

**METODOLOGÍA ANALÍTICA PARA ESTIMAR LOS GASES DE EFECTO  
INVERNADERO (GEI) PRODUCIDOS A PARTIR DE LOS GENERADORES DE  
VAPOR OTSG EN LAS OPERACIONES DE CAMPOS DE CRUDO PESADO.**

**JULIAN DAVID PAREDES BERNAL**

**Proyecto integral de grado para optar al título de  
INGENIERO QUIMICO**

**Director  
JUAN CAMILO CELY GARZON  
INGENIERO QUÍMICO**

**Codirector  
ROMEL ANTONIO PÉREZ ROMERO  
INGENIERO DE PETRÓLEOS**

**Orientador  
LUIS EDUARDO GARCÍA RODRÍGUEZ  
MAGISTER EN CIENCIAS DE INGENIERÍA**

**FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA  
FACULTAD INGENIERÍAS  
PROGRAMA INGENIERÍA QUÍMICA  
BOGOTÁ D.C  
2023**

**NOTA DE ACEPTACIÓN**

---

---

---

---

---

---

---

JUAN CAMILO CELY GARZON  
Firma del Director

---

Nombre  
Firma del Presidente Jurado

---

JUAN CAMILO GÓMEZ CAIPA  
Firma del Jurado

---

DIANA CAROLINA GARZON VELASCO  
Firma del Jurado

Bogotá D.C Febrero 20 de 2023

## **DIRECTIVOS DE LA UNIVERSIDAD**

**Presidente de la Universidad y Rector del Claustro**

**Dr. MARIO POSADA GARCÍA-PEÑA**

**Consejero Institucional**

**Dr. LUIS JAIME POSADA GARCIA-PEÑA**

**Vicerrectora Académica y de Investigaciones**

**Dra. ALEXANDRA MEJÍA GUZMÁN**

**Vicerrector Administrativo y Financiero**

**Dr. RICARDO ALFONSO PEÑARANDA CASTRO**

**Secretario General**

**Dr. JOSÉ LUIS MACÍAS RODRÍGUEZ**

**Decana de la Facultad**

**Dra. NALINY PATRICIA GUERRA PRIETO**

**Director del Programa de Ingeniería Química**

**Ing. NUBIA LILIANA BECERRA OSPINA**

Las directivas de la Universidad de América, los jurados calificadores y el cuerpo docente no son responsables por e ideas expuestas en el presente documento. Estos corresponden únicamente a los autores

## DEDICATORIA

Dedico este trabajo de grado a DIOS, igualmente a mis padres, VICTOR JULIO PAREDES Y LUZ DARY BERNAL RODRIGUEZ, que me han apoyado, guiado, enseñado y formado durante toda mi vida, dándome valores para ser una persona de bien. Gracias a ellos por su esfuerzo y sacrificio.

A mis abuelos, tíos, primos, los cuales han estado en momentos importantes de mi vida, con su compañía he aprendido a valorar el tiempo en familia. En este momento es importante recordar a tres seres que desafortunadamente no comparten conmigo este logro y los siguientes que Dios tiene para mí, ellos son: mi abuelita Lucinda, mi tía Martha y mi tío Guillermo. Se que desde el cielo me siguen acompañando por el camino que hoy emprendo como profesional.

A mis amigos que han estado para mí como hermanos, gracias por su apoyo, amistad incondicional.

*Las lecciones que no traen con ellas algo de dolor no valen la pena, después de todo nadie puede ganar nada sin haber sacrificado algo, pero una vez que se haya superado ese dolor se gana un corazón lo suficientemente fuerte como para nunca más ser vencido. Si un corazón de acero (FMA)*

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco de todo corazón a mi primo Edwin Rodríguez, a los ingenieros Romel Pérez y Luis García, quienes me guiaron y apoyaron en el desarrollo de mi trabajo de grado, confiando un tema de vital importancia para la industria. Al profesor Juan Cely quien fue mi tutor de tesis, me brindó siempre su opinión profesional, tanto en mi trabajo de grado como en cada una de las asignaturas de la que fui afortunadamente su estudiante.

Igualmente, agradezco a cada uno de los docentes quienes compartieron conmigo sus enseñanzas, con dedicación, profesionalismo y ética, quiero mencionar especialmente a los docentes: Nubia Becerra, David Triviño, Orlando Castiblanco y Felipe Correa, quienes además de brindarme sus conocimientos fueron mis consejeros en momentos cruciales de mi vida, lo cual permitió un enriquecimiento en mi formación integral.

## TABLA DE CONTENIDO

	pág.
RESUMEN	14
INTRODUCCIÓN	16
OBJETIVOS	21
1. CONSIDERACIONES INICIALES	22
1.1 Marco conceptual	22
1.2 Generador de vapor y aspectos técnicos	23
1.2.1 <i>Generadores de Vapor y su aplicación en la industria petrolera</i>	23
1.2.2 <i>Propiedades generales de insumos empleados en un generador de vapor</i>	30
2. GENERALIDADES DE LAS PROPIEDADES TÉRMICAS DEL VAPOR Y GENERADORES OTSG	36
2.1 Propiedades del agua	36
2.2 Usos del vapor de agua en la industria	40
2.3 Características del vapor de agua en la industria del petróleo	41
2.4 Propiedades termodinámicas del vapor de agua	43
2.5 Generador de vapor otsg	43
2.5.1 <i>Partes de los generadores de vapor otsg</i>	45
2.6 Proceso del generador de vapor otsg	47
2.7 Combustibles empleados en el generador de vapor	49
3. MARCO NORMATIVO	59
3.1 Normatividad colombiana	61
3.2 Normatividad internacional técnica	66
3.2 Normatividad internacional regulatoria	69
4. ANÁLISIS DE EMISIONES DE GASES DE EFECTO INVERNADERO PRODUCIDAS POR GENERADORES OTSG	76
4.1 Combustibles empleados en los generadores de vapor	76
4.2 Propiedades físicas y químicas del gas natural	77

4.2.1	<i>Reacciones de combustión en el generador de vapor</i>	79
4.2.2	<i>Emisiones de gases de efecto invernadero obtenidas mediante balances masicos</i>	81
4.3	Balance masico Agua	85
5.	BALANCE ENERGÉTICO DEL GENERADOR DE VAPOR OTSG	86
5.1	Fundamentos termodinámicos del balance de masa en el generador de vapor otsg	86
5.2	Balance energético del agua	87
5.3	Balance energético de los gases	89
6.	PROPUESTA DE ALGORITMO PARA LA DESCRIPCIÓN DEL COMPORTAMIENTO DEL GENERADOR OTSG	91
6.1	Consideraciones principales	91
6.2	Modelo del cálculo	93
6.3	Determinación de las incógnitas	94
6.4	Variables	94
6.5	Estructura del algoritmo	94
6.6	Programación del algoritmo	96
6.6.1	<i>Formato simulador</i>	97
6.6.2	<i>Esquema de programación</i>	99
6.8	Simulaciones	103
6.8.1	<i>Datos de salida</i>	103
6.8.2	<i>Resultados de la simulación</i>	103
6.8.3	<i>Análisis de la simulación</i>	104
6.9	Valores estimados	105
7.	MANUAL DEL USUARIO	112
8.	CONCLUSIONES	121
	BIBLIOGRAFIA	123





## LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Clasificación de generadores de vapor.	25
Figura 2. Generador de vapor	26
Figura 3. Diagrama esquemático simplificado del OTSG	28
Figura 4. Configuración interna de una caldera piro-tubular	29
Figura 5. Análisis de combustible	34
Figura 6. Diagrama T-v proceso de calentamiento del agua a presión constante	37
Figura 7. Diagrama T-v proceso de calentamiento del agua a presión Variable	38
Figura 8. Curva de saturación agua	39
Figura 9. Diagrama de Sankey para el generador de vapor F1-2	56
Figura 10. Eficiencia de combustión de acuerdo al exceso de aire.	57
Figura 11. Relación entre la familia de Normas ISO 14060 de GEI	74
Figura 12. Balance masico hogar reacción completa general del generador de vapor	81
Figura 13. Balance masico hogar reacción de metano incompleta general del generador de vapor	82
Figura 14 Balance masico agua del generador de vapor.	85
Figura 15. Cambio de fases del agua	88
Figura 16. Formato del simulador	98
Figura 17. Esquema de programación	99
Figura 18 Esquema interno Excel moles de entrada	100
Figura 19 Esquema interno Excel reacciones químicas	101
Figura 20 Formato Visual Basic	102
Figura 21. Resultados de la simulación.	104
Figura 22s Fuentes estimadas y sumideros de metano 2021	108
Figura 23 Emisiones Globales de CO <sub>2</sub>	109
Figura 24 Emisiones Globales de N <sub>2</sub> O	110
Figura 25. Inicio simulación	112
Figura 26. Selección de métodos	113
Figura 27. Cuadro selección de método	114
Figura 28. Cuadro datos de entrada método simple	115

Figura 29 Entrada de variables.	116
Figura 30 Selección de variables de paso.	117
Figura 31 Selección método simple.	118
Figura 32. Resultados de método simple	119
Figura 33 Simulación Aspen agua	128
Figura 34 Tabla datos agua de entrada	129
Figura 35 Tabla datos agua de salida sin cambio de fase	130
Figura 36 Tabla datos agua de salida con cambio de fase	131
<i>Figura 37 Tabla datos agua de salida con calidad aproximada de 1</i>	132
Figura 38 Tabla datos agua de salida en fase vapor	133

## LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Parámetros característicos del agua	31
Tabla 2. Composición del gas natural	32
Tabla 3. Potenciales de contribución al calentamiento global, relativos al CO <sub>2</sub> .	60
Tabla 4. Estándares de emisión admisibles de contaminantes al aire para actividades industriales a condiciones de referencia	64
Tabla 5. Estándares de emisión admisibles	65
Tabla 6. Metodologías para la huella de carbono.	67
Tabla 7. Potencial de calentamiento por efecto invernadero.	70
Tabla 8. Propiedades físicas del gas natural	77
Tabla 9. Rango de composición de gas natural	78
Tabla 10. Composición gas natural para cálculos finales	79
Tabla 11 Emisiones de N <sub>2</sub> O de sistemas de combustión	84
Tabla 12 Fuentes estimadas y sumideros de metano 1987	107
Tabla 13 Emisiones anuales de GEI	111

## LISTA DE ABREVIATURAS

OTSG: ONCE THROUGH STEAM GENERATORS (Generador de vapor de un solo paso).

ESTIMULACION HUFF & PUFF.

cp capacidad calorífica

*API* American Petroleum Institute (**Instituto Estadounidense del Petróleo**)

GEI Gases de efecto invernadero

ASP EOR (alkaline surfactant polymer enhanced oil recovery)

GtCO<sub>2</sub> Giga toneladas de CO<sub>2</sub>

## RESUMEN

Este trabajo de grado centra sus esfuerzos en analizar desde una metodología de investigación de carácter explicativa, tomando como fundamentos teóricos las ramas de la termodinámica y las reacciones químicas, para determinar a partir del análisis matemático, las implicaciones de los gases de efecto invernadero y así mismo la calidad del vapor de agua obtenido por la combustión del gas natural desde un generador de vapor OTSG.

El objetivo del presente proyecto es desarrollar una metodología de investigación a partir de las ramas de la termodinámica y reacciones químicas para determinar numéricamente las cantidades de gases efecto invernadero y así mismo la calidad del vapor de agua obtenido por la combustión de gas natural a través de un generador de vapor OTSG, desarrollándose este en 6 capítulos de la siguiente manera ; en el capítulo 1 se presenta la descripción general relacionada con los generadores de vapor ,sus generalidades ,datos técnicos ,y diseño estructural del generador pirotubular ,en el capítulo 2 se enfoca el tema de la combustión considerando el aspecto químico y físico del proceso y su aplicación en la industria.

El presente documento comprende 5 capítulos organizados de la siguiente manera: En el primer capítulo se presenta aspectos preliminares del trabajo de grado y la definición del campo problémico que resalta aspectos del desarrollo de la propuesta de investigación. En el segundo capítulo se constituye los referentes teóricos que se focalizan en las definiciones conceptuales, las experiencias análogas y la demarcación de aspectos importantes que delimitan el análisis de la investigación.

En el capítulo 3 se desarrolla un proceso analítico para el cálculo de la transferencia de calor, balance energético de los gases. En el capítulo 4 se presenta el algoritmo programable y su modelación matemática, así mismo se observa la resolución de las ecuaciones matemáticas utilizadas en el proceso de simulación, consecuentemente en

el capítulo 5 se encuentra el manual de usuario y por último se muestran los resultados y conclusiones del presente trabajo.

**PALABRAS CLAVE:** Generador de vapor, simulación, algoritmo, generador OTSG, gas natural, Crudo pesado.

## INTRODUCCIÓN

Desde la revolución industrial, los generadores de vapor se han convertido en sistemas tecnológicos que se caracterizan por gran potencial energético, debido a su aplicación en el campo de los hidrocarburos, específicamente en la extracción de combustibles fósiles. El presente trabajo de grado tiene como eje central desarrollar una metodología analítica para estimar el impacto de los gases de efecto invernadero emitidos por generadores de vapor OTSG, en los campos de procesamiento de crudo pesado, evaluando los factores internos y externos relacionados con el funcionamiento y eficiencia, con el propósito de establecer criterios que optimicen su extracción.

Los generadores de vapor son sistemas tecnológicos que comprenden de una serie de dispositivos compuestos por varios elementos diseñados para generar vapor de agua mediante la aplicación de energía térmica en fase líquida. Este tipo de tecnología se utiliza en la industria petrolera con el fin de acompañar el proceso de la extracción de petróleo a partir de la aplicación de criterios físicos y químicos que potencian el funcionamiento termodinámico a partir de calderas desde de la intervención de gases para la combustión.

Actualmente en Colombia son utilizadas diversas técnicas para la extracción de petróleo, entre ellas se encuentran: la inyección de vapor, la inyección de CO<sub>2</sub> y más común mundialmente la inyección cíclica, las cuales aumentan el factor de recobro, incrementando la oportunidad de extraer más crudo de los yacimientos, siendo así utilizados en este proceso, los generadores de vapor en este caso OTSG (generadores de vapor de un solo paso) que además de producir gases de combustión como el CO<sub>2</sub>. Uno de los propósitos de este proyecto es analizar el proceso metodológico de la estimación de gases de efecto invernadero a partir de una metodología analítica que permita la estimación de los gases de combustión de un generador de vapor OTSG.



Para ello, se diseñó un algoritmo aplicando herramientas ofimáticas para el análisis, que ponen a prueba el comportamiento de los gases de efecto invernadero para ver la influencia y estimación de niveles de contaminación en el ambiente.

Inicialmente, se realizó un proceso de recolección del estado del arte sobre aspectos principales de los generadores OTSG, seguido se analizó el comportamiento físico y químico, para después establecer la generación de los gases de efecto invernadero que producen este tipo de generadores, además, se realizó un balance energético comprendido en los componentes del agua, aire y gases, para desde este punto consolidar un algoritmo que calcule la producción de gases y determine los niveles de contaminación que estos pueden generar en su puesta en marcha.

## DEFINICIÓN DEL CAMPO PROBLÉMICO

En el campo de la extracción de hidrocarburos, existen herramientas informáticas que posibilitan el análisis de eficiencia y funcionamiento de los componentes del sistema del generador de vapor OTSG, pero dichas herramientas no cuentan con una interpretación concreta que posibilite medir el impacto de los gases de efecto invernadero, la eficiencia de los insumos y el rendimiento del generador de vapor OTSG.

Desde el anterior escenario, los generadores de vapor no han sido estudiados desde sus formas simples: Dichos sistemas tecnológicos se analizan desde su funcionalidad, faltando evaluar los factores externos como el ambiente y este como afecta los componentes del generador y las salidas del proceso. Para ello, es importante establecer ecuaciones (Balances energéticos y masicos) que determinen una decisión crítica para hacer un correcto planteamiento del generador.

De la misma manera, las experiencias análogas encontradas en los diferentes repositorios se basan únicamente en el análisis del funcionamiento y dejan de lado todos los aspectos relacionados con los factores externos que afectan de manera significativa el funcionamiento y eficiencia de los generadores de vapor OTSG, desde la misma perspectiva al existir diversos modelos de prototipado de generadores OTSG, estos no cuentan con una herramienta de análisis que posibilite evaluar el impacto de los gases de efecto invernadero y la eficiencia de los componentes del sistema. Además, las aplicaciones informáticas de análisis existentes son de alta complejidad y costes, limitando la interpretación y practicidad de análisis.

Retomando lo anterior, se pretende desde las intenciones del presente trabajo de grado realizar una investigación que describa de forma simple el funcionamiento de los generadores de vapor OTSG, analizando su funcionamiento y características físicas-químicas, orientadas a la observación de las ecuaciones y algoritmos matemáticos que tabulen de manera secuencial el funcionamiento del generador, llevándolas a la aplicabilidad en un software de baja complejidad, que dé respuesta desde un programa

computacional simple, la medición del impacto de los gases de efecto invernadero y la precisión de métodos que puedan ser empleados para el análisis que plantea la tesis. Así se traza la ruta para desarrollar una metodología analítica aplicando una estructura algorítmica que permita medir el impacto generado por los gases de combustión en un generador de vapor OTSG.

Para ello, se propició un ambiente para investigar y plantear definiciones simples desde las fuentes primarias de investigación, aplicando una metodología cuantitativa - explicativa sobre los generadores de vapor y sus componentes. Seguidamente se profundiza en el funcionamiento propio de los generadores de vapor OTSG sus funciones y características mecánicas con el fin de intentar aplicar ecuaciones simples, para de esta manera investigar las ecuaciones más pertinentes que están siendo empleadas y los métodos que se fundamentan las ecuaciones anteriormente mencionadas.

Por lo anterior, se debe entender e indagar sobre las partículas o sustancias químicas que se consideren contaminantes, únicamente se profundiza en el impacto contaminantes atmosféricos, sin enfocarse en los aerosoles presentes en las combustiones. El IDEAM define la contaminación atmosférica como: “La contaminación atmosférica es la presencia que existe en el aire de pequeñas partículas o productos secundarios gaseosos que pueden implicar riesgo, daño o molestia para las personas, plantas y animales que se encuentran expuestas a dicho ambiente.” También el título 5 del decreto 1076 de 2015 ajusta la definición y determina que para este documento solo se tendrán en cuenta los contaminantes primarios que son las sustancias emitidas directamente a la atmósfera por la fuente de emisión.

Retomando, La resolución 2254 de 2017 del Ministerio de Ambiente de Colombia estableció los niveles máximos en donde se definió los contaminantes monitoreados entre los cuales se encuentra material particulado: dióxido de azufre, dióxido de nitrógeno, ozono troposférico y monóxido de carbono. Para el documento no se considera la presencia de material particulado ozono, aunque es propósito de esta

investigación, el análisis de la combustión de otros materiales y los porcentajes de composición de las sustancias mencionadas al principio.

## **OBJETIVOS**

### Objetivo General

Desarrollar una metodología analítica que permita la estimación de los gases de combustión de un generador de vapor OTSG.

### Objetivos Específicos

- Describir las propiedades térmicas del vapor y el funcionamiento de los generadores.
- Determinar los gases de efecto invernadero (GEI) que producen los generadores de vapor OTSG.
- Realizar un balance energético basado en los componentes de agua, aire y gas.
- Desarrollar un algoritmo para un generador de vapor OTSG calculando los gases de combustión generados.

## 1. CONSIDERACIONES INICIALES

En el desarrollo de la presente investigación se pretende poner en contexto diversos aspectos de carácter teórico que son de alto interés, ya que desde la construcción conceptual se analiza, criterios tecnológicos, químicos y físicos que son de suma relevancia para llegar a describir los factores que intervienen en la producción petrolera a partir de un generador a vapor OTSG, por lo tanto, se categorizó aspectos conceptuales de los generadores pirotubulares, describiendo su funcionamiento técnico normativo, para comprender como desde la física y la química, los insumos tienen comportamientos que producen los gases de efecto invernadero. A continuación, se presenta los referentes teóricos.

### 1.1. Marco conceptual

Algoritmo: Un algoritmo se puede definir como una secuencia finita de instrucciones claras, precisas y concretas que representan un modelo de solución para determinado tipo de problema o bien, como un conjunto de instrucciones que realizadas en orden secuencial que conducen a obtener la solución de un problema. Para realizar un programa informático, es conveniente aplicar la metodología para el diseño de algoritmo o definición previa del algoritmo. El diseño de algoritmos requiere creatividad y conocimientos profundos de la técnica de programación [1].

Crudo pesado: Se categoriza como cualquier tipo de petróleo que no fluye con facilidad. «El petróleo crudo se caracteriza por su alta viscosidad (típicamente superior a 10 cp.) y alta gravedad específica. La API clasifica los petróleos pesados como crudos con una gravedad inferior a 22,3° API. Además de alta viscosidad y gravedad específica, los petróleos pesados generalmente presentan una relación hidrógeno-carbono baja, alto contenido de asfalteno, azufre, nitrógeno y metales pesados, además de números ácidos más elevados»[2].

Gas Natural: «El gas natural es un hidrocarburo mezcla de gases ligeros de origen natural que se encuentra en grandes bolsas de gas a una profundidad de entre 1000 y 3000 metros bajo tierra. Principalmente contiene metano, y normalmente incluye cantidades variables de otros alcanos, y a veces un pequeño porcentaje de dióxido de carbono, nitrógeno, ácido sulfhídrico o helio»[3]. Se considera el hidrocarburo más limpio entre el petróleo y carbón por su poca contaminación al ambiente.

Generador de vapor: Es una maquina o dispositivo ingenieril que se basa en la combinación de una caldera y un sobrecalentado a partir de uso de combustibles y transferencias de energía se logra generar vapor con propiedades características. Se pueden presentar varios tipos de generadores dependiendo el lugar donde se lleva a cabo la combustión, así mismo se compone de varias partes para un funcionamiento preciso que mejora el proceso de transferencia de calor.[4]

Vapor: Se define como vapor a la mezcla gaseosa obtenida de un fluido generalmente de agua que con el calentamiento se expone a altas temperaturas, la cual puede tener presencia de agua líquida, presentando una característica especial la cual es la “calidad”, es empleado como medio de calentamiento para incontables procesos industriales dado que no contamina y presenta bajos costos de producción. [5]

Simulador: La simulación de sistemas es la representación analítica apoyada en herramientas matemáticas y computacionales, que permiten evaluar el impacto que producen cambios en las distintas variables, también nos permite la elección de recursos óptimos para el proceso analizado en pro de una toma de decisiones. (Thomas H. Taylor)

## **1.2 Generador de vapor y aspectos técnicos**

### ***1.2.1 Generadores de Vapor y su aplicación en la industria petrolera***

El generador de vapor es un sistema tecnológico que transforma la energía química en energía térmica. Este sistema recibe agua en la mayoría de los casos con alguna dureza

de la planta de agua industrial, pues como más adelante se mencionará la dureza es un factor que determina la vida útil del equipo, debemos aclarar que no es objeto de estudio, pero si puede ocasionar que los cálculos matemáticos no reflejen este factor de los generadores. Su función principal es producir vapor con el fin de disminuir la viscosidad de los fluidos, exactamente el petróleo, por medio de la transferencia de calor a los pozos productores de hidrocarburos, con el objetivo de hacer más fácil la extracción de los fluidos. La calidad del vapor generada debe estar entre el 77% - 80% y los líquidos de arrastre entre 23% - 20%. [4], los valores son un aproximado y se busca que el equipo cumpla estas condiciones, pero estos mismos pueden ser manipulados y modificados al momento de desarrollar el proceso en el generador de vapor.

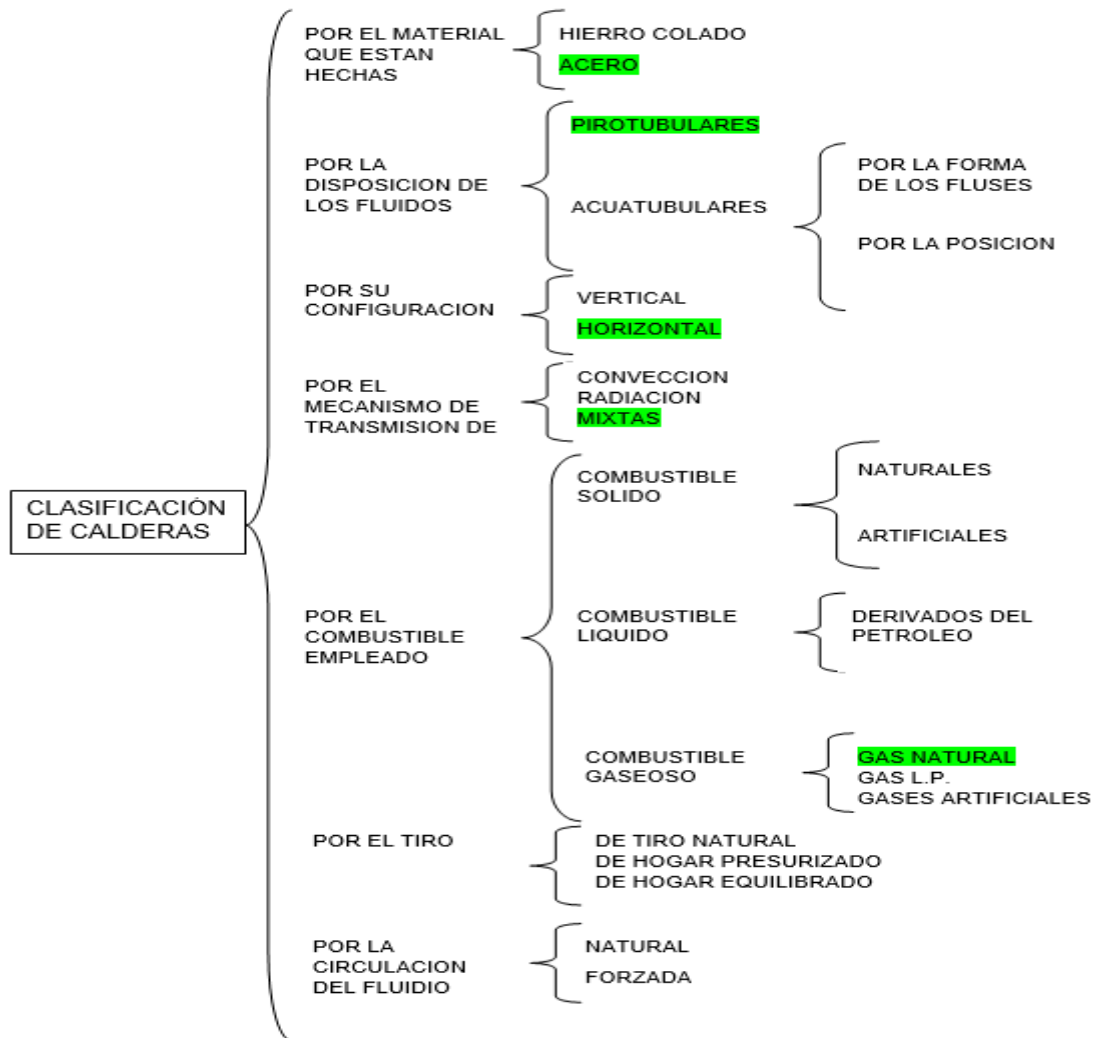
Los generadores de vapor se pueden clasificar en varios tipos, como se observa en la figura 1, pero para nuestro proyecto hemos señalado las clasificaciones que se tomaron en cuenta, pero en opinión personal la clasificación con mayor importancia es por la disposición de los fluidos siendo de tipo acuotubular y pirotubular en este caso este último será el generador a estudiar, esta disposición nos indica que por dentro de los tubos del generador es por donde van a circular los gases de combustión mientras que fuera de los mismo circulara el agua que será transformada en vapor.

Como se observa en la figura las divisiones son útiles para comprender el comportamiento del generador y como este lleva en desarrollo el proceso en la planta, se debe aclarar que desde el punto de vista de la ingeniería ningún generador se considera óptimo, debido a que según del tipo de combustible, área para la ubicación del generador, poder adquisitivo de la empresa el ingeniero deberá seleccionar el generador que mejor cumpla con las necesidades y posibilidades de la empresa.



**Figura 1.**

*Clasificación de generadores de vapor.*



**Nota.** Clasificación de los generadores de vapor, en color verde se aprecia las características del tipo de generador que se va a estudiar en el presente documento. Tomado de: C. Andrade., metodología de diseño de un generador de vapor acuotubular bagacero, tesis pre, facultad de ingeniería, Universidad de Piura, 2015. [En Línea]. Disponible:

[https://pirhua.udep.edu.pe/bitstream/handle/11042/2205/IME\\_184.pdf;sequence=1](https://pirhua.udep.edu.pe/bitstream/handle/11042/2205/IME_184.pdf;sequence=1).

El generador de vapor está compuesto de varios elementos que garantizan su correcto funcionamiento y verifican las variables del proceso. Estos componentes son: la bomba quintuplex, el quemador, el tablero de control, el Manifold de salida y la vasija. Los

anteriores componentes cumplen con un objetivo específico: bombear el agua del proceso, inyectar el aire para después sacar los gases de combustión a la atmosfera, visualizar las variables del proceso y control de alarmas (vital para correcto funcionamiento y seguridad del equipo). Y, por último, la distribución del vapor para la inyección en el pozo. [6]

En la figura 2 se puede observar un generador de vapor horizontal, en la mayoría de los casos más específicamente como en los pozos petrolero estos equipos se encuentran al aire libre, algunas de las razones son ya que no se van a generar gastos para construir recintos donde ubicarlos, el sol puede ayudar a calentar las paredes del equipo, se tiene un control visual más amplio de los generadores, pero no se debe olvidar que estos equipos están en contacto directo con el ambiente, esto puede ocasionar que su eficiencia varíe de un día a otro por factores incontrolables. [7]

## Figura 2.

*Generador de vapor*



**Nota.** Generador de vapor en el cual se observan las diversas partes que lo componen y como se encuentran situados en los lugares de funcionamiento. Tomado de: WEG COLOMBIA S.A.S., Paquetes de controles en Oriente Medio, [En Línea]. Disponible: <https://www.weg.net/institucional/VE/en/news/products-and-solutions/paquetes-de-controles-en-oriente-medio>.

Las vasijas son un componente clave para el fenómeno de transferencia de energía y se compone de tres zonas que se describen a continuación:

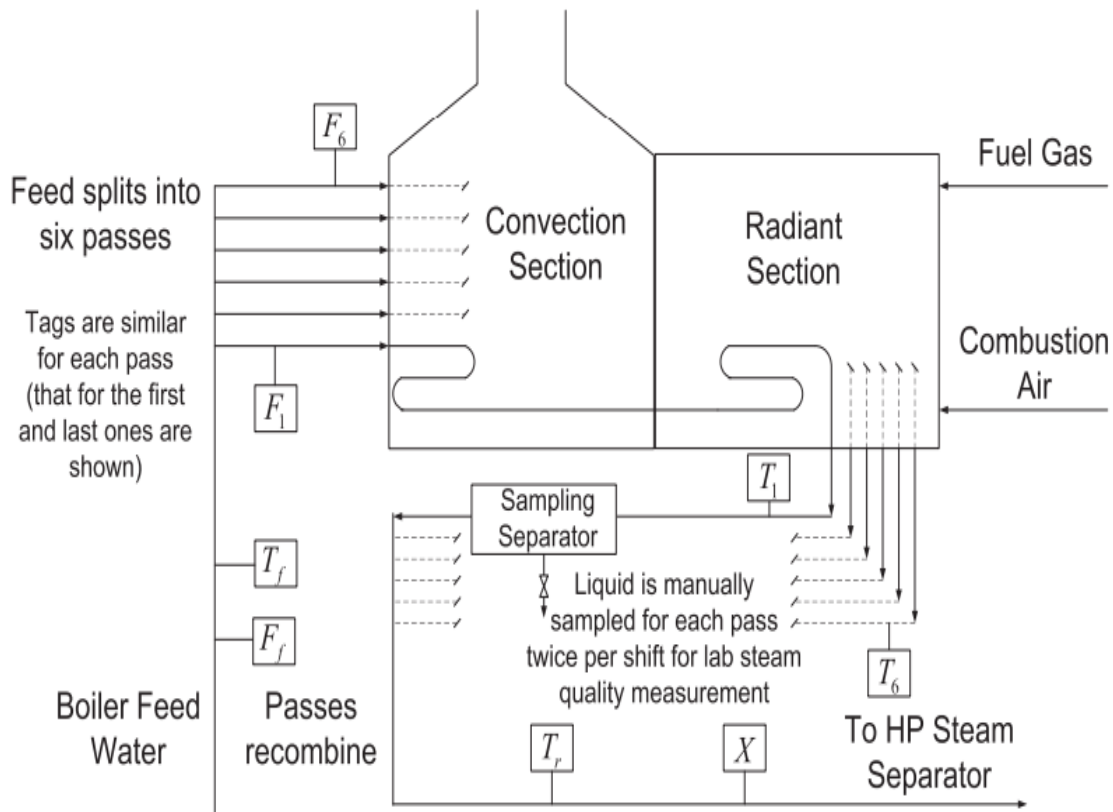
- *Zona de transición*: el cual es un intercambiador de doble tubo, su función principal es incrementar la temperatura del agua de alimentación, con el objetivo de prevenir la condensación de agua.
- *Zona de radiación*: es la zona de área cilíndrica con tubos horizontales. Esta zona representa aproximadamente el 60 % de la carga de transferencia.
- *Zona de convección*: esta es la última zona del generador, donde las temperaturas son elevadas y la presión se eleva drásticamente consiguiendo de esta manera vapor de alta calidad para el proceso.

Los generadores de vapor necesitan principalmente dos insumos, agua y un combustible. Dichos insumos poseen características las cuales deben tener un mínimo óptimo, en algunos casos de no cumplir con las características mínimas representa una disminución en la eficiencia del proceso, cabe señalar que al modificarse el proceso se pueden generar daños en los componentes del generador ya que al ser fluidos estos están en contacto directo con las partes del sistema, por consiguiente, la vida útil y eficiencia de los equipos se verá afectada, por lo pronto no abordaremos la eficiencia y vida útil del equipo.

Una última observación es que el generador opera de forma continua durante largos periodos de tiempo entre 8 a 16 horas diarias, por ende, cualquier fallo en el sistema, o perturbación en los productos puede ser ocasionado principalmente por la calidad de los insumos, es por esta razón que se deben considerar el uso de insumos de óptima calidad antes del ingreso al sistema.

**Figura 3.**

*Diagrama esquemático simplificado del OTSG*



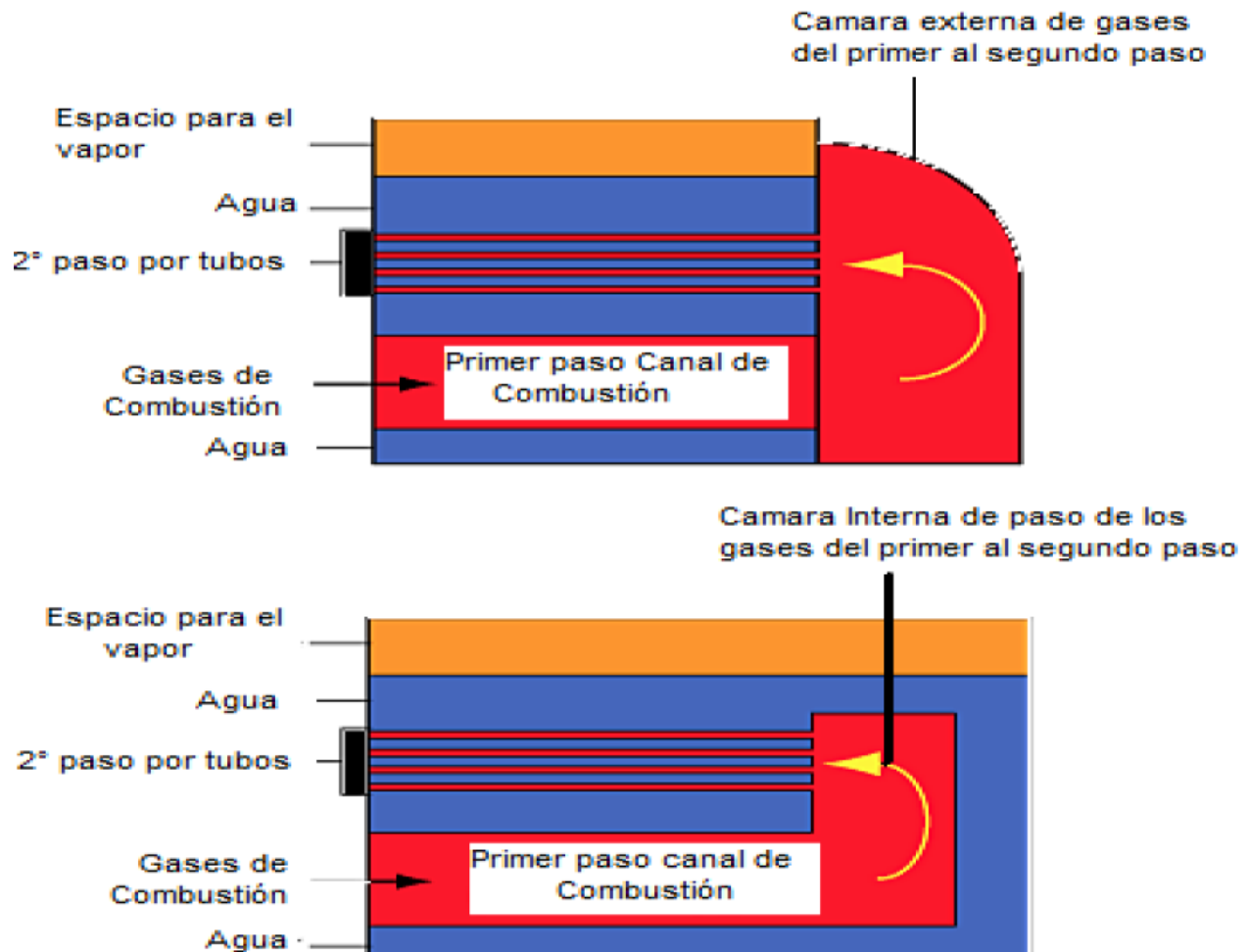
**Nota.** La figura representa como se observan las partes del generador de vapor OTSG en donde se lleva a cabo los ingresos de reactivos, agua y las secciones de transferencia de calor. Tomado de: L. Xie., Y. Zhao., Soft sensors for online steam quality measurements of OTSGs, Journal of Process Control, 2013. [En línea]. Disponible: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959152413001133>.

En la figura 3 se observa una vista general de lo que se mencionó en los párrafos anteriores, pero se debe aclarar que este esquema es una muestra generalizada de un generador de vapor en donde se puede encontrar la sección de radiación y sección de convección, con el fin de entender cuál proceso es llevado a cabo en primer lugar, así mismo se resalta que entran varios tubos con agua categorizándolo como tipo acuatubular.

De igual modo, se resalta que se debe conocer la temperatura del agua que entra al equipo y el flujo de esta, para obtener una temperatura de mezcla en donde en ocasiones se coloca un separador para evitar el paso de líquido en el vapor, y al final obtener una mayor calidad del vapor y una temperatura final.

**Figura 4.**

*Configuración interna de una caldera piro-tubular*



**Nota.** La figura representa el funcionamiento de un generador de vapor piro-tubular.

Tomado de: D. Osejo., Diseño de una caldera de generación de vapor piro tubular de 10 BHP expandible a 25 BHP mediante módulos, Tesis pre, Facultad de Ingenierías, Fundación Universidad de América, Bogotá, Colombia, 2017. [En línea]. Disponible: <https://repository.uamerica.edu.co/bitstream/20.500.11839/6507/1/4062032-2017-2-IM.pdf>.

Una aclaración sobre la sección de radiación y convección en un generador de vapor es que como se observa en la figura 4 se encuentra un canal de combustión en donde se realiza la reacción de combustión en el equipo, se puede considerar que esta es la zona de radiación, pero a medida que se los gases de combustión pasan a través de los tubos estos se calientan y se puede evidenciar que la sección de radiación y convección están ubicadas a lo largo de los tubos, ambos fenómenos de transferencia se llevan a cabo en los tubos, pero a medida que se va a generar la transferencia se puede considerar que la radiación no se presenta, pero se divide en dos zonas para comprender mejor los fenómenos de transferencia. Así mismo, los generadores cuentan con una zona para que se ubique el vapor generado evitando una sobrepresión en el equipo. [8]

### ***1.2.2 Propiedades generales de insumos empleados en un generador de vapor***

A continuación, se determinan las propiedades que caracterizan a los componentes que entran en el generador de vapor, se expresan de forma didáctica, simple y concreta, lo que esta vez importa es destacar el agua que ingresa al generador, así como el combustible que entra, pero en los capítulos posteriores se harán las respectivas aclaraciones, para comprender la complejidad que conlleva determinar el vapor y gases generados en un generador OTSG.

No se considera que el agua o combustible como sustancia principal o que deba resaltar la importancia de controlar alguna o que se puedan considerar constantes a medida del tiempo, puesto que como se mencionó anteriormente el cambio de alguna puede generar daños en los equipos o alterar los GEI o características de vapor. Pero se caracterizará primero el agua con algunas cualidades, posteriormente se miran cualidades y cómo se comporta a medida que es transformada.

**Tabla 1.**

*Parámetros característicos del agua*

<b>Parámetros</b>	<b>Unidades</b>	<b>Valor</b>
<b>pH</b>	-	8.7
<b>Oxígeno disuelto</b>	us/cm	421
<b>Densidad</b>	g/mL	0.998
<b>Dureza total</b>	Ppm	<2
<b>Alcalinidad total</b>	mg/L	170
<b>Solidos totales</b>	mg/L	218

**Nota.** En la tabla se muestran los parámetros medidos en el agua suavizada y sus valores con sus respectivos. Tomado de: A. Chanaga., A. Guarín., optimización de la calidad de vapor en pozos con métodos de estimulación HUFF & PUFF., tesis pre., Universidad industrial de Santander, Colombia, 2015.

El agua posee varias características, la tabla 1 muestra algunas de ellas que se deben tener en cuenta para el correcto uso del generador de vapor, ya que estas propiedades son en principio las más fáciles de controlar y afectan la transferencia de energía de forma directa; por esto, se coloca un suavizador al inicio del proceso del cual va a salir agua para ingresar luego en el generador de vapor. Este proceso es muy común puesto que se mejora la transferencia de calor y se garantiza la vida útil del generador.

Otro aspecto importante de la tabla 1, considera que, si el agua en el proceso presenta altas durezas o solidos totales, estos ocasionarían daños en la tubería como fisuras, disminuyendo la cantidad de calor transferido. Como parte de esta investigación es de suma importancia el análisis de los afluentes de agua cuyo objetivo se enfoca en encontrar las mejores condiciones y parámetros para generar mayor eficiencia antes de iniciar el proceso.

El agua tiene más características, pero solo se abordaron estas por la importancia que tienen en el generador de vapor, pero posteriormente se dio apertura a características

termodinámicas que dieron a entender el comportamiento del generador de vapor y la importancia de estas características está enlazada con el combustible y como se emplean en la producción.

Por lo anterior, es claro que se requiere combustible y como se mencionó anteriormente existen tres tipos de combustibles, sólidos, líquidos y gaseosos. Estos dos últimos son los más empleados en la producción de vapor, pero el gas natural se usa en un 80% comparado con otro combustible por sus productos obtenidos de la combustión. Este insumo está conformado por varias sustancias las cuales se muestran en la tabla 2, pero se conoce un poder calorífico promedio del gas natural que equivale a 33.852 BTU/ m<sup>3</sup>.

**Tabla 2.**

*Composición del gas natural*

Componente	Composición (vol %)	
	Húmedo	Rango Seco
<b>Hidrocarburos</b>		
Metano	84.07	96.0
Etano	6.4	2.0
Propano	5.3	0.6
i-Butano	1.2	0.18
n-Butano	1.4	0.12
i-Pentano	0.4	0.14
n-Pentano	0.2	0.06
Hexano	0.4	0.10
Heptano,	0.1	0.80
<b>No hidrocarburos</b>		
Dióxido de carbono		0-5
Ácido sulfhídrico		0-5
Nitrógeno		0-10
Helio		0-0.5
Argón		0-0.05

**Nota.** La tabla muestra una posible composición del gas natural en % volumen, la cual está formada principalmente por metano y otros hidrocarburos. Tomado de: M. Zamora., Conceptos fundamentales de la ingeniería de producción de gas natural, Universidad nacional autónoma de México, México, 2015. [En línea]. Disponible:

[https://repositorio.unam.mx/contenidos/conceptos-fundamentales-de-la-ingenieria-de-produccion-de-gas-natural-378076?c=bwNJ9Y&d=true&q=\\*&i=2&v=1&t=search\\_0&as=0](https://repositorio.unam.mx/contenidos/conceptos-fundamentales-de-la-ingenieria-de-produccion-de-gas-natural-378076?c=bwNJ9Y&d=true&q=*&i=2&v=1&t=search_0&as=0).



El gas natural es un gas el cual se compone por varias sustancias entre la mayoría se encuentran los hidrocarburos, como se ve en la tabla 2, de la misma forma se pueden encontrar sustancias que no son hidrocarburos, pero esta composición no es igual siempre, y presenta variaciones según el pozo en el momento en que es extraído puesto que su composición es muy variable y cada componente presenta un rango en la conformación del gas natural.

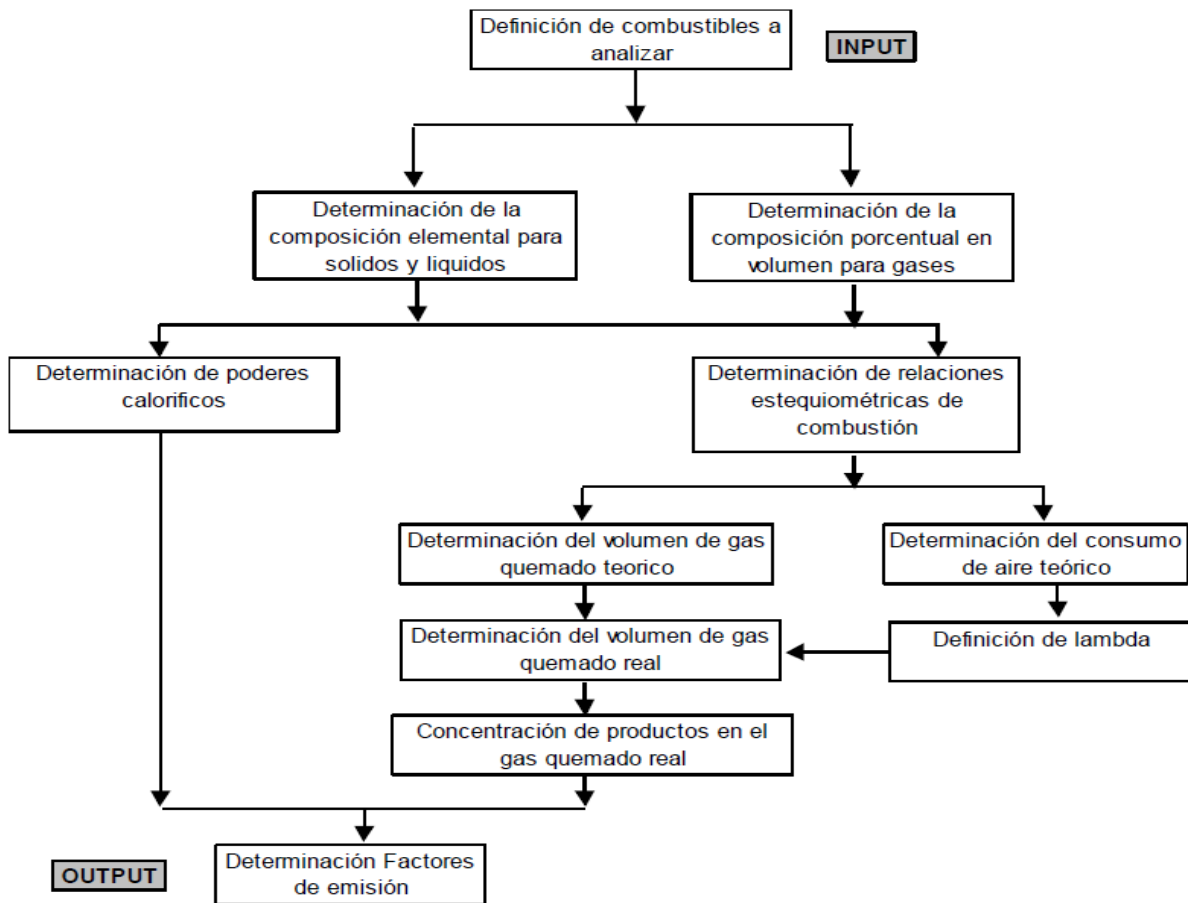
Igualmente, Otro compuesto empleado para la combustión es el crudo pesado. Es una alternativa que se considera válida para el sistema, aunque el crudo pesado no es tan empleado, puesto que no se pueden controlar todos sus parámetros químicos y físicos, este combustible solo es empleado cuando el gas natural no está disponible in situ. Entre las condiciones y propiedades más importantes de los combustibles para la generación de vapor son: calor específico de combustión, humedad, contenido de azufre, sustancias volátiles, viscosidad y densidad.

De la misma forma, se ha mencionado los insumos, pero el papel importante lo presentan los productos de la combustión los cuales son el vapor de agua generado, y los gases de efecto invernadero. Ambos compuestos químicos son liberados en forma gaseosa a temperaturas altas, lo cual presenta un alto control de salida para los productos y generalmente estos productos son utilizados para calentar otras partes de la empresa u otras sustancias que se necesiten en otra parte del proceso. Sin embargo, el vapor de agua es transportado mediante tuberías al pozo, teniendo un mejor control de salida.

Por el contrario, con los gases de efecto invernadero deben ser controlados por su alta carga particular ya que se componen de: dióxido de carbono, monóxido de carbono, metano, etano, propano, entre otros hidrocarburos. En ocasiones también se encuentran la presencia de azufres, material particulado y otros óxidos, esto es debido a las altas temperaturas a la que están expuestas dentro de las calderas que ocasionan reacciones químicas no deseadas en el proceso, convirtiéndose en un riesgo a considerar.

**Figura 5.**

*Análisis de combustible*



**Nota.** La figura muestra cómo se debe considerar un combustible desde una secuencia para determinar los factores de emisión. Tomado de: Academia colombiana de ciencias exactas, físicas y naturales, factores de emisión de los combustibles colombianos, artículo , UPME, Bogotá, Colombia, 2003.

En la figura se muestra la ruta desde el dato de entrada hasta el dato de salida, mediante la selección principal del tipo de combustible empleado, puesto que como se mencionó previamente el gas natural varía su composición, esta debe ser evaluada, mientras que los sólidos y líquidos presentan una composición elemental, para los gases primero se debe evaluar las relaciones estequiométricas y los poderes caloríficos, así como los volúmenes teóricos de aire y combustible, para posteriormente determinar el consumo de combustible quemado, para determinar finalmente los factores de emisión. Este es un

simple algoritmo el cual es de vital importancia para entender y comprender el cálculo del consumo de combustible y la generación de gases generados.

Para el desarrollo del presente trabajo de grado, desde los referentes teóricos, es de suma importancia profundizar en aspectos como las propiedades químicas y físicas del agua, analizando las propiedades termodinámicas y fisicoquímicas analizando como estos aspectos impactan el funcionamiento del generador de vapor. Seguidamente, se enfocó la mirada en los generadores de vapor, como sistema que parte de muchos años de desarrollo tecnológico a través de la historia. Así mismo, se teoriza sobre los gases de efecto invernadero y como cada uno de los insumos son coparticipes en las diversas emisiones de gases. Para culminar, se profundiza sobre el balance energético del generador a vapor y sus representaciones fisicoquímicas que evalúen aspectos como balance energético del agua y de los gases.

«Uno de los recursos más importantes para los procesos industriales es el agua, ya sea para la elaboración de sus productos, y/o para el mantenimiento de sus materiales y equipos. Todos los sectores industriales hacen uso del agua, están desde los que producen alimentos, hasta los que fabrican aparatos electrónicos. De acuerdo con el origen del agua la calidad de esta puede variar de acuerdo con la fuente hídrica, ya sea de la fuente sea natural (pozo profundo, lago, río, etc.) o que provenga del suministro municipal.»[7].

## **2. GENERALIDADES DE LAS PROPIEDADES TÉRMICAS DEL VAPOR Y GENERADORES OTSG**

El agua es uno de los recursos fundamentales en el sostenimiento de la vida y el entorno que habitamos, de igual manera posee gran importancia en los procesos industriales, siendo parte vital en la elaboración de productos y obtención de estos. De tal modo, en su estado puro y bajo condiciones estándar al ser sometida a procesos de calentamiento en un sistema, puede presentar cambios en la temperatura y la presión, las cuales modifican su estado para obtener vapor de agua; En otros términos, las moléculas de H<sub>2</sub>O al permanecer en una temperatura de ebullición constante, adquieren energía la cual ocasiona que los enlaces intermoleculares se rompan y se genere su cambio físico.

### **2.1 Propiedades del agua**

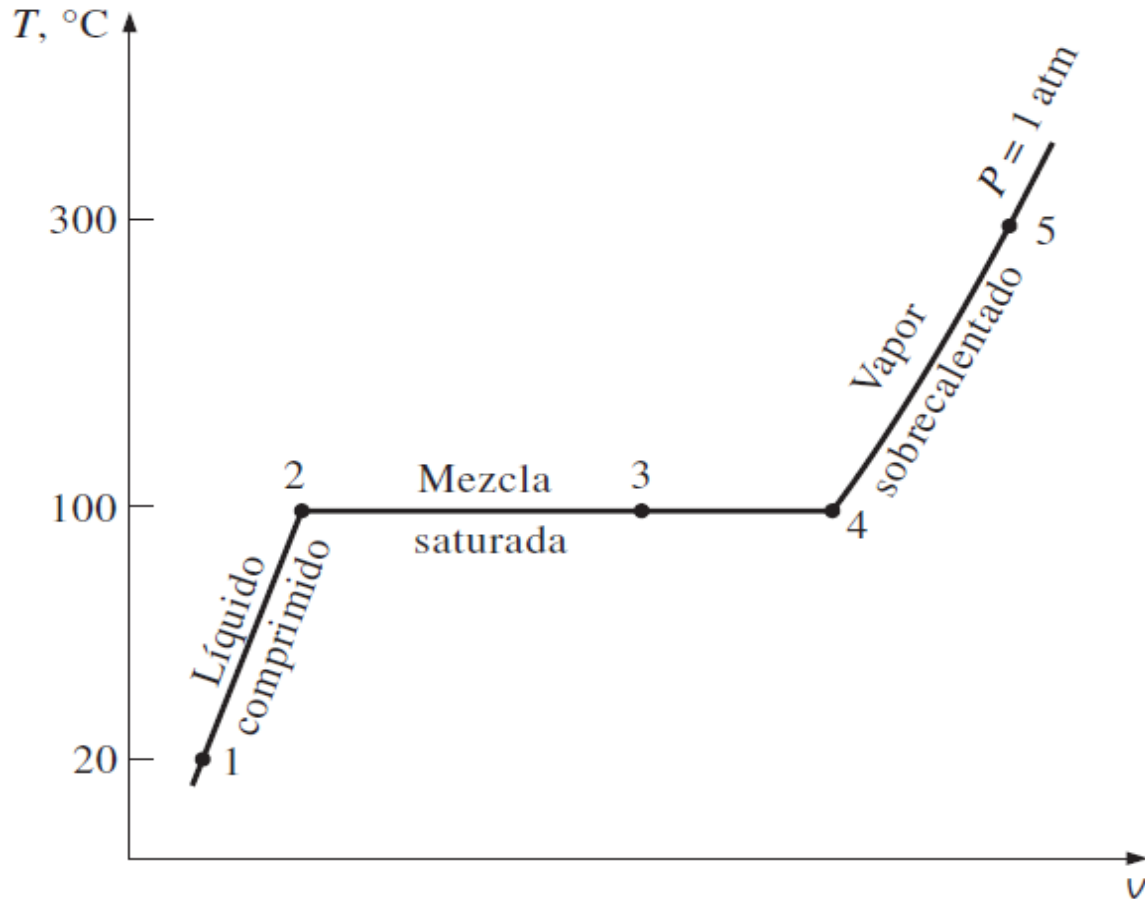
Para comprender las propiedades del agua como sustancia pura, es importante traer en este aspecto su composición química que va a seguir siendo constante a través del tiempo, por lo tanto, aun cuando se presente un cambio de fase, esta no va a cambiar químicamente, únicamente se presenta un cambio en su estado física. Con el objetivo de ampliar este aspecto, la primera consideración es el análisis de como el agua cambia de fase, a medida que se calienta. [10]

Como se observa en la figura 6, el agua a una presión igual a 1 atm se comporta como una mezcla a 100°C y su volumen empieza a cambiar puesto que en ese punto se encuentra la coexistencia de vapor y agua líquida, sólo hasta que se alcanza un volumen se convierte en vapor, posteriormente si se sigue incrementando la temperatura se obtendrá vapor sobrecalentado. Cabe aclarar que si se modifica la presión a la cual es calentada el agua, la mezcla líquido de vapor presentaría una temperatura por encima o por debajo de los 100°C.[11]

El vapor de agua se caracteriza por tener una temperatura elevada y en ocasiones presiones altas, por ende, se consideran las propiedades térmicas que debe poseer el vapor para un propósito específico.

**Figura 6.**

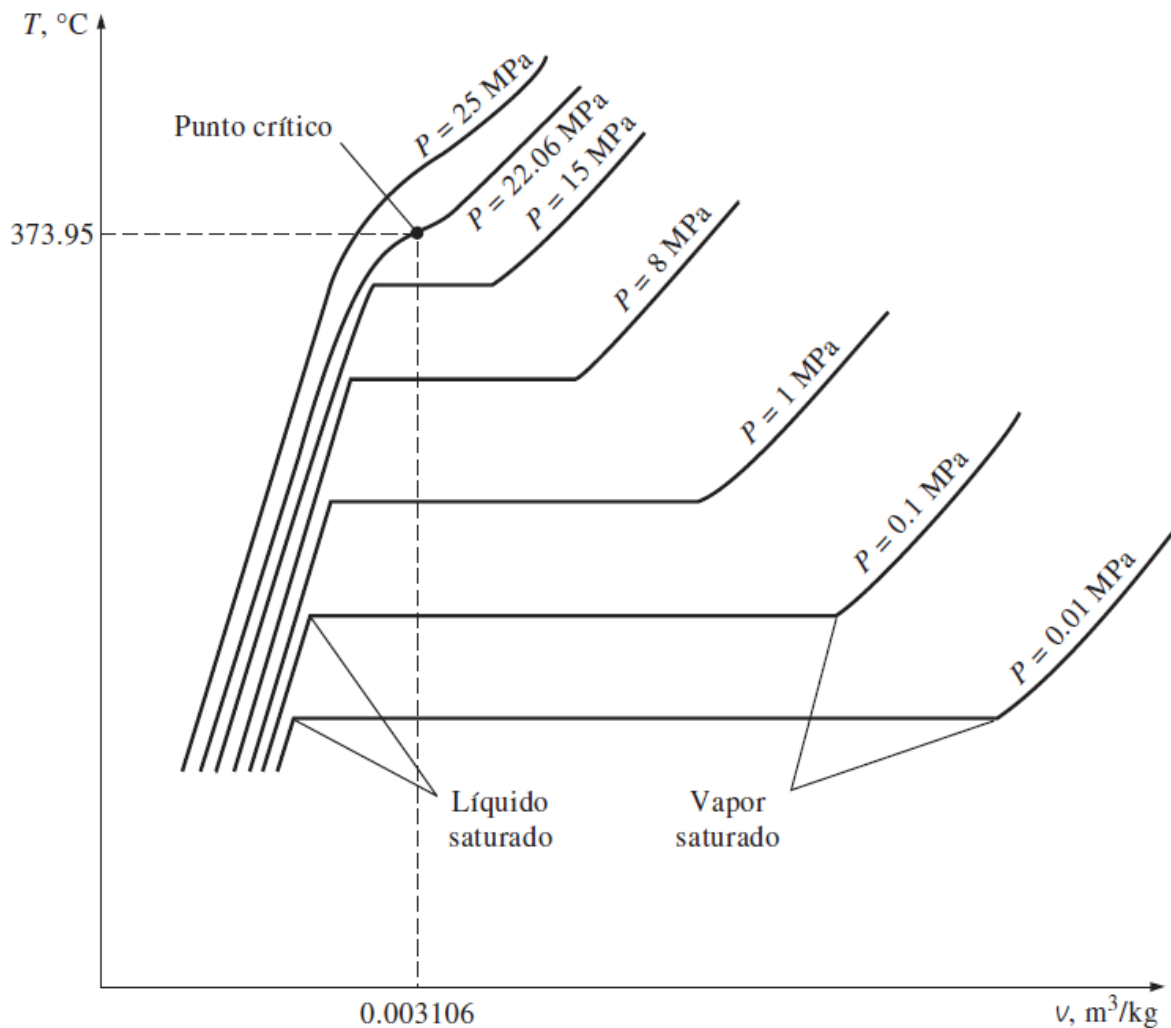
Diagrama  $T$ - $v$  proceso de calentamiento del agua a presión constante



**Nota.** Fases del agua según la temperatura a presión constante, presión de 1 atmósfera. Tomado de: Y. Cengel, *Termodinámica*, 7a.ed México. The McGraw-Hill, 2011.

**Figura 7.**

*Diagrama T-v proceso de calentamiento del agua a presión Variable*

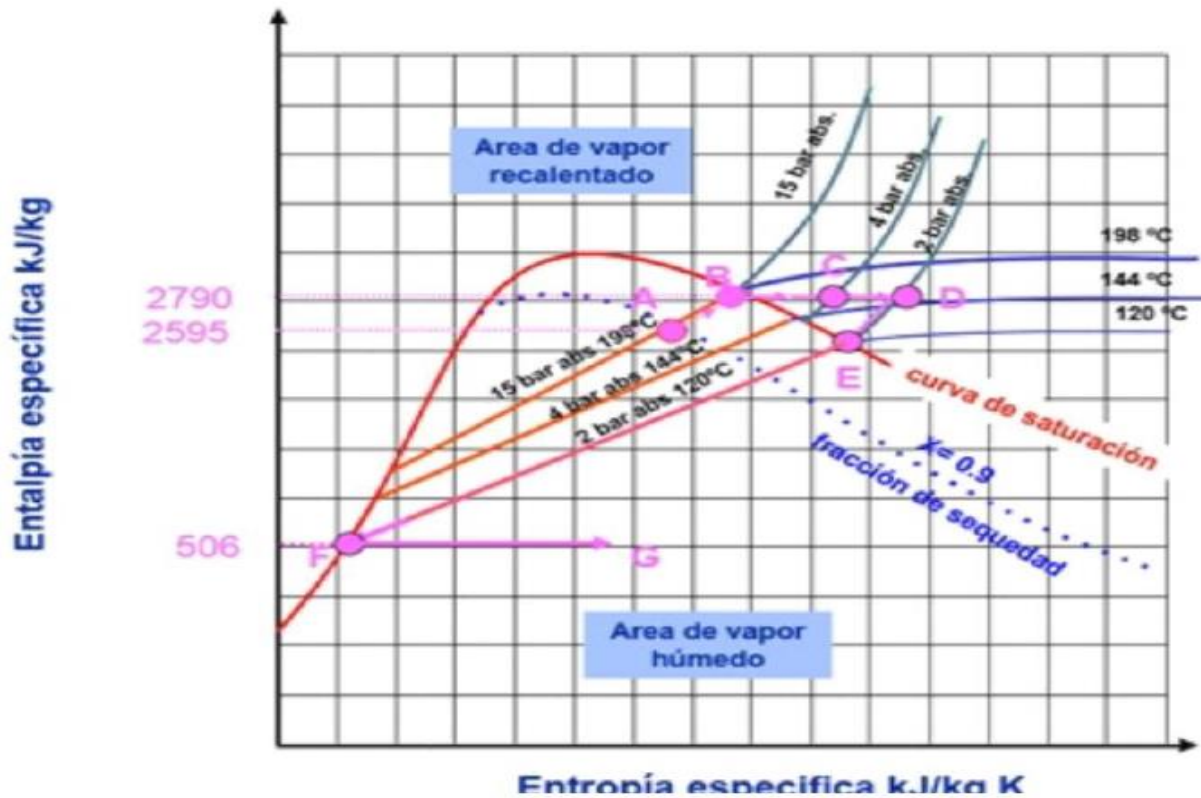


**Nota.** Fases del agua según la temperatura a presión variable. Tomado de: Y. Cengel, *Termodinámica*, 7a.ed México. The McGraw-Hill, 2011.

En la figura 7 se observa como la temperatura de ebullición cambia al modificarse la presión, de esta misma forma se analiza como el volumen específico en la mezcla liquido vapor es más corto, además, se observa el punto crítico del agua; Este punto es definido como el punto en que los estados liquido saturado y vapor saturado son idénticos. [12]

**Figura 8.**

*Curva de saturación agua*



**Nota.** Se muestra en la figura el comportamiento de agua es la relación entre la entropía específica y entalpía específica. Tomado de: A. Olajire., Review of ASP EOR (alkaline surfactant polymer enhanced oil recovery) technology in the petroleum industry: Prospects and challenges, arti, Energy,

Volume 77, 2014. [En línea]. Disponible:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360544214010603>.

Retomando lo anterior, el agua se considera una sustancia pura, por ello es importante definir las propiedades y las características. Pero antes de conocer y analizar estos conceptos, se debe comprender que el agua es el solvente universal por naturaleza, lo que nos lleva a identificar a este compuesto como una sustancia no pura, es decir es una sustancia que tiene presente otras moléculas o partículas que afectan sus propiedades, pero principalmente los equipos y usos finales que se le va a dar al vapor de agua.

Como se deben controlar y evitar daños a equipos, disminución de costos operativos y un uso eficiente y correcto del vapor, se deben tener planes o protocolos de control para el agua que es ingresada al proceso de cambio de fase, algunas características que son controladas son: Densidad, temperatura, presión, temperatura de saturación, presión de saturación, entalpías, material de sólidos, dureza y alcalinidad entre otras.

Las características anteriormente mencionadas se miden *in situ* para la selección del agua en el proceso. En la mayoría de los casos estas aguas son tratadas por las empresas o plantas antes, puesto que en los ductos de transporte pueden aumentar características que afectan el proceso de forma negativa, para la obtención de vapor o acarrear que los equipos disminuyan sus vidas útiles en el proceso, entre estas características se debe resaltar la dureza. Otras características son constantes que se han determinado en un laboratorio, por ejemplo, la temperatura de saturación, las cuales son empleadas en el desarrollo de ecuaciones y fórmulas que se han considerado para el generador de vapor o para determinar funciones según los procesos que se realizan en el mismo.

## **2.2 Usos del vapor de agua en la industria**

Desde un corto periodo de tiempo el hombre ha empleado el agua como una sustancia para el enfriamiento y transferencia de energía, aun no tan sofisticados por falta de tecnología ocasionando que en estos procesos no se recupere el agua o el calor que poseen, pero en otros procesos no solo se necesita el agua como medio para retirar el calor, también se emplea para transportar el calor a otras sustancias o sistemas, puesto como se mencionó, el agua puede ser sometida a procesos donde su presión aumenta permitiendo aprovechar su control y capacidad para transferir energía,[13] algunos usos para los cuales es empleada el agua en la actualidad son:

- Vapor para el calentamiento: Este tipo de vapor posee una presión positiva sobre la temperatura la cual permite su uso en las plantas procesadoras de alimentos y refinerías además de ser utilizado para la esterilización y mantenimiento de equipos.



- Vapor para el impulso: Se hace uso de un tipo de vapor sobrecalentado para la propulsión comúnmente en turbinas de vapor utilizadas para la generación de energía en plantas eléctricas.
- Vapor para la atomización: El vapor es utilizado para separar de manera mecánica los fluidos en este caso es común que sea requerido para separar aceites viscosos en los derivados del petróleo para que su combustión sea más rápida.
- Vapor para limpieza: Generalmente es requerido en la limpieza de grandes superficies como por ejemplo los sopladores de hollín.
- Vapor humectante: Es muy usual que sea utilizado en plantas productoras de papel, puesto que generan humedad y calor lo que permite que este producto no sufra fisuras en su producción.

### **2.3 Características del vapor de agua en la industria del petróleo**

Es de vital importancia para esta investigación, el uso del vapor de agua en la industria, pero ahora se aborda su relevancia en la industria del petróleo y características que se deben tener presentes al momento de su obtención. Finalizando con cuestiones económicas que para nuestro proyecto no se indaga a profundidad, pero son vitales para entender el alcance y una posterior optimización para documentos posteriores.

En primera medida, se analizó el uso del vapor de agua en la industria del petróleo, el cual ha tomado un gran valor en los últimos tiempos, partiendo de que el petróleo es una mezcla viscosa de hidrocarburos los cuales están bajo la superficie terrestre se utiliza el vapor de agua con dos objetivos principales, disminuir la viscosidad gracias al aumento de la temperatura y aumento de presión en el pozo petrolero, con el fin de facilitar la extracción del petróleo, este proceso se conoce con el nombre de *recobro terciario de petróleo*, es un método que aún no tiene un desarrollo elevado por algunos factores que se aclararan posteriormente. Este uso si se puede considerar de los métodos más limpios

para la extracción de petróleo, pues la sustancia que se inyecta al pozo es agua, y geológicamente no se busca afectar la estructura del suelo.

Otros aspectos importantes para el petróleo es en su transporte y separación en la planta, el primer uso es el calentamiento de tuberías, con el fin de facilitar el flujo de petróleo debido a que se conoce su alta viscosidad, este proceso ya se desarrolla en la extracción del petróleo, pero con la pérdida de energía normal que se presenta se debe considerar o procurar tener un punto óptimo de temperatura del petróleo para su fácil y controlado transporte, la separación del petróleo es desarrollada en la destilación fraccionada, en la cual se adiciona más energía comparada con el transporte, para obtener los diferentes productos del petróleo, estos dos últimos usos son en la refinería de petróleo mientras el primero es su extracción buscando cumplir las características de transporte en la refinería.

El vapor obtenido en el generador debe tener varias características entre las cuales está la calidad, la fase, la temperatura y presión, un factor que no se debe olvidar es el transporte del vapor desde el generador hasta el pozo, el documento actual no desarrolla o considera las tuberías de transporte, pero estas mismas características deben ser evaluadas para que en posteriores cálculos se determinen las particularidades del vapor final. Atributos como la dureza no son medidas con rigor directamente para el vapor son medidas y controladas con el fin de proteger los equipos.

Estas características son medidas por dos factores el transporte del vapor y el costo operacional, el primero es porque en la mayoría de los casos la energía que se adiciona al agua es transferida al entorno, lo cual nos da a comprender que si se pierde energía en el transporte del vapor se disminuye la temperatura y puede presentarse un cambio en la calidad, esto se podría considerar como un aumento en costos o disminución de la rentabilidad del proceso. También se debe tener en claro que tener vapor sobrecalentado no es rentable para el proceso y esto se explica a profundidad en el balance energético para ilustrar mejor como llevar vapor a temperaturas elevadas no sería rentable

económicamente. Esta es alguna de las razones que hace que este proceso sea un recobro terciario de petróleo.

## **2.4 Propiedades termodinámicas del vapor de agua**

Las propiedades termodinámicas del agua describen el comportamiento y la interacción con el entorno, estas propiedades pueden ser modificadas según condiciones que se presenten o pueden considerarse constante. Estas propiedades son:

- **Temperatura de ebullición:** La temperatura del agua varía dependiendo la presión en la que se encuentre en un sistema, de tal modo se puede decir que la temperatura de ebullición del agua es cuando la presión del vapor se iguala a la presión atmosférica en la que se encuentra dicho líquido.
- **Calor específico del agua:** Se define como el calor necesario que requiere una sustancia para elevar su temperatura.
- **Calor sensible:** Se define como el calor necesario para que se produzca un aumento de la temperatura hasta el punto de saturación de una sustancia a una presión constante.
- **Calor latente de vaporización:** Es la cantidad de calor que debe suministrarse para generar un cambio de fase.
- **Entalpia del vapor seco y saturado:** Es la suma del calor sensible del agua saturada y del calor latente de vaporización del agua.

## **2.5 Generador de vapor OTSG**

Recapitulando lo anterior, se resaltó de manera progresiva las características de los generadores de vapor y su división según varios factores, pero la sección actual se

enfocará en analizar el generador de vapor OTSG. Este equipo es el empleado en el pozo a analizar, es por esta razón que se enfoca su estudio en el documento.

Primero, se define el concepto de generador de vapor OTSG (*Once Through Steam Generator*) o en español como generador de vapor de un solo paso. El cual consiste en una máquina que cuenta con partes específicas para su correcto uso y funcionamiento, las cuales se mencionarán posteriormente. La importancia que resalta esta máquina es el flujo masico de vapor que se puede obtener, puesto que solo se hace circular el agua por la máquina en un solo trayecto, de la misma manera se elimina el tambor para el generador OTSG lo cual permite que se opere la maquina a condiciones de presión y temperaturas más elevadas.[14] El poco avance de estudio y control se debe a varias condiciones, una de ellas es que es un proceso intuitivo, pero de un alto nivel de control en todo momento. Cuestiones como la vida útil, corrosión, inicio, final del proceso se deben tener presentes en todo momento es por esta razón que el sitio, ubicación dentro de la empresa, tamaño ocasionan que se deba controlar mejor el uso de este.

Generalizando, en el generador de vapor como se resaltó en el capítulo anterior, las características que posee y como categorizarlo, pero las características para resaltar son: es pirotubular, de forma horizontal y su combustible es gas natural. Ubicado en contacto directo con el entorno, ubicado en una zona cálida. No se conoce el tiempo de operación total del equipo, ni el tiempo diario de operación.

En la mayoría de los casos estos equipos son diseñados, para condiciones específicas de proceso, buscando y seleccionando los materiales que cumplan los datos de salida, de la misma forma en esta selección de materiales se analiza si es necesario la implementación de catalizadores.[15]

El tiempo de inicio del generador varía, pero para algunos autores este tiempo esta entre 17 y 27 minutos, esto no busca obtener un “nivel”, con el ingreso de agua al generador de vapor y el calentamiento gradual con la adición de combustible, para evitar el sobrecalentamiento en los tubos, cuando se considera que el equipo llega a una

condición de operación se puede regular el flujo de agua o de gas natural, en la mayoría de las ocasiones se regula el agua para obtener un vapor sobrecalentado. De igual manera, para finalizar el proceso se continúa ingresando agua al sistema para evitar deformaciones y tubos arqueados. La mayoría de las fallas está dada por la corrosión, el enfriamiento térmico y taponamiento de tubos.[16]

### **2.5.1 Partes de los generadores de vapor OTSG**

En primer lugar, hay que tomar en cuenta que los generadores de vapor cuentan con dos zonas importantes, zona de combustión u hogar y zona de tubos.

- Zona de combustión u hogar: Esta se define por ser la parte en la que se libera el calor, a través de la quema de combustible respecto al recipiente metálico. Puede ser interior o exterior dependiendo de su ubicación, interior cuando la zona de combustión se encuentra dentro del recipiente y exterior si la zona se encuentra construida fuera del recipiente metálico.
- Zona de tubos: Dicha zona corresponde se ubican los combustibles que transfieren calor al agua para generar vapor, esto a través de tubos por donde circulan los gases.
- Hogar o fogón: Es el espacio donde se produce la combustión. Se le conoce también con el nombre de cámara de combustión.
- Puerta hogar: Es una pieza metálica, abisagrada, revestida generalmente en su interior con ladrillo refractario o de doble pared, por donde se agrega el combustible sólido al hogar, para que inicie con su proceso de combustión.
- Emparrillado: Es una reja metálica, generalmente rectangular, que va en el interior de la cámara de combustión, la cual sirve de soporte al combustible sólido. Esta debe permitir el paso del aire primario que sirve para que se produzca la combustión.

Las parrillas deben adaptarse al combustible y deben cumplir principalmente las siguientes características:

- Deben permitir el paso del aire.
- Deben permitir que caigan las cenizas.
- Deben permitir que se limpien con facilidad y rapidez.
- Deben impedir que se junte suciedad.
  
- Cenicero: Es un espacio ubicado bajo la parrilla el cual sirve para recibir las cenizas que caen de ésta. los residuos acumulados deben retirarse periódicamente para no obstruir el paso de aire necesario para la combustión, también hay que tener cuenta en algunas calderas el cenicero es un depósito de agua.

Caja de humo: Es la parte en el cual se juntan los humos y gases, después de haber entregado su calor y antes de salir por la chimenea.

- Chimenea: Es el conjunto de salida de los gases y humos de la combustión para la atmósfera.
  
- Regulador de tiro o templador: Es una compuerta metálica instalada en el conducto de humo que comunica con la chimenea y da mayor paso para la salida de los gases y humos de la combustión.
  
- Tapas de registro o puertas de inspección: Son aberturas que permiten inspeccionar, limpiar y reparar la caldera.
  
- Puertas de explosión: Son puertas metálicas con contrapeso o resorte, ubicadas generalmente en la caja de humos y que se abren en caso de exceso de presión en la cámara de combustión, permitiendo la salida de los gases y eliminando la presión.
  
- Cámara de agua: Es el espacio de la caldera donde se encuentra el agua y tiene como límite superior un cierto nivel mínimo del que no debe disminuir nunca el agua durante su funcionamiento.

- Cámara de vapor: Es el espacio o volumen que queda sobre el nivel superior máximo de agua y en el cual se almacena el vapor generado por la caldera.

## **2.6 Proceso del generador de vapor OTSG**

De la misma manera, al analizar el generador de vapor como un equipo que transforma la energía química en energía térmica, este equipo recibe agua sin dureza de la planta de agua industrial, su función es producir vapor para disminuir la viscosidad de los fluidos por medio de la transferencia de calor a los pozos productores de hidrocarburos, con el fin de hacer más fácil la extracción de los fluidos. La calidad del vapor generada debe estar entre el 77% y 80%, además los líquidos de arrastre deben estar entre 23% y 20%.

Así mismo, como se ha mencionado en varias ocasiones, las características de los generadores a vapor, para comprender el funcionamiento, se enfatizó en el presente trabajo de grado reconocer el funcionamiento y la metodología que se emplea para evaluar las variables, de esta misma forma se debe entender el proceso, el cual inicia con el ingreso de agua a la zona por la cual va a pasar, luego se inicia la combustión del gas natural, al no poseer un tambor de vapor se debe controlar la presión en tiempo real, el agua o gases de combustión solo pasarán una única vez por los tubos.

Es por esta razón que los equipos deben tener un control de la entrada de combustible y agua para regular el vapor generado, se considera que ambas sustancias deben estar en equilibrio, lograr el equilibrio permitirá el paso directo del líquido al vapor, si se ingresa una mayor cantidad de combustible o poca agua los tubos se pueden sobrecalentar, esto ocasiona daño en los tubos si no se controla el calentamiento de los tubos. La otra situación de no estar en equilibrio es que si se ingresa poco combustible y una gran cantidad de agua se pueden generar incrustaciones o arrastre de vapor húmedo al sobrecalentador. El generador de vapor OTSG al no tener un tambor permite que se puedan alcanzar presiones elevadas, se considera que no hay un estado de vaporización a causa de ello se considera que cambia de un estado de fluido super crítico suavemente.

El arranque del equipo como ya se mencionó, se debe iniciar con una mayor cantidad de agua muy por encima de lo normal y luego se hace la entrada del combustible. Esta puesta en marcha hace que se obtenga vapor saturado que debe pasar por separadores para que pueda volver a pasar a través del generador de vapor. Este proceso inicial se conoce como “recirculación”, en donde la entrada de combustible se va elevando hasta obtener vapor seco, se pasa luego a “un solo paso”, o modo Benson en donde se modifica la alimentación del agua.[17]

Un factor para tener presente es el tamaño del generador de vapor y sus materiales, pero uno de los materiales más importantes es de los tubos pues ellos permiten la transferencia de calor, debe resistir altas temperaturas y resistir a la corrosión acelerada por flujo. En la mayoría de los casos, se requiere de un catalizador para la combustión por ejemplo NOx a medida que se evapora el agua se van dejando solidos disueltos para el caso de los generadores pirotubulares estos solidos pueden quedar en los tubos y en la parte interior de la coraza, pero comparado al generador acuaturbular en donde los sólidos quedan directamente en los tubos ocasionando que la transferencia disminuya y se aumente la corrosión en los tubos, se puede concluir que los fenómenos de incrustación se presentan en menor consideración.

Cuando se quiere llegar al punto de equilibrio entre los compuestos se controla el flujo de agua. La lógica del sistema siempre se predice un flujo de agua anticipado. Se considera que se debe a una presión típica en la que generalmente el generador OTSG tarda 27 minutos. Luego de este inicia, en el modo Benson debe ser lenta para evitar un enfriamiento en los tubos lo cual puede resultar en deformaciones de los tubos.[18]

El OTSG es un equipo, que actúa como un recipiente cerrado para convertir el agua de su interior en vapor. Para esto, al pasar la energía química de un gas combustible se convierte en calor por combustión. A continuación, el calor se transfiere al agua contenida, aumentando así la presión y eventualmente convirtiendo la forma líquida en vapor. La integridad del tubo OTSG es importante para el funcionamiento seguro del agua a presión. Como resultado, hay requisitos para garantizar que se mantenga la



integridad del tubo. El proceso de integridad se puede definir como la gestión del equipo de proceso crítico para garantizar que esté diseñado, instalado correctamente y opera y mantenido correctamente».[19]

Como último, para entender el funcionamiento de un generador OTSG se debe analizar que al ser un proceso desarrollado *in situ*, esto ocasiona que se puedan presentar perturbaciones, así mismo pequeñas variaciones en el combustible, el agua ocasiona que la calidad del vapor varíe así como el daño que se puede originar en los tubos, este control es difícil de predecir, ni siquiera en el laboratorio puesto que la medición de los datos de entrada no es precisa ni confiable así como la toma manual es difícil.

Así mismo, que se deben tener sensores, pero para ello se emplean sensores sensibles o “blandos”, ya que con ellos se miden las características que van adquiriendo los tubos; Pero el más importante, es la temperatura para determinar en qué punto el agua cambia de estado. Se comprende también que los tubos en los generadores pirotubulares cumplen con la transferencia de calor por convección y radiación ambos fenómenos ocurren al tiempo, mas este último no transfiere tanto calor como el calor transferido por la convección, puesto que se considera que si se calientan demasiado los tubos estos se deformarán.[20]

## **2.7 Combustibles empleados en el generador de vapor**

Desde un principio, los combustibles están presentes en la evolución, producción y vida cotidiana de las personas, pero es hasta hace pocos años en los que se emplean los combustibles fósiles, ocupando un papel crucial en el transporte y producción industrial. Los combustibles más comunes en la industria son la gasolina, Diesel, gas natural y crudo pesado, los cuales están compuestos por hidrocarburos siendo los encargados de liberar energía por su combustión, está dependiendo del tipo de combustible, la estequiometría, exceso de aire, cantidad de azufre, las condiciones del ambiente, etc. Lo anterior es un factor importante al considerar las ecuaciones de combustión.

Los combustibles que se emplean en la generación de vapor requieren y buscan economizar el coste del proceso, es por esta razón que se consideran dos combustibles en la mayoría de los procesos industriales para generar vapor, el principal es el gas natural y el segundo es el crudo pesado, este último es empleado en la mayoría de los casos en los pozos petroleros, cuando no se encuentra un suministro de gas natural elevado o con condiciones óptimas, el crudo pesado es de fácil acceso en los pozos.

El crudo pesado es un combustible difícil de controlar, se busca aprovechar su potencial energético, pero implementarlo en los generadores ocasiona que el equipo deba tener un control mayor, debido a que como no es un compuesto que tenga una composición constante de sustancia que lo conforman, su alta viscosidad y la generación de material particulado, son razones por las cuales dificultan un control riguroso en los equipos y proceso, pero su energía si es vital y permite mejorar condiciones del gas natural que deban ser tratadas antes de que el gas natural entre en el generador de vapor.

El combustible de interés es el gas natural para el documento, puesto como se mencionó en el párrafo anterior el control del crudo pesado requiere datos con un mayor control *in situ* lo que hace que desarrollar una metodología para esta sustancia sea de tipo experimental, para controlar condiciones del crudo y determinar el comportamiento de este según condiciones de proceso. De igual manera, otra razón es que es el combustible empleado en el pozo para la extracción terciaria de vapor es el gas natural. Por lo anterior, se va a considerar únicamente las fórmulas del gas natural y factores o correlaciones necesarias para considerar el mejor modelo matemático, analizando el generador de vapor desde los datos obtenidos en planta. Un factor importante para considerar es que el gas natural no genera tantos gases de efecto invernadero comparado con otros combustibles.

## 2.8 Estudios de caso de generadores OTSG

- *Compact Steam Bottoming Cycles: Minimum Weight Design Optimization and Transient Response of Once-Through Steam Generators.*

La industria noruega O |&G de petróleo y gas presenta un consumo de energía alto y emisiones de CO<sub>2</sub> estas emisiones representan un 27% de las emisiones de gases de efecto invernadero en el territorio noruego. El estudio fue desarrollado en una plataforma de petróleo y gas costa fuera en una plataforma continental noruega, las ventajas que ofrece los generadores de vapor OTSG son la carga más rápida y arranque, y la reducción de agua de alimentación y mantenimiento.

La simulación del generador de vapor está planteada como unidimensional, pero este considera el número de paso como un volumen de control, esto sirve para determinar la temperatura según cada volumen de control. Así mismo, se consideran variaciones de densidad las cuales se determinan como la densidad promedio en cada nodo (número de paso determinado por el simulador).

Un factor clave a tener presente es que el balance de masa en los gases de combustión es estático. Lo cual presenta una simplificación en el sistema dado que se considera una generación energética y másica constante. Desde el punto de vista energético se describe el balance como la capacidad calorífica y la conductividad según el material de la pared, para determinar la cantidad de energía transferida. Un factor clave que se ha de considerar es que el generador es acuatubular.

- *Diseño mecánico de un generador de vapor tipo acuatubular de presión subcrítica y baja producción de vapor.*

El documento muestra las principales ecuaciones para un generador de vapor en el cual se tiene en cuenta las velocidades del fluido las presiones, la teoría de energía de distorsión, así como consideraciones de diseño para un generador de vapor, sus

accesorios y componentes principales lo cual genera un correcto funcionamiento del generador.

También se consideran tablas en las cuales según la variación de temperatura y presión se determinan la densidad, entalpía, calor específico y viscosidad dinámica, Asimismo se determina la tasa de calor (Q) el cual tiene un valor de: 2.34kW sabiendo que es líquido su enfriado para tener un estado final del líquido saturado, luego se determina la tasa de calor para el proceso de ebullición la cual es de uno 1.9kW, después se calcula el sobrecalentamiento del vapor el cual tiene una tasa de calor igual a 11.79kW, lo cual da una tasa de flujo de calor con un valor de 16.03 kW, se determina un eficiencia del 80%.

- *Diseño de una caldera de generación de vapor piro tubular de 10 bhp expandible a 25 bhp mediante módulos.*

El documento muestra como la cantidad de vapor está directamente proporcionada a la potencia del equipo cuando trabaja a su máxima capacidad, explicando que tiene una potencia de 25 BHP lo cual permite en su máxima capacidad producir 34,5 lb de vapor sobre hora partiendo de agua a una atmósfera y 100°C también se especifica que esta condición final puede tener variación partiendo de la presión de trabajo y la temperatura de alimentación.

Así mismo, se escribe que el nivel requerido de aceptación para el vapor depende de la necesidad del pozo u operación industrial a realizar. Por lo tanto, se determinó que en un 46% entra agua de 10 a 15° C o de 20 a 25° C con un porcentaje del 23%, Además supresión de trabajo es de 70 a 80 psi con un porcentaje aproximado del 45% o de 80 a 90 psi con un 33% de presión de trabajo.

- *Condiciones de seguridad en calderas de vapor de empresas afiliadas a una administradora de riesgos profesionales en Antioquia.*

Este documento explica el estudio realizado a 20 calderas tanto cuestiones de seguridad operación mantenimiento combustible y potencia en las cuales se encuentra que la pirotubular horizontal es la más empleada. Se encuentra que el 85% de las empresas no tienen instructivo de la caldera y el 60% no tienen alarma sonora. Se desarrolla un mantenimiento preventivo para la mayoría de las empresas, así mismo, se observa que no hay una capacitación para el manejo y operación de la caldera, un factor a tener en cuenta es la falta de agua o aumento en la sobrepresión como riesgo físico. Como riesgo físico y químico está la acumulación de gases de combustión y posibles incendios.

- Optimización del sistema de generación de vapor de la empresa Incauca S.A.

La tesis se basa en un análisis del funcionamiento de las calderas de la empresa Incauca S.A. Las calderas son de tipo acuotubular en donde se quema carbón y bagazo, este último componente no se analiza en todas las plantas y es por esto por lo que en la tesis nombrada "OPTIMIZACION DEL SISTEMA DE GENERACIÓN DE VAPOR DE LA EMPRESA INCAUCA S.A." se especifica que el carbón tiene un porcentaje de carbón fijo del 56.38% mientras el bagazo tiene un porcentaje del 22.65% lo cual hace que el carbón sea desde este punto de vista efectivo. De la misma forma, la humedad del bagazo que es de un 50.00% a diferencia de la del carbón que es 4.0% se obtiene un poder calorífico (Btu/lb) para el carbón es de 11600, mientras que para el bagazo es de 4100. Partiendo desde esto se puede observar cómo se emplea el bagazo como un insumo que puede generar energía sin aumentar un costo adicional, lo cual hace el carbón que se debe comprar para generar vapor.

La empresa cuenta con cuatro calderas las calderas generan de 300000 lb/hr hasta 150000 lb/hr, se encuentran datos como: exceso de aire, temperatura de sobrecalentamiento, presión de sobrecalentamiento, temperaturas de salidas de los gases. Estos datos deben ser analizados conociendo el tipo de caldera y su funcionamiento, se debe aclarar que estos datos son antiguos y no se conoce la veracidad de estos, pero un dato que se puede analizar es la entrada de aire a la caldera, donde en la caldera 2 y 4 se observa que para el bagazo se debe tener una entrada

mayor de aire. Además, se observa la eficiencia en donde se encuentra un 78% para el carbón y de 64% para el bagazo, esa eficiencia desde nuestro punto de vista es menor debido a la humedad que posee el bagazo.

Finalmente, luego de desarrollar los cálculos conociendo y partiendo que un problema en el cual no se conoce la cantidad de carbón que entra en las calderas 3 y 4, y se utiliza bagacillo como una sustancia adicional en la combustión del bagazo, generando una estimación ya que se debe hacer cálculos para estimar cantidades de combustible, lo cual puede ocasionar un aumento o disminución de la eficiencia, pero luego de realizar cálculos para estimar las cantidades de combustible que entra en cada caldera se encontraron eficiencias del 36% para la caldera 1 y 2 así como una eficiencia de 61,76% promedio para la caldera 3, y de 64,82% promedio para la caldera 4, de la misma forma, se considera una disminución de eficiencia en la caldera 3 y esto podría deberse a que el combustible que ingresa a la caldera es una mezcla de bagazo, bagacillo y carbón y este último está presente en menor porcentaje en la caldera 3 con un 22,91% , mientras que en la caldera 4 está en la mezcla con un 31,30% para ambos casos es un promedio.

Lo anterior muestra como el comportamiento de una caldera se ve afectado por el tipo de combustible y la humedad de este, la anterior tesis establece aspectos importantes sobre el comportamiento del carbón y como se pueden calcular las eficiencias, y cálculos por perdidas, es solo una orientación para comprender la importancia de emplear gas natural para generar vapor de agua.

- *Evaluación energética de los generadores de vapor f1-2 y bh-109 de una refinería cubana de petróleo.*

Para este caso presenta a los generadores de tipo acuatubular en donde se resaltan dos cosas que el agua que va a ser transformada en vapor es tratada químicamente para eliminar contaminaciones y se hace un precalentamiento de 25 a 98°C la cual es la temperatura de entrada al generador, esto se justifica para evitar daños estructurales en la máquina, además busca generar vapor sobrecalentado. Para este generador, el combustible empleado es el petróleo, para ello es importante tener en cuenta la

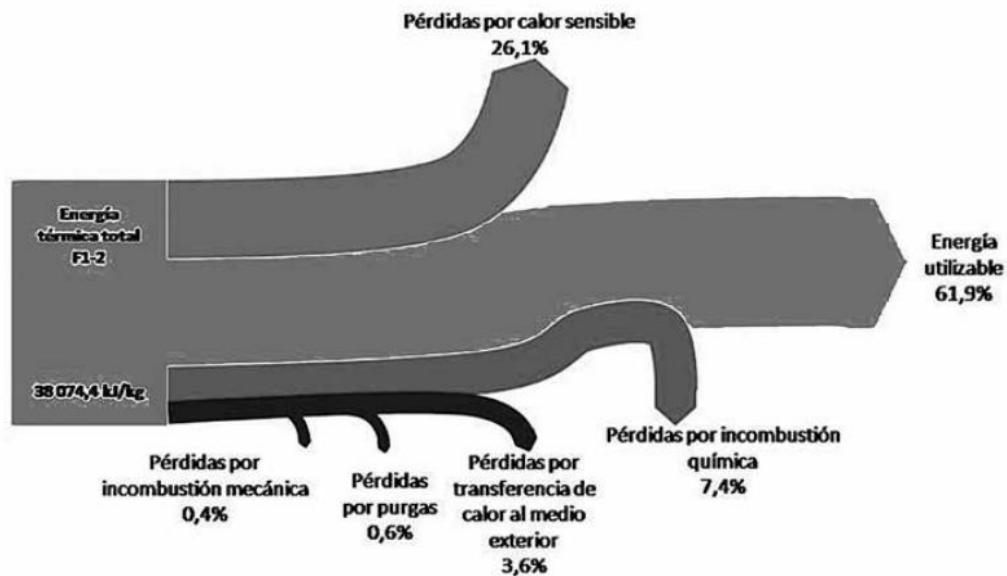
temperatura mínima de los gases de combustión, puesto que si la temperatura de los gases es menor a 145°C se puede presentar una temperatura de rocío encontrándose presencia de azufre este componente, causando corrosión en los equipos, por lo anterior, en ocasiones no se busca recuperar la energía de los gases de combustión.

Un valor que es relevante reevaluar es la combustión en las cuales se genera CO, llamadas combustiones incompletas, pero en el documento se rescata que para que un generador de vapor opere bien el contenido de CO debe ser menor al 0.1% puesto que la presencia de este compuesto generaría pérdidas energéticas.

Finalmente, se observa como los equipos estudiados presentan una eficiencia del 61.9% para un equipo y 77.3%, la eficiencia menor se debe en el primer equipo por la combustión incompleta donde se presenta un porcentaje de 1.38% presente del CO en los gases de combustión, lo cual muestra que si se llega a aumentar considerablemente la concentración de CO esto repercute negativamente en la eficiencia del equipo ya que como se muestra en la figura 1.3 al aumentar la presencia de CO se incrementan las pérdidas por calor sensible y por combustión química incompleta. Algo que se puede resaltar es las pérdidas que se van a tener en cualquier equipo ya que como conocemos no existe una maquina perfecta.

**Figura 9.**

*Diagrama de Sankey para el generador de vapor F1-2*



**Nota.** La figura muestra la energía que se puede utilizar de un generador de vapor, el valor de energía útil tiene un rango entre 60% y 80%. Tomado de: A. Valles., L Cordero., A. Perez., Evaluación Energética de los Generadores de Vapor F1-2 y BH-109 de una Refinería Cubana de Petróleo, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, Cuba, 2013.

Para el autor es relevante considerar siempre un exceso de aire, esto con el fin de evitar la combustión incompleta, ya que como se ha mencionada el incremento en el % del CO en los gases de combustión, genera que la eficiencia disminuya considerablemente, se consideran excesos de aire entre 13,21% y 30%, como se muestra en la figura 9 se observa como en un porcentaje de exceso de aire entre un 5 y 23% se considera la región con mayor eficiencia.

De la misma forma, se puede analizar cuándo se considera que se da una combustión total del combustible, lo cual para muchos autores es efectivo, ya que el metano como lo mencionó el autor tiene un mayor impacto en la atmósfera, aunque este factor no es el único que afecta la eficiencia, pues los tiempos de residencia en el generador de vapor afectan, en la literatura se considera que si los tiempos de residencia en el generador

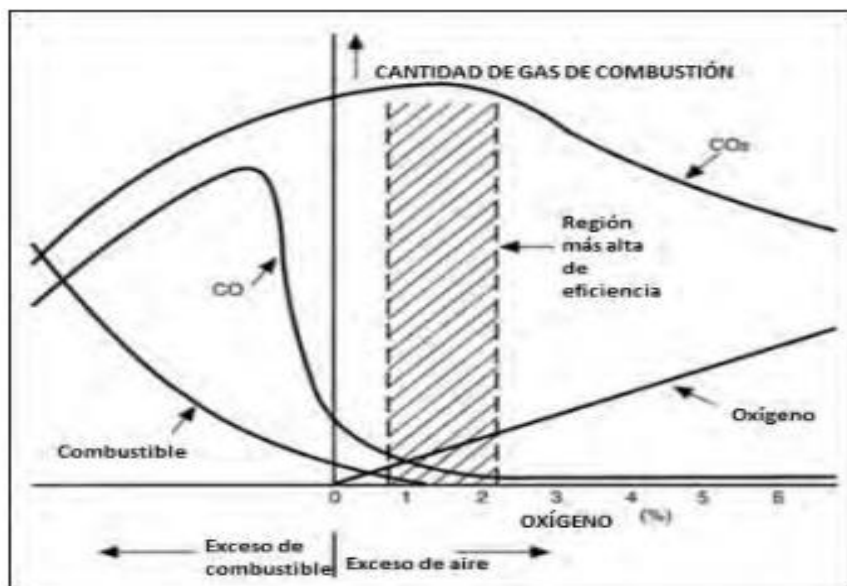


son pequeños y que no se alcanza a generar una combustión completa, así mismo no se han presentado todos los choques moleculares y por lo anterior, el combustible y oxígeno no reaccionan.

También se debe considerar la temperatura de los gases de combustión, pues de forma directa si se determina que la temperatura es inferior a lo normal se define que se está llevando a cabo una combustión incompleta, y si se llega a disminuir como se mencionó anteriormente la temperatura no puede ser menor a la temperatura del rocío para evitar daños en los equipos por corrosión por el azufre.

### Figura 10.

*Eficiencia de combustión de acuerdo con el exceso de aire.*



**Nota.** La figura anterior representa la medición de la eficiencia de combustión de acuerdo a la presión de aire de acuerdo a la condición de oxígeno o Dióxido de carbono, que se encuentra en una estructura acuatubular. Tomado de: C. Andrade, metodología de diseño de un generador de vapor acuatubular bagacero, tesis pre, facultad de ingeniería, Universidad de Piura, 2015. [En Línea]. Disponible: [https://pirhua.udep.edu.pe/bitstream/handle/11042/2205/IME\\_184.pdf;sequence=1](https://pirhua.udep.edu.pe/bitstream/handle/11042/2205/IME_184.pdf;sequence=1).

Para completar el campo problémico, se analizó la anterior figura donde la geometría de los generadores que se muestra en la figura 8 determina como existen dos tipos de

geometrías, Como estaba en la parte izquierda, existe una geometría cuadrada y una triangular. Se puede determinar, el área de flujo y el área de contacto entre el tubo y el flujo, se puede enfocar que queda una geometría cuadrada y esto generaría una transferencia de calor mayor, al tener áreas de contacto entre el tubo y el líquido mayores, pero debe tener presente el espacio y el diámetro total del generador comprendiendo que un generador de vapor horizontal, el cual es el más común por 2 factores importantes; Más fácil de ubicar en una planta industrial y presenta una mayor eficiencia, por el hecho de que los tubos se encuentran rodeados del fluido que va en la coraza. Ya que la geometría afecta varias variables, Se puede definir que generador es más conveniente para una empresa se debe hacer una evaluación de costos. [21]

La geometría empleada en los generadores de vapor es de tipo cilíndrico de tipo horizontal, aunque también en la industria se encuentran los generadores de tipo vertical de contraflujo ya que como se conocemos la termodinámica y transferencia de calor el contraflujo es la manera más eficiente para ceder energía de un medio a otro, pero este fenómeno se busca generalmente en todos los sistemas industriales, la razón por la cual se emplea un generador vertical es por el espacio disponible en la empresa, aunque para el presente caso no se necesita que se tenga en esta posición, el generador horizontal genera mayor contacto entre la parte caliente y fría.

### 3. MARCO NORMATIVO

La presente investigación se centra en el desarrollo de una serie de análisis para construir de manera asertiva y cercana aspectos relevantes que den la fundamentación suficiente para comprender los aspectos importantes. Para ello, se da inicio con el concepto de contaminante, el IDEAM define la contaminación atmosférica como la presencia que existe en el aire de pequeñas partículas o productos secundarios gaseosos que pueden implicar riesgo, daño o molestia para las personas, plantas y animales que se encuentran expuestas en el ambiente que los rodea. De igual manera, en el Título V del decreto 1076 de 2015 determina aspectos importantes de los contaminantes primarios, que están contempladas como las sustancias emitidas directamente a la atmosfera por la fuente de emisión, que están intrínsecamente relacionados con las pretensiones del presente trabajo de investigación.

Desde ese escenario se analizó el impacto ambiental de las sustancias generadas en las reacciones de combustión, para empezar, se debe conocer algunos indicadores empleados o procesos realizados para determinar sus concentraciones según su origen y proceso de combustión. Uno de estos indicadores es conocido como huella de carbono (HdC), definida en forma muy general, como la representación de la cantidad de gases efecto invernadero (GEI) emitidos a la atmósfera derivados de las actividades de producción o consumo de bienes y servicios (Pandey et al., 2010; Wiedmann, 2009), es considerado de vital importancia y considera las siguientes sustancias como GEI: dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), metano (CH<sub>4</sub>), óxido nitroso (N<sub>2</sub>O), hidrofluorocarbonos (HFC), hidrocarburos perfluorados (PFC), y hexafluoruro de azufre (SF<sub>6</sub>).

**Tabla 3.**

*Potenciales de contribución al calentamiento global, relativos al CO2.*

Nombre Industrial o común (años)	Fórmula química	Vida (años)	Eficacia Radiativa (W m <sup>-2</sup> ppb <sup>-1</sup> )	Potencial de calentamiento mundial para Tiempo dado de Horizonte			
				SIE† (100-años)	20-años	100-años	500-años
Dióxido de carbono	CO <sub>2</sub>	Ver debajo <sup>a</sup>	<sup>b</sup> 1.4x10 <sup>-5</sup>	1	1	1	1
Metano <sup>c</sup>	CH <sub>4</sub>	12 <sup>c</sup>	3.7x10 <sup>-4</sup>	21	72	25	7.6
Óxido nitroso	N <sub>2</sub> O	114	3.03x10 <sup>-3</sup>	310	289	298	153
<b>Sustancias controladas por el Protocolo de Montreal</b>							
CFC-11	CCl <sub>3</sub> F	45	0.25	3,800	6,730	4,750	1,620
CFC-12	CCl <sub>2</sub> F <sub>2</sub>	100	0.32	8,100	11,000	10,900	5,200
CFC-13	CClF <sub>3</sub>	640	0.25		10,800	14,400	16,400
CFC-113	CCl <sub>2</sub> FCClF <sub>2</sub>	85	0.3	4,800	6,540	6,130	2,700
CFC-114	CClF <sub>2</sub> CClF <sub>2</sub>	300	0.31		8,040	10,000	8,730
CFC-115	CClF <sub>2</sub> CF <sub>3</sub>	1,700	0.18		5,310	7,370	9,990
Halon-1301	CBrF <sub>3</sub>	65	0.32	5,400	8,480	7,140	2,760
Halon-1211	CBrClF <sub>2</sub>	16	0.3		4,750	1,890	575
Halon-2402	CBrF <sub>2</sub> CBrF <sub>2</sub>	20	0.33		3,680	1,640	503
Tetracloruro de carbón	CCl <sub>4</sub>	26	0.13	1,400	2,700	1,400	435
Bromuro de metilo	CH <sub>3</sub> Br	0.7	0.01		17	5	1
Cloroformo de metilo	CH <sub>3</sub> CCl <sub>3</sub>	5	0.06		506	146	45
HCFC-22	CHClF <sub>2</sub>	12	0.2	1,500	5,160	1,810	549
HCFC-123	CHCl <sub>2</sub> CF <sub>3</sub>	1.3	0.14	90	273	77	24
HCFC-124	CHClF <sub>2</sub> CF <sub>3</sub>	5.8	0.22	470	2,070	609	185
HCFC-141b	CH <sub>3</sub> CCl <sub>2</sub> F	9.3	0.14		2,250	725	220
HCFC-142b	CH <sub>3</sub> CClF <sub>2</sub>	17.9	0.2	1,800	5,490	2,310	705
HCFC-225ca	CHCl <sub>2</sub> CF <sub>2</sub> CF <sub>3</sub>	1.9	0.2		429	122	37
HCFC-225cb	CHClF <sub>2</sub> CClF <sub>2</sub>	5.8	0.32		2,030	595	181
<b>Hidrofluorocarbonos</b>							
HFC-23	CHF <sub>3</sub>	270	0.19	11,700	12,000	14,800	12,200
HFC-32	CH <sub>2</sub> F <sub>2</sub>	4.9	0.11	650	2,330	675	205
HFC-125	CHF <sub>2</sub> CF <sub>3</sub>	29	0.23	2,800	6,350	3,500	1,100
HFC-134a	CH <sub>2</sub> FCF <sub>3</sub>	14	0.16	1,300	3,830	1,430	435
HFC-143a	CH <sub>3</sub> CF <sub>3</sub>	52	0.13	3,800	5,890	4,470	1,590
HFC-152a	CH <sub>3</sub> CHF <sub>2</sub>	1.4	0.09	140	437	124	38
HFC-227ea	CF <sub>3</sub> CH <sub>2</sub> CF <sub>3</sub>	34.2	0.26	2,900	5,310	3,220	1,040
HFC-236fa	CF <sub>3</sub> CH <sub>2</sub> CF <sub>3</sub>	240	0.28	6,300	8,100	9,810	7,660
HFC-245fa	CHF <sub>2</sub> CH <sub>2</sub> CF <sub>3</sub>	7.6	0.28		3,380	1030	314
HFC-365mfc	CH <sub>3</sub> CF <sub>2</sub> CH <sub>2</sub> CF <sub>3</sub>	8.6	0.21		2,520	794	241
HFC-43-10mee	CF <sub>3</sub> CH <sub>2</sub> CF <sub>2</sub> CF <sub>3</sub>	15.9	0.4	1,300	4,140	1,640	500
<b>Compuestos perfluorinados</b>							
Hexafluoruro de azufre	SF <sub>6</sub>	3,200	0.52	23,900	16,300	22,800	32,600
Trifluoruro de nitrógeno	NF <sub>3</sub>	740	0.21		12,300	17,200	20,700
PFC-14	CF <sub>4</sub>	50,000	0.10	6,500	5,210	7,390	11,200
PFC-116	C <sub>2</sub> F <sub>6</sub>	10,000	0.26	9,200	8,630	12,200	18,200

**Nota.** Se establecen los diferentes potenciales de calentamiento global según varias sustancias químicas. Tomado de: S. Solomon., D. Qin., M. Manning., Informe aceptado por el Grupo de Trabajo I del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático pero no aprobado en detalles, IPCC.

Retomando lo anterior y como se observa en la anterior tabla 3, tiene como apertura el dióxido de carbono como índice (1) de contribución al calentamiento global. Seguidamente se encuentra al metano con 25 veces más contaminante. Lo anterior indica que un gramo de metano es 25 veces más contaminante que un gramo de CO<sub>2</sub>. Con esto, se encuentran sustancias que son demasiado contaminantes como el hexafluoruro de azufre que es 22800 veces más contaminante.

Pero antes de centrar y determinar solo que tan contaminante es una sustancia, se debe entender la cantidad que es emitida en los procesos industriales y es claro que el dióxido de carbono es una sustancia que es generada en un porcentaje mayor a cualquier otra, en un proceso de combustión, es por esta razón que para determinar que la sustancia que tenga un impacto mayor al ambiente se debe establecer el cálculo por naturaleza de la sustancia y por su generación, como la vida media de la sustancia.[22]

Cabe anotar, que existe el método TOP-DOWN Y BOTTOM-UP, el cual busca principalmente comprender el proceso. El primero se enfoca en ir desde un punto macroeconómico a una decisión de compra o venta, mientras el segundo inicio con un análisis del producto y finaliza en una decisión de compra o venta. Estos métodos son utilizados tanto por las empresas como por entidades que regulan y miden las emisiones generadas al ambiente estos métodos no van a hacer abordados en el documento puesto que se deben considerar datos de análisis detallados pues se puede llegar a conducir a errores y resultan más complicados y costosos que otros métodos.[23]

### **3.1 Normatividad colombiana**

Agregando a lo anterior, en la resolución 2254 de 2017 del Ministerio de ambiente, estableció los niveles máximos en donde definió los contaminantes monitoreados entre los cuales se encuentra material particulado, dióxido de azufre, dióxido de nitrógeno, ozono troposférico y monóxido de carbono. Para el documento no se consideró la presencia de material particulado ozono. Se analizó los componentes generados de la combustión de gas natural (colocar formulación química). Hay que abordar ahora en

primer lugar la combustión de otros materiales y los porcentajes de composición de las sustancias mencionadas al principio.

Una de las principales normativas del territorio colombiano que regula las emisiones de gases o partículas a la atmosfera es el conocido: “protocolo para el control y vigilancia de la contaminación atmosférica generada por fuentes fijas” desarrollado por el Ministerio de Ambiente del año 2010. En donde se explica métodos de medición, estudio de emisiones atmosféricas, monitoreo de emisiones atmosféricas, determinación de la altura de descarga (buenas prácticas de ingeniería), sistemas de control, así como otros temas.

Para los generadores de vapor se tiene considerado la generación de material particulado los óxidos de nitrógeno y SO<sub>2</sub> estos datos son muestreados durante 60 minutos con un volumen de muestra de 0.85 dscm estos datos son los que se deben medir así mismo se deben tener consideraciones tales como emisiones de CO<sub>2</sub> y CO mediante muestras, determinación de la humedad para una posterior determinación de contaminantes.[24]

Un factor importante a nivel industrial y de muestreo es la cantidad de material particulado el cual es descrito y abarcado en el documento pero en el presente documento no se va a tener presente el material particulado, dado que este factor conlleva a un aumento en las consideraciones para el modelamiento matemático que se desarrolla, por complejidad de manejar solidos en gases (aerosoles) lo cual no se va a considerar dado que el objetivo principal es determinar la generación de vapor y los gases generados.

Otra normatividad vigente En Colombia es la ley 9 de 1979, en la cual se analiza las medidas sanitarias para la protección del medio ambiente esta norma sirve de base a las disposiciones y reglamentaciones necesarias para restaurar un mejorar las condiciones necesarias relacionadas a la salud humana industrialmente busca cumplir las disposiciones para el uso de aguas Asimismo como su descarga.

Un factor que clara la ley 9 es la toma y captación de agua en la cual busca determinar equipos lugares canales para no interferir en aguas para uso doméstico. Esta ley está enfocada a la parte del calentamiento del agua puesto que se necesitan condiciones óptimas para el ingreso al generador, industrialmente como el agua es tomada in situ debe tener normatividad para no afectar afluentes lo cual hasta el momento no se ha presentado ningún inconveniente.

La ley 1931 de 2018 la cual establece directrices para la gestión del cambio climático en las decisiones con el objetivo de promover una economía competitiva, sustentable y un desarrollo bajo de carbono. La finalidad de esta ley es que las entidades regulatorias determinen la cantidad de CO<sub>2</sub> equivalente, así como el pago de impuestos por la generación de GEI así como buscan incentivar a las empresas por cambios que conlleven a una disminución de la generación de los mismos. Todo esto esta respaldado por el consejo nacional de cambio climático basándose en el sistema nacional de cambio climático las cuales son políticas, normas, procesos, entidades estatales y demás mecanismos que busquen disminuir el cambio climático. También se define como gases de efecto invernadero el CO<sub>2</sub> N<sub>2</sub>O el CH<sub>4</sub> y otros compuestos que para el presente documento no se tendrán en cuenta.

Otra norma es la resolución 909 del 5 de junio del 2008. En la cual se establece las normas y estándares de emisión admisibles de contaminantes al aire para fuentes fijas, para esto se considerará la tabla 4.

**Tabla 4.**

*Estándares de emisión admisibles de contaminantes al aire para actividades industriales a condiciones de referencia*

Contaminante	Flujo del contaminante (kg/h)	Estándares de emisión admisibles de contaminantes (mg/m <sup>3</sup> )	
		Actividades industriales existentes	Actividades industriales nuevas
Material Particulado (MP)	≤ 0,5	250	150
	> 0,5	150	50
Dióxido de Azufre (SO <sub>2</sub> )	TODOS	550	500
Óxidos de Nitrógeno (NO <sub>x</sub> )	TODOS	550	500
Compuestos de Fluor Inorgánico (HF)	TODOS	8	
Compuestos de Cloro Inorgánico (HCl)	TODOS	40	
Hidrocarburos Totales (HC <sub>T</sub> )	TODOS	50	
Dioxinas y Furanos	TODOS	0,5*	
Neblina Ácida o Trióxido de Azufre expresados como H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	TODOS	150	
Plomo (Pb)	TODOS	1	
Cadmio (Cd) y sus compuestos	TODOS	1	
Cobre (Cu) y sus compuestos	TODOS	8	

\* Las Dioxinas y Furanos se expresan en las siguientes unidades: (ng-EQT / m<sup>3</sup>), EQT: Equivalencia de Toxicidad.

**Nota.** La tabla muestra la emisión de contaminantes permitida según cada gas de efecto invernadero en la industria colombiana a condiciones estándar, (25 °C y 760 mm Hg), algunos contaminantes tienen la posibilidad de ser en alguna medida mayor por el tiempo de operación, por la disminución de la eficiencia. Tomado de: Ministerio de ambiente, vivienda y desarrollo territorial. (5 de junio de 2008). Por la cual se establecen las normas y estándares de emisión admisibles de contaminantes a la atmósfera por fuentes fijas y se dictan otras disposiciones. [En línea]. Disponible: <http://www.ideam.gov.co/documents/51310/527650/Resolucion+909+de+2008.pdf/a3bcdf0d-f1ee-4871-91b9-18eac559dbd9>.



De acuerdo a lo enunciado anteriormente, se omitirá el material particulado, las razones están descritas en el apartado de delimitaciones. Los principales factores contaminantes que tendrán un análisis son óxidos de nitrógeno (NOx) y dióxido de azufre. Presentando las delimitaciones y consideraciones químicas para cada uno de estos compuestos para el documento se tendrá en cuenta el capítulo IV denominado “ESTÁNDARES DE EMISIÓN ADMISIBLES DE CONTAMINANTES AL AIRE PARA CENTRALES TÉRMICAS CON CAPACIDAD INSTALADA IGUAL O SUPERIOR A 20 MW” dado que nuestra caldera tiene una capacidad de operación de 50MW, en donde nos muestran que el material particulado y SO<sub>2</sub> no se tiene en cuenta el cual se muestra en la tabla 4.

**Tabla 5.**

*Estándares de emisión admisibles*

Combustible	Estándares de emisión admisibles (mg/m <sup>3</sup> )			Oxígeno de referencia
	MP	SO <sub>2</sub>	NOx	
Sólido	100	2800	760	6%
Líquido	100	2000	650	3%
Gaseoso	NO APLICA	NO APLICA	300	3%

**Nota.** Estándares de emisión admisibles de contaminantes al aire para centrales térmicas existentes con capacidad instalada igual o superior a 20 MW por tipo de combustible. Tomado de: Ministerio de ambiente, vivienda y desarrollo territorial. (5 de junio de 2008). Por la cual se establecen las normas y estándares de emisión admisibles de contaminantes a la atmósfera por fuentes fijas y se dictan otras disposiciones. [En línea]. Disponible:

<http://www.ideam.gov.co/documents/51310/527650/Resolucion+909+de+2008.pdf/a3bcdf0d-f1ee-4871-91b9-18eac559dbd9>.

Esta primera norma establece los límites para las emisiones de sustancia que afectan al cambio climático, aunque en esta normatividad no es tan estricta dado que los gases generados como productos son considerados aerosoles y su medición y control es aún un problema a nivel químico y tecnológico.

Igualmente, En el Decreto 1076 2015 en el artículo 2.2.5.1.7.2. Casos que requieren permiso de emisión atmosférica. Donde se hace alusión a las calderas u hornos que empleen como combustible gas natural para la operación en planta no requerirán permiso de emisión atmosférica. Cabe aclarar que el ministerio de ambiente y desarrollo sostenible podrá establecer las condiciones técnicas específicas para desarrollar las actividades industriales. En los artículos siguientes se menciona los trámites para el permiso y renovación de estos. Aunque esta ley nos permite desarrollar la actividad de forma libre debemos tener un control de las emisiones generadas.

Para finalizar se hace mención del reporte del IDEAM–METEO/008-2007 titulado: *información técnica sobre gases de efecto invernadero y el cambio climático*, en donde se resaltan factores como el efecto invernadero y su importancia al calentamiento y oscurecimiento global. Así mismo se toca el tema de los GEI tanto los directos como los indirectos y su importancia y relevancia al cambio climático en donde encontramos al vapor de agua en un GEI directo, pero para nuestro estudio solo analizaremos su importancia, mas esta sustancia como no es emitida a la atmosfera directamente no es un GEI considerable de forma directa en el recobro terciario de petróleo.

### **3.2 Normatividad internacional técnica**

Se inicia esta sección como la normatividad que está presente en los generadores de vapor puesto que estos presentan condiciones especiales para su diseño y control del proceso, algunas de las cuales se resaltarán son:

- ISO 2314-2009: Gas turbine – Acceptance test.
- ASME PTC 22-2005: Gas turbine – Performance test code.
- ASME PTC 6-2004: Steam turbine – Performance test code.
- ASME PTC 6-2:2004: Steam turbine in combined cycle.
- ASME PTC 4.4-2008: Gas turbine Heat Recovery Steam Generators.

En la anterior normatividad, se muestran las principales formas de diseño y consideraciones que se debe tener tanto para la parte de vapor como para la parte del

gas de combustión. no se entra en detalle debido a que son normas que especifica en ciertas condiciones operativas para el proceso. A continuación, se describe como se determinan o se calculan de forma metodológica las mediciones de las sustancias según varias referencias a continuación se muestran los métodos.

**Tabla 6.**

*Metodologías para la huella de carbono.*

<i>Metodologías</i>	<i>Enfoque</i>	<i>Escala</i>	<i>Unidades</i>	<i>Actividades</i>	<i>Referencia</i>
Protocolo de Gases Efecto Invernadero	Corporativo	Empresa	kg CO2 eq/año	todas las actividades de una organización	Protocolo GEI, 2005
Balance de Carbono	Corporativo	Empresa, Territorio y Producto:	kg CO2 eq/año kg Co2 eq/Unidad funcional	todas las actividades de una organización	BC,2011
Especificaciones Públicamente Disponibles PAS 2050	Producto	Producto:	kg CO2 eq/Unidad funcional	todas las actividades productivas	BSI, 2008
Método Compuesto de las Cuentas Contables MC3	Corporativo+ Producto	Empresa: y Producto:	tco2 eq/año ton CO2 eq/ton prod. Ha Globales (Gha)	todas las actividades de una organización	Doménech , 2004a; 2004b

**Nota.** La tabla muestra las diferentes metodologías para determinar la huella de carbono. Tomado de: J. Valderrama., C. Espíndola., R. Quezada., Huella de carbono, un concepto que no puede estar ausente en ingeniería y ciencias, Chile, 2011. [En línea]. Disponible: [https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0718-50062011000300002](https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-50062011000300002).

En la tabla 6 se observa las diferentes metodologías para determinar la huella de carbono. Se muestra como cada metodología tiene un enfoque desde la empresa o el producto, y las unidades de medida para la huella de carbono las cuales se darán a entender más adelante. Finalmente se conoce la referencia de la cual fue desarrollada, y que agencia o instituto desarrollo la metodología.

Los modelos matemáticos descritos, se pueden calcular de una forma simple mediante el uso de la siguiente ecuación o modelo matemático, el cual se entiende como la suma ponderada de diversos factores como se describen en siguiente ecuación:

Ecuación 1. Entalpia de formación

$$HC = \sum x_i y_i F_i$$

En la *Ecuación 1*  $X_i$ ,  $Y_i$  son factores de conversión y equivalencia que dependerán del tipo de aplicación y magnitud.  $F_i$  será la influencia de la variable, es decir su origen, si es de forma directa o indirecta entre muchos otros factores. Los modelos y ecuaciones matemáticas que se emplean y utilizan comúnmente por estudiantes se consideran que no demuestran el comportamiento o impacto a la huella de carbono dado a que estimar la huella de carbono requiere técnicas y datos precisos y cualquier dato que no se seleccione o presente alguna desviación modifica el resultado de forma directa, finalmente también puede presentarse variación entre un método u otro por los datos a tomar.[25]

Desde un papel fundamental para el correcto uso y aplicación de los generadores de vapor a nivel industrial, las políticas gubernamentales han generado normas técnicas las cuales buscan prevenir accidentes industriales. En relación con lo anterior, se plantean normas para la construcción y diseño de generadores, aunque para el presente documento no se contemplan consideraciones por el hecho de que el equipo se encuentra in situ actualmente. A continuación, se presentan aspectos relevantes de la normatividad categorizada de la siguiente manera: En primera instancia, se parte desde la visión global de la normatividad, para desde ese escenario delimitar la normatividad colombiana y enfocar desde lo técnico el desarrollo del presente proyecto.

Igualmente, se debe analizar de manera minuciosa la normatividad que tenga relación con la aplicabilidad de las calderas y generación de sustancias y analizar de manera

indirecta aspectos derivados de la investigación como los son componentes con presencia de azufre o generación de aerosoles de la reacción de combustión. [26]

### **3.3 Normatividad internacional regulatoria**

En la misma perspectiva de lo enunciado en la sección anterior, se consideró la norma ASME (The American Society of Mechanical Engineers) la cual se ha diseñado para el control e inspección de calderas o recipientes a presión (BPVC). Esta norma ha sido escrita por voluntarios que son nombrados con base a sus conocimientos técnicos (950 voluntarios en la actualidad), con aportes y contribuciones de orden científico. El primer documento fue publicado en 1915 y era un único libro de 114 páginas. En la actualidad hay 32 libros, los cuales están enfocados a la construcción e inspección, codificación y fabricación de componentes, examinación de materiales entre otros tópicos importantes para la normatividad.

La norma ASME centra sus propósitos en los factores de diseño, selección de materiales, control de proceso y seguridad en el trabajo. Su enfoque parte de lo técnico e instrumental en las calderas y centrales nucleares. Cabe aclarar que esta normatividad no está en función de los aspectos químicos (reacciones y sustancias generadas), pero al mejorar los factores técnicos ayuda a disminuir la generación de gases de efecto invernadero y mejorar la transferencia de energía en los generadores de vapor. De lo anterior se comprende que la norma ASME está enfocada en la parte mecánica de los equipos. No obstante, debe ser un asunto importante del presente trabajo de grado ya que su injerencia rige a los generadores de vapor a nivel internacional.

Otra medición para los GEI (Gases de efecto invernadero) es el potencial de calentamiento global también conocido como GWP que de sus siglas en inglés (*global warming potential*) y se define como la capacidad de un gas para contribuir al apantallamiento radiactivo relativo a otro gas de referencia. Así mismo se analizó en la Tabla 7, la cual inicia como la tabla del calentamiento global y se basa en el CO<sub>2</sub> como sustancia relativa pero la diferencia es que el calentamiento global no considera la el tiempo de forma directa a la sustancia a analizar y no se considera que porque una

sustancia este presente un mayor tiempo aumente el GWP, así también se ve el tiempo de vida atmosférico, el cual se define de forma corta como “el tiempo requerido para restablecer el equilibrio en la atmosfera luego de un aumento o disminución repentino en la concentración de la especie en cuestión de la atmosfera” (Libro de Datos de Promotores de Adhesión , 2018).

El GWP busca estimar y calcular la interacción de los gases presentes en la atmosfera y la radiación como se mencionó anteriormente. Pero para resaltar dentro de esta investigación es que el GWP no ha tenido tanta importancia aún cuando ha formado y ha sido desarrollado hace más de 20 años, y se puede considerar un método más enfocado al futuro atmosférico y considerando la difusividad, y el comportamiento de las moléculas como sustancias radioactivas.

**Tabla 7.**

*Potencial de calentamiento por efecto invernadero.*

Gas	Tiempo de vida atmosférico	GWP a 100 años	GWP a 20 años	GWP a 500 años
CO <sub>2</sub>	50 – 200	1	1	1
CH <sub>4</sub>	12 ± 3	21	556	6,5
N <sub>2</sub> O	120	310	280	170
HFC-23	264	11.700	9.100	9.800
HFC-125	32,6	2.800	4.600	920
HFC-134a	14,6	1.300	3.400	420
HFC-143a	48,3	3.800	5.000	1.400
HFC-152a	1,5	140	460	42
HFC-227ea	36,5	2.900	4.300	950
HFC-236fa	209	6.300	5.100	4.700
HFC-4310mee	17,1	1.300	3.000	400
CF <sub>4</sub>	50.000	6.500	4.400	10.000
C <sub>2</sub> F <sub>6</sub>	10.000	9.200	6.200	14.000
C <sub>4</sub> F <sub>10</sub>	2.600	7.000	4.800	10.100
C <sub>6</sub> F <sub>14</sub>	3.200	7.400	5.000	10.700
SF <sub>6</sub>	3.200	23.900	16.300	34.900

**Nota.** La tabla muestra el GWP de componentes emitidos a la atmosfera. Tomado de: G. Power., El calentamiento global y las emisiones de carbono, Universidad de Lima, Perú, 2009. [En línea]. Disponible: <https://www.redalyc.org/pdf/3374/337428493007.pdf>.

En efecto, otra norma que presentan las calderas es la OSHA de sus siglas en inglés (Occupational Safety and Health Administration), busca prevenir accidentes fatales, la integridad de los trabajadores tanto en la operación de las máquinas como en los mantenimientos que son llevados en la planta. Esta norma está dirigida a los trabajadores, para que ellos conozcan los peligros que se pueden presentar, el correcto uso de los equipos de protección personal (EPP). Pero también, invita a las empresas a realizar de manera asertiva un adecuado proceso de capacitación, generando estrategias de control y seguimiento. Así mismo, las empresas también deben contemplar en sus planes los tiempos de mantenimiento preventivo. Alternamente, al presentarse un mantenimiento correctivo desde la normatividad las empresas deben estar capacitadas para presentar un oportuno correctivo, ya que una pequeña fuga es considerada un riesgo que puede ocasionar un accidente fatal en las instalaciones o con los empleados.

*“Procurar condiciones laborales seguras y salubres para los trabajadores, autorizando el cumplimiento de las normas formuladas bajo esta Ley, ayudando y alentando a los Estados en sus iniciativas para procurar condiciones laborales seguras y salubres, facilitando investigación, información, formación y capacitación en el ámbito de la seguridad y salud ocupacionales...” OSHA 3473-06R 2017*

La norma OSHA, establece aspectos tales como la presencia de partículas contaminantes como lo es el polvo de carbón, ya que este componente es sumamente peligroso puesto que estas partículas se acumulan en los equipos afectando presiones, transferencias de calor y posibles daños a los ductos entre otros factores que generan obstrucciones. Así mismo se enfoca en los reportes de los equipos y reportes de mantenimiento para un control industrial para minimizar los riesgos.

Recapitulando lo anterior, estas normas están enfocadas en el correcto funcionamiento de las calderas y generadores de vapor, tanto por el equipo y materiales de diseño, como los elementos de protección para los trabajadores, estableciendo aspectos técnicos de uso y aplicación de instrumentos y seguridad industrial. En concordancia con esto, se

enruta el presente trabajo de grado, con los propósitos de la tesis que intenta establecer criterios normativos sobre la generación de gases de efecto invernadero.

Para ello, lo primero que se analizó nace del acuerdo de París el cual entró en vigor el 4 de noviembre del 2016. El objetivo principal del acuerdo es limitar el calentamiento mundial, a partir de tres premisas: la mitigación de emisiones de CO<sub>2</sub>, la transparencia y balance Global, la sensibilización de los gobiernos sobre el impacto y consecuencias del cambio climático. Para ello los países participantes se proponen minimizar las emisiones de gases de efecto invernadero, esto se debe hacer desde la industria, teniendo una transformación económica y social, pero cada país va a implementar sus acciones y medidas para reducir las emisiones.

Falta ahora el punto esencial en el cual los países se apoyan financiera, técnica y tecnológicamente para lograr las acciones a largo y corto plazo propuestas: Desde esta visión, lo más importante es mejorar las técnicas para minimizar la generación de gases de efecto invernadero, pero en algunas industrias plantas la determinación cuantitativa no está desarrollada, tanto por falta de equipo industrial, hay que reconocer el costo que conlleva tener equipo para la medición de gases de efecto invernadero y su instalación en equipos de hace 10 años, lo cual ocasiona que muchas industrias no inviertan en estos equipos, como por leyes las cuales son flexibles dado como se mencionó anteriormente por falta de equipos, también se debe entender que determinar los gases de efecto invernadero generados en los equipos no se establecen de forma fácil y en su totalidad dado varios factores de entorno y compuestos que entran en reacción, y el equipo en el cual ocurre el proceso químico.

Para ampliar este capítulo, se referencian las normas ISO las cuales proporcionan buenas prácticas, conocimiento y colaboración para los desafíos mundiales. La Organización Internacional de la Normalización (ISO), ha creado a la fecha del 9 de enero del 2020 220 normas internacionales enfocadas al cambio climático y también ha participado en la cumbre de Madrid para enfocar una economía neutra en carbono.

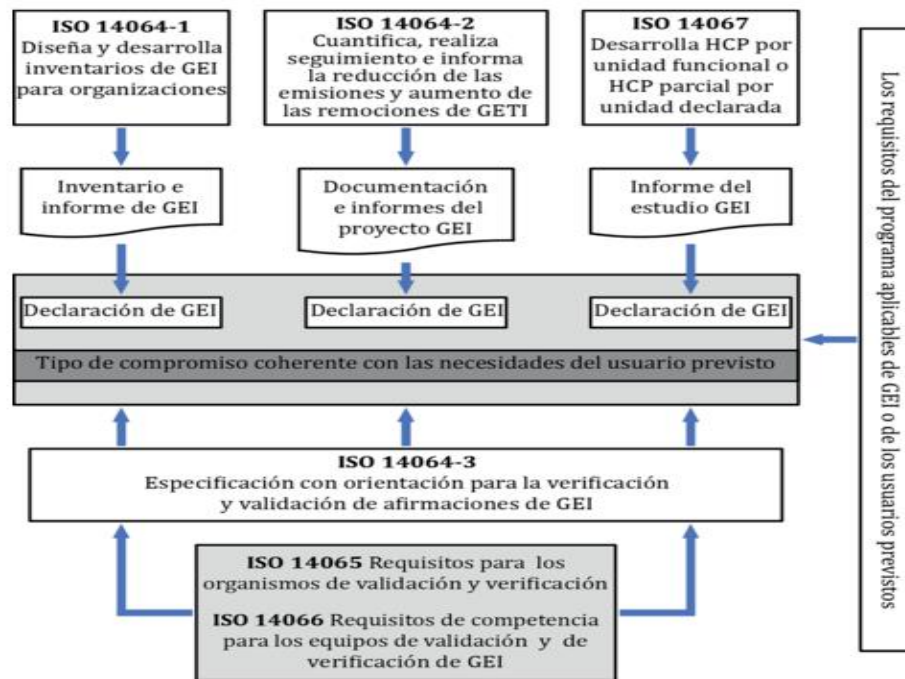


Una de las leyes que se pueden mirar es la UNE-EN ISO 14064-1:2019 la cual se nombra: Gases de efecto invernadero. Parte 1: Especificación con orientación, a nivel de las organizaciones, para la cuantificación y el informe de las emisiones y remociones de gases de efecto invernadero. Los principales cambios son los límites de operación los cuales definen la huella de carbono y su documentación por parte de las empresas, así mismo se determinó las emisiones directas indirectas y como estas últimas se dividen en varias categorías en las plantas de proceso. Como se menciona anteriormente las empresas deben aplicar un proceso para determinar las emisiones indirectas de GEI (Gases de Efecto Invernadero) que se consideran más significativas. De antemano la empresa define sus criterios para considerar: la magnitud de las emisiones, el nivel de influencia en fuentes, acceso a la información, exactitud de los datos, orientaciones específicas del sector.

No olvidemos que esta norma busca calcular la huella de carbono y los gases de efecto invernadero generados o producidos en cualquier nivel, división de la planta a estudio. su principal enfoque es que cada empresa determine la totalidad o generación significativa de GEI para así afrontar cambios o mejoras al proceso o equipos. Por cierto, hay un software el cual es el ISO 14001, el cual va enfocado a una gestión ambiental ágil y de manera práctica para que las entidades y empresas tengan un control y planes de acción y gestiones de la generación de GEI, más adelante se observará en el capítulo de software existente sólo como una herramienta que puede ser adquirida para un control en la planta.

**Figura 11.**

*Relación entre la familia de Normas ISO 14060 de GEI*



**Nota.** Normas ISO las cuales regulan los GEI y su relación entre ellas, para hacer una correcta documentación y control en las empresas. Tomado de: ISO, ISO 14067:2018(en) Greenhouse gases, Online Browsing Platform, 2018. [En línea]. Disponible: <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:14067:ed-1:v1:es>.

En la figura anterior se puede evidenciar como las normas ISO14060 tienen un enfoque a medir, documentar y estudiar los GEI. Estas normas son de vital importancia para las industrias pues se deben conocer las cantidades y orígenes de los GEI para atacar las generaciones con un porcentaje mayor y esto se logra desde la cuestión cuantitativa, para generar medidas correctivas y optimización del proceso en el documento solo se abordó la medición dado que se espera que la empresa en función del proyecto tome las medidas necesarias para optimizar el generador de vapor OTSG.

Así mismo en México, como un país que presenta un crecimiento marcado a nivel industrial desde el año 2012, implementó la Ley General de Cambio Climático (LGCC) la cual establece en el artículo 87 que las personas deben registrar de manera obligatoria

datos sobre las emisiones de gases y compuestos de efecto invernadero. Para cumplir con esto, deben adjuntar cada 3 años la información correspondiente para el registro y dictamen de verificación. Si las plantas presentan emisiones mayores a 25000 toneladas de dióxido de carbono por año, deberán reportar las emisiones a la Secretaría del Medio Ambiente, mediante la plataforma COA-Web en una fecha establecida. El reporte tendrá información de los compuestos entre ellos cabe resaltar el dióxido de carbono, metano, óxido nitroso, carbono negro u hollín gases fluorados entre otros compuestos de carácter halógeno azufre y mezcla de gases.

Como se puede observar, en algunos países el control por la generación de GEI se lleva de forma sistemática, así como las empresas van evolucionando tecnológica y normativamente para determinar las generaciones de gases y con ello dar reportes a las páginas mediante el uso de las TICS para tener un control nacional de los procesos industriales.

Finalizando, la normatividad internacional que adopta Colombia en concordancia con el acuerdo de Paris de 2015, aunque ha tenido avances significativos en la protección de medio ambiente, es considerable los pocos avances en este campo ya que las empresas cuentan con poca tecnología para el desarrollo de sistemas que mitiguen la emisión de gases contaminantes.

## **4. ANÁLISIS DE EMISIONES DE GASES DE EFECTO INVERNADERO PRODUCIDAS POR GENERADORES OTSG**

### **4.1 Combustibles empleados en los generadores de vapor**

En los procesos de generación de vapor, son de alto consumo el gas natural, la gasolina, el crudo pesado y el gas licuado. Estos combustibles son utilizados principalmente por la cantidad de energía de la cual disponen, así mismo si su densidad energética es alta, otro factor es su disposición y transporte totalmente importante en la elección del crudo pesado puesto que, en ocasiones, no se dispone de gas natural para la combustión o se generan costos de producción que no son necesarios.

En el actual documento, se considera únicamente el gas natural ya que es el combustible empleado en el pozo para la extracción terciaria de vapor, por lo anterior se va a tener en cuenta únicamente las fórmulas del gas natural y factores o correlaciones necesarias para considerar el mejor modelo matemático, analizando el generador de vapor desde los datos obtenidos en planta. Así mismo, este componente no es analizado detalladamente para saber las características que presenta al inicio del proceso de combustión.

Primero, se debe considerar que es el gas natural y porque es empleado para la generación de vapor y no otro combustible fósil: “Está formado por una mezcla de gases ligeros que se encuentran normalmente en yacimientos de petróleo, disuelto o asociado a él, o bien en depósitos de carbón. Se compone principalmente por metano y en su combustión genera mucho menos CO<sub>2</sub> que el petróleo o el carbón por su mayor porcentaje de hidrógeno. Como se mencionó anteriormente, el gas natural presentó ventajas ya que disminuye la contaminación generada por otros combustibles ayudando a disminuir la huella de carbono de la tierra.

## 4.2 Propiedades físicas y químicas del gas natural

El gas natural está principalmente compuesto por metano etano y propano, además tiene pequeñas trazas de butano pentano hexano heptano y octano debido a su estado gaseoso, resulta más fácil distribuirlo desde los pozos directamente a los equipos. Aunque en ocasiones, puede contener cantidades de azufre o sulfuros los cuales deben ser eliminados para mejorar la eficiencia tanto química como energética del gas natural. Las propiedades físicas del gas natural que están expresadas en la tabla 8 en la cual se determinan las propiedades para un gas natural específico, desde una vista más general, solo se van a considerar algunas de estas propiedades para los cálculos a desarrollar en todo el proceso.[27]

**Tabla 8.**

*Propiedades físicas del gas natural*

Propiedad	Unidades
Metano (CH <sub>4</sub> )	83-84 % Vol.
Oxígeno (O <sub>2</sub> )-Max	0.2% Vol.
Dióxido de carbono (CO <sub>2</sub> )-Max	3.0% Vol.
Nitrógeno (N <sub>2</sub> )-Max ±1.5	4-6 % Vol.
Total, de Inertes (CO <sub>2</sub> Y N <sub>2</sub> ) Max	11.0% Vol.
Etano-Max	4-6% Vol.
Temperatura de roció de hidrocarburos -Max	271.15(-2) K(°C)
Humedad (H <sub>2</sub> O)- Max	110.00 mg/m <sup>3</sup>
Poder calorífico superior-Min	36.80-37.30 MJ/m <sup>3</sup>
Densidad relativa	0.61. aire =1.0
Viscosidad	0.01 cp a 25°C

**Nota.** La tabla muestra las propiedades del gas natural más importantes en la cual se observa su humedad máxima t cantidad de metano promedio. Tomado de: CHANAGA, A. GUARIN, A., optimización de la calidad de vapor en pozos con métodos de estimulación HUFF & PUFF., tesis pre., Universidad industrial de Santander, Colombia, 2015.

Agregando a lo anterior, entre las propiedades físicas más importantes se encuentran: el poder calorífico, humedad, viscosidad. La modificación de ellas incide directamente en la energía que puede ser liberada en la combustión. En la tabla 9, se muestra la composición del gas natural que va a ser empleada en el desarrollo de las ecuaciones, además se deben evaluar para los balances masicos de la combustión y eliminar variables para evitar desviaciones de los datos reales obtenidos de la planta.

De igual manera, se han analizado las propiedades físicas, aunque las propiedades químicas son de vital importancia para un correcto balance de masa. La composición química del gas natural varía de forma continua según el pozo y a medida que se extrae el gas natural, este mismo puede variar su composición, por lo tanto, no es posible predecir el comportamiento del gas natural en su extracción, por lo anterior y como se muestra en la tabla 9 se evidencia los posibles rangos según el porcentaje molar de cada elemento químico en el gas natural.

**Tabla 9.**

*Rango de composición de gas natural*

<b>Componente</b>	<b>%molar mínimo</b>	<b>% molar máximo</b>
Nitrógeno	1.0	7.7
Dióxido de carbono	0.14	7.9
Metano	71.60	86.4
Etano	4.90	9,7
Propano	2.30	4,3
Iso-butano	0.26	1.0
n-butano	0.60	1.9
Iso-pentano	0.12	0.45
n-pentano	0.14	0.42
C6+	0.10	0,35

**Nota.** La tabla muestra el rango de composición molar del gas natural. Tomado de: Processors Association G, GPA 2261: Analysis of Natural Gas and Similar Gaseous Mixtures by Gas Chromatography. USA. 2000.

De acuerdo con la indagación realizada, se contemplan un sinfín de porcentajes de composición para el gas natural, por consiguiente, se tomó la decisión de seleccionar la siguiente composición para el desarrollo de los cálculos matemáticos para la producción de GEI.

**Tabla 10.**

*Composición gas natural para cálculos finales*

<b>Componente</b>	<b>%molar</b>
<b>Nitrógeno</b>	0.68
<b>Dióxido de carbono</b>	0.56
<b>Metano</b>	79.87
<b>Etano</b>	10.34
<b>Propano</b>	5.23
<b>Iso-butano</b>	0.74
<b>n-butano</b>	1.38
<b>Iso-pentano</b>	0.4
<b>n-pentano</b>	0.35
<b>C6+</b>	0.45

**Nota.** Composición del gas natural para el desarrollo de los cálculos finales. Tomado de: Processors Association G, GPA 2261: Analysis of Natural Gas and Similar Gaseous Mixtures by Gas Chromatography. USA. 2000.

#### **4.2.1 Reacciones de combustión en el generador de vapor**

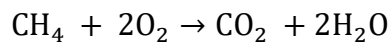
Las reacciones de combustión en el generador de vapor deben estar en una relación de aproximadamente 15% con un 85% de oxígeno para garantizar la combustión completa al interior de la caldera. Así mismo, el gas natural debe estar deshidratado y desulfurizado para que no se presenten reacciones indeseadas en el generador que pongan en riesgo la operación, ya que se pueden producir ácidos generando daños en los equipos y pérdidas de energía en el proceso, puesto que los componentes químicos retiran parte del calor producido.

La *Ecuación 2*, es la reacción ideal para la combustión de metano, aunque a nivel industrial esta reacción no es la única que ocurre con el metano, dado, que se generan reacciones de combustión incompleta. En la práctica se halla que no es posible generar una combustión completa, suministrando el aire teórico requerido. Así pues, es necesario alimentar aire en exceso a la reacción (factor lambda), dependiendo del tipo de combustible, para gases se considera un 10% a un 40% de exceso de aire.

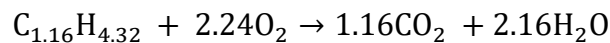
existe una ecuación general aplicable a los hidrocarburos gaseosos:

Se van a tener presentes varias situaciones como se mencionó en el numeral anterior el gas natural se compone por metano etano y propano y trazas de otros componentes. Analicemos las reacciones de combustión únicamente para el metano para entender el proceso de combustión.

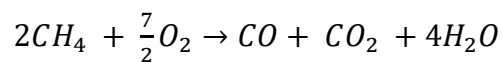
Ecuación 2. Combustión completa de metano balanceada



Ecuación 3. Combustión completa del pseudocomponente



Ecuación 4. Combustión incompleta de metano



La *Ecuación 4*, se debe considerar que en la práctica no se logra en la combustión de una única reacción. Así mismo, a nivel industrial se da la combustión incompleta ya que disminuye la eficiencia energética y económica del proceso puesto que el CO puede reaccionar una vez más para generar CO<sub>2</sub> y liberar energía. No se evidencia una combustión incompleta, para el pseudocomponente puesto que al ser un compuesto creado de varias sustancias no se relaciona con una reacción incompleta.

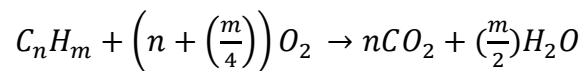
De la misma manera, no se consideraron las reacciones del azufre y de los nitratos; estos compuestos no son medidos en su totalidad y para cuidar el generador de vapor y aprovechar el máximo de energía generada por la combustión de los hidrocarburos, los



componentes que tengan estos elementos no son considerados. Pero se debe considerar que el N<sub>2</sub> está presente como componente inerte y este absorbe una parte de la energía generada lo cual se planteó en el capítulo posterior.[28]

Finalmente, Se explica a continuación la Ecuación 5 la cual está expresada de forma que se pueda determinar el balance para cada hidrocarburo presente en el gas natural.

Ecuación 5. Combustión para los hidrocarburos gaseosos

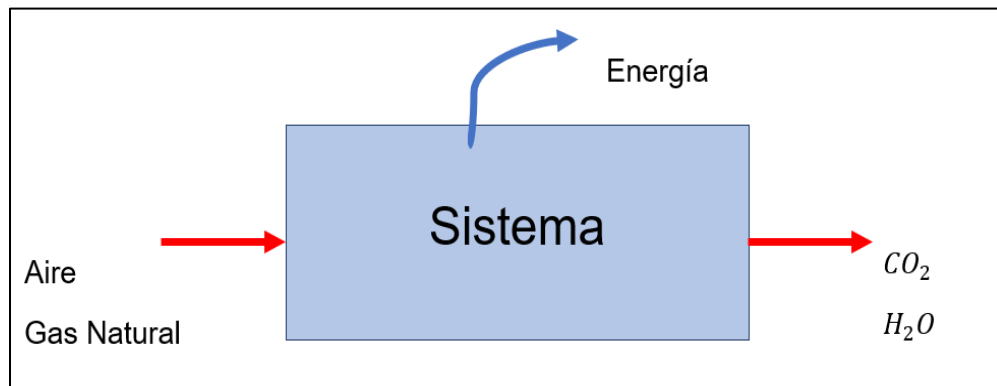


Esta ecuación facilitara el desarrollo de los cálculos de balance de masa.

#### 4.2.2 Emisiones de gases de efecto invernadero obtenidas mediante balances masicos

**Figura 12.**

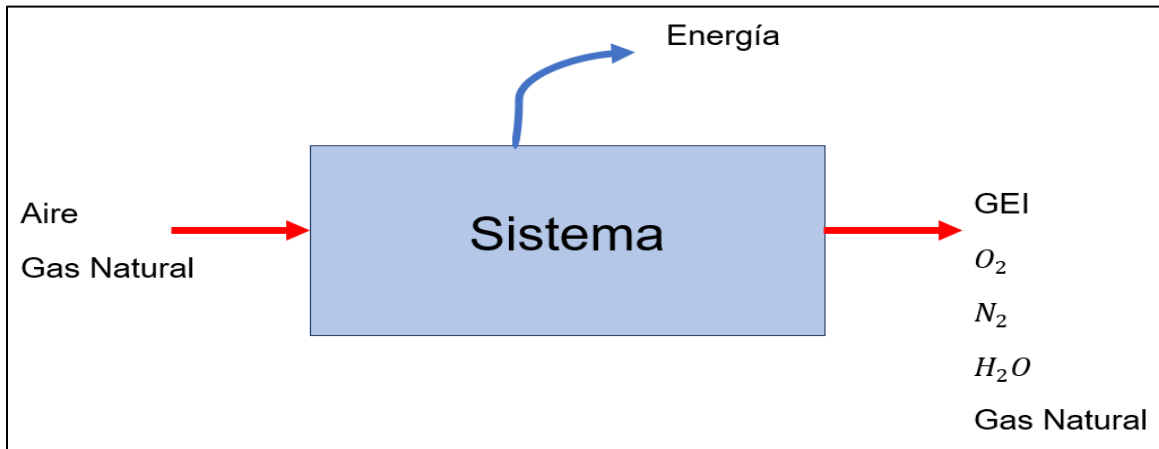
*Balance masico hogar reacción completa general del generador de vapor*



**Nota.** Esta figura muestra los reactivos y productos considerando reacciones de combustión completas.

**Figura 13.**

*Balance masico hogar reacción de metano incompleta general del generador de vapor*



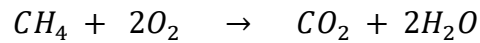
**Nota.** Esta figura muestra los reactivos y productos considerando la combustión de metano incompleta.

Como se muestra en la gráfica, solo hay una entrada y una salida en todo el proceso, lo cual hace que el proceso sea más simple en los balances de materia, sin olvidar esto que, al desarrollarse reacciones de combustión, esto presenta una complejidad que debe tener en cuenta factores como: conversión, velocidad de reacción, reactivo en exceso, reactivo límite, temperatura, presión, entre otras. Una ventaja de este mecanismo de reacción es que no se presentó una reacción reversible al hacer la combustión [29].

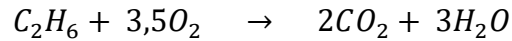
En los gráficos se observa que para entender el proceso que seleccionado gas natural o metano únicamente, el proceso global tiene la misma representación para el presente trabajo de grado. Aunque en la figura 10 se muestra que el Monóxido de Carbono en la metodología numérica, se va a tener en cuenta la generación del monóxido en algún caso particular. Dicha decisión es elegida por el usuario. Esta información fue profundizada en el capítulo 5 y 6.

El balance de masa del gas natural presenta un aumento en ecuaciones principalmente porque se deben considerar las reacciones químicas de cada componente iniciando con el metano y finalizando con el hexano en total se llevan a cabo 8 reacciones de combustión. La *Ecuación 6* representa la reacción química del metano

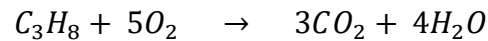
Ecuación 6. Combustión metano



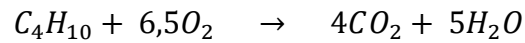
Ecuación 7. Combustión etano



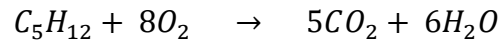
Ecuación 8. Combustión propano



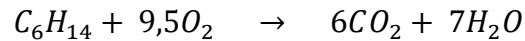
Ecuación 9. Combustión butano



Ecuación 10. Combustión pentano

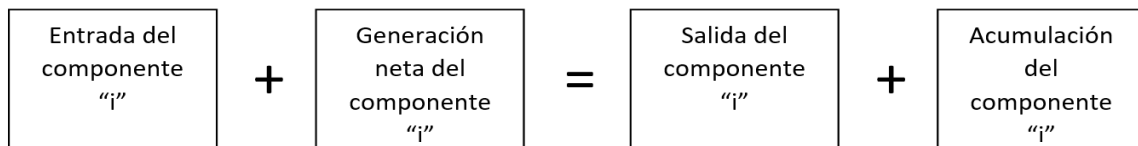


Ecuación 11. Combustión hexano



Solo se muestran 6 formulas dado que existen compuesto que químicamente son iguales. Se debe cumplir la conservación de la materia, la *Ecuación 12* describe el comportamiento que presentan los componentes con reacciones químicas en donde no se considera la acumulación de ningún componente en el equipo.

Ecuación 12. Balance masico general



Para cumplir el balance de masa el programa determino el peso molecular promedio del gas natural con los pesos moleculares de cada uno de los componentes y su porcentaje molar. Este peso molecular multiplica el flujo masico, el cual es obtenido por multiplicar

la densidad del gas natural para finalmente obtener un flujo molar con la *Ecuación 13* para posteriormente evaluar las moles que ingresan de cada componente.

Ecuación 13. Flujo molar gas natural

$$\frac{PM_{promedio}}{\dot{m}_{gas\ natural}} = \dot{n}_{gas\ natural}$$

El dato final es el  $\dot{m}_{CO_2}$  en kg/h con el objetivo de determinar el total de emisiones de CO<sub>2</sub>.

Un componente para tener presente es el N<sub>2</sub>O, pero el balance de este compuesto es un poco difícil de determinar dado a que esta reacción no debería darse en la combustión, es por esta razón que se investiga un valor para determinar el N<sub>2</sub>O producido, el valor seleccionado es 2 ppm proveniente de la Tabla 11 se considera por ser una caldera de pared sencilla[30]. para el programa se considerara que es 2g de N<sub>2</sub>O por cada kg de productos (H<sub>2</sub>O y CO<sub>2</sub>).

**Tabla 11.**

*Emisiones de N<sub>2</sub>O de sistemas de combustión*

Design Type	Fuel	Load (%)	NO <sub>x</sub> * (ppm)	N <sub>2</sub> O* (ppm)
Single Wall-Fired Boiler	Nat. Gas	98	120	2
Opposed-Fired Boiler	Nat. Gas	97	142	2
T-Fired Boiler	Nat. Gas	100	58	1
Single Wall-Fired Boiler	Resid. Oil	100	268	1
Single Wall-Fired Boiler	Resid. Oil	91	291	2
Opposed-Fired Boiler	Pulv. Coal	97	982	12
Opposed-Fired Boiler	Pulv. Coal	97	701	3
Opposed-Fired Boiler, Triple Cell	Pulv. Coal	98	692	6
T-Fired Boiler	Pulv. Coal	95	325	1
T-Fired Boiler	Pulv. Coal	82	390	1
T-Fired Boiler	Pulv. Coal	69	393	1
T-Fired Boiler	Pulv. Coal	51	498	1
Circulating Fluidized Bed	Crushed Coal	100	81	84

**Nota.** La figura muestra las ppm de N<sub>2</sub>O que se generar en tipos de calderas según su carga también se observa el NO<sub>x</sub> el cual se produce en mayor cantidad. Tomado de: L. Muzio., L.Montgomery., Formation and measurement of N<sub>2</sub>O in combustion systems, Symposium (International) on Combustion, 1991.

### 4.3 Balance masico Agua

El balance masico del agua en un proceso de obtención de vapor se considera un balance simple, primeramente, no se presenta alguna reacción química, no se contempla la acumulación del agua en el sistema. La *Ecuación 14* nos muestra el flujo masico del agua en el sistema. El agua incrementa su energía, la cual proviene de la combustión del gas natural, este aumento ocasiona que las propiedades termodinámicas y físicas se vean afectadas. La masa de entrada es proporcionada por el usuario, pero en la práctica se ingresa un dato de flujo volumétrico. Esto ocasiona que se implemente la *Ecuación 15*, la cual emplea la densidad del agua a 25°C la cual es 997 kg/m<sup>3</sup>, dato proveniente de la tabla A-3 Termodinámica[11].

Ecuación 14. Balance masico agua

$$\dot{m}_{Entrada} = \dot{m}_{salida}$$

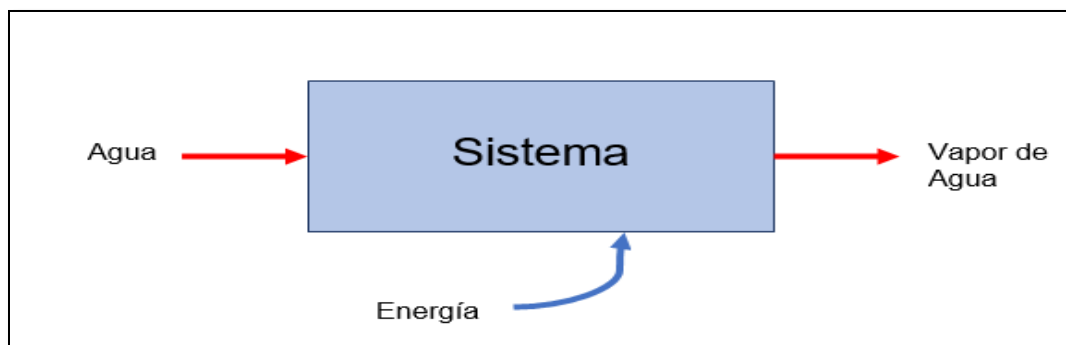
Ecuación 15. Relación densidad agua entrada

$$\dot{m}_{Entrada} = \dot{V}_{Entrada} \times \rho_{Entrada}$$

La unidad empleada para el  $\dot{V}_{Entrada}$  es m<sup>3</sup>/h, para comprender esto se da ingreso a la figura 12 en la cual solo se evidencia un cambio de fase por un ingreso de energía. De igual manera el dato de salida es  $\dot{m}_{salida}$  en kg/h.

#### Figura 14.

*Balance masico agua del generador de vapor*



**Nota.** La figura muestra que el agua solo presenta un cambio de fase, por consiguiente, el flujo masico es igual en la entrada y la salida. La energía que ingresa es proveniente de la combustión del gas natural, en donde se considera un porcentaje.

## 5. BALANCE ENERGÉTICO DEL GENERADOR DE VAPOR OTSG

### 5.1 Fundamentos termodinámicos del balance de masa en el generador de vapor OTSG

Desde el punto de vista químico, se pueden analizar las bases científicas para modelar y plantear ecuaciones y tienen como fin resolver un problema desde un punto de partida, esto quiere decir que las pautas o valores iniciales, servirán para servirán para determinar las ecuaciones adecuadas para uno o varios problemas. Cabe recalcar que, en ocasiones, no es necesario contemplar los fundamentos, Sin embargo, se debe plantear fundamentos termodinámicos, tomando las simulaciones que pueden variar entre resultados en pequeña o gran escala, dependiendo de la dirección de las ecuaciones y la selección de estas.

Como primer fundamento se establece un sistema sin acumulaciones de gases o material particulado, dentro del generador tanto para la parte de los tubos como para la parte de la coraza. Si se considera este suceso, se debe tener en cuenta la presencia de aerosoles como material final de salida y por esto, es de vital importancia analizar la vida útil y la eficiencia periódica del equipo, según el uso de determinada cantidad de materia que pase y reaccione en su interior.

Un segundo fundamento es que se considera únicamente 2 reacciones, ya que, si se tienen en cuenta más reacciones, se sobredimensionaría el número de incógnitas presentes en el problema y se debería plantear la consideración 2 formaciones de  $\text{NO}_x$  y sulfuros los cuales son liberados al final del proceso en un entorno industrial, pero llevar al llevar a cabo esta simulación, generaría un alto nivel de dificultad para la estructuración del algoritmo y la secuencia de ecuaciones.

Otro fundamento de gran importancia en el sistema adiabático, puesto que no se considera que se presenta intercambio de calor hacia el exterior del sistema, por lo cual,

la transferencia de calor tendrá una mayor eficiencia, por esta razón se espera una eficiencia de 80% y 100% para obtener tanto un dato real como uno ideal.

Además, otro fundamento de gran importancia son las tablas de agua saturada, para así determinar la energía necesaria para la transformación a vapor sobrecalentado, este último sólo se especificará su condición final y no se determinará la cantidad de agua que deben estar para producir una cierta cantidad de vapor sobrecalentado, debido a que el método busca no solamente determinar directamente la producción de vapor sino busca una relación entre vapor generado y los gases de efecto invernadero producidos.

Principalmente, se va a tener en cuenta tanto que los gases de combustión generados, como el vapor que presenta una transferencia de calor directa, lo cual es evidencia de que no se considera un equipo, sino que la energía generada sucede directamente al agua. esto con el fin de no considerar a pérdidas tanto por materiales, espesor entre paredes, incrustaciones, etc. Lo anterior es con el fin de no establecer un factor que determine la vida útil del equipo ya que esto ocasionaría que datos del equipo la inicio de la operación en planta sean diferentes a los datos obtenidos en la actualidad.

## **5.2 Balance energético del agua**

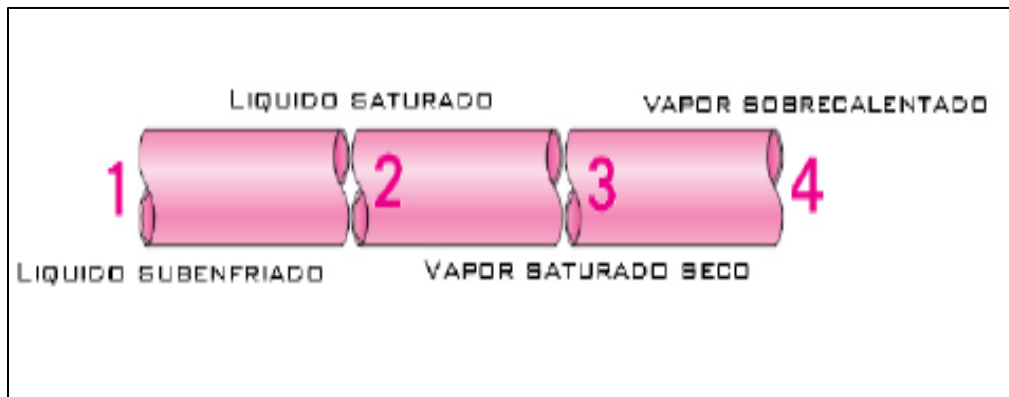
El balance energético del agua principalmente está fundamentado en la generación energética para la combustión del gas natural, pero las ecuaciones serán igual en todo momento. Primero se inicia con llevar el agua a agua saturada, luego se lleva a cabo el proceso de ebullición y finalmente se lleva a vapor sobrecalentado. Este proceso se lleva a cabo a una presión constante, en el cual se considera entalpías y entropías para determinar el calor necesario para el cambio de estado.

Otro calculo para tener en cuenta es la transferencia de calor a través de los tubos, que a su vez es considerado también para los gases dado que se da una misma ecuación para ambas sustancias. Esta ecuación es ideal debido a que no se consideran los materiales y deformaciones de los tubos, Así mismo, el agua no libera energía al entorno.

Para entender las ecuaciones del balance energético se debe analizar la figura 12, en la cual muestra cómo debe ser entendido el fluido a través del proceso de calentamiento. En este, se muestran las condiciones del agua en cada parte del proceso, además se observan las cuatro partes, en la gráfica, la última parte que se conoce como vapor sobrecalentado, no es útil y representa un costo económico innecesario en el proceso de recobro terciario de petróleo.

### Figura 15.

*Cambio de fases del agua*



**Nota.** En la figura se observa cómo cambia de estado el agua y en cada punto, la energía necesaria para cambiar entre cada fase. Tomado de: A. Quintero., diseño mecánico de un generador de vapor tipo acuotubular de presión subcrítica y baja producción de vapor, universidad autónoma del caribe, Colombia, 2013 .

Estos cálculos son tomados de las tablas enunciadas anteriormente, esto con el fin de facilitar y mejorar la determinación numérica de los equipos y además determina la energía necesaria a través de la entalpía del líquido, entalpía del vapor y entalpía el líquido vapor, para obtener la cantidad de energía necesaria con una temperatura de saturación. Estas tablas, están ocultas en el programa para que el usuario sólo tenga acceso a la introducción de datos, aunque también, está permitido mejorar un dato que pueda ser hacer descrito en alguna otra tabla de vapor obtenida experimentalmente.[31]. Se considero que la energía necesaria para que se presente un cambio de liquido saturado a vapor saturado es de 539.4 kcal/kg. Para determinar si con la adición de



energía obtenida del gas natural es menor y no se logra obtener vapor sobrecalentado, y según los análisis y estudios obtener vapor sobrecalentado aumenta los costos de operación.

Se utilizó la siguiente ecuación para determinar la calidad del agua según la energía adicionada.

Ecuación 16. Determinación calidad en relación a la energía adicionada

$$x = \frac{\text{Energía adicionada} - (h_f \times \text{masa de agua})}{(h_g \times \text{masa de agua}) - (h_f \times \text{masa de agua})}$$

### 5.3 Balance energético de los gases

Los gases presentan una particularidad dado que no se va a considerar la temperatura a la cual se encuentran sino el calor liberado por ser una reacción exotérmica

Ecuación 17. Energía de formación

$$\Delta H^{\circ}_r = \sum \Delta H^{\circ}_f (\text{Productos}) - \sum \Delta H^{\circ}_f (\text{Reactivos})$$

Cálculo de energía de formación

En el caso de metano  $\Delta H^{\circ}_r$  es igual a 803 kJ/mol. Este cálculo, es tomado considerando  $k$  relativo de la combustión completa, dando este valor numérico, este dato será también analizado posteriormente con relación a simulaciones planteadas en Aspen para mirar similitudes en los procesos de combustión, esta relación es tan directa debido a que se consideró gas natural, y debemos tener en cuenta que para nuestro sistema se considera una eficiencia de un 70 a 80% lo cual ocasiona que no se genere toda esta energía sino que tenga menor cantidad para ser seguida. Así mismo, también se debe tener en cuenta la transferencia de calor a través de los equipos y las áreas de transferencia netas.[32]

No se consideró la temperatura de los gases, debido a que la energía liberada no es representativa, luego de un análisis se planteó una eficiencia del 80% para la energía liberada por el gas natural, permitiendo que se consideren pérdidas por radiación y calentamiento de los gases de efecto invernadero.

## **6. PROPUESTA DE ALGORITMO PARA LA DESCRIPCIÓN DEL COMPORTAMIENTO DEL GENERADOR OTSG**

En el presente capítulo, se muestra las principales características y métodos utilizados para determinar el comportamiento del generador OTSG desde un punto de vista de programación considerando las ecuaciones y metodologías necesarias para un correcto uso y manejo de datos, estos últimos se describirán y se mostrará de dónde son empleados y cuál es su utilidad en la metodología analítica, dado que como se mostró anteriormente en el capítulo 4 y 5 hay un sinnúmero de ecuaciones en las cuales unas son correctas a cualquier condición y otras deben tener condiciones específicas para su uso durante el proceso y modelamiento.

### **6.1 Consideraciones principales**

Entre las condiciones principales del proceso se destaca el uso de tablas para la determinación de la entalpía para el cambio de fase del agua, se seleccionaron estas tablas dado que se pueden rastrear los datos para su posterior uso y determinación de la energía necesaria para llevar a cabo la generación de vapor.

Otro aspecto que se ha considerado en los capítulos anteriores es la selección de únicamente 4 reacciones en las cuales sólo se tuvo en cuenta la formación de monóxido, dióxido de carbono y agua. Lo anterior conduce al uso del método numérico para estimar la generación de monóxido y destruye al carbono como un gas de efecto invernadero. Concretamente, el agua generada de la reacción es liberada a la atmósfera, pero para nuestro uso y determinación no se contempla como un gas de efecto invernadero, aunque posteriormente en una versión posterior de la metodología se puede tener en cuenta este fluido, así como la presencia de otros gases de efecto invernadero.[33]

Un factor que se encontró en la literatura analizada en el presente trabajo de grado tiene relación con la vida útil del generador de vapor, este es un factor que tiene gran relevancia en los procesos, esto ocasiona que un fallo en la determinación de este

ocasiona alteraciones a la metodología analítica, a su vez también genera que se deba plantear otra secuencia para la determinación de este, lo cual llevaría a métodos numéricos complejos dado la fórmula matemática que éste representa en la literatura.

Un aspecto de suma importancia fue contemplar que no hay presencia de aerosoles en los gases generados por la combustión dado que esto se presenta normalmente en las combustiones, pero a nivel de cálculo y planteamiento manejar aerosoles y determinar sus características principales resulta complejo y extenso es por estas razones que no se considera la formación de estos.

Al momento de limitar la metodología analítica se consideró que no hay acumulación tanto para el agua como para la combustión, aunque en ocasiones eso no es del todo cierto dado que se debe cargar el equipo con cierta cantidad de agua y ésta queda retenida en el equipo, en los gases se presenta la formación de hollín el cual se puede considerar despreciable según el área de contacto de los tubos.

Sólo se consideró un material para los tubos el cual es acero inoxidable dado que es el material del cual está compuesto el generador de vapor que se va a analizar Asimismo también se consideró a las medidas respectivas del mismo, no se consideran accesorios ni tuberías sólo se considera el generador como sistema, dado que se deben garantizar las condiciones de entrada y salida para el correcto funcionamiento del equipo.

También se consideró para el agua ciertas condiciones químicas y físicas dado que en documentos anteriores se seleccionó unas características que puede poseer el agua para alargar la vida útil del equipo y mejorar la eficiencia de este, dado que el agua debe poseer un tratamiento antes de iniciar el proceso para la generación de vapor.

A su vez el gas natural se consideró como un segundo componente el cual fue seleccionado de la literatura para determinar la diferencia entre este y el metano como combustible único, aunque sabemos que entre más larga sea la cadena del hidrocarburo mayor será la energía que puede ser liberada mediante la combustión del mismo, pero

al considerar más reacciones el esquema se considerarían en total 8 hidrocarburos presentes en el gas natural sin importar su proporción, y estos hidrocarburos presentan un porcentaje variable según el gas natural, es por esto mismo que se considera sólo metano y el pseudocomponente.

Consideraciones anteriores fueron planteadas y decididas ya que se considera que es el primer método matemático programado para el generador de vapor este documento servirá de guía para ir ampliando los mecanismos ecuaciones reacciones determinación exacta de sustancias para ir aproximándonos a una metodología rigurosa del proceso, pero al no tener una programación base se desarrolló una metodología que busca simplificar y entender el funcionamiento del generador de vapor OTSG.

## **6.2 Modelo del cálculo**

El modelo del cálculo es un modelo secuencial dado que no se van a hacer iteraciones ni repeticiones en algún proceso del cálculo, se van a desarrollar las ecuaciones de forma continua para maximizar la velocidad de respuesta y lograr a futuro una traducción a otro lenguaje de programación o cambio en las fórmulas que se están desarrollando en la metodología, siempre buscando obtener datos con desviaciones mínimas dado que esto permitirá considerar el modelo de cálculo correcto.

Los cálculos empleados son ecuaciones las cuales están programadas en celdas de Excel, no están desarrolladas en el lenguaje de programación dado que estos resultados son trasladados a otras ecuaciones que están ubicadas en otras celdas del documento es por esta razón que las ecuaciones son desarrolladas en las celdas dado que sí se desarrollará en el lenguaje de programación dificultaría la movilización de los datos y ubicación correcta, a su vez no se podría encontrar un error de forma rápida y eficaz, aunque se colocó una ecuación en el lenguaje de programación.

Los cálculos entrelazan las celdas para tener una secuencia ordenada, dada la complejidad de los cálculos y de programación. Sólo se planteó un cálculo para determinar los datos de salida para no presentar errores posteriores en el momento de

ingresar los datos y no aumentar el tamaño del documento lo cual ocasionaría a su vez que se demorará un mayor tiempo en la resolución de la metodología.

### **6.3 Determinación de las incógnitas**

La determinación de incógnitas se considera la cantidad de energía generada por la combustión del hidrocarburo, dado que esta solucionará la cantidad de calor absorbida por el agua, esta energía se considera una incógnita intermedia en la metodología dado que esta dará continuación para determinar la cantidad de vapor generado. Otra incógnita es la cantidad de monóxido y dióxido generado por la reacción de combustión.

Entre las incógnitas finales se encuentra la temperatura del vapor, la calidad del vapor, por parte de la parte exterior del generador de vapor, este hace referencia a el agua únicamente. para la parte de los tubos en donde se genera la combustión presenta como incógnitas finales la cantidad de monóxido, dióxido y agua generada por la combustión.

### **6.4 Variables**

Como principal variable se considera la cantidad de agua y de gas natural que entran al proceso, dado que de estas dos cantidades dan inicio al modelo matemático para el generador de vapor.

### **6.5 Estructura del algoritmo**

El algoritmo está diseñado para iniciar con el cálculo de la energía generada por la reacción de combustión de la cual se conoce la energía posteriormente esta energía es Seleccionada para calcular el vapor generado esta condición del vapor se calcula mediante el uso de tablas y funciones De Excel de la cual determina un valor exacto del rango de la tabla, posteriormente estos datos son enviados a una gráfica según el método seleccionado. [34]

El algoritmo tiene esta secuencia dado que primero se necesita calcular la energía necesaria para determinar la calidad temperatura y cantidad de vapor generado, sola se diseñó una dirección para el algoritmo dado que si se planteará bidireccional se necesitarían otros cálculos y otras secuencias para el algoritmo dado que el algoritmo debe partir de un punto origen.

El algoritmo fue planteado de esta forma para el presente proyecto, pero sí sea considerado para ampliar en su posterior desarrollo y actualización una dirección para según la cantidad de vapor que se necesite se determine la cantidad de combustible necesario lo cual permitiría poder iniciar la operación a nivel industrial ingresando la alimentación que genere la metodología analítica.

El programa cuenta con tablas en las cuales se encuentra la específica, densidad, temperatura de saturación y presión de saturación esa tabla está ubicada desde la columna a hasta la columna h, Para tener un acceso rápido algún dato Y poder modificarlo si es necesario para una posible actualización que se pueda presentar más adelante. El algoritmo está desarrollado para que cada vez que se seleccione una opción o un botón el cambie las propiedades de los cuadros de texto, label e imágenes como se conoce en Visual Basic.

La estructura fue dada de esta forma para facilitar su uso y plantear posibles actualizaciones de forma fácil y sencilla dado que se espera actualizar en fechas futuras el programa para considerar el otro combustible empleado en el generado de vapor, a su vez si se desea eliminar alguna consideración o adicionar otro método u otra variable es posible dado que se planteó esta estructura para una constante evolución para satisfacer las necesidades del proceso, dado que aún se pueden considerar otras variables que afectan directa e indirectamente el funcionamiento del equipo.

Se recalca la estructura del algoritmo evolutiva ya que se va a continuar actualizando y adicionando fórmulas y ecuaciones que no se han previsto hasta la fecha, esta estructura busca satisfacer su correcto uso en Visual Basic y Excel, pero también busca que sea

fácil de ser programada en otros lenguajes los cuales son c++ , c#.net, java entre otros. También se plantea el uso de base de datos para almacenar los datos de entrada y de salida que se desarrollen y ejecuten.

## **6.6 Programación del algoritmo**

El algoritmo está programado con funciones de Excel las cuales buscan datos y desarrollan operaciones matemáticas, se seleccionan estas funciones dado a qué se deben manejar tablas para el agua, dado a casa las ecuaciones en Excel genera factibilidad para el manejo de ecuaciones y de datos.

El algoritmo está programado con visual Basic el cual es el encargado de generar el entorno visual tanto para el ingreso de datos como la visualización de los resultados este entorno permite seleccionar datos de celdas y visualizarlos de forma amigable, una ventaja también en la selección para poder seleccionar la metodología que se quiere realizar y la visualización de gráficas de este.

Entrando en la programación del algoritmo se puede empezar aclarando cómo se obtiene un dato exacto de densidad a partir de cualquier temperatura como se menciona anteriormente la tabla del agua está ubicada en la columna a hasta la columna h, cada columna tiene una propiedad específica, pero para determinar su valor se utilizó la función índice enlazada con la función coincidir, para obtener un dato inferior al dato de entrada y un dato superior al dato de entrada, esto para luego realizar una interpolación entre ambos datos. se planteó este conjunto de funciones para determinar todos los valores de la tabla, pero para determinar la densidad del agua y poder transformar la cantidad de flujo volumétrico a flujo másico para que se determine posteriormente el flujo volumétrico de vapor generado y su temperatura de salida.

Se consideró la ecuación de los gases ideales ya que es una ecuación fácil de programar y fácil de controlar a condiciones ideales, las cuales se tuvieron en cuenta para desarrollar el programa, esta consideración se planteó dado que se planteó el ingreso de



metano al sistema y la formación únicamente de dióxido de carbono. luego tener el número de moles se terminó  $H_c'$  la cual está expresada dentro del programa en kJ esta energía se considera que la energía que va a tener el agua luego mediante la función coincidir e índice se determina la temperatura de saturación esto quiere decir que tenemos vapor saturado por ende su calidad es igual a uno en todos los entonces métodos planteados. esto se encuentra ubicado entre la columna BA y la columna BL.

Finalmente se obtiene las cantidades de agua y dióxido de carbono generadas mediante la ecuación estequiométrica ideal, cabe aclarar que no se considera un exceso de aire el cual debería ser aproximadamente un 20% dado que se considera la idealidad constante en el proceso. la estequiometria está ubicada entre las columnas BA y BV finalmente estos datos son llevados a la pantalla del usuario.

La programación anterior fue descrita para el método simple, pero funciona igual para el método secuencial dado que en el método secuencial se están guardando y recopilando los datos según la modificación que el usuario desee llevar a cabo, no se plantearon adicionar nuevas celdas o columnas para el desarrollo de este método dado que se planteó resolver el algoritmo en la parte del simulador.

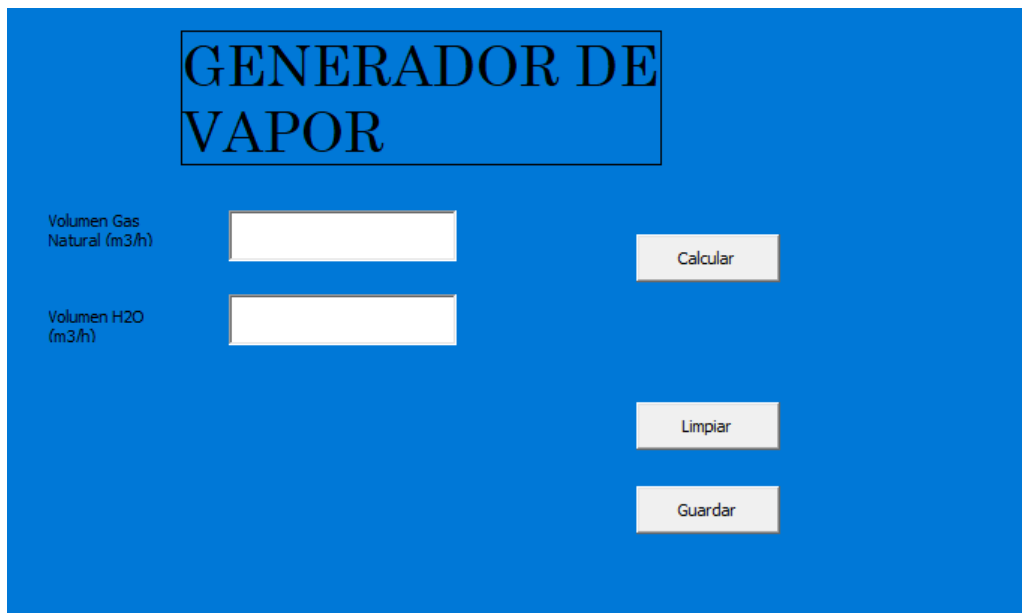
### **6.6.1 Formato simulador**

El formato del simulador como se mencionó anteriormente se te va en la imagen 5, en el cual se observa el entorno que va hacer manipulada por el usuario el cual se empieza diligenciando de izquierda hacia abajo en el cual se encuentra Casillas o cajas para seleccionar principalmente el método en el cual se divide la aparición de una nueva casilla sí se escogerá uno de los 2 métodos y la activación de casillas para el ingreso de los datos finalmente se encuentran botones los cuales indican su función que es guardar los datos y poder analizar las gráficas, también se cuenta con un botón de cálculo y un botón para limpiar y volver a iniciar un nuevo cálculo, el formato se diseñó para que al dar inicio al cálculo se bloquean las Casillas para permitir que no se modifiquen datos y se generen errores en la metodología, también se han considerado restricciones las

cuales están diseñadas y planteadas para disminuir errores en las fórmulas o evitar cálculos innecesarios dado que se puede presentar o ingresar datos que tengan un valor que no puede hacer empleado a nivel industrial, es por eso que se plantearon estas restricciones lo cual evita también la generación de errores en la metodología.

### Figura16.

*Formato del simulador*



The image shows a software interface for a steam generator simulator. At the top, the title "GENERADOR DE VAPOR" is centered in a blue box. Below the title, there are two input fields for "Volumen Gas Natural (m3/h)" and "Volumen H2O (m3/h)". To the right of these fields are three buttons: "Calcular", "Limpiar", and "Guardar".

**Nota.** Formato simulador de la metodología analítica.

El simulador está programado para visualizar las partes o eliminarlas tanto su contenido como aparición en la pantalla todo esto gracias a Visual Basic, el cual permitió estructurar de forma ordenada y concreta el algoritmo para que Excel desarrollará todos los cálculos y Visual Basic fuera de la parte de visualización y estructuración del algoritmo, generando una secuencia lógica programable que también puede ser modificada de forma fácil y sencilla según las necesidades del usuario.

Se selecciona el color amarillo para los datos de entrada o selecciones del usuario dado que es un color llamativo en el cual se pueden determinar si faltan datos de entrada, Asimismo se escogió el color azul para los datos de salida para que pueda ser de fácil comprensión los datos que son expuestos y mostrados en pantalla al usuario.

### 6.6.2 Esquema de programación

La programación como se menciona anteriormente fue desarrollada en las hojas De Excel, el esquema está representado en la figura 9

**Figura17.**

*Esquema de programación*



**Nota.** Esquema simplificado de la programación.

Como se había mencionado anteriormente La programación está desarrollada con opciones de selección, pero su finalidad es una secuencia lineal la cual presenta un inicio y un final concreto en cada parte más exactamente en la determinación de energía y determinación de las cualidades del vapor se encuentran las diversas fórmulas que han sido empleadas y utilizadas en el proyecto, pero se especifica de esta forma para simplificar la obtención de datos y desarrollo de ecuaciones.

### 6.7 Formato interno

Excel presenta las formulas y datos necesarios para evaluar la combustión y el cambio de fase del agua. Principalmente los datos se pueden modificar según el usuario las ecuaciones se encuentran en las celdas de Excel en la Figura 18 se muestra la parte para determinar el peso molecular para determinar la cantidad de agua y gas natural en kg que entran por hora.

**Figura 18.**

*Esquema interno Excel moles de entrada*

	AZ	BA	BB	BC	BD	BE	BF	BG	BH	BI
1	Flujo Volumetrico Gas Natural	33,7	m3/h		Componente	%molar	Peso Molecu	Peso Molecular Promedio		Moles De Entrada
2	Fujo Volumetrico Agua	1			Nitrógeno	0,68	14	0,0952		0,006811033
3	Densidad Gas Natural	0,61	kg/m3		Dióxido de carbo	0,56	44	0,2464		0,005609086
4	Peso Molecular	20,5237	kg/kmol		Metano	79,87	16	12,7792		0,799995902
5					Etano	10,34	30	3,102		0,103567768
6					Propano	5,23	41	2,1443		0,052384858
7	Masa Gas natural	20,557	kg		Iso-butano	0,74	58	0,4292		0,007412007
8	Masa Agua	50	kg		n-butano	1,38	58	0,8004		0,013822391
9					Iso-pentano	0,4	72	0,288		0,00400649
10	Moles Gas Natural	1,0016225	kmol		n-pentano	0,35	72	0,252		0,003505679
11					C6+	0,45	86	0,387		0,004507301
12								20,5237		

**Nota.** Se organizo Excel de forma simple para permitir la modificación de alguna dato teórico o cambio en la composición del gas natural.

Luego de determinar las moles de entrada de cada componente se determinan las reacciones químicas para determinar la entrada de moles y finalmente conocer las moles de CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>O generadas para posteriormente obtener el flujo masico de CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>O. En la Figura 19 se muestra la organización esta sección de Excel no debe ser modificada dado que estos valores son formulas.

**Figura 19.**

*Esquema interno Excel reacciones químicas*

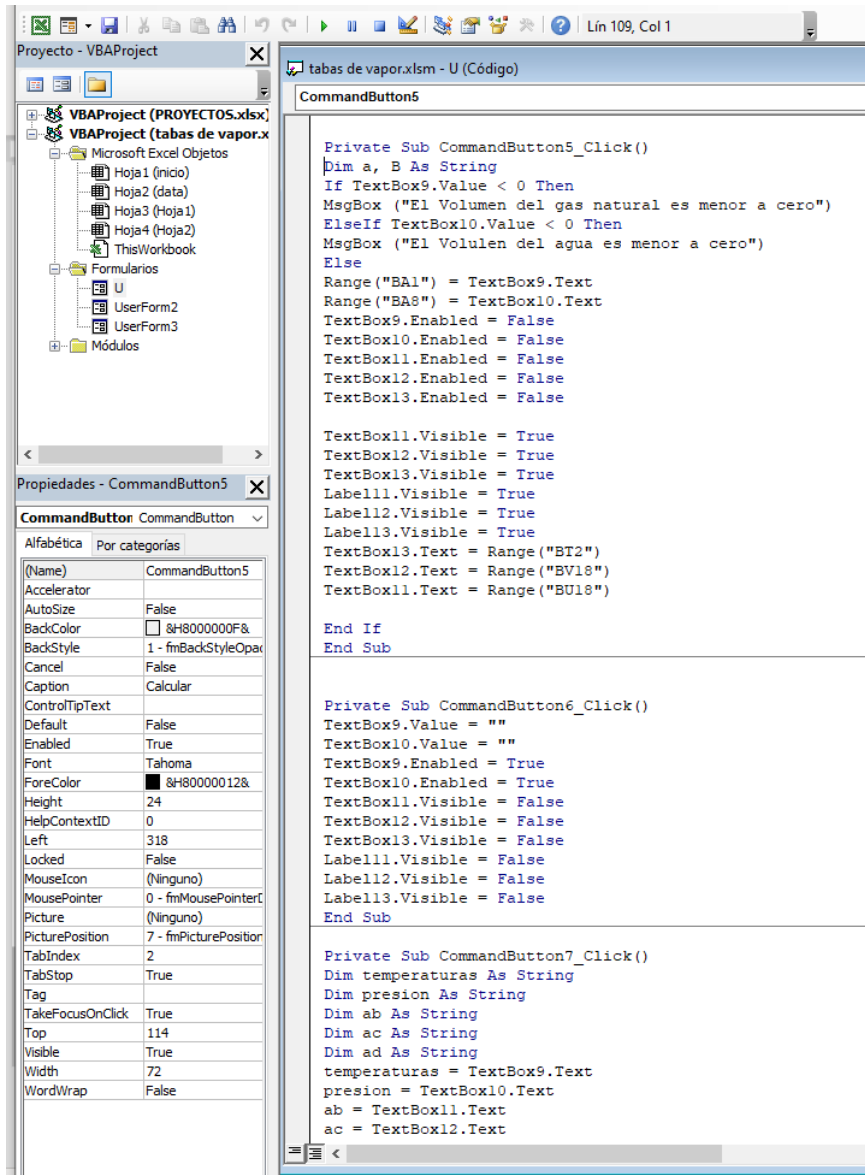
15	Reaccion 1	C		1 H		4													
16	0,799995902 +			1,5999918 =		0,7999959 +		1,5999918	O2 Total	CO2 Total	H2O Total								
17	CH4			O2		CO2		H2O	2,4653436	1,3194373	2,3030306								
18																			
19	Reaccion 2	C		2 H		6													
20	0,103567768 +			0,3624872 =		0,2071355 +		0,3107033											
21	C2H6			O2		CO2		H2O											
22																			
23	Reaccion 3	C		3 H		8													
24	0,052384858 +			0,2619243 =		0,1571546 +		0,2095394											
25	C3H8			O2		CO2		H2O											
26																			
27	Reaccion 4	C		4 H		10													
28	0,007412007 +			0,048178 =		0,029648 +		0,03706											
29	C4H10			O2		CO2		H2O											
30																			
31	Reaccion 5	C		4 H		10													
32	0,013822391 +			0,0898455 =		0,0552896 +		0,069112											
33	C4H10			O2		CO2		H2O											
34																			
35	Reaccion 6	C		5 H		12													
36	0,00400649 +			0,0320519 =		0,0200325 +		0,0240389											
37	C5H12			O2		CO2		H2O											
38																			
39	Reaccion 7	C		5 H		12													
40	0,003505679 +			0,0280454 =		0,0175284 +		0,0210341											
41	C5H12			O2		CO2		H2O											
42																			
43	Reaccion 8	C		6 H		14													
44	0,004507301 +			0,0428194 =		0,0270438 +		0,0315511											
45	C6H14			O2		CO2		H2O											

**Nota.** Se muestran las moles de entrada de cada sustancia, estos datos no se deben modificar porque son las reacciones químicas.

También miraremos como se comporta Visual Basic desde su programación y planteamiento del algoritmo. El programa determina los valores de Excel según un orden para llevar el dato a una celda y posteriormente buscar el dato de interés activando y desactivando cuadros o textos llamados “*label*” en Visual Basic también se deben activar o desactivar funciones según el botón de igual manera se programan los 3 botones los cuales son Calcular, Guardar y Limpiar, internamente se deben hacer condicionales para evitar colocar datos negativos generando errores en los cálculos, en la Figura 20 se observa el lenguaje de programación de Visual Basic en el cual se determinan variables independientes las cuales solo son para la programación del algoritmo

Figura 20.

Formato Visual Basic



**Nota.** Programación en Visual Basic según cada botón.

## **6.8 Simulaciones**

### **6.8.1 Datos de salida**

En los capítulos anteriores se describe los datos de salida, los cuales eran la cantidad de dióxido de carbono y agua generados por la reacción de combustión Dado que Estos datos son de gran importancia y es el principal objetivo del documento.

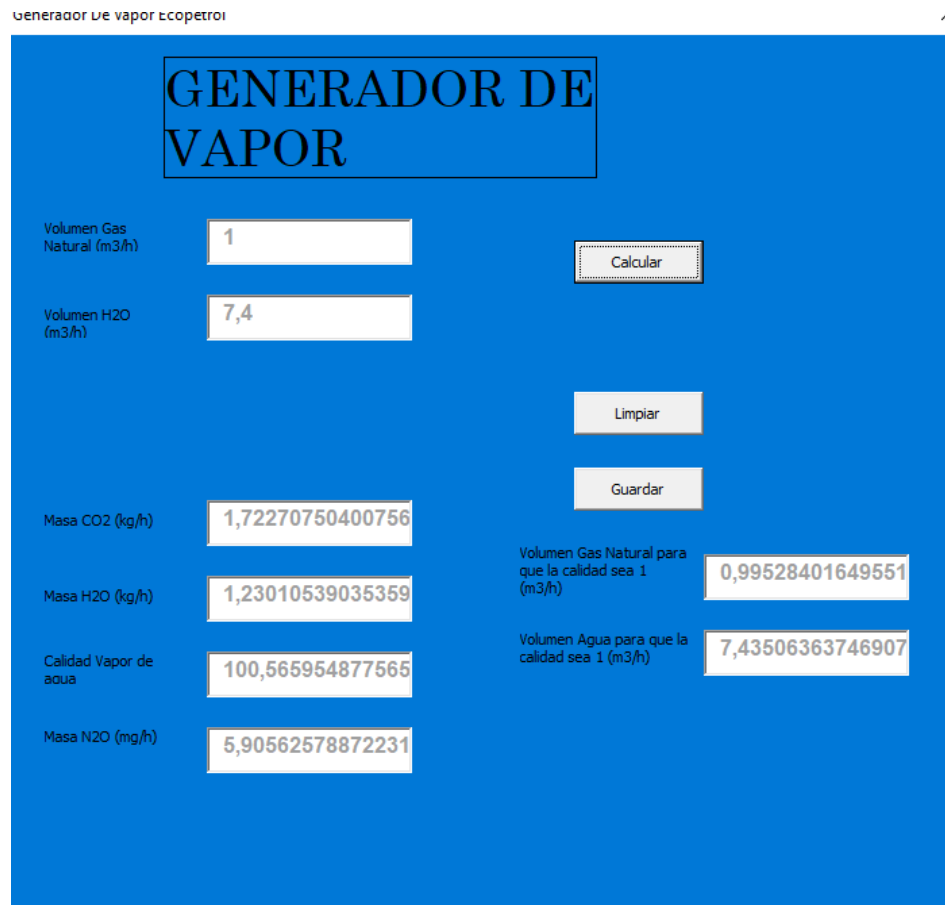
### **6.8.2 Resultados de la simulación**

La simulación se observa en la imagen 6 en la cual se observan los datos de ingreso y los datos de salida respectivamente, se seleccionaron los colores amarillo para los datos de ingreso o selección del proceso, y el color azul para los datos de salida para así implementar una tabla de colores de la cual el usuario pueda tener claridad de los datos de ingreso y de salida, estos datos se informa su unidad respectiva todas las medidas de tiempo están en minutos y las magnitudes está en unidades del sistema inglés las cuales son galones y grados Fahrenheit.

Aunque algunas ecuaciones presentaron cambio de unidades debido al uso de temperatura en kelvin, aunque las unidades de las tablas y datos mismos si están representados en el sistema inglés para facilitar su uso, se usa el sistema inglés debido a que la zona de proceso si se miden en estas unidades dado que los equipos provienen de otras partes del mundo es por eso que se emplean estas unidades, y en ocasiones es más fácil imaginar, comprender y analizar las dimensiones de las mismas.

**Figura 21.**

*Resultados de la simulación.*



**Nota.** Resultado de la simulación método simple

### **6.8.3 Análisis de la simulación**

como análisis final se observa que la metodología analítica es de vital importancia dado que nos muestra de una forma sencilla y rápida cómo se comporta idealmente el sistema, aunque debemos tener en claro que esta metodología principalmente busca generar un algoritmo simple y eficaz de una forma ideal para es un generador de 50 MBTU, posteriormente este sistema va a ser trasladado a otro lenguaje de programación, pero hasta el momento de ayudar al ser un tema de tesis de pregrado se busca general una secuencia, conocida en programación como algoritmo dado que no hay una forma exacta



de saber el comportamiento del equipo y determinar cuál es su mejor configuración para los caudales y temperatura de alimentación del agua.

Se puede decir que esta metodología ignora ciertas ecuaciones y consideraciones estructurales del generador de vapor, esto se hizo con el principal objetivo de eliminar la complejidad de ingreso de datos primarios, dado que hacer esta simulación en aspen presenta una complejidad tanto por la selección del modelo, entre los cuales se encuentran NRTL, Peng Robinson, entre otros, y posteriormente se debe ingresar las sustancias que van a participar en la combustión, posteriormente se genera el generador, en el cual se introducen los caudales y seleccionan líneas de entrada y de salida tanto para masa como para energía, pero el programa no va a funcionar ni va a simular nada dado a qué se debe utilizar aspen Exchange Design and ratings en el cual se debe seleccionar el sistema de tuberías el orden "triangular o cuadrado", la cantidad de tubos el material, en los diámetros, en el desarrollo de este proceso se pueden presentar errores dado a la complejidad de diseñar un generador de vapor, posteriormente luego de obtener el diseño se debe cargar este diseño a Aspen hysys el cual si va a simular todo el general de vapor con los datos de inicio generando datos de salida más complejos pero con un periodo de desarrollo más amplio comparado con la metodología analítica presentada en este documento.

## **6.9 valores estimados**

Desde una percepción química se comprenden las reacciones químicas como el cambio de una sustancia en otra. Considerando la conservación de la materia se estima que por cada 16 gramos de metano obtendremos 44 gramos de CO<sub>2</sub> en una reacción de combustión completa. Y el hidrocarburo mas pesado el cual es C<sub>6</sub>H<sub>14</sub> con 86 gramos obtendremos 264 gramos de CO<sub>2</sub>. Estos valores se pueden ver afectados un poco por factores como la conversión, pero en la industria la no combustión completa ocasiona que se libere CH<sub>4</sub> u otro hidrocarburo a la atmosfera presentando un impacto negativo a la huella de carbono.

La composición seleccionada para el documento nos genero un peso molecular para la mezcla de 20,52 g/mol se debe considerar que la densidad del gas natural es de

0,61kg/m<sup>3</sup> se estima que con 33,7 m<sup>3</sup> de obtenga una kmol de gas natural, es de esperar que se obtenga un poco más de 1kmol aproximadamente de CO<sub>2</sub> y esto se observa ya que con 33,7 m<sup>3</sup> de gas natural se obtiene 1,3 kmol de CO<sub>2</sub>, esto permite estimar con una combustión total del gas natural la generación de 58 kg de CO<sub>2</sub>, iniciando con 20,5kg de gas natural.

Con los datos obtenidos partiendo únicamente con que el gas natural está compuesto por metano se obtiene una relación de 2,75 g de CO<sub>2</sub> por cada gramo de CH<sub>4</sub>, pero considerándolo como una mezcla de 10 componentes en los cuales 8 de estos componentes reaccionan y producen CO<sub>2</sub> obtenemos una relación de 2,82 g de CO<sub>2</sub> por cada gramo de gas natural. Una interpretación a estos datos es que en muchas tesis y documentos se consideraba la participación únicamente de metano en las reacciones. Se determina que el porcentaje de error sería un 2,5%, permitiendo analizar que el metano es el componente que influye principalmente en la generación de CO<sub>2</sub>.

Un análisis complejo es considerar si se está generando demasiado CO<sub>2</sub> en la reacción o poco, esto depende a que si consideramos una empresa que cuenta con 4 generadores de vapor generaría 4 veces mas que una empresa que cuenta con un solo generador de vapor de igual manera el vapor se necesita para una etapa mínimo en el proceso, también se debe considerar la capacidad de operación del equipo, el tiempo de operación, etc. Lo cual desde un punto objetivo no se permite considerar si la producción de CO<sub>2</sub> es alta o baja en cada empresa, lo ideal sería tener una data histórica, la cual permita comparar el aumento o disminución en la generación de CO<sub>2</sub>, o comparar la cantidad de CO<sub>2</sub> generado con el producto final obtenido o vapor generado.

Se ha encontrado que para el año de 1987 se consideraba que las fuentes disponibles estimadas de CH<sub>4</sub> fueran de 45 Tg por año a nivel mundial en la industria de Gas Perforación, venteo, transmisión[35]. Se tomo este número porque se considera que la actividad económica en la cual se basa el proyecto está participando en el gas de perforación, así este gas no sea directa mente empleado en los generadores.

**Tabla 12.**

Fuentes estimadas y sumideros de metano 1987

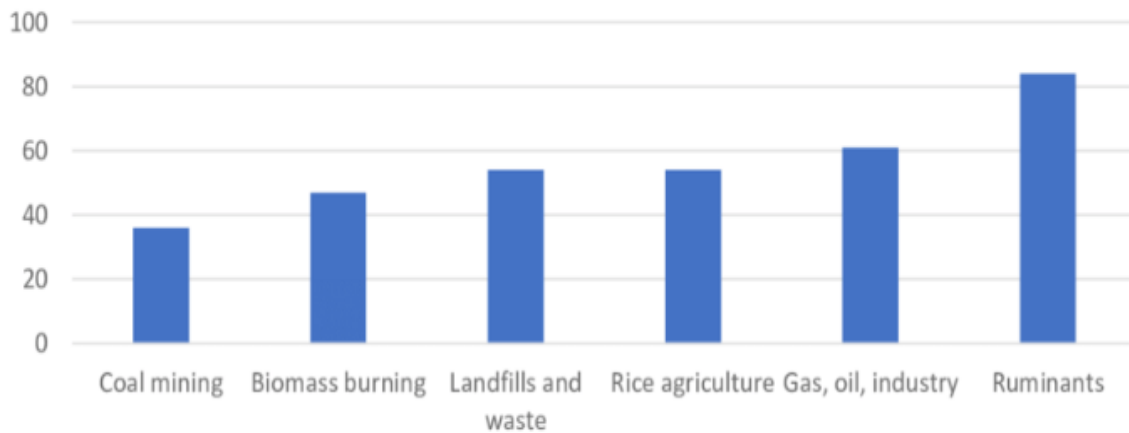
	Annual Release (Tg CH <sub>4</sub> )	Range (Tg CH <sub>4</sub> )
<b>Source</b>		
Natural Wetlands (bogs, swamps, tundra, etc)	115	100 - 200
Rice Paddies	110	25 - 170
Enteric Fermentation (animals)	80	65 - 100
Gas Drilling, venting, transmission	45	25 - 50
Biomass Burning	40	20 - 80
Termites	40	10 - 100
Landfills	40	20 - 70
Coal Mining	35	19 - 50
Oceans	10	5 - 20
Freshwaters	5	1 - 25
CH <sub>4</sub> Hydrate Destabilization	5	0 - 100
<b>Sink</b>		
Removal by soils	30	15 - 45
Reaction with OH in the atmosphere	500	400 - 600
<b>Atmospheric Increase</b>	44	40 - 48

**Nota.** La tabla muestra las fuentes estimadas de CO<sub>2</sub> por actividad, el valor más elevado de la producción es de forma natural en pantanos, siendo casi 3 veces más elevado que el proceso industrial. Tomado de: R. Watson., H. Rodhe., Greenhouse Gases and Aerosols, IPCC.

Una tabla actualizada es la tabla 12 en la cual se observa el incremento para la industria del gas y petróleo en 60 Tg por año de metano y como los animales rumiantes tienen la mayor participación como fuente principal de CH<sub>4</sub>, aunque se observa como de ser la cuarta actividad como fuente de CH<sub>4</sub> se aumentó y pasó a ser la segunda fuente [36].

## Figura 22.

Fuentes estimadas y sumideros de metano 2021

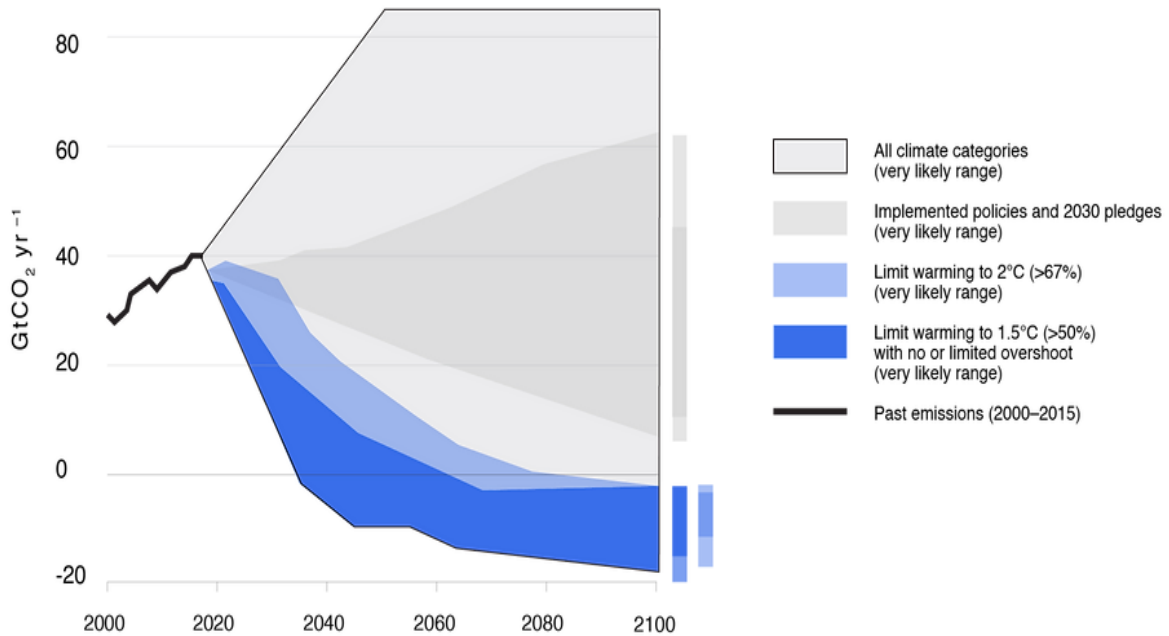


**Nota.** Se observa los Tg de CH<sub>4</sub> obtenidos en cada actividad se da un incremento de 15Tg de CH<sub>4</sub> comparado con el año de 1987. Tomado de: M.Purnell., W. Jehne., A. Thorsten., NorthTec, USA, 2021. [En línea]. Disponible: <https://www.researchgate.net/publication/355789160 METHANE Sources Sinks and Uncertainties>.

Ya se ha analizado las fuentes de emisión, pero en un factor claro es el CO<sub>2</sub> producido a nivel mundial es por esta razón que se acude al IPCC al “*Sixth Assessment Report*” en el cual se encuentra un dato de 40GtCO<sub>2</sub> por año lo cual en la Figura 23 se observa y se da un contraste entre los posibles escenarios para mitigar la generación o el aumento en la generación de CO<sub>2</sub>[37].

**Figura 23.**

*Emisiones Globales de CO<sub>2</sub>*

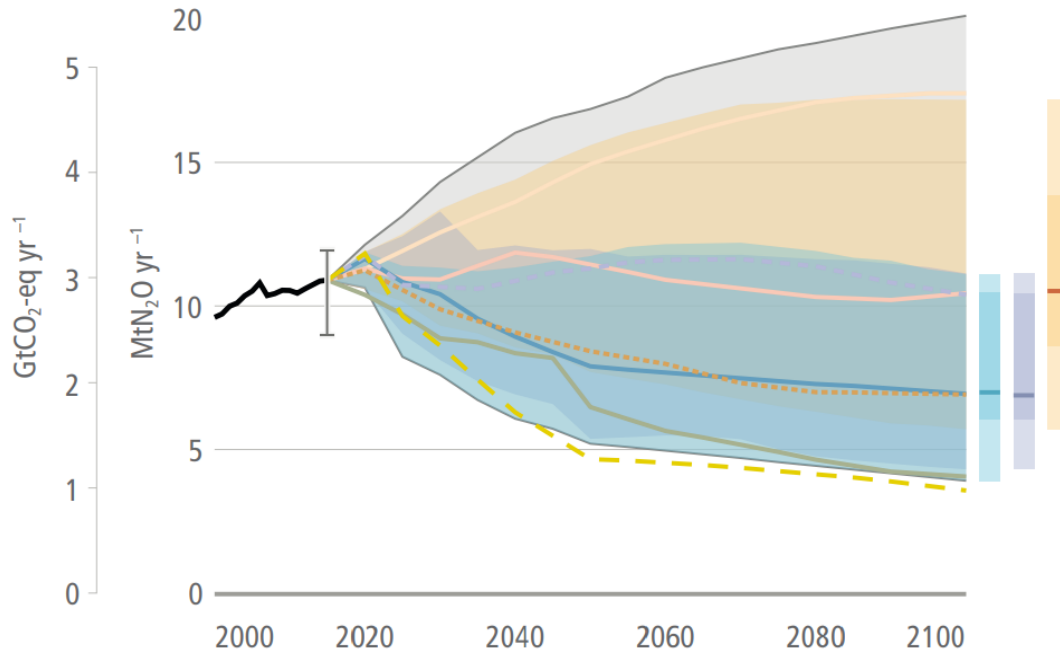


**Nota.** La figura muestra las emisiones del CO<sub>2</sub> a nivel mundial. Tomado de: IPCC, Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change, 2022. [En línea]. Disponible: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/>.

Se encuentra también las emisiones de N<sub>2</sub>O en el cual se compara el N<sub>2</sub>O con el CO<sub>2</sub> las emisiones de N<sub>2</sub>O son de 11Mt. Este dato permite ver la diferencia entre el N<sub>2</sub>O y como es 10 veces menos a las emisiones de CO<sub>2</sub> si comparamos su relación directa.

**Figura 24.**

*Emisiones Globales de N2O*



**Nota.** La figura muestra las emisiones del N2O y su comparación respecto al CO2. Tomado de: IPCC, Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change, 2022. [En línea]. Disponible: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/>. La figura muestra las emisiones del CO2 a nivel mundial.

Para concluir se ha determinado la cantidad de los GEI en relación con el CO2 en donde se evidencia que cada componente puede tener una variación, el CO2 participa en un 66% de participación total anual la tabla 13 permite comparar de manera efectiva la cantidad de cada componente para evaluar la producción de cada compuesto [37][38].

**Tabla 13.***Emisiones anuales de GEI*

	Average annual emissions (GtCO <sub>2</sub> -eq)					
	CO <sub>2</sub> FFI	CO <sub>2</sub> LULUCF	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub> O	Fluorinated gases	GHG
2019	38 ± 3.0	6.6 ± 4.6	11 ± 3.2	2.7 ± 1.6	1.4 ± 0.41	59 ± 6.6
2010–2019	36 ± 2.9	5.7 ± 4.0	10 ± 3.0	2.6 ± 1.5	1.2 ± 0.35	56 ± 6.0
2000–2009	29 ± 2.4	5.3 ± 3.7	9.0 ± 2.7	2.3 ± 1.4	0.81 ± 0.24	47 ± 5.3
1990–1999	24 ± 1.9	5.0 ± 3.5	8.2 ± 2.5	2.1 ± 1.2	0.49 ± 0.15	40 ± 4.9
1990	23 ± 1.8	5.0 ± 3.5	8.2 ± 2.5	2.0 ± 1.2	0.38 ± 0.11	38 ± 4.8

**Nota.** La figura muestra los GtCO<sub>2</sub> que se pueden producir de cada gas de efecto invernadero para tener una idea del comportamiento de cada sustancia. Tomado de: IPCC, Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change, 2022. [En línea].

Disponible: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/>.

Al programa se le realizó una actualización la cual muestra la cantidad de agua o gas natural necesarios para tener una calidad igual a uno, se permite al usuario modificar en una celda de Excel la calidad que él desea obtener, se deja el programa configurado con una calidad igual a uno para determinar cuál sería el volumen de gas natural necesario manteniendo constante el volumen de agua ingresado por el usuario, de igual forma puede determinar el volumen de agua necesario para obtener una calidad igual a uno con el volumen de gas natural ingresado por el usuario.

## 7. MANUAL DEL USUARIO

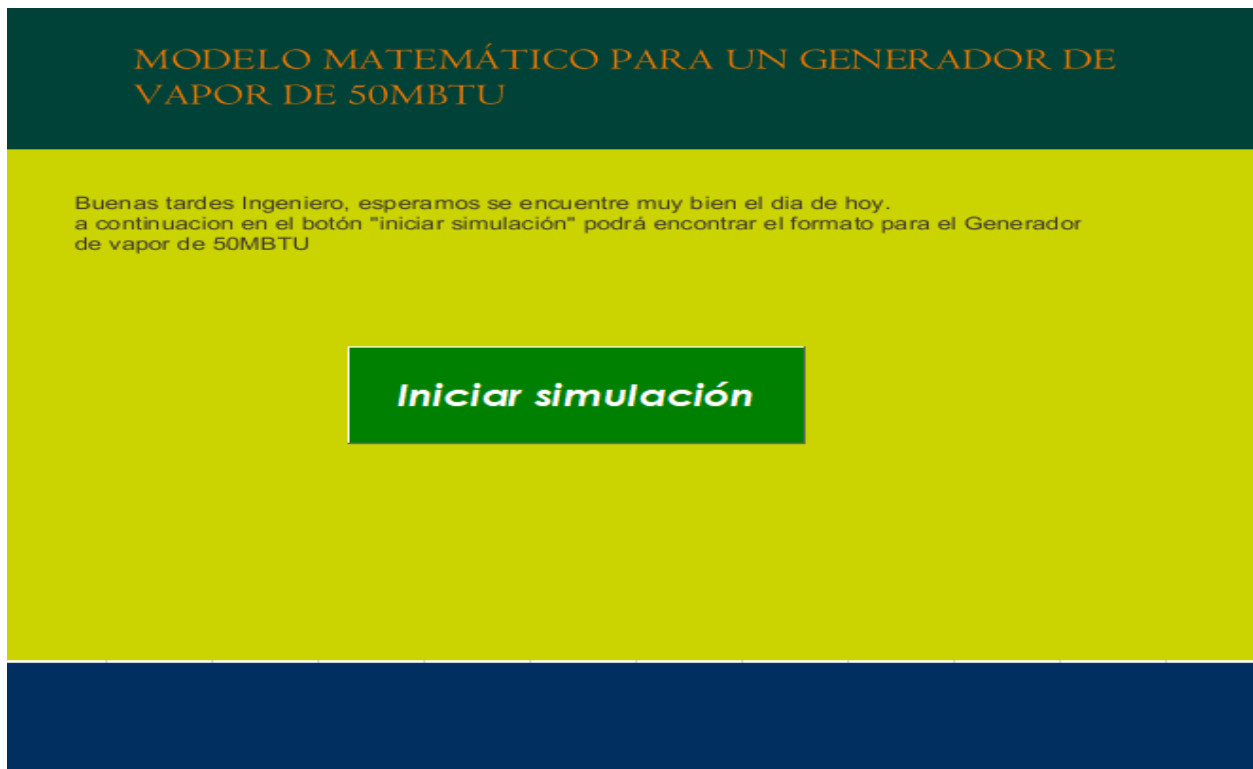
La presente guía está diseñada para orientar el uso correcto de la herramienta de cálculo analítico para un generador de vapor de 50 MBTU. Se le Otorga el nombre al documento de Excel con el nombre de “Metodología Analítica”. Para su correcto uso se deben habilitar macros en Excel.

### PASO 1: INICIO

La pantalla de inicio cuenta con un botón en la parte inferior central de color verde, el cual indica: Iniciar simulación.

#### **Figura 25.**

*Panel principal: Inicio simulación*



**Nota.** En la figura se observa el botón de inicio de la simulación



## PASO 2: APLICATIVO

Después de dar clic en el botón "iniciar simulación" este direcciona al usuario a la ventana del aplicativo, desde la cual selecciona el método que va a ser empelado y en la parte izquierda un botón que indica la palabra "limpiar" el cual servirá para volver a esta pantalla por si se selecciona o se desea cambiar un dato, "este botón elimina todos los datos y recuadros que se seleccionaron"

### Figura 26.

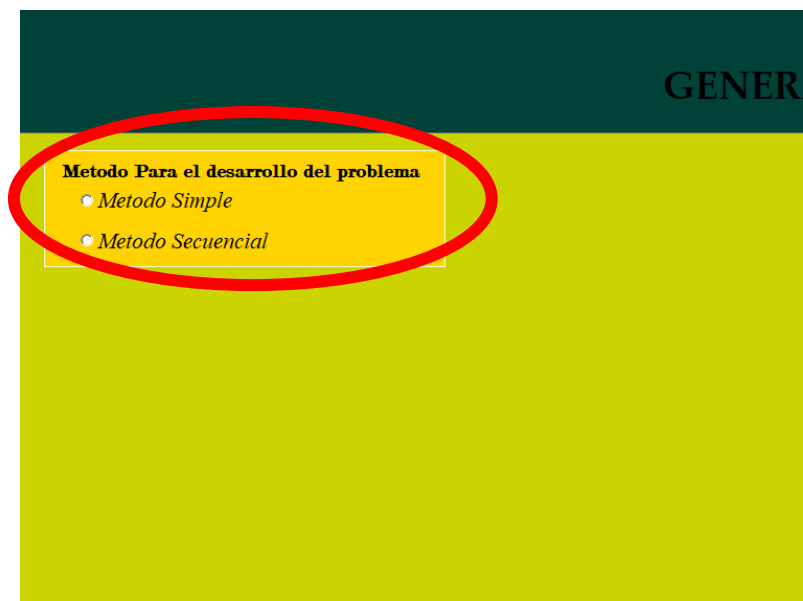
*Selección de métodos*



**Nota.** En la figura se observa el cuadro de método para el desarrollo

**Figura 27.**

*Cuadro selección de método*



**Nota.** En la figura se muestra la opción de método en el cual se debe seleccionar alguno de los dos métodos.

En la parte superior izquierda se encuentra un recuadro, el cual indica el método para el desarrollo. Principalmente se le pide al usuario el método que va a ser empleado para el modelamiento matemático se debe seleccionar el método que se acople a su necesidad de modelamiento. A continuación, se muestra a detalle la función de cada método.

- Método simple

En el costado izquierdo frente a cada ítem, se debe ingresar el valor determinado por el usuario. Luego de ingresada la información se considerará que la reacción tendrá una conversión del 100% para determinar toda la energía que se produce por la reacción química.

**Figura 28.**

*Cuadro datos de entrada método simple*

GENERA

**Metodo Para el desarrollo del problema**

*Metodo Simple*

*Metodo Secuencial*

Calcular

Caudal de agua Entrada (gal/min)

Caudal combustible de Entrada (gal/min)

Temperatura del Agua (°F)

**Nota.** La figura muestra los cuadros de texto para ingresar la información

- Método Secuencial

**Figura 29.**

*Entrada de variables.*

The screenshot shows a software interface with a dark green header containing the word "GENERADOR". Below the header, there are three main sections on a light green background:

- Metodo Para el desarrollo del problema:** Contains two radio buttons: "Metodo Simple" (unselected) and "Metodo Secuencial" (selected).
- Variable De Pasos:** This section is highlighted with a red rectangular border. It contains three radio buttons: "Caudal de agua" (selected), "Temperatura del agua" (unselected), and "Caudal de Combustible" (unselected).
- Input Fields:** Below the "Variable De Pasos" section, there are three input fields, each with a label in a yellow box:
  - "Caudal de agua Entrada (gal/min)" with an empty white input box.
  - "Caudal combustible de Entrada (gal/min)" with an empty white input box.
  - "Temperatura del Agua (°F)" with an empty white input box.

**Nota.** La selección del método secuencial permite el ingreso de las variables, para ser procesadas y permitir el desarrollo del cálculo respectivo. Pero se debe seleccionar la variable a evaluar de forma continua.

El método secuencial está especializado en proporcionar al usuario una tabla de datos en la cual podrá observar cómo se comporta el sistema si se cambia un dato de entrada en la parte superior izquierda se da al usuario la opción de seleccionar la variable de pasos que va a ser utilizada las cuales son Caudal de agua, Caudal de combustible y Temperatura del agua.

**Figura 30.**

*Selección de variables de paso*

The image shows a web interface for a calculator. At the top right, the text "GENERADOR DE" is visible. The main content area has a yellow background. It contains several sections:

- Metodo Para el desarrollo del problema:** Two radio buttons are present: "Metodo Simple" (selected) and "Metodo Secuencial".
- Calcular:** A dark grey button with white text.
- Variable De Pasos:** Three radio buttons: "Caudal de agua" (selected), "Temperatura del agua", and "Caudal de Combustible".
- Input Fields:** Three white input boxes with labels: "Caudal de agua Entrada (gal/min)", "Caudal combustible de Entrada (gal/min)", and "Temperatura del Agua (°F)".
- Pasos:** A yellow button labeled "Pasos" and a white input box, both enclosed in a red rectangular border.

**Nota.** Se selecciona la variable que va a presentar cambios en su valor, se da la opción para un máximo de 10 pasos, por la complejidad de los cálculos, formulación del algoritmo.

En el costado derecho hay una sección donde el usuario puede ingresar la cantidad de pasos requeridos y el caudal o temperatura final.

importante: se aclara que el primer dato ingresado debe ser la menor y la siguiente el mayor para que se lleva a cabo un correcto funcionamiento del programa.

### Figura 31.

*Selección método simple*

GENERAL

**Método Para el desarrollo del problema**

*Método Simple*

*Método Secuencial*

Calcular

Caudal de agua Entrada (gal/min)

Caudal combustible de Entrada (gal/min)

Temperatura del Agua (°F)

**Nota.** Para la selección del método simple se contempla únicamente un dato para cada variable para evaluar el comportamiento ideal.

Finalmente, después de ingresar los datos se selecciona el botón calcular para cualquiera de los dos métodos

### PASO 3: RESULTADOS

Por último, el algoritmo arrojará los resultados a partir de los datos introducidos por el usuario, los cuales son guardados para un posterior uso.

**Figura 32.**

*Resultados método simple*

The screenshot shows a web application titled "GENERADOR DE VAPOR". It features a yellow background with a dark green header. On the left, there is a yellow box with the text "Metodo Para el desarrollo del problema" and two radio buttons: "Metodo Simple" (selected) and "Metodo Secuencial". To the right of this box is a dark grey button labeled "Calcular". Below these are three input fields: "Caudal de agua Entrada (gal/min)" with the value "50", "Caudal combustible de Entrada (gal/min)" with the value "500", and "Temperatura del Agua (°F)" with the value "50". On the right side, there are three output fields, each with a dark blue label and a white value box. These are: "Emision de CO2 (gal/min)" with the value "971.770781805302", "Emision de H2O (gal/min)" with the value "1943.5415636106", and "Temperatura del vapor (°F)" with the value "586.849618415986". A red rectangular box highlights these three output fields.

Input	Value	Output	Value
Caudal de agua Entrada (gal/min)	50	Emision de CO2 (gal/min)	971.770781805302
Caudal combustible de Entrada (gal/min)	500	Emision de H2O (gal/min)	1943.5415636106
Temperatura del Agua (°F)	50	Temperatura del vapor (°F)	586.849618415986

**Nota.** Los resultados son visualizados en la parte derecha, de color azul indicando las emisiones de CO2, agua y temperatura del vapor.

También se habilitará un botón el cual esta nombrado como “guardar” el cual permitirá guardar los datos de entrada y salida para su posterior análisis.

**NOTA:** el usuario no deberá modificar, ni diligenciar datos en ninguna hoja del aplicativo, pues esto podría ocasionar algún daño o alteración a los resultados esperados de la simulación. Posteriormente se espera que se puedan modificar o alterar las eficiencias de reacción y datos que afecten el proceso.

Nota: El botón guardar solo se encuentra disponible para el método sencillo, se espera que para una futura actualización esté disponible para el método secuencial.



## 8. CONCLUSIONES

Se desarrolló la metodología permitiendo el análisis según las normas y consideraciones personales de cada ingeniero, se presentan valores numéricos para un generador de vapor. La metodología fue desarrollada según criterios de secuencia de datos, uso de herramientas ofimáticas, para permitir un acceso eficaz.

Se considero el CO<sub>2</sub> como el principal gas de combustión, de igual forma se considera el agua como gas de combustión. Además, se logró determinar las propiedades térmicas del vapor, pero la propiedad que presento un papel importante para el desarrollo del programa fue la entalpia, puesto esta propiedad permite determinar la energía del vapor.

El funcionamiento de los generadores de vapor no fue importante para determinar el comportamiento, debido a que se deberían considerar propiedades de ordenamiento de los tubos el tipo de transferencia de energía que sería presentada, de igual manera se planteó que se presenta radiación, pero por comportamiento del equipo y su complejidad se determinó no emplear este tipo de transferencia.

El balance energético fue considerado como la transferencia proveniente de la combustión del gas natural, el valor fue considerado de la bibliografía como un dato exacto, pero por consideraciones de proceso se planteó una eficiencia del 80%. Aunque esta eficiencia puede ser modificada por el usuario.

Los gases de efecto invernadero considerados y planteados fueron el agua y dióxido de carbono, no se consideró otras sustancias puesto que según la bibliografía la cantidad de otra sustancia como GEI son de un porcentaje pequeño comparado con estos dos primeros compuestos químicos.

El algoritmo planteado fue de autoría propia, puesto que aún no se han planteado algoritmos empleando la herramienta ofimática para un generador de vapor, los gases de combustión fueron calculados según balance de materia, de igual manera se planteó

la posibilidad de que se cambie o se adicionen nuevas ecuaciones para permitir la actualización y permitir la practicidad según las necesidades del usuario.

Se realizó el cálculo de la masa obtenida del N<sub>2</sub>O en la cual se encontró que su producción respecto al dióxido de carbono es menor en una relación de dos por millón, se evidenció que es difícil comprobar si las emisiones de dióxido de carbono son altas o bajas, porque no existe una base que determine dicha relación.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] S. Mota, “*¿qué es un algoritmo? Una respuesta desde la obra de wittgenstein what is an algorithm? A response based on wittgenstein’s work*”, Madrid, 2015. doi: <https://doi.org/10.5944/endoxa.36.2015.14967>.
- [2] Energy Glossary, “*petróleo pesado*”, Schlumberger Limited, 2023. [https://glossary.slb.com/es/terms/h/heavy\\_oil](https://glossary.slb.com/es/terms/h/heavy_oil) (consultado el 10 de febrero de 2023).
- [3] Vaillant, “*¿Qué es el gas natural?*”, 2023. <https://www.vaillant.es/usuarios/servicios/glosario/gas-natural/> (consultado el 10 de febrero de 2023).
- [4] Chanaga A y Guarín A, “*optimización de la calidad de vapor en pozos con métodos de estimulación huff & puff*”, Universidad industrial de Santander, Bucaramanga, 2015.
- [5] Borroto A y Rubio A, *Combustión y Generación de Vapor*. Editorial Universo SUR, 2007. [En línea]. Disponible en: <https://www.researchgate.net/publication/333903191>
- [6] C. A. Espinosa B y K. Torres, “*Técnicas de recobro y recobro mejorado en yacimientos*”, 2015, Universidad de San Buenaventura Cartagena.
- [7] A. P. QUINTERO CARRASCAL, “*diseño mecánico de un generador de vapor tipo acuotubular de presión subcrítica y baja producción de vapor*”, 2013.
- [8] J. Yoon, J. P. Kim, H. Y. Kim, D. J. Lee, y M. H. Chang, “*Development of a computer code, ONCESG, for the thermal-hydraulic design of a once-through steam generator*”, *J Nucl Sci Technol*, vol. 37, núm. 5, pp. 445–454, 2000, doi: 10.1080/18811248.2000.9714917.
- [9] Carbotecnia, “*Agua para procesos industriales*”, el 15 de marzo de 2022.
- [10] A. Culp, “*Principles of Energy Conversion*”, 1979.
- [11] Y. Cengel, *Termodinámica*, vol. Séptima Edición. 2012.
- [12] I. Alexander et al., “*Recomendaciones para Eficientar los Generadores de Vapor del Complejo Petroquímico Cangrejera*”, 2012.

- [13] “*Agua para procesos industriales o uso industrial - Carbotecnia*”. <https://www.carbotecnia.info/aprendizaje/tratamiento-de-agua/agua-para-procesos-industriales/> (consultado el 3 de diciembre de 2022).
- [14] D. Lindsley, J. Grist, y D. Parker, “*Thermal power plant control and instrumentation : the control of boilers and HRSG systems*”, p. 325.
- [15] Y. Z. Chen, Y. G. Li, y M. A. Newby, “*Performance simulation of a parallel dual-pressure once-through steam generator*”, *Energy*, vol. 173, pp. 16–27, abr. 2019, doi: 10.1016/j.energy.2019.02.022.
- [16] V. L. Eriksen, *Heat recovery steam generator technology*. 2017.
- [17] D. Lindsley, J. Grist, y D. Parker, “*Once-through Boilers and OTSGs*”, *Thermal Power Plant Control and Instrumentation -The Control of Boilers and HRSGs*, pp. 13–15, 2018, Consultado: el 30 de agosto de 2022. [En línea]. Disponible en: [https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt011NXS87/thermal-power-plant-control/once-through-boilers BT](https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt011NXS87/thermal-power-plant-control/once-through-boilers-BT) - Thermal Power Plant Control and Instrumentation - The Control of Boilers and HRSGs (2nd Edition)
- [18] J. Miller y E. Vernon, “*Once-through HRSG*”, *Heat Recovery Steam Generator Technology*, pp. 384–385, 2017.
- [19] G. Al-Ajmi *et al.*, “*Once through Steam Generator Integrity OTSG*”, *Society of Petroleum Engineers - SPE International Heavy Oil Conference and Exhibition 2018, HOCE 2018*, vol. 2, p. 193654, dic. 2018, doi: 10.2118/193654-MS.
- [20] L. Xie *et al.*, “*Soft sensors for online steam quality measurements of OTSGs*”, *J Process Control*, vol. 23, núm. 7, pp. 990–1000, ago. 2013, doi: 10.1016/J.JPROCONT.2013.05.006.
- [21] R. Morales, J. L. Morillo, M. Espinosa, J. C. Herrera, J. Felipe Mendez, y A. Cadena, “*PROPUESTA DE ACTUALIZACIÓN Y CONSOLIDACIÓN DE ESCENARIOS DE EMISIONES DE GEI POR SECTOR Y EVALUACIÓN DE COSTOS DE ABATIMIENTO ASOCIADOS EN COLOMBIA*”. [En línea]. Disponible en: [www.minambiente.gov.co](http://www.minambiente.gov.co)
- [22] T. Wiedmann, “*Carbon footprint and input-output analysis - an introduction*”, *Economic Systems Research*, vol. 21, núm. 3. pp. 175–186, septiembre de 2009. doi: 10.1080/09535310903541256.

- [23] D. Pandey, M. Agrawal, y J. S. Pandey, “Carbon footprint: Current methods of estimation”, *Environ Monit Assess*, vol. 178, núm. 1–4, pp. 135–160, jul. 2011, doi: 10.1007/s10661-010-1678-y.
- [24] “PROTOCOLO PARA EL CONTROL Y VIGILANCIA DE LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA GENERADA POR FUENTES FIJAS”, 2010.
- [25] J. O. Valderrama, C. Espíndola, y R. Quezada, “Huella de Carbono, un Concepto que no puede estar Ausente en Cursos de Ingeniería y Ciencias”, *Formación universitaria*, vol. 4, núm. 3, pp. 3–12, 2011, doi: 10.4067/S0718-50062011000300002.
- [26] A. D. González y A. Carlsson-Kanyama, “emisiones de gases de efecto invernadero con alto potencial de calentamiento global: el sector agropecuario”, *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, vol. 11, 2007, Consultado: el 3 de diciembre de 2022. [En línea]. Disponible en: [www.fao.org](http://www.fao.org)
- [27] M. D. L. A. ZAMORA, “conceptos fundamentales de la ingeniería de producción de gas natural”, UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO, 2015.
- [28] energía y minas Dirección general de industria, “el petróleo el recorrido de la energía”, Madrid, 2002.
- [29] Herman y Steven, “Modelling the Impact of Tube Fouling on Heat Transfer in Once-Through Steam Generators”, 2019. [En línea]. Disponible en: <http://hdl.handle.net/1880/110261>
- [30] L. J. Muzio, T. A. Montgomery, G. S. Samuelsen, J. C. Kramlich, R. K. Lyon, y A. Kokkinos, “Formation and measurement of N<sub>2</sub>O in combustion systems”, *Symposium (International) on Combustion*, vol. 23, núm. 1, pp. 245–250, ene. 1991, doi: 10.1016/S0082-0784(06)80266-3.
- [31] D. Himmelblau, “Principios Básicos y Cálculos en Ingeniería Química”, vol. 6<sup>o</sup>-edición, 1997.
- [32] J. Seaba, D. Wissmiller, M. Sandeep, y A. Senior, “Advanced Steam Generation: Technologies for Canadian Oil Sands”, 2017. [En línea]. Disponible en: [www.gastechnology.org](http://www.gastechnology.org)

- [33] A. A. Olajire, “*Review of ASP EOR (alkaline surfactant polymer enhanced oil recovery) technology in the petroleum industry: Prospects and challenges*”, *Energy*, vol. 77, pp. 963–982, dic. 2014, doi: 10.1016/J.ENERGY.2014.09.005.
- [34] R. Fernández, “*desarrollo de un simulador de calderas en matlab-simulink*”, *Universidad de Montevideo*, pp. 47–65, 2009.
- [35] R. T. Watson *et al.*, “*Greenhouse Gases and Aerosols*”.
- [36] T. Arnold, “*Methane Sources, Sinks and Uncertainties*”, oct. 2021. doi: 10.13140/RG.2.2.28627.71201.
- [37] “*Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change*”. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/> (consultado el 14 de febrero de 2023).
- [38] M. Li, H. Wu, T. Zhang, B. Shen, Q. Zhang, y Z. Li, “*A comprehensive review of pilot ignited high pressure direct injection natural gas engines: Factors affecting combustion, emissions and performance*”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 119, p. 109653, mar. 2020, doi: 10.1016/J.RSER.2019.109653.

## **ANEXOS**

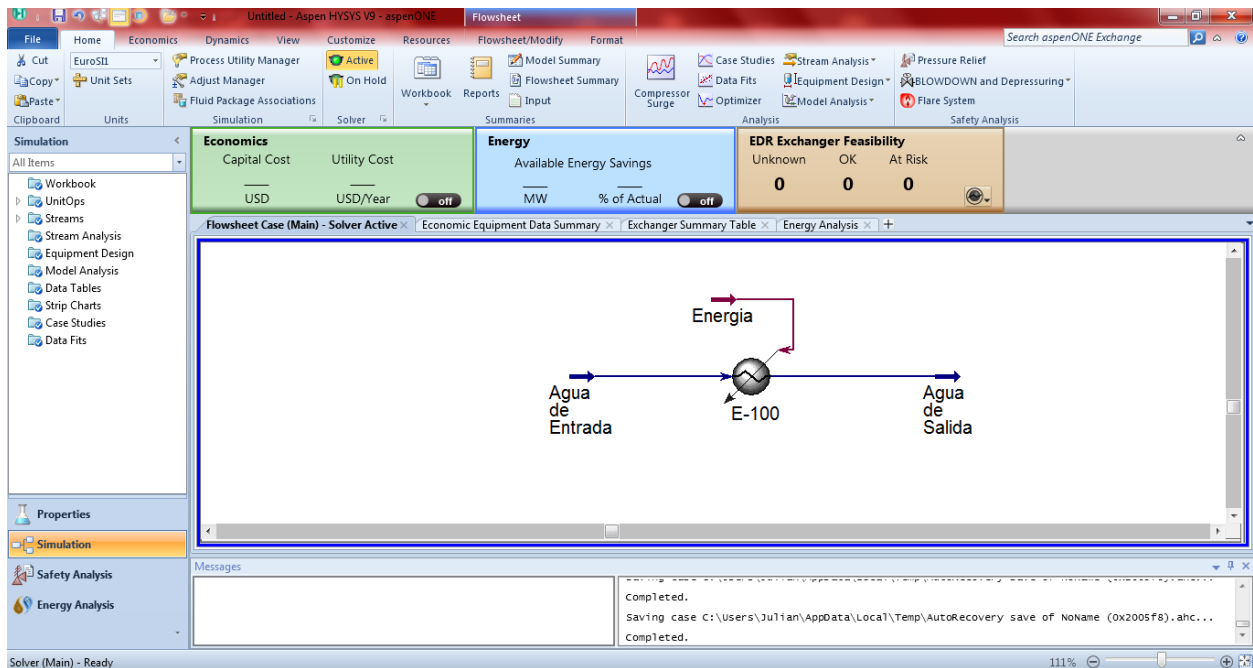
# ANEXO 1

## SIMULACIONES ASPEN

Para el desarrollo del documento se implementó Aspen HYSYS V9 con el objetivo de analizar el comportamiento del vapor y el control de este con diferentes relaciones de entrada de agua, cambiando la energía que es transferida al agua, de igual forma se analizó en qué punto se considera que se forma la primera burbuja de agua, el método seleccionado fue peng-robinson, para no considerar la idealidad de la sustancia, el esquema de simulación fue el siguiente. Se encuentra una corriente de entrada llamada “Agua de Entrada” y una corriente de salida llamada “Agua de Salida”.

**Figura 33.**

### Simulación Aspen agua



**Nota.** Se simulo en aspen el comportamiento al someter al agua a un calentamiento para determinar la calidad de la misma según la energía adicionada.

Los datos de entrada son los siguientes, se resalta en azul los datos ingresados por el usuario en Aspen. Los cuales son: temperatura, presión y flujo másico. considerando composición del 100% de agua.



Inicialmente se seleccionó una temperatura de 25°C, presión de 1bar, y un flujo másico de 1 kg/h. Posteriormente se selecciona la cantidad de energía que ingresa al sistema iniciando con 75kcal/h. puesto que es nuestro punto de referencia, para comprender que el agua está saturada.

**Figura 34.**

*Tabla datos agua de entrada*

Worksheet	Stream Name	Agua de Entrada	Aqueous Phase
Conditions	Vapour / Phase Fraction	0,0000	1,0000
Properties	Temperature [C]	25,00	25,00
Composition	Pressure [bar]	1,000	1,000
Oil & Gas Feed	Molar Flow [kgmole/h]	5,551e-002	5,551e-002
Petroleum Assay	Mass Flow [kg/h]	1,000	1,000
K Value	Std Ideal Liq Vol Flow [m3/h]	1,002e-003	1,002e-003
User Variables	Molar Enthalpy [kcal/kgmole]	-6,841e+004	-6,841e+004
Notes	Molar Entropy [kJ/kgmole-C]	53,70	53,70
Cost Parameters	Heat Flow [kcal/h]	-3797	-3797
Normalized Yields	Liq Vol Flow @Std Cond [m3/h]	9,854e-004	9,854e-004
	Fluid Package	Basis-1	
	Utility Type		

**Nota.** Se observa las características del agua de entrada al inicio en el cual se seleccionó la temperatura, presión y flujo masico.

**Figura 35.**

*Tabla datos agua de salida sin cambio de fase*

The screenshot displays the Aspen Plus V9 interface. The 'Material Stream: Agua de Salida' worksheet is open, showing a table of properties for an aqueous phase stream. The 'Energy Stream: Energía' dialog box is also open, showing its properties.

Worksheet	Stream Name	Agua de Salida	Aqueous Phase
Conditions	Vapour / Phase Fraction	0,0000	1,0000
Properties	Temperature [C]	99,24	99,24
Composition	Pressure [bar]	1,014	1,014
Oil & Gas Feed	Molar Flow [kgmole/h]	5,551e-002	5,551e-002
Petroleum Assay	Mass Flow [kg/h]	1,000	1,000
K Value	Std Ideal Liq Vol Flow [m3/h]	1,002e-003	1,002e-003
User Variables	Molar Enthalpy [kcal/kgmole]	-6,702e+004	-6,702e+004
Notes	Molar Entropy [kJ/kgmole-C]	71,08	71,08
Cost Parameters	Heat Flow [kcal/h]	-3720	-3720
Normalized Yields	Liq Vol Flow @Std Cond [m3/h]	9,854e-004	9,854e-004
	Fluid Package	Basis-1	
	Utility Type		

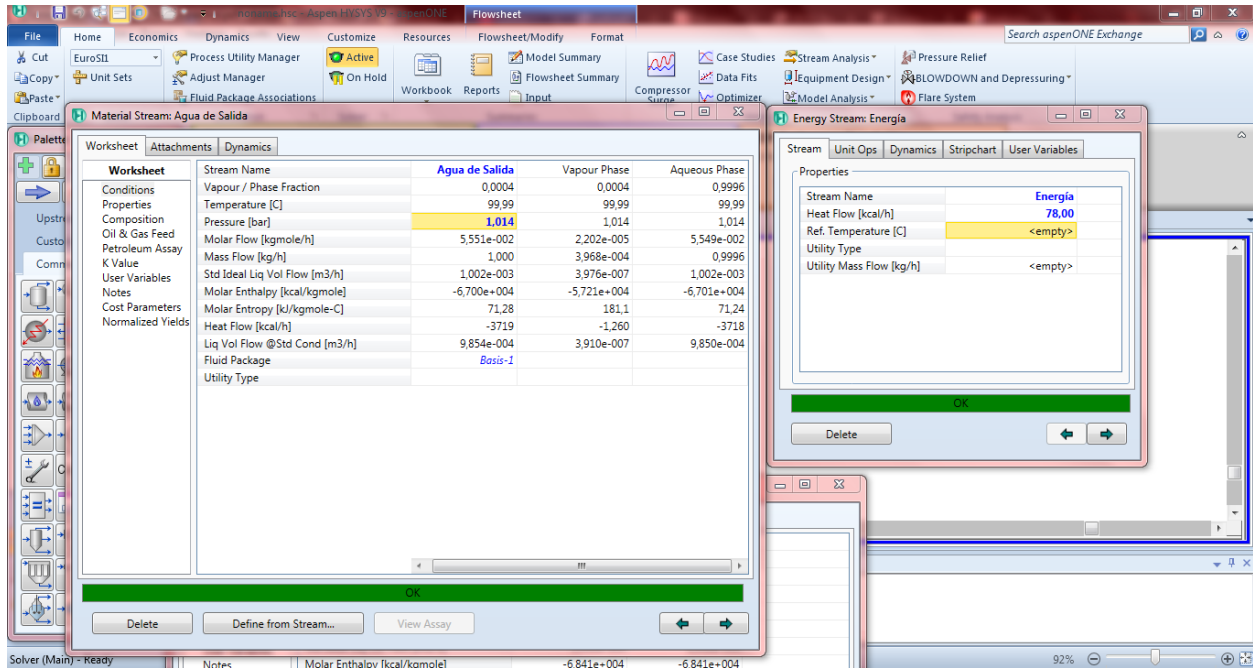
  

Stream	Unit Ops	Dynamics	Stripchart	User Variables
Properties				
Stream Name	Energía			
Heat Flow [kcal/h]	77,00			
Ref. Temperature [C]	<empty>			
Utility Type	<empty>			
Utility Mass Flow [kg/h]	<empty>			

**Nota.** Se determina el comportamiento del agua según la adición de una energía proporcionada.

**Figura 36.**

*Tabla datos agua de salida con cambio de fase*



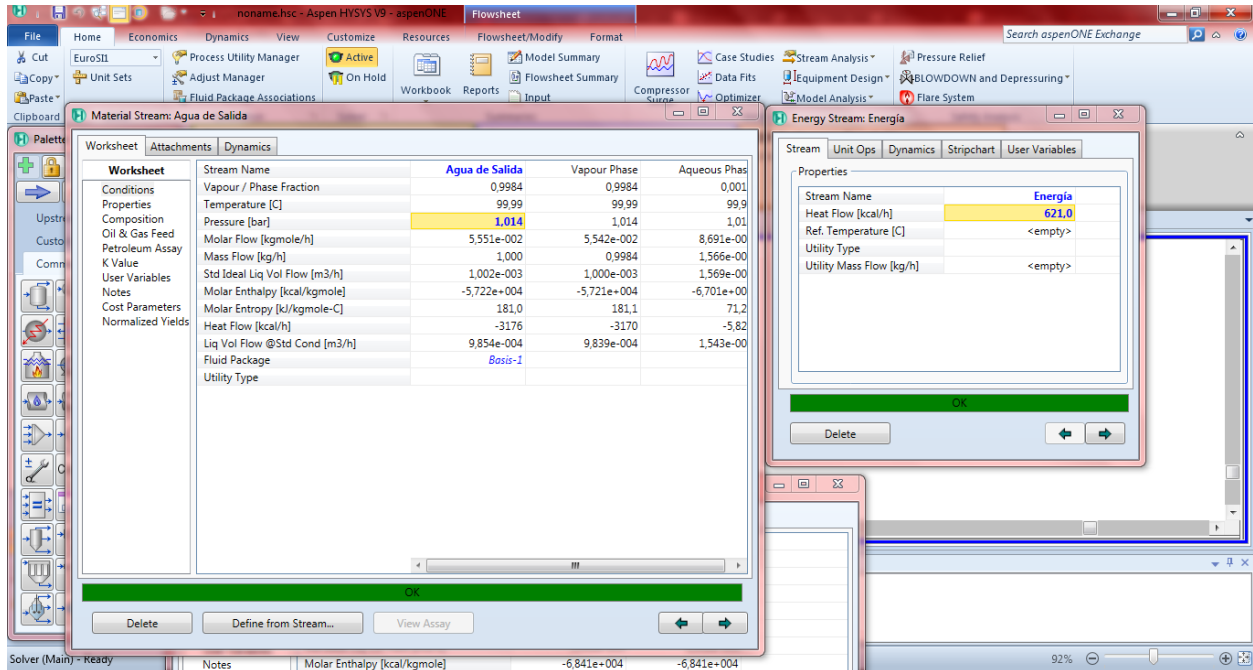
**Nota.** Se determino la energía necesaria para producir el cambio de fase del agua.

Posteriormente se buscó determinar cuál es la energía necesaria para encontrar un equilibrio de fases, 78kcal/h fue la energía necesaria para encontrar la primera fracción de fase vapor.

Posteriormente se estimó que 621kcal/h es la última medida para encontrar un equilibrio de fases

**Figura 37.**

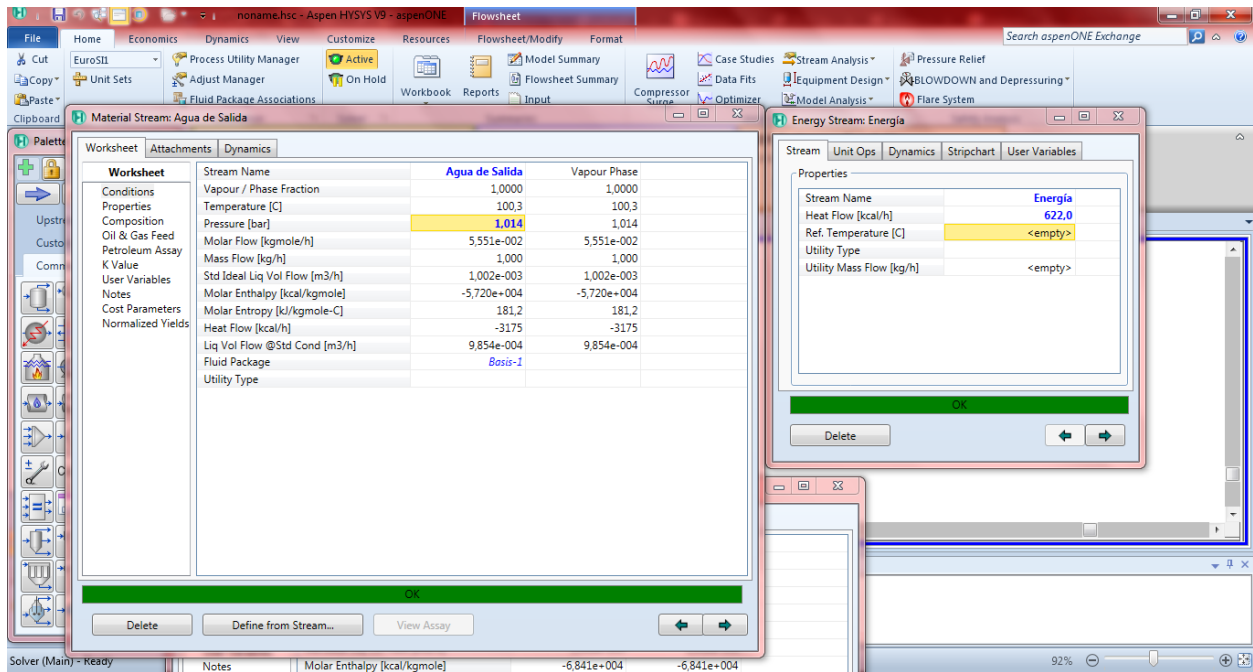
Tabla datos agua de salida con calidad aproximada de 1



**Nota.** Se determino la energía necesaria para que el agua presentara dos fases en donde la calidad fuera menor a 1

**Figura 38.**

*Tabla datos agua de salida en fase vapor*



**Nota.** Se encontró la energía necesaria para obtener agua en fase vapor.

Únicamente se planteó a una presión y se consideró el proceso isobárico, puesto que la simulación es más efectiva y permite comprender el funcionamiento del generador de vapor, para considerar en nuestro caso el programa considera que se necesitan 614kcal/h para generar un vapor saturado.

## ANEXO 2

### RECOMENDACIONES

Para posteriores tesis se recomienda seguir las siguientes pautas, referencias y opciones para evitar el incumplimiento de objetivos o falta de información bibliográfica, de igual manera también se pueden generar un análisis o enfoque diferente permitiendo comparar la metodología actual, permitiendo validar y analizar los porcentajes de diferencia.

Se recomienda emplear constantes cinéticas para cada reacción, energías de activación, con el objetivo de comprender si se presentan variaciones en la generación de compuestos como CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O o la generación de otros compuestos químicos, pero un factor a analizar es la temperatura a la cual se está llevando a cabo la combustión, llamada en la documentación temperatura de la llama adiabática.

Se permite la libertad de analizar la generación de compuestos azufrados, para analizar el impacto de estos compuestos a la huella de carbono y su relación con el CO<sub>2</sub> generado. En la bibliografía este valor es determinado como un porcentaje menor a 0,01% aproximado, en el documento se consideró que no se genera azufre principalmente porque en los datos no se mide el azufre presente en el gas natural y tampoco se conoce en que compuestos está presente.

Para el programa se recomienda que se planteen las fórmulas o ecuaciones en Excel, para permitir un cambio en el lenguaje de programación. Puesto que para el documento se busca manejar posteriormente otros lenguajes de programación, entre las posibles opciones son C# C++ y bases de datos como XAMPP para permitir implementar el programa en otros pozos petroleros y tener un acceso mediante internet.

De igual manera si se conocen las medidas o el generador de vapor considera la transferencia de energía, coeficiente de energía. De igual manera determinar la eficiencia del quipo, un análisis que se evidencio fue que los generadores de vapor pirotubulares presentan mayor eficiencia dado a que la energía debe pasar primero por el agua y la mayor pérdida de energía se da en las uniones o soldadura del equipo.