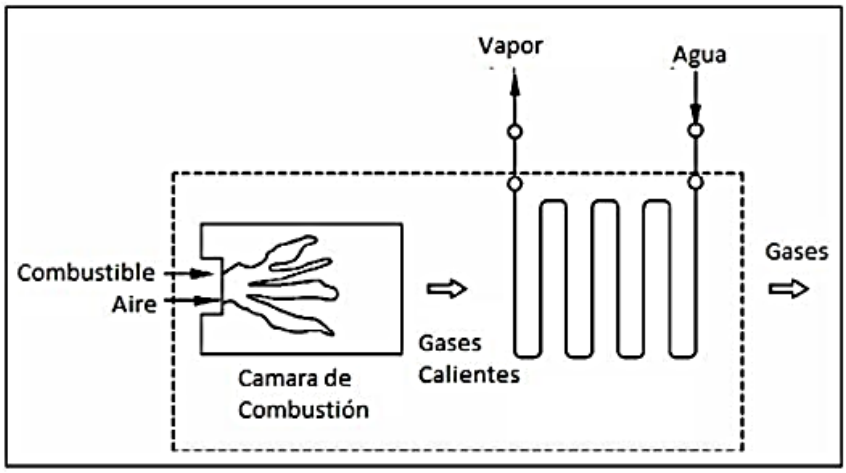
3.2 CALDERA

Hoy en día, el concepto de generación de vapor para grandes accionamientos mecánicos (Bombas, Ventiladores, Molinos, etc.) está cambiando y los ingenieros encargados de las plantas de potencia enfocan sus esfuerzos en el uso racional del vapor de sus industrias. Es así como el uso de Turbinas de vapor y Calderas más eficientes y compactas, marcan la pauta de las grandes centrales térmicas de generación de electricidad. El uso eficiente del combustible fósil y la sustitución de este por fuentes renovables se convierte en una preocupación constante para los ingenieros jefes de generación de las centrales térmicas en pro de un proceso amigable con el medio ambiente. Actualmente, el término “caldera” se aplica a dispositivos para generar (1) vapor para producción de potencia, procesos industriales o calefacción; o (2) agua caliente para calefacción o para uso general [8].

Se puede definir como caldera de vapor todo equipo que, utilizando la energía química liberada durante la combustión de un combustible, promueve el cambio de fase del agua del estado líquido para el de vapor a una presión mayor que la atmosférica. En algunas plantas térmicas (ciclos combinados), existen calderas que aprovechan los gases de combustión generados en un ciclo Brayton para realizar una transferencia de calor entre estos gases y el agua de alimentación para la generación de vapor [15].

Estas son llamadas calderas de recuperación. La industria de pulpa y papel utiliza calderas de recuperación para quemar residuos del proceso tales como el licor negro. De esta forma, se aprovecha el poder calorífico de un producto y se recupera un insumo químico de gran valor como es la soda caustica. El vapor resultante (calderas convencionales y de recuperación) es utilizado para el accionamiento de máquinas térmicas, para la generación de potencia mecánica y eléctrica, así como para fines de calentamiento en procesos industriales [16] . Un esquema simplificado del generador de vapor se muestra en la figura 1.

Figura 1. esquema simplificado del generador de vapor

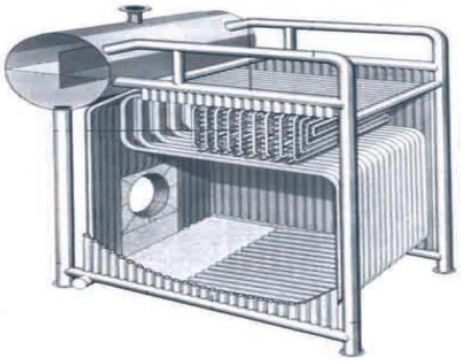


Fuente: (Silva-Lora, 2003) [16]

3.2.1 Tipos de Calderas

Calderas Acuotubulares En calderas acuotubulares, los tubos contienen en su interior el vapor y el agua, mientras que el fuego es aplicado en la superficie exterior de los mismos y los gases calientes se dirigen a través del exterior de los tubos, este tipo puede proyectarse para quemar cualquier tipo de combustible en diversos tipos de parrilla. Son las más utilizadas en las centrales termoeléctricas, ya que permiten altas presiones a su salida, en torno a 200 bares y tienen menor inercia térmica. La estructura de los tubos no ha de ser tan robusta como en las calderas pirotubulares. En su contra están una mayor inversión inicial en la instalación y mayores problemas de suciedad en el lado del agua. Su rendimiento está entre un 80% y un 90% [17].

Figura 2 Caldera acuotubular moderna



Fuente: Rodas-Flores & Vargas Machuca 2016 [17]

Calderas Pirotubulares. Las calderas pirotubulares están dotadas de tubos rodeados de agua y a través de cuyo interior pasan los gases de la combustión. Este tipo de calderas se usan generalmente en donde la demanda de vapor es relativamente pequeña, no se utiliza para el accionamiento de turbinas, su alimentación depende de su tamaño o en la adaptabilidad de su diseño. Tienen, sin embargo, la ventaja de su gran volumen de almacenamiento de agua, además de su peculiaridad de compensar los efectos de las grandes y repentinas fluctuaciones

en la demanda de vapor. Debido a su gran volumen de agua, el tiempo que necesita para alcanzar su presión de trabajo partiendo de un arranque en frío, es considerablemente menor que el requerido para una caldera acuotubular. Las presiones máximas de operación oscilan en torno a 20 bares. Su rendimiento está entre un 70% y un 80% [17].

Figura 3. Caldera pirotubular moderna

Fuente: Rodas-Flores & Vargas Machuca 2016 [17]

3.2.2 Clasificación de las Calderas

Existen muchos criterios para clasificar estas calderas, pero en función del desarrollo que estos equipos tuvieron en los últimos años, impulsados por los nuevos negocios que presenta la cogeneración y el aprovechamiento de la biomasa, podemos intentar una clasificación en función del tipo de diseño y condiciones operativas hoy imperantes en la industria azucarera. Estos criterios de clasificación son [5]:

1) Basada en la tecnología de combustión.

- Calderas convencionales con combustión suspendida o semi suspendida sobre grillas horizontales o inclinadas, fijas o móviles

- Calderas de lecho fluidizado tipo BFBC o CFBC

2) Basada en la producción de vapor.

- Baja capacidad– Gv ≤ 100 ton / h
- Media capacidad – 250 ≥ Gv ≥ 150 ton / h
- Alta capacidad – 400 ≥ Gv ≥ 250 ton / h

3) Basada en la presión de trabajo

- Baja presión – pt < 25 bar
- Media presión – 70 ≥ pt ≥ 30
- Alta presión – 150 ≥ pt ≥ 80

4) Basada en la forma de soporte

- Colgante
- Soportada en la base (bottom supported)

5) Basada en la separación agua-vapor

- Un sólo domo – (single drum)
- Dos domos (double drum o bi-drum)

3.2.3 Parámetros principales Caldera Bagacera.

Estos parámetros de operación son de una caldera típica de la industria azucarera colombiana. Esta caldera hace parte de un proyecto de cogeneración de 34 MW a partir de bagazo de caña de azúcar como combustible principal. Esta caldera puede

manejar un flujo de vapor de 400.000 lb/hr a una presión de 950 Psig y 955°F. Los parámetros principales se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 1. Características del generador de vapor

CARACTERISTICA	UNIDAD	WALCHANDNAGAR
Fabricante		Walchandnagar
Modelo		BT 501
Pais de fabricación		INDIA
Tipo de Caldera		Acuatubular, dos domos, un solo paso, circulacion natural, suspendida, combustible principal: 100% Bagazo, combustible alterno: 100% Carbon, combustible auxiliar: 30% Bagazo pitting.
Combustible principal		Bagazo
Combustible alterno		Carbon
Parrilla		Viajera - Descarga frontal
Capacidad maxima continua	M lb/hr (Ton/hr)	100% Bagazo: 400 (181) 100% Carbon: 350 (159)
Presion de diseño	Psig (Kg/cm2)	1159(81.5)
Presion de operación	Psig (Kg/cm2)	955(67)
Temperatura del vapor vivo	°F (°C)	950(510)
Temperatura de agua de alimentacion	°F (°C)	250(121)
Capacidad pico por dos horas en 24 horas	M lb/hr (Ton/hr)	420(190)
Eficiencia termica 100%Bag. - PC. 3800 btu/lb	%	66,71
Eficiencia termica 100%C - PC. 10240 btu/lb	%	83,17
Caudal aire total 100%B	lb/hr	756051
Caudal aire total 100%C	lb/hr	474151
Caudal gas 100%B	lb/hr	874404
Caudal gas 100%C	lb/hr	469764
Emisiones material particulado p/chimenea	mg/Nm3	50
Produccion especifica 100%B	lb vap / lb comb	2,01
Produccion especifica 100%C	lb vap / lb comb	6,67

Fuente: (Molina-López, 2015) [15]

3.2.4 Bagazo

El bagazo es el residuo del proceso extractivo de la caña de azúcar y está compuesto por los siguientes elementos:

Contenido de agua: 48-53%
Contenido de fibra: 39-53%
Sólidos disueltos: 1.5 – 6%

La fibra está formada por los componentes insolubles en agua y se distinguen dos tipos: a) la fibra verdadera y b) la falsa fibra o médula que se ubica en la zona central de los tallos. Al proceso de molienda o difusión ingresa la caña de azúcar y se extrae de la misma jugo mixto y bagazo [5].

El tamaño de las partículas de bagazo oscila en promedio entre 1-5 mm hasta un máximo de 25 mm de longitud, un ancho entre 0.3-10mm y un espesor entre 0.1-5 mm, dimensiones estas que varían mucho con el tipo y grado de preparación de la caña, tipo de fibra y del número de molinos del trapiche [5].

Como es conocido, el contenido de fibra en caña no sólo afecta la eficiencia del proceso de molienda y extracción de la sacarosa, sino también, la cantidad de bagazo producido para su uso en calderas, lo que resulta de especial interés a los fines de cuantificar su volumen disponible para cogenerar [5].

3.2.5 Impacto ambiental en calderas

Las diversas máquinas térmicas entre ellas las calderas generadoras de vapor que queman biomasa de distinto origen para el desarrollo de procesos productivos y, en particular, las calderas bagaceras, que a través de la combustión de un residuo celulósico, producen la energía necesaria para la industrialización de la Caña de azúcar, generan emisiones de particulado, cuya calidad y magnitud depende, entre otros factores, del tipo de combustión y de las condiciones de operación del sistema empleado [18].

El material particulado es uno de los mayores problemas en cuanto a contaminación atmosférica se refiere, y aunque el uso de calderas bagaceras representa un impacto Positivo sobre la contaminación global por producir energía con un biocombustible, las cenizas provenientes de la combustión de bagazo pueden provocar una gran contaminación que puede ser incluso más dañina que la contaminación producida por la quema de combustibles fósiles [18].

3.3 SOFTWARE ASPEN PLUS

El origen de Aspen Plus se remonta a los años 1970, investigadores (L.Evans) del Laboratorio de Energía del Instituto Tecnológico de Massachusetts (MIT) desarrollaron un prototipo para la simulación de procesos. Le llamaron Sistema Avanzado para Ingeniería de Procesos (Advanced System for Process Engineering ASPEN). Este software fue comercializado en 1980 por la fundación de una compañía denominada AspenTech. AspenTech, que compró a HYSIM/HYSIS en 2003, es ahora una compañía comercial que emplea a miles de personas en todo el mundo y ofrece una solución integral completa para industrias de procesos químicos. Este paquete de software sofisticado puede ser usado en casi todos los aspectos de ingeniería de proceso, desde la etapa del diseño hasta el análisis de costos y rentabilidad [19].

Tiene una biblioteca modelo incorporada para columnas de destilación, separadores, cambiadores de calor, reactores, etc. Los modelos de comportamiento o propiedades pueden extenderse dentro de su biblioteca de modelos. Estos modelos del usuario son creados con subrutinas Fortran u hojas de trabajo Excel y se suman a su biblioteca modelo. Usando Visual Basic se puede añadir formas de entrada para el modelo del usuario que lo hace indistinguible de las incorporadas. Tiene un banco de datos de propiedades incorporado para los parámetros termodinámicos y físicos. Durante el cálculo del diagrama de fabricación, cualquier

parámetro que falte puede ser estimado automáticamente por diversos métodos de contribución de grupos [19].

Aspen Plus es un simulador de procesos completamente interactivo, capaz de llevar a cabo tanto simulaciones en estado estacionario como en estado dinámico, permitiendo sus operaciones y propiedades modelar una amplia gama de procesos y predice el comportamiento de un proceso o una serie de operaciones unitarias a través de las relaciones básicas existentes entre las mismas. Se ubica dentro del grupo de simuladores de estrategia secuencial, al igual que otros como PRO II y CHEMCAD. Por este motivo, está compuesto por un grupo de unidades o programas de simulación (subrutinas) representados mediante bloques o iconos a los que debe suministrase la información requerida para la resolución de los balances de materia y energía [19].

Es un programa básicamente de simulación de procesos químicos, en el cual además de simulaciones de diagramas de flujo, se puede realizar: (1) estimación de propiedades de compuestos, (2) análisis de sensibilidad de variables de proceso, (3) obtener especificaciones de diseño de proceso, y, (4) síntesis y análisis de procesos químicos, entre otras tareas del diseño de procesos y equipos.

3.3.1 Modelos simples de operaciones unitarias

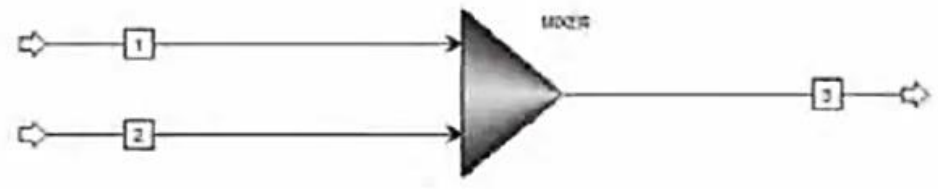
- **Mezcladores y Divisores de Corrientes**

a) Mixer

Es una operación que combina dos o más entradas para producir una única salida, Figura 4. Se efectúan los correspondientes balances de materia y energía completos, es decir, se calcula rigurosamente una de las temperaturas desconocida, bien a la entrada o a la salida. Si se conocen todas las propiedades,

temperatura, presión y composición, de todas las corrientes de entrada, se calculan automáticamente todas las propiedades de la corriente de salida, ya que se conocen composición, temperatura y entalpía para esta corriente.

Figura 4. Mezclador de corrientes

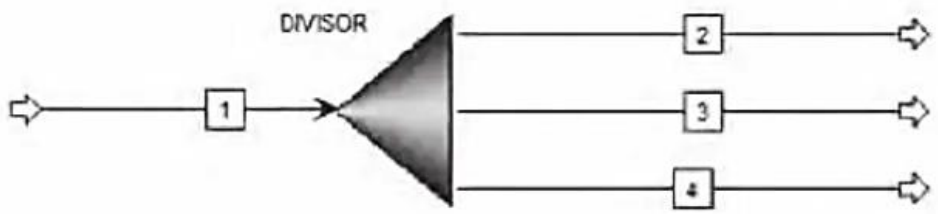


Fuente: (Espinola-Lozano, 2017) [19]

b) FSplit

Esta operación divide una corriente de alimentación en múltiples corrientes de producto, todas con la misma composición y condiciones que la alimentación, Figura 5.

Figura 5. Divisor de corrientes

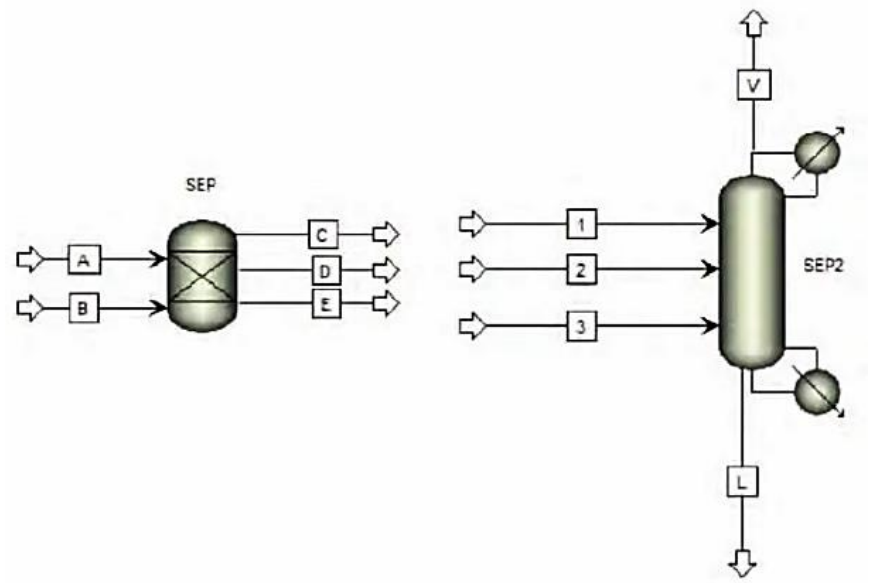


Fuente: (Espinola-Lozano, 2017) [19]

- **Separadores de Componentes**

Con estas operaciones se pueden separar los componentes de múltiples entradas en múltiples salidas, para el caso de Sep o dos salidas para el caso de Sep2 Figura 6.

Figura 6. Separadores de componentes, Sep, múltiples salidas, Sep2 dos salidas



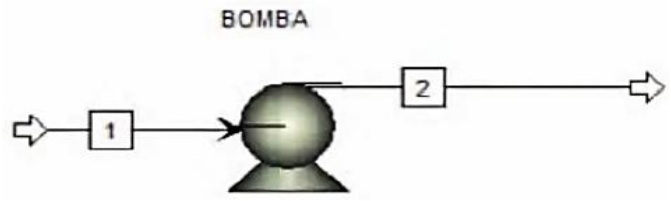
Fuente: (Espinola-Lozano, 2017) [19]

- **Cambiadores de presión**

El bloque Pump o bomba, Figura 7, es un modelo perteneciente al grupo de modelos llamados cambiadores de presión, también encontramos los compresores (Compr), válvulas (Valve) y tramos de tuberías (Pipe y Pipeline).

El bloque Pump realiza un balance de materia y energía a dos corrientes. Se necesita indicar las corrientes de entrada y salida, y se puede especificar la caída de presión a través de la bomba. Si sólo se especifica la presión de la corriente de salida, se calcula la temperatura a la salida mediante un flash isoentálpico, dado que la entalpía de entrada es conocida. La operación bomba calculará solo una incógnita de entre las dos corrientes, que puede ser: temperatura a la entrada, presión a la entrada, temperatura a la salida, presión a la salida.

Figura 7. Bomba



Fuente: (Espinola-Lozano, 2017) [19]

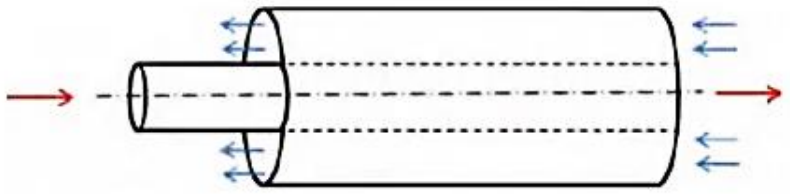
3.3.2 Cambiadores de calor

Cuando se hace necesario modificar la temperatura de las sustancias que se quieren transformar, se requiere el uso de aparatos que de un modo u otro se comportan como una fuente de energía (hornos, ebullidores) y a la utilización de otros que permiten la cesión de energía por parte de una corriente de elevada temperatura a otra de temperatura inferior: intercambiadores, condensadores. Estas operaciones presentan varios aspectos que es preciso considerar:

- La naturaleza de la energía cedida o aceptada, puede ser de origen eléctrico o donada por vapor al condensar o por fluidos que ceden su calor sensible como ocurre en los cambiadores o intercambiadores.
- El mecanismo de la transmisión de la energía como calor desde un foco caliente o una zona de elevada temperatura a un foco frío o una zona de temperatura inferior.
- La cantidad de energía que debe ponerse en juego.
- El nivel de temperatura necesario y estos niveles fijan un tipo de fuente productora de energía, tipo de aparato, materiales de construcción, coste, etc.
- El dimensionado de un aparato de intercambio depende también de la cinética del proceso y, por tanto, de los factores que influyen en la velocidad de transporte de energía.

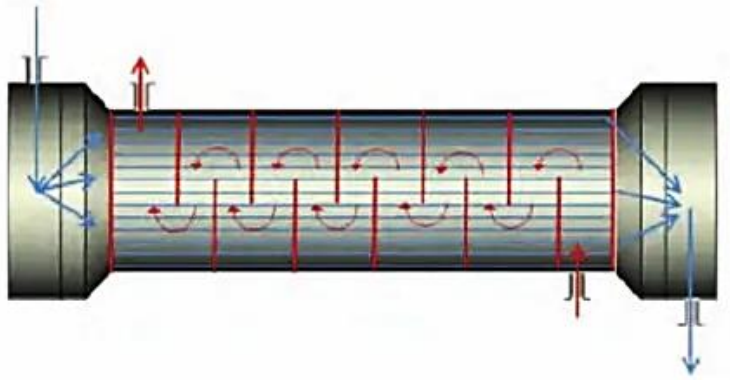
Las características comentadas influyen, en primer lugar, en la elección cualitativa del aparato de producción o intercambio y, en segundo lugar, en las características de tipo cuantitativo, es decir, geometría y dimensiones. El conocimiento de estas características forma parte de la tarea de diseño. En los aparatos llamados cambiadores de calor hay un transporte energético desde un fluido frío a un fluido caliente a través de una pared metálica soporte del sistema. En general los intercambiadores simples consisten, bien en un sencillo par de tubos concéntricos en cuyo interior circulan los dos fluidos, Figura 8, bien en un haz de tubos paralelos introducidos en una carcasa, Figura 9

Figura 8. Esquema de un intercambiador de doble tubo



Fuente: (Espinola-Lozano, 2017) [19]

Figura 9. Esquema de un intercambiador de carcasa y tubos de paso simple



Fuente: (Espinola-Lozano, 2017) [19]

En la siguiente Tabla se muestran los diferentes modelos de equipos de transmisión de calor disponibles en ASPEN.

Tabla 2. Equipos de transmisión de calor.

Tipo	Descripción
Heater	Intercambiador de calor básico. Efectúa cálculos simples de balance de energía y requiere sólo una corriente de proceso.
HeatX	Algoritmos fundamentales de transferencia de calor, usados en diseños rigurosos, calcula balances de energía, caídas de presión, área de transferencia, velocidades, etc. Requiere dos corrientes de proceso, una caliente y otra fría.
MHeatX	Similar al bloque previo, pero aceptará más corrientes de proceso.
HXFlux	Modelo de cálculo de transferencia de calor. Modela transferencia de calor convectiva entre un receptor de calor y una fuente de calor

Fuente: (Espinola-Lozano, 2017) [19]

3.3.3 Reactores en Aspen Plus V10

Existen 7 modelos de reactores incorporados, RSTOIC, RYIELD, REQUIL, RGIBBS, RPLUG, RCSTR y RBATCH. En la tabla 2 se resumen los requerimientos para cada modelo. La cinética personalizada se puede definir en subrutinas de Fortran o en hojas de trabajo de Excel [20]

Tabla 3. Requerimientos para los reactores en Aspen Plus

Modelo	Estequiometria	Cinética	Riguroso	Alimentación
RSTOIC	SI	NO	NO	Ninguna
RYIELD	NO	NO	NO	Ninguna
REQUIL	NO	NO	NO	Ninguna
RGIBBS	NO	NO	NO	Ninguna
RBATCH	SI	SI	SI	1
RCSTR	SI	SI	SI	Ninguna
RPLUG	SI	SI	SI	1

Fuente: Adaptada de Michigan engineering. Introduction to Aspen Plus™ 2006.5. [17]

3.3.4 Componentes de simulación en Aspen Plus V10

A continuación, en el cuadro 1 se describen los reactores y elemento utilizados en las simulaciones de los procesos termoquímicos en Aspen Plus V10.

Tabla 4. Descripción de los componentes utilizados en las simulaciones en Aspen Plus.

Nombre en Aspen Plus	Unidad que simula	Descripción	Requerimientos
RYIELD	Descomponedor	Convierte el flujo no convencional en Componentes convencionales.	Temperatura y presión de operación. Rendimientos de los componentes.
RGIBBS	Combustión	Calcula el equilibrio químico y el equilibrio de fase minimizando la energía libre de Gibbs del sistema.	Entrada de aire y combustible. Una corriente de Q a la combustión. Especificación de presión de operación.
FLASH2	Secador	Realiza cálculos de equilibrio vapor-líquido o vapor-líquido-líquido. Determina las condiciones térmicas y de fase de una mezcla de una o más corrientes de entrada.	Corriente de entrada y dos de salida.
SEP2	Separador	Separa los componentes de entrada en dos flujos de salida especificando fracciones o flujos divididos.	Especificaciones de fracciones de los componentes de salida para cada corriente
SSPLIT	Separador	Simula un ciclón, donde separa los sólidos de los gases.	Especificaciones de fracciones de los componentes de salida para cada corriente.
Fuente: Elaboración propia. Información de Aspen Plus V10 help. [21]			

4. ESTADO DEL ARTE

4.1 Proyectos de Simulación en Aspen Plus

(Valderrama, Quintero, & Kafarov, 2019) **Energy and water optimization of an integrated bioethanol production process from molasses and sugarcane bagasse: A Colombian case:** se propone un esquema integrado de producción de bioetanol de primera y segunda generación para aumentar el rendimiento y disminuir los requisitos de energía térmica y agua dulce. En este sentido, se evaluó una reducción del consumo de energía del proceso integrado a través de la integración de la red de intercambiadores de calor, aplicando programación matemática. Luego, para reducir el consumo de agua dulce, se evaluaron las corrientes con eliminación de agua para su reutilización en el proceso, formulando el problema como un problema de programación no lineal de enteros mixtos (MINLP). El proceso de producción de etanol, tanto de etanol de primera como de segunda generación, en la biorrefinería de caña de azúcar se simuló utilizando el software Aspen Plus ® V8.6, en estado estable. [22]

(Nadaraju, Maddocks, Zanganeh, & Moghtaderi, 2019). **Simulation of power and cooling generation via heat recovery from a ventilation air methane abatement unit:** La recuperación de calor de un reactor de reducción de metano de aire de ventilación de lecho fluidizado y la conversión en energía usando una turbina de vapor basada en el ciclo de Rankine y el enfriamiento a través de un enfriador de absorción se simularon usando el paquete de simulación de proceso Aspen Plus. El objetivo principal de la simulación era determinar la concentración mínima de metano para la operación autosostenida, tanto en términos de mantener el proceso de oxidación a alta temperatura como para generar suficiente energía para operar la planta. [23]

(Sefakor-Dogbe, Mandegari, & Görgens, 2019) **Assessment of the thermodynamic performance improvement of a typical sugar mill through the integration of waste-heat recovery technologies:** El sistema de cogeneración es la unidad más ineficiente de un ingenio azucarero típico. Este documento evalúa las mejoras en el rendimiento de exergía de un sistema de cogeneración de ingenio azucarero, a través de la integración de las tecnologías de bomba de calor de absorción (AHP) y el ciclo orgánico de Rankine (ORC) para la recuperación de calor residual. El sistema de cogeneración se simuló en el simulador de procesos Aspen Plus® y su rendimiento termodinámico se determinó mediante análisis de exergía. [24]

(Fukushima, Palacios-Bereche, Palacios-Bereche, & Nebra, 2019) **Energy analysis of the ethanol industry considering vinasse concentration and incineration:** El objetivo de este estudio es la integración de un sistema de concentración e incineración de vinaza en un proceso convencional de producción de azúcar, etanol y electricidad. Se utilizó el software Aspen Plus® para simular el proceso de producción. Asumiendo una planta de producción de azúcar y etanol, se analizaron diferentes escenarios considerando la concentración de vinaza con un sistema evaporador de efectos múltiples, la incineración de vinaza con recuperación de sal y la integración de calor. [25]

(Sefakor-Dogbe, Mandegari, & Görgens, 2018) **Exergetic diagnosis and performance analysis of a typical sugar mill based on Aspen Plus® simulation of the process:** Este estudio presenta un análisis exhaustivo de exergía de los procesos de producción de azúcar de caña para identificar componentes ineficientes para mejorar. El análisis de exergía se basó en rigurosos balances de masa y energía calculados a partir de una simulación Aspen Plus® de un ingenio azucarero típico de 250 toneladas por hora, junto con una metodología de ejercicio apropiada. La irreversibilidad general del ingenio azucarero y la eficiencia de

ejercicio funcional fueron 217.3MJ por tonelada de caña triturada y 9.7%, respectivamente. [26]

(Camacho-Ardila, Jaimes-Figueroa, Hoss-Lunelli, Maciel-Filho, & Wolf-Maciel, 2018). **Syngas production from sugar cane bagasse in a circulating fluidized bed gasifier using Aspen Plus™: Modelling and Simulation**: Este trabajo se desarrolla utilizando el modelo de gasificación de biomasa en un gasificador de lecho fluidizado circulante utilizando el simulador ASPEN PLUS. El método de minimización de energía libre de Gibbs se usó para predecir la composición del gas producido. Se investiga la influencia de las condiciones de operación como temperatura, relación de equivalencia (ER) e inyección de vapor en el rendimiento del gasificador. El modelo predice la composición del gas de síntesis, los valores de calentamiento y la eficiencia de conversión de acuerdo con los datos experimentales publicados. [27]

(Mandegari, Farzad, & Görgens, 2018) **A new insight into sugarcane biorefineries with fossil fuel co-combustion: Techno-economic analysis and life cycle assessment:** En este estudio, se investigaron biorrefinerías lignocelulósicas alternativas anexas a un típico ingenio de caña de azúcar, para producir etanol, ácido láctico o metanol, o coproducción de etanol y ácido láctico, todo con electricidad excedente para la venta por conversión de bagazo de caña de azúcar y recolección de residuos (hojas marrones) como materia prima accesible. Se desarrolló una simulación completa de Aspen Plus para cada escenario de biorrefinería considerando todas las unidades de proceso y unidades complementarias requeridas (es decir, calor y energía combinados, tratamiento de aguas residuales y evaporación). Además, los balances de masa y energía junto con los datos de costos se aplicaron para llevar a cabo el análisis tecnoeconómico, el estudio de riesgo final de Monte Carlo y la evaluación del ciclo de vida, en una matriz de deseabilidad de criterios múltiples. [28]

(Gagliano, Nocera, Bruno, & Cardillo, 2017) **Development of an Equilibrium-based Model of Gasification of Biomass by Aspen Plus:** Actualmente, la gasificación de la biomasa residual para la producción de combustible de CO2 neutro para la producción de energía se encuentra en etapa de desarrollo. En este contexto, este estudio propone un modelo basado en el equilibrio, desarrollado por el software comercial Aspen Plus, de un gasificador co-actual alimentado con residuos agrícolas, que permite estimar la composición química y el valor de calentamiento del gas de síntesis producido. La predicción de dicho modelo incluye las principales especies gaseosas, los rendimientos de carbón y alquitrán y describe el proceso de gasificación a través de los equilibrios de masa y energía, el cambio de agua-gas (WGS) y la reacción de metanización. [29]

(Pardo-Planas, Atiyeha, Phillips, Aichele, & Mohammad, 2017) **Process simulation of ethanol production from biomass gasification and syngas fermentation:** Este estudio presenta un nuevo modelo de simulación de proceso desarrollado con Aspen Plus® de una biorefinería basada en una tecnología de conversión híbrida para la producción de etanol anhidro usando 1200 toneladas por día (wb) de hierba de cambio. El modelo de simulación consta de tres módulos: gasificación, fermentación y recuperación del producto. Los resultados revelaron una producción potencial de aproximadamente 36.5 millones de galones de etanol anhidro por año. [30]

(Pina, y otros, 2017) **Reduction of process steam demand and water-usage through heat integration in sugar and ethanol production from sugarcane – Evaluation of different plant configurations:** El objetivo de este estudio fue realizar una evaluación conjunta para evaluar la reducción de la demanda de vapor del proceso y el uso de agua obtenida mediante la integración de calor y un análisis de exergía para cuantificar la reducción en la generación de irreversibilidad debido al procedimiento de integración de calor. Se analizaron dos configuraciones de planta. Se realizaron simulaciones en el software ASPEN PLUS® para evaluar los

equilibrios de masa y energía y se aplicó la integración de calor utilizando el Método Pinch para minimizar el consumo de servicios públicos. Los resultados mostraron que la integración de calor promovió una reducción en el consumo de vapor de 35% aproximadamente, mientras que la reducción en el consumo de agua (requisito de recolección de agua) fue de 24 y 13% en comparación con los casos convencionales sin integración de calor. [31]

(Larnaudie, Rochón, Ferrari, & Lareo, 2016) **Energy evaluation of fuel bioethanol production from sweet sorghum using very high gravity (VHG) conditions**: Se estudió experimentalmente la producción de bioetanol a partir de jugo concentrado de sorgo dulce (142-318 g / L de azúcar). Los efectos del contenido de azúcar en el jugo, la concentración de jugo antes de la fermentación (condiciones VHG), la eficiencia de la fermentación y el tiempo de fermentación en el consumo de energía del proceso industrial se evaluaron utilizando el software Aspen Plus® y datos experimentales [32].

5. METODOLOGIA

Con el propósito de dar buen cumplimiento a los objetivos planteados, se llevó a cabo la siguiente metodología.

- **Revisión Bibliográfica**

En esta etapa, se revisan los documentos, libros, trabajos, congresos y otras fuentes de información del tema en cuestión. Esta recolección de información genera el panorama general del estado del arte para el tema de análisis energético de calderas. Las bases de datos especializadas es el mayor contribuyente de información para lograr un estado del arte lo más completo posible.

- **Caracterización del Sistema**

En esta etapa, se realiza una investigación del tipo de generador de vapor, condiciones de operación, parámetros, eficiencias de diseño, pautas, controles y recomendaciones.

- **Análisis de las unidades de proceso para modelar el sistema de generación de vapor en Aspen Plus.**

En esta etapa se describen las 4 unidades que componen el sistema de generación de vapor y se propone un diagrama de bloques que modela el funcionamiento.

- **Cálculos y Simulación del proceso**

En esta etapa se definen el flujo de material y los equilibrios de energía, una distribución de tamaños de bagazo de caña predeterminados, la corriente de

entrada de Bagazo y se establecen las condiciones de operación y finalmente se realiza la simulación de los procesos en el software Aspen Plus V10.

- **Análisis de sensibilidad de parámetros energético y ambiental**

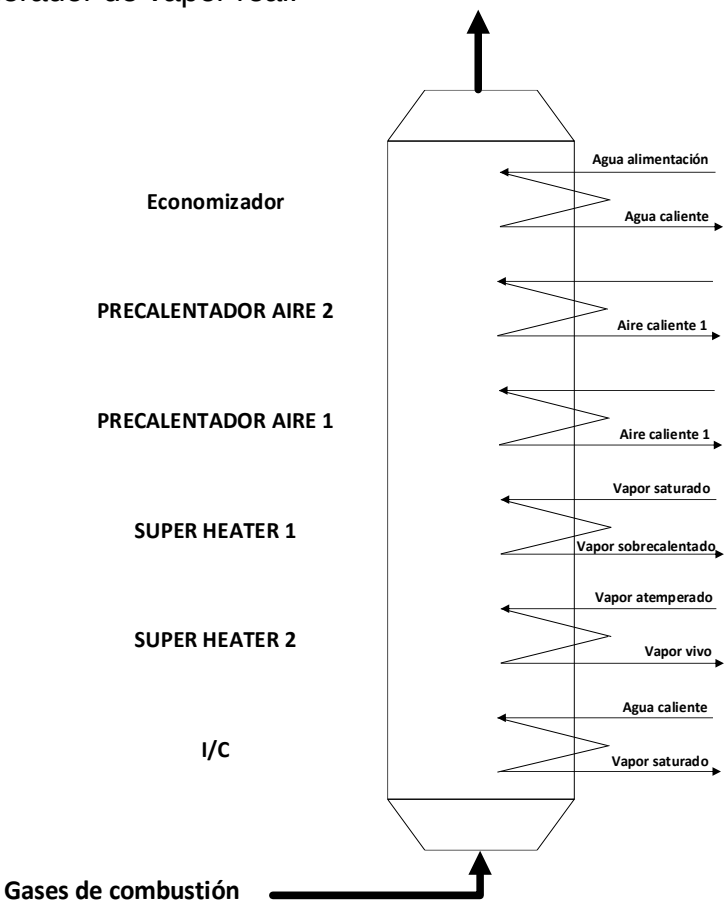
En esta etapa se emplea una sensibilidad de parámetros que ofrece un método de análisis del comportamiento de las variables del sistema de generación al variar parámetros que puedan afectar el sistema, se plantean dos escenarios, respecto al análisis energético, en un primer escenario se varían las entradas de aire y en el segundo escenario se varían entradas de aire y flujo de combustible. Con relación al análisis ambiental, en el primer escenario se analizan las emisiones producidas por los gases de combustión teniendo en cuenta la variación de carga de aire primario y secundario y en el segundo escenario se analizan estas mismas condiciones adicionando el flujo de combustible. Finalmente se define un indicador energético en el generador de vapor.

6. DESARROLLO

6.1 Analizar y utilizar las unidades de proceso adecuadas que permitan modelar el sistema de generación de vapor en Aspen Plus.

El generador de vapor se compone de 4 unidades de proceso: hogar o cámara de combustión, área de sobrecalentamiento, área de precalentamiento de aire y el economizador o precalentamiento de agua. En la siguiente figura se muestra el arreglo real de generación de vapor [23]:

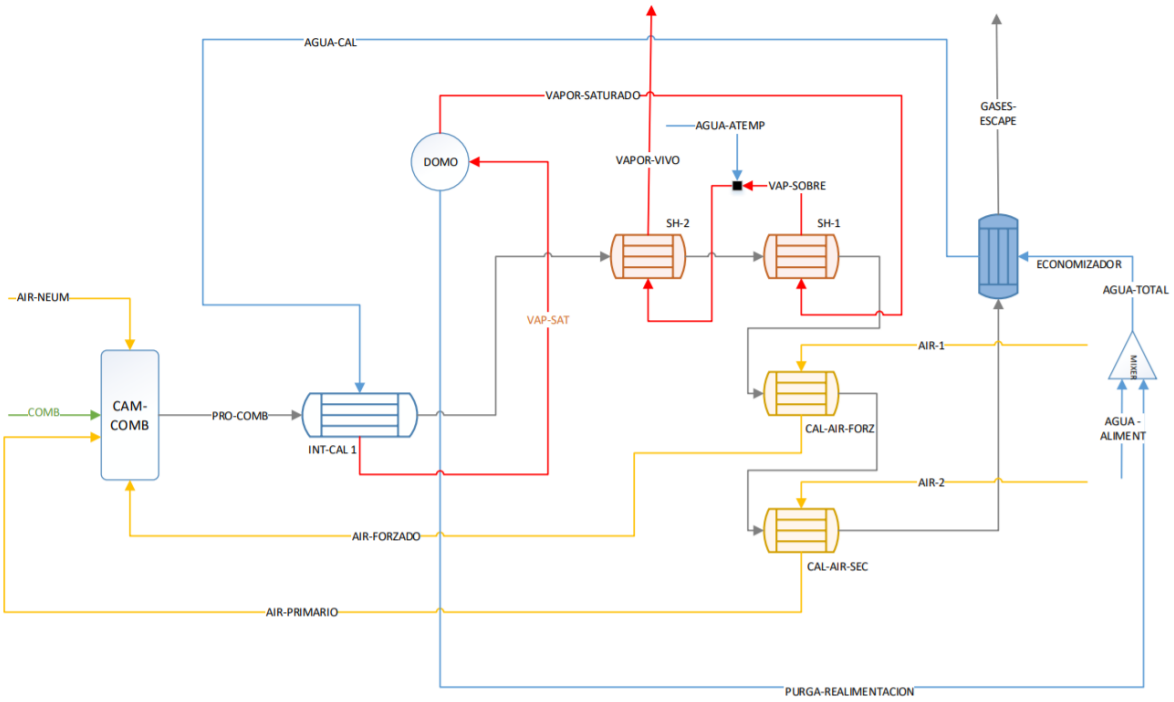
Figura 10. Generador de vapor real.



Fuente: (Quintero-Carrascal, 2013) [33]

Teniendo en cuenta el arreglo real de generación de vapor se propone un diagrama de bloques que modela el funcionamiento del generador de vapor, para posteriormente ser utilizado como base en el software Aspen Plus. En este diagrama de bloque se muestran las 6 unidades necesarias para simular el sistema deseado, como se muestra en la Figura 6.

Figura 11. Diagrama de bloques proceso de generación de vapor.



Fuente. Elaboración propia. Información de Aspen Plus V10

Como se muestra en el diagrama de bloques anterior se proponen los siguientes equipos:

- **Hogar, paredes y nariz:** Se compone de la cámara de combustión, intercambiador de calor 1 y domo. La cámara de combustión es la encargada de generar los gases de combustión necesarios para el intercambio de calor con los fluidos (Aire y agua de alimento). El intercambiador de calor encargado cambiar de fase el agua total de líquido a vapor saturado y por

último se encuentra el equipo necesario para realizar el purgado de agua propuesto en 1% del flujo de agua total.

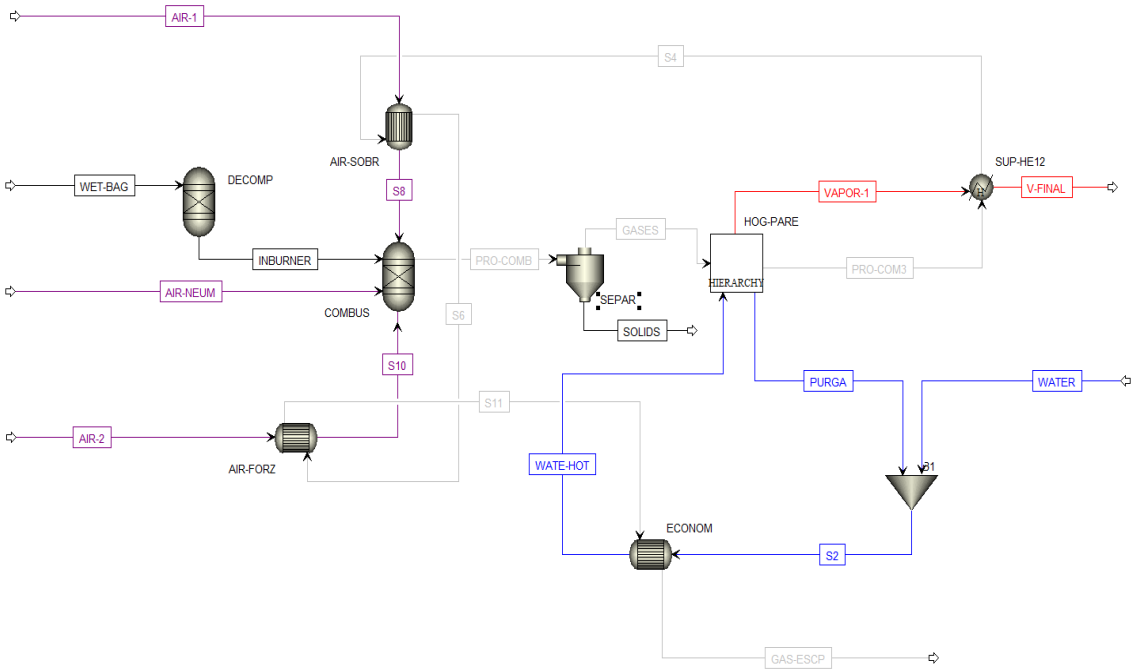
- **Zona de sobrecalentamiento del vapor:** Esta zona está compuesta por el sobrecalentador 1, atemperamiento del vapor y el sobrecalentador 2. El primer sobrecalentador es el encargado de aumentar la temperatura del vapor saturado y llevarlo hasta vapor sobrecalentado. El equipo de atemperación de vapor se encarga de disminuir la temperatura del vapor sobrecalentado hasta la temperatura deseada inyectándole una corriente de agua a ciertas condiciones y también el sobrecalentador 2, encargado de llevar ese vapor atemperado a condiciones deseadas de temperatura y presión.

- **Área de calentamiento de aire:** Esta área es la encargada del intercambio de calor entre los gases y el aire de suministro. Se compone de dos equipos precalentadores de aire. El aire caliente producido en esta zona posteriormente es usado como aire de combustión que ingresara a la cámara de combustión.

- **Economizador:** Por último, encontramos el economizador que es el encargado de precalentar el agua de suministro que posteriormente ingresara a la zona de Hogar, paredes y nariz.

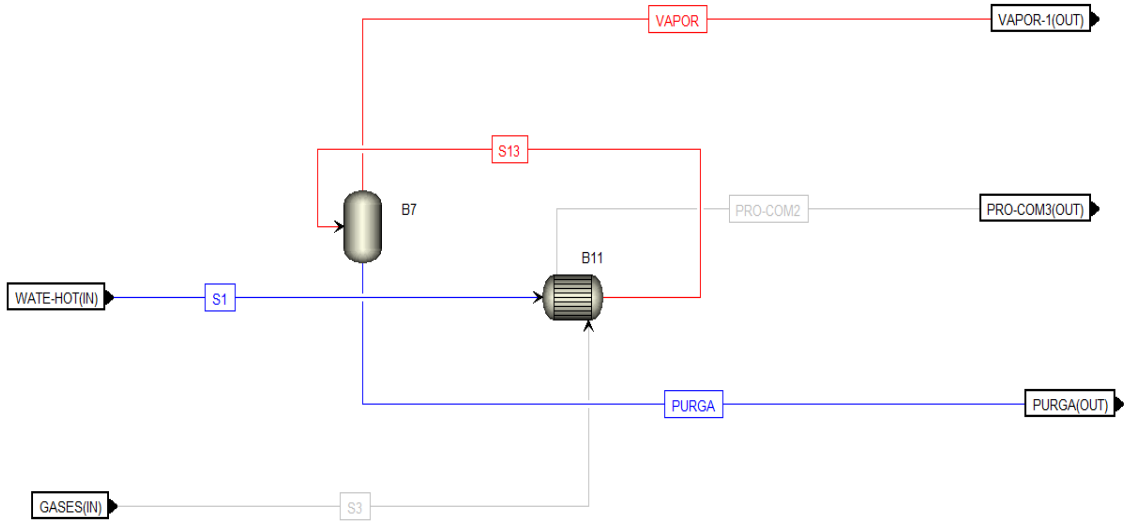
Ya mostrados los diagramas necesarios para simular el sistema de generación de vapor en Aspen Plus, se procede a realizar la simulación y plantear el esquema base necesario para realizar el análisis de sensibilización de parámetros:

Figura 12. Diagrama de flujo del proceso de generación de vapor en Aspen Plus V10.



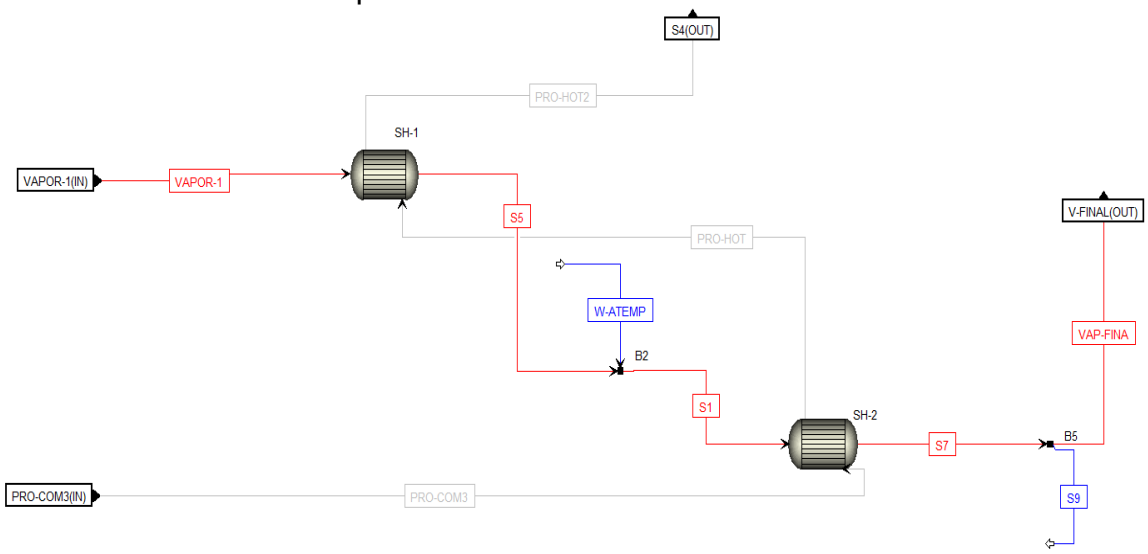
Fuente. Elaboración propia. Información de Aspen Plus V10

Figura 13. Diagrama de flujo del proceso de generación de vapor (Hogar, paredes y nariz) en Aspen Plus V10.



Fuente. Elaboración propia. Información de Aspen Plus V10

Figura 14. Diagrama de flujo del proceso de generación de vapor unidades de sobrecalentamiento en Aspen Plus V10.



Fuente. Elaboración propia. Información de Aspen Plus V10

Tabla 5. Tabla de identificación de líneas de fluidos.

Color de línea	Tipo de fluido
	Flujo de vapor de agua
	Flujo de agua líquida
	Flujo de gases de combustión
	Flujo de aire

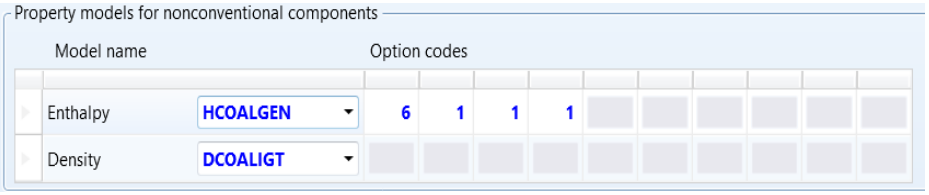
Fuente. Elaboración propia

6.2 Simulación del sistema de generación de vapor en Aspen plus.

6.2.1 Flujos de materia y calor

La simulación del sistema se basa en el balance de masa-energía y equilibrio químico. Este diseño es modelado en Aspen Plus V10, herramienta que puede calcular el flujo de material y los equilibrios de energía. La corriente de entrada (Biomasa) se especificó como una corriente no convencional. En la simulación, los modelos HCOALGEN y DCOALIGT se utilizan para calcular la entalpia y la densidad de componentes no convencionales. Para el modelo HCOALGEN se requiere tres componentes como lo es el análisis próximo (PROXANAL en Aspen plus), análisis ultimo (ULTANAL) y el análisis de azufre (SULFANAL). Con respecto al modelo DCOALIGT, solo se requiere el ULTANAL y SULFANAL.

Figura 15. Coeficientes numéricos para el modelo HCOALGEN.



Fuente: Aspen Plus V10.

6.2.2 Tamaño de las partículas del combustible

Se define una distribución de tamaños de bagazo de caña predeterminados, Aspen plus utiliza una distribución de tamaño de partícula de 10 rangos de tamaño que cubren 20 micras cada uno. Se utiliza un rango de 140 a 200 micras y automáticamente se calculan valores de fracción de peso del bagazo de caña. Esta distribución es utilizada para el proceso de combustión.

6.2.3 Definición de la corriente de entrada de Bagazo

Para la simulación de la corriente de bagazo de caña (WET-BAG) se ingresa un flujo de 22.281 kg/s a temperatura y presión ambiente. Se define el análisis próximo y ultimo del bagazo de caña previamente al ingreso del bloque RYIELD, como se muestra en la siguiente figura.

Figura 16. Análisis próximo y análisis último del bagazo

Análisis próximo	Fracción másica [%]
Humedad	50
Carbón fijo	15.7
Materia volátil	81.7
Cenizas	2.6
Análisis último	Fracción másica [%]
C	45.79
H	6.33
O	45.28
N	0
S	0
Cenizas	2.6
Poder calorifico inferior [Mj/kg]	9.24119

Fuente. Elaboración propia. Información de Aspen Plus V10

6.2.4 Bloque Ryield (Especificaciones)

Las condiciones de operación para este reactor son 25°C y 1.01353 bar, se definen unos rendimientos temporales para los productos, por lo tanto, no son los rendimientos reales de la distribución. Se usa un Calculator block llamado COMBUST, para calcular la distribución real de los rendimientos de cada componente para el bagazo de caña. Para este proceso se utilizan declaraciones Fortran, que toma los componentes de la corriente de bagazo en forma de vector y por medio de un factor pasa de base húmeda a base seca.

$$\mathrm{FACT} = (100 - \mathrm{WATER}) / 100$$
$$\mathrm{H2O} = \mathrm{WATER} / 100$$
$$\mathrm{ASH} = \mathrm{ULT}(1) / 100 * \mathrm{FACT}$$
$$\mathrm{CARB} = \mathrm{ULT}(2) / 100 * \mathrm{FACT}$$
$$\mathrm{H2} = \mathrm{ULT}(3) / 100 * \mathrm{FACT}$$
$$\mathrm{N2} = \mathrm{ULT}(4) / 100 * \mathrm{FACT}$$
$$\mathrm{CL2} = \mathrm{ULT}(5) / 100 * \mathrm{FACT}$$
$$\mathrm{SULF} = \mathrm{ULT}(6) / 100 * \mathrm{FACT}$$
$$\mathrm{O2} = \mathrm{ULT}(7) / 100 * \mathrm{FACT}$$

FACT: Factor de conversión de base húmeda a base seca.

6.2.5 Combustión

En la cámara de combustión se utiliza un reactor RGIBBS, con condiciones heat duty 0 btu/lb y presión de 1.01353 bar. y presión de 1.01353 bar. Se utiliza la opción “Calcular equilibrio de fase y equilibrio químico”. Para el caso de los productos, se utiliza la opción “Identificar posibles productos”, se incluyen los componentes comúnmente generados. La entrada de combustible seco se llama INBURNER y las corrientes de aire de combustión AIR-1, AIR-2 y AIR-NEUM.

6.2.6 Especificaciones de bloque SSPLIT (Con unidad SSPLIT)

En este tipo de simulaciones el SSPLIT, funciona como un separador de la corriente (PRO-COMB) entre los productos gaseosos (MIXED) y los sólidos de la combustión (sub-corrientes CIPSD y NCPSD). En la corriente de gases de combustión se encuentran componentes como (CO2, CO, N2, H2) y la corriente de solidos se componen de cenizas.

6.2.7 Especificaciones del bloque Hierarchy (Hogar)

Este tipo de bloque funciona como un subproceso o “Jerarquía” nombrado HOG-PARE, que contiene el equipo de calentamiento de agua y el domo encargado de

separar líquidos residuales del vapor. Las entradas de corriente son WATER-HOT proveniente del economizador y GASES que provienen de la cámara de combustión. En este proceso se genera vapor saturado y se realiza la purga de agua.

6.2.7.1 Especificaciones del intercambiador de calor IC-1

El bloque de intercambio de calor del hogar se define como un intercambiador en contracorriente y con una condición de salida “Fracción de vapor a la salida de la corriente fría”. Esta condición se hallar debido a que se conoce la presión del líquido y la temperatura a la que este es calentado. Este cálculo se realiza mediante tablas del agua presurizada.

6.2.7.2 Especificaciones del Domo

El domo se simula mediante un bloque FLASH, con condiciones de presión 74.3944 bar y una fracción de vapor del 0.99. En este proceso se separa el vapor saturado de los líquidos residuales también llamado purga, que posteriormente será utilizada como agua de realimentación.

6.2.8 Especificaciones del bloque SUPERHEATERS (SUP-HE12)

Este bloque funciona como un subproceso nombrado SUP-HE12, que contiene los dos sobre calentadores necesarios para la generación de vapor vivo. En las calderas modernas con temperaturas mayores a 400°C, la operación puede llevarse a cabo en dos o tres etapas (Sobrecalentador primario, secundario y terciario) dependiendo de la temperatura final del vapor y con una etapa intermedia de atemperación [1]. En este ingresan el vapor saturado generado en el hogar y los gases de combustión saliendo del hogar.

6.2.8.1 Especificaciones sobre calentador 1

Para simular el sobre calentador 1, se especifica la “temperatura de salida de la corriente fría” a 400° C y el tipo de intercambiador se define en flujo contracorriente.

En este sobrecalentador se aumenta la temperatura del vapor saturado y se lleva hasta una temperatura de vapor sobrecalentado.

6.2.8.2 Corriente de agua de atemperamiento

Se utiliza una corriente de agua de atemperamiento, que es calculada mediante el "Design Specs" para reducir la temperatura del vapor hasta 290° C. Para este caso la variable a controlar es el flujo masico de agua también llamado W-ATEMP. Las condiciones de salida del vapor deben cumplir con las condiciones de operación del sobrecalentador 2, debido a que las altas temperaturas a las que se ven expuestos los materiales pueden generar deformaciones dilatando y expandiendo los tubos.

$$SPEC = TSAL$$
$$TARGET = 290°C$$
$$TOLERANCIA = 1$$

6.2.8.3 Especificaciones sobre calentador 2

Para simular el sobre calentador 2, se especifica la "temperatura de salida de la corriente fría" a 513.13° C y el tipo de intercambiador se define en flujo contracorriente. El objetivo de este sobrecalentador es llevar ese vapor atemperado hasta las condiciones requeridas para comportarse como vapor vivo.

6.2.9 Precalentadores de aire primario y secundario

Estos equipos tienen como objetivo principal recuperar parte de la energía de los gases de combustión, antes de salir del generador de vapor. Además de este objetivo, el precalentamiento del aire contribuye al proceso de secado del bagazo reduciendo el efecto de la humedad e incrementar la temperatura en el hogar favoreciendo la transferencia por radiación entre gases y paredes de agua.

6.2.9.1 Especificaciones del precalentador de aire primario (AIR-1)

Se ingresa una corriente de aire y la corriente de gases circulante calienta el aire hasta una temperatura de 385° C que posteriormente ingresara a la cámara de combustión. Las condiciones de entrada de esta corriente de aire se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 6. Condiciones de entrada aire en estado muerto

Parámetro	**Valor**	**Unidades**
Temperatura	25	°C
Presión	1,01353	Bar
Fracción Molar O_2	0,21	-
Fracción Molar H_2	0,79	-
Fuente: Elaboración propia.		

6.2.9.2 Especificaciones del precalentador de aire secundario (AIR-2)

Se ingresa una corriente de aire y la corriente de gases circulante que ingresan al intercambiador de calor que calienta el aire hasta una temperatura de 243° C que posteriormente ingresara a la cámara de combustión. Las condiciones de entrada de esta corriente se muestran en la Tabla 1.

6.2.9.3 Condiciones de entrada aire neumático (AIR-NEUM)

Esta corriente de aire ingresa directamente a la cámara de combustión y completa la relación de aire requerido para quemar completamente el combustible (bagazo de caña). Las condiciones de entrada de esta corriente se muestran en la Tabla 2.

Tabla 7. Condiciones de entrada aire en estado muerto

Parámetro	**Valor**	**Unidades**
Temperatura	30.18	°C
Presión	1,01353	Bar
Fracción Molar O_2	0,21	-
Fracción Molar H_2	0,79	-
Fuente: Elaboración propia.		

6.2.10 Economizador

El economizador forma parte de los recuperadores de calor de gases de combustión y tiene como objetivo principal aumentar la temperatura del agua de alimentación que posteriormente será ingresada al hogar. Se ingresa una corriente de alimentación de agua al economizador como se muestra en la Tabla 3.

Tabla 8. Condiciones de entrada del agua al economizador.

Parámetro	**Valor**	**Unidades**
Temperatura	116	°C
Presión	87.1856	Bar
Flujo másico	46	Kg/seg
Fuente: Elaboración propia.		

7. RESULTADOS

7.1 Comparación de los datos obtenidos por la simulación con la data real de la generadora de vapor.

Se obtienen las condiciones de operación de la caldera generadora de vapor por medio de una tesis de maestría desarrollada por Ducardo León Molina, que provee una serie de promedios de las condiciones de entrada y salida del sistema de generación de vapor. En este caso se requiere hacer una comprobación de la data obtenida por el software mediante la simulación donde se obtienen resultados muy favorables, con respecto al comportamiento de las condiciones de operación en el sistema real. Los resultados obtenidos en el software son similares al sistema de generación de vapor real, por lo tanto, se utilizaron unidades con comportamientos similares al sistema real.

Tabla 9. Resultados obtenidos en el software Aspen Plus para entrada y salida de *gases exhaustos*.

Temperaturas de entrada y salida para los gases exhaustos		
UNIDAD INTERCAMBIADORA	**Tin [°C]**	**Tout [°C]**
HOGAR	1438.630	799.360
SOBRECALENTADOR 1	799.360	568.976
SOBRECALENTADOR 2	568.976	470.051
PRECALENTADOR 1	470.051	382.889
PRECALENTADOR 2	382.889	283.248
ECONOMIZADOR	283.248	164.567

Fuente. Autor, software Aspen Plus V10.

Tabla 10. Resultados obtenidos en el software Aspen Plus para entrada y salida de del componente AGUA.

Temperaturas de entrada y salida en cada etapa de intercambio de calor para el componente AGUA				
UNIDAD INTERCAMBIADORA	**Tin [°C]**	**Tout [°C]**	**ESTADO DE ENTRADA**	**ESTADO DE SALIDA**
ECONOMIZADOR	116.460	186.000	Agua líquida	Agua precalentada
IC-1	186.000	300.000	Agua precalentada	Vapor saturado
SOBRECALENTADOR 1	290.000	400.000	Vapor saturado	Vapor sobrecalentado
SOBRECALENTADOR 2	290.000	513.130	Vapor atemperado	Vapor vivo

Fuente. Autor, software Aspen Plus V10.

Tabla 11. Resultados obtenidos en el software Aspen Plus para entrada y salida de del componente AIRE.

Temperaturas de entrada y salida en cada etapa de intercambio de calor para el componente AIRE				
UNIDAD INTERCAMBIADORA	**Tin [°C]**	**Tout [°C]**	**ESTADO DE ENTRADA**	**ESTADO DE SALIDA**
PRECALENTADOR 1	30.000	243.000	Aire ambiente	Aire precalentado
PRECALENTADOR 2	30.000	285.000	Aire ambiente	Aire precalentado

Fuente. Autor, software Aspen Plus V10.

En la siguiente tabla de comparación se toman los datos las variables más relevantes del sistema de generación de vapor y se obtienen sus respectivos porcentajes de error.

Tabla 12. Tabla de comparación de datos obtenidos en la simulación con la generadora de vapor real.

VARIABLE	UNIDAD DE MEDIDA	PROMEDIOS VALORES REALES DEL GENERADOR DE VAPOR	DATOS OBTENIDOS EN LA SIMULACIÓN	% DE ERROR
FLUJO DE VAPOR VIVO	Lb/h	363740.680	363641	0.027
TEMPERATURA DE VAPOR VIVO	°C	513.130	513.130	-
PRESION DE VAPOR VIVO	psia	973.550	973.550	-
FLUJO DE AGUA DE ALIMENTACION	Lb/h	367278.080	367314	0.010
T AGUA ENTRANDO AL ECONOMIZADOR	°C	116.460	116	-
T AGUA SALIENDO DEL ECONOMIZADOR	°C	185.780	186	0.118
PRESION AGUA DE ALIMENTACION	psia	1264.520	-	-
FLUJO DE AIRE PRIMARIO (VTF)	Lb/h	171510.360	176000	2.618
TEMPERATURA AIRE PRIMARIO	°C	243.610	-	-
FLUJO DE AIRE SECUNDARIO (VTS)	Lb/h	390667.560	396000	1.365
TEMPERATURA DE AIRE SECUNDARIO	°C	384.610	385	0.101
FLUJO DE AIRE NEUMATICO	Lb/h	46694	-	-
TEMPERATURA DE AIRE NEUMATICO	°C	30.180	-	-
TEMPERATURA DE GASES SALIENDO CHIMENEA	°C	167.130	164.980	1.286
TEMPERATURA DEL HOGAR	°C	789	799.360	1.313
TEMPERATURA DE GASES IN OVERFIRE	°C	443.333	470.051	6.027
TEMPERATURA GASES IN VTF	°C	373.690	382.889	2.462
TEMPERTATURA GASES IN ECON	°C	276.667	283.248	2.379

Fuente. Autor software Aspen Plus V10 - Tesis de maéstria Ducardo León Molina.

Como se muestra en la tabla anterior los porcentajes de error con respecto a la generadora de vapor real son relativamente bajos, por tanto, el software Aspen Plus nos provee unos resultados confiables y con buen acierto en este tipo de simulaciones, teniendo en cuenta que las unidades que interfieren en el proceso no tienen una definición detallada refiriéndose a falta de condiciones de operación de los intercambiadores de calor (coeficiente de transferencia de calor, numero de pasos, numero de tubos y área del intercambiador).

7.2 Análisis de sensibilización de parámetros y analizar cómo estos afectan el sistema de generación de vapor.

Para este caso se maneja una sensibilidad de parámetros que ofrece un método de análisis del comportamiento de las variables del sistema de generación al variar parámetros que puedan afectar el sistema. Dentro del análisis se encontró que el aire que se suministra, como aire de combustión tiene una alta incidencia en el proceso de generación de vapor al afectar la transferencia de calor entre los gases de combustión y el fluido que gana energía. Por otro lado, dependiendo de la cantidad de aire que se suministre al sistema los gases exhaustos tienden a aumentar o disminuir su temperatura.

En este caso se evalúa ese comportamiento y se analiza si es beneficioso para el sistema o si este genera un efecto contrario al deseado. Para este análisis de sensibilidad se plantean dos escenarios, el primer escenario es variando solamente el factor de aireación y el segundo escenario se plantea variar el flujo de combustible de combustible que es suministrado a la cámara de combustión, esto con el fin de poder comparar el comportamiento de los dos escenarios.

7.2.1 Análisis energético - Escenario 1 (Variando el factor de aireación)

En tabla 11, se muestra la influencia de variar la cantidad de aire suministrado (factor de aireación), estos se comparan con respectos a los gases exhaustos, teniendo en cuenta que los mayores cambios se representan en la energía que es transferida de los gases de combustión al fluido que se desea calentar. Como se muestra en la Tabla 11, se puede afirmar que el comportamiento de la transferencia de calor entre los gases exhaustos y el fluido que gana energía es válido para los rangos de factor de aireación entre 1.25 a 1.5, debido a que en estos rangos la temperatura de los gases exhaustos se asimila al comportamiento de la caldera de

generación de vapor real. También en la siguiente grafica para observar el comportamiento de la temperatura de los gases de combustión.

Tabla 13. Análisis de sensibilidad variando el factor de aireación.

AIR-1 [kg/s]	AIR-2 [kg/s]	AIR-NEUM [kg/s]	TSALHOGAR [°C]	TSAL IC1 [°C]	TSALSP2 [°C]	TSALSP1 [°C]	TSALPRE1 [°C]	TSALPRE2 [°C]	GASES-ESC [°C]
24.116	45.400	18.200	1647.953	898.725	627.210	509.924	430.307	339.407	198.204
25.322	47.670	19.110	1607.376	879.695	616.259	502.595	421.605	329.108	192.357
26.528	49.940	20.020	1568.797	861.388	605.540	495.271	412.982	318.975	186.395
27.733	52.210	20.930	1532.178	843.890	595.192	488.113	404.597	309.163	180.503
28.939	54.480	21.840	1497.436	827.221	585.273	481.203	396.527	299.744	174.779
30.145	56.750	22.750	1464.466	811.364	575.805	474.578	388.803	290.745	169.270
31.351	59.020	23.660	1433.158	796.289	566.785	468.248	381.434	282.170	163.997
32.557	61.290	24.570	1403.403	781.954	558.199	462.213	374.414	274.007	158.964
33.762	63.560	25.480	1375.097	768.315	550.027	456.462	367.729	266.239	154.167
34.968	65.830	26.390	1348.141	755.331	542.247	450.985	361.363	258.845	149.598
36.174	68.100	27.300	1322.443	742.958	534.835	445.765	355.299	251.805	145.246

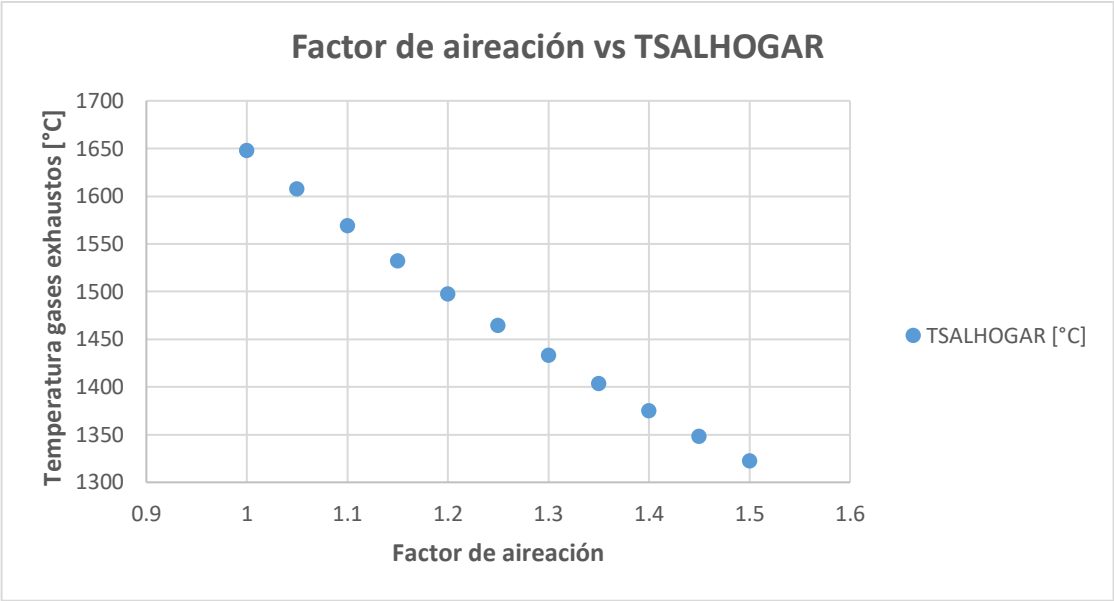
Fuente. Autor, software Aspen Plus V10.

Tabla 14. Factor de aireación y relación A/C.

Factor aireación	Relación AC
1.000	3.937
1.050	4.134
1.100	4.330
1.150	4.527
1.200	4.724
1.250	4.921
1.300	5.118
1.350	5.315
1.400	5.512
1.450	5.708
1.500	5.905

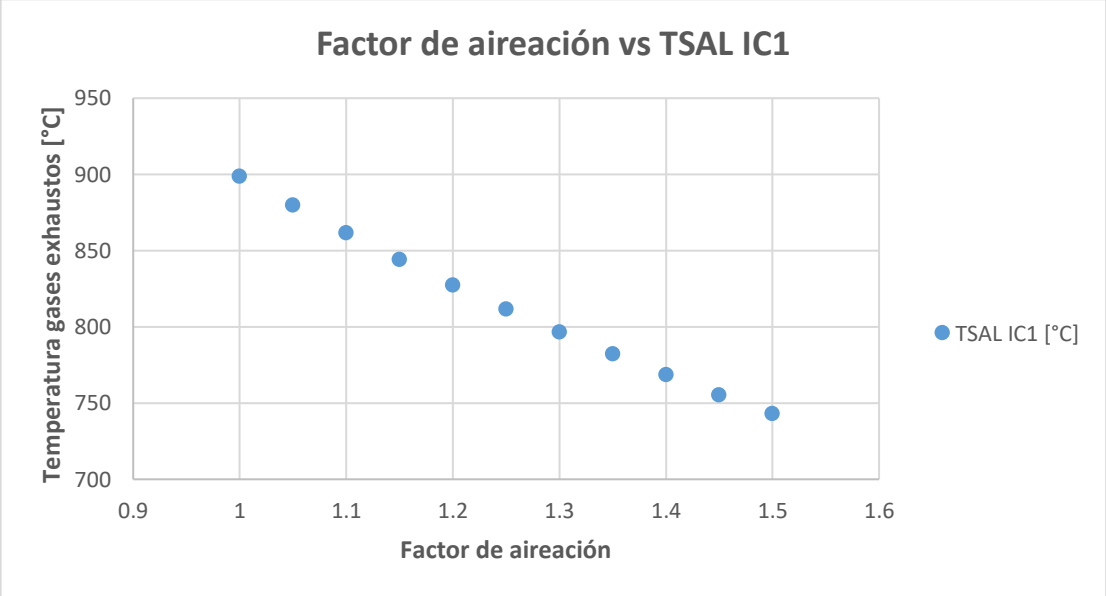
Fuente. Autor, software Aspen Plus V10.

Gráfica 1. Comportamiento de los gases exhaustos saliendo del hogar.



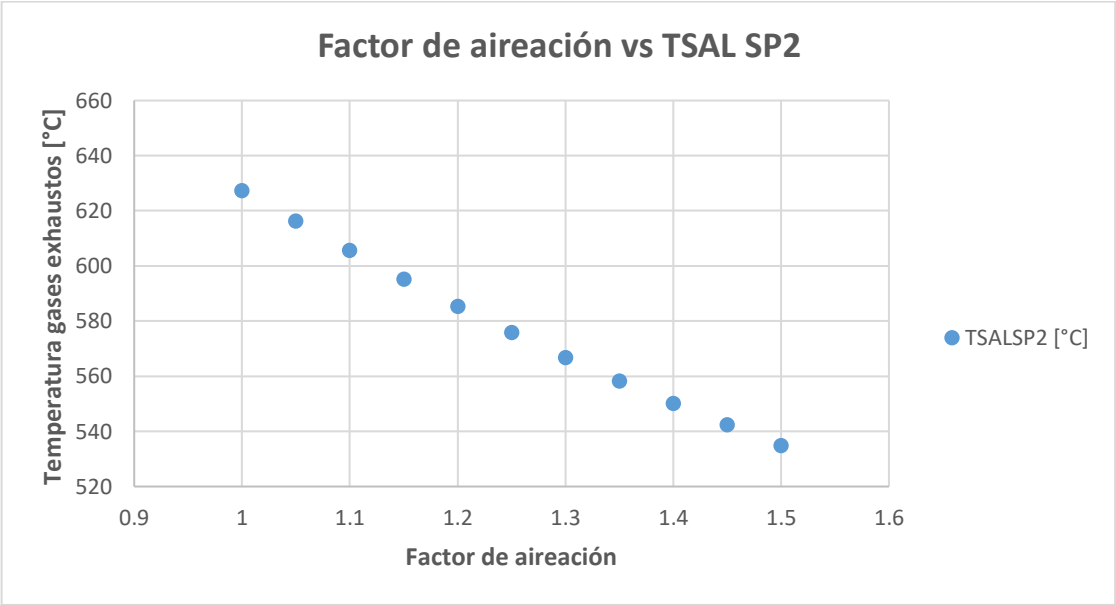
Fuente. Autor, software Aspen Plus V10.

Gráfica 2. Comportamiento de los gases exhaustos saliendo del IC1**.**



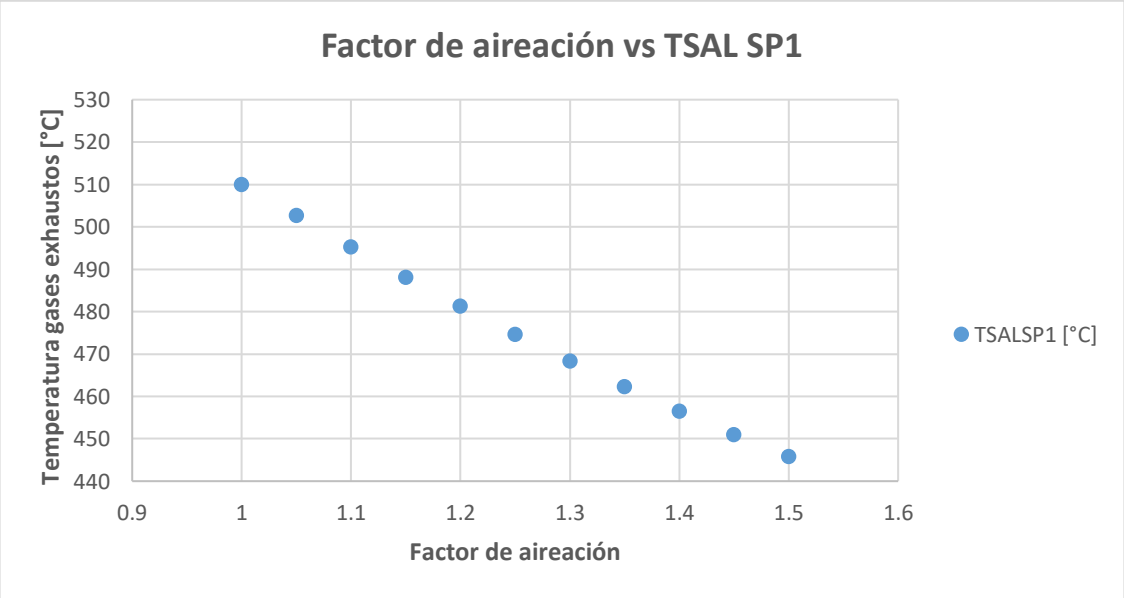
Fuente. Autor, software Aspen Plus V10.

Gráfica 3. Comportamiento de los gases exhaustos saliendo del sobrecalentador 2.



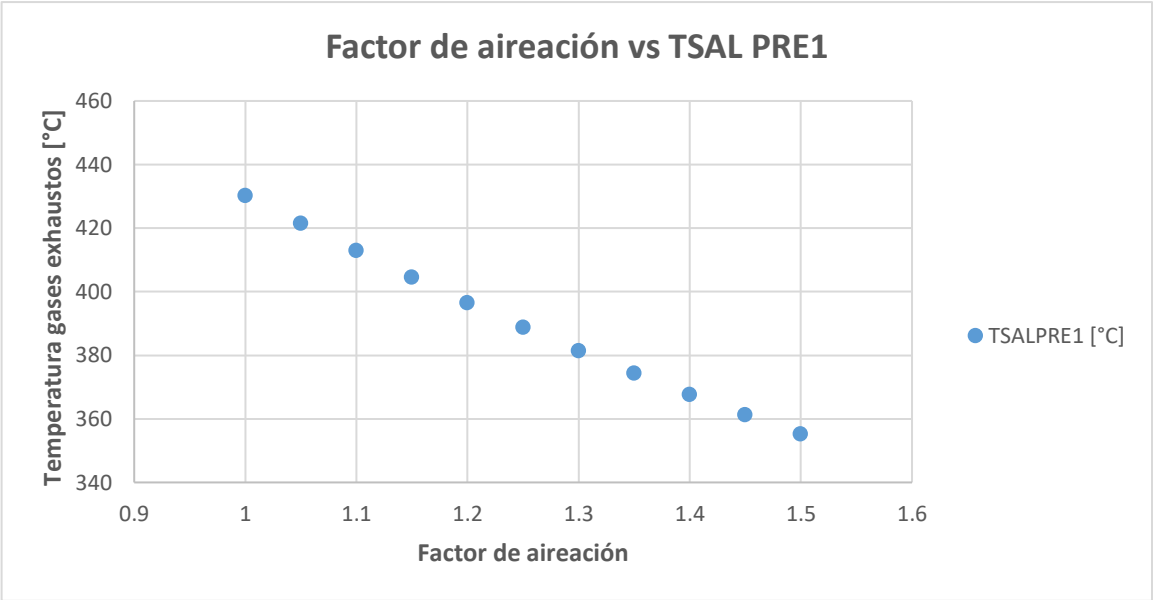
Fuente. Autor, software Aspen Plus V10.

Gráfica 4. Comportamiento de los gases exhaustos saliendo del sobrecalentador 1.



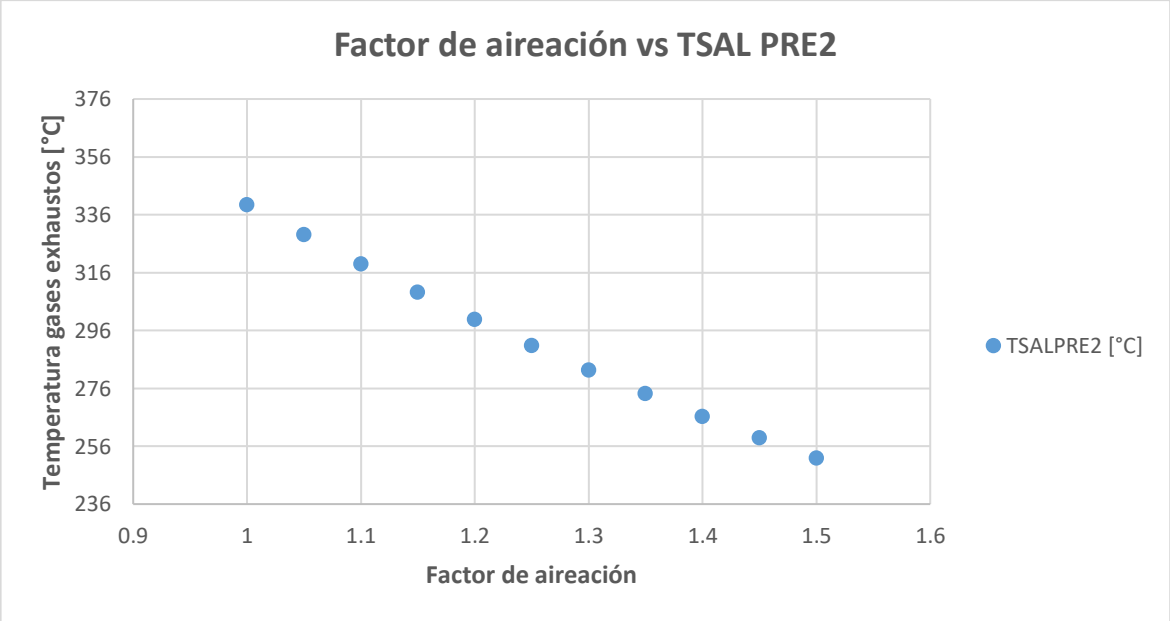
Fuente. Autor, software Aspen Plus V10.

Gráfica 5. Comportamiento de los gases exhaustos saliendo del precalentador de aire 1.



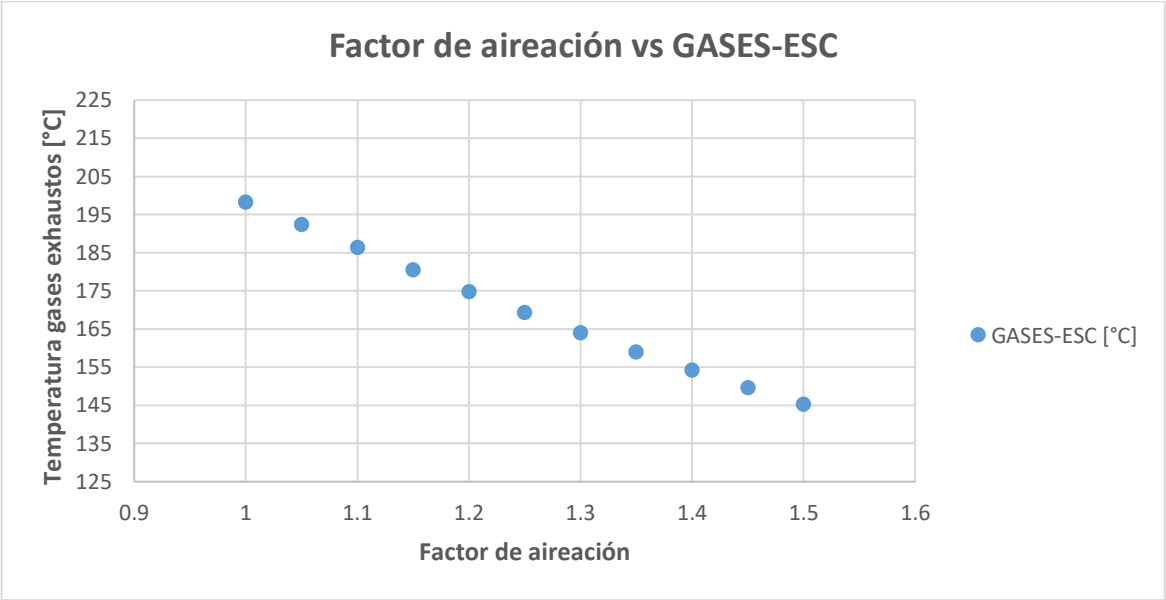
Fuente. Autor, software Aspen Plus V10.

Gráfica 6. Comportamiento de los gases exhaustos saliendo del precalentador de aire 2.



Fuente. Autor, software Aspen Plus V10.

Gráfica 7. Comportamiento de los gases exhaustos saliendo del economizador.



Fuente. Autor, software Aspen Plus V10.

Como se puede observar en los gráficos mostrados anteriormente, se nota una disminución considerable a medida que aumenta el factor de aireación, por lo tanto, una elevada concentración de oxígeno tiende a cortar las llamas, contrario a aplicar pequeñas cantidades de aire que tiende a aumentar la turbulencia de la llama.

7.2.2 Eficiencia energética (Escenario 1)

En el siguiente cuadro, se muestra el cambio de eficiencia energética a medida que aumenta el factor de aireación teniendo en cuenta la formula general de eficiencia en calderas de generación de vapor. Para este caso se tiene en cuenta el calor sensible presente en AIR-1, AIR-2 y AIR-NEUM.

$$n = 100 * \left(\frac{(m_v * (h_v - h_{al)}) - (Q_{sen-air1} + Q_{sen-air2} + Q_{sen-air-neum})}{(m_b * PC_{bagazo})} \right)$$

Donde:

$m_v = masa\ de\ vapor\ generado\ \left(\frac{kg}{h}\right)$

$m_b = masa\ de\ combustible\ quemado\ \left(\frac{kg}{h}\right)$

$h_v = Entalpía\ del\ vapor\ \left(\frac{kJ}{kg}\right)$

$h_v = Entalpía\ del\ agua\ \left(\frac{kJ}{kg}\right)$

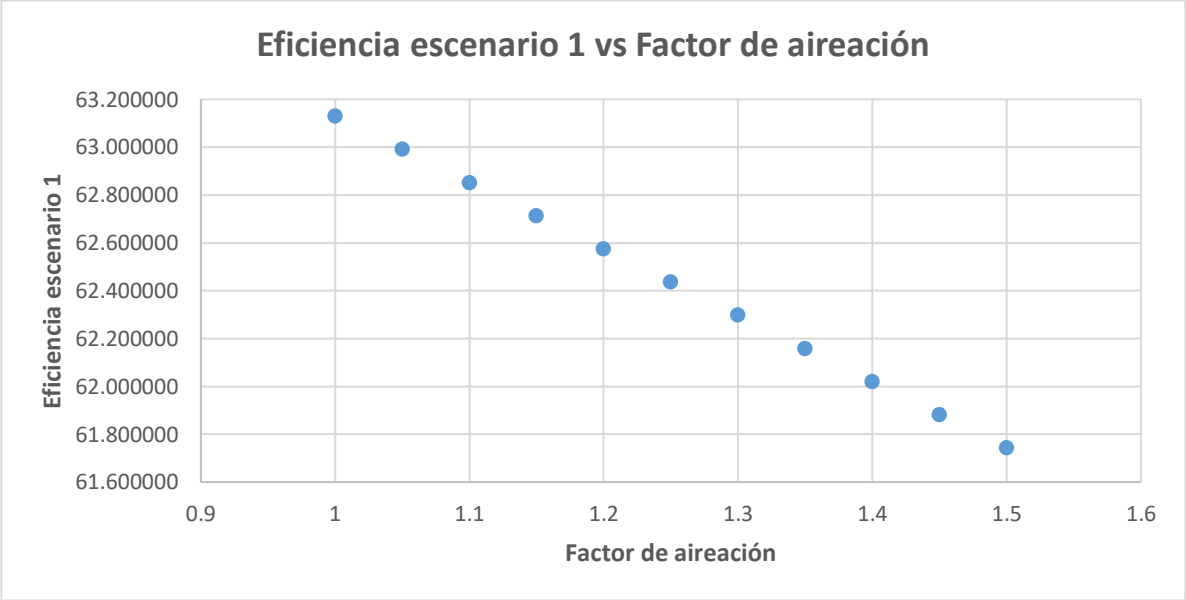
$n = \%\ de\ eficiencia\ energética$

$Q_{sen-air1} = Calor\ sensible\ del\ aire\ primario$

$Q_{sen-air2} = Calor\ sensible\ del\ aire\ secundario$

$Q_{sen-air-neum} = Calor\ sensible\ del\ aire\ neumatico$

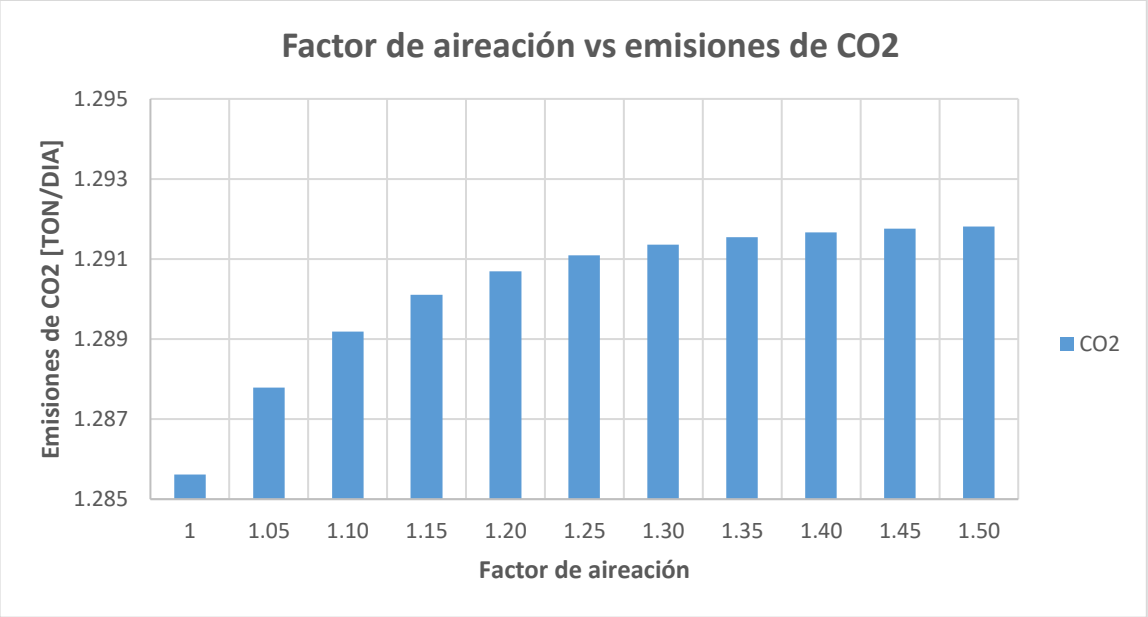
Gráfica 8. Eficiencia energética escenario 1.



Fuente. Autor, software Aspen Plus V10.

7.2.3 Análisis ambiental (Escenario 1)

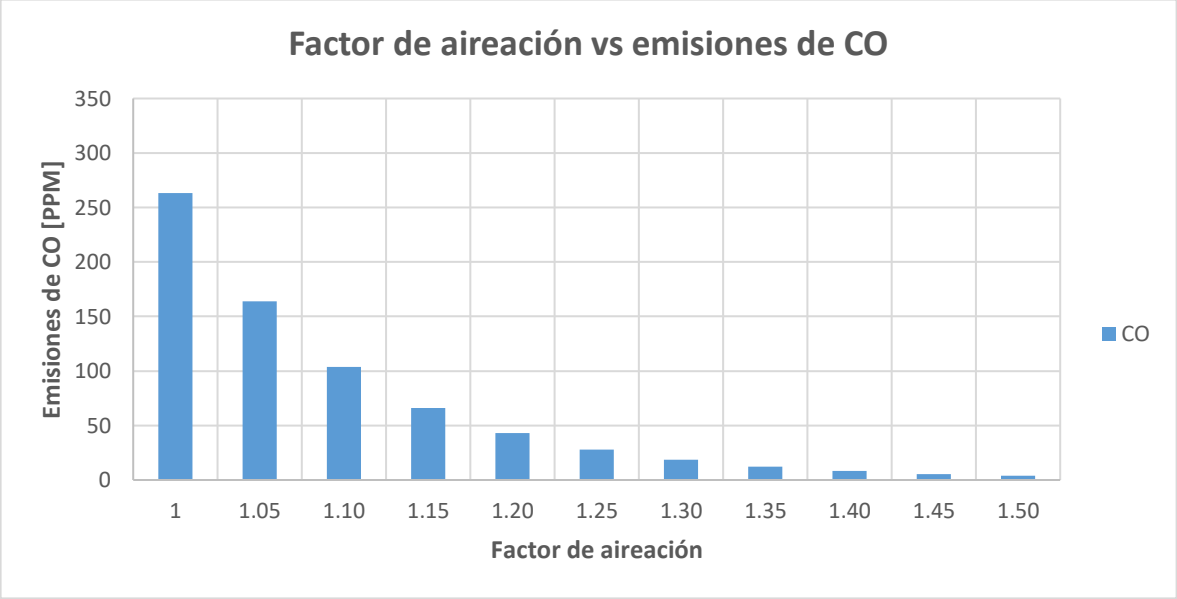
Gráfica 9. Emisiones de CO2 variando el factor de aireación.



Fuente. Autor, software Aspen Plus V10.

Se analizan las emisiones producidas por los gases de combustión teniendo en cuenta la variación del factor de aireación propuesto. Dentro de estas emisiones se toman en cuenta las más relevantes CO_2 y CO. Como se muestra en el gráfico anterior las emisiones de CO2, aumentan a medida que se suministra una mayor cantidad de aire a la combustión. También es válido afirmar que a medida que se aumentan los gases de combustión los porcentajes de dióxido de carbono presentes en la mezcla también aumentan.

Gráfica 10.Emisiones de CO variando el factor de aireación.



Fuente. Autor, software Aspen Plus V10.

Como se muestra en el grafico anterior, las emisiones de CO disminuyen a medida que aumenta el factor de aireación. En la combustión la presencia de altos porcentajes de CO, se deben a que una combustión es incompleta, por lo tanto, este gas aparece cuando el aire comburente es insuficiente o cuando la mezcla aire-combustible es defectuosa. Las variaciones de emisiones de CO2 y CO, la primera tiende a aumentar mientras que en la segunda disminuye, en un sistema de generación de vapor real estas emisiones tienden a aumentar para ambos casos. Una explicación aceptable es la unidad RGIBS que se utiliza para simular la cámara de combustión debido a que esta unidad no necesita el rendimiento o estequiometria detallada de la reacción, por lo tanto, calcula equilibrio químico y el de fase minimizando la energía libre de Gibbs.

7.2.4 Análisis energético Escenario 2 (Variando porcentaje de carga)

En la siguiente tabla, se muestra la influencia de variar el flujo de agua, como se mencionó anteriormente se analiza el comportamiento de los gases exhaustos a medida que este flujo aumenta o disminuye. A medida que se ingresa mayor cantidad de agua, aumenta la rata de transferencia de calor entre los fluidos fríos y calientes, por lo tanto, tendera a disminuir la temperatura de los gases exhaustos.

Tabla 15. Análisis de sensibilidad variando el agua de alimentación.

Flujo de agua [kg/s]	TSALHOGAR [°C]	TSAL IC1 [°C]	TSALSP1 [°C]	TSALSP2 [°C]	TSALPRE1 [°C]	TSALPRE2 [°C]	TGEXHAUST [°C]
40,000	1438,631	883,966	669,467	585,326	500,744	404,201	303,988
40,492	1438,631	876,856	661,052	575,541	490,750	393,950	292,207
40,985	1438,631	869,737	652,621	565,914	480,914	383,860	280,584
41,477	1438,631	862,608	644,173	556,233	471,022	373,711	268,894
41,970	1438,631	855,471	635,710	546,534	461,110	363,540	257,175
42,462	1438,631	848,324	627,229	536,810	451,171	353,341	245,420
42,954	1438,631	841,168	618,732	527,063	441,206	343,113	233,630
43,447	1438,631	834,002	610,218	517,292	431,215	332,858	221,806
43,939	1438,631	826,826	601,687	507,497	421,198	322,575	209,948
44,432	1438,631	819,641	593,138	497,677	411,154	312,264	198,056
44,924	1438,631	812,446	584,572	487,833	401,083	301,926	186,131
45,417	1438,631	805,241	575,988	477,963	390,985	291,559	174,173
45,818	1438,631	799,360	568,976	470,051	382,889	283,248	164,567
45,909	1438,631	798,026	567,386	468,068	380,860	281,164	162,183
46,401	1438,631	790,800	558,766	458,147	370,707	270,742	150,161

Fuente. Autor, software Aspen Plus V10.

Como se muestra en la Tabla 15, se puede afirmar que el comportamiento de la transferencia de calor entre los gases exhaustos y el fluido que gana energía es válido para los rangos de 44.432 a 46.401 kg/s, debido a que en estos rangos de temperatura se asimila a las condiciones de operación de la caldera de generación de vapor real (Temperatura de los gases exhaustos), en este caso es válido aumentar el flujo de agua de alimento debido a que la caldera de generación de

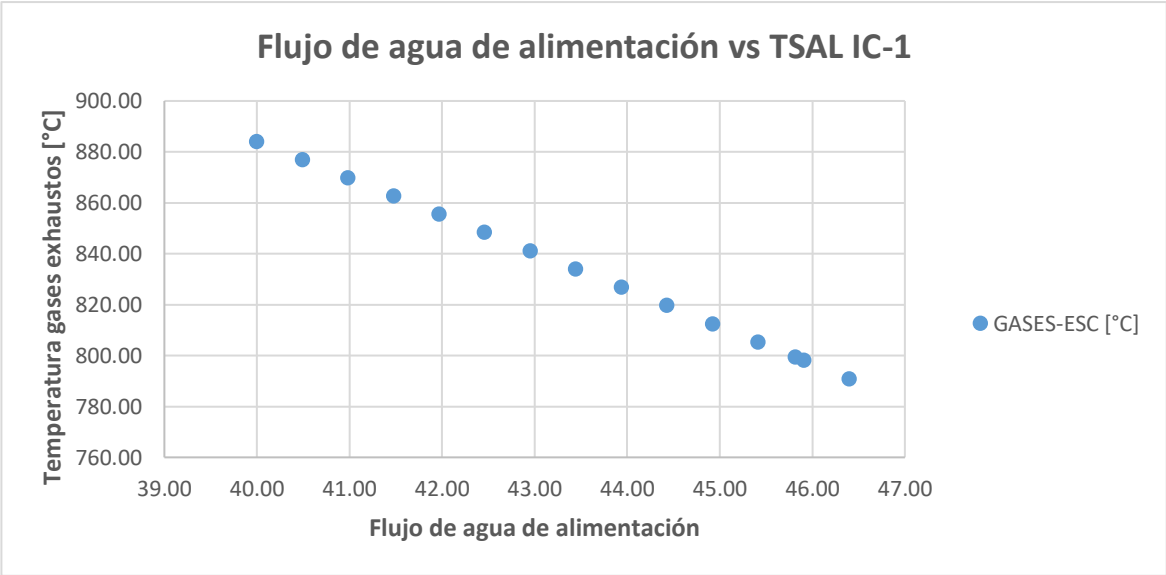
vapor real tiene una carga máxima de vapor de 50 kg/s, también es válido afirmar que a medida que aumenta el flujo de agua de alimento se aprovecha mayor porcentaje la energía contenida en el fluido caliente, por lo tanto, es más eficiente la transferencia de calor al fluido con menor temperatura. También se puede observar una disminución de temperatura de los gases exhaustos a la salida del economizador, teniendo un impacto favorable con el medio ambiente.

Tabla 16. Relación de aire-combustible.

Factor aireación	Kg-vapor/Kg-combustible
1.300	1,777
	1,799
	1,821
	1,843
	1,865
	1,887
	1,909
	1,930
	1,952
	1,974
	1,996
	2,018
	2,036
	2,040
	2,062

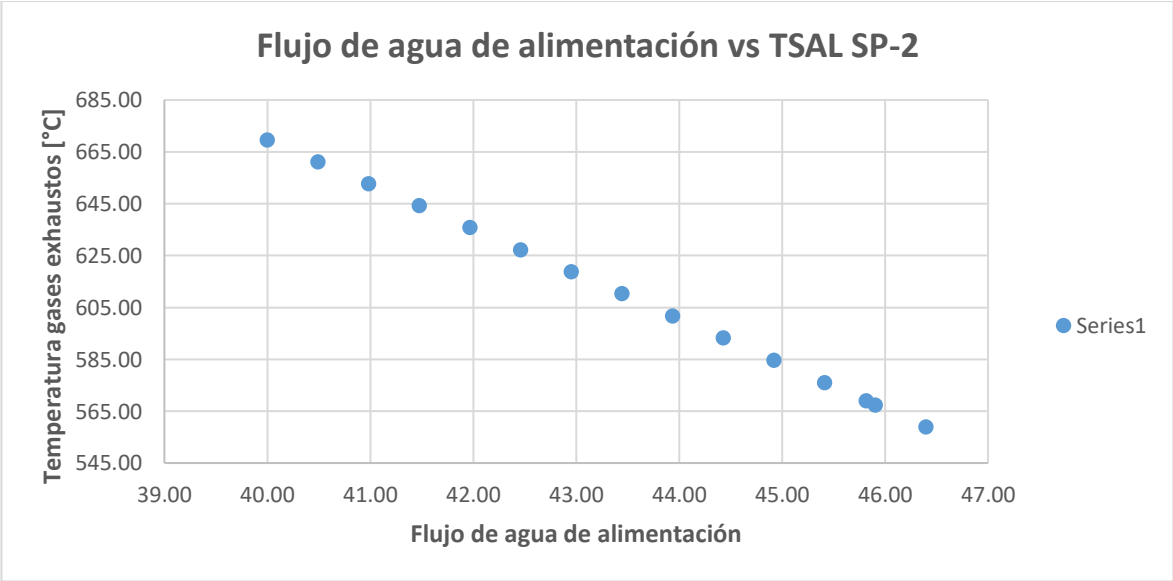
Fuente. Autor, software Aspen Plus V10.

Gráfica 11. Comportamiento de los gases exhaustos saliendo del Intercambiador de calor 1.



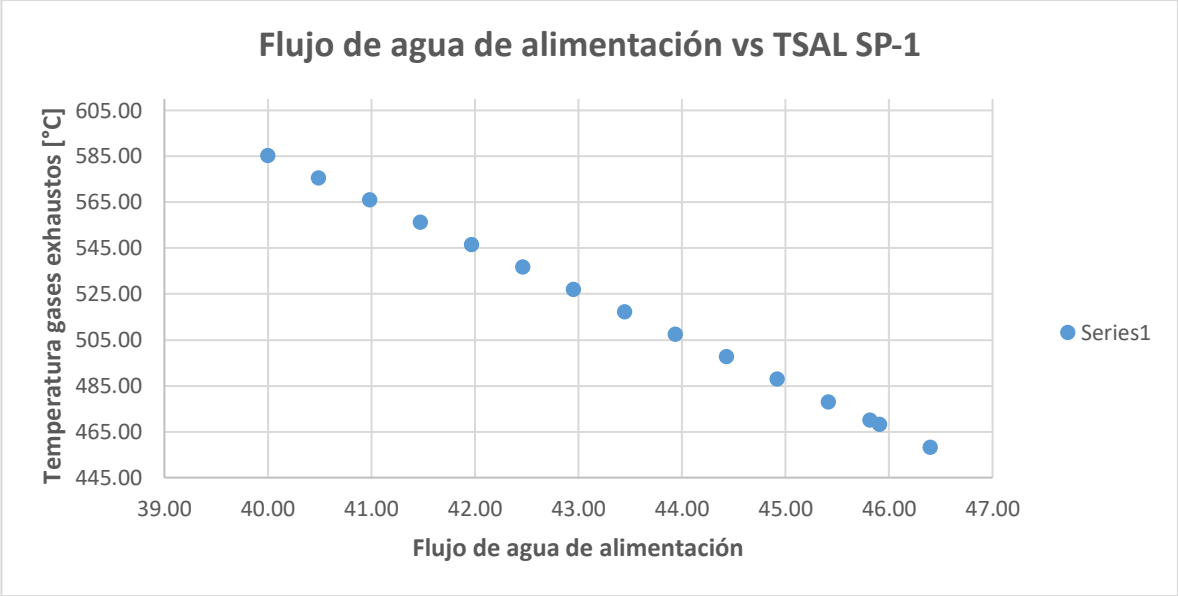
Fuente. Autor, software Aspen Plus V10.

Gráfica 122. Comportamiento de los gases exhaustos saliendo del sobrecalentador de vapor 2.



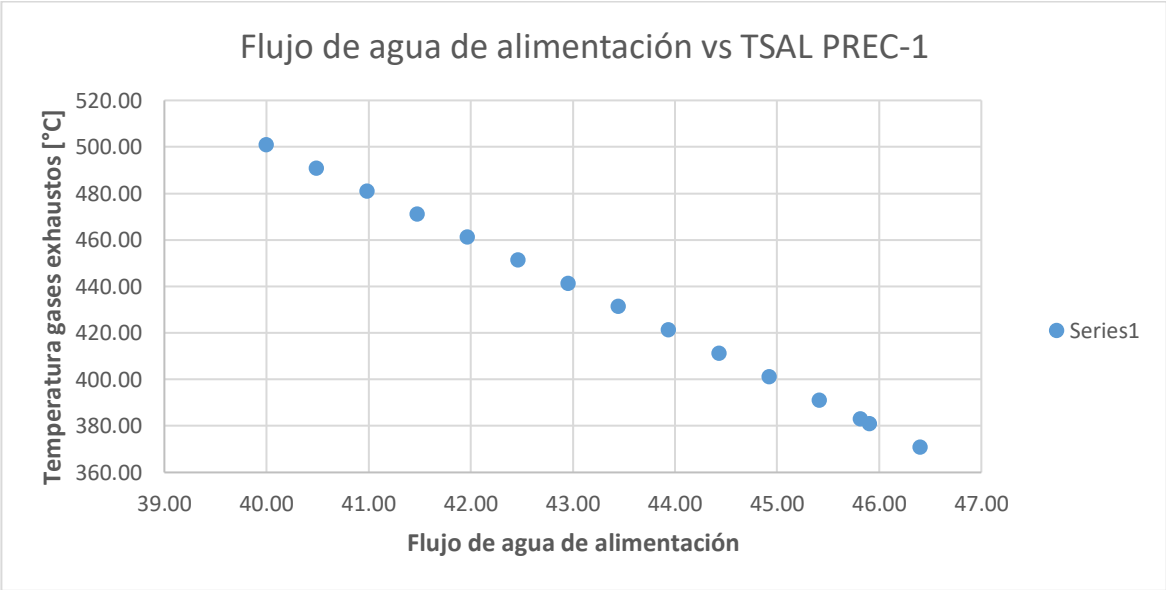
Fuente. Autor, software Aspen Plus V10.

Gráfica 133. Comportamiento de los gases exhaustos saliendo del sobrecalentador de vapor 1.



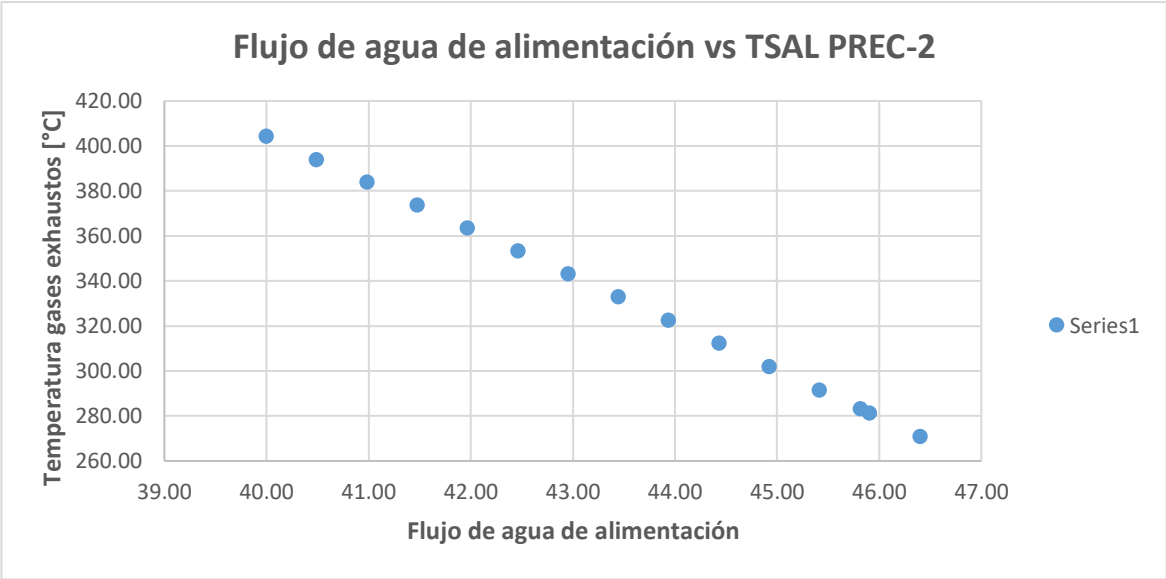
Fuente. Autor, software Aspen Plus V10.

Gráfica 144. Comportamiento de los gases exhaustos saliendo del precalentador de aire 1.



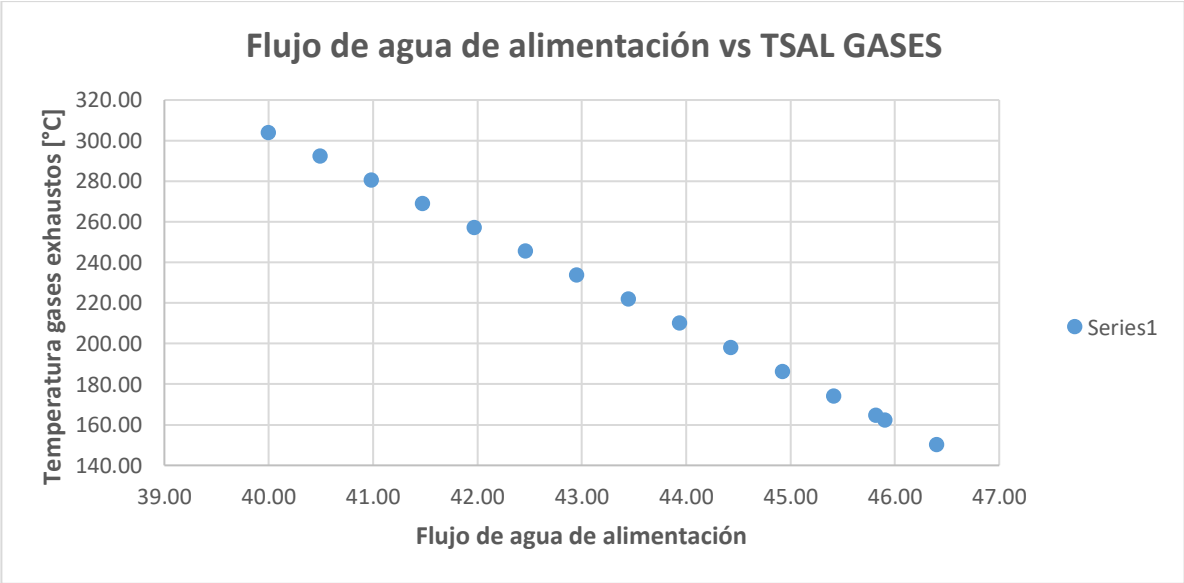
Fuente. Autor, software Aspen Plus V10.

Gráfica 155. Comportamiento de los gases exhaustos saliendo del precalentador de aire 2.



Fuente. Autor, software Aspen Plus V10.

Gráfica 166. Comportamiento de los gases exhaustos saliendo del economizador (gases de escape).



Fuente. Autor, software Aspen Plus V10.

En los gráficos anteriores, se muestra el comportamiento de los gases exhaustos a medida que varía el flujo de agua de alimentación. En cada uno de los gráficos se puede observar, que a medida que se aumenta el suministro de este parámetro la temperatura de los gases exhaustos a la salida de cada equipo de intercambio de calor a disminuir.

7.2.5 Eficiencia energética (Escenario 2)

En el siguiente cuadro, se muestra el cambio de eficiencia energética a medida que aumenta el flujo de agua de alimentación teniendo en cuenta la formula general de eficiencia en calderas de generación de vapor.

$$n = 100 * \left(\frac{m_v * (h_v - h_{al)}}{(m_b * PC_{bagazo})} \right)$$

Donde:

$m_v = masa\ de\ vapor\ generado\ \left(\frac{kg}{h}\right)$

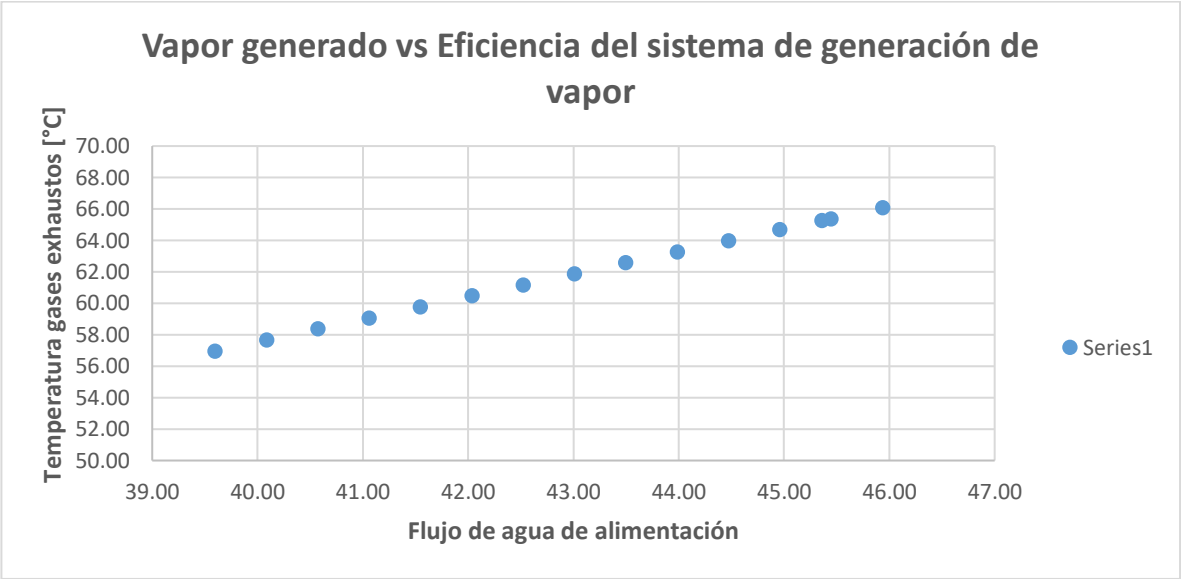
$m_b = masa\ de\ combustible\ quemado\ \left(\frac{kg}{h}\right)$

$h_v = Entalpía\ del\ vapor\ \left(\frac{kJ}{kg}\right)$

$h_v = Entalpía\ del\ agua\ \left(\frac{kJ}{kg}\right)$

$n = \%\ de\ eficiencia\ energética$

Gráfica 17. Eficiencia energética escenario 2.



Fuente. Autor, software Aspen Plus V10.

En el grafico anterior, se puede observar un aumento de la eficiencia del sistema de generación de vapor al aumentar la carga. Este aumento se debe a que, con la misma cantidad de combustible, se produce mayor cantidad de vapor. Para este caso se aseguran mismas temperaturas de salida del vapor vivo, solamente cambia el aprovechamiento energético de la transferencia de fluido frio y caliente en el proceso de generación de vapor.

7.2.6 Análisis ambiental (Escenario 2)

Se analizan las emisiones producidas por los gases de combustión teniendo en cuenta la variación de flujo de agua de alimentación. Dentro de estas emisiones se toman en cuenta las más relevantes CO_2 y CO, sabiendo que este no es un factor que influye directamente con las emisiones de gases por tal razón estas emisiones permanecerán constantes en este escenario. El dióxido de carbono emitido a la atmosfera para este caso es de 1.29 [Ton/día] y para el monóxido de carbono es de 19.76 [ppm].

7.2.7 Indicadores energéticos en el generador de vapor

Se calcularon proponen 3 indicadores energéticos, entre ellos están el índice de generación de vapor con bagazo (IGV_b), índice de eficiencia energética (IEE) y el índice de aprovechamiento de la capacidad de vapor (IAV).

- Índice de generación de vapor de bagazo (IGV_b): Representa el rendimiento del generador de vapor (caldera), a menor consumo de bagazo mayor excedente de combustible y mejor aprovechamiento de los recursos, también representa el rendimiento de caldera.

$$IGV_b = \frac{m_v}{m_b}$$

Donde:

$m_v = Cantidad\ de\ vapor\ generado\ en\ la\ caldera\ \left[\frac{kg_v}{h}\right]$

$m_b = Cantidad\ de\ bagazo\ quemado\ en\ la\ caldera\ \left[\frac{kg_b}{h}\right]$

$IGV_b = \left[\frac{kg_v}{kg_b}\right]$

- Índice de eficiencia energética (IEE): Representa la energía aprovechada proveniente en los combustibles, es la relación entre la energía generada en la caldera y la energía contenida en los combustibles.

$$IEE = \frac{E_v}{E_b} * 100$$

Donde:

$E_v = Energía\ generada\ en\ la\ caldera\ por\ hora\ [kWh]$

$E_b = Energía\ contenida\ en\ el\ combustible\ quemado\ por\ hora\ [kWh]$

$IEE = \%\ de\ eficiencia\ energética.$

- Índice de aprovechamiento de la capacidad de vapor (IAV): Representa el grado de utilización de la capacidad de generación de vapor instalada. Este índice puede usarse global o individualmente para cada caldera [39].

$$IAV = \left(1 - \frac{V_i - V_g}{V_g}\right) * 100$$

Donde:

$V_i = Capacidad\ de\ generacion\ de\ vapor\ instalada\ \left[\frac{kg_v}{h}\right]$

$V_g = Capacidad\ de\ generacion\ de\ vapor\ generada \left[\frac{kg_v}{h}\right]$

$IAV = \%\ de\ utilización\ de\ vapor$

Tabla 17. Indicador de vapor generado por cantidad de combustible utilizado escenario 1.

Vapor generador por kg de combustible [kg vapor/kg de combustible]
2.05275
Fuente: Elaboración propia. Valores calculados.

Fuente. Elaboración propia. Información de Aspen Plus V10.

Tabla 18. Índice de aprovechamiento de la capacidad de vapor escenario 1 - 2.

% de utilización de vapor [%]
89.8072
Fuente: Elaboración propia. Valores calculados.

Fuente. Elaboración propia. Información de Aspen Plus V10.

Para el cálculo del índice de eficiencia energética se realiza para el escenario 2, manteniendo constante la energía generada de vapor y variando las energías de contenidas en el combustible.

- Escenario 2

Tabla 19. Índice de eficiencia energética escenario 2.

Flujo masico de combustible [kg/s]	E_v [kWh]	E_b [kWh]	IEE [%]
22.281	3.08E+04	3.94E+04	78.123
22.553	3.08E+04	4.02E+04	76.656
22.825	3.08E+04	4.09E+04	75.235
23.097	3.08E+04	4.17E+04	73.858
23.369	3.08E+04	4.25E+04	72.523
23.641	3.08E+04	4.32E+04	71.230
23.912	3.08E+04	4.40E+04	69.975
24.184	3.08E+04	4.48E+04	68.757
24.456	3.08E+04	4.56E+04	67.575
24.728	3.08E+04	4.64E+04	66.428
25.000	3.08E+04	4.72E+04	65.314

Fuente. Elaboración propia. Información de Aspen Plus V10.

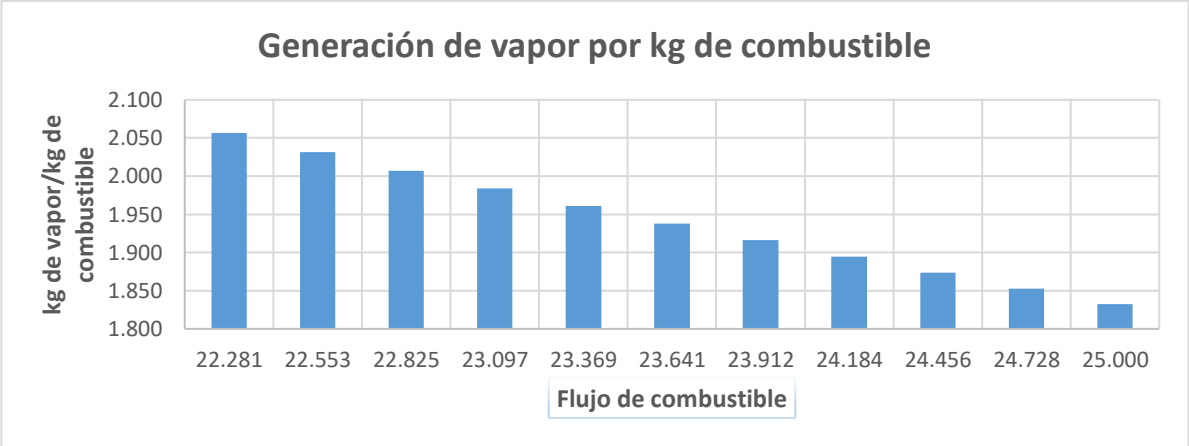
Gráfica 17. Índice de eficiencia energética escenario 2.

Fuente. Elaboración propia. Información de Aspen Plus V10.

En el grafico anterior, se puede observar una reducción del índice de eficiencia energética debido a que la cantidad de bagazo suministrado aumenta, normalmente en este tipo de sistemas es ineficiente aumentar la cantidad de combustible para generar la misma cantidad de vapor.

Por último, se obtiene el índice de generación de vapor con bagazo para el escenario 2, teniendo en cuenta que este tiene una variación en la cantidad de combustible suministrada.

Gráfica 18. Consumo de combustible para la producción de un kg de vapor vivo.



Fuente. Elaboración propia. Información de Aspen Plus V10.

8. CONCLUSIONES

Una vez implementado el sistema simulado de generación de vapor de caldera bagacera y al haber efectuado pruebas de modelado y simulación, estableciendo los parámetros propios y manipulando las variables de entrada ya antes mencionadas, con valores reales, se obtuvo un resultado satisfactorio en el valor de la variable final a controlar es decir la eficiencia energética del sistema. Se observa que las temperaturas de salida tales como gases exhaustos y el vapor vivo tienen unos porcentajes de error menores al 7%. El mayor error absoluto se encuentra en la temperatura de entrada al precalentador de aire 1 con un error absoluto del 6.027%. Las demás temperaturas registran errores absolutos más bajos entre estas, la temperatura de gases exhaustos a la salida del hogar con un 1.313%, a la entrada del precalentador de aire primario con 2.462%, a la entrada del economizador con 2.379% y a la salida de gases de escape con un 1.286%.

Para los casos tratados en este documento, y de acuerdo con las gráficas obtenidas se puede observar que, en general, el sistema presenta los siguientes valores de eficiencia: para el caso base el 65.902% (simulado) y 66.71% (real), lo cual da un error absoluto del 1.21%, por lo tanto, muy similar al sistema real. Para el escenario 1, se presenta una variación entre 63.459% y 64.253%, también aproximado teniendo en cuenta que a la eficiencia se le agregan calores sensibles del componente aire, lo cual da una variación de error absoluto entre 3.68% y 4.87%. Para el escenario 2, se presentan variaciones de eficiencia entre 56.96% y 66.07%, presentando errores absolutos entre 0.64% y 9.75%, por lo tanto, no es beneficioso para flujos de agua menores al 42.95 kg/s.

Lo anterior verifica la funcionalidad y versatilidad del sistema simulado, específicamente para el caso base el cual está más relacionado con el sistema real.

En el caso del escenario 1, variando el exceso de aire de combustión de 1.0 a 1.5% se analiza el comportamiento de los gases de combustión, se observan disminuciones en temperatura de 1695.22 a 1367.38 °C a medida que aumenta dicha relación. Para el escenario 2, variando el flujo de agua de 40 a 46.401 kg/s, se analiza el comportamiento de los gases combustión, y estos sufren altos cambios de temperatura a la salida del economizador desde 150.161 a 303.988 °C.

También se plantearon indicadores ambientales, teniendo en cuenta que el CO2 y CO son los gases contaminantes con mayor participación para estas emisiones de gases. En el caso del escenario 1, se observan pequeñas variaciones en las emisiones de 1.286 a 1.292 TON/día de CO2 y estas aumentan paulatinamente a medida que se aumenta el factor de aireación. Para el caso del CO, se observa una variación de 441.96 a 7.291 ppm a la salida de los gases de escape debido a que la relación de aireación aumenta. Para el caso del escenario 2, no se presentan cambios en la cantidad de gases emitidos a la atmosfera, por lo tanto, este valor permanece constante a medida que el flujo de agua varia, en el caso del CO2 1.292 [TON/día] y para el CO 19.766 [ppm].

9. RECOMENDACIONES

Para un futuro trabajo se recomienda tener en cuenta condiciones específicas de operación de los equipos que hacen parte del sistema de generación de vapor. En este caso sería conocer el área de transferencia de calor, numero de tubos de los intercambiadores y el coeficiente global de transferencia de calor. Con estos valores se podría simular la caldera de bagazo y obtener unos resultados muy similares.

También para el análisis de sensibilidad encontrar data del comportamiento de la generadora de vapor a medida que se varía el aire de combustión y cuando se varía el flujo de combustible.

Con respecto a los impactos por emisiones al medio ambiente, sería excelente encontrar un equipo que permita disminuir las emisiones de estos contaminantes y compararlos con data real de emisiones.

10. REFERENCIAS

[1] C. Quintero-Zuñiga, «Evaluación de la eficiencia energética en el área de elaboración de un ingenio azucarero,» Santiago de Cali, 2019.

[2] J. Arias-Gaviria, B. Van Der Zwaan, T. Kober y S. Arango-Aramburo, «The prospects for small hydropower in colombia,» *Renewable energy 107,* pp. 204-214, 2017.

[3] S. Zapata, M. Castañeda, E. Garces, C. Franco y I. Dyner, «Assessing security of supply in a largely hydroelectricity-based system: the colombian case,» *Energy 156,* pp. 444-457, 2018.

[4] J. C. Acevedo-Pinzón, «Simulacion de las unidades de cogeneración de energía a partir de bagazo de caña de azúcar,» 2009.

[5] C. Alderetes, «Calderas a Bagazo - – Proyecto, operación y mantenimiento,» 2016.

[6] P. Uribazo Díaz, D. Tito Ferro y J. Ochoa Estévez, «Influencias de las calderas sobre el medio ambiente,» *Ciencia en su PC,* nº 3, pp. 1-13, 2006.

[7] E. Rosero y B. Chiliquinga, «Observatorio de energias renovables en América Latina y el Caribe,» 2011.

[8] S. Pelayo-Díaz, «Modelado y simulación de una caldera de vapor industrial usando Ecosimpro,» 2001.

[9] A. Echeverry-Arbelaez, «Análisis Exergético y Termo-ecológico de una caldera acuotubular de bagazo y cabón en un ingenio azucarero del Valle del Cauca,» Santiago de Cali, 2017.

[10] ASOCAÑA, «Más que azúcar, una fuente de energía renovable para el país,» 2014.

[11] Ingenio Risaralda, «Experiencia Proyecto Energía Renovable - Caso de Exito,» 2018.

[12] L. Vásquez-Acuña, «Predecir mediante el análisis exergético la tecnología adecuada de cogeneración para la optimización de la planta azucarera san jacinto,» 2017.

[13] D. Molina-López, «Modelacion matemática basada en el análisis exergético de una caldera bagacera,» 2015.

[14] E. Silva-Lora, «Calderas de vapor y cogeneración en la industria azucarera.,» 2003.

[15] E. Rodas Flores y C. Vargas Machuca, «Análisis comparativo de la eficiencia térmica en la caldera bagacera n°4 en funcionamiento convencional y con inyector secundario de aire caliente en la Empresa Agroindustrial Pomalca S.A.A.,» 2016.

[16] J. E. Esquerre-Verástegui, «Reducción del impacto ambiental de calderas bagaceras,» *Untelsciencia-Perú,* 2016.

[17] F. Espinola-Lozano, «Tutorial de Aspen Plus introducción y modelos simples de operaciones unitarias,» 2017.

[18] Michigan University, «“Reactor Models,” Aspen Plus,» 2001.

[19] AspenPlus, «Aspen Plus 2004.1: Getting Started Modeling Processes with Solids,» *2004.*

[20] C. Valderrama, V. Quintero y V. Kafarov, «Energy and water optimization of an integrated bioethanol production process from molasses and sugarcane bagasse: A Colombian case,» *Fuel,* 2019.

[21] F. Nadaraju, A. Maddocks, J. Zanganeh y B. Moghtaderi, «Simulation of power and cooling generation via heat recovery from a ventilation air methane abatement unit,» *Fuel,* pp. 27-35, 2019.

[22] E. Sefakor-Dogbe, M. Mandegari y J. F. Görgens, «Assessment of the thermodynamic performance improvement of a typical sugar mill through the integration of waste-heat recovery technologies,» *Applied Thermal Engineering,* 2019.

[23] N. A. Fukushima, M. C. Palacios-Bereche, R. Palacios-Bereche y S. A. Nebra, «Energy analysis of the ethanol industry considering vinasse concentration and incineration,» *Renewable Energy,* pp. 96-109, 2019.

[24] E. Sefakor-Dogbe, M. A. Mandegari y J. F. Görgens, «Exergetic diagnosis and performance analysis of a typical sugar mill based on Aspen Plus® simulation of the process,» *Energy,* pp. 614-625, 2018.

[25] Y. Camacho-Ardila, J. E. Jaimes-Figueroa, B. Hoss-Lunelli, R. Maciel-Filho y M. R. Wolf-Maciel, «Syngas production from sugar cane bagasse in a circulating fluidized bed gasifier using Aspen Plus™: Modelling and Simulation,» *Computer Aided Chemical Engineering,* pp. 1093-1097, 2018.

[26] M. Mandegari, S. Farzad y J. F. Görgens, «A new insight into sugarcane biorefineries with fossil fuel co-combustion: Techno-economic analysis and life cycle assessment,» *Energy Conversion and Management,* pp. 76-91, 2018.

[27] A. Gagliano, F. Nocera, M. Bruno y G. Cardillo, «Development of an Equilibrium-based Model of Gasification of Biomass by Aspen Plus,» *Energy Procedia,* pp. 1010-1019, 2017.

[28] O. Pardo-Planas, H. K. Atiyeha, J. R. Phillips, C. P. Aichele y S. Mohammad, «Process simulation of ethanol production from biomass gasification and syngas fermentation,» *Bioresource Technology,* pp. 925-932, 2017.

[29] E. A. Pina, R. Palacios-Bereche, M. F. Chavez-Rodriguez, A. V. Ensinasa, M. Modesto y S. A. Nebra, «Reduction of process steam demand and water-usage through heat integration in sugar and ethanol production from sugarcane – Evaluation of different plant configurations,» *Energy,* pp. 1263-1280, 2017.

[30] V. Larnaudie, E. Rochón, M. D. Ferrari y C. Lareo, «Energy evaluation of fuel bioethanol production from sweet sorghum using very high gravity (VHG) conditions,» *Renewable Energy,* pp. 280-287, 2016.

[31] A. P. Quintero-Carrascal, «Diseño mecánico de un generador de vapor tipo acuotubular de presión subcrítica y baja producción de vapor,» 2013.

[32] ASOCAÑA, «Aspectos generales del sector agroindustrial de la caña 2018-2019,» 2018.

[33] ASOCAÑA, «Sector Agroindistria de la caña - Aspectos Generales 2017-2018,» 2017.

[34] J. Thompson, «Una historia paso a paso (Calderas y Quemadores),» 2014.

[35] C. D. SHIELD, «Calderas tipos, características y sus funciones,» Compañía Editorial Continental, 1975.

[36] Y. CENGEL y M. BOLES, «Termodinámica,» McGraw - Hill, 2006.

[37] D. Sanz-Amaya, «Análisis y optimización exergética de una planta de cogeneración para la industria azucarera,» Pereira, 2014.

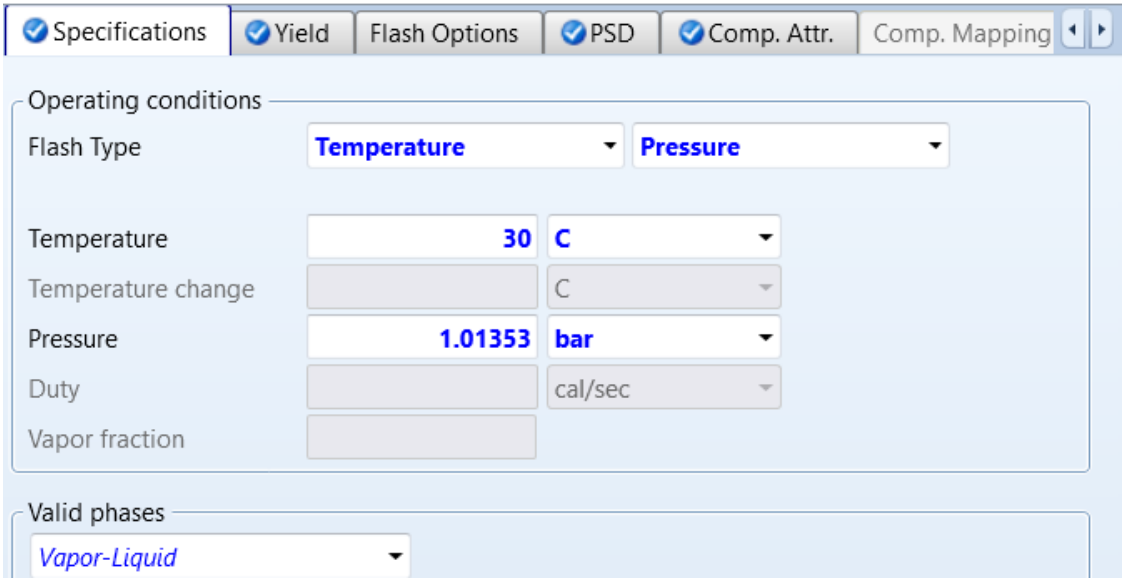
[38] P. Abarca-Bahamondes, «Descripción de Calderas y Generadores de Vapor».

[39] M. Muñoz, «Cengicaña, Guía para determinar y reducir pérdidas de energía en generadores de vapor,» Guatemala, 2012.

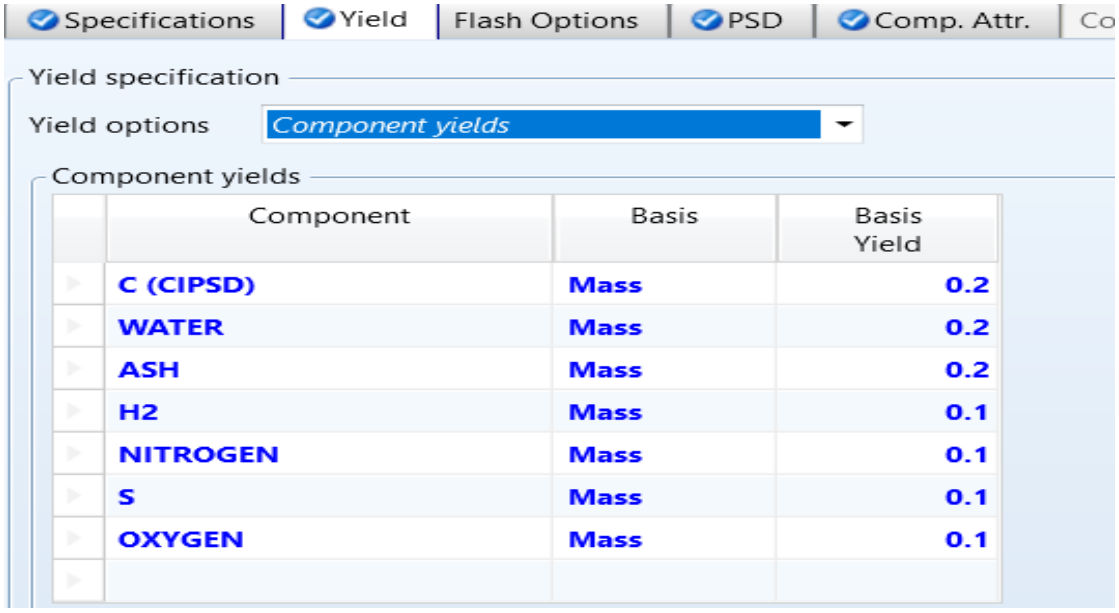
11. ANEXOS

ANEXO B: Especificaciones de simulación en Aspen Plus V10

B1. Bloque DECOMP Ryield



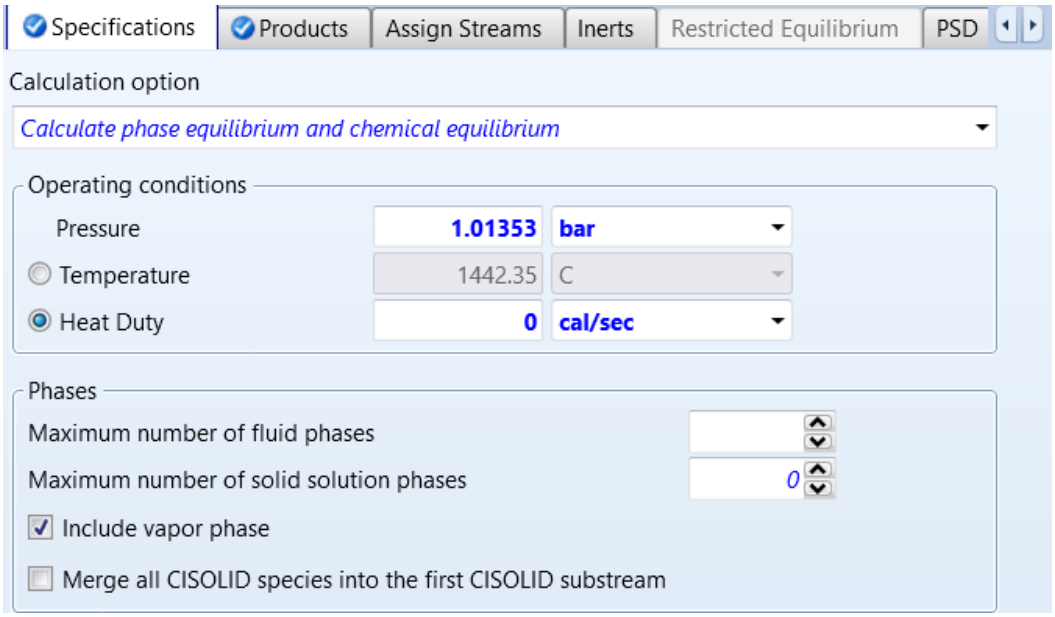
Fuente: Aspen Plus V10. Especificaciones propias



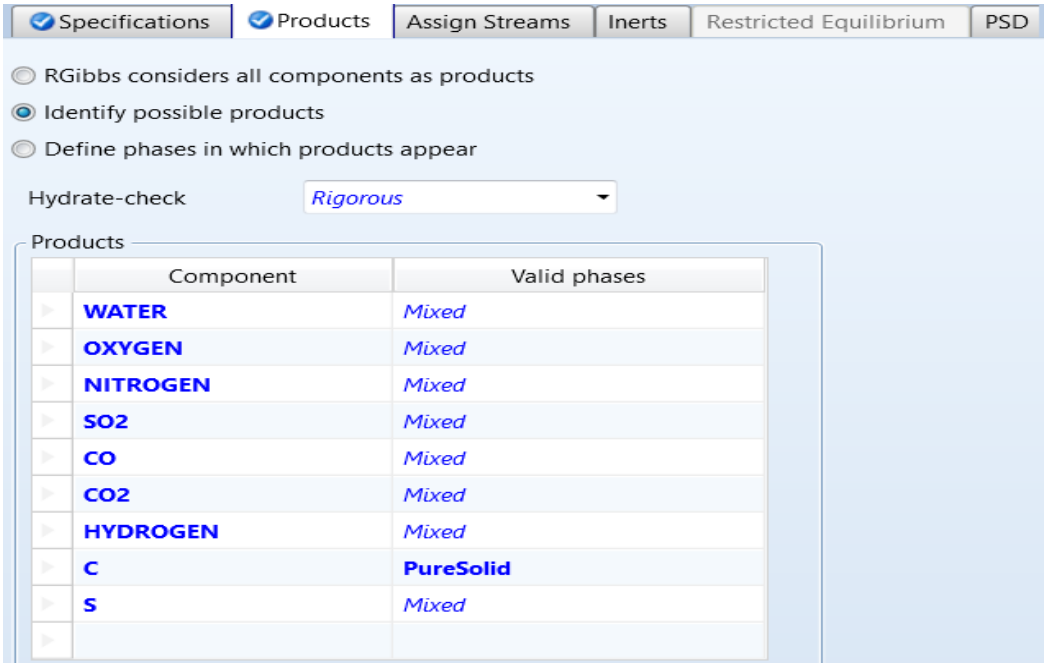
Component	Basis	Basis Yield
C (CIPSD)	Mass	0.2
WATER	Mass	0.2
ASH	Mass	0.2
H2	Mass	0.1
NITROGEN	Mass	0.1
S	Mass	0.1
OXYGEN	Mass	0.1

Fuente: Aspen Plus V10. Especificaciones propias

B1. Bloque RGibbs

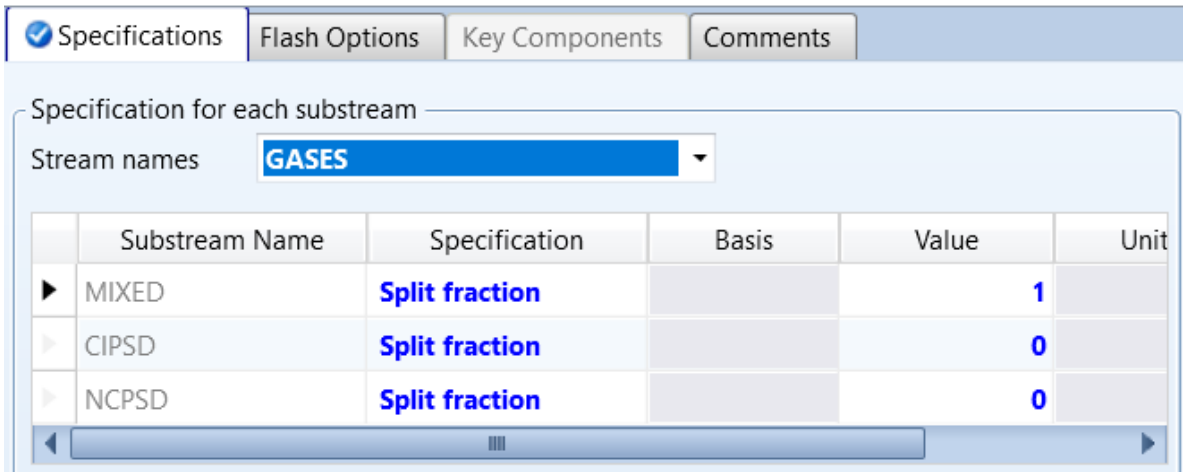


Fuente: Aspen Plus V10. Especificaciones propias.



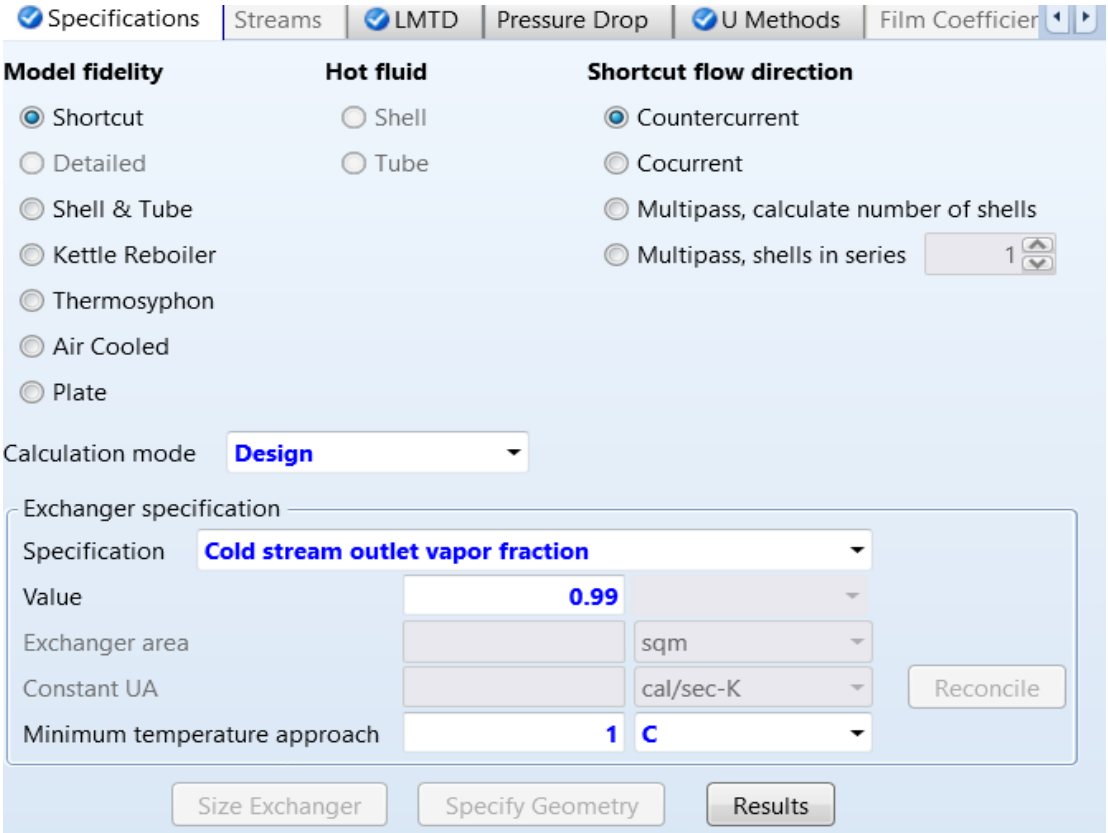
Fuente: Aspen Plus V10. Especificaciones propias.

B3. Bloque Separate SSplit



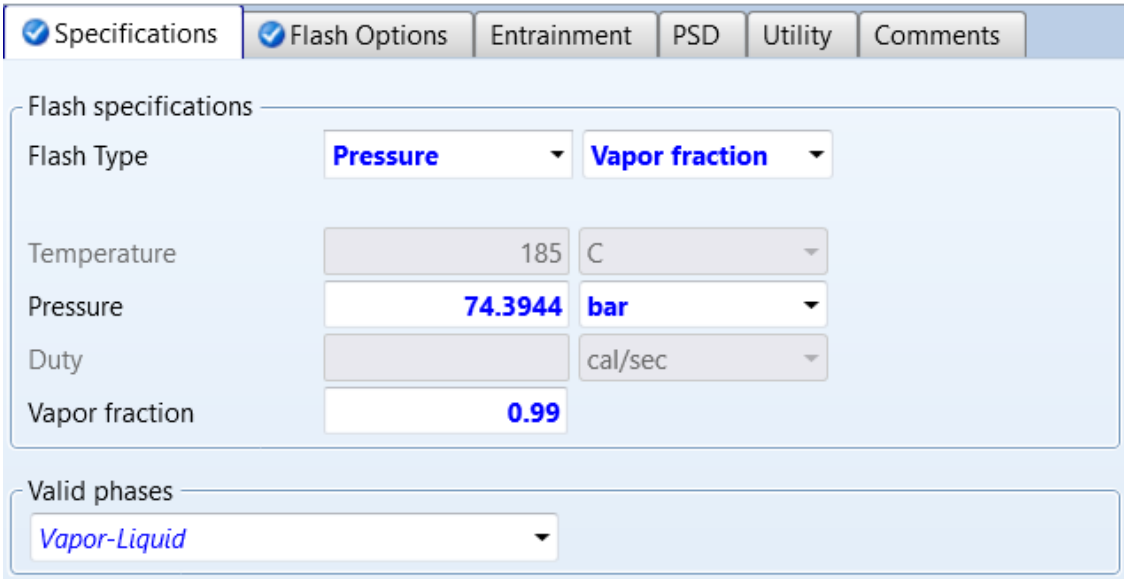
Fuente: Aspen Plus V10. Especificaciones propias.

B4. Bloque HOGAR-PAREDES (I/C)



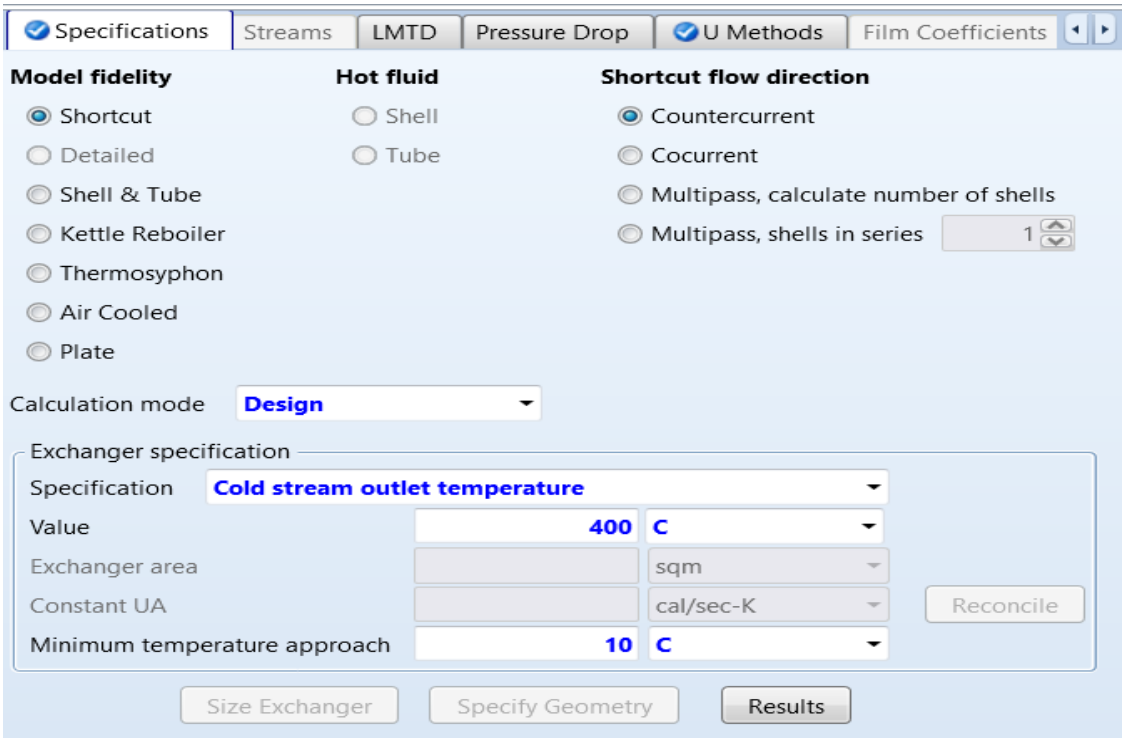
Fuente: Aspen Plus V10. Especificaciones propias.

B5. Bloque HOGAR-PAREDES (DOMO)



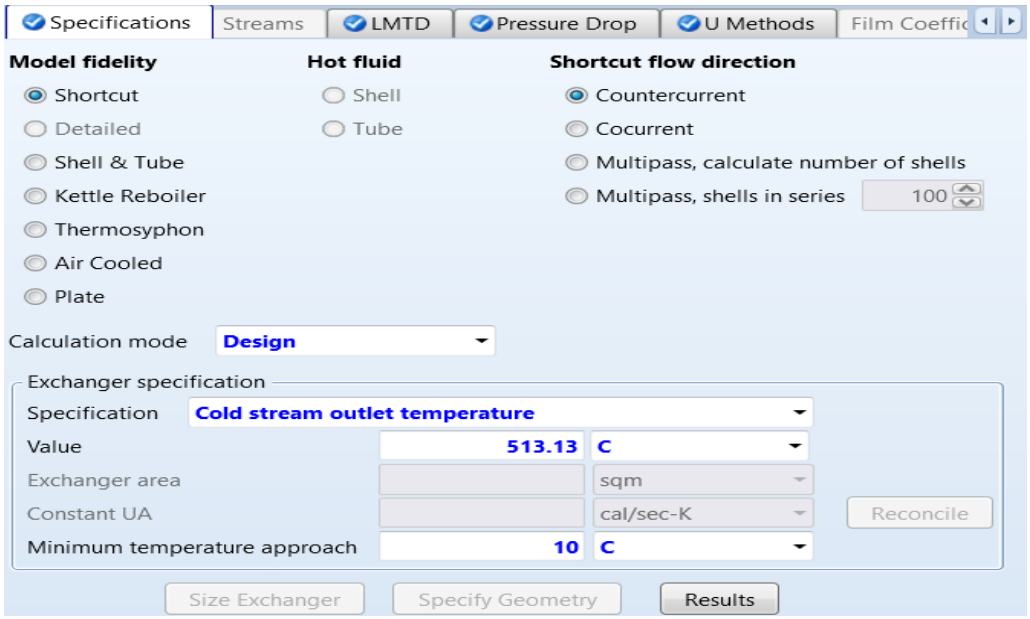
Fuente: Aspen Plus V10. Especificaciones propias.

B6. Bloque SUP-HE12 (SUPERHEATER 1)



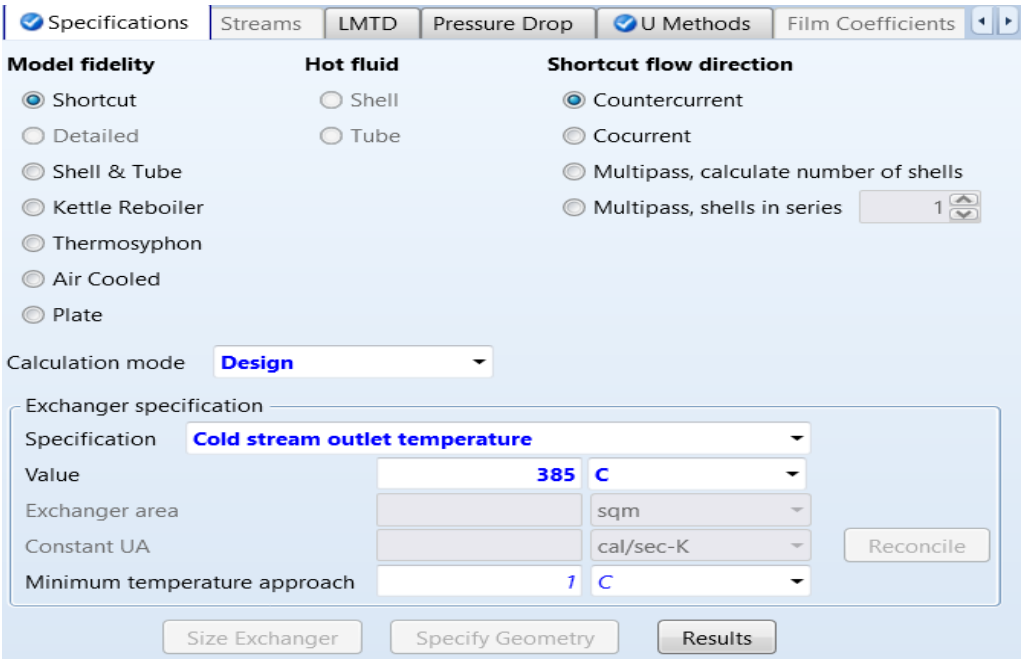
Fuente: Aspen Plus V10. Especificaciones propias.

B7. Bloque SUP-HE12 (SUPERHEATER 2)



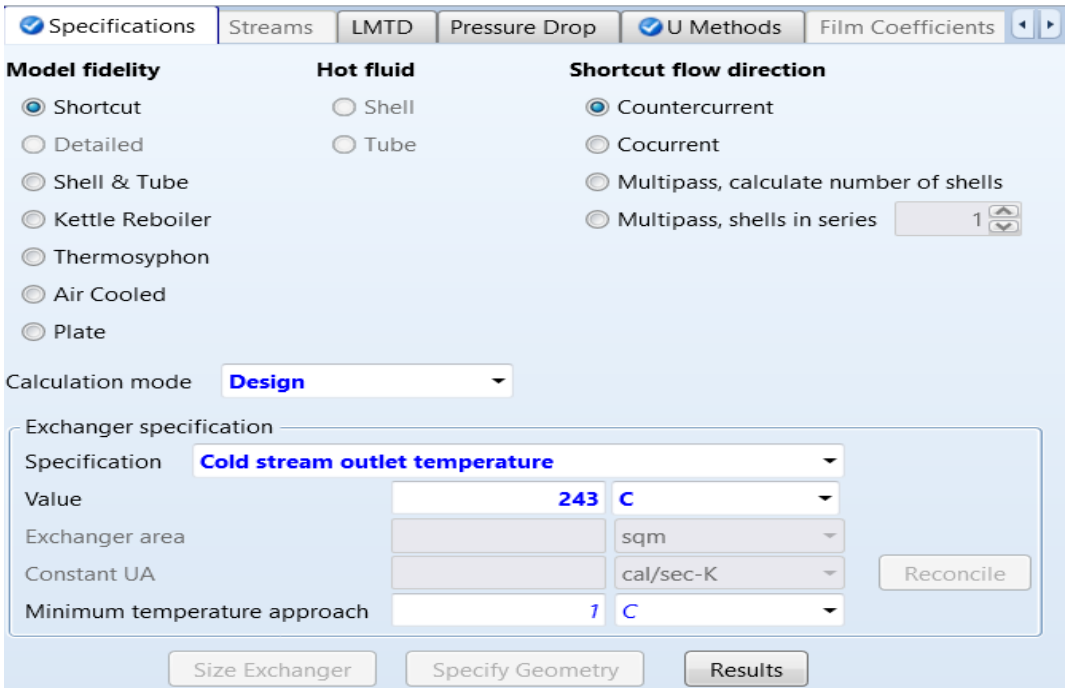
Fuente: Aspen Plus V10. Especificaciones propias.

B8. Bloque precalentador AIR-SOBRE



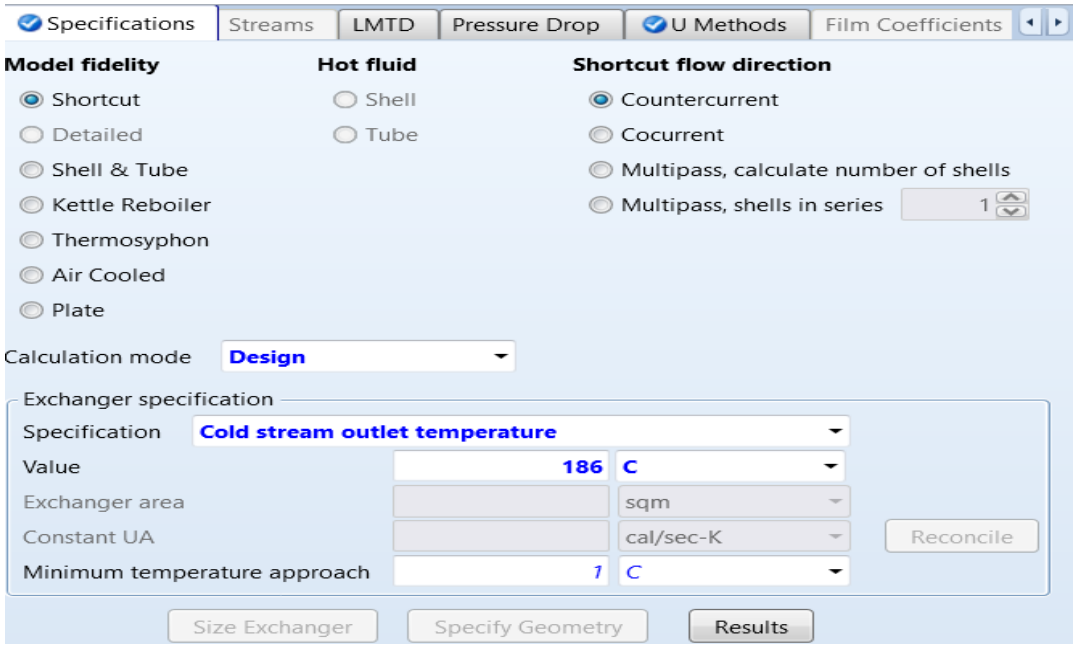
Fuente: Aspen Plus V10. Especificaciones propias.

B9. Bloque precalentador AIR-FORZ



Fuente: Aspen Plus V10. Especificaciones propias.

B10. Bloque economizador



Fuente: Aspen Plus V10. Especificaciones propias.