

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO
FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA, INFORMÁTICA
Y MECÁNICA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA ELÉCTRICA



TESIS

**ESTUDIO DE INGENIERIA DE LA CONVERSION ENERGETICA DE UNA
CENTRAL TERMICA A BIOGAS, APROVECHANDO LOS RESIDUOS SOLIDOS
ORGANICOS, CUSCO 2022**

PRESENTADO POR:

- Br. Rodrigo Angulo Sanchez
- Br. Luis Brady Bravo Lara

**PARA OPTAR AL TITULO PROFESIONAL DE
INGENIERO ELECTRICISTA**

ASESOR:

Dr. Ing. Edgar Zacarias Alarcon Valdivia

CUSCO-PERÚ

2023

INFORME DE ORIGINALIDAD

(Aprobado por Resolución Nro.CU-303-2020-UNSAAC)

El que suscribe, Asesor del trabajo de investigación/tesis titulada: Estudio de Ingeniería de la conversión energética de una central térmica a biogas, aprovechando los residuos sólidos orgánicos, Cusco 2022.

presentado por: Rodrigo Angulo Sanchez con DNI Nro.: 70400600 presentado por: Luis Brady Bravo Lara con DNI Nro.: 45265238 para optar el título profesional/grado académico de Ingeniero Electricista

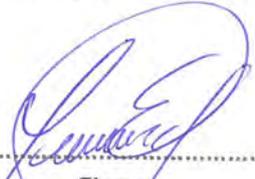
Informo que el trabajo de investigación ha sido sometido a revisión por 2 veces, mediante el Software Antiplagio, conforme al Art. 6° del **Reglamento para Uso de Sistema Antiplagio de la UNSAAC** y de la evaluación de originalidad se tiene un porcentaje de 10%.

Evaluación y acciones del reporte de coincidencia para trabajos de investigación conducentes a grado académico o título profesional, tesis

Porcentaje	Evaluación y Acciones	Marque con una (X)
Del 1 al 10%	No se considera plagio.	<input checked="" type="checkbox"/>
Del 11 al 30 %	Devolver al usuario para las correcciones.	<input type="checkbox"/>
Mayor a 31%	El responsable de la revisión del documento emite un informe al inmediato jerárquico, quien a su vez eleva el informe a la autoridad académica para que tome las acciones correspondientes. Sin perjuicio de las sanciones administrativas que correspondan de acuerdo a Ley.	<input type="checkbox"/>

Por tanto, en mi condición de asesor, firmo el presente informe en señal de conformidad y adjunto la primera página del reporte del Sistema Antiplagio.

Cusco, 13 de febrero de 2024


Firma
Post firma Dr. Ing. Edgar Z. Alarcón Valdivia
Nro. de DNI 23821021
ORCID del Asesor 0000-0002-9168-7535

Se adjunta:

1. Reporte generado por el Sistema Antiplagio.
2. Enlace del Reporte Generado por el Sistema Antiplagio: oid: 27259:331135923 ✓

NOMBRE DEL TRABAJO

ESTUDIO DE INGENIERÍA DE LA CONVERSIÓN ENERGÉTICA DE UNA CENTRAL TÉRMICA A BIOGÁS, APROVECHANDO LOS

AUTOR

RODRIGO & LUIS ANGULO & BRAVO

RECUENTO DE PALABRAS

68119 Words

RECUENTO DE CARACTERES

344062 Characters

RECUENTO DE PÁGINAS

320 Pages

TAMAÑO DEL ARCHIVO

28.4MB

FECHA DE ENTREGA

Feb 13, 2024 6:39 PM GMT-5

FECHA DEL INFORME

Feb 13, 2024 6:46 PM GMT-5**● 10% de similitud general**

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para cada base de datos.

- 9% Base de datos de Internet
- Base de datos de Crossref
- 9% Base de datos de publicaciones
- Base de datos de contenido publicado de Crossref

● Excluir del Reporte de Similitud

- Base de datos de trabajos entregados
- Material citado
- Material bibliográfico
- Material citado

DEDICATORIA

Dedico este trabajo de investigación a Dios por darme la vida, a la Virgen del Carmen y al Señor de Huanca por guiarme, por brindarme la sabiduría y la fortaleza para afrontar nuevos retos y superar los obstáculos.

A mis queridos padres Liberato Angulo Kucho y Teófila Sánchez Araoz por sus consejos y apoyo incondicional.

Rodrigo Angulo Sánchez

Agradecer a la vida por haberme dado la oportunidad de estar entre todos en estos momentos, y así a todo cuanto me dio siendo mis sendas que seguramente me acompañaran en todos los aspectos de mi desarrollo.

Luis Brady Bravo Lara

AGRADECIMIENTO

Quiero expresar un sincero agradecimiento al Ingeniero Edgar Z. Alarcón Valdivia, quien nos guio durante todo el desarrollo de este trabajo especial de grado.

Al Ingeniero Luis Zea, por brindarnos su colaboración y ayuda y también al Ing. Aquilo Casaño, quien me guio intensamente al inicio de mi carrera profesional.

A todos los Ingenieros de la Escuela Profesional de Ingeniería Eléctrica, quienes fueron participes de nuestra preparación académica.

Tesistas

PRESENTACIÓN

Señor Decano de la Facultad de Ingeniería: Eléctrica, Electrónica, Informática y Mecánica de la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco.

Señores Docentes miembros del jurado, según al cumplimiento de las normas establecidas para optar al título profesional de ingeniero electricista ponemos a vuestra consideración el trabajo de tesis intitulada **“ESTUDIO DE LA CONVERSIÓN ENERGÉTICA DE UNA CENTRAL TÉRMICA A BIOGÁS, APROVECHANDO LOS RESIDUOS SOLIDOS ORGÁNICOS URBANOS, CUSCO 2022”**, con el objetivo de optar al título profesional de ingeniero electricista. Queremos expresar nuestra cordial gratitud, a nuestro asesor de tesis Dr. Edgar Alarcón Valdivia, por su completo apoyo y disposición en el avance de la tesis, así mismo a nuestros dictaminantes Ingeniero Ronald Dueñas Ponce de León y el Ingeniero Mario Gonzáles Vargas por su tolerancia y comprensión.

Esperando que los señores, replicantes y miembros del jurado, nos hagan llegar sus observaciones, sugerencias y críticas a cerca del presente trabajo, que por supuesto servirán para mejorar y permitirnos adquirir mayores experiencias.

Tesistas

INTRODUCCIÓN

La tesis de proyecto de ingeniería presenta un estudio técnico de conversión energética y equipamiento de una central térmica de biogás que está destinada a la utilización de residuos sólidos orgánicos urbanos como combustible en el diseño de una central térmica de biogás para la generación de energía eléctrica, estos residuos son muy abundante de donde se recolecta de los diferentes distritos de Cusco, San Sebastián, San Jerónimo, Wanchaq, Santiago, Ccorca, Poroy y Saylla de la ciudad y provincia del Cusco.

Los Residuos Sólidos Orgánicos como gas comburente constituyen uno de los recursos energéticos más económicos y sostenibles actualmente, ya que la emisión de los gases nocivos de metano, CO₂, NO; son perjudiciales en cantidades mayores para una contaminación ambiental que produzca su utilización.

A continuación, se resume los cinco capítulos que se desarrolló en el trabajo de tesis.

CAPÍTULO I. En este capítulo se da a conocer el ámbito geográfico, planteamiento del problema, objetivos, justificación del estudio, alcances y limitaciones, antecedentes, variables, población, muestra y finalmente la matriz de consistencia.

CAPÍTULO II. Presenta los fundamentos teóricos necesario para el desarrollo del trabajo de tesis, conceptos de generación eléctrica de residuos sólidos orgánicos urbanos, composición y tratamiento de los residuos sólidos urbanos para la generación eléctrica, descripción de los diferentes equipos para la central térmica de biogás.

CAPÍTULO III. Se realiza la estimación y la proyección de los residuos sólidos orgánicos generados del 2020 al 2030 en los distritos de Cusco, San Sebastián, San Jerónimo, Wanchaq, Santiago, Ccorca, Poroy y Saylla teniendo como referencia el estudio de caracterización de los diferentes distritos mencionados y posteriormente se efectúa la generación eléctrica proyectada.

CAPÍTULO IV. Se desarrolla y determina la conversión energética mediante la cuantificación del biogás recuperada de los residuos sólidos orgánicos generados diariamente realizando el balance termodinámico de ciclo combinado para luego realizar el dimensionamiento e implementación de los instrumentos, equipos y elementos generales de la central termoeléctrica definidos a partir de los parámetros o características técnicas obtenidos así también desarrollar la estimación de energía generada a partir de la materia orgánica obtenida.

CAPÍTULO V. Se presenta el impacto ambiental el cual es la principal consecuencia del aprovechamiento y utilización de los recursos de materia prima de residuos sólidos orgánicos, donde los gases a la salida de la central térmica de ciclo combinado son expulsados a la atmósfera.

En conclusión, se afirma que la conversión energética obtenida a partir de la cantidad de biogás recuperado como materia prima del relleno sanitario de Haqaira es viable, obteniendo la producción de energía eléctrica a través del biogás generado en los distritos de la provincia del Cusco, donde el fluido gaseoso en estado reversible, permanece isoentrópicamente en el sistema de transferencia de calor.

RESUMEN

En esta tesis de proyecto de ingeniería se realizó el planteamiento sobre el manejo y producción de biogás generado por los residuos sólidos orgánicos generados de los distritos de Cusco, San Sebastián, San Jerónimo, Santiago, Wanchaq, Ccorca, Poroy y Saylla de la provincia del Cusco, el cual tiene como finalidad la generación de energía eléctrica llevando a cabo un perfil de instrumentación, ejecución de una central termoeléctrica con un modelo, método y diseño establecido.

El método del estudio de ingeniería fue la modelación, estimación y selección de los instrumentos de una central térmica en donde los residuos sólidos orgánicos generados en el relleno sanitario de Haqira del Cusco produjeron el biogás determinado para su aprovechamiento renovable utilizando la técnica de recopilación y análisis de datos secundarios.

También se llegó a la conclusión, que, con una disposición constante y controlada de los residuos sólidos orgánicos en un relleno sanitario se podría generar 300 kW en un periodo de 10 años (2020–2030) según el modelo Scholl Canyon, considerando una eficiencia en un bajo, medio y alto régimen de descomposición del elemento orgánico.

Palabras Clave: Residuos Sólidos Orgánicos, Caudal, Biogás, Potencia Eléctrica

ABSTRACT

In this engineering project thesis, the approach was made on the management and production of biogas generated by organic solid waste generated from the districts of Cusco, San Sebastián, San Jerónimo, Santiago, Wanchaq, Ccorca, Poroy and Saylla of the province of Cusco, whose purpose is the generation of electrical energy carrying out an instrumentation profile, execution of a thermoelectric plant with an established model, method and design.

The method of the engineering study was the modeling, estimation and selection of the instruments of a thermal power plant where the organic solid waste generated in the Haquira landfill in Cusco produced the biogas determined for its renewable use using the collection and analysis technique. of secondary data.

It was also concluded that, with a constant and controlled disposal of organic solid waste in a landfill, 300 kW could be generated in a period of 10 years (2020-2030) according to the Scholl Canyon model, considering an efficiency in a low, medium and high decomposition regime of the organic element.

Keywords: Organic Solid Waste, Flow, Biogas, Electrical Power

ÍNDICE GENERAL

AGRADECIMIENTO.....	III
PRESENTACIÓN.....	IV
INTRODUCCIÓN.....	V
RESUMEN.....	VII
ÍNDICE GENERAL.....	IX
ÍNDICE DE FIGURAS.....	XVII
ÍNDICE DE TABLAS.....	XXI
COMPOSTAJE.....	XXV
CAPÍTULO I.....	1
ASPECTOS GENERALES.....	1
1.1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.2. ÁMBITO GEOGRÁFICO.....	1
1.3. EL PROBLEMA.....	2
1.3.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	2
1.3.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.....	4
1.3.3. PROBLEMAS ESPECÍFICOS.....	4
1.4. OBJETIVOS.....	4
1.4.1. OBJETIVO GENERAL.....	4
1.4.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	4
1.5. JUSTIFICACIÓN DEL ESTUDIO.....	5
1.5.1. JUSTIFICACIÓN TÉCNICO.....	5
1.5.2. JUSTIFICACIÓN ECONÓMICO.....	6
1.5.3. JUSTIFICACIÓN SOCIAL.....	6
1.5.4. JUSTIFICACIÓN ACADÉMICA.....	7
1.6. ALCANCES Y LIMITACIONES.....	7
1.6.1. ALCANCES.....	7
1.6.2. LIMITACIONES.....	8
1.6.3. ANTECEDENTES.....	9
1.6.4. BASE LEGAL.....	10
1.7. OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES.....	10
1.8. METODOLOGÍA.....	11
1.8.1. CARACTERÍSTICAS DEL ESTUDIO.....	11
1.8.1.1. TIPO DE ESTUDIO.....	11
1.8.1.2. NIVEL DE ESTUDIO.....	11
1.8.1.3. MÉTODO DEL ESTUDIO.....	11
1.8.1.4. DISEÑO DEL ESTUDIO.....	12
1.8.2. POBLACIÓN Y MUESTRA.....	12
1.8.3. TÉCNICAS Y RECOLECCIÓN DE DATOS.....	12
1.8.4. PROCESAMIENTO DE DATOS.....	14
1.8.4.1. ANÁLISIS DE DATOS.....	14
1.9. MATRIZ DE CONSISTENCIA.....	15
2. CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO.....	17
2.1. BIOMASA COMO FUENTE DE BIOGÁS PARA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA.....	17
2.1.1. LA BIOMASA COMO FUENTE DE BIOGÁS.....	17
2.1.2. RESIDUOS SÓLIDOS.....	17
2.1.2.1. CLASIFICACIÓN POR SU NATURALEZA.....	18
2.1.3. BIOGÁS EN RESIDUOS SÓLIDOS.....	18
2.1.3.1. COMPOSICIÓN DE LOS RESIDUOS SOLIDOS.....	18
2.1.3.2. CARACTERIZACIÓN DE LOS RESIDUOS SOLIDOS ORGÁNICOS.....	19
2.1.4. GENERACIÓN DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS.....	23

2.1.4.1.	CANTIDAD Y GENERACIÓN DE RESIDUOS SOLIDOS PRODUCIDOS EN EL DISTRITO DEL CUSCO	23
2.1.4.2.	COMPOSICIÓN FÍSICA DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS DEL DISTRITO DEL CUSCO	25
2.1.4.3.	CANTIDAD Y GENERACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS PRODUCIDOS EN EL DISTRITO DE SANTIAGO.....	26
2.1.4.4.	COMPOSICIÓN FÍSICA DE LOS RESIDUOS SOLIDOS DEL DISTRITO DE SANTIAGO	27
2.1.4.5.	CANTIDAD Y GENERACIÓN DE RESIDUOS SOLIDOS EN EL DISTRITO DE WANCHAQ.....	29
2.1.4.6.	COMPOSICIÓN FÍSICA DE LOS RESIDUOS SOLIDOS DEL DISTRITO DE WANCHAQ.....	30
2.1.4.7.	CANTIDAD Y GENERACIÓN DE RESIDUOS SOLIDOS PRODUCIDOS EN EL DISTRITO DE SAN SEBASTIÁN	31
2.1.4.8.	COMPOSICIÓN FÍSICA DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS DE SAN SEBASTIÁN.....	32
2.1.4.9.	CANTIDAD Y GENERACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS PRODUCIDOS EN EL DISTRITO DE SAN JERÓNIMO	33
2.1.4.10.	COMPOSICIÓN FÍSICA DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS DEL DISTRITO DE SAN JERÓNIMO	34
2.1.4.11.	CANTIDAD Y GENERACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS PRODUCIDOS EN EL DISTRITO DE CCORCA.....	34
2.1.4.12.	COMPOSICIÓN FÍSICA DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS DEL DISTRITO DE CCORCA	35
2.1.4.13.	CANTIDAD Y GENERACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS PRODUCIDOS EN EL DISTRITO DE POROY.....	36
2.1.4.14.	COMPOSICIÓN FÍSICA DE LOS RESIDUOS SOLIDOS DEL DISTRITO DE POROY	37
2.1.4.15.	CANTIDAD Y GENERACIÓN DE RESIDUOS SOLIDOS PRODUCIDOS EN EL DISTRITO DE SAYLLA	37
2.1.4.16.	COMPOSICIÓN FÍSICA DE LOS RESIDUOS SOLIDOS DEL DISTRITO DE SAYLLA.....	38
2.1.5.	PODER CALORÍFICO DE BIOGÁS DE RESIDUOS SÓLIDOS	40
2.1.6.	DETERMINACIÓN DEL PODER CALORÍFICO INFERIOR.....	40
2.1.7.	MANEJO, ALMACENAMIENTO Y ACONDICIONAMIENTO DE RESIDUOS SÓLIDOS	45
2.1.8.	SISTEMA DE RECOLECCIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS	46
2.1.9.	SISTEMA DE SELECCIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS ORGÁNICOS	47
2.1.9.1.	TRATAMIENTO DE RESIDUOS SÓLIDOS.....	47
2.2.	FUNDAMENTOS DE LA GENERACIÓN DEL BIOGÁS DE RESIDUOS SÓLIDOS.....	47
2.2.1.	ANTECEDENTES DE LA UTILIZACIÓN DEL BIOGÁS DE RESIDUOS SÓLIDOS	47
2.2.2.	PROCESOS DE BIODIGESTIÓN.....	49
2.2.3.	FACTORES DEL PROCESO DE PRODUCCIÓN DE BIOGÁS	50
2.2.3.1.	TEMPERATURA.....	51
2.2.3.2.	POTENCIAL DE HIDROGENO(PH)	52
2.2.3.3.	NUTRIENTES.....	52
2.2.3.4.	TOXICIDAD	52
2.2.4.	ALMACENAJE DEL BIOGÁS	53
2.2.4.1.	DIGESTOR	53
2.2.4.2.	BIODIGESTOR.....	53
2.2.4.3.	TIPOS DE BIODIGESTORES.....	54
2.2.5.	MODELO PARA ESTIMAR LA GENERACIÓN DE BIOGÁS EN EL RELLENO SANITARIO.....	57
2.2.5.1.	MODELO SCHOLL CANYON.....	57
2.2.5.2.	GENERACIÓN DE DIÓXIDO DE CARBONO COMO MATERIA ORGÁNICA.....	63

2.3.	GENERACIÓN DE ENERGÍA A PARTIR DE LA DESCOMPOSICIÓN ORGÁNICA DE LOS RESIDUOS SOLIDOS ORGÁNICOS URBANOS	63
2.3.1.	POTENCIA ELÉCTRICA.....	63
2.3.1.1.	POTENCIA DISPONIBLE Y POTENCIA A INSTALAR.....	64
2.3.2.	FUNDAMENTOS TERMODINÁMICOS DE LA CENTRAL TÉRMICA.....	64
2.3.2.1.	SEGUNDA LEY DE LA TERMODINÁMICA	64
2.3.2.2.	MÁQUINAS TÉRMICAS.....	66
2.3.2.3.	EFICIENCIA TÉRMICA	68
2.3.2.4.	CICLO DE CARNOT.....	68
2.4.	CICLO COMBINADO PARA EL APROVECHAMIENTO DE LA CENTRAL TÉRMICA	70
2.4.1.	PARÁMETROS CARACTERÍSTICOS DE UN CICLO COMBINADO	72
2.4.2.	CARACTERÍSTICAS DEL CICLO COMBINADO.....	73
2.4.3.	VENTAJAS DE UNA CENTRAL DE CICLO COMBINADO	74
2.4.4.	CICLO COMBINADO GAS-VAPOR.....	75
2.4.5.	COMPONENTES Y ESTRUCTURACIÓN DE UNA CENTRAL TÉRMICA DE CICLO COMBINADO.....	76
2.4.6.	CONFIGURACIONES DE UN CICLO COMBINADO	78
2.4.6.1.	CICLO COMBINADO DE CONFIGURACIÓN MONOEJE.....	78
2.4.6.2.	CICLO COMBINADO DE CONFIGURACIÓN MULTIEJE 1X1	80
2.4.6.3.	CICLO COMBINADO DE CONFIGURACIÓN MULTIEJE 2X1	81
2.4.6.4.	CICLO COMBINADO DE CONFIGURACIÓN MULTIEJE 3X1	82
2.4.7.	RENDIMIENTO DE LA CENTRAL DE CICLO COMBINADO GAS-VAPOR..	83
2.4.8.	CICLO BRAYTON	84
2.4.8.1.	CICLO ABIERTO	85
2.4.8.2.	CICLO CERRADO	85
2.4.8.3.	CICLO DE BRAYTON IDEAL.....	85
2.4.8.4.	CICLO DE BRAYTON REAL	87
2.4.9.	TURBINAS DE GAS	90
2.4.9.1.	ELEMENTOS DE LA TURBINA DE GAS.....	90
2.4.10.	CONFIGURACIONES ESPECIALES PARA EL MEJORAMIENTO DEL CICLO BRAYTON.....	100
2.4.10.1.	CICLO BRAYTON REGENERATIVO	100
2.4.10.2.	CICLO BRAYTON CON INTERENFRIAMIENTO	103
2.4.10.3.	CICLO BRAYTON DE RECALENTAMIENTO INTERMEDIO.....	104
2.4.10.4.	INTERENFRIAMIENTO, RECALENTAMIENTO Y REGENERACIÓN EN UN CICLO BRAYTON	105
2.4.10.5.	PARÁMETROS CONSIDERANDO EL CICLO BRAYTON CON INTERENFRIAMIENTO, RECALENTAMIENTO Y REGENERACIÓN.....	106
2.4.11.	CICLO RANKINE	107
2.4.12.	CICLO VAPOR.....	107
2.4.13.	CICLO RANKINE REAL.....	110
2.4.13.1.	EFICIENCIA ISOENTRÓPICA	111
2.4.13.2.	ELEMENTOS PRINCIPALES QUE CONFORMAN EL CICLO DE VAPOR(RANKINE)	112
2.4.14.	MEJORAS DEL FUNCIONAMIENTO Y INCREMENTO DE LA EFICIENCIA DEL CICLO RANKINE.....	113
2.4.14.1.	SOBRECALENTAMIENTO	113
2.4.14.2.	RECALENTAMIENTO	114
2.4.14.3.	CICLO REGENERATIVO	116
2.5.	EQUIPAMIENTO DE LA CENTRAL TÉRMICA DE RESIDUOS SOLIDOS URBANOS.....	117

2.5.1.	PARÁMETROS CARACTERÍSTICOS DE UNA CALDERA RECUPERADORA DE VAPOR	118
2.5.2.	ELEMENTOS QUE CONFORMAN UNA CALDERA DE RECUPERACIÓN DE CALOR.....	119
2.5.3.	CLASIFICACIÓN DE UNA CALDERA DE RECUPERACIÓN DE CALOR ...	121
2.5.3.1.	CALDERA CON POSTCOMBUSTIÓN	122
2.5.3.2.	CALDERA SIN POSTCOMBUSTIÓN	122
2.5.3.3.	CALDERA CON CIRCULACIÓN NATURAL	122
2.5.3.4.	CALDERA CON CIRCULACIÓN FORZADA	122
2.5.3.5.	CALDERA DE RECUPERACIÓN DE CALOR HORIZONTAL.....	122
2.5.3.6.	CALDERA DE RECUPERACIÓN DE CALOR VERTICAL.....	123
2.5.3.7.	CALDERAS PIROTUBULARES	124
2.5.3.8.	CALDERAS ACUOTUBULARES.....	125
2.5.4.	CONFIGURACIÓN EN EL NIVEL DE PRESIÓN DE UNA CALDERA RECUPERADORA DE CALOR	126
2.5.4.1.	CALDERA DE UN SOLO NIVEL DE PRESIÓN.....	127
2.5.4.2.	CALDERA DE DOS NIVELES DE PRESIÓN	129
2.5.4.3.	CALDERA DE TRES NIVELES DE PRESIÓN	131
2.5.4.4.	CALDERA DE TRES NIVELES DE PRESIÓN CON RECALENTAMIENTO EN UN CICLO COMBINADO	132
2.5.5.	TURBINA DE VAPOR.....	132
2.5.6.	CLASIFICACIÓN DE LA TURBINA DE VAPOR.....	134
2.5.6.1.	TURBINA DE ACCIÓN	134
2.5.6.2.	TURBINA DE REACCIÓN	135
2.5.6.3.	TURBINA MONOETAPA	136
2.5.6.4.	TURBINA MULTIETAPA	136
2.5.6.5.	TURBINA DE FLUJO AXIAL	137
2.5.6.6.	TURBINA DE FLUJO RADIAL.....	137
2.5.6.7.	TURBINA DE CONTRAPRESIÓN.....	137
2.5.6.8.	TURBINA DE CONDENSACIÓN	137
2.5.6.9.	TURBINA DE ESCAPE LIBRE	137
2.5.6.10.	TURBINA CON O SIN EXTRACCIÓN.....	137
2.5.7.	EFICIENCIA DE UNA TURBINA DE VAPOR.....	138
2.5.8.	CONDENSADOR DE UN CICLO DE VAPOR	139
2.5.8.1.	PARÁMETROS CARACTERÍSTICOS DE UN CONDENSADOR DE VAPOR.....	141
2.5.8.2.	DESCRIPCIÓN CONSTRUCTIVA DE UN CONDENSADOR DE VAPOR	142
2.5.8.3.	CLASIFICACIÓN DE CONDENSADORES DE VAPOR.....	144
2.5.9.	AEROCONDENSADOR	147
2.5.9.1.	AEROCONDENSADOR DE CONVECCIÓN FORZADA.....	147
2.5.9.2.	AEROCONDENSADOR DE CONVECCIÓN INDUCIDA.....	148
2.5.10.	BOMBAS DEL CICLO AGUA-VAPOR	148
2.5.10.1.	PARÁMETROS CARACTERÍSTICOS DE UNA BOMBA	148
2.5.10.2.	CLASIFICACIÓN DE UNA BOMBA DE AGUA	149
2.5.11.	GENERADOR ELÉCTRICO.....	150
2.5.11.1.	PARÁMETROS CARACTERÍSTICOS DE UN GENERADOR ELÉCTRICO	151
2.5.11.2.	TIPOS DE GENERADORES ELÉCTRICO	152
2.5.11.3.	GENERADOR SÍNCRONO.....	152
2.5.11.4.	GENERADOR ASÍNCRONO (DE INDUCCIÓN).....	154
2.5.11.5.	TIPOS DE GENERADORES ASÍNCRONOS.....	155
2.5.12.	SISTEMA DE DEPURACIÓN DE GASES DE COMBUSTIÓN.....	155
2.5.12.1.	PRECIPITADORES ELECTROESTÁTICOS	156
2.5.12.2.	TIPOS DE PRECIPITADOR ELECTROESTÁTICO.....	157
2.5.12.3.	FILTROS DE LECHO GRANULAR.....	157
2.5.12.4.	CICLÓN.....	159
2.5.12.5.	FILTROS DE MANGAS	160
2.5.12.6.	MULTICICLÓN	161
2.5.13.	TRATAMIENTO DE AGUAS	161

2.5.13.1.	SISTEMA DE DESINFECCIÓN Y CONTROL DE CALIDAD DEL AGUA.....	161
2.5.14.	CRITERIOS DE SELECCIÓN DE UNA GENERADOR DE VAPOR Y RECUPERADOR DE CALOR	163
2.5.14.1.	POTENCIA DE LA CALDERA RECUPERADORA DE CALOR.....	163
2.5.14.2.	TIPO DE CALDERA RECUPERADORA DE CALOR.....	163
2.5.14.3.	EFICIENCIA DEL FABRICANTE DE LA CALDERA RECUPERADORA DE CALOR.....	163
2.5.14.4.	EL COMBUSTIBLE EMPLEADA EN UNA CALDERA RECUPERADORA DE CALOR.....	163
2.5.15.	CRITERIOS DE SELECCIÓN DE UNA TURBINA DE GAS	164
2.5.15.1.	CONDICIONES AMBIENTALES.....	164
2.5.15.2.	POTENCIA NOMINAL REQUERIDA DE LA TURBINA DE GAS.....	164
2.5.15.3.	TIPO DE COMBUSTIBLE DE LA TURBINA DE GAS.....	164
2.5.15.4.	ESPECIFICACIONES DE LA CÁMARA DE COMBUSTIÓN	164
2.5.15.5.	NIVELES DE EMISIONES	165
2.5.16.	CRITERIOS DE SELECCIÓN DE UNA GENERADOR ELÉCTRICO	165
2.5.16.1.	POTENCIA NOMINAL REQUERIDA DEL GENERADOR ELÉCTRICO	165
2.5.16.2.	EFICIENCIA DE FABRICANTE DEL GENERADOR ELÉCTRICO	165
2.5.17.	CRITERIOS DE SELECCIÓN DE UNA TURBINA DE VAPOR.....	166
2.5.17.1.	VELOCIDAD DE GIRO DE LA TURBINA DE VAPOR	166
2.5.17.2.	PRESIÓN DE VAPOR DE LA TURBINA.....	166
2.5.17.3.	TEMPERATURA DE VAPOR DE LA TURBINA	166
2.5.17.4.	PRESIÓN A LA SALIDA DE LA TURBINA DE VAPOR	167
2.5.18.	CRITERIOS DE SELECCIÓN DE UN CONDENSADOR	167
2.5.18.1.	ENTRADA DE VAPOR.....	167
2.5.18.2.	NÚMERO DE CUERPOS	167
2.5.18.3.	NÚMERO DE PASOS.....	168
2.5.19.	CRITERIOS DE SELECCIÓN DE UNA BOMBA DE AGUA	168
2.5.19.1.	CAUDAL REQUERIDO DE LA BOMBA.....	168
2.5.19.2.	TIPO DE FLUIDO.....	168
2.5.19.3.	TEMPERATURA DE BOMBEO	168
2.5.19.4.	PRESIÓN DE FLUIDO	168
3.	CAPÍTULO III: ESTIMACIÓN, PROYECCIÓN Y GENERACIÓN ELÉCTRICA DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS GENERADOS EN LA REGIÓN DEL CUSCO	169
3.1.	GENERACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS DE LA REGIÓN DEL CUSCO.....	169
3.1.1.	ESTIMACIÓN Y PROYECCIÓN DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS SEGÚN LA POBLACIÓN DEL DISTRITO DEL CUSCO	169
3.1.1.1.	PROYECCIÓN DE LA GENERACIÓN PER CÁPITA DEL DISTRITO DEL CUSCO	170
3.1.1.2.	ESTIMACIÓN Y PROYECCIÓN DE GENERACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS ORGÁNICOS DEL DISTRITO DEL CUSCO.....	171
3.1.2.	ESTIMACIÓN Y PROYECCIÓN DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS SEGÚN LA POBLACIÓN DEL DISTRITO DE SANTIAGO.....	172
3.1.2.1.	PROYECCIÓN DE LA GENERACIÓN PER CÁPITA DEL DISTRITO DE SANTIAGO	173
3.1.2.2.	ESTIMACIÓN DE GENERACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS ORGÁNICOS DEL DISTRITO DE SANTIAGO.....	173
3.1.3.	ESTIMACIÓN Y PROYECCIÓN DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS SEGÚN LA POBLACIÓN DEL DISTRITO DEL WANCHAQ.....	175
3.1.3.1.	PROYECCIÓN DE LA GENERACIÓN PER CÁPITA DEL DISTRITO DEL WANCHAQ.....	177
3.1.3.2.	ESTIMACIÓN DE LA GENERACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS ORGÁNICOS DEL DISTRITO DE WANCHAQ	178
3.1.4.	ESTIMACIÓN Y PROYECCIÓN DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS SEGÚN LA POBLACIÓN DEL DISTRITO DE SAN SEBASTIÁN	180
3.1.4.1.	PROYECCIÓN DE LA GENERACIÓN PER CÁPITA DEL DISTRITO DE SAN SEBASTIÁN.....	181

3.1.4.2.	ESTIMACIÓN DE GENERACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS ORGÁNICOS DEL DISTRITO DE SAN SEBASTIÁN	181
3.1.5.	ESTIMACIÓN Y PROYECCIÓN DE LOS RESIDUOS SOLIDOS SEGÚN LA POBLACION DEL DISTRITO DE SAN JERÓNIMO	182
3.1.5.1.	PROYECCIÓN DE LA GENERACIÓN PER CÁPITA DEL DISTRITO DE SAN JERÓNIMO	183
3.1.5.2.	ESTIMACIÓN DE GENERACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS ORGÁNICOS DEL DISTRITO DE SAN JERÓNIMO	184
3.1.6.	ESTIMACIÓN Y PROYECCIÓN DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS SEGÚN LA POBLACIÓN DE LOS DISTRITOS CERCANOS DE LA REGIÓN DEL CUSCO	185
3.1.6.1.	ESTIMACIÓN Y PROYECCIÓN DE LOS RESIDUOS SOLIDOS SEGÚN LA POBLACIÓN EN EL DISTRITO DE SAYLLA.....	185
3.1.7.	GENERACIÓN TOTAL DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS	190
3.2.	GENERACIÓN DE BIOGÁS DE LA DESCOMPOSICIÓN DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS	192
3.2.1.	DETERMINACIÓN DEL FACTOR DE CORRECCIÓN PARA EL METANO .	192
3.2.2.	DETERMINACIÓN DEL CARBONO ORGÁNICO DEGRADABLE DEL RESIDUO SOLIDO	194
3.2.3.	DETERMINACIÓN DE LA FRACCIÓN DEL CARBONO ORGÁNICO DEGRADABLE	195
3.2.4.	DETERMINACIÓN DEL POTENCIAL DE GENERACIÓN DEL METANO ..	195
3.2.5.	DETERMINACIÓN DEL BIOGÁS EN EL MODELO SCHOLL CANYON.....	197
3.2.6.	CAUDAL DEL METANO DE LOS RESIDUOS SOLIDOS ORGÁNICOS	198
3.3.	EFICIENCIA DE RECUPERACIÓN DE BIOGÁS.....	203
3.4.	POTENCIA ELÉCTRICA GENERADA A PARTIR DEL BIOGÁS PROVENIENTES DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS	206
4.	CAPITULO IV: PROCESO DE ESTRUCTURACIÓN Y SELECCIÓN DE EQUIPOS PARA LA GENERACIÓN ELÉCTRICA A PARTIR DEL BIOGÁS DE RESIDUOS SÓLIDOS ORGÁNICOS URBANOS.....	208
4.1.	ESTRUCTURACIÓN Y EQUIPAMIENTO DE INSTRUMENTOS DEL CICLO COMBINADO	208
4.2.	PARÁMETROS DE DISEÑO DEL CICLO BRAYTON	208
4.3.	PARÁMETROS DE DISEÑO DEL CICLO RANKINE.....	211
4.4.	PUNTOS DE ENTRADA Y SALIDA DE DISEÑO EN EL CICLO BRAYTON-RANKINE	213
4.5.	ANÁLISIS DEL CICLO TERMODINÁMICO.....	214
4.5.1.	CÁLCULO DE LA RELACIÓN AIRE-COMBUSTIBLE ESTEQUIOMÉTRICO	214
PUNTO 1	.....	215
PUNTO 2S	.....	215
PUNTO 2	.....	215
PUNTO 3	.....	216
PUNTO 4S	.....	217
PUNTO 4	.....	217
4.5.1.1.	FLUJO MASIVOS	217
4.5.2.	CÁLCULO EN CICLO SIN POST-COMBUSTIÓN	218
4.5.2.1.	FLUJO MASIVOS DE COMBUSTIBLE DE POST-COMBUSTIÓN	218
PUNTO 5	.....	219
PUNTO 6	.....	220
4.5.3.	POTENCIA DEL COMPRESOR AXIAL PROPIO DE LA MICROTURBINA DE GAS	220
4.5.3.1.	POTENCIA DE LA MICROTURBINA DE BIOGÁS	221
4.5.3.2.	POTENCIA ADQUIRIDA EN LA CÁMARA DE COMBUSTIÓN	221
4.5.3.3.	POTENCIA ADQUIRIDA EN LA CÁMARA DE POST-COMBUSTIÓN	222

4.5.4.	ANÁLISIS DE CÁLCULO DEL CICLO VAPOR.....	223
	PUNTO 7.....	224
	PUNTO 8.....	225
	PUNTO 9.....	225
	PUNTO 10.....	225
	PUNTO 11S.....	225
	PUNTO 11.....	226
	PUNTO 12S.....	227
	PUNTO 12.....	227
	PUNTO 13.....	228
	PUNTO 14.....	228
	PUNTO 15S.....	229
	PUNTO 15.....	229
	PUNTO 16S.....	230
	PUNTO 16.....	230
	PUNTO 17.....	230
4.5.5.	BALANCE DE ENERGÍA EN EL CALENTADOR DE PROCESO	231
4.5.5.1.	POTENCIA DE LA TURBINA DE VAPOR.....	231
4.5.5.2.	POTENCIA DE LA BOMBA 1 EXTRACCIÓN DE CONDENSADO.....	232
4.5.5.3.	POTENCIA DE LA BOMBA 2 DE ALIMENTACIÓN A LA CALDERA RECUPERADORA DE VAPOR.....	232
4.5.5.4.	POTENCIA NETA DEL CICLO DE VAPOR.....	233
4.5.5.5.	RELACIÓN DE FLUJOS DE MASAS	233
4.5.5.6.	ENTALPIA EN EL PUNTO 17.....	234
4.5.6.	POTENCIAS	235
4.5.6.1.	POTENCIA DE LA TURBINA DE VAPOR.....	235
4.5.6.2.	POTENCIA DE LA BOMBA 1 DE EXTRACCIÓN DE CONDENSADO	235
4.5.6.3.	POTENCIA DE LA BOMBA 2 DE ALIMENTACIÓN A LA CALDERA RECUPERADORA DE VAPOR.....	236
4.5.6.4.	POTENCIA DE ENTRADA AL CICLO VAPOR.....	236
4.5.6.5.	POTENCIA RECHAZADA EN EL CONDENSADOR	237
4.5.7.	PARÁMETROS DE SALIDA	237
4.5.7.1.	EFICIENCIA DEL CICLO DE GAS.....	237
4.5.7.2.	RENDIMIENTO ENERGÉTICO PARA LA OBTENCIÓN DE POTENCIA	238
4.5.7.3.	RENDIMIENTO ENERGÉTICO PARA LA GENERACIÓN DE CALOR.....	238
4.5.7.4.	FACTOR DE UTILIZACIÓN DE LA CENTRAL TÉRMICA	238
4.5.7.5.	ÍNDICE DE CALOR-ELECTRICIDAD	238
4.5.8.	ANÁLISIS DE SELECCIÓN DEL DISEÑO DEL CICLO COMBINADO	239
4.5.8.1.	ELECCIÓN DE LA CONFIGURACIÓN DEL CICLO COMBINADO	239
4.5.8.2.	ELECCIÓN DE LA CALDERA RECUPERADORA DE CALOR(HRSG).....	239
4.5.8.3.	ELECCIÓN DE LA TURBINA DE GAS	242
4.5.8.4.	ELECCIÓN DE LA TURBINA DE VAPOR.....	243
4.5.8.5.	ELECCIÓN DEL CONDENSADOR	244
4.5.8.6.	ELECCIÓN DE LA BOMBA DE EXTRACCIÓN DE CONDENSADO	246
4.5.8.7.	ELECCIÓN DE LA BOMBA DE ALIMENTACIÓN	248
4.5.8.8.	ELECCIÓN DEL GENERADOR ELÉCTRICO.....	249
5.	CAPITULO V: IMPACTO AMBIENTAL Y SOCIAL.....	254
5.1.	IMPACTO AMBIENTAL.....	254
5.2.	OBJETIVO	254
5.3.	METODOLOGÍA.....	254
5.4.	CRITERIOS DE EVALUACIÓN DE IMPACTOS	255
5.4.1.	TIPO DEL IMPACTO.....	255
5.4.2.	MAGNITUD DEL IMPACTO.....	255
5.4.3.	DURACIÓN DEL IMPACTO	255
5.5.	MITIGACIÓN DEL IMPACTO	255
5.6.	SIGNIFICANCIA DEL IMPACTO.....	255

5.7. DIAGNÓSTICO AMBIENTAL	257
5.8. ÁREA DE INFLUENCIA DEL PROYECTO	257
5.9. IDENTIFICACIÓN Y EVALUACIÓN DE LOS IMPACTOS AMBIENTALES.....	258
5.9.1. IMPACTO AMBIENTAL EN SUELOS	259
5.9.2. IMPACTO AMBIENTAL EN LOS RÍOS.....	259
5.9.3. IMPACTO AMBIENTAL EN EL AIRE	259
5.9.4. IMPACTO SOCIAL.....	259
5.10. RESULTADOS	260
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	261
CONCLUSIÓN	261
RECOMENDACIONES.....	263
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	264
ANEXO	269

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Relleno Sanitario Haquira: Coordenadas (S13° 32' 6').....	1
Figura 2. Balance de Energía.....	33
Figura 3. Gestión de Manejo de los Residuos Sólidos Urbanos.....	35
Figura 4. Condiciones de Temperatura en la producción de metano.....	41
Figura 5. Componentes de un digestor de cúpula fija.....	45
Figura 6. Componentes de un digestor de campana flotante.....	54
Figura 7. Digestor Moderno.....	56
Figura 8. Diagrama de Kevin Planck.....	65
Figura 9. Diagrama de Clausius.....	66
Figura 10. Esquema de la transferencia de calor de una máquina térmica.....	67
Figura 11. Procesos del Ciclo de Carnot operando para una maquina térmica.....	67
Figura 12. Esquema simplificado de una central de un sistema de Ciclo Combinado.....	71
Figura 13. Modelo de una central térmica de ciclo combinado.....	75
Figura 14. Esquema de un ciclo combinado gas-vapor.....	76
Figura 15. Diagrama de bloques de los elementos de una central térmica.....	76
Figura 16. Esquema simplificado de un ciclo combinado sin combustión suplementaria.....	78
Figura 17. Esquema de un ciclo combinado monoeje con embrague.....	79
Figura 18. Esquema de un ciclo combinado monoeje sin embrague.....	80
Figura 19. Esquema de un ciclo combinado multieje.....	81
Figura 20. Esquema de un ciclo combinado multieje 2X1.....	82
Figura 21. Esquema de un ciclo combinado multieje 3X1.....	83
Figura 22. Sistema de Circuitos de una turbina de gas.....	85
Figura 23. Diagrama Temperatura-Entropía y Diagrama Presión-Volumen de los procesos del ciclo Brayton ideal.....	86
Figura 24. Diagrama Tempera - Presión de un ciclo Brayton real.....	87
Figura 25. Componentes principales de una turbina de gas.....	91
Figura 26. Filtro compacto con pestañas para turbinas de gas.....	92
Figura 27. Compresor Axial Alstom de 14 etapas.....	93
Figura 28. Camara de Combustión anular.....	94
Figura 29. Cámara de Combustión Tubular.....	94
Figura 30. Camara de Combustión tipo Tuboanular.....	95
Figura 31. Turbina de gas tipo aeroderivada en mantenimiento.....	97

Figura 32. Turbina de gas tipo Industrial (Heavy Duty).....	97
Figura 33. Estructura de una turbina mono eje	99
Figura 34. Estructura de una turbina multieje.....	99
Figura 35. Ciclo Brayton con Regeneración.....	100
Figura 36. Diagrama Temperatura-Entropía del ciclo Brayton regenerativo real-ideal	101
Figura 37. Enfriamiento Intermedio entre dos compresores.....	103
Figura 38. Recalentamiento de la cámara de combustión -turbina.....	104
Figura 39. Esquema del ciclo Brayton con recalentamiento, enfriamiento y regeneración. .	105
Figura 40. Modelo de un ciclo con enfriamiento, recalentamiento y regeneración con doble eje de una turbina de gas	106
Figura 41. Esquema de un Ciclo Rankine agua-vapor.....	108
Figura 42. Diagrama Temperatura-Entropía del ciclo de Rankine ideal	109
Figura 43. Diagrama de Temperatura-Entropía de un ciclo Rankine real	111
Figura 44. Elementos principales de un ciclo Rankine.....	112
Figura 45. Diagrama Temperatura-Entropía en un ciclo con sobrecalentamiento	114
Figura 46. Diagrama del Recalentamiento del ciclo Rankine.....	114
Figura 47. Diagrama Temperatura-Entropía de un Ciclo Rankine con recalentamiento.....	115
Figura 48. Esquema de un Ciclo Rankine con regeneración con calentador abierto.....	116
Figura 49. Esquema de un ciclo Rankine con regeneración con calentador cerrado.....	117
Figura 50. Esquema de constituyentes de una caldera recuperadora de calor horizontal	111
Figura 51. Esquema de una caldera Horizontal	123
Figura 52. Esquema de una caldera de calor vertical.....	124
Figura 53. Esquema de una caldera pirotubular.....	125
Figura 54. Esquema de caldera acuotubular	126
Figura 55. Ciclo Combinado de gas-vapor de un nivel de presión.....	128
Figura 56. Esquema de un Ciclo Combinado con un ciclo gas-vapor de dos niveles de presión	130
Figura 57. Esquema de un Ciclo Combinado con un ciclo gas-vapor de tres niveles de presión	131
Figura 58. Turbina de vapor.....	133
Figura 59. Partes y estructuración de una turbina de acción y reacción	135
Figura 60. Partes y estructuración de una turbina de reacción	136
Figura 61. Condensador de haces tubulares de un ciclo agua-vapor	139
Figura 62. Bomba de agua HGB.....	139

Figura 63. Partes de un Generador Síncrono	151
Figura 64. Precipitador Electrostatico Industrial	156
Figura 65. Filtro de lecho-fluido	158
Figura 66. Ciclón y sus válvulas rotativas.....	169
Figura 67. Curva de proyección de generación de biogás	204
Figura 68. Esquema del ciclo combinado propuesto	213
Figura 69. Diagrama de curva de Temperatura-Entropía del proceso del ciclo combinado..	214
Figura 70. Esquema de la cámara de combustión del ciclo de gas (Brayton).....	195
Figura 71. Esquema de la cámara de postcombustión del ciclo de gas propuesto.....	219
Figura 72. Esquema del compresor del ciclo de gas propuesto	220
Figura 73. Esquema de la turbina del compresor del ciclo de gas propuesto	221
Figura 74. Cámara de combustión entre los puntos 2 y 3 del ciclo de gas propuesto	221
Figura 75. Camara de postcombustión entre los puntos 4 y 5 del ciclo de gas propuesto.....	222
Figura 76. Esquema del ciclo de vapor propuesto	223
Figura 77. Diagrama de curva de Temperatura- Entropía del proceso del ciclo de vapor propuesto.....	224
Figura 78. Calentador del proceso del ciclo de vapor propuesto	231
Figura 79. Esquema de la turbina de compresor del ciclo de vapor propuesto	231
Figura 80. Bomba 1 en los puntos 14 y 15 del ciclo de vapor propuesto	232
Figura 81. Bomba 2 en los puntos 13 y 16 del ciclo de vapor propuesto	232
Figura 82. Cámara de combustión en los puntos 15,16 y 17 del ciclo de vapor propuesto	233
Figura 83. Turbina de compresor en los puntos 9,11 y 12 del ciclo de vapor propuesto	235
Figura 84. Bomba 1 en los puntos 14 y 15 del ciclo de vapor propuesto	235
Figura 85. Bomba 2 en los puntos 13 y 16 del ciclo de vapor propuesto	236
Figura 86. Caldera recuperadora de vapor en los puntos 7 y 17 del ciclo de vapor propuesto	236
Figura 87. Condensador en el punto 12 y 14 del ciclo de vapor propuesto	237
Figura 88. Caldera recuperadora de calor VYC INDUSTRIAL modelo HK 250.....	241
Figura 89. Seccion de la microturbina de Gas Capstone C600.....	242
Figura 90. Vista Perfil de Turbina de vapor HOWDEN BASE KK&K.....	243
Figura 91. Condensadores AISI 304 / 316L de la marca EQUIREPSA.....	245
Figura 92. Perfil de una bomba VSP/VSP CHEM RUHRPUMPRN vertical tipo turbina ...	247
Figura 93. Bomba centrifugo BEK BEL marca IMBIL	248

Figura 94. Alternador LSA 47.2 M7 marca LEROY SOMMER232

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Componentes del Biogás provenientes de un relleno sanitario	19
Tabla 2. Generación de residuos sólidos del distrito de Cusco.....	24
Tabla 3. Composición física de los residuos sólidos del distrito del Cusco	25
Tabla 4. Generación de residuos sólidos del distrito de Santiago.....	26
Tabla 5. Composición física de los residuos sólidos del distrito de Santiago	27
Tabla 6. Generación de residuos sólidos del distrito de Wanchaq	29
Tabla 7. Composición de los residuos sólidos del distrito de Wanchaq.....	30
Tabla 8. Generación de residuos sólidos del distrito de San Sebastián	31
Tabla 9. Composición física de los residuos sólidos del distrito de San Sebastián	32
Tabla 10. Generación de residuos sólidos del distrito de San Jerónimo.....	33
Tabla 11. Composición física de los residuos sólidos del distrito de San Jerónimo	34
Tabla 12. Generación de residuos sólidos del distrito de Ccorca	34
Tabla 13. Composición física de los residuos sólidos del distrito de Ccorca	35
Tabla 14. Generación de los residuos sólidos del distrito de Poroy	36
Tabla 15. Composición Física de los residuos sólidos del distrito de Poroy	37
Tabla 16. Generación de residuos sólidos del distrito de Saylla.....	37
Tabla 17. Composición física de los residuos sólidos del distrito de Saylla	38
Tabla 18. Valores de la constante de generación de metano	58
Tabla 19. Valores del factor de corrección del metano	61
Tabla 20. Valores por defecto para el contenido de DOC y carbono fósil en los diferentes tipos de desechos.....	62
Tabla 21. Cuadro de comparación y diferencias entre turbinas aeroderivadas y turbinas industriales	98
Tabla 22. Resultados de la proyección del generación de residuos sólidos urbanos y la Poblacion 2020-2030 de la ciudad del Cusco	170
Tabla 23. Resultados de la Proyección de la Generación de Residuos Sólidos Urbanos y Urbanos Organicos 2020 del distrito del Cusco	171
Tabla 24. Resultados de la proyección del generación de residuos sólidos urbanos y la Poblacion 2020-2030 del Distrito de Santiago	172
Tabla 25. Resultados de la Proyección de la Generación de Residuos Sólidos Urbanos y Urbanos Organicos 2020 del distrito de Santiago.....	174
Tabla 26. Resultados de la proyección del generación de residuos sólidos urbanos y la Poblacion 2020-2030 del Distrito de Wanchaq	176
Tabla 27. Resultados de la Proyección de la Generación de Residuos Sólidos Urbanos y Urbanos Organicos 2020 del distrito de Wanchaq	178

Tabla 28. Resultados de la proyección del generación de residuos sólidos urbanos y la Poblacion 2020-2030 del Distrito de San Sebastian	180
Tabla 29. Resultados de la Proyección de la Generación de Residuos Sólidos Urbanos y Urbanos Organicos 2020 del distrito de San Sebastian	182
Tabla 30. Resultados de la proyección del generación de residuos sólidos urbanos y la Poblacion 2020-2030 del Distrito de San Jeronimo	183
Tabla 31. Resultados de la Proyección de la Generación de Residuos Sólidos Urbanos y Urbanos Organicos 2020 del distrito de San Jeronimo.....	184
Tabla 32. Resultados de la proyección del generación de residuos sólidos urbanos y la Poblacion 2020-2030 del Distrito de Saylla	185
Tabla 33. Resultados de la Proyección de la Generación de Residuos Sólidos Urbanos y Urbanos Organicos 2020 del distrito de Saylla.....	186
Tabla 34. Resultados de la proyección del generación de residuos sólidos urbanos y la Poblacion 2020-2030 del Distrito de Poroy.....	187
Tabla 35. Resultados de la Proyección de la Generación de Residuos Sólidos Urbanos y Urbanos Organicos 2020 del distrito de Poroy	188
Tabla 36. Resultados de la proyección del generación de residuos sólidos urbanos y la Poblacion 2020-2030 del Distrito de Ccorca	189
Tabla 37. Resultados de la Proyección de la Generación de Residuos Sólidos Urbanos y Urbanos Organicos 2020 del distrito de Ccorca	190
Tabla 38. Resultados de la Generación Total de Residuos Sólidos Urbanos de los distritos de la ciudad del Cusco	191
Tabla 39. Resumen de la composición porcentual de los residuos sólidos urbanos e la región del Cusco.....	193
Tabla 40. Calculo del potencial de generacion de metano.....	197
Tabla 41. Calculo de la generacion de metano y de biogas, con proyeccion 2020-2030	201
Tabla 42. Generacion del Biogas en M ³ /Hora	202
Tabla 43. Resultados de la cantidad del biogás recuperado eficientemente de un 50%.....	204
Tabla 44. Resultados de la conversión de los valores de recuperacion del biogas.....	206
Tabla 45. Potencia electrica generada a partir del biogas	207
Tabla 46. Características Técnicas de una Caldera recuperadora de calor VYC INDUSTRIAL modelo Hk250.....	241
Tabla 47. Características Técnicas de una microturbinas Capstone C600	243
Tabla 48. Características Técnicas de una turbina de vapor HOWDEN BASE KK&K 1M..	244
Tabla 49. Características Técnicas de un Condensador AISI 304 / 316L de la marca EQUIREPSA.....	245
Tabla 50. Características Técnicas de una bomba VSP/VSP CHEM RUHRPUMPRN	247
Tabla 51. Característica Técnicas de una bomba BEK BEL	249

Tabla 52. Características Técnicas de un Alternador Síncrono LEROY SOMER LSA 47.2 M7	253
Tabla 53. Criterios para la Evaluación de Impacto Ambiental Potencial	256
Tabla 54. Carácter de los Posibles Impactos Ambientales en la Ejecución de la Obra y Puesta en Marcha de la Central Térmica a Biogás	257
Tabla 55. Valores de t temperatura de agua saturada desde los 0°C a 200°C	270
Tabla 56. Valores de temperatura de agua saturada desde los 205°C a 373.95°C	271
Tabla 57. Valores de presión de agua saturada desde 1kPa a 750kPa	272
Tabla 58. Valores de presión de agua saturada desde los 800kPa hasta los 22064kPa	273
Tabla 59. Valores de temperatura de vapor de agua sobrecalentado a diferentes presiones desde los 50°C hasta los 1300°C	274
Tabla 60. Valores de temperatura de vapor de agua sobrecalentado a diferentes presiones desde los 50°C hasta los 1300°C	275
Tabla 61. Valores de temperaturas de vapor de agua sobrecalentado a diferentes presiones desde 275°C hasta los 1300°C	276
Tabla 62. Valores de temperatura de vapor de agua sobrecalentada a diferentes presiones desde los 375°C hasta los 1300°C	277
Tabla 63. Valores de temperatura de agua de líquido comprimida diferentes presiones desde los 0°C hasta los 380°C	278
Tabla 64. Valores de temperatura de hielo saturado de vapor de agua desde los 0°C hasta los 40°C	279

GLOSARIO

Acetogénica

Proceso donde las bacterias anaerobias producen acetato a partir de diversas fuentes de energía y de carbono.

Acetotrófica

Tipo de bacterias metanogénicas, el cual forma parte de la fermentación anaeróbica.

Acidogénica

Las distintas especies bacterianas que son capaces de realizar la acetogénesis se denominan colectivamente acetógenos.

Adiabático

Aquel sistema que no intercambia calor con su entorno.

Álabes

Paleta curva de una máquina de fluido.

Approach point

Es la diferencia de temperaturas entre el agua que sale del economizador y la temperatura de saturación de la misma a la presión nominal.

Axial

Característica de un instrumento mecánico, donde el fluido se encuentra en paralelo al eje de la máquina térmica.

Biodigestión

Proceso de degradación de residuos sólidos urbanos en carencia de oxígeno.

Biodigestor

Digestor biológico, donde se produce la descomposición y generación de biogás.

Biogás

Combustible gaseoso obtenido por fermentación anaerobia de residuos biodegradables.

Biomasa

Es la materia orgánica generada de los residuos sólidos.

Combustión

Reacción entre el oxígeno y un material combustible, que, por desprender energía, suele causar incandescencia o llama.

Composición Física

Propiedades o características físicas de un elemento químico.

Compost

Fertilizante natural procedente de residuos orgánicos.

Compostaje

Proceso biológico aeróbico, que por el que se obtiene compost.

Compresión

Disminución del volumen del gas a una determinada presión

<u>Densidad</u>	Relación entre la masa y el volumen de una sustancia o cuerpo.
<u>Depuración</u>	Eliminar el fluido residual a la salida del ciclo.
<u>Difusor</u>	Dispositivo que convierte la energía cinética en entalpia.
<u>Digestor</u>	Es un contenedor o container cerrado, impermeable donde se almacena los residuos orgánicos.
<u>Efecto Invernadero</u>	Fenómeno Natural, el cual aumenta la temperatura a nivel de la tierra por la acumulación y concentración de gases en la atmosfera.
<u>Embrague</u>	Dispositivo mecánico que permite la facilidad en el sistema de arranque.
<u>Entalpia</u>	Cantidad de energía que un sistema puede intercambiar con su alrededor.
<u>Entropía</u>	Cantidad de energía útil en un sistema para generar trabajo.
<u>Estator</u>	Elemento estático de una turbina integrada por la correspondiente carcasa de la turbina.

Estudio de Caracterización

Proceso de recopilación de información sobre la composición y características de los residuos sólidos urbanos y municipales.

Exérgico

Es el trabajo teórico útil máximo que se puede obtener al llevar un sistema termodinámico al equilibrio con el entorno mediante interacciones con dicho entorno únicamente.

Expansión

Dilatación de gas en la turbina para generar energía mecánica de rotación en el eje.

Factor de Corrección

Es un ajuste de la estimación de la generación de biogás en el modelo que toma en cuenta el grado de degradación anaeróbica de los residuos municipales.

Fermentación Anaeróbica

Descomposición de materia orgánica en ausencia de oxígeno

Dirección, administración de una empresa, negocio, etc.

Irreversibilidad

Paso del estado final a la inicial es imposible sin efectuar ningún cambio a los cuerpos del entorno.

Isobárico

Aquel sistema donde hay transferencia de calor y la presión se mantiene constante.

Isoentrópico

Aquel sistema donde su entropía permanece constante.

Lixiviado

Líquido y sus componentes en suspensión, que ha percolado o drenado a través de la masa de residuos.

Maquina Térmica

Elemento mecánico que genera trabajo a partir del intercambio de energía en forma de calor.

Metano

Hydrocarburo gaseoso, incoloro, inodoro, poco soluble e inflamable, producido por la descomposición de sustancias orgánicas, siendo uno de los componentes del biogás.

Metanogénesis

Formación de metano por medio microbiano.

Modelo Scholl Canyon

Es un modelo de degradación de primer orden en la generación de biogás.

Pinch point

Es la ubicación en el intercambiador de calor donde la diferencia de temperatura entre el fluido caliente y el frío es mínima en esa ubicación.

Poder Calorífico

Cantidad de energía liberada en forma de calor.

Precipitador

Dispositivo de control de partículas que utiliza fuerzas eléctricas para mover las partículas fuera de la corriente de gas y sobre las placas del colector.

Radial

Característica con fluido de trabajo en dirección a un radio de una circunferencia en una maquina térmica.

Rendimiento térmico

Eficiencia con la que es convertido el calor de la combustión en rendimiento mecánico.

Rotor

Elemento móvil de una turbina que consta de una serie de coronas de álabes.

Tobera

Dispositivo que transforma un fluido de presión, calor en energía cinética o velocidad.

Vertedero

Instilación física utilizada para deposición de Residuos Sólidos Urbanos.

Volumen específico

Volumen ocupado por unidad de masa de un material.

GLOSARIO DE SIGLAS

<u>BID</u>	Banco Interamericano de Desarrollo
<u>BTU</u>	Unidades Térmicas Británicas
<u>EPA</u>	Agencia de Protección Ambiental
<u>FORSU</u>	Fracción Orgánica de los Residuos Sólidos Urbanos
<u>GEI</u>	Gases de Efecto Invernadero
<u>HAPb</u>	Contaminantes Nocivos del Aire
<u>HRSG</u>	Caldera de Calor Residual
<u>INEI</u>	Instituto Nacional de Estadística e Informática
<u>IPCC</u>	Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático
<u>MCI</u>	Motor de Combustión Interna
<u>NPI</u>	Inventario Nacional de Contaminantes
<u>Pce</u>	Pie Cubico Estándar

PIGARS

Planificación y Gestión Integral de Residuos
Sólidos

Ppm

Parte por Millón

RSO

Residuo Sólido Orgánico

RSOU

Residuos Sólidos Orgánicos Urbanos.

SEIN

Sistema Eléctrico Interconectado Nacional

TAP

Turbina de Alta Presión

TBP

Turbina de Baja Presión

TMP

Turbina de Media Presión

VOC

Compuestos Volátiles Orgánicos

CAPÍTULO I

ASPECTOS GENERALES

1.1. INTRODUCCIÓN

En el presente capítulo se presenta el ámbito geográfico, planteamiento del problema, objetivos, justificación del estudio, alcances y limitaciones, antecedentes, hipótesis, variables e indicadores, metodología de investigación, población y muestra y por último la matriz de consistencia.

1.2. ÁMBITO GEOGRÁFICO

El desarrollo del presente estudio de ingeniería comprende geográficamente el relleno sanitario de Haquira el cual consta con 5 hectáreas de extensión de las cuales 4,4 hectáreas son aprovechadas y acopiadas los residuos sólidos orgánicos de los distritos de la provincia del Cusco el cual está administrada y supervisada por la Municipalidad Provincial del Cusco. El relleno sanitario de Haquira está ubicado a 7,7 Km de la ciudad del Cusco, en el tramo carretero Cusco – Ccorcca, al sur oeste de la ciudad del Cusco, comprendida en la comunidad de Haquira Grande del Distrito de Ccorca, Provincia y Departamento del Cusco.

Figura 1. Relleno Sanitario Haquira: Coordenadas (S13° 32' 6")



Fuente: Elaboración propia, ubicación geográfica, Google Maps

1.3. EL PROBLEMA

1.3.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En la actualidad Perú enfrenta un desafío energético producto del alto crecimiento industrial y democrático, por lo que es necesario contar con fuentes de energía limpias, económicas y seguras. Hace unos 35 años aproximadamente ya muchos científicos exponían los problemas que los gases de efecto invernadero causarían en el medio ambiente de nuestro planeta; según el Protocolo de Kioto que fue adoptada, pero no fue hasta los años 2003 - 2005 que entró en vigor y nuestro país lo ha ratificado para poder desarrollar proyectos relacionados con la tecnología que permita disminuir los gases de efecto invernadero. Actualmente la población de la comunidad de Ccorca presenta una crisis social y medio ambiental, el cual la generación de los gases de efecto invernadero y lixiviados perjudican la salud de los pobladores al emanar los gases tóxicos y nauseabundos generados de los residuos sólidos orgánicos. Frecuentemente a nivel nacional existe una de las problemáticas medio ambientales más significativas que afectan a los departamentos asimismo la región del Cusco también presenta el déficit contaminante de los gases de efecto invernadero, donde la provincia del Cusco y sus distritos del Cusco constituyen el manejo inadecuado y la mala disposición final de los residuos sólidos, los cuales son arrojados en las pampas del poblado de Haqira y en los diferentes botaderos de los distritos de cusco, donde los residuos sólidos se encuentran soterrados, compactados y cubiertos con geo membrana, poseen unas chimeneas para el drenaje de los gases, lo que hace que esta liberación de gases a la atmosfera sean totalmente contaminantes, causantes de efecto invernadero y otros adversos al medioambiente, por otro lado el mal manejo de los lixiviados (líquido que se filtra procedente de los residuos dispuestos) amenazan la contaminación de nuestros ríos.

El relleno sanitario de Haqira es un tajo abierto, recibiendo 395 toneladas de residuos sólidos por día y depositando, un promedio de 127 750 toneladas de basura por año, en el cual la producción de metano por la acción de microorganismos en condiciones anaerobias hace que se degrade la materia orgánica, liberando el metano y otras sustancias químicas. Los gases producidos en el botadero de Haqira constituyen un problema que no le dieron el tratamiento adecuado ocasionando problemas ambientales porque el metano representa la mayor contribución al efecto invernadero porque es 25 veces más potente por tonelada que el CO₂ en causar calentamiento global. Estos cálculos están basados en promediar el impacto calórico del metano durante 100 años, pero en 10 a 15 años el metano es apenas rastreable y casi desaparece después de 20 años. Los cálculos más recientes promediados en un periodo de 20 años dan como resultado que el metano es 72 veces más potentes, ya que son liberados al ambiente en formas más concentradas y peligrosas que en el desecho original. La combustión a altas temperaturas libera metales tóxicos como plomo, cadmio, arsénico, mercurio y cromo de distintos materiales estables como plásticos, caucho, etc., y se liberan en forma de partículas muy pequeñas o gases, aumentando el riesgo de inhalación.

Por otro lado, sabemos que existe una brecha tremenda de energía eléctrica en las zonas rurales, el cual debe ser cubierto en su totalidad ya que en la actualidad dependemos cada vez más de este tipo de energía en nuestra vida cotidiana. Ya no es sólo nuestra fuente de iluminación en horas nocturnas, todo nuestro confort, gracias a los aparatos electrodomésticos, así como nuestras actividades comerciales, industriales, está total y absolutamente ligadas al uso de la energía eléctrica. De qué manera se podría lograr dar solución a ambas situaciones aprovechando lo positivo de ellas y buscando respetar y cuidar nuestro medio ambiente.

1.3.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

¿Es posible reducir las emisiones de los gases de efecto invernadero aprovechando la generación del biogás en un sistema de energía eléctrica del relleno sanitario de Haquira?

1.3.3. PROBLEMAS ESPECÍFICOS

1. ¿Cuál es la cantidad de biogás recuperado en el relleno sanitario de Haquira?
2. ¿Cuál es la potencia generada a partir del biogás producido en el relleno sanitario de Haquira?
3. ¿Qué equipamiento y tecnología idónea se emplearán en la central térmica de biogás del relleno sanitario de Haquira?
4. ¿Cuál será el impacto medioambiental en la generación de biogás producido de los residuos sólidos orgánicos del relleno sanitario de Haquira?

1.4. OBJETIVOS

1.4.1. OBJETIVO GENERAL

Realizar un estudio de ingeniería de la conversión energética de una central termoeléctrica utilizando como fuente de energía renovable, el biogás generado a partir de los residuos sólidos orgánicos del relleno sanitario de Haquira.

1.4.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Determinar la cantidad de biogás recuperado a través de los residuos sólidos orgánicos en el relleno sanitario de Haquira.
2. Calcular la potencia generada del biogás de los residuos sólidos orgánicos en el relleno sanitario de Haquira.
3. Identificar el equipamiento del sistema de generación eléctrica a partir del biogás obtenida de los residuos sólidos orgánicos en el relleno sanitario de Haquira.

4. Evaluar y contribuir el impacto medioambiental de la generación del biogás de los residuos sólidos orgánicos en el relleno sanitario de Haquira.

1.5. JUSTIFICACIÓN DEL ESTUDIO

La realización del presente estudio se justifica por la preservación del medio ambiente y evitar el crecimiento del calentamiento global a consecuencia de la emanación y acumulación de gases de efecto invernadero emitidos a la atmósfera. Así mismo la generación de biogás aprovecharía la generación de energía eléctrica como fuente renovable de los residuos sólidos orgánicos proveniente del relleno sanitario de Haquira

La biomasa es la fuente para el aprovechamiento energético, en donde se define el conjunto de la materia orgánica, de origen vegetal o animal que proceden de su transformación natural o artificial. El biogás o biomasa es una solución que contribuye a cubrir necesidades energéticas de una forma sostenible, ya que se caracteriza por tener un bajo contenido en carbón y un elevado contenido en oxígeno y en compuestos volátiles, con presencia de dióxido de carbono, monóxido de carbono e hidrógeno y un alto valor de metano, el cual se utiliza como fuente principal en la combustión de una central térmica y estos son los que concentran una gran parte de poder calorífico de la biomasa. Su poder calorífico depende mucho del tipo de biomasa considerada y de su contenido de humedad. Estas características, junto con el alto contenido en azufre, la convierten en un producto especialmente atractivo para ser aprovechado energéticamente.

1.5.1. JUSTIFICACIÓN TÉCNICO

El alto porcentaje de residuos orgánicos y la cantidad de residuos sólidos (RS) generados en el país y en nuestra ciudad, son factores muy importantes que inciden en la mayor producción de biogás en un relleno sanitario. La concentración de residuos sólidos y la recolección no selectiva conllevan a la necesidad indispensable de contar con sitio de disposición final autorizado, por ello

a corto o mediano plazo la generación y recuperación de biogás en estos sitios será una realidad. Actualmente se dispone en el mercado de diversas tecnologías, modelos y tamaños de equipos de conversión de biogás a electricidad, lo cual indica que la adquisición de los equipos tecnológicos no sería un inconveniente.

1.5.2. JUSTIFICACIÓN ECONÓMICO

Los proyectos de rellenos sanitarios con aprovechamiento energético son financiados y respaldados por entidades mundialmente reconocidas como el Banco Mundial y el BID. Un relleno sanitario al utilizar el biogás generado, y disminuir la emisión de metano a la atmosfera recibe incentivos económicos, y por la generación de energía eléctrica percibe ingresos económicos al ser suministrado al sistema eléctrico interconectado nacional (SEIN). Por todo lo mencionado los costos que conlleve el presente estudio no serán comparables con los resultados hallados, puesto que este es un tema muy aplicable y retribuido.

1.5.3. JUSTIFICACIÓN SOCIAL

El impacto ambiental que aflige y afecta a la población del distrito de Ccorca que se encuentra adyacente al relleno sanitario de Haqira, el cual conlleva a la incomodidad y desazón de los pobladores.

El estudio de la generación de energía aprovechado de los residuos sólidos urbanos será indispensable para dar mejor calidad de vida a la población del distrito de Ccorca frente a un pésimo plan de manejo de los residuos sólidos urbanos, el cual se encuentra en un crecimiento acelerado de la población del distrito mencionado, así como también el crecimiento de la materia solida urbana.

1.5.4. JUSTIFICACIÓN ACADÉMICA

El conocimiento del funcionamiento de una central termoeléctrica a partir de combustible, el dimensionamiento de equipos para el diseño de una central térmica, otorgara dimensiones y desenlaces de soluciones que se plasmaran desde la implementación preliminar, la selección de equipos acorde a los resultados de cálculo y finalmente la instalación de la central térmica.

1.6. ALCANCES Y LIMITACIONES

1.6.1. ALCANCES

El estudio se centrará específicamente en la conversión de residuos sólidos orgánicos en biogás y su posterior utilización como fuente de energía mediante una central termoeléctrica.

a) Consideraciones geográficas y temporales:

El estudio se desarrollará, en la ubicación específica en Cusco y en el año 2022, centrándose en las condiciones, disponibilidad de recursos y contexto energético de este tiempo y ubicación.

b) Enfoque de la conversión energética:

El presente estudio de ingeniería está enfocado en el estudio de transformación de energía calorífica contenida en el biogás como combustible en energía mecánica y eléctrica.

c) Impacto Ambiental Limitado:

Aborda algunos aspectos de impacto ambiental de manera general, pero podría no profundizar en todos los aspectos medio-ambientales, porque este estudio se centra en la conversión de energía.

d) Análisis específico de los residuos sólidos orgánicos:

Es estudio se limitado a los residuos sólidos orgánicos, no abarca otros tipos de residuos sólidos.

1.6.2. LIMITACIONES

a) Disponibilidad de datos:

La falta de información detallada sobre la cantidad y composición exacta de los residuos sólidos orgánicos. La cantidad de datos disponibles no son precisas por la pandemia del COVID 19 durante los años 2021 y 2022.

b) Acceso a la tecnología específicas:

Limitaciones en el acceso a tecnologías avanzadas para la conversión de residuos sólidos orgánicos en biogás podrían perjudicar la evaluación completa de las mejores opciones disponibles.

c) Factores económicos:

Limitaciones financieras que afectan la capacidad de realizar pruebas o implementar tecnologías costosas lo que influiría en la evaluación realista del estudio de ingeniería.

d) Restricciones geográficas o regulatorias:

Normativas locales, restricciones legales o requisitos específicos en la zona del cusco que limitan ciertas actividades.

e) Limitaciones temporales:

El tiempo del estudio puede no ser suficiente para realizar un análisis exhaustivo y exacta por lo podría resultar en un estudio menos detallado.

f) Factores climáticos:

Las variaciones estaciones en la generación de residuos sólidos orgánicos no pueden ser completamente representativas porque el estudio se lleva a cabo en un periodo limitado.

g) Complejidad del impacto ambiental:

La evaluación completa del impacto medioambiental puede ser compleja y requerir estudios a largo plazo que podrían exceder el alcance y tiempo de la presente tesis.

1.6.3. ANTECEDENTES

Se tomaron en consideración trabajos de investigación que guardan relación con el tema, que se detallan a continuación:

- Ambía, Edy, y Miguel Farfán. En su Tesis intitulada “OPTIMIZACIÓN POR DISEÑOS EXPERIMENTALES DEL PROCESO DE DEGRADACIÓN AEROBIO DE LOS LIXIVIADOS DE HAQUIRA.” Dio a conocer la situación y estado de los residuos sólidos orgánicos del relleno sanitario de Haquira en la provincia del Cusco, el cual el biogás y lixiviados generados en la disposición final de Haquira no presenta tratamiento y uso de los gases de efecto invernadero que afecta a la población de Ccorca y a la atmosfera.
- “DISEÑO DE UNA CENTRAL TERMOELÉCTRICA DE CICLO COMBINADO DE 500MW”, trabajo de tesis realizado por Luis Alfredo Ramos Franco. En el que se realizó un estudio de ingeniería referida al modelamiento de un perfil de ingeniería de una central térmica a partir del gas natural, obteniendo como resultado viable y sostenible, puesto que el dimensionamiento y selección de los equipos principales son óptimos acorde a las características técnicas obtenidas del diseño de una central térmica.
- Estudio Técnico-Económico de una planta de generación a base de biogás, aprovechando los residuos sólidos urbanos de la ciudad del Cusco, elaborado por Alan Pio Ninancuro Cruz y Guido Mamani Quiñones. Tesis que llegó a las siguientes conclusiones:
 - I. El estudio de ingeniería mencionado es viable, mediante la generación del biogás para la generación de energía eléctrica y su posterior selección de la tecnología adecuada.
 - II. El trabajo de ingeniería determino la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero, a partir de la captura de biogás y generación de electricidad.

1.6.4. BASE LEGAL

- Decreto Legislativo N° 1002. De promoción de la inversión para la generación de electricidad con el uso de energías renovables.
- Decreto Legislativo N° 1278: Ley de Gestión Integral de Residuos Sólidos.
- Reglamento de la Ley de Gestión Integral de Residuos Sólidos.
- La Constitución Política del Perú de 1993.
- El Reglamento de Acondicionamiento Territorial, Desarrollo Urbano y Medio Ambiente, promulgado por Resolución N.º 007-85-VC, 15.02.85.
- El Código del Medio Ambiente y los Recursos Naturales, promulgado por Decreto Legislativo N.º 613, 07.09.90 y aprobado por la comisión revisora creada por Ley N.º 25238.
- Ley N° 26410 mediante el cual se constituye el Concejo Nacional del Ambiente (CONAM).
- Ley General de Educación, Ley N.º 28044

1.7. OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES

Variable Independiente	Dimensiones	Indicadores	Instrumentos	Escala
Residuos Sólidos Orgánicos	Tipos y Composición de Residuos Sólidos Orgánicos Urbanos	Poder calorífico	Estudio de caracterización de los residuos sólidos de los distritos del Cusco	MJ/kg
		Caudal del biogás		m ³ /h
Variable Dependiente	Dimensiones	Indicadores	Instrumentos	Escala
Biogás	Cantidad de residuos sólidos orgánicos	Temperatura	Modelos matemáticos de estimación de biogás	°C
		Poder Calorífico		kJ/kg
Generación eléctrica	Cantidad de biogás	Potencia eléctrica	Formula de conversión de biogás en potencia eléctrica	KW

Fuente: Elaboración Propia

1.8. METODOLOGÍA

1.8.1. CARACTERÍSTICAS DEL ESTUDIO

1.8.1.1. TIPO DE ESTUDIO

La presente es un estudio del tipo **APLICADA**, porque se utilizan conocimientos de Ingeniería, ya que busca resolver algunas interrogantes y problemas sobre el impacto que tienen los Gases de Residuos Sólidos (GRS) que al contener metano y dióxido de carbono son los que contribuyen al calentamiento global, así como los efectos que estos gases pudieran tener sobre el ser humana. Así mismo se busca identificar la viabilidad técnica y económica que tendría la instalación de una central de biogás para disminuir los gases causantes.

Es de **enfoque cuantitativo** debido a que se requiere la recolección de datos para procesarlos y evaluarlos para así proponer una solución.

1.8.1.2. NIVEL DE ESTUDIO

El nivel de investigación es **DESCRIPTIVO-EXPLICATIVO**: porque da a conocer la problemática que se encuentra en la zona del estudio, donde se describe los instrumentos y ejecución de un método de diseño de una central termoeléctrica de biomasa y la cantidad de gases de efecto invernadero y residuos sólidos orgánicos urbanos puesto que perjudican a la contaminación atmosférico y al calentamiento global.

También es **PROPOSITIVO** porque se plantea una propuesta de solución de disminución de los gases de efecto invernadero de la descomposición de los residuos sólidos orgánicos.

1.8.1.3. MÉTODO DEL ESTUDIO

MÉTODO ANALÍTICA, este método nos permitirá analizar en forma individual y en conjunto el presente estudio atribuye métodos **INDUCTIVO** y **DEDUCTIVO**, es decir emplea el método **mixto** por la relación entre dichos métodos, ya que se inicia de datos generales aceptados

como válidos es decir el control de tiempos de la producción de energía eléctrica a partir del biogás de los residuos sólidos orgánicos urbanos de la central térmica para luego ser aplicado adquirido de los datos reales y actuales partiendo de ellos una forma general del diseño y selección de equipos principales y auxiliares de una central térmica.

1.8.1.4. DISEÑO DEL ESTUDIO

El diseño utilizado es de investigación de campo y documental **NO EXPERIMENTAL**, que consiste en la recolección de datos directamente de la realidad donde ocurren los hechos, la obtención y el análisis de datos provenientes de documentos. Para dar una solución o alternativa de generación eléctrica al problema de los residuos sólidos urbanos en la ciudad del Cusco.

1.8.2. POBLACIÓN Y MUESTRA

a) Población

Para el estudio se tendrá como población la totalidad de los residuos sólidos orgánicos recolectadas de los distritos de Cusco, Santiago, Wanchaq, San Jerónimo, San Sebastián, Ccorcca, Poroy y Saylla.

b) Muestra

Para esta investigación la muestra son los residuos sólidos orgánicos dispuestos en el relleno sanitario de Haquira.

1.8.3. TÉCNICAS Y RECOLECCIÓN DE DATOS

La información necesaria será obtenida empleando las siguientes técnicas y herramientas de recolección de datos:

a) Análisis de la composición de residuos sólidos orgánicos:

Para realizar un muestreo representativo de los residuos sólidos orgánicos para determinar su composición y contenido específico de materia orgánica, humedad, densidad, temperatura etc.

b) Revisión de la documentación de las municipalidades:

Revisar informes previos, datos estadísticos y estudios de casos similares para recopilar información relevante y antecedentes de estudios similares sobre el relleno sanitario de Haquira

c) Observación directa en campo:

Observación directa de las operaciones en el relleno sanitario de Haquira y la infraestructura existente para comprender mejor el proceso y las limitaciones físicas o técnicas.

d) Simulaciones y modelado:

Utilización de los softwares AutoCAD versión 2022, Microsoft Word Office, Excel versión 2022 para estimar las proyecciones y generación de biogás de los residuos sólidos orgánicos asimismo evaluar diferentes escenarios de producción de biogás.

e) Entrevistas y cuestionarios

Realiza entrevistas estructuras a personas clave involucradas en la gestión de residuos sólidos orgánicos, expertos en energía renovable, responsables del procesamiento de los residuos sólidos orgánicos en el relleno sanitario de Haquira, para obtener información cuantitativa relevante.

1.8.4. PROCESAMIENTO DE DATOS

a) Organización de datos:

Para la organización de los datos recolectados en el estudio se realizó la clasificación y estructuración de la información en el software Excel para su posterior análisis y AutoCAD versión 2022 para la elaboración de los planos.

b) Análisis a través de modelos matemáticos:

Aplicación de métodos matemáticos para procesar datos numéricos. Por ejemplo; modelo mexicano Scholl Canyon; modelo apropiado para la determinación del potencial de generación del metano y posteriormente el biogás recuperado, además de cálculos termodinámicos y fórmulas.

c) Visualización de datos:

Para elaborar el siguiente estudio se utilizó gráficos y tablas para presentar los resultados de manera comprensibles lo cual ayudó a identificar la generación de biogás y generación eléctrica de los residuos sólidos orgánicos del relleno sanitario de Haquira.

1.8.4.1. ANÁLISIS DE DATOS

Después de ser procesado los datos e información se procederá a realizar análisis utilizando conocimientos de diseños de ingeniería, estadística, normatividad, matemática.

1.9. MATRIZ DE CONSISTENCIA

TÍTULO: "ESTUDIO DE INGENIERÍA DE LA CONVERSIÓN ENERGÉTICA DE UNA CENTRAL TÉRMICA A BIOGÁS, APROVECHANDO LOS RESIDUOS SÓLIDOS ORGÁNICOS, CUSCO 2022."			
PROBLEMAS	OBJETIVOS	VARIABLES	CONCLUSIONES
FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	OBJETIVO GENERAL		
¿Es posible reducir las emisiones de los gases de efecto invernadero aprovechando la generación del biogás en un sistema de energía eléctrica del relleno sanitario de Haqaira?	Realizar un estudio de ingeniería de la conversión energética de una central termoeléctrica utilizando como fuente de energía renovable, el biogás generado a partir de los residuos sólidos orgánicos del relleno sanitario de Haqaira.	VARIABLE INDEPENDIENTE 1. Residuos sólidos orgánicos VARIABLE DEPENDIENTE 2. Biogás 3. Generación eléctrica	1. CONSIDERANDO EL OBJETIVO ESPECÍFICO NRO. 2 En el presente estudio de ingeniería se determinó un caudal de 120.065 m ³ /hora del biogás recuperado durante el período comprendido entre 2020 y 2021. Además, mediante las proyecciones futuras, se estima que este caudal aumentará significativamente, alcanzando una cantidad proyectada de 144.398 m ³ /hora para el período comprendido entre 2030 y 2031. Este caudal destaca la relevancia y el potencial de aprovechamiento de los residuos sólidos orgánicos, minimizando las emisiones contaminantes de efecto invernadero en el relleno sanitario de Haqaira.
PROBLEMAS ESPECÍFICOS	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	INDICADORES	
1. ¿Cuál es la cantidad de biogás recuperado en el relleno sanitario de Haqaira? 2. ¿Cuál es la potencia generada a partir del biogás producido en el relleno sanitario de Haqaira? 3. ¿Qué equipamiento y tecnología idónea se emplearán en la central térmica de biogás del relleno sanitario de Haqaira? 4. ¿Cuál será el impacto medioambiental en la generación de biogás producido de los residuos sólidos orgánicos del relleno sanitario de Haqaira?	1. Determinar la cantidad de biogás recuperado a través de los residuos sólidos orgánicos en el relleno sanitario de Haqaira. 2. Calcular la potencia generada del biogás de los residuos sólidos orgánicos en el relleno sanitario de Haqaira. 3. Identificar el equipamiento del sistema de generación eléctrica a partir del biogás obtenida de los residuos sólidos orgánicos en el relleno sanitario de Haqaira. 4. Evaluar y contribuir el impacto medioambiental de la generación del biogás de los residuos sólidos orgánicos en el relleno sanitario de Haqaira.	• Poder Calorífico (MJ/kg) • Caudal del biogás. (m ³ /Hora) • Potencial de generación de metano (Gg de CH ₄ /Gg de residuos) • Composición física (%) • Potencia eléctrica (KW)	2. CONSIDERANDO EL OBJETIVO ESPECÍFICO NRO. 3 El presente estudio de ingeniería determinó la capacidad de generación eléctrica a partir del biogás recuperado de los residuos sólidos orgánicos del relleno sanitario de Haqaira. Según los resultados obtenidos, se determinaron diferentes niveles de potencia eléctrica según el régimen de operación: 134.496 kW para un régimen del 25%, 177.534 kW para un régimen del 33%, y 215.193 kW para un régimen del 40% del año 2020 al 2021. Estos valores demuestran el potencial energético del biogás y su capacidad para alimentar sistemas de generación eléctrica con eficiencias variadas. Además, las proyecciones realizadas para el período de 2030 a 2031 incrementaron considerablemente en la potencia eléctrica generada a partir del biogás: 161.753 kW para un régimen del 25%, 213.514 kW para un régimen del 33%, y 258.805 kW para un régimen del 40%. Estas proyecciones reflejan un crecimiento considerable en la capacidad de generación eléctrica, lo que destaca la importancia y el potencial de continuar desarrollando y optimizando sistemas de conversión energética basados en biogás.
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	JUSTIFICACIÓN DEL ESTUDIO	ALCANCES	
En la actualidad Perú enfrenta un desafío energético producto del alto crecimiento industrial y democrático, por lo que es necesario contar con fuentes de energía limpias, económicas y seguras. Hace unos 35 años aproximadamente ya muchos científicos exponían los problemas que los gases de efecto invernadero causarían en el medio ambiente del planeta; el Protocolo de Kioto fue adoptado en 1997, pero no fue hasta los años 2003 - 2005 que entró en vigor y que el Perú se integró; actualmente se viene cumpliendo la segunda etapa del Protocolo hasta el año 2020 y nuestro país lo ha ratificado. La ciudad del Cusco, considerada uno de los principales atractivos turísticos del Perú, alberga aproximadamente 428 450 de habitantes o ciudadanos y anualmente recibe más de 1 millón de turistas por año, por lo que uno de los problemas medio ambientales más significativos que afectan tanto a la ciudad del Cusco y a sus diferentes distritos de la región del Cusco. Esta problemática lo constituye el manejo inadecuado y la mala disposición final de los residuos sólidos, los cuales son arrojados en las pampas del poblado de Haqaira y en los diferentes botaderos de los distritos de cusco, donde los residuos sólidos se encuentran soterrados, compactados y cubiertos con geo membrana, poseen unas chimeneas para el drenaje de los gases, lo que hace que esta liberación de gases a la atmósfera sean totalmente contaminantes, causantes de efecto invernadero y otros adversos al medioambiente, por otro lado el mal manejo de los lixiviados (líquido que se filtra procedente de los residuos dispuestos) amenazan la contaminación de nuestros ríos. El relleno sanitario de Haqaira es un tajo abierto, recibiendo 395 toneladas de residuos sólidos por día y depositando, un promedio de 127 750 toneladas de basura por año, en el cual la producción de metano por la acción de microorganismos en condiciones anaerobias hace que se degrade la materia orgánica, liberando el metano y otras sustancias químicas. Los gases	JUSTIFICACIÓN TÉCNICO. - El alto porcentaje de residuos orgánicos y la cantidad de RSU (residuos sólidos urbanos) generados en el país y en nuestra ciudad, son factores muy importantes que inciden en la mayor producción de biogás en un relleno sanitario. La concentración de RSU y la recolección no selectiva conllevan a la necesidad indispensable de contar con un sitio de disposición final autorizado en el distrito de Santiago, por ello a corto o mediano plazo la generación y recuperación de biogás en estos sitios será una realidad. Actualmente se dispone en el mercado de diversas tecnologías, modelos y tamaños de equipos de conversión de biogás a electricidad, lo cual indica que la adquisición de los equipos tecnológicos no sería un inconveniente. JUSTIFICACIÓN ECONÓMICO. - Los proyectos de rellenos sanitarios con aprovechamiento energético son financiados y respaldados por entidades mundialmente reconocidas como el Banco Mundial y el BID. Un relleno sanitario al utilizar el biogás generado, y disminuir la emisión de metano a la atmósfera recibe incentivos económicos denominados bonos de carbono, y por la generación de energía eléctrica recibe ingresos por KW/H suministrado al SEIN. Por todo lo mencionado los costos que conlleve el presente estudio no serán comparables con los resultados hallados, puesto que este es un tema muy aplicable y retribuido. JUSTIFICACIÓN SOCIAL. - El impacto ambiental que aflige y afecta a la población del distrito de Ccorca que se encuentra adyacente al relleno sanitario de Haqaira, el cual conlleva a la incomodidad y desazón de los pobladores. El estudio de la generación de energía aprovechado de los residuos sólidos urbanos será indispensable para dar mejor calidad de vida a la población del distrito de Ccorca frente a un pésimo plan de manejo de los residuos sólidos urbanos, el cual se encuentra en un crecimiento acelerado de la población del	El estudio se centrará específicamente en la conversión de residuos sólidos orgánicos en biogás y su posterior utilización como fuente de energía mediante una central termoeléctrica. 1. Consideraciones geográficas y temporales: El estudio se desarrollará, en la ubicación específica en Cusco y en el año 2022, centrándose en las condiciones, disponibilidad de recursos y contexto energético de este tiempo y ubicación. 2. Enfoque de la conversión energética: El presente estudio de ingeniería está enfocado en el estudio de transformación de energía calorífica contenida en el biogás como combustible en energía mecánica y eléctrica. 3. Impacto Ambiental Limitado: Aborda algunos aspectos de impacto ambiental de manera general, pero podría no profundizar en todos los aspectos medio-ambientales, porque este estudio se centra en la conversión de energía. 4. Análisis específico de los residuos sólidos orgánicos: Es estudio se limitado a los residuos sólidos orgánicos, no abarca otros tipos de residuos sólidos.	
		LIMITACIONES	
		1. Disponibilidad de datos: La falta de información detallada sobre la cantidad y composición exacta de los residuos sólidos orgánicos. La cantidad de datos disponibles no son precisas por la pandemia del COVID 19 durante los años 2020 ,2021 y 2022. 2. Acceso a la tecnología específicas:	3. CONSIDERANDO EL OBJETIVO ESPECÍFICO NRO. 4 Basándonos en los resultados obtenidos del estudio de ingeniería realizado entre los años 2020 y 2021 se determinó la selección de equipamiento realizada en función de los parámetros obtenidos en el estudio de ingeniería, el cual ha sido un paso determinante para validar la viabilidad del estudio

<p>producidos en el botadero de Haquira constituyen un problema que no le dieron el tratamiento adecuado ocasionando problemas ambientales porque el metano representa la mayor contribución al efecto invernadero porque es 25 veces más potente por tonelada que el CO2 en causar calentamiento global. Estos cálculos están basados en promediar el impacto calórico del metano durante 100 años, pero en 10 a 15 años el metano es apenas rastreable y casi desaparece después de 20 años. Los cálculos más recientes promediados en un periodo de 20 años dan como resultado que el metano es 72 veces más potentes, ya que son liberados al ambiente en formas más concentradas y peligrosas que en el desecho original. La combustión a altas temperaturas libera metales tóxicos como plomo, cadmio, arsénico, mercurio y cromo de distintos materiales estables como plásticos, caucho, etc., y se liberan en forma de partículas muy pequeñas o gases, aumentando el riesgo de inhalación.</p> <p>Por otro lado, sabemos que existe una brecha tremenda de energía eléctrica en las zonas rurales, el cual debe ser cubierto en su totalidad ya que en la actualidad dependemos cada vez más de este tipo de energía en nuestra vida cotidiana. Ya no es sólo nuestra fuente de iluminación en horas nocturnas, todo nuestro confort, gracias a los aparatos electrodomésticos, así como nuestras actividades comerciales, industriales, está total y absolutamente ligadas al uso de la energía eléctrica. De qué manera se podría lograr dar solución a ambas situaciones aprovechando lo positivo de ellas y buscando respetar y cuidar nuestro medio ambiente.</p>	<p>distrito mencionado, así como también el crecimiento de la materia sólida urbana.</p> <p>JUSTIFICACIÓN ACADÉMICO. - El conocimiento del funcionamiento de una central termoeléctrica a partir de combustible, el dimensionamiento de equipos para el diseño de una central térmica, otorgara dimensiones y desenlaces de soluciones que se plasmaran desde la implementación preliminar, la selección de la tecnológica acorde a los resultados de cálculo y finalmente la instalación de la central térmica.</p>	<p>Limitaciones en el acceso a tecnologías avanzadas para la conversión de residuos sólidos orgánicos en biogás podrían perjudicar la evaluación completa de las mejores opciones disponibles.</p> <ol style="list-style-type: none"> 3. Factores económicos: Limitaciones financieras que afectan la capacidad de realizar pruebas o implementar tecnologías costosas lo que influiría en la evaluación realista del estudio de ingeniería. 4. Restricciones geográficas o regulatorias: Normativas locales, restricciones legales o requisitos específicos en la zona del cusco que limitan ciertas actividades. 5. Limitaciones temporales: El tiempo del estudio puede no ser suficiente para realizar un análisis exhaustivo y exacta por lo podría resultar en un estudio menos detallado. 6. Factores climáticos: Las variaciones estaciones en la generación de residuos sólidos orgánicos no pueden ser completamente representativas porque el estudio se lleva a cabo en un periodo limitado. 7. Complejidad del impacto ambiental: La evaluación completa del impacto medioambiental puede ser compleja y requerir estudios a largo plazo que podrían exceder el alcance y tiempo de la presente tesis. 	<p>de ingeniería. Esta elección cuidadosa y fundamentada asegura que las instalaciones sean capaces de operar de manera eficiente y confiable, maximizando así la generación de energía a partir del biogás recuperado; por lo que concluimos con la viabilidad del estudio de ingeniería siendo sustentable, ecológico y beneficioso energéticamente.</p> <p>4. CONSIDERANDO EL OBJETIVO ESPECÍFICO NRO. 4</p> <p>Finalmente se estableció el impacto satisfactorio el cual mostró el desarrollo de una central termoeléctrica de biogás respecto a la contaminación e infección medioambiental en el relleno sanitario de Haquira, el cual redujo la emisión de gases de efecto invernadero o metano de los residuos olidos orgánicos. Este estudio de ingeniería, determinó la reducción sustancial en la emisión de gases de efecto invernadero, que son conocidos por su contribución al calentamiento global y otros impactos ambientales adversos. Al capturar y utilizar el biogás generado a partir de los residuos orgánicos como fuente de energía, se ha evitado la liberación directa de estos gases a la atmósfera, lo que representa un avance significativo en la protección del medio ambiente.</p>
--	---	---	---

2. CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

2.1. BIOMASA COMO FUENTE DE BIOGÁS PARA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA

La generación de biogás de los residuos sólidos de los diferentes rellenos sanitarios de los distritos del Cusco está determinada por el procedimiento y el manejo de la cantidad de Residuos Sólidos Orgánicos Urbanos para el acopio, así como nos ilustra en los criterios y propuestas de diseño para la selección de los sistemas principales y auxiliares con el objetivo justamente de lograr la implementación de una Central Termoeléctrica de Biogás.

2.1.1. LA BIOMASA COMO FUENTE DE BIOGÁS

La biomasa es aquella materia orgánica de origen vegetal o animal, incluyendo los residuos y desechos orgánicos, susceptible de ser aprovechada energéticamente. Las plantas transforman la energía radiante del sol en energía química a través de la fotosíntesis, y parte de esta energía queda almacenada en forma de materia orgánica (Garrido, 2008, pág. 27)

En la actualidad se acepta como definición de biomasa la siguiente:

“Se considera biomasa a un grupo de productos energéticos y materia primas de tipo renovable que se originan a partir de materia orgánica formada por vía biológica “

Quedan pues fuera de este concepto los combustibles fósiles y las materias orgánicas derivadas de éstos (los plásticos y la mayoría de los productos sintéticos) ya que, aunque aquellos tuvieron un origen biológico, su formación tuvo lugar en tiempos remotos. La biomasa es una energía renovable de origen solar a través de la fotosíntesis de los vegetales.

2.1.2. RESIDUOS SÓLIDOS

(Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental(OEFA), 2014) Define a “Los residuos sólidos son productos o subproductos en estado sólido o semisólido, desechados por un

generador (persona), además se considera que carecen de valor económico y se les conoce coloquialmente como basura”.

Los Residuos Sólidos (RS) se definen como los desechos recolectados por municipalidades u otras autoridades locales-urbanos por otro lado, esta definición varía según el país. Típicamente, los residuos sólidos incluyen desechos domésticos; desechos de jardines y parques; y desechos comerciales/institucionales. (Sosa H. , 2018)

2.1.2.1 CLASIFICACIÓN POR SU NATURALEZA

a) Residuos Sólidos Urbanos Orgánicos

Residuos de origen biológico (vegetal o animal), que se descomponen naturalmente, generando gases (dióxido de carbono y metano, entre otros) y lixiviados en los lugares de disposición final.

b) Residuos Sólidos Urbanos Inorgánicos

Residuos de origen mineral o producidos industrialmente, que no se degradan con facilidad. Pueden ser reaprovechados mediante el reciclaje.

2.1.3. BIOGÁS EN RESIDUOS SÓLIDOS

(Chonlón Velicoso, 2016) Define: “El biogás, se origina en el proceso de fermentación o digestión anaerobia, es decir en ausencia del oxígeno, a través de la putrefacción de la parte orgánica de los residuos”.

2.1.3.1 COMPOSICIÓN DE LOS RESIDUOS SOLIDOS

Está compuesto principalmente por el (CH_4) gas metano y (CO_2) dióxido de carbono y de otros gases en mínimas cantidades, tal como se muestra en la **Tabla 1**. Los residuos sólidos orgánicos comienzan el tratamiento químico de fermentación, emanan una suma de gases, los cuales en su conjunto son llamados biogás. Utilizando los métodos apropiados, el biogás se puede convertir en diferentes tipos de energía, como en formas de calor, energía mecánica, electricidad (Chonlón Velicoso, 2016)

“El CH₄ (metano), este gas puede llegar a tener las mismas características de un combustible fósil, suficientemente eficiente y limpio que puede ser directamente utilizado para fines de satisfacer alguna o en su totalidad las demandas de energía” (Chonlón Velicoso, 2016)

Tabla 1. Componentes del Biogás provenientes de un relleno sanitario

Componente	Cantidades
Metano (CH ₄)	45-65 %
Dióxido de Carbono (CO ₂)	35-55 %
Oxígeno (O ₂)	0-5 %
Nitrógeno (N ₂)	0-20 %
Hidrogeno(H ₂)	0-1 %
Humedad (H ₂ O)	Saturado
Monóxido de Carbono (CO)	Trazas
Amoníaco(NH ₃)	Trazas
Sulfuro de Hidrogeno (H ₂ S)	0.5-100 ppm
Compuestos orgánicos	5 ppm

Fuente: Tesis sobre la generación de residuos sólidos orgánicos, Huaylinos S. Irving del departamento de Huancayo, 2018

2.1.3.2 CARACTERIZACIÓN DE LOS RESIDUOS SOLIDOS ORGÁNICOS

Aquel estudio producto de mediciones en campo o muestreos estadísticos, determina entre otros: la generación per cápita de residuos de una población, la generación actual, la composición porcentual de los diferentes tipos de residuos que se generan y la densidad de los residuos que se recolectan.

a) Composición física

Se calcula el porcentaje de cada componente teniendo en cuenta los datos del peso total de los residuos recolectados en un día (W_t) y el peso de cada componente (P_i).

$$\text{Porcentaje (\%)} = \frac{P_i}{W_t} * 100 \quad (2.1)$$

b) Proyección de la Población

Es anunciar o pronosticar la cantidad de habitantes que será estimada en años futuros, en donde se calcular según un procedimiento de determinación el cual se incrementa progresivamente.

$$P_f = P_o(1 + r)^n \quad (2.2)$$

Donde:

P_f = Proyección Final Proyectada después de “n” años (Hab.)

P_o = Población actual; población real obtenida del último censo (Fuente INEI)

r = Tasa de crecimiento anual intercensal (1.7% a 1% descendientemente según INEI.)

n = Cantidad de años a proyectar desde la población actual inicial (P_o)

c) La tasa de crecimiento anual intercensal

Es la frecuencia con la que la cantidad de habitantes varía, ya sea aumentando o disminuyendo durante un periodo de censo específico. Se puede determinar de la siguiente manera:

$$r = 1000x\left(\sqrt[n]{\frac{Poblacion\ final}{Poblacion\ Inicial}} - 1\right) \quad (2.3)$$

Donde:

r = Tasa de crecimiento de anual intercensal

n = Número de años entre la población final y población inicial (años)

d) Generación per cápita

La Generación per cápita expresa la cantidad (en peso) de residuos sólidos generados por una persona, se puede estimar globalmente así:

$$\mathbf{GPC} = \frac{\mathbf{DSr \text{ en una semana}}}{\mathbf{Pob * 7 * Cob}} \quad (2.4)$$

Donde:

GPC = Generación de habitante por día (Kg. /habitante por día)

DSr = Cantidad de Residuos Sólidos recolectados en una semana (Kg/semána)

Pob = Población total (hab.)

7 = Días de la semana

Cob = Cobertura del servicio de aseo urbano (%)

e) Cobertura del servicio de aseo urbano

Es el rango o alcance del servicio de limpieza urbana, el cual es el cociente entre la población atendida y la población total. La cobertura de servicio de aseo urbano se determina a partir de la siguiente fórmula:

$$\mathbf{Cobertura \text{ del servicio } (\%)} = \frac{\mathbf{Poblacion \text{ atendida (Hab.)}}}{\mathbf{Poblacion \text{ total (Hab.)}}} \quad (2.5)$$

f) Proyección de generación per cápita

La generación per cápita en cuando pasan los años futuros variaran, al momento de un desarrollo urbano y comercial de la población, será causa para el indicador de producción se incremente. Así mismo será necesario determinar el valor de la producción per cápita anualmente, para poder determinar la generación de residuos sólidos urbanos en los próximos años.

$$\mathbf{G_{pf}} = \mathbf{G_{pc}(1 + r)^n} \quad (2.6)$$

Donde:

G_{pf} = Generación per cápita futura (Kg. /hab./día)

G_{pc} = Generación per cápita actual (Kg. /hab./día)

r = Tasa del incremento de generación en % (de 0.5 a 1%)

n = Número de años

g) Tasa del incremento de generación

Se determina basándose en la cantidad de residuos producidos durante un año, al dividir esta cifra entre el número de habitantes de la población actual. Según la Revista de Costa Rica de la Universidad Nacional de Costa Rica (UNA). En su artículo “Tasas de generación y caracterización de residuos sólidos ordinarios en cuatro municipios del área metropolitana” Se menciona que el valor de incremento de generación variara entre el 0.5% y 1% para escenarios en bajo, medio y normal crecimiento de residuos sólidos orgánicos por cada habitante. Asimismo, la Gerencia de Medioambiente Provincial del Cusco dio a conocer los valores de las tasas de incremento de generación per cápita de los diferentes distritos de la provincia del Cusco mencionadas en el Plan Integral de Gestión Ambiental de Residuos Sólidos. Así mismo esta referido en el Ministerio del Ambiente (MINAM. 2020) y en el Sistema Nacional de Información Ambiental. (SINAI, 2020)

h) Generación de Residuos Sólidos

La producción anual de residuos sólidos orgánicos debe ser estimada con base en las proyecciones de la población y la producción per cápita.

$$DSd = Pob * GPC \quad (2.7)$$

Donde:

DSd = Cantidad de residuos sólidos producidos por día (Kg/día)

Pob = Población total (hab.)

GPC = Generación per cápita (Kg. /hab./día)

2.1.4. GENERACIÓN DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS

2.1.4.1. CANTIDAD Y GENERACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS PRODUCIDOS

EN EL DISTRITO DEL CUSCO

Según (Cusco, 2020, pág. 126) afirma que El Estudio de Caracterización de Residuos Sólidos (ECRS) de Distrito de Cusco, es una herramienta base para obtener información primaria de las características de los residuos sólidos del ámbito municipal, conformado por los residuos sólidos de fuente de generación domiciliaria y la fuente de generación no domiciliaria como son los comercios, restaurantes, mercados, instituciones, entre otros similares.

Así mismo un estudio de caracterización de residuos sólidos (ECRS) es un instrumento que proporciona información básica de los residuos sólidos de los distritos y provincias de un departamento, con el objeto de modelar técnicamente los sistemas de almacenamiento, barrido, recolección, transporte y disposición final de los mismos para luego obtener las determinadas condiciones de tratamiento de los residuos sólidos orgánicos urbanos y su posterior aprovechamiento energético.

El estudio de caracterización de residuos sólidos (ECRS) del Distrito del Cusco nos permite conocer la cantidad de residuos sólidos que se generan en función de los niveles socioeconómicos identificados y las actividades económicas predominantes en las actuales condiciones locales. Asimismo, analiza las principales características (cuantitativas y cualitativas) de los residuos, tales como densidad, composición física, contenido de humedad.

La generación de Residuos Sólidos constara en el siguiente cuadro de la **tabla 2**.

Tabla 2. Generación de residuos sólidos del distrito de Cusco

Población del distrito del Cusco				121741 habitantes		
	Estratos	Generación Per Cápita (kg/persona/día)	Representatividad (%)	Volumen diario (Toneladas /día)	Volumen mensual (Toneladas /mes)	Volumen anual (Toneladas /año)
1	Orgánicos	0.457	46.94	55.636	1669.08	20028.96
2	Comercios Comunes	0.0605	6.21	7.314	219.42	2633.04
3	Restaurantes	0.04342	4.46	5.255	157.65	1891.80
4	Instituciones	0.0109	1.12	1.317	39.51	474.12
5	Alojamientos	0.0629	6.46	7.614	228.42	2741.04
6	Servicios	2.037	4.49	5.290	158.70	1904.40
7	Especial	1.432	0.76	0.895	26.85	322.20
8	Mercados	0.0721	7.41	8.730	261.90	3142.77
9	Supermercados, centros de abastos	0.03797	0.39	0.464	13.91	166.95
10	Instituciones Educativas	0.051	2.65	3.127	93.81	1125.67
11	Barrido de calles	0.186	19.1	22.500	675.00	8100.00
Total		4.45079	100	118.142	3544.250	42530.95

Fuente: Gerencia de Medio Ambiente, Municipalidad del Cusco, 2020

a) Población: El Distrito del Cusco según el censo de población registra una población de 121,741 habitantes como población en el año 2020. (Distrito.pe, 2020)

b) Generación de Residuos Sólidos: Son aquellos residuos sólidos en el distrito del Cusco el cual son recolectadas en áreas públicas comprendiendo los diferentes establecimientos fuera del rango domiciliario como son los mercados de abastos, centros comerciales, restaurantes, instituciones, hoteles/hospedajes/clubes, parques, hospitales, comisarías y establecimientos de servicios. Los residuos sólidos urbanos del distrito del Cusco corresponden a la cantidad de 118.142 Toneladas por día en el año 2020.

c) Generación Per Cápita: El estudio de caracterización de residuos sólidos es realizado por la gerencia del medio ambiente del municipio del Cusco el cual determinó que el valor de la generación per cápita promedio de los diferentes lugares de disposición de residuos sólidos (mercados, calles, domicilios plazas etc.) del distrito del Cusco es de 4.45079 kg. / habitante/ al día de residuos sólidos recolectados del distrito del Cusco.

2.1.4.2. COMPOSICIÓN FÍSICA DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS DEL DISTRITO DEL CUSCO

Tabla 3. Composición física de los residuos sólidos del distrito del Cusco

TIPO DE RESIDUOS SOLIDOS	Composicion								Composicion porcentual (%)
	Dia 1	Dia 2	Dia 3	Dia 4	Dia 5	Dia 6	Dia 7	Total	
	Kg								
1. Residuos Aprovechables	51.30	38.33	48.44	66.35	51.00	44.05	43.72	343.19	79.61%
1.1. Residuos Organicos	47.30	35.20	39.95	57.20	47.05	40.50	40.32	307.52	71.34%
1.1.1. Residuos de alimentos (restos de comida, cascara, restos de frutas, verduras, hortalizas y otros similares)	42.00	31.50	35.20	47.60	44.85	35.90	38.10	275.15	63.82%
1.1.2. Residuos de maleza y poda (restos de flores, hojas, tallos, grass y otros similares)	2.00	1.10	1.50	1.90	0.05	0.60	1.30	8.45	1.96%
1.1.3. Otros organicos (estiércol de animales menores, huesos y similares)	0.10	0.20			0.05		0.02	0.37	0.09%
1.1.4. Papel	1.60	1.50	1.90	5.40	1.10	0.80	0.6	12.90	2.99%
Blanco	1.15	0.90	1.10	3.10	0.35	0.80	0.10	7.50	1.74%
Periodico	0.45	0.60	0.60	1.10	0.65		0.20	3.60	0.84%
Mixto (paginas de cuadernos, revistas, otros similares)			0.20	1.20	0.10		0.30	1.80	0.42%
1.1.5. Carton	1.60	0.90	1.35	2.30	1.00	3.20	0.30	10.65	2.47%
Blanco (liso y cartulina)	1.00		0.45	0.80	0.35	0.90	0.10	3.60	0.84%
Marron (corrugado)	0.50	0.90	0.65	1.50	0.65	1.80	0.20	6.20	1.44%
Mixto (tapas de cuaderno, revistas y otros similares)	0.10		0.25			0.50		0.85	0.20%
1.2. Residuos Inorganicos	4.00	3.13	8.49	9.15	3.95	3.55	3.40	35.67	8.27%
1.2.1. Vidrio	0.00	0.22	1.50	1.90	0.15	0.30	0.40	4.47	1.04%
Transparente			0.80	0.80	0.15	0.30	0.40	2.45	0.57%
Otros colores (marron, ambar, verde, azul, entre otros)		0.22	0.60	1.10				1.92	0.45%
Verde									0.00%
Otros (vidrios de ventana)			0.10					0.10	0.02%
1.2.2. Plastico	2.9	2.10	2.090	5.25	3.40	2.45	2.75	20.94	4.86%
PET-Tereftalato de polietileno(1) (aceite y botellas de bebidas y agua, entre otros similares)	2.00	1.10	1.35	4.10	3.00	1.00	0.4	12.95	3.00%
PEAD-Polietileno de alta densidad(2) (botellas de lacteos, shampoo, detergente, liquido, suavizante)	0.40	0.5	0.59	0.65	0.20	1.15	0.20	3.69	0.86%
PEBD-Polietileno de baja densidad(4) (empaques de alimentos, empaques de plastico de papel higienico, empaques de detergente, empaques film)	0.15	0.35	0.15	0.35	0.05	0.05	2.15	3.25	0.75%
PP-polipropileno(5) (baldes, rafia, estuches negros de CD, tapas de bebidas, tapers)	0.20				0.15	0.25		0.60	0.14%
PS-poliestireno(6) (tapas cristalinas de Cds, micas, vasos de yogurt, subetas de helado, envases de lavavajilla)	0.10	0.15		0.15				0.40	0.09%
PVC-policloruro de vinilo(3) (Tuberias de agua, desagüe y electricas)	0.05							0.05	0.01%
1.2.3. Tetra brik (envases multicapa)	0.00	0.11	0.20	0.10	0.15	0.30	0.00	0.86	0.20%
1.2.4. Metales	1.10	0.70	1.45	0.80	0.20	0.50	0.15	4.90	1.14%
Latas (latas de leche, atun entre otros)	0.80	0.70	0.75	0.80	0.20	0.35	0.10	3.70	0.86%
Metales ferrosos	0.20		0.40					0.60	0.14%
Aluminio			0.10			0.15		0.25	0.06%
Otros metales	0.10		0.20				0.05	0.35	0.08%
1.2.5. Textiles (telas)	0.00	0.00	3.25	1.10	0.05	0.00	0.10	4.50	1.04%
1.2.6. Caucho, cuero, jebe	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	5.89
2. Residuos No aprovechables	8.56	16.11	13.24	20.05	8.3	13.9	7.75	87.91	20.39%
Bolsas plasticas de un solo uso	0.05	5.00	3.05	3.20	1.65	2.95		15.90	3.69%
Residuos sanitarios (Papel Higienico /pañales/toallas sanitarias, excretas de mascotas)	6.8	9.60	8.00	8.80	5.80	7.30	4.70	51.00	11.83%
Pilas	0.05		0.01	0.20				0.26	0.06%
Tecnopor (Poliestireno expandido)	0.35	0.45	0.31	0.50	0.20	0.50	0.10	2.41	0.56%
Residuos Inertes (tierra, piedras, ceramicos, ladrillos entre otros)	1.00	0.90	0.01	0.20	0.20	2.60	2.50	7.41	1.72%
Restos de medicamentos	0.05	0.01	0.01	0.05	0.10	0.10	0.05	0.37	0.08%
Envolturas de snacks, galletas, caramelos, entre otros	0.15	0.15	0.25	0.60	0.35	0.45		1.95	0.45%
Otros residuos no categorizados	0.11		1.60	6.50			0.40	8.61	2.00%
Total	59.86	54.44	61.68	86.40	59.30	57.95	51.47	431.10	100.00%

Fuente: Servicio de limpieza pública, Gerencia de medio ambiente (municipalidad del Cusco, 2020)

La composición de los residuos sólidos está dividida en residuos aprovechables y residuos no reaprovechables con una composición porcentual de 79.61% y 20.39% respectivamente, dentro de los residuos aprovechables son de tipo de residuos orgánicos 65.87% y los residuos inorgánicos 13.74%.

Los residuos orgánicos desempeñan un papel crucial en diversas actividades, siendo aprovechados en múltiples procesos. Entre ellos, destacan los provenientes de alimentos, la maleza, la poda y otras materias orgánicas, los cuales se utilizan para la producción de compost, biogás o como fertilizantes naturales. Por otro lado, la composición se ve complementada con la presencia de residuos inorgánicos, como papel, cartón, vidrio, plástico, metales y telas, que también pueden ser reciclados y reutilizados para contribuir a la sostenibilidad ambiental. La gestión adecuada de ambos tipos de residuos es esencial para promover prácticas más responsables y respetuosas con el medio ambiente.

2.1.4.3. CANTIDAD Y GENERACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS PRODUCIDOS EN EL DISTRITO DE SANTIAGO

Tabla 4. Generación de residuos sólidos del distrito de Santiago

Población Urbana del Distrito	Generación Per Cápita	Generación Domiciliaria	Generación No domiciliaria	Generación de residuos sólidos especiales	Generación Municipal	Generación Municipal Diaria	Generación Municipal Mensual	Generación Municipal Anual
INEI	Kg/hab./día	Kg/día	Kg/día	Kg/día	Kg/día	Ton/día	Ton/mes	Ton/año
94 756	1.021	51,168.24	44,350	1,220	96738.29	96.74	2,902.15	35,310.10

Fuente: Servicios de limpieza Pública (Documentación de la gerencia de medio ambiente, Municipalidad de Santiago, 2020)

a) Población: La población del distrito de Santiago según el Instituto Nacional de Estadística e Informática es de 94756 habitantes en el año 2020.

b) **Generación de residuos sólidos:** Como se muestra en la **Tabla 4**. La generación de residuos sólidos en el distrito de Santiago alcanza un valor de 96.74 toneladas por día, y una estimación anual de producción de 35,310.1 toneladas por año de residuos sólidos.

c) **Generación per cápita:** La generación per cápita es de 1.0219 kg/habitante por día el cual está establecido por el estudio de caracterización de residuos sólidos de la gerencia de medio ambiente del distrito de Santiago así mismo podemos determinarlo mediante la ecuación de generación per cápita, considerando la población actual, la cantidad de residuos sólidos y la cobertura del servicio de aseo urbano del distrito de Santiago.

2.1.4.4. COMPOSICIÓN FÍSICA DE LOS RESIDUOS SOLIDOS DEL DISTRITO DE SANTIAGO

Tabla 5. Composición física de los residuos sólidos del distrito de Santiago

TIPO DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS	COMPOSICIÓN PORCENTUAL (%)	
	Domiciliaria	No domiciliaria
1. Residuos Aprovechables	70.51	42.28
1.1. Residuos Orgánicos	62.81	23.64
a) Residuos de alimentos (restos de comida, cascaras, restos de frutas, verduras, hortalizas y otros similares)	53.51	19.72
b) Residuos de maleza y poda (restos de flores, hojas, tallos, 27ircu y otros similares)	1.90	0.90
c) Otros orgánicos (estiércol de animales menores, huesos y similares)	0.93	25.07
d) Papel	3.05	6.22
Blanco	0.63	1.60
Periódico	0.93	1.80
Mixto (páginas de cuadernos, revistas, otros similares)	1.49	15.37
e) Cartón	3.42	4.95
Blanco (liso y cartulina)	0.00	7.92
Marrón(corrugado)	1.61	4.69
Mixto (tapas de cuaderno, revistas y otros similares)	1.81	3.43
1.2. Residuos Inorgánicos	7.70	19.83
a) Vidrio	2.57	0.76
Transparente	1.39	0.21

Otros colores (marrón, ámbar, verde, azul, entre otros)	1.18	0.00
Otros (vidrios de ventana)		4.87
b) Plástico	3.43	7.15
PET-Tereftalato de polietileno (1) (aceite y botellas de bebidas y agua, entre otros similares)	1.64	6.86
PEAD-Polietileno de alta densidad (2) (botellas de lácteos, shampoo, detergente, liquido, suavizante)	1.70	2.86
PEBD-Polietileno de baja densidad (4) (empaques de alimentos, empaques de plástico de papel higiénico, empaques de detergente, empaques film)	0.00	0.00
PP-polipropileno (5) (baldes, rafia, estuches negros de CD, tapas de bebidas, tapers)	0.08	0.00
PS-poliestireno (6) (tapas cristalinas de Cds, micas, vasos de yogurt, cubetas de helado, envases de lavavajilla)	0.02	0.00
PVC-policloruro de vinilo (3) (Tuberías de agua, desagüe y eléctricas)	0.00	0.00
c) Tetra brik (envases multicapa)	0.00	5.30
d) Metales	1.7	5.25
Lata, hojalata (latas de leche, atún entre otros)	1.67	0.26
Acero	0.03	0.13
Fierro	0.00	0.00
Aluminio	0.00	0.19
Otros metales	0.00	0.00
e) Textiles(telas)	0.00	0.00
f) Caucho, cuero, jebe	0.00	5.89
2. Residuos No aprovechables	29.49	30.00
Bolsas plásticas de un solo uso	4.65	4.59
Residuos sanitarios (Papel Higiénico /pañales/toallas sanitarias, excretas de mascotas)	9.65	8.91
Pilas	0.01	0.27
Tecnopor (Poliestireno expandido)	0.54	3.89
Residuos Inertes (tierra, piedras, cerámicos, ladrillos entre otros)	13.47	5.74
Restos de medicamentos	0.03	7.21
Envolturas de snacks, galletas, caramelos ,entre otros	1.03	1.75
Otros residuos no categorizados	0.13	33.33
Total	100.00	100.00

Fuente: Servicios de limpieza Pública (SERLIP, Municipalidad de Santiago-2020)

En base al estudio de caracterización se determinó la composición física de los residuos sólidos con las siguientes características:

- Residuos compostables, aquellos residuos que pueden ser aprovechados en la elaboración de compost, materia orgánica, madera y follaje, representando el 70.49%.
- Residuos Reciclables inorgánicos comerciables, por tener un precio en el mercado; Papel, Cartón, Vidrio, Plástico PET–Tereftalato de polietileno (1) (aceite y botellas de bebidas y agua, entre otros similares), PEAD-Polietileno de alta densidad (2) (botellas de lácteos, shampoo, detergente líquido, suavizante), y Metales Ferrosos, representando 14.16%
- Residuos no aprovechables, aquellos residuos que no pueden ser aprovechados y cuya disposición sería el relleno sanitario, representando el 29.51%.
- La composición física de los residuos sólidos urbanos que se encuentra fuera del ámbito domiciliario, es decir, no domiciliario los cuales son los mercados, centros comerciales, zonas urbanas públicas de calles, instituciones públicas y privadas etc.
- El 42.28% pertenecen a los residuos aprovechables los cuales son los residuos orgánicos e inorgánicos.

2.1.4.5. CANTIDAD Y GENERACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS EN EL DISTRITO DE WANCHAQ

Tabla 6. Generación de residuos sólidos del distrito de Wanchaq

Poblacion del distrito de Santiago	Generacion Per Capita Domiciliaria (kg/hab./día)	Generacion Domiciliaria (kg/día)	Generacion Establecimiento (kg/día)	Generacion Barrido de Calles (kg/día)	Generacion Per Capita Total (kg/hab./día)	Generacion Total No Domiciliaria (kg/día)	Generacion Total Municipal (kg/día)	Generacion Total Municipal (Tonelada/día)	Generacion Total Municipal (Tonelada/año)
69655	0.5	34827.96	24130.74	21166.2	1.14	45296.94	80124.9	80.125	29245.589

Fuente: Plan de desarrollo urbano, Oficina de Medio Ambiente (Municipalidad de Wanchaq-2020)

a) Población: Según el Instituto Nacional de Estadística e Informática, el número de habitantes del distrito de Wánchaq es de 69655 habitantes en el año 2020.

b) Generación Per Cápita: Según el Plan de desarrollo urbano del Cusco de la gerencia del medio ambiente de la municipalidad de Wanchaq, el valor de la generación per cápita es de 1.14 kg/habitante por día de residuos sólidos generados; sin embargo, si la cantidad de la generación per cápita no está presente en el estudio de caracterización de residuos sólidos del Plan de desarrollo urbano de Cusco se establecerá por medio de la fórmula del cálculo de generación per cápita de residuos sólidos. Considerando los valores de generación de residuos sólidos, la población distrital de Wanchaq y la cobertura de servicio de aseo urbano.

c) Generación Total de Residuos Sólidos: Abarca los 80.125 Toneladas/día y 29245.589 Toneladas/año siendo este en mayor cantidad de residuos sólidos urbanos domiciliarios de 34827.96 kg/día y de no domiciliarios de 45296.94 kg/día.

2.1.4.6. COMPOSICIÓN FÍSICA DE LOS RESIDUOS SOLIDOS DEL DISTRITO DE WANCHAQ

Tabla 7. Composición de los residuos sólidos del distrito de Wanchaq

Tipos de residuos solidos urbanos	Generacion de Residuos Solidos Urbanos			
	Total RSU Domiciliarios	Composicion Porcentual	Total RSU No Domiciliarios	Composicion Porcentual
	kg	%	kg	%
1. Materia Organica	134.15	59.69	263.5	56.02
Madera, Follaje	7.35	3.27	19.4	4.12
Papel	5.45	2.42	39	8.29
Carton	6.75	3	37.5	7.97
Vidrio	6.2	2.76	7.9	1.68
Plastico PET	4	1.78	21	4.46
Plastico Duro	6.65	2.96	4.15	0.88
Bolsas	8.7	3.87	35	7.44
Carton Multilaminado(tetra pack)	1.22	0.54	2.5	0.53
Tecnopor y similares	3.3	1.47	4.85	1.03
Metal	4.65	2.07	5.05	1.07
Telas y textiles	2.05	0.91	11.95	2.54
Caucho,cuero, jebe	6.05	2.69	4.95	1.05
Pilas	0.27	0.12	1.55	0.33
Restos de medicina, focos, etc.	0.97	0.43	1.65	0.35
Residuos sanitarios	22.95	10.21	5.15	1.09
Residuos inertes	2.8	1.25	4	0.85
Otros (Especificar)	1.25	0.56	1.3	0.28
Total	224.76	100	470.4	100

Fuente: Plan de desarrollo urbano, Oficina de Medio Ambiente (Municipalidad de Wanchaq-2020)

**2.1.4.7. CANTIDAD Y GENERACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS PRODUCIDOS EN
EL DISTRITO DE SAN SEBASTIÁN**

Tabla 8. Generación de residuos sólidos del distrito de San Sebastián

Población Urbana del Distrito	Generación de residuos sólidos diaria (Tonelada/día)	Generación de residuos sólidos mensual (Tonelada/mes)	Generación de residuos sólidos Anual (Tonelada/año)	Generación Per Cápita (kg/hab./día)
138017	84.996	2549.88	31023.54	0.62

Fuente: Estudio de Caracterización de Residuos Sólidos Municipales – Plan Integral de Gestión Ambiental de Residuos Sólidos, Municipalidad de San Sebastián, 2020

a) Población: El número de habitantes del distrito de San Sebastián es de 138017 habitantes en el año 2020 establecida por el Instituto Nacional de Estadística e Informática

b) Generación Per Cápita: El valor de la generación per cápita está determinada mediante el estudio de caracterización de residuos sólidos proporcionada por la Gerencia de Medio ambiente de la municipalidad de San Sebastián, el cual es de 0.6158 kg/hab./día de residuos sólidos recolectados, sin embargo, dado que no se muestra el valor de la generación per cápita, se empleará la fórmula de generación per cápita basada en las cantidades de residuos sólidos generados, la población distrital y la cobertura de servicio de aseo urbano del año 2020.

c) Generación de Residuos Sólidos: La Generación Total de Residuos Sólidos en el distrito de San Sebastián es de 84.996 Toneladas/día y 31023.54 Toneladas/año de residuos sólidos generados, dicho valor está determinado por la Gerencia de medioambiente y el Plan Integral de Gestión Ambiental de Residuos Sólidos del distrito de San Sebastián del año 2020.

2.1.4.8. COMPOSICIÓN FÍSICA DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS DE SAN

SEBASTIÁN

Tabla 9. Composición física de los residuos sólidos del distrito de San Sebastián

TIPO DE RESIDUOS SOLIDOS	COMPOSICION TOTAL PORCENTUAL (%)	
1. Residuos Aprovechables	9881.07	91.90%
1.1. Residuos Organicos	9001.62	83.72%
a) Residuos de alimentos (restos de comida, cascara, restos de frutas, verduras, hortalizas y otros similares)	7349.03	68.37%
b) Residuos de maleza y poda (restos de flores, hojas, tallos, grass y otros similares)	136.95	1.27%
c) Otros organicos (estiércol de animales menores, huesos y similares)	508.48	4.73%
d) Papel	156.96	1.46%
Blanco	100.46	0.93%
Periodico	30.10	0.28%
Mixto (paginas de cuadernos, revistas, otros similares)	26.40	0.25%
e) Carton	850.20	7.91%
Blanco (liso y cartulina)	34.10	0.32%
Marron (corrugado)	782.40	7.28%
Mixto (tapas de cuaderno, revistas y otros similares)	33.70	0.31%
1.2. Residuos Inorganicos	879.45	8.18%
a) Vidrio	173.90	1.62%
Transparente	92.60	0.86%
Otros colores (marron, ambar, verde, azul, entre otros)	68.40	0.64%
Otros (vidrios de ventana)	12.9	0.12%
b) Plastico	432.35	4.02%
PET-Tereftalato de polietileno(1) (aceite y botellas de bebidas y agua, entre otros similares)	310.20	2.89%
PEAD-Polietileno de alta densidad(2) (botellas de lacteos, shampoo, detergente,	36.00	0.33%
PEBD-Polietileno de baja densidad(4) (empaques de alimentos, empaques de plastico de papel higienico, empaques	54.90	0.51%
PP-polipropileno(5) (baldes, rafia, estuches negros de CD, tapas de bebidas, tapers)	10.25	0.10%
Cds, micas, vasos de yogurt, subetas de helado, envases de lavavajilla	16.7	0.16%
PVC-policloruro de vinilo(3) (Tuberias de agua, desagüe y electricas)	4.30	0.04%
c) Tetra brik (envases multicapa)	3.50	0.03%
d) Metales	171.30	1.59%
Lata, hojalata (latas de leche, atun entre otros)	123.20	1.15%
Acero	9.50	0.09%
Fierro	20.70	0.19%
Aluminio	15.90	0.15%
Otros metales	2.00	0.02%
e) Textiles (telas)	33.90	0.32%
f) Caucho, cuero, jebe	64.50	0.60%
2. Residuos No aprovechables	870.65	8.10%
Bolsas plasticas de un solo uso	203.24	1.89%
Residuos sanitarios (Papel Higienico /pañales/toallas sanitarias, excretas	411.14	3.83%
Pilas	1.54	0.01%
Tecnopor (Poliestireno expandido)	71.17	0.66%
Residuos Inertes (tierra, piedras, ceramicos, ladrillos entre otros)	132.42	1.23%
Restos de medicamentos	0.00	0.00%
Envolturas de snacks, galletas, caramelos, entre otros	49.80	0.46%
Otros residuos no categorizados	1.34	0.01%
Total	10751.72	100.00

Fuente: Estudio de Caracterización de Residuos Sólidos – Municipalidad de San Sebastián, 2020

**2.1.4.9. CANTIDAD Y GENERACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS PRODUCIDOS
EN EL DISTRITO DE SAN JERÓNIMO**

Tabla 10. Generación de residuos sólidos del distrito de San Jerónimo

Poblacion Urbana del distrito de San Jeronimo			48540 Habitantes	
Sectores de Generacion	Generacion Per Capita (kg/hab./dia)	Generacion de RSU por dia (Toneladas/dia)	Generacion de RSU por mes (Toneladas/mes)	Generacion de RSU por año (Toneladas/año)
Domiciliaria (Departamentos, vivienda)	0.403	19.582	587.453	7147.35
No Domiciliaria (Barrido de calles, Instituciones Educativas, Centros Comerciales)	0.393	19.07	572.16	6961.32
Total	0.796	38.652	1159.613	14108.67

Fuente: Plan Integral de Gestión Ambiental de Residuos Sólidos de la Municipalidad de San Jerónimo, 2020

a) Población: El número de habitantes del distrito de San Jerónimo es de 48540 habitantes en el año 2020 establecida por el Instituto Nacional de Estadística e Informática

b) Generación Per Cápita: El valor de la generación per cápita está determinada mediante el estudio de caracterización de residuos sólidos proporcionada por la Gerencia de Medio ambiente de la municipalidad de San Jerónimo, el cual es de 0.796 kg/hab./día de residuos sólidos recolectados, sin embargo, dado que no se muestre el valor de la generación per cápita, se empleará la fórmula de generación per cápita basada en las cantidades de residuos sólidos generados, la población distrital y la cobertura de servicio de aseo urbano del distrito de San Jerónimo.

c) Generación de Residuos Sólidos: La Generación Total de Residuos Sólidos en el distrito de San Jerónimo es de 38.652 Toneladas/día, el valor está determinado por la Gerencia de medioambiente mediante el Plan Integral de Gestión Ambiental de Residuos Sólidos del distrito de San Jerónimo.

**2.1.4.10. COMPOSICIÓN FÍSICA DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS DEL
DISTRITO DE SAN JERÓNIMO**

Tabla 11. Composición física de los residuos sólidos del distrito de San Jerónimo

TIPO DE RESIDUOS SOLIDOS	COMPOSICIÓN PORCENTUAL (%)
R. APROVECHABLE CON PRECIO EN EL MERCADO	13.58%
Metales	1.73%
Papel blanco	2.27%
Cartón	2.13%
Plástico PET.	1.85%
Plásticos duros	4.11%
Vidrios	1.49%
R. APROVECHABLE COMPOSTIFICABLE	64.15%
Materia orgánica	61.78%
Madera follaje	2.37%
R. NO APROVECHABLES	22.27%
Residuos sanitarios	14.61%
Bolsas	3.39
Pilas	0.89%
Tecknopor y similares	0.75%
Telas, textiles	0.36%
Restos de medicinas, focos	0.10%
Residuos inertes	2.02%
Otros	0.15%
TOTAL	100.00%

Fuente: Plan Integral de Gestión Ambiental de Residuos Sólidos de la Municipalidad de San Jerónimo, 2020

**2.1.4.11. CANTIDAD Y GENERACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS PRODUCIDOS
EN EL DISTRITO DE CCORCA**

Tabla 12. Generación de residuos sólidos del distrito de Ccorca

Poblacion Urbana del distrito de Ccorca			2407 Habitantes	
Sectores de Generacion	Generacion Per Capita (kg/hab./dia)	Generacion de Residuos Solidos por dia (Toneladas/dia)	Generacion de Residuos Solidos por mes (Toneladas/mes)	Generacion de Residuos Solidos por año (Toneladas/año)
Domiciliaria (Vivienda)	0.36	0.867	26.01	312.12
No Domiciliaria (Centros Educativos, Municipio)	0.393	0.946	28.379	340.542
Total	0.753	1.813	54.389	652.662

Fuente: Plan Integral de Gestión Ambiental de Residuos Sólidos de la Municipal del Cusco, 2020

a) Población: En la **Tabla 12**. Se aprecia que el distrito de Ccorca presenta una población de 2407 habitantes en el año 2020 establecida por el Instituto Nacional de Estadística e Informática

b) Generación Per Cápita: El valor de la generación per cápita está determinada mediante el estudio de caracterización de residuos sólidos proporcionada mediante el Plan Integral de Gestión Ambiental de Residuos Sólidos de la Gerencia del Medioambiente Provincial del Cusco, el cual es de 0.753 kg/hab./día. De residuos sólidos recolectados, sin embargo, dado que no se muestre el valor de la generación per cápita, se empleará la fórmula de generación per cápita basada en las cantidades de residuos sólidos generados, el número de la población distrital y la cobertura de servicio de aseo urbano del distrito de Ccorca del año 2020.

c) Generación de Residuos Sólidos: La Generación de Residuos Sólidos del distrito de Ccorca es de 1.813 Toneladas/día, este valor está determinado por la Gerencia de medioambiente y el Plan Integral de Gestión Ambiental de Residuos Sólidos de la provincia del Cusco del año 2020.

2.1.4.12. COMPOSICIÓN FÍSICA DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS DEL DISTRITO DE CCORCA

Tabla 13. Composición física de los residuos sólidos del distrito de Ccorca

Tipos de residuos solidos	Total(kg)	Composicion Porcentual
Biodegradable	475.6	62.2
Restos de Alimentos	200.6	26.2
Follaje	73.5	9.6
Guano	201.5	26.4
No Biodegradable	289	37.8
Aprovechable	180.5	23.6
Botellas Plasticas	33.5	4.4
Metales,Latas,Fierros	52.8	6.9
Vidrios	23	3
Plasticos Duros	38.5	5
No Aprovechable		
Caucho,Cuero, Huesos, Papel Higienico Tecnopor,Tetrapack,Pilas,Telas, Tejas,	108.5	14.2
Total	746.6	100

Fuente: Plan Integral de Gestión Ambiental de Residuos Sólidos de la Municipal del Cusco, 2020

**2.1.4.13. CANTIDAD Y GENERACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS PRODUCIDOS
EN EL DISTRITO DE POROY**

Tabla 14. Generación de los residuos sólidos del distrito de Poroy

Distrito de Poroy	Generación per cápita	Mercado	Barrido	Salud	Comercio	Restaurant	Institucion	Total (Ton./día)	Total (Ton./año)
	kg/hab./día	kg/estab./día	kg/km./día	kg/estab./día	kg/estab./día	kg/estab./día	kg/estab./día		
kilogramos	0.295	1.98	2100	1.485	3.465	1.98	4.455		
Poblacion	13497	0	2	1	18	25	3		
Generación total de residuos solidos (Toneladas/día)	3.982	0	0.06	0.001	0.003	0.001	0.004	4.051	1478.615

Fuente: Plan Integral de Gestión Ambiental de Residuos Sólidos, Gerencia de Medioambiente de la Municipal del Cusco, 2020

a) Población: En la **Tabla 14**. Podemos observar que la población del distrito de Poroy es de 13497 habitantes en el año 2020 designado por el Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI) de acuerdo al censo específico.

b) Generación de residuos sólidos: La generación de residuos sólidos en el distrito de Poroy es de 4.051 toneladas por día de residuos sólidos acumulados; el valor determinado de generación de residuos sólidos está establecido por el Plan Integral de Gestión Ambiental de Residuos Sólidos 2020 de la Municipalidad del Cusco.

c) Generación per cápita: El estudio de caracterización de residuos sólidos y el Plan Integral de Gestión Ambiental de Residuos Sólidos de la Gerencia del Medioambiente de la Municipalidad del Cusco son los encargados de proporcionar los valores de generación per cápita de residuos sólidos, el cual el valor de la generación per cápita es de 0.295 kg/habitante por día de residuos sólidos generados; sin embargo, si la cantidad de la generación per cápita no está presente en el Plan Integral de Gestión Ambiental de Residuos Sólidos se establecerá por medio de la **fórmula 2.4** del cálculo de generación per cápita de residuos sólidos tomando los valores de cantidad de generación de residuos sólidos, la población distrital y la cobertura de servicio de aseo urbano del distrito de Poroy.

2.1.4.14. COMPOSICIÓN FÍSICA DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS DEL DISTRITO DE POROY

Tabla 15. Composición Física de los residuos sólidos del distrito de Poroy

Tipo de residuo	Porcentaje (%)	
Residuo Orgánico	35	
Residuo Inorgánico	Plástico	60
	Otros	5
Total	100%	

Fuente: Estudio de Caracterización de Residuos Sólidos Municipales del Cusco-Municipalidad del Cusco 2020

2.1.4.15. CANTIDAD Y GENERACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS PRODUCIDOS EN EL DISTRITO DE SAYLLA

Tabla 16. Generación de residuos sólidos del distrito de Saylla

Sector de Generación	Población de Saylla	Generación Per Cápita (kg/hab./día)	Generación de residuos sólidos		
			Toneladas/día	Toneladas/mes	Toneladas/año
Domiciliario	9146	0.168	1.537	46.11	553.32
No Domiciliario		0.053	0.17	5.23	63.68
Total		0.221	1.707	51.34	617

Fuente: Plan Integral de Gestión Ambiental de Residuos Sólidos, Gerencia de Medioambiente de la Municipalidad del Cusco, 2020

a) Población: La población del distrito de Saylla es de 9146 habitantes en el año 2020 establecida por el Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI).

b) Generación Per Cápita: El valor de la generación per cápita del distrito de Saylla es de 0.221 kg/hab./día de residuos sólidos recolectados cuyo valor está determinada mediante el Plan Integral de Gestión Ambiental de Residuos Sólidos de la Gerencia del Medioambiente de la Municipalidad del Cusco, sin embargo, dado que no se muestre el valor de la generación per cápita, se empleará la fórmula de generación per cápita basada en las cantidades de residuos

sólidos generados, el número de la población distrital y el valor de la cobertura de servicio de aseo urbano del distrito de Saylla del año 2020.

c) Generación de Residuos Sólidos: La Generación de Residuos Sólidos del distrito de Saylla es de 1.707 Toneladas/día, este valor está determinado por la Gerencia de medioambiente y el Plan Integral de Gestión Ambiental de Residuos Sólidos de la provincia del Cusco del año 2020.

2.1.4.16. COMPOSICIÓN FÍSICA DE LOS RESIDUOS SOLIDOS DEL DISTRITO DE SAYLLA

Tabla 17. Composición física de los residuos sólidos del distrito de Saylla

TIPOS DE RESIDUOS	COMPOSICION PORCENTUAL
APROVECHABLE CON PRECIO EN EL MERCADO	16.80%
Metales	0.95%
Carton	1.97%
Plasticos 1 (botellas de gaseosa)	4.00%
Vidrios	9.87%
APROVECHABLE COMPOSTIFICABLE	54.50%
Restos de comida	23.28%
Follaje(restos de jardin)	21.55%
Guano	9.67%
NO APROVECHABLE	28.70%
Caucho	0.01%
Huesos	0.30%
Plasticos comun (bolsas plasticas)	18.74%
Papel inservible (Higienico)	0.44%
Pañales y apositos	2.04%
Ceramicos y losa	0.27%
Material fino < 10 mm.	6.54%
Madera	0.25%
Textiles (tela, lana y algodón)	0.11%
TOTAL	100.00%

Fuente: Estudio de Caracterización de Residuos Sólidos Municipales del Cusco-Municipalidad del Cusco 2020

Tabla 18. Resultados de la Generación Total y proyección de Residuos Sólidos de los distritos de la provincia del Cusco

Año	Cusco	Santiago	Wanchaq	San Sebastián	San Jerónimo	Saylla	Poroy	Ccorca	Total
	Tonelada/día	Tonelada/día	Tonelada/día	Tonelada/día	Tonelada/día	Tonelada/día	Tonelada/día	Tonelada/día	Tonelada/día
2020	118.142	96.738	80.125	85.571	38.652	1.707	4.051	1.813	426.799
2021	118.792	98.932	81.201	87.504	39.566	2.065	4.068	1.852	433.979
2022	119.564	101.068	82.955	89.394	40.420	2.112	4.160	2.011	441.683
2023	120.461	103.455	84.914	91.505	41.375	2.155	4.245	1.933	450.044
2024	121.485	105.588	86.664	93.391	42.228	2.206	4.346	1.979	457.887
2025	122.639	108.190	88.800	95.693	43.268	2.249	4.431	2.018	467.288
2026	123.927	110.312	90.542	97.570	44.117	2.305	4.540	2.067	475.380
2027	125.353	113.143	92.866	100.074	45.250	2.331	4.593	2.091	485.701
2028	126.921	114.342	93.850	101.134	45.729	2.389	4.706	2.143	491.214
2029	128.636	117.277	96.258	103.731	46.903	2.429	4.784	2.179	502.196
2030	130.502	119.223	97.855	105.451	47.680	2.491	4.907	2.234	510.344

Fuente: Elaboración Propia, Plan Integral de Gestión Ambiental de Residuos Sólidos de la provincia del Cusco, Gerencia de Medioambiente de la Municipalidad Provincial del Cusco, 2020

2.1.5. PODER CALORÍFICO DE BIOGÁS DE RESIDUOS SÓLIDOS

Es la cantidad de calor por unidad de masa de combustible que se libera al quemar el combustible en una combustión completa y dejando los productos de combustión condiciones estándar. La determinación del poder calorífico del biogás es indispensable para la determinación de la potencia eléctrica generado contenida en los residuos sólidos de los distritos de la provincia del Cusco. (Sosa I. A., 2018, pág. 36).

En donde podremos ver la diferencia de los dos tipos de poder calorífico:

a) Poder Calorífico Superior

Es la cantidad de calor generado cuando en los productos de la combustión el agua aparece en forma líquida, es decir que se aprovecha todo el calor de oxidación de los componentes de combustible.

b) Poder Calorífico Inferior

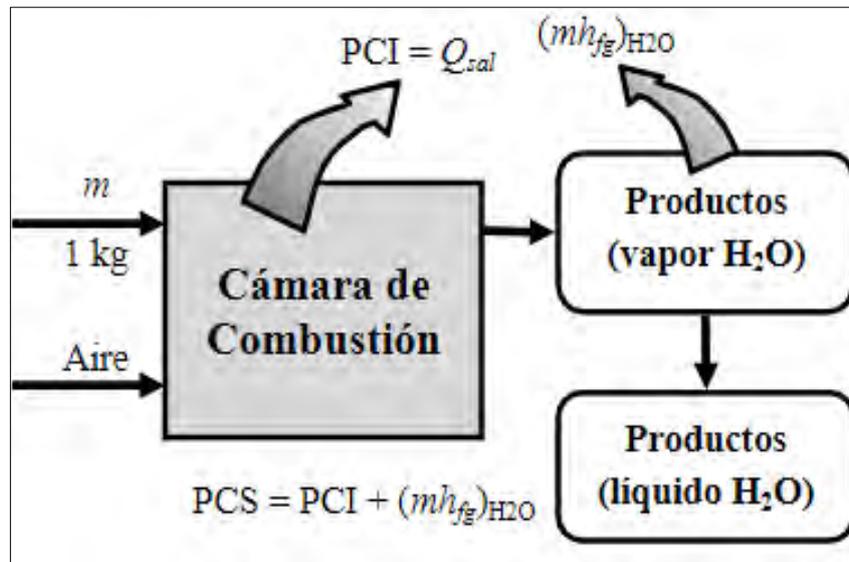
Es el calor que puede obtener en la combustión completa de la unidad de combustible el agua está en forma de vapor. Una parte de calor generado en las oxidaciones se utiliza para evaporar el agua y por ello ese calor no se aprovecha.

La diferencia entre ambos está en función del calor latente de vaporización del agua a la presión atmosférica. En la práctica, el agua producto de la combustión se vierte a la atmosfera en estado de vapor, desaprovechando el calor latente y siendo muy difícil de recuperar. Por este motivo, a la hora de definir el rendimiento es más usual emplear el poder calorífico inferior.

2.1.6. DETERMINACIÓN DEL PODER CALORÍFICO INFERIOR

Mediante la liberación de calor para generar energía, siempre se asume el valor del poder calorífico al ser quemado. La determinación del poder calorífico dependerá de la fase de H₂O en su forma líquida o forma de vapor.

Figura 2. Poder calorífico superior en función del poder calorífico inferior y del calor latente de vaporización en los productos



Fuente: Análisis del Biogás captado en un Relleno Sanitario para la Generación de energía eléctrica-U. Tecnológica de Pereira, Colombia

El cálculo del poder calorífico del biogás se determinará mediante el valor del poder calorífico del metano, ya que este se encuentra con mayor proporción en el biogás, y fijando a este compuesto de facilidad en el momento de la reacción y una mayor liberación de la energía al momento de la combustión. El cambio de entalpía por combustión entre el producto y el reactivo se presenta como la cantidad de calor cedido al exterior como se muestra en:

$$H_c = H_{\text{productos}} - H_{\text{reactivos}} = Q_{\text{salientes}} \quad (2.3)$$

H_c= Es la entalpía de reacción o de combustión del balance de energía.

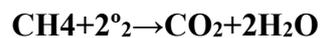
H_{productos}= Es la entalpía final el cual indica las variaciones de energía relacionadas con la entalpía de formación de los productos resultantes de una reacción química en un sistema en equilibrio

Hreactivos= Es la entalpía inicial de un sistema, refleja la entalpía de formación de los compuestos reactivos.

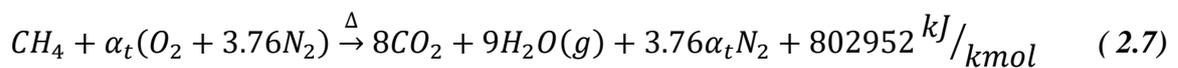
Qsalientes= Es el calor saliente o calor cedido o liberado cuando se realiza la combustión o quema de un mol en una sustancia.

Al analizar el biogás, es esencial tener en cuenta las variables que están involucradas en la combustión del metano según la ecuación estequiométrica proporcionada, tomando en cuenta que el agua (H₂O) está presente en estado de vapor.

Para la combustión completa del metano (CH₄) en presencia de oxígeno (O₂), formando dióxido de carbono (CO₂) y agua (H₂O) en forma de vapor, la ecuación estequiométrica es:

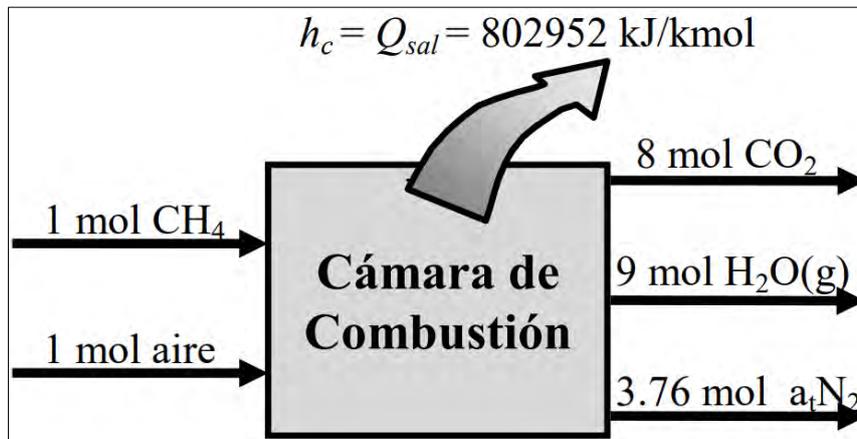


La ecuación estequiométrica señala que cuando un mol de metano reacciona, se requieren dos moles de oxígeno, resultando en la formación de un mol de dióxido de carbono y dos moles de agua en forma de vapor.



La **Figura 3.** y la información proporcionada indican que hay una reacción química en la que el metano reacciona con el aire estándar. La energía asociada con esta reacción, que es el cambio de entalpía (Hc), se ha determinado como 802,952 kJ/kmol802, 952kJ/kmol. (Panesso, Cadena, Mora Flórez, & Ordoñez, 2011, pág. 5).

Figura 3. La representación de la energía liberada en un proceso de un compuesto bajo condiciones normales



Fuente: Análisis del Biogás captado en un Relleno Sanitario para la Generación de energía eléctrica-U. Tecnológica de Pereira, Colombia

Para determinación del balance o reacción del proceso de combustión se establece bajo condiciones de:

- I. Presión atmosférica = 1 atmosfera
- II. Temperatura ambiente = 25 °C

El poder calorífico del metano puro en condiciones normales es similar al del gas natural, que tiene una composición aproximada de $C_nH_{3.8n}N_{0.1n}$. Ambos tienen un poder calorífico cercano de 810,000 kJ/kmol.

Asimismo, para cualquier gas ideal en condiciones estándar, se acepta que su volumen es cercano al de 1 mol, y por conveniencia, esta medida se indica en unidades métricas, como se presenta en:

$$1\text{m}^3 = 1000\text{L} \approx 0.044643\text{kmol} \text{ entonces } 802952\text{kJ/kmol} = 35846.071\text{kJ/m}^3.$$

No obstante, como se ha indicado anteriormente, el biogás se compone de múltiples elementos, según su composición física, en proporciones diversas. Por lo tanto, en este análisis, se asumirá que, dentro de un volumen específico de biogás, el metano se presenta en una proporción

intermedia, tal como se detalla en el siguiente enunciado, tomando como referencia los datos en la **Tabla 1**:

1 biogás = 0.45CH₄+0.35CO₂+0.03N₂+0.01^o₂+0.01 (compuestos degradables)

1. Metano= 45-65%
2. Anhídrido carbónico=35%
3. Nitrógeno=0-5%=3%
4. Oxígeno=0-20%=1%
5. Compuestos orgánicos=0-1%=1%

Según la composición de los residuos sólidos urbanos, el metano contiene el 45% del total del biogás de los residuos sólidos urbanos así mismo para poder obtener el poder calorífico del biogás será:

$$PCI_{biogas} = \%CH_4 * PCI_{metano} \quad (2.4)$$

De donde:

- %CH₄= Composición del metano (%) = 0.45
- PCI_{metano}=Poder calorífico inferior del metano = 35846.071kJ/m³
- El valor del poder calorífico inferior del biogás es:

$$PCI_{biogás} = 0.45*(35846.071kJ/m^3) = 16130.732 \text{ kJ/m}^3$$

$$PCI_{biogás} = 4.48076 \text{ kWh/m}^3$$

Un aspecto fundamental es que el valor del poder calorífico inferior del biogás (PCI_{biogás}) se puede alterar de acuerdo a la antigüedad del vertedero y a la propiedad de los residuos sólidos, por esto es conveniente hacer un muestreo periódico de los residuos y comprobar así la calidad del gas antes de la combustión.

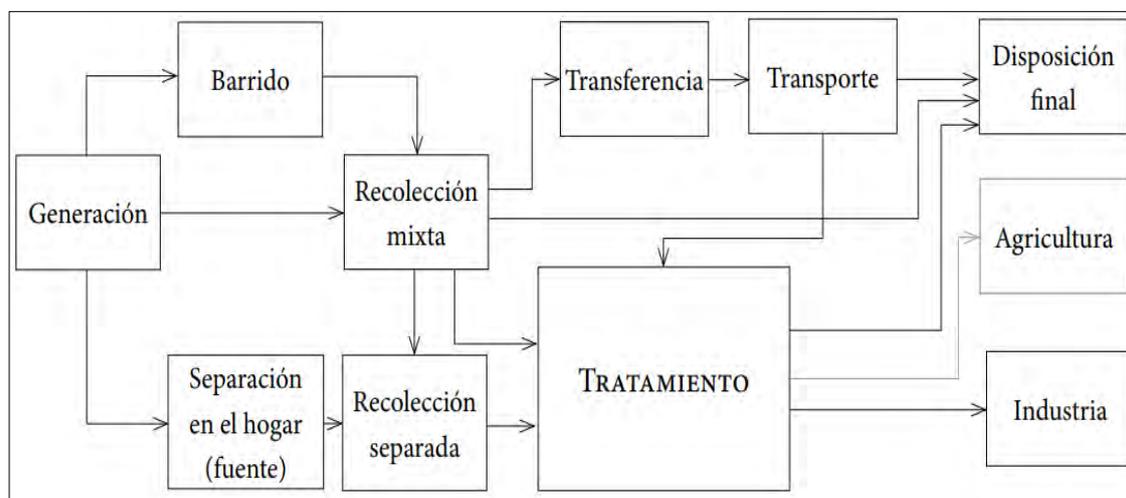
Para una facilidad de análisis al momento de hallar los valores será necesario convertir el poder calorífico del biogás determinado en función de kW-h. Están en circunstancias normales donde la presión y temperatura a nivel del cusco son de 25°C y 1 Atmosfera respectivamente.

2.1.7. MANEJO, ALMACENAMIENTO Y ACONDICIONAMIENTO DE RESIDUOS SÓLIDOS

El control en la generación de los residuos sólidos urbanos estará establecido por medio del tratamiento, recolección, selección y eliminación de la cantidad de residuos sólidos urbanos que se genera a diario, por consiguiente, será necesario un plan de tratamiento para su apropiado aprovechamiento de los gases. El régimen de los gases de los residuos sólidos urbanos debe de garantizar que no sea afectado al nuestro medio ambiente, es por eso que se establecerá dos modelos de gestión:

Como primer guía de gestión, forman parte los residuos sólidos urbanos domiciliarios los cuales son separados por los consumidores o productores en los contenedores que se alojan en cada calle, prolongación y avenidas de los distritos de la ciudad del cusco, como también cada ciudadano alberga su propio contenedor en su domicilio para luego llevar y sea recogida posteriormente por los camiones de residuos sólidos urbanos de las zonas distritales y finalmente depositado en los vertederos o relleno sanitarios. Los residuos sólidos urbanos no domiciliarios, es decir los que se encuentran en mercados, centros comerciales, calles, zonas públicas por donde la circula personas también pertenecerán al recojo de los contenedores para su posterior disposición final.

Figura 4. Gestión de Manejo de los Residuos Sólidos Urbanos



Fuente: Manejo de Compostaje, SENARMAT

2.1.8. SISTEMA DE RECOLECCIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS

La recolección de este tipo de biomasa se realiza mediante contenedores que albergan materiales orgánicos, fracciones de alimentos así mismo son transportadas por las unidades compactadoras o camión baranda, todos estos materiales domiciliarios y no domiciliarios, aprovechables y no aprovechables finalmente son dispuestos en el relleno sanitario disponible por la municipalidad.

Existen tipos de residuos sólidos recolectados por el servicio municipal

- a. Residuos Domiciliarios
- b. Residuos No domiciliarios
- c. Residuos Especiales de centro comerciales y mercados de abastos
- d. Residuos de vías publicas

Las municipalidades como San Jerónimo, Santiago, Cusco están acondicionando contenedores definidos para cada tipo de residuo, esta labor es muy importante, ya que permite una mejor disposición final de los residuos y educa a la sociedad en la preservación del medio ambiente.

2.1.9. SISTEMA DE SELECCIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS ORGÁNICOS

Los residuos sólidos orgánicos urbanos son seleccionados a través de la recolección selectiva dando lugar a la elección de la materia orgánica en la que será destinada al aprovechamiento del metano.

2.1.9.1. TRATAMIENTO DE RESIDUOS SÓLIDOS

Este sistema de tratamiento de residuos incluye el conjunto de operaciones que tienen por finalidad modificar y aprovechar las características físicas, químicas y biológicas de los residuos sólidos urbanos luego de ser recolectadas por las unidades de transportes al ser llevadas al lugar de disposición final.

2.2. FUNDAMENTOS DE LA GENERACIÓN DEL BIOGÁS DE RESIDUOS SÓLIDOS

2.2.1. ANTECEDENTES DE LA UTILIZACIÓN DEL BIOGÁS DE RESIDUOS SÓLIDOS

Los rellenos sanitarios producen biogás a medida que la materia orgánica se descompone bajo condiciones anaeróbicas (sin presencia de oxígeno). El biogás se compone en partes aproximadamente iguales de metano (CH₄) y dióxido de carbono (CO₂), con concentraciones de compuestos volátiles orgánicos (VOC), contaminantes nocivos del aire (HAP), y otros elementos. Los dos de los componentes principales del biogás (metano y dióxido de carbono) se consideran gas de invernadero (GHG) que contribuyeron al calentamiento global, aunque el panel intergubernamental sobre el cambio climático (IPCC) no considera que el dióxido de carbono que se encuentra específicamente presente en el biogás crudo un Gas de Efecto Invernadero (GEI). (Condori, 2014, pág. 16)

Sin embargo, el metano presente en el biogás crudo en su forma natural se considera un gas de efecto invernadero (GEI). De hecho, el metano es un gas con mayor composición física

porcentual que el dióxido de carbono, con un potencial de calentamiento global generalmente considerado como 21 veces mayor que el del CO₂. Por esa razón, la captura y combustión de metano (transformándolo en dióxido de carbono y agua) en una antorcha o chimenea de Biogás, un motor generador u otro dispositivo, tiene como resultado una considerable reducción neta de emisiones de gas de efecto invernadero (GEI).

Existen dos rutas naturales por las que el Biogás puede abandonar el relleno sanitario: por migración hacia el subsuelo adyacente, y por ventilación a través del sistema de cobertura del relleno sanitario. En ambos casos, sin una captura y control adecuados, el Biogás como metano con el tiempo llegará a la atmósfera. El volumen e índice de las emisiones de metano de un relleno sanitario son una función de la cantidad total de material orgánico enterrado en el relleno y su humedad, técnicas de compactación, temperatura, y tipo de residuos, así como el tamaño de sus partículas. A pesar de que el índice de emisiones de metano disminuye después del cierre de un relleno sanitario (cuando se agota la parte orgánica), normalmente un relleno sanitario continúa emitiendo metano durante varios años, hasta 20 o más, después de su cierre. Una forma habitual de someter y poder manejar las emisiones de Biogás es instalar un sistema de recolección y manejo del Biogás. Existen sistemas de control de Biogás que normalmente están equipados con un dispositivo de combustión diseñado para destruir el metano, VOC antes de que sean emitidos a la atmósfera.

Se puede utilizar el Biogás de buena calidad (alto contenido de metano con niveles bajos de oxígeno y nitrógeno) como combustible para reducir el uso de combustibles de fósiles convencionales u otros tipos de combustible. Usualmente el valor calorífico varía de 400 a 600 BTU (unidades térmicas británicas) por pie cúbico estándar (pce), lo cual equivale aproximadamente a la mitad del valor calorífico del gas natural. Los usos existentes y posibles del Biogás generalmente se clasifican en: generación de electricidad, uso directo para combustible de calefacción/caldera (BTU media), mejora a gas de alta BTU, y otros usos como

combustible para vehículos. Este estudio se enfoca en la evaluación de un posible proyecto de generación de electricidad.

2.2.2. PROCESOS DE BIODIGESTIÓN

El desarrollo y manejo de los residuos sólidos urbanos se plasma en el tratamiento de que involucra al reutilizar el material orgánico alterándolas en productos con un mayor valor añadido. La descomposición de la materia orgánica que se establecerá mediante la ausencia o presencia del oxígeno con el objeto de utilizar los residuos sólidos orgánicos urbanos con la necesidad de aprovechar las vías de depuración y supresión de residuos.

a) DIGESTIÓN AERÓBICA

La digestión aeróbica es un proceso llevado a cabo por una variedad de microorganismos, principalmente bacterias y protozoos. Estos microorganismos, al interactuar con la materia orgánica en solución en presencia de oxígeno, la descomponen y convierten en productos finales no dañinos, así como en material celular.

La digestión aeróbica ofrece varias ventajas, entre las que se incluyen la operación sencilla del sistema, una inversión inicial más baja en comparación con la digestión anaeróbica, la ausencia de olores desagradables, una reducción en la cantidad de coliformes fecales y, por ende, de microorganismos patógenos. Además, produce un efluente clarificado con una baja demanda bioquímica de oxígeno, con una mínima presencia de sólidos y bajo contenido de fósforo. Sin embargo, este proceso también tiene sus inconvenientes, como los elevados costos operativos debido al consumo significativo de energía, la falta de parámetros y directrices claras para el diseño, y los desafíos asociados con la separación de los lodos tratados aeróbicamente mediante técnicas como la centrifugación y la filtración al vacío. (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y Agricultura, 2011)

b) DIGESTIÓN ANAERÓBICA

El biogás se origina mediante la descomposición anaerobia de la materia orgánica. Este proceso, conocido como digestión anaerobia, es una actividad microbiana natural que tiene lugar en la materia orgánica en ausencia de oxígeno. Como resultado, se produce una mezcla gaseosa compuesta principalmente por metano y dióxido de carbono, denominada biogás, así como una solución líquida residual, denominada bioabono, que contiene componentes no descompuestos o parcialmente descompuestos, junto con residuos inorgánicos que estaban presentes originalmente en la materia orgánica. Esta transformación se lleva a cabo en contenedores sellados llamados biodigestores. En términos generales, estos biodigestores son estructuras diseñadas para recibir (entrada) materiales orgánicos (biomasa) y liberar (salida) el bioabono procesado, al mismo tiempo que cuentan con un sistema para recolectar y almacenar el biogás producido, con el fin de utilizarlo como fuente de energía. (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y Agricultura, 2011)

c) FERMENTACIÓN ANAERÓBICA

La fermentación anaeróbica descompone la materia por medio el empleo de microorganismos para producir reacciones de óxido – reducción, bajo condiciones de ausencia de oxígeno (O_2) En este proceso dos tercios del metano (CH_4) se producen mediante la fermentación anaeróbica al que se le denomina como metanogénesis acetotrófica, el cual es principalmente es utilizado para la recuperación de biocombustibles. (Adolfo, 2014)

2.2.3. FACTORES DEL PROCESO DE PRODUCCIÓN DE BIOGÁS

Para obtener un proceso microbiológico adecuado de la generación del biogás, se considera parámetros determinados, donde se incluyen los siguientes:

- Temperatura
- Potencial de Hidrogeno
- Presencia de nutrientes-sustratos

- Compuestos tóxicos en el proceso
- Concentración de Oxígeno

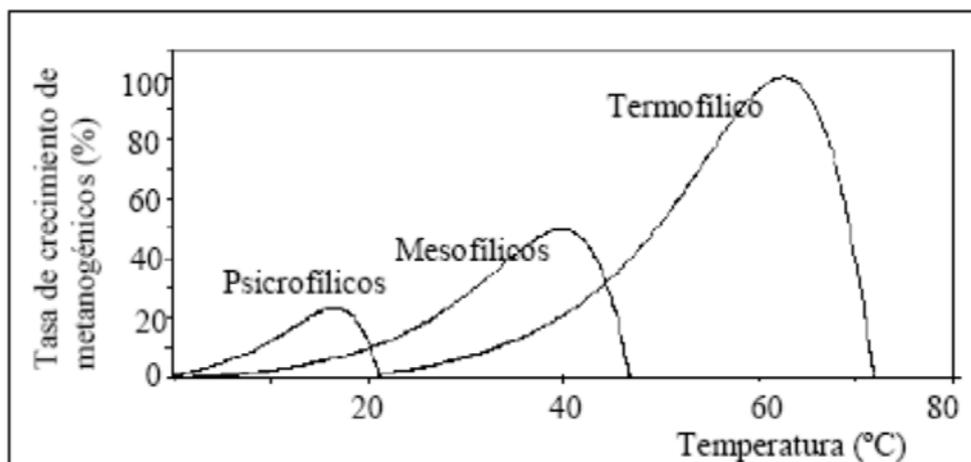
2.2.3.1. TEMPERATURA

Para garantizar la eficacia del proceso de degradación, la temperatura es vital para la descomposición, puesto que de ella dependerá la rapidez y el tiempo de desgaste o corrosión de las bacterias metanogénicas implicadas.

La existencia de variabilidad de la temperatura se ha establecido intervalos para que los microorganismos se desarrollen, los niveles de rangos de temperatura varían hasta los 25°C de las que se desarrollan las bacterias psicrófilas considerado de bajo grado de actividad, como grado medio se tienen temperaturas desde los 32°C hasta los 42°C en las que se desarrollan bacterias mesófilas y finalmente se tiene temperaturas de los 50°C hasta los 70°C con un alto grado de actividad que se hallan las bacterias termófilas. (Mario & Gabriela, 2015, pág. 41)

Las diferentes situaciones que existen en el cambio de temperatura inciden directamente en la generación del metano; como se aprecia en la **Figura 5**, el comportamiento de variación de temperatura.

Figura 5. Condiciones de Temperatura en la producción de metano



Fuente: Susceptibilidad a la temperatura de lodos metanogénicos termófilos, pág. 8

2.2.3.2. POTENCIAL DE HIDROGENO (PH)

Cada grupo microbiano involucrado en la fermentación anaeróbica tiene una región de pH específica para su crecimiento óptimo. Para los acidogénicos el pH ideal es de 6, mientras que para los acetógenos y metanógenos es de 7. El pH es, además, un importante modulador del sistema, puesto que influye en varios equilibrios químicos, pudiendo desplazarlos hacia la formación de un determinado componente que tenga influencia en el proceso. Por ejemplo, altos pH favorecen la formación de amoníaco libre, auténtico inhibidor de la fase metanogénica (Rosales, 2006, pág. 88)

2.2.3.3. NUTRIENTES

Es fundamental el alto poder de nutrientes para la descomposición anaeróbica de los residuos sólidos urbanos, donde el desarrollo bacteriano necesitara de relación de elementos como: Carbono, Nitrógeno, Fosforo, Azufre(C/N/P/S) con una oscilación que varía entre valores de 600:15:5:1 respectivamente para tener condiciones convenientes para el desarrollo de los microorganismos, al igual que en la temperatura la insuficiencia de los nutrientes-sustratos repercute en la rapidez de la actividad bacteriana. (Mario & Gabriela, 2015, pág. 42)

2.2.3.4. TOXICIDAD

Habitualmente se considera que los metanógenos son el grupo bacteriano más perceptible a las sustancias tóxicas de origen bacteriano involucrados en la fermentación anaeróbica. No obstante, se puede dar el caso de una adaptación o una reversibilidad a algunos efectos nocivos. Estos efectos nocivos es la fermentación orgánica de residuos sólidos el cual están asociados a la presencia de amoníaco, sulfuro de hidrógeno y ácidos grasos volátiles. El grado tóxico de estos fluidos y compuestos está sujeto al Potencial de hidrogeno (pH).

Los microorganismos metanogénicos son muy sensibles al oxígeno. Po esta razón la presencia de los organismos o microorganismos facultativos, que se desarrollan tanto en la

presencia o ausencia del oxígeno ya se en la hidrólisis o acidogénesis para ser absorbidas por estas bacterias presentes en el proceso anaeróbico.

2.2.4. ALMACENAJE DEL BIOGÁS

2.2.4.1. DIGESTOR

El digestor es básicamente es un cilindro o contenedor sellado, por donde entran las materias a tratar, convenientemente humedecidas. Dentro no hay oxígeno y las bacterias anaerobias se multiplican y procesan la materia orgánica, produciendo gas metano (EMISON, s.f.)

2.2.4.2. BIODIGESTOR

El concepto de este tipo de digestor, denominado biodigestor, califica como un contenedor cerrado de desechos orgánicos en este caso de materia orgánica de los residuos sólidos urbanos, que aprovecha la ausencia del oxígeno para su descomposición. Está conformado principalmente por la entrada para la biomasa, una salida, el sistema de recolección, y algunas veces es ejercida para el depósito del biogás, ya que muchas veces el sistema de almacenamiento es autónomo del biodigestor. La sencilla elaboración y construcción, su tecnología innovadora y un bajo coste hacen que sea accesible para muchos países, empresas que desean implementación y utilizar para diferentes fines, ya que la tecnológica que presentan forma parte de las energías renovables cumplirán con los requerimientos ecológicos, ambientales y económicos del futuro. (ALCIVAR GONZALEZ, 2007, pág. 25)

Los sistemas de disposición y acopio son los llamados también digestores o biodigestores, las cuales son contenedores cerrados en donde se la generación y almacenamiento del biogás.

Los tipos de digestores se ajustan a las exigencias y cambios que se adquiera, considerando el volumen y material utilizado, los diferentes digestores o biodigestores por el patrón de clasificación puede ser: de superficie tipo campana, cilíndrica o abovedada, ya que el fluido gaseoso es sustraído por medio de manguera y tuberías, de donde también el diseño que

adquieren estas son de tipo las balón, cúpula fija y de campana flotante y de acuerdo al proceso de carga residual de la planta son especificadas como en plantas continuas o discontinuas.

2.2.4.3. TIPOS DE BIODIGESTORES

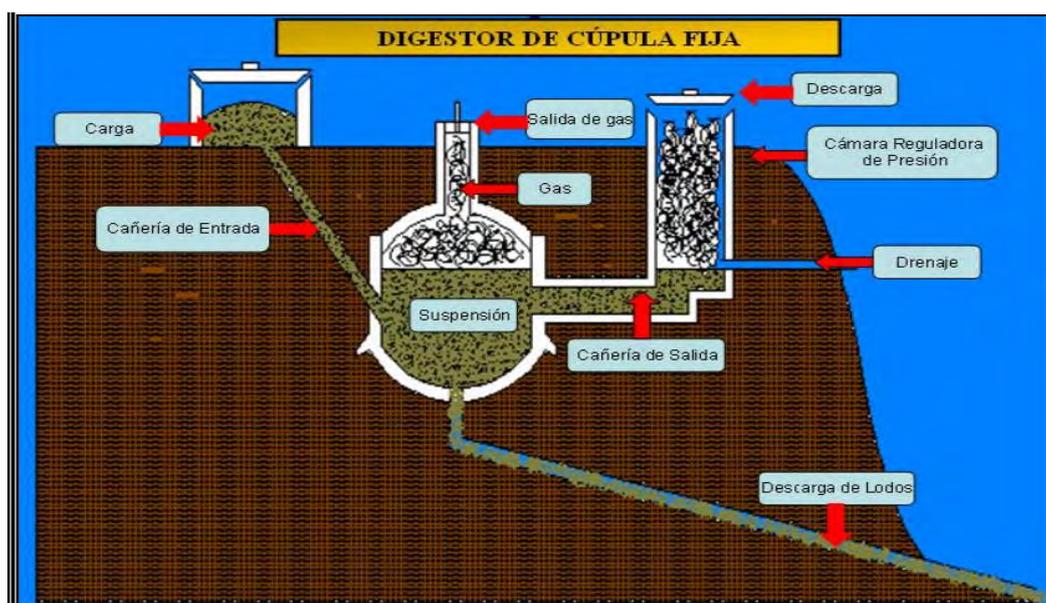
En la producción de biogás se pueden clasificar en:

- a) Discontinuas o de Bach, estas son cargadas una vez y vaciadas por completo después de un tiempo de parada; el suministro constante de gas con estas plantas se alcanza con tanques de gas o con varios digestores funcionando a la vez. (ALCIVAR GONZALEZ, 2007, pág. 41)
- b) Continuas, estas se cargan y descargan en forma periódica, por lo general diariamente, el material de fermentación debe ser fluido y uniforme. (ALCIVAR GONZALEZ, 2007, pág. 41)

a) *DIGESTOR TIPO CÚPULA FIJA*

En este tipo de digestor se generan entre 0.15 y 0.20 de volumen de gas por volumen de digestor/día. (ROMO LEGÑA, 2015, pág. 31)

Figura.6. Componentes de un digestor de cúpula fija

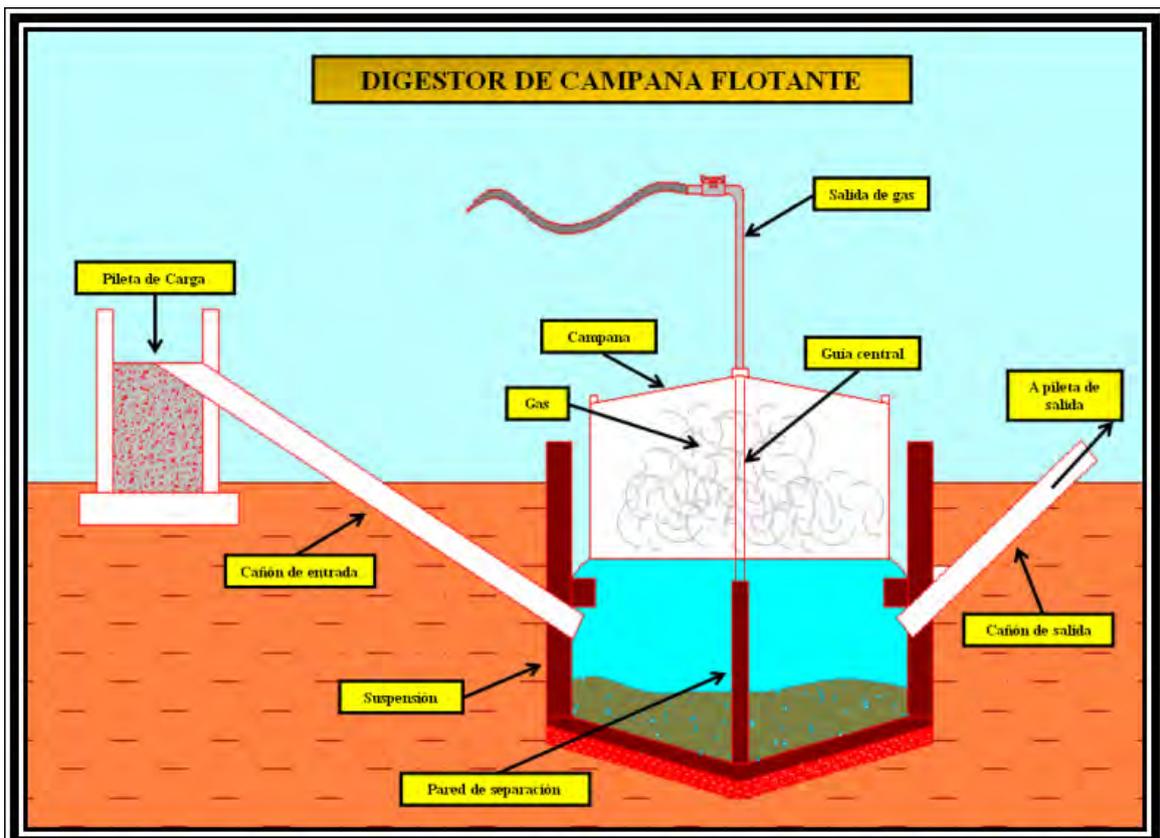


Fuente: Biodigestor, Byron Alcívar González- Informe de Tesis- año 2000

b) DIGESTOR DE CAMPANA FLOTANTE

La característica de este tipo de digestor se presenta como la alta calidad de eficiencia de producción de biogás, originando entre 0.5 y 1.0 volumen de gas por volumen de digestor por día.

Figura 7. Componentes de un digestor de campana flotante



Fuente: Biodigestor, Byron Alcívar González- Informe de Tesis, 2007

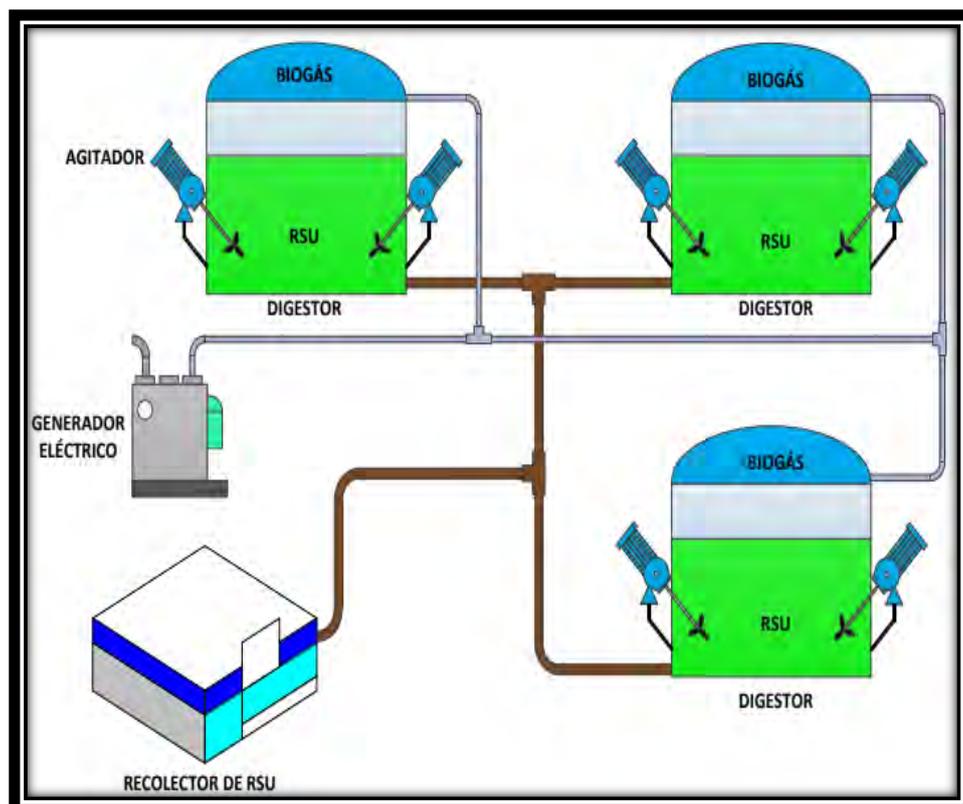
c) DIGESTORES MODERNOS

Los digestores modernos se basan en un proceso ordenado y estructurado para la generación del biogás, los cuales van desde agrupar los residuos que van a entrar al digestor (grandes envases metálicos) de tal forma que posea un alto porcentaje de residuos orgánicos para una degeneración acelerada de la biomasa del biogás.

Los procedimientos automatizados de materia orgánica difieren de los digestores convencionales teniendo la presencia del proceso de la fermentación anaeróbica, control adecuado de la precipitación del agua y del oxígeno o de gases que permiten la rapidez del procedimiento de las bacterias que degradan los residuos para ser convertidos en biogás.

La características como el control rígido de temperatura, agitadores motorizados controlados por ordenador y medidores de concentración serán primordiales para comprobar la existencia abundante de metano (CH_4) en comparación con el dióxido de carbono (CO_2) y que sea útil como combustible, así como gasómetros de presión para la disposición del volumen de biogás útil, estos dos indicadores denotan que la cantidad de residuos orgánicos depositada se ha convertido en biogás. (ROMO LEGÑA, 2015, pág. 31)

Figura 8. Digestor Moderno



Fuente: Biodigestor, Byron Alcívar González- Informe de Tesis, 2007

2.2.5. MODELO PARA ESTIMAR LA GENERACIÓN DE BIOGÁS EN EL RELLENO SANITARIO

Las ecuaciones matemáticas de los modelos para calcular la generación de biogás se darán a conocer como:

2.2.5.1. MODELO SCHOLL CANYON

Este modelo de cálculo se establece en la hipótesis que hay una fragmentación regular de material biodegradable en el relleno sanitario por unidad de tiempo, que evaluara la producción del metano. (Sosa I. A., 2018)

Ecuación de generación de metano según el modelo Scholl Canyon

$$Q_{CH_4} = k \times L_0 \times m_i \times e^{-k \cdot t_i} \quad (2.5)$$

Donde:

$$Q_{CH_4} = \text{Metano producido en el año } i \left[\frac{m^3 CH_4}{\text{año}}, \right]$$

$$k = \text{Constante de generación de metano, } \left[\frac{1}{\text{año}} \right]$$

$$L_0 = \text{Potencial de generación de metano, } \left[\frac{m^3 CH_4}{t} \right]$$

$$m_i = \text{Masa depositada en el año } i, t \text{ al año.}$$

$$T_i = \text{Periodo de disposición de los residuos en el relleno sanitario en años.}$$

$$e = \text{Logaritmo natural, adimensional.}$$

El modelo anuncia la generación del biogás en el transcurso del tiempo en función a la constante de generación de metano (k), del potencial de generación del metano (L₀) en donde relaciona los datos, registros importantes y alcances a futuro.

También predice la generación de biogás a lo largo del tiempo en función a la constante de generación de metano (k), del potencial de generación del metano (Lo) y de los registros históricos de residuos y futuras proyecciones.

A continuación, explicamos un poco más sobre los valores y constantes del modelo:

a) Constante de generación de metano(k)

Simboliza el índice de biodescomposición de primer orden a la que se produce el metano después del almacenamiento de los residuos orgánicos. Esta constante es incidiada por la humedad, Potencial de hidrogeno, temperatura. El valor normalmente es de 0.05 para un lugar de colocación almacenamiento final habitual bajo condiciones normales. (Sosa H. , 2018)

La constante de generación de metano depende de la humedad, temperatura y el potencial de hidrogeno (Ph) y otros elementos y circunstancias medioambientales.

Tabla 19. Valores de la constante de generación de metano

Valores estimados	EPA	NPI	IPCC
Lo (m ³ /Tn basura)	100	79	100 -200
K (1/año)	0,04 (tpo. lluvioso)	0,058	0,004 – 0,4
	0,02 (tpo.seco)		

Fuente: Sociedad Pública de Gestión Ambiental. Gobierno Vasco, 2005-pag.33

Existen tres tipos de estimaciones de normas y leyes medioambientales los cuales son: US Environmental Protection Agency (EPA), National Pollutant Inventory (NPI) y Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) los cuales se dan a conocer valores que representan y se utilizan en diferentes situaciones y países que sirven para calcular las emisiones de gas con parámetros del potencial de generación de metano (Lo) y la constante de generación de metano (k).

Según United States Environmental Protection Agency (EPA) para efectuar los cálculos de emisiones de gas, los valores estimados serán de acuerdo al clima del área que se encuentra en donde “k” será:

- 0,04 para área de tiempo lluvioso (más de 635 L de agua/m²al año).
- 0,02 para área de tiempo seco (menos de 635 L de agua/m²al año).

b) Masa depositada en el año(mi)

Hace referencia a la cantidad de residuos sólidos urbanos recolectados en los diferentes distritos de la ciudad del Cusco, el cual será calculada en Toneladas/año.

c) Periodo de disposición de los residuos en el relleno sanitario en años

El lugar donde se dispondrá el relleno sanitario es primordial en el desarrollo de la generación de biogás, el cual alude al tiempo de colocación y preparación para la producción de metano con las siguientes características:

- I. Según el reglamento de la Ley de Gestión Integral de Residuos Sólidos, el lugar de acopio o relleno sanitario de materiales sólidos urbanos tendrá un tratamiento mecanizado, ya que supera el límite de la cantidad de residuos sólidos urbanos almacenados en el relleno sanitario, con una generación de 291 Toneladas/al día de residuos sólidos urbanos en la ciudad del Cusco.
- II. Cumple un factor importante la vida útil de un relleno sanitario, el cual según el Decreto Legislativo N° 1002 (Generación de electricidad con el uso de energías renovables) establece un tiempo de vida de 20 años el plazo de suministro eléctrico, sin embargo, la el tiempo de vida de este relleno sanitario será de 10 años como mínimo.
- III. El año de apertura del relleno sanitario se vendría a dar el año 2021.
- IV. El año de clausura tendría el desenlace el año 2031.

d) Potencial de generación de metano(L₀)

Es la productividad o el rendimiento absoluta que es el total de metano producido. La porción de materia orgánica que contenga estos residuos, reflejara en el valor del potencial de generación de metano, así mismo el criterio habitual para su cálculo posterior, L₀ depende de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos y de la humedad; el valor puede variar entre los siguientes valores de metano (CH₄): 6,2 y 270 m³/Toneladas de residuos sólidos (RS). (Engineers, 2005)

El potencial de generación de metano (L₀) de residuos inorgánicos sin estado de degradación no producirá biogás, sin embargo, una tonelada de residuos orgánicos puramente degradable obtendría un valor aproximado hasta 400m³/Tonelada. Así mismo el valor que se toma en cuenta será el cálculo en la siguiente formula:

$$L_0 = MCF \times DOC \times DOC_f \times F \times \frac{16}{12} \quad (2.6)$$

Donde:

L₀ = Potencial de generación de metano (Gg de CH₄/Gg de residuos)

MCF = Factor de Corrección para el metano (Fracción)

DOC = Carbono orgánico degradable en la basura (Gg C/Gg de residuos)

DOC_f = Fracción de carbono orgánico degradable que se convierte a gas asimilado

F = Fracción de metano (CH₄) en el gas gestionado del vertedero generado.

16/12 = Constante estequiométrica (CH₄/C)

d.1. Factor de Corrección para el metano (MCF)

La estimación del valor de este parámetro que toma en cuenta el nivel de degradación anaeróbica de la materia orgánica, dependerá de la profundidad de la materia orgánica. (Kumar S., 2004)

En la siguiente **Tabla 20** se puede ver los valores que son considerados para su selección:

Tabla 20. Valores del factor de corrección del metano

Manejo de sitio	Profundidad	Profundidad
	< 5m	>=5m
sin manejo	0.4	0.8
con manejo	0.8	1
semi aeróbico	0.4	0.5
condición desconocida	0.4	0.8

Fuente: IPCC, Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Institute for Global Environmental Strategies (IGES)-2006

Los valores del factor de corrección del metano varían conforma a la cantidad de metano en el biogás:

- Para vertederos gestionados con una profundidad mayor o igual a 5m se considera =1
- Para vertederos no gestionados con una profundidad menor a 5m se considera=0.4
- Para vertederos no tratados o manejados más profundos son considerados=0.8

d.2. Carbono orgánico degradable en la basura (DOC)

Es el carbono orgánico de residuos que posteriormente se someterán a la degradación bioquímico como parte del proceso dependerá de la composición de los residuos, el cual será expresado en Giga gramos de Carbono por Giga gramos de residuos (Gg C/Gg de residuos. El valor estimado será el siguiente:

$$DOC = 0.40 \times (A) + 0.17 \times (B) + 0.15 \times (C) + 0.30 \times (D)$$

Donde:

A=Porcentaje de los RS de residuos de papel, cartón y los textiles

B= Porcentaje de los RS de desechos de jardín, u otros desechos orgánicos putrescibles

C= Porcentaje de los RS de restos de alimentos

D= Porcentaje de los RS de madera y paja

Tabla 21. Valores por defecto para el contenido de DOC y carbono fósil en los diferentes tipos de desechos.

VALORES POR DEFECTO DEL CARBONO ORGÁNICO DEGRADABLE EN LAS PRINCIPALES TIPOS DE DESECHOS	
Tipo de desechos	Porcentaje de COD (por peso)
A. Papel y textiles	40
B. Desechos de jardines y parques y otros desechos orgánicos putrescibles (excluidos los alimentos)	17
C. Restos de alimentos	15
D. Desechos de madera y paja ¹	30
¹ excluido el C de la lignina	
Fuente: Bingemer y Crutzen, 1987.	

Fuente: Directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero. Japón: IGES, 2006. Vol.

La **Tabla 21** presenta la composición de la materia degradable y no degradable, el cual varían según la fracción en condición de carbono orgánico contenida en las diferentes materias degradables y no degradables.

d.3. Fracción de carbono orgánico degradable (DOC_f)

Esta es una porción de carbono orgánico degradable que es transformada en biogás. Según (IPCC, 2006) el Panel Intergubernamental del Cambio Climático el valor predestinado es el 0.77, asumiendo que la temperatura fuese 35°C ya que es la temperatura normal o estándar con el cual permanece un vertedero, como también el valor de la estimación dependerá el valor de la temperatura en la zona anaerobia para su variación.

$$DOC_f = 0.014 \times T + 0.28 \quad (2.7)$$

Donde:

T= Temperatura de la zona anaeróbica (°C) se considera 35°C

d.4. Fracción de metano en el gas gestionado del vertedero(F)

Según (Kumar S., 2004): como valor despejado se considera un 0.6 a 07, puesto que el biogás constituye fundamentalmente en un 60 % a 70% de metano y un 30 % a 40% % de dióxido de carbono con menos del 5 % de otros constituyentes impuestos en los desechos recolectados.

2.2.5.2. GENERACIÓN DE DIÓXIDO DE CARBONO COMO MATERIA ORGÁNICA

Tanto la generación estimada de biogás, donde la mayor cantidad en porcentaje es de metano y la parte en menor cantidad es considerada de dióxido de carbono (CO₂) con un 40% como valor máximo porcentual de la generación total de material urbano, solo el 5% está compuesto por sustancias químicas como el nitrógeno, hidrogeno, oxígeno, etc.

2.3. GENERACIÓN DE ENERGÍA A PARTIR DE LA DESCOMPOSICIÓN ORGÁNICA DE LOS RESIDUOS SOLIDOS ORGÁNICOS

La generación de energía será a partir del biogás capturado de donde la potencia eléctrica es el factor de generación para su cálculo; de los cuales son considerados 3 escenarios de baja, media y alta representación.

2.3.1. POTENCIA ELÉCTRICA

La potencia eléctrica al ser la cantidad de energía entregada o transferida a un sistema en unidad de tiempo, será calculada conforme a la cantidad de caudal de biogás generado, en donde posteriormente se realizará el diseño de los equipos para la central térmica. Las unidades de medida son los Watts, unidad de potencia activa del Sistema Internacional de Unidades. Un Watt es equivalente a un joule (unidad internacional para energía y trabajo) por segundo (unidad de tiempo). (Sosa I. A., 2018)

2.3.1.1. POTENCIA DISPONIBLE Y POTENCIA A INSTALAR

Dependerá del caudal del biogás generado, según la ecuación siguiente:

$$\textit{Potencia Disponible} = \eta_t \times PCI_{biogas} \times Q_{biogas} \quad (2.8)$$

Donde:

η_t = Rendimiento térmico de la generación eléctrica

PCI_{biogas} =Poder Calorífico Inferior del biogás (kWh/m³)

Q_{biogas} = Caudal del biogás generado (m³CH₄/hora)

a) Rendimiento térmico de la generación eléctrica(η_t)

Es la eficiencia térmica del caudal de biogás adquirido, el cual es considerado del desempeño combinada de la central térmica, para el posterior cálculo de la potencia disponible se asume la estimación de valores de 25,33 y 40% para los escenarios bajo, medio y alto respectivamente.

b) Poder Calorífico Inferior del biogás (PCI_{biogas})

Es necesario el valor del poder calorífico inferior del biogás producido para la determinación de la potencia disponible para luego dimensionamiento de equipos. Las unidades del poder calorífico inferior deben ser kWh/m³, el cual varía entre 5 a 6.5kWh/m³ según el porcentaje de metano contenido en la composición del biogás.

c) Caudal del biogás generado (Q_{biogas})

Al generar la cantidad de biogás desarrollada en el caudal para el cálculo correspondiente, dicho valor será denominada en el sistema de unidades de m³CH₄/año.

2.3.2. FUNDAMENTOS TERMODINÁMICOS DE LA CENTRAL TÉRMICA

2.3.2.1. SEGUNDA LEY DE LA TERMODINÁMICA

Como primera ley de la conservación de la energía, la existencia de transmisión de la energía al ser abarcada por la fuerza calorífica, así mismo enuncia que el incremento de ciertos tipos o

formas de energía como la energía eléctrica, energía mecánica, energía térmica deben repercutir en la reducción de otros tipos de energía, de esta manera tener un sistema equilibrado, sin restricción sobre estos tipos o formas de transformación de energía. También no hace divisar las diferencias entre el trabajo y el calor. De acuerdo con la primera ley, la energía interna de un sistema se puede incrementar ya sea agregando calor o realizando un trabajo sobre el sistema.

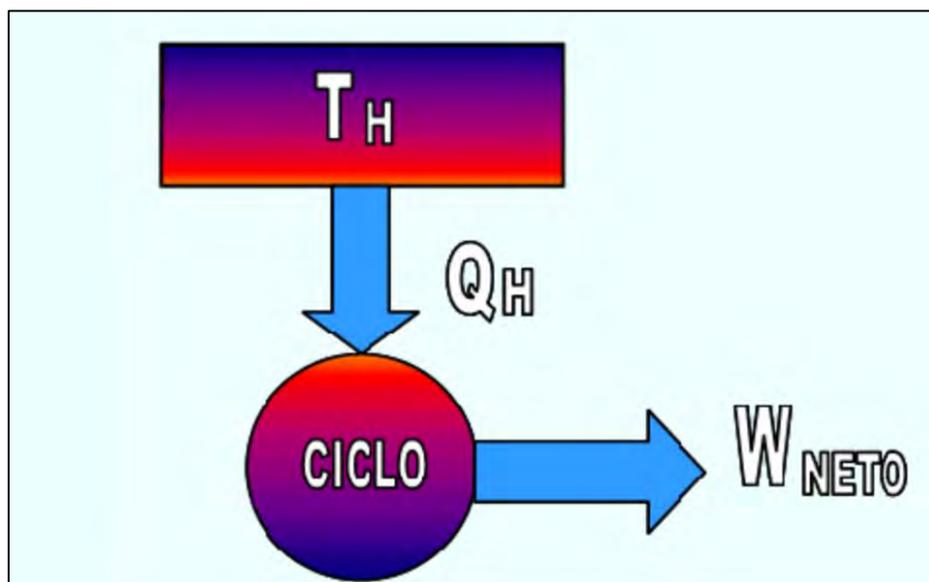
Según la segunda ley de la termodinámica al implantar algunos procesos de la naturaleza los cuales pueden ocurrir o no. Una de las características importantes es la eficiencia limitada de las maquinas térmicas, en donde no es posible tener una maquina con la capacidad de convertir completamente la energía térmica en todas las formas o tipos de energía.

(Hernandez Zapata & Lozano Palomino, 2014, pág. 10)

a) ENUNCIADO DE KEVIN PLANCK

Es imposible construir un aparato que opere cíclicamente, cuyo único efecto sea absorber calor de una fuente de temperatura y convertirlo en una cantidad equivalente de trabajo.

Figura 9. Diagrama de Kevin Planck

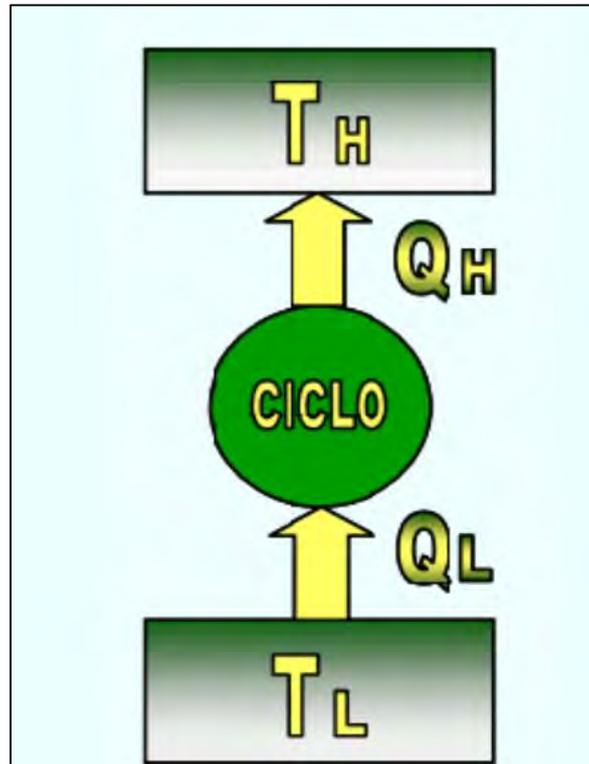


Fuente: www.unet.edu.ve – Fenómeno de Transporte

b) ENUNCIADO DE CLAUSIUS

Es imposible construir un aparato que opere en un ciclo cuyo único efecto sea transferir calor desde una fuente de baja temperatura a otra de temperatura mayor.

Figura 10. Diagrama de Clausius



Fuente: www.unet.edu.ve – Fenómeno de Transporte

2.3.2.2. MÁQUINAS TÉRMICAS

Es un aparato o dispositivo que transforma energía térmica en otros tipos de energía, al operar cíclicamente o continuamente, realiza un trabajo al absorber calor de una fuente de alta temperatura y luego liberar a otra de baja temperatura.

Al representar un ciclo cerrado que permita la transferencia de calor, absorbiendo cierta cantidad de calor Q_c de alta temperatura, realizando trabajo W y liberando calor Q_f de una fuente de menor temperatura. Ya que la sustancia de trabajo se lleva a cabo a través de un proceso cíclico en donde su energía inicial y final es igual, por ende, no existe la variación de la energía interna $\Delta U=0$. (Hernandez Zapata & Lozano Palomino, 2014)

De la siguiente ecuación:

$$\Delta U = Q + W \quad (2.9)$$

Donde:

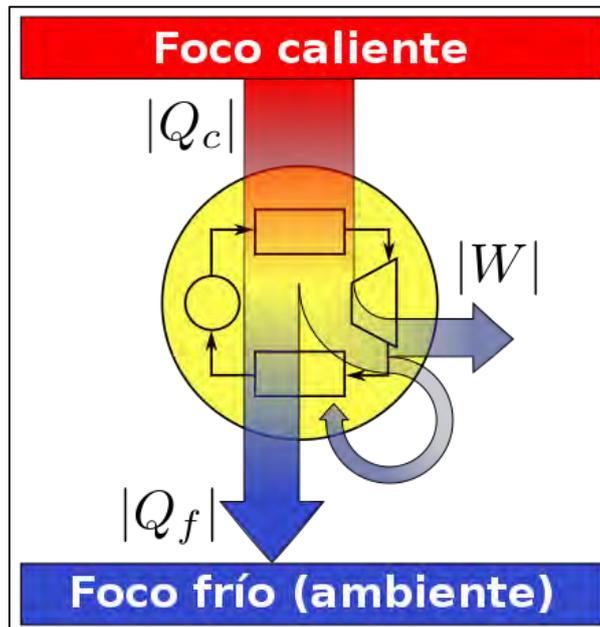
ΔU = Variación de la energía interna

Q = Calor neto

W = Trabajo neto

Por consiguiente, se dice que: “El trabajo realizado por la maquina es igual al calor neto que fluye hacia la misma”

Figura 11. Esquema de la transferencia de calor de una máquina térmica



Fuente: Informe de la segunda ley de la termodinámica-Universidad Nacional del Callao

Por lo tanto, de la **Figura** , el calor neto $Q_{\text{neto}} = Q_c - Q_f$, y posteriormente la determinación del trabajo neto de la **ecuación (2.7)** entonces se tiene que:

$$W_{\text{neto}} = Q_c - Q_f \quad (2.10)$$

2.3.2.3. EFICIENCIA TÉRMICA

Es la medida del rendimiento de una máquina térmica y se define como la relación entre el trabajo neto obtenido y el calor suministrado al fluido de trabajo. (Transporte, s.f.)

$$Ef_t = \frac{W_{neto}}{Q_c} \quad (2.11)$$

Donde:

Ef_t = Eficiencia térmica de una maquina térmica

W_{neto} = Trabajo Neto

Q_c = Calor absorbido suministrado durante un ciclo

La eficiencia térmica expresada en términos de calores absorbido y liberado, es el siguiente:

$$Ef_t = \frac{Q_c - Q_f}{Q_c} = 1 - \frac{Q_f}{Q_c} \quad (2.12)$$

En un caso ideal, la eficiencia actuara al 100% de su rendimiento, al tener $Q_f=0$, es decir que no hay liberación de calor a la fuente fría en la maquina térmica y afirmar que se transforme toda la energía calorífica absorbida Q_c en trabajo mecánico por consiguiente esta aplicación de la segunda ley de la termodinámica no existiría. (Hernandez Zapata & Lozano Palomino, 2014)

2.3.2.4. CICLO DE CARNOT

Es un ciclo de tipo reversible, el cual tiene como característica la alta eficiencia que dispone al trabajar en una maquina térmica completamente reversibles, estas actúan mediante dos fuentes de calor de temperaturas fijas. Este ciclo reversible está conformado por cuatro procedimientos reversibles los cuales otorgan adquirir una eficiencia superiora del ciclo ya que el trabajo neto puede incrementarse al utilizar procesos que exigen la menor cantidad de trabajo y proporcionen la mayor cantidad del mismo, Así mismo esta eficiencia o rendimiento será menor o igual en la maquina térmica que la maquina térmica reversible cuando estos se trabajen

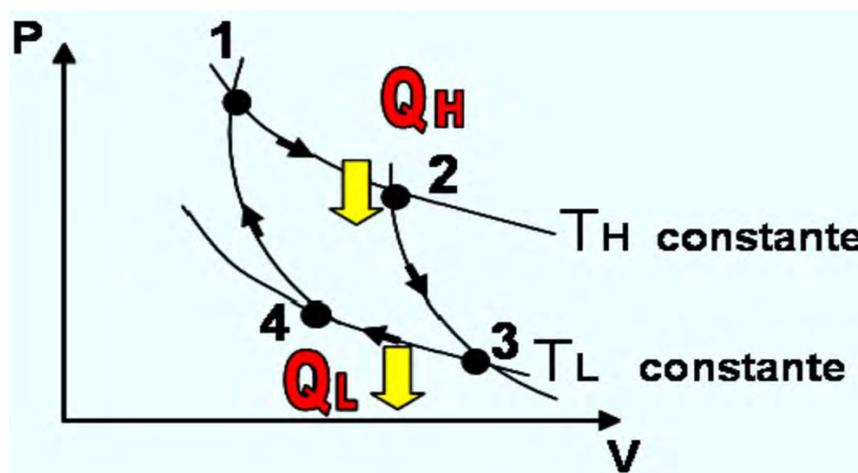
a la misma temperatura y autónomo del sistema físico que pertenezca a la máquina; sin embargo los ciclos reversibles no es posible lograr en la práctica a causa de que las irreversibilidades relacionada con cada procedimiento no pueden suprimirse. Es así que, los ciclos reversibles sirven también como puntos de partida en el proceso de los ciclos reales y varían según se precise para superponer ciertas exigencias.

El ciclo se constituye de cuatro procedimientos reversibles, dos isotérmicos y dos adiabáticos, y puede llevarse a cabo ya sea en un sistema cerrado o en uno de flujo estable, con sustancia pura o con un fluido compresible.

Estos procedimientos reversibles que integran el ciclo de Carnot son:

- a. Expansión isotérmica reversible (proceso 1-2, T_H constante con transferencia de calor Q_H hacia el gas).
- b. Expansión adiabática reversible (proceso 2-3, la temperatura disminuye de T_H a T_L).
- c. Compresión isotérmica reversible (proceso 3-4, T_L constante con transferencia de calor desde el gas).
- d. Compresión adiabática reversible (proceso 4-1, la temperatura aumenta de T_L a T_H).

Figura 12. Procesos del Ciclo de Carnot operando para una máquina térmica



Fuente: (www. Unet.edu.ve- fenómeno/F_DE_T-75)

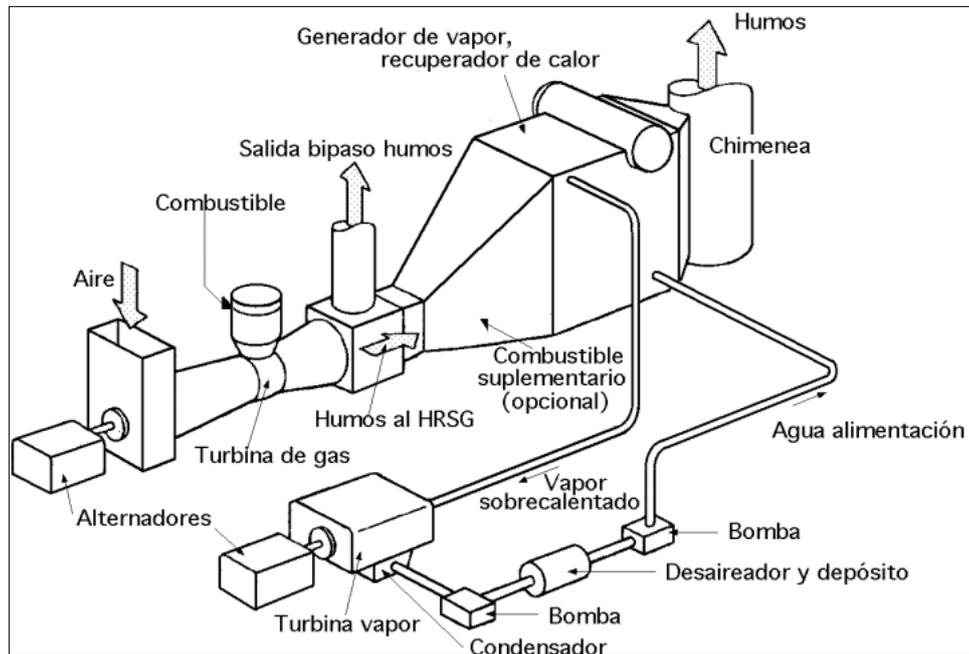
2.4. CICLO COMBINADO PARA EL APROVECHAMIENTO DE LA CENTRAL TÉRMICA

El ciclo combinado como un sistema termodinámico que abarcan dos o más ciclos de potencia, en estos casos comprendería el ciclo Brayton y ciclo Rankine, el cual cada ciclo emplea un fluido de trabajo diferente (gas, vapor, líquido). Al ser combinado estos dos ciclos de potencia en uno solo, incrementará de rendimiento o eficiencia mayor a los ciclos de potencia al estar operando independientemente uno del otro. Así mismo esta fusión o acoplamiento de ciclo combinado al operar de manera autónoma, resaltara el intercambio de energía, para su posterior de máxima productividad de operación. El ciclo Brayton y el ciclo Rankine el cual son utilizadas las turbinas de gas y turbinas de vapor respectivamente. (Diego & Ramon)

El ciclo que labora con aire-gases de combustión (Brayton) el cual actúa a una temperatura superior que el ciclo cuyo fluido es agua-vapor (Rankine), en donde están entrelazadas mediante el intercambiador de calor. La unión termodinámica de estos ciclos conduce generalmente a la obtención de un rendimiento global superior a los rendimientos de los ciclos termodinámicos individuales que lo componen, ya que este proceso termodinámico combinado resulta imposible esperar exclusivamente a un solo ciclo que opere entre las temperaturas medias de los focos calientes y fríos usuales.

La implementación de la central térmica de biogás de ciclo combinado está dada por el rendimiento de la tecnología moderna, seleccionada en relación con una central térmica convencional. Cabe mencionar la presencia de un sistema de post. Combustión en el ciclo combinado el cual permitirá el desempeño máximo de potencial de combustible orgánico y biodegradable. (Endesa, 2023)

Figura 13. Esquema simplificado de una central de un sistema de Ciclo Combinado



Fuente: ([www.Redsauc.net/es-ciclos-combinados, recuperación de calor residual y otros sistemas](http://www.Redsauc.net/es-ciclos-combinados-recuperacion-de-calor-residual-y-otros-sistemas))

La reutilización de esos gases del escape de la turbina de gas en el generador de vapor, permitirán acceder el modelamiento del ciclo de Rankine para la generación de energía, así mismo actúa como una caldera recuperadora de calor residual, al ser aprovechada el calor residual de la turbina de gas. La generación de energía eléctrica se realiza con los trabajos mecánicos de la turbina de gas y la turbina de vapor.

El acoplamiento térmico de estos dos ciclos de potencia incide en las categorías o rangos reales de temperatura de trabajo, y el rendimiento superior que son aplicadas en el equipamiento tecnológico que sea posible a utilizar.

En el ciclo Rankine, la presencia de las máquinas térmicas de vapor actúa como tecnología e equipamiento del fluido motor, es decir el vapor de agua como fluido en proceso de condensación y para luego ser partícipe de las transformaciones de fases que presenta. La utilización del fluido motor implica procesos de desmineralización del agua, sin embargo, existen otros tipos de fluidos que también aprovechan sus propiedades termodinámicas para poder aplicar en las turbinas de vapor. (Diego & Ramon, pág. 33)

2.4.1. PARÁMETROS CARACTERÍSTICOS DE UN CICLO COMBINADO

Es necesario los parámetros que se toman en cuenta al momento de diseñar y modelamiento, los cuales son las características de la instalación de una central térmica de ciclo combinado:

I. Potencia mecánica bruta o neta

La potencia es el parámetro indispensable en una central de ciclo combinado que variara acorde a las condiciones ambientales.

II. Marca o modelo de la turbina de gas

Es necesario saber el modelo de la turbina de gas, ya que en ella se realiza el principal proceso de convertir de energía térmica en energía mecánica y eléctrica.

III. Configuración del ciclo combinado

El número ya sea de turbinas de gas o turbinas de vapor es importante para el aprovechamiento de los gases calientes, así como el número de generadores eléctricos necesarios para su transformación en energía eléctrica.

IV. Rendimiento del Ciclo Combinado

El rendimiento o eficiencia del ciclo combinado dependerá de la cantidad y recuperación del combustible, para completar su liberación de energía química para luego ser transformada en la energía eléctrica por medio de la turbina de potencia en un determinado tiempo.

V. Consumo Especifico

También denominada en el inglés como Heat Rate, es un parámetro el cual es el a medida de la eficiencia de una central térmica. Es el resultado de la relación de división de la energía térmica y la energía eléctrica contenida en un combustible. Expresada en $KJ/KWh = KWs/KWh$.

VI. Combustibles utilizados

Es el elemento primordial para la combustión, así mismo siempre se tendrá como un combustible auxiliar en caso este fallará.

VII. Tipo de Caldera de Recuperación de calor

Es preciso saber qué tipo de generador de vapor se empleará. Ya sea el tipo vertical o horizontal, y a la salida de la caldera si será con postcombustión o no.

VIII. Niveles de Presión del ciclo Agua-Vapor

En la configuración del ciclo agua-vapor, es importante enunciar el número de niveles de presión del ciclo ya sea de uno, dos o tres niveles.

IX. Tipo de Refrigeración

El sistema de refrigeración para expulsar el calor o gas contenido a la salida de la turbina. Ciclo cerrado, ciclo abierto y ciclo semicerrado.

X. Tipo de Generador eléctrico

Los generadores eléctricos asíncronos y síncronos, con el número de polos correspondientes ya sea de 2 o 4 polos y la velocidad a la cual gira la turbina.

2.4.2. CARACTERÍSTICAS DEL CICLO COMBINADO

- a. En la caldera de recuperación tan solo se desperdicia un 8% de eficiencia térmica en emanación de humos, lo que significa la baja polución térmica atmosférica.
- b. La relación eficiencia-contaminación en estado real es muy alta, ya que el gas natural o biogás metano es un carburante fósil de menor emisión contaminante que el carbón.
- c. Según lo acordado en el protocolo de Kioto, como uno de su finalidad por acatar es la disminución de las emisiones de dióxido de carbono (CO_2), el cual el biogás como combustible fósil cumple las condiciones.
- d. La refrigeración solo es indispensable para la utilización del fluido de agua de la turbina de vapor más no en la turbina de gas.
- e. Se requiere el sobre – diseño e equipamiento exhaustivo para poder reducir las pérdidas del rendimiento en el transcurso del tiempo para así obtener una óptima eficiencia del ciclo combinado.

- f. La utilización del gas natural del biogás se encuentra como materia prima consistente, el cual abastecerá satisfactoriamente la central térmica.
- g. Al comprender un modelamiento cerrado de un ciclo combinado, no permite la utilización de otros tipos de materia prima que no sea gas natural.

2.4.3. VENTAJAS DE UNA CENTRAL DE CICLO COMBINADO

- a. Reducción de niveles de emisiones de CO₂ por kW/h generado. El dióxido de carbono que se despliega a la atmosfera es limitado ya que una gran parte de CO₂ se utiliza en el aprovechamiento de la central térmica.

Según (Koch, 2001) que afirma que el ciclo combinado de una central térmica con gas natural genera hasta 511g CO₂/kWh.

- b. La combustión de mezclas aire/combustible con una excedencia de aire, inyección de agua o vapor en el sector combustor y el diseño del sector combustor son las formas más apropiadas para la disminución de las emisiones de NO_x, es decir, los grupos de gases muy reactivos óxidos de nitrógeno que contaminan la atmosfera.
- c. El agua de refrigeración que se dispone será en menor cantidad de desgaste o consumo ya que se encuentra en un ciclo combinado cerrado.
- d. La alta eficiencia que presentara al ser determinada mediante el manejo de dos ciclos termodinámicos de potencia con un alto grado de sobrecalentamiento en el generador de vapor.
- e. Menor espacio ocupado, es decir, es menor la superficie por Mw instalado al comparar con la central térmica de ciclo convencional.
- f. Corto periodo de construcción, oscila de los dos a tres años de construcción.
- g. Elevada disponibilidad de trabajo de la central térmica, laborando hasta 8300 horas durante el año, el cual, en comparación a la una central convencional, con menos horas de producción.

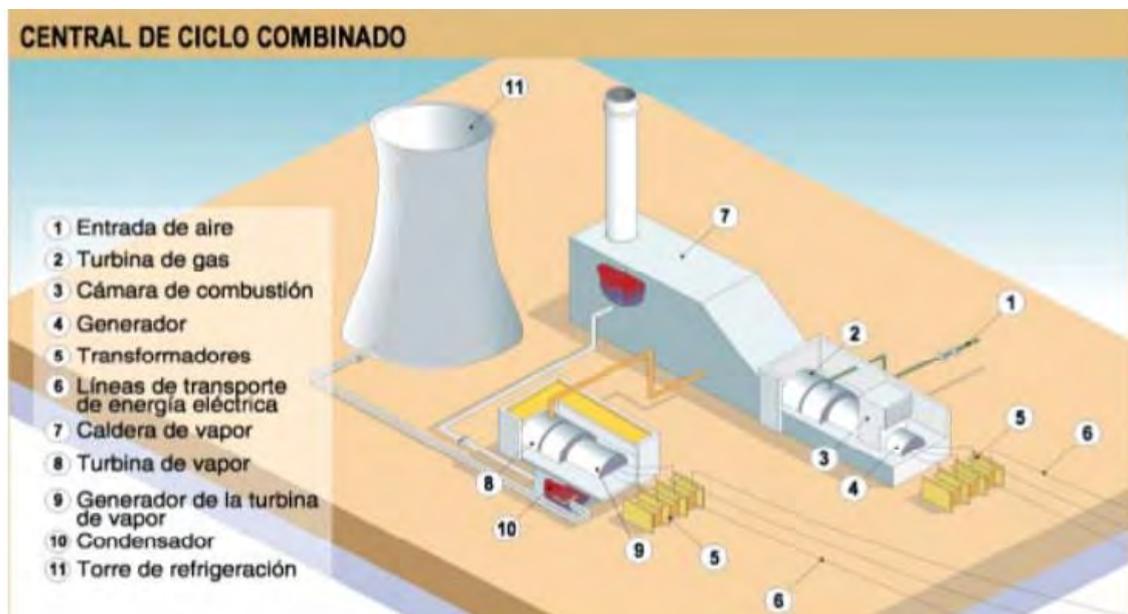
- h. El mantenimiento y control de la central térmica de ciclo combinado necesitaran menor cantidad de mano de obra ya que se encuentra con un alto nivel de automatización.

2.4.4. CICLO COMBINADO GAS-VAPOR

a) CICLO AIRE-GAS

Ingresa el aire al compresor para ser comprimido, lo filtra y luego entra en el sector combustor o cámara de combustión, en donde se produce la combustión al mezclarse el aire con el gas natural o biogás. Estos gases de combustión se encontrarán a una alta presión y temperatura, para luego expandirse y compartir energía mecánica de rotación en el eje de la turbina de gas y también al generador eléctrico, posteriormente el calor residual contenida a la salida de la turbina de gas, se aprovecha entrando al generador de vapor para entrar en un ciclo agua-vapor a una alta temperatura, para ser expulsada hacia el exterior por una chimenea.

Figura 14. Modelo de una central térmica de ciclo combinado



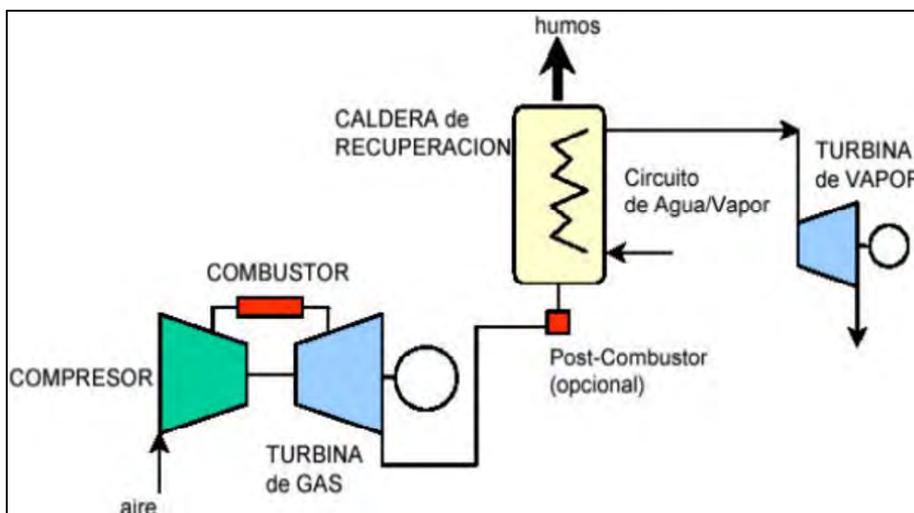
Fuente: Monografía de Centrales de generación de energía eléctrica la Universidad de Cantabria

b) CICLO AGUA-VAPOR

El vapor producido en la caldera de recuperación de calor o generador de vapor, se propaga y expande en la turbina de vapor para luego ser condensado en el condensador, para luego ser

vertido a la torre de refrigeración, con su sistema de bombeo en un ciclo cerrado dirigido a la caldera de recuperación con un ciclo cerrado en la torre de refrigeración.

Figura 15. Esquema de un ciclo combinado gas-vapor

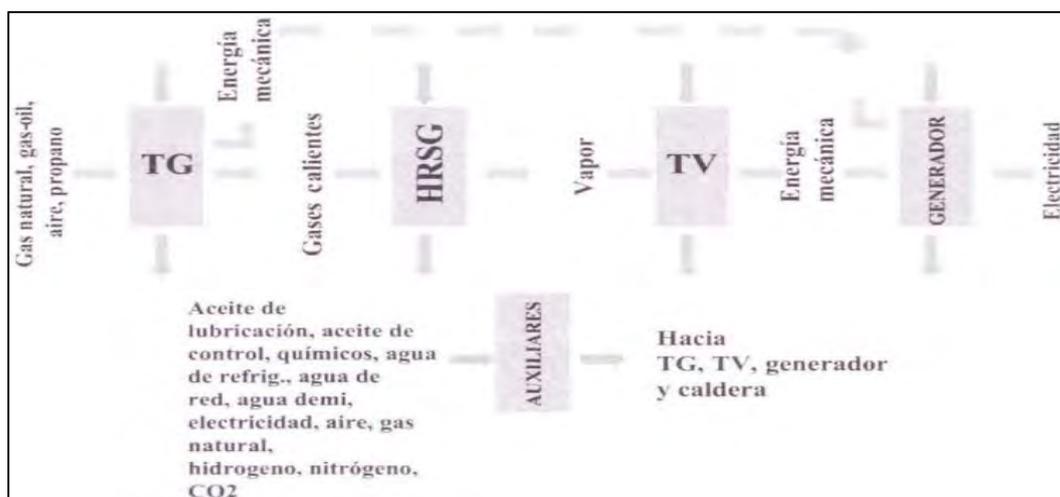


Fuente: Estudio Económico de dos opciones de refrigeración de CTCC (Mario Cascante Estepa -2018)

2.4.5. COMPONENTES Y ESTRUCTURACIÓN DE UNA CENTRAL TÉRMICA DE CICLO COMBINADO

En el siguiente diagrama de bloques se muestran los componentes de una central térmica de ciclo combinado:

Figura 16. Diagrama de bloques de los elementos de una central térmica



Fuente: Operación y mantenimiento de CCC (Santiago García Garrido-2008)

a) TURBINA DE GAS (TG)

Es una maquina térmica es decir un motor térmico rotativo de combustión interna, en donde la energía calorífica contenida en el combustible genera energía mecánica rotativa en el eje y para luego producir energía eléctrica en el generador eléctrico o alternador.

b) CALDERA DE RECUPERACIÓN DE CALOR (HRSG)

Es una caldera convencional, cuya función es generador vapor luego de ser aprovechada los gases encontrados a la salida de la turbina de gas.

c) TURBINA DE VAPOR (TV)

Turbomáquina o maquina térmica que transforma la energía del vapor contenida en la caldera de recuperación de vapor en energía mecánica transmitida al eje de la turbina de vapor propiamente dicha para luego ser convertida en energía eléctrica en estar acoplada a un generador eléctrico.

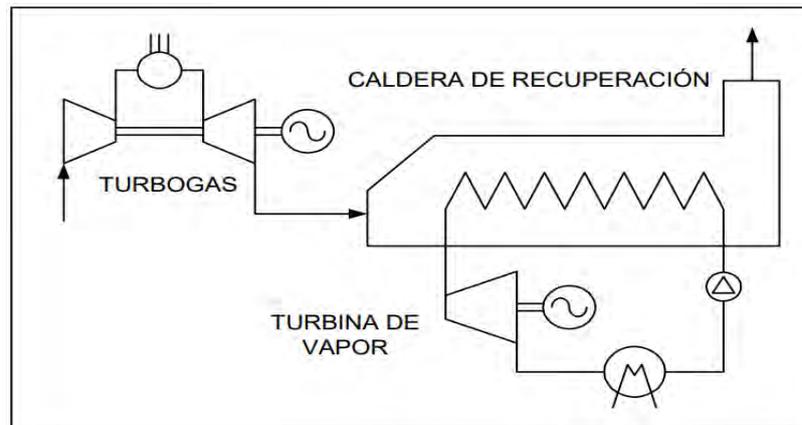
d) GENERADOR ELÉCTRICO

Es una máquina que, a partir de la energía mecánica generada en las turbinas de vapor, produce energía eléctrica.

e) SISTEMAS AUXILIARES

Conjunto de instrumentos o dispositivos que tienen la función de proporcionar energía necesaria a todo el sistema del arranque y el correcto funcionamiento de los accesorios tales como el sistema de refrigeración, sistema de arranque, sistema de alimentación, etc.

Figura 17. Esquema simplificado de un ciclo combinado sin combustión suplementaria



Fuente: Análisis de Diseño Termodinámico de CCC (Jaime Mendoza Nalvarte, pág.12-2002)

2.4.6. CONFIGURACIONES DE UN CICLO COMBINADO

En un ciclo combinado se tiene diferentes modelos de configuraciones donde la turbina de gas, turbina de vapor y el generador eléctrico varían, de acuerdo las necesidades que se desea en el ciclo gas-vapor. Tomando en cuenta la alineación o no con el número de ejes de las turbinas y el generador que se disponga.

2.4.6.1. CICLO COMBINADO DE CONFIGURACIÓN MONOEJE

Es la configuración más básica de todas, la cual se caracteriza por el único eje que presenta el ciclo con el acoplamiento de una turbina de gas, una turbina de vapor y un solo generador eléctrico como accionamiento para la conversión de energía eléctrica, puede ser que el generador eléctrico este ubicado en los extremos o en la parte intermedia de las dos turbinas para así poder facilitar el mantenimiento o inspección que se desea.

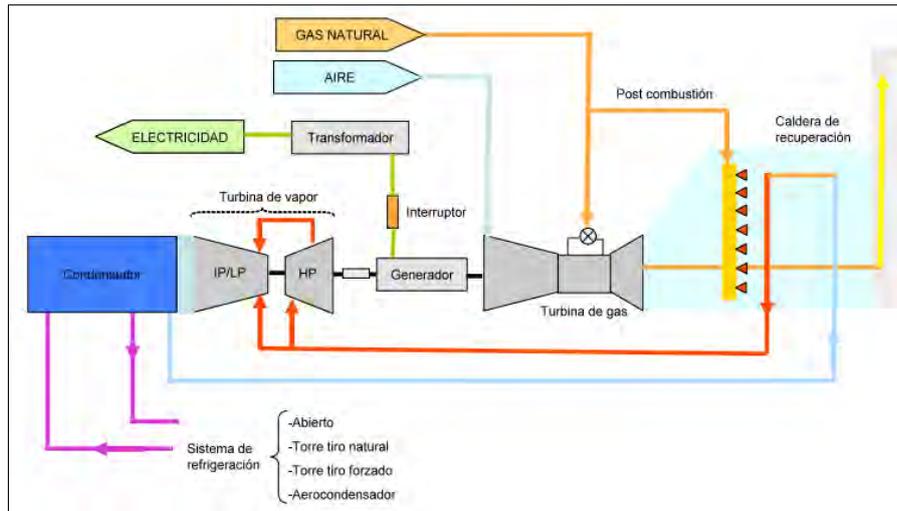
a) CONFIGURACIÓN MONOEJE CON EMBRAGUE

Como una configuración monoeje con la utilización de embrague accede a un sistema de arranque simple y con facilidad de separar en el proceso de giro la turbina de vapor como de la turbina de gas. Este sistema facilita el equilibrio en el proceso de generación.

Existen algunas ventajas que atribuyen a la utilización de esta configuración:

- Se necesita un generador eléctrico menos que la de configuración multieje
- Su arranque es más habitual ya que la utilización de embrague al trabajar autosuficientemente el sistema de giro la turbina de gas de la de vapor.
- El espacio que requiere es menor al comparar con el multieje

Figura 18. Esquema de un ciclo combinado mono eje con embrague



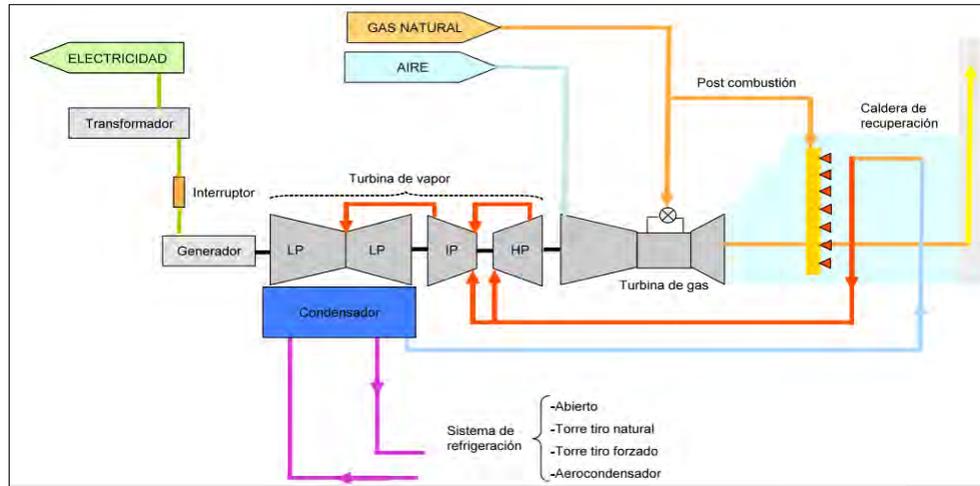
Fuente: Informe de grado-Mejoras de la eficiencia y optimización de equipos en una Central de Ciclo Combinado (pág. 30 -2016)

b) CONFIGURACIÓN MONOEJE SIN EMBRAGUE

La ausencia de un sistema de embrague afecta al método de arranque, donde la turbina de gas es seleccionada de mayor potencia con un sistema de arranque fijo-estacionario ya que al momento del giro o rodaje es empujada la turbina de vapor por no existir el acoplamiento de embrague. Así mismo es necesario instalar una caldera auxiliar para suministrar el vapor de cierres, vapor de vacío y su posterior refrigeración preliminar de la turbina de vapor en el proceso de giro. Presenta algunas características las cuales son:

- Dado que la posición del generador eléctrico se encuentra a un extremo, facilita su mantenimiento e inspección satisfactoriamente.
- Al no ubicarse axialmente con dirección al eje el condensador, será necesario incorporar como obra civil un soporte tipo pedestal elevado.

Figura 19. Esquema de un ciclo combinado mono eje sin embrague



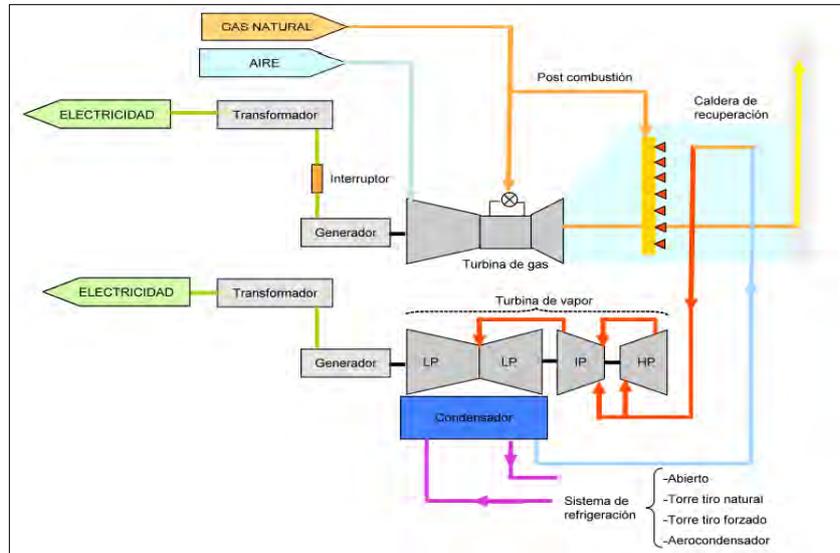
Fuente: Informe de grado-Mejoras de la eficiencia y optimización de equipos en una Central de Ciclo Combinado, pág. 36 – (2016)

2.4.6.2. CICLO COMBINADO DE CONFIGURACIÓN MULTIEJE 1X1

El ciclo combinado con multieje será necesaria la implementación de un embrague para poder acoplar el eje de la turbina de gas con el eje de la turbina de vapor y el generador así generando energía eléctrica por una de las turbinas. El término de 1X1 significa una turbina de gas que abastece a una caldera recuperadora de calor y genera fluido de vapor para un solo ciclo Rankine es decir con una sola una turbina de vapor para producir energía eléctrica mediante el generador eléctrico acoplado a cada turbina de gas. Las características predominantes son:

- Un mantenimiento e inspección en este tipo de configuración ayuda a su sencilla facilidad.
- En caso se presentar la avería de la turbina de vapor, la turbina de gas cumpliría con abastecer y expulsar los gases al exterior.
- Se requiere mayor espacio por la utilización de un equipo generador de electricidad.

Figura 20. Esquema de un ciclo combinado multieje



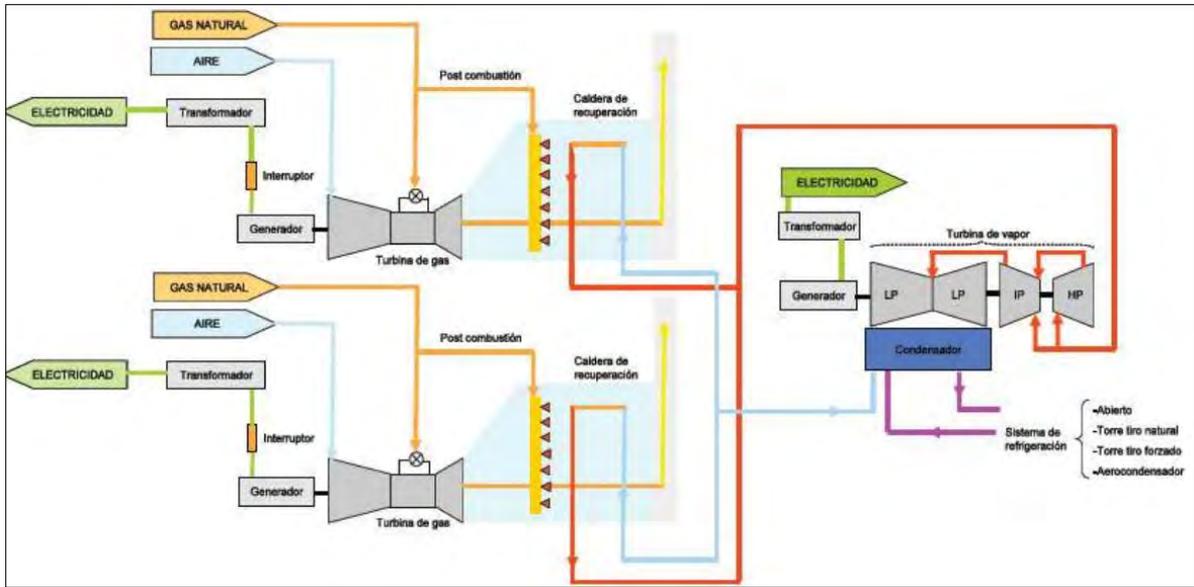
Fuente: Informe de grado-Mejoras de la eficiencia y optimización de equipos en una Central de Ciclo Combinado, pag.37 – 2016

2.4.6.3. CICLO COMBINADO DE CONFIGURACIÓN MULTIEJE 2X1

En esta configuración está determinada por la disposición de dos turbinas de gas que alimentan una sola turbina de vapor, cada turbina es independiente con su propio generador eléctrico para generar energía eléctrica, así como la utilización de dos calderas recuperadoras de calor para ganar calor antes de ingresar a la turbina de vapor. Teniendo como características como son:

- Mayor disposición de espacio, debido a la instalación de más equipos de conversión.
- En casos de emergencia, la turbina de gas puede trabajar a través de la expulsión de los gases hacia la atmosfera.
- Al encontrarse los equipos apartados uno del otro, facilita su mantenimiento e inspección.
- Al ser instalados dos generadores eléctricos, en caso de emergencia o si se desea pueden trabajar a dos diferentes niveles de tensión.

Figura 21. Esquema de un ciclo combinado multieje 2X1



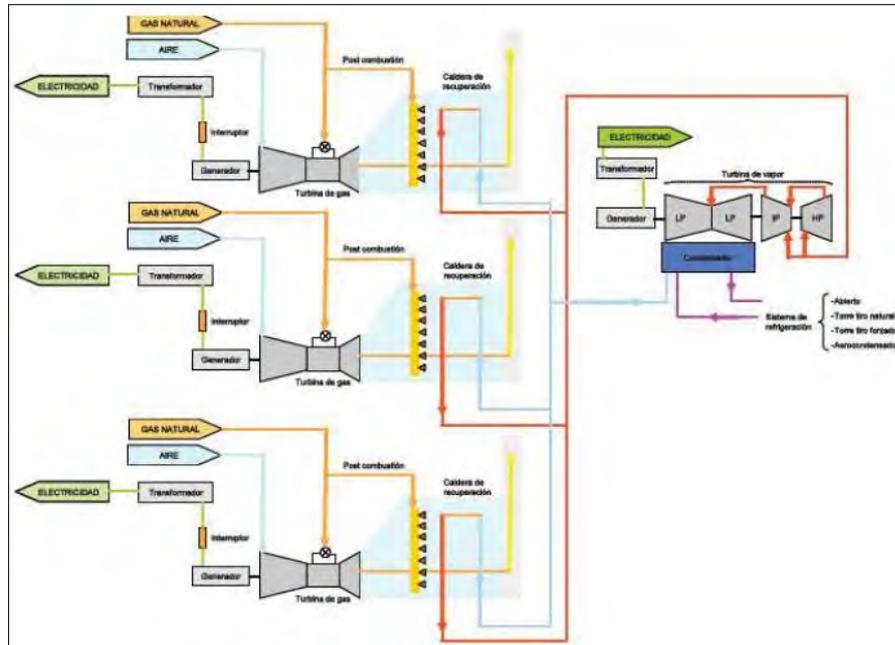
Fuente: Informe de grado-Mejoras de la eficiencia y optimización de equipos en una Central de Ciclo Combinado, pag.39 – 2016

2.4.6.4. CICLO COMBINADO DE CONFIGURACIÓN MULTIEJE 3X1

La configuración con tres turbinas de gas para alimentar una turbina de vapor y generar energía eléctrica por medio de tres generadores eléctricos o alternadores por cada turbina de gas, permite que se tenga un desbalance en caso se tenga averías o se realice un mantenimiento en la turbina de vapor puesto que también a no presentar BYPASS en ermita desviar el fluido de generación de gases en la turbina de vapor. Se tiene algunas ventajas que acceden a las necesidades que sean posible, las cuales son:

- En las configuraciones multiejes anteriores presenta equipos de arranque estacionario-fijo y generados eléctricos de refrigeración neumática de menor potencia.
- No será necesario utilizar calderas auxiliares
- Facilidad y menor tiempo para el instante del arranque de la turbina de gas.
- El rendimiento es más eficaz baja cargas parciales al momento de minimizar la potencia de una de las turbinas de gas.

Figura 22. Esquema de un ciclo combinado multieje 3X1



Fuente: Informe de grado-Mejoras de la eficiencia y optimización de equipos en una Central de Ciclo Combinado (2016)

2.4.7. RENDIMIENTO DE LA CENTRAL DE CICLO COMBINADO GAS-VAPOR

El rendimiento o eficiencia de la central térmica de ciclo combinado varía notablemente en una 55-57% de un rendimiento neto serán compartidas por la turbina de gas y la turbina de vapor de un ciclo agua-vapor de 37% y 20% respectivamente, así dando lugar a la producción de la energía neta del intercambio y del acoplamiento de estos dos ciclos termodinámicos.

Para la determinación del rendimiento total que realizará el ciclo combinado independientemente se establecerá para su cálculo el ciclo Rankine y el ciclo Brayton individualmente, así mismo influirá en la capacidad para ejecutar un apropiado trasvase del calor residual que se encuentra en el escape del ciclo Brayton al ciclo Rankine a través de la caldera de recuperación de calor. El rendimiento se valorará de la siguiente manera; el cociente entre la energía aportada y la obtenida. El cálculo del rendimiento estará determinado con los subciclos correspondientes en la siguiente ecuación:

$$\eta_{COMB} = \frac{W_{TG} + W_{TV}}{Q_{TG}} \quad (2.13)$$

Donde:

η_{COMB} = Eficiencia total de un Ciclo Combinado

W_{TG} = Trabajo de la turbina de gas

W_{TV} = Trabajo de la turbina de vapor

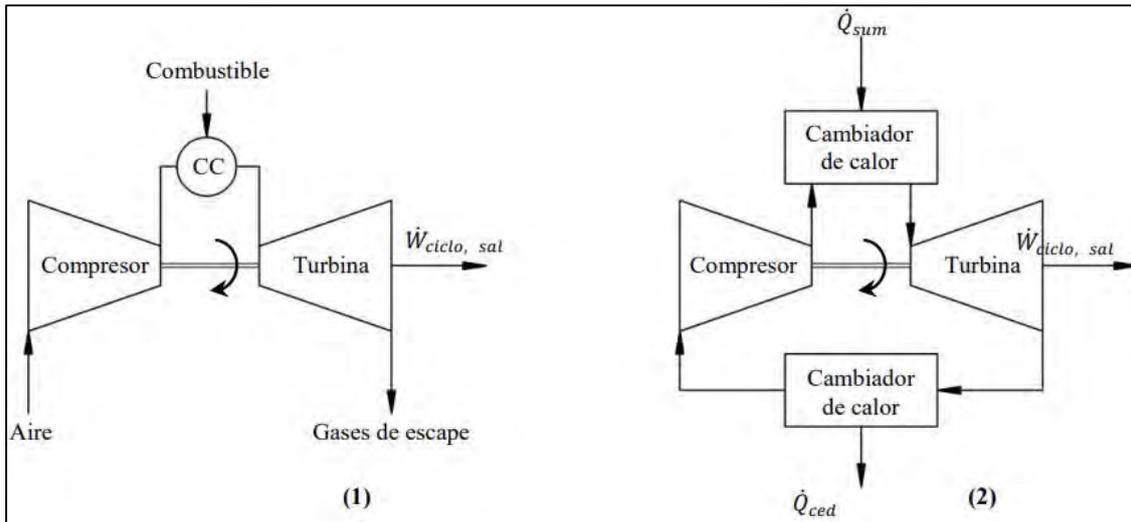
Q_{TG} = Calor aportado en forma de combustible en el ciclo de alta-Turbina de gas

Esta eficiencia en el ciclo combinado gas-vapor reflejara en el incremento de las temperaturas medias de los focos calientes y la disminuci3n de las temperaturas medias de los focos fr3os, es decir, incrementa su la temperatura de trabajo en las turbinas y va disminuyendo la temperatura y presi3n dando lugar al calor cedido y absorbido (humos y vac3o del condensador). El mejoramiento y optimizaci3n del proceso ser3 unas caracter3sticas para incrementar su eficiencia, y as3 poder minimizar las perdidas presentadas en las m3quinas que constituyen el ciclo gas-vapor. Al incrementar y sumar niveles de presi3n en la caldera se producir3 un recalentamiento del vapor, en el que habr3 un incremento de la temperatura media de foco caliente en el ciclo Brayton el cual tendr3 como resultado la reducci3n de los saltos de temperaturas reales entre los gases de escape de la turbina de gas y el ciclo agua-vapor en la caldera de recuperaci3n. (Diego & Ramon, p3g. 36).

2.4.8. CICLO BRAYTON

Es un ciclo de potencia se fundamenta en el funcionamiento de una turbina de gas; el cual consta de un compresor, donde el aire al ingresar al compresor a presi3n atmosf3rica ($P_a=101325$ Pascales=1 atmosfera) para ser comprimida y posteriormente ingresar al sector combustor a una presi3n y temperatura determina, para luego pasar expandida los gases de combusti3n en la turbina de gas; as3 mismo existen dos subciclos del ciclo Brayton de aprovechamiento de gases, por tanto, como se muestran en la **Figura 23**.

Figura 23. Sistema de Circuitos de una turbina de gas



Fuente: Análisis de Diseño Termodinámico de CCC (Jaime Mendoza Navarte, pág. 51-2002)

2.4.8.1. CICLO ABIERTO

El cual es un ciclo en donde los gases a la salida turbina son expulsados hacia la atmósfera, mostrada en la (1) de la Figura .

2.4.8.2. CICLO CERRADO

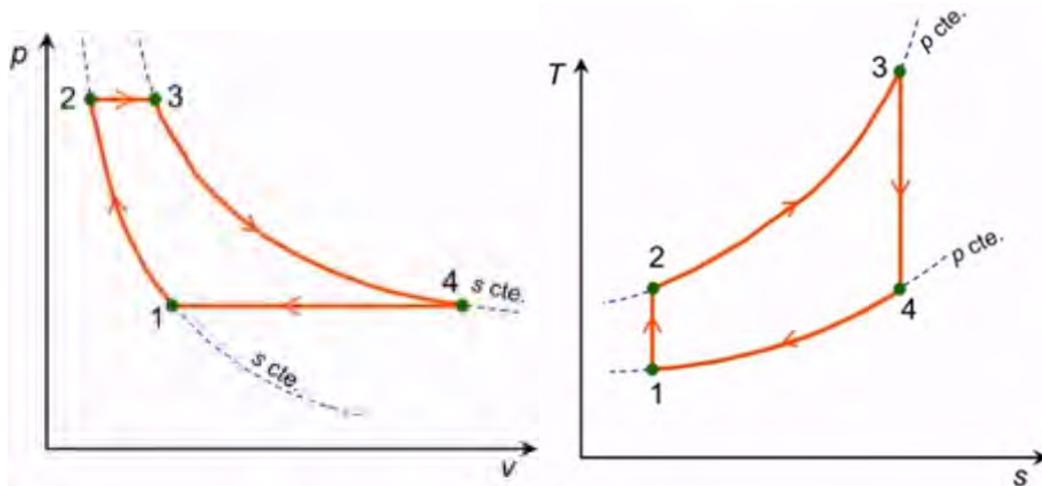
Los gases de escape de una turbina de gas son aprovechados mediante la utilización de un intercambiador de calor, el cual se denomina generador de vapor o caldera de recuperación de calor. Indicada en la (2) de la Figura .

2.4.8.3. CICLO DE BRAYTON IDEAL

El ciclo Brayton en condiciones ideales, está compuesta por cuatro procesos internamente reversibles, los cuales son:

- a) 1-2 Compresión isoentrópica en el compresor.
- b) 2-3 Calentamiento o adición de calor isobárico.
- c) 3-4 Expansión isoentrópica en la turbina.
- d) 4-1 Enfriamiento o rechazo de calor isobárico.

Figura 24. Diagrama Temperatura-Entropía y Diagrama Presión-Volumen de los procesos del ciclo Brayton ideal



Fuente: Ciclos de Potencia de gas (Mario Toledo Torres-Chile, pág. 20 – 2020)

a) *Diagrama Temperatura-Entropía (T-S)*

- **Compresión Isoentrópica:** De (1-2), la entropía se mantiene constante y hay un aumento de temperatura del estado termodinámico 1 al 2.
- **Calentamiento o adición de calor isobárico:** De (2-3), proceso de suministro de calor se mantiene la presión constante y existe un incremento de la temperatura al llegar a la máxima temperatura de punto (3).
- **Expansión isoentrópica en la turbina:** De (3-4), se mantiene la entropía constante
- **Enfriamiento o rechazo de calor isobárico:** De (4-1), se mantiene la presión constante existe un rechazo de calor para luego ingresar al estado termodinámico inicial de aire.

b) *Diagrama Presión-Volumen (T-S)*

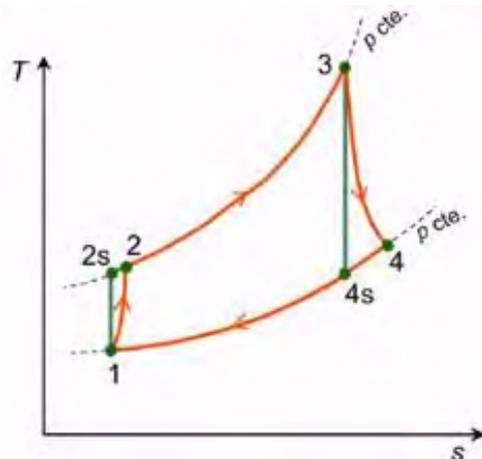
- **Compresión Isoentrópica:** De (1-2), hay un incremento importante de la presión desde el punto más bajo (1) hasta el punto más alto (2).
- **Calentamiento o adición de calor isobárico:** De (2-3), se conserva la presión constante y hay un leve aumento del volumen específico.

- **Expansión isoentrópica en la turbina:** De (3-4), disminución de la presión y un aumento del volumen específico.
- **Enfriamiento o rechazo de calor isobárico:** De (4-1), disminución importante del volumen específico, hasta llegar al estado termodinámico inicial.

2.4.8.4. CICLO DE BRAYTON REAL

Los procesos de ciclo Brayton real no son isoentrópicos, es decir existe una variación en la entropía de gas o fluido de trabajo y como tales se encuentra la irreversibilidad de este ciclo real. Entre los puntos de estado termodinámico 3 y 4 se realiza la expansión, el proceso de generación de potencia eléctrica en la turbina hay un aumento en la entropía a la salida e a la entropía del fluido como también en el compresor un aumento de entropía en el estado termodinámico 1 y 2, asimismo se observa en la **Figura 25**.

Figura 25. Diagrama Temperatura – Presión de un ciclo Brayton real



Fuente: Ciclos de Potencia de gas (Mario Toledo Torres-Chile, pág. 18 -2020)

La relación entre el trabajo del compresor y el trabajo de la turbina se denomina acoplamiento, el cual se afirma en: $W_{COMP.ENTRAD} / W_{TURB.SALID}$, esta relación varía entre un 40-80% de trabajo.

Para la determinación del Rendimiento térmico del ciclo se necesario saber la relación de presiones, donde se definirá a continuación:

$$r_p = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_3}{P_4} \quad (2.14)$$

El balance de energía del ciclo está establecido por:

$$q + W = \Delta h + \Delta e_c + \Delta e_p \quad (2.15)$$

De la **Figura** se desprende, los valores de Δe_c y Δe_p , entonces no existe transmisión de calor (q) en los estados termodinámicos 1-2 y 3-4 en el proceso adiabático:

$$W = \Delta h \quad (2.16)$$

Asimismo, en los estados termodinámicos de 2-3 y 4-1 con un trabajo nulo, será calculado como:

$$q = \Delta h \quad (2.17)$$

Al despejar quedarían ecuaciones en la turbina y el compresor de la siguiente manera:

$$W_{COMPRESOR} = h_2 - h_1 \quad (2.18)$$

$$W_{TURBINA} = h_3 - h_4 \quad (2.19)$$

$$q_{SUM} = h_3 - h_2 \quad (2.20)$$

$$q_{CED} = h_4 - h_1 \quad (2.21)$$

Trabajo neto de salida será:

$$W_{NETO} = W_{TURBINA} - W_{COMPRESOR} \quad (2.22)$$

Es así que se determina el valor del rendimiento térmico de la siguiente forma:

$$\eta_{TERM} = \frac{W_{NETO}}{Q_{SUM}} = 1 - \frac{q_{CED}}{q_{SUM}} = \frac{C_P(T_4 - T_1)}{C_P(T_3 - T_2)} = \frac{C_P\left(\frac{T_4}{T_1} - 1\right)}{C_P\left(\frac{T_3}{T_2} - 1\right)} \quad (2.23)$$

En tanto como las presiones $P_4 = P_1$ y $P_2 = P_3$, al comparar las relaciones isoentrópicas en los estados termodinámicos de 1-2 y 3-4, entonces será:

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{(K-1)/K} = \left(\frac{P_3}{P_4}\right)^{(K-1)/K} = \frac{T_3}{T_4} \quad (2.24)$$

Ya que $T_4/T_1 = T_3/T_2$, entonces el rendimiento térmico será:

$$\eta_{TERM} = 1 - \frac{T_2}{T_1} = 1 - \frac{1}{r_P^{(K-1)/K}} \quad (2.25)$$

Existe una diferencia entre el ciclo Brayton real e ideal, que gradualmente disminuye la presión al instante de absorber o de ceder calor, donde la reducción de este proceso será necesario, como también un proceso importante será la entra del trabajo real que ingresa al compresor que será superior; sin embargo, en la salida de la turbina, el trabajo real será menor al de la entrada al compresor, a causa de la irreversibilidad en el tiempo. La desviación del comportamiento real del compresor y la turbina para el comportamiento isoentrópico idealizado puede explicarse con precisión si se utilizan las eficiencias isentrópicas de la turbina y el compresor; de las siguientes ecuaciones de la **Figura 25. Diagrama Temperatura – Presión de un ciclo Brayton real.**

$$\eta_{COMPRESOR} = \frac{W_S}{W_{NETO}} = \frac{h_{2S} - h_1}{h_2 - h_1} \approx \frac{T_{2S} - T_1}{T_2 - T_1} \quad (2.26)$$

$$\eta_{TURBINA} = \frac{W_{NETO}}{W_S} = \frac{h_3 - h_4}{h_{3S} - h_4} \approx \frac{T_3 - T_4}{T_{3S} - T_4} \quad (2.27)$$

Donde:

$\eta_{COMPRESOR}$ = Rendimiento térmico isoentrópico del compresor

$\eta_{TURBINA}$ = Rendimiento térmico isoentrópico de la turbina

W_S = Trabajo o Potencia de la turbina en los diferenciales de entalpia.

W_{NETO} = Trabajo o Potencia neta del ciclo

$h_1, h_2, h_{2S}, h_3, h_{3S}, h_4$ = Diferenciales de entalpia

$T_1, T_2, T_{2S}, T_3, T_{3S}, T_4$ = Diferenciales de temperatura

r_p = Relación de Presiones

El rendimiento térmico de la turbina y del compresor en el ciclo real, siempre existirá un error a diferencia de uno ideal como lo son las irreversibilidades en los dispositivos mecánicos, ya que, en los ciclos reales, los procesos de suministro de calor no son completamente isobáricos, y los de expansión y compresión tampoco son completamente a entropía constante. (Condo, 2014, págs. 41-43)

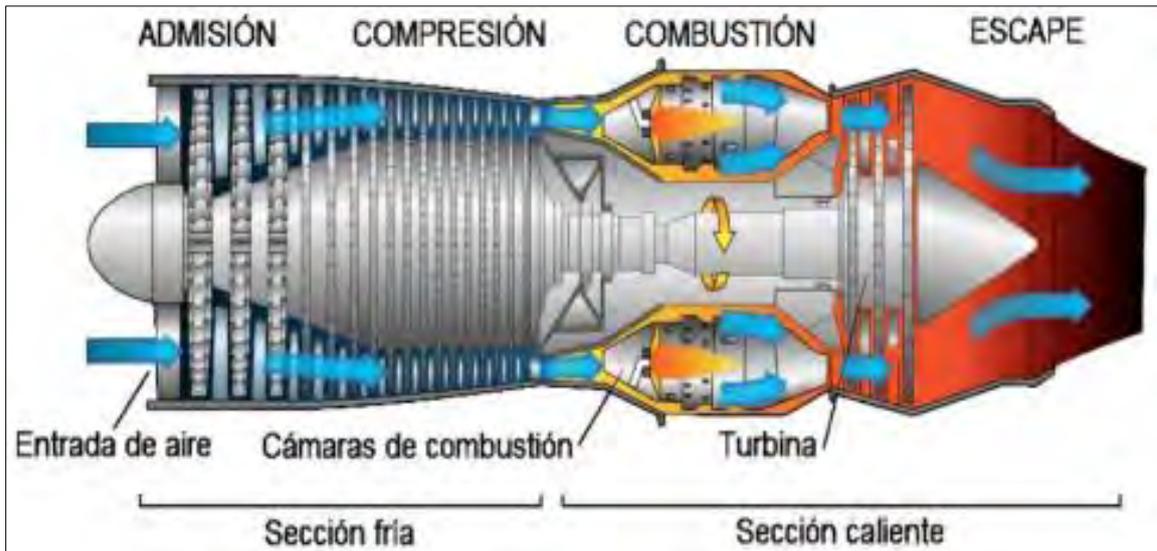
2.4.9. TURBINAS DE GAS

Las turbinas de gas son turbomáquinas, que corresponden al tipo de máquinas térmicas generadoras y cuyo límite determinado de operación va desde pequeñas potencias (5 KW para las microturbinas) hasta 500 MW para las más avanzadas y sofisticadas. Esta máquina térmica transforma la energía contenida en el fluido de trabajo del gas en energía mecánica de rotación al eje, para luego generar energía en el generador eléctrico.

2.4.9.1. ELEMENTOS DE LA TURBINA DE GAS

El sistema de turbina de gas este compuesto por un número de componentes los cuales son:

Figura 26. Componentes principales de una turbina de gas



Fuente: Principio de Operación de una turbina de gas(<http://www.energiza.org>)

a) FILTROS DE ADMISIÓN DE AIRE

Es un dispositivo que purifica el ingreso de aire, eliminando impurezas solidas de tal manera que no permite la entrada de materia solida al compresor. Estas impurezas dañan los alabes del compresor, de la cámara de combustión y de la turbina de potencia. El filtrado de entrada de aire, consta de 3 etapas:

- **Rejilla metálica**, nombrada también como rejilla anti-pajaros como filtrada muy grueso ya que agentes de tamaño podrían tratar de ingresar.
- **Prefiltros**, malla de filtrado más fino, eliminando el polvo fino que se encuentra suspendido.
- **Filtros Finos**, el cual expulsa las impurezas estrictamente, recibiendo pulsos de aire comprimido en flujos inversos para así, eliminar las partículas que permanecen retenidas en la superficie del aire.

Figura 27. Filtro compacto con pestañas para turbinas de gas



Fuente: Producto de Turbinas de gas (<https://www.camfil.com>)

b) COMPRESOR

Es un tipo de máquina cuya función es comprimir el fluido de trabajo de aire incrementando la presión y temperatura de un aire para ingresar a la cámara de combustión con una determinada presión y temperatura. El compresor se encuentra con un número de etapas el cual conforme va disminuyendo la presión va pasando por cada una de las etapas.

I. Compresor de desplazamiento dinámico

Compresor que son utilizados en turbo-maquinarias, que depende la transferencia de energía de un impulsor giratorio al aire; para luego dividirse en:

- **Compresor Axial;** compresor rotativo establecido en una superficie aerodinámica, en la que el gas o aire fluye en dirección al eje de rotación.
- **Compresor Radial o Centrifugo;** el aire ingresa directamente por la campana de aspiración, se dirige hacia la zona del centro del compresor, ya que esta compresión generalmente consta de una cámara en espiral.

Figura 28. Compresor Axial Alstom de 14 etapas



Fuente: Compresor (Turbina de gas- <http://www.turbinasdegas.com/el-compresor>)

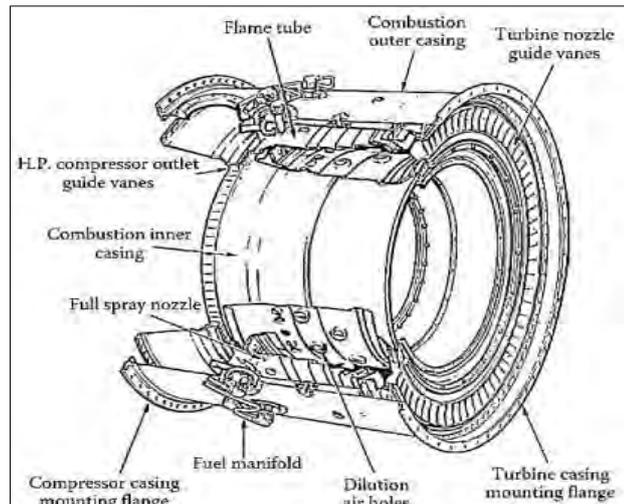
c) CÁMARA DE COMBUSTIÓN

La cámara de combustión o sector combustor; donde se produce la mezcla de aire-combustible al ser comprimido en el compresor, para producir la combustión para luego generar trabajo en forma de calor introduciéndose en los alabes de la turbina de potencia.

El calor se introduce en las turbinas de gas a través de la cámara de combustión. Esta cámara recibe el aire comprimido proveniente del compresor y lo envía a una elevada temperatura hacia la turbina expansora, idealmente sin pérdida de presión. Existen varios tipos de cámaras de combustión, pero en general pueden agruparse en tres categorías:

- c.1. Cámara de Combustión Anular:** En este tipo de cámara de combustión, la cámara tiene la forma de un anillo continuo que se encuentra en torno del eje entre el compresor y la turbina, con una serie de quemadores o inyectores (de 15 a 20) que están ubicados a lo largo de todo el anillo, la mezcla combustible/comburente y la distribución de temperaturas es menos uniforme que en las tubo-anulares, aunque también son menores las pérdidas de carga y tiene una buena refrigeración la cámara de combustión.

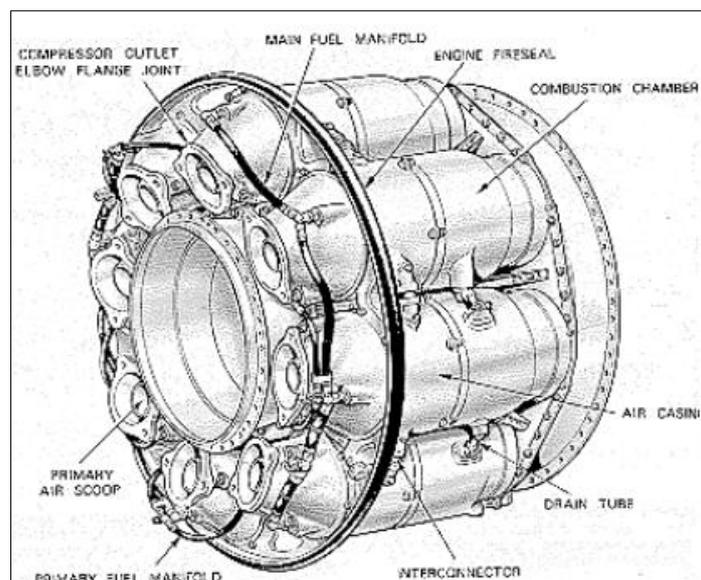
Figura 29. Cámara de Combustión anular



Fuente: Motores térmicos- Javier López (Libro de máquinas térmica, pag.15 – UPV)

c.2. Cámara de Combustión a silo: También llamado cámara tubular que contiene tubos de llama para el momento de la combustión, está colocada en la parte superior de la turbina fuera del eje, los inyectores se colocan pasando el techo superior de la cámara, y los gases de escape se posicionan a la entrada de la turbina de expansión por medio de una abertura inferior conectada a ésta; para este tipo de cámaras se utilizan en turbinas cuyo combustible de trabajo sea generalmente el hidrogeno.

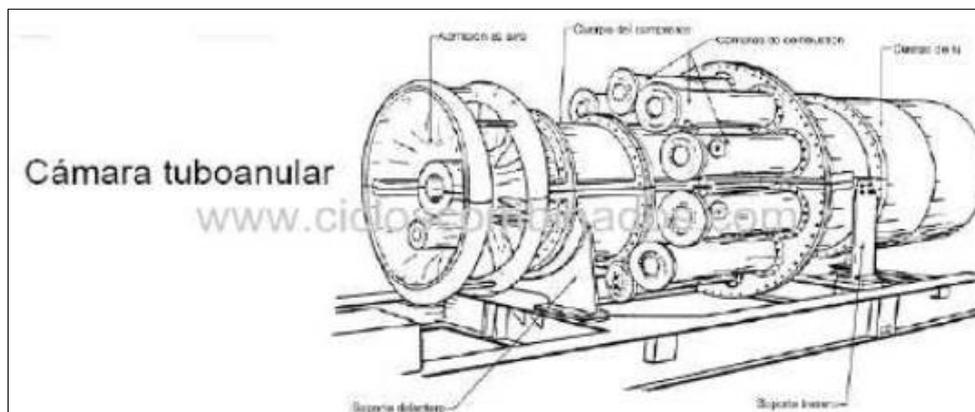
Figura 30. Cámara de Combustión Tubular



Fuente: Motores térmicos- Javier López (Libro de máquinas térmica, pag.16 – UPV)

c.3. Cámara de Combustión tuboanular: Este tipo de cámara es la fusión de la cámara anular y la tubular, Este tipo de cámaras de combustión está compuesta por una cadena o cantidad de cilindros colocados alrededor del eje cada uno con su quemador y sistema de encendido, ya que debido al fallo en el encendido de alguno de los quemadores podría provocar la divergencia de temperatura. Son más pesadas al tener varias cámaras de combustión, pero tienen una mayor resistencia estructural. General Electric y Mitsubishi son los fabricantes de este tipo de cámaras.

Figura 31. Cámara de Combustión tipo Tuboanular



Fuente: Motores térmicos- Javier López (Libro de máquinas térmica, pag.20 – UPV)

d) CARCASA

Es un elemento constitutivo el cual contiene a al compresor, cámara de combustión y la turbina propiamente dicha, al proteger y no permitir la salida del fluido de trabajo para su óptimo aprovechamiento el cual se diferencia en 3 áreas o secciones longitudinales:

- **Carcasa del compresor:** Presenta solo una sola capa que permite contener y soportar los alabes y evitar el escape de aire en toda la sección de compresión.
- **Carcasa de la cámara de combustión:** Es el espacio donde se producirá la combustión a una alta temperatura; la presencia de varias capas le permite una protección térmica, mecánica por las diferentes cámaras.

- **Carcasa de la turbina de expansión:** Contemplará dos capas, una para la unión entre alabes estáticos y la otra colocada exteriormente para la disposición del fluido de trabajo, así como la protección térmica de esta.

e) TURBINA DE POTENCIA DE LA TURBINA DE GAS

La turbina propiamente dicha o turbina de expansión, espacio el cual se genera la conversión de la energía comprendida en los gases de combustión con una alta temperatura y presión, para ser expandida incidiendo en los alabes de la turbina de alta(3 a 4 escales de alabes de la turbina) disminuyendo su presión y temperatura hasta llegar al alternador para poder transformar la energía mecánica de los alabes en el eje en energía eléctrica, sin embargo los 2/3 de la energía producida será consumida para poder hacer girar los alabes móviles del compresor y comprimir el aire. Los álabes deben estar recubiertos por material cerámico para soportar las altas temperaturas, además, un flujo de aire refrigerador proveniente del compresor los atraviesa internamente, saliendo al exterior por pequeños orificios practicados a lo largo de toda su superficie. Los gases, que se ajustan, ingresan la turbina a una temperatura de 1000-1300°C y una presión de 10 a 40 bares, salen de la turbina a unos 450-550°C. La temperatura determinada hace que la eficiencia o rendimiento sea óptimo en la turbina de gas, y ser aprovechada estos gases de escape en la caldera de recuperación de calor.

Según el origen de estas turbinas se pueden dividir en:

d.1. Aeroderivadas

Son consideradas de menor tamaño y una alta eficiencia en cuyo origen son diseñadas para propulsión de aviones, barcos, etc. Estas máquinas que requieren una gran fuerza de potencia al ser más compactas, robustas, tienen una alta relación potencia/peso, son inestables de operar, ya que, al derivar de aviones, barcos, etc. Presentan una marcha firme y constante, ya que varían rápidamente en subidas y bajadas de potencia. El arranque que requieren es más fácil comparando con el industrial; son diseñadas con potencias que abarcan los 50MW.

Figura 32. Turbina de gas tipo aeroderivada en mantenimiento

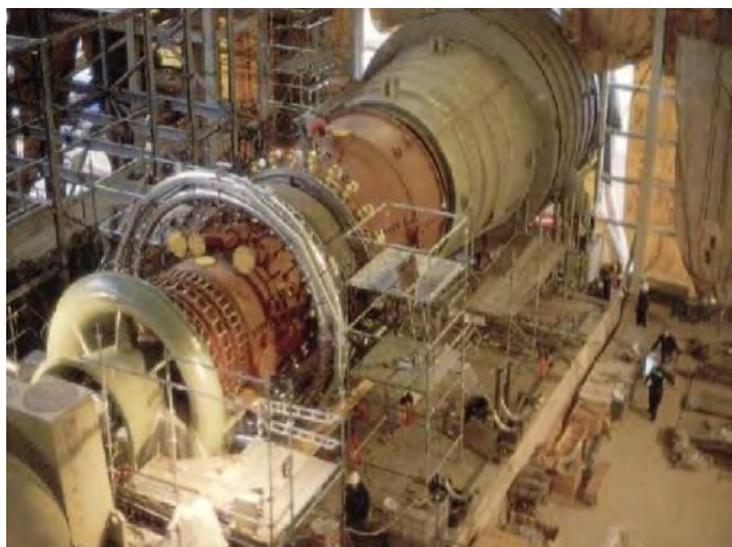


Fuente: Tipos de turbina de gas (<http://www.turbinasdegas.com>)

d.2. Industriales (Heavy Duty)

La evolución de su diseño se ha orientado siempre a la producción de electricidad, buscándose grandes potencias y largos periodos de operación a máxima carga sin paradas ni arranques continuos. Su potencia de diseño puede llegar a los 500 MW, moviendo grandes cantidades de aire a bajas velocidades, que pueden aprovecharse en posteriores aplicaciones de cogeneración. Su mantenimiento debe realizarse in-situ o en el mismo lugar donde se encuentre la turbina debido a su gran tamaño y peso, buscándose alargar lo más posible en el tiempo las revisiones completas del equipo.

Figura 33. Turbina de gas tipo Industrial (Heavy Duty)



Fuente: Tipos de turbina de gas (<http://www.turbinasdegas.com>)

Las turbinas de gas aeroderivadas muestran un diseño que les permite ser de menor tamaño y liviano. Este tipo de turbinas aeroderivadas muestran un mayor rendimiento en comparación con las turbinas industriales o turbinas heavy duty en ciclo simple, el cual es superior en una 5 a 8 % ya que la temperatura máxima que presenta en los gases de salida de la turbina industrial es superior al de la turbina aeroderivada. No obstante, esta superior temperatura de los gases de salida es la encargada de que, en configuraciones de la central térmica de ciclo combinado, las heavy duty consigan rendimientos superiores a las aeroderivadas.

Tabla 22. Cuadro de comparación y diferencias entre turbinas aeroderivadas y turbinas industriales

Turbina aeroderivadas	Turbina Industrial
Peso menor	Peso mayor
Menos lento en el arranque	lento en el arranque
Menores dimensiones	Mayores dimensiones
Menor periodo de mantenimiento	Mayor periodo de mantenimiento
Consumo energético menor	Consumo energético mayor
Mayor número de repuestos	Menor número de repuestos

Fuente: Alternativa Tecnológica del proyecto de una central térmica Quillabamba-Ministerio de Energía y Minas

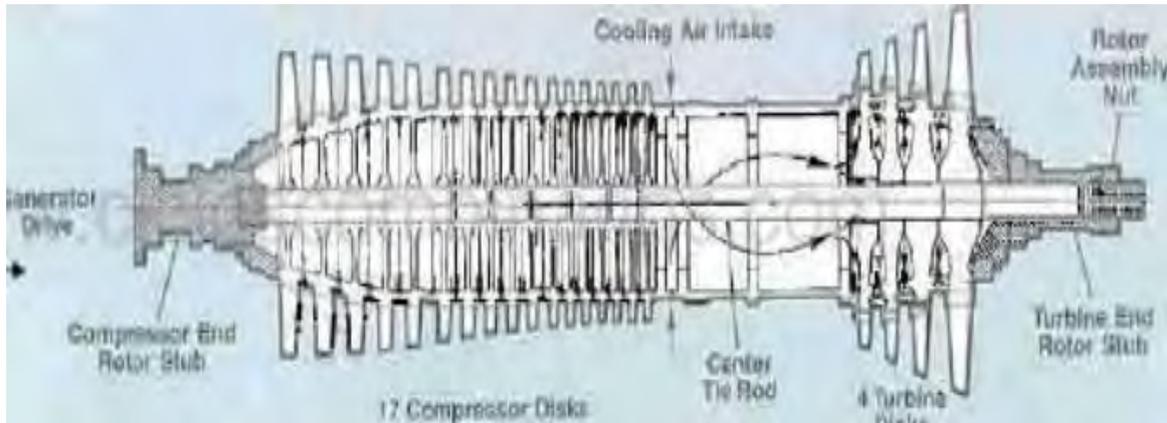
Otra de sus características de tipo de turbinas, se pueden apreciar su clasificación por el tipo de construcción que es el de número de ejes que presenta:

- Turbinas de gas de un solo eje o monoeje.
- Turbinas de gas de varios ejes o multieje.

d.3. Turbinas de gas de un solo eje o monoeje

En la turbina monoeje está montada sobre un único eje, el compresor, turbina de expansión y generador giran alrededor de un solo eje de rotación. La velocidad de giro varía entorno a los 3000 rpm, para acoplarse y ajustarse al nivel de frecuencia (50 Hz) de la red eléctrica. Son consideradas como turbinas comerciales de generación eléctrica.

Figura 34. Estructura de una turbina mono eje

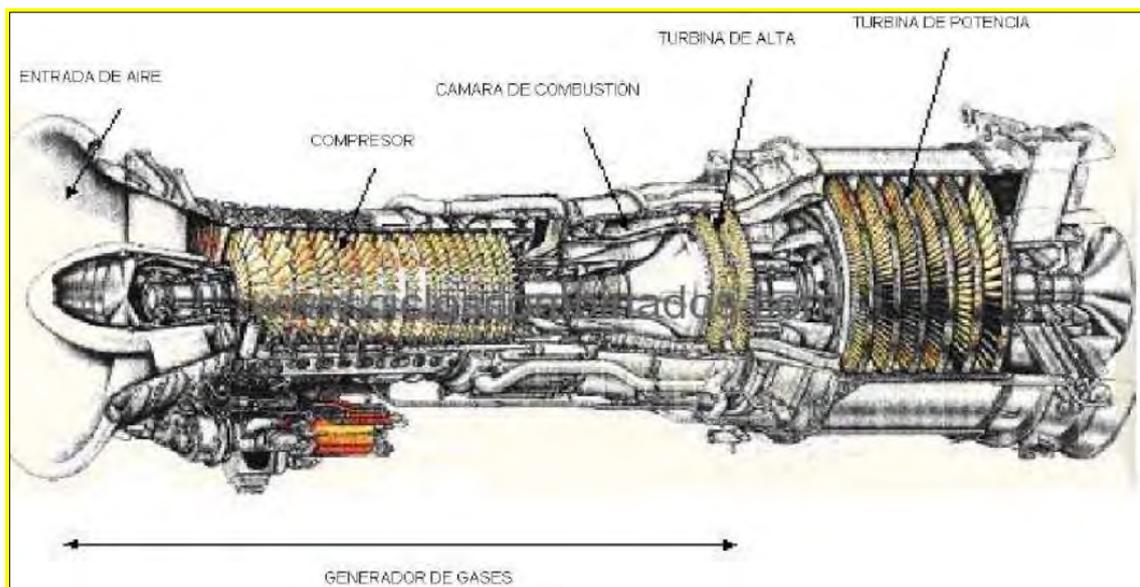


Fuente: Tipos de Turbinas de gas (<http://www.cicloscombinados.com>)

d.4. Turbinas de gas de varios ejes o multieje

Este tipo de turbina presenta dos ejes, de tal manera tendremos una turbina de alta acoplada y para poder mover el compresor o al llamado generador de gas conformado por el compresor, cámara de combustión y turbina que generaran gas caliente y a presión para mover la turbina libre, la cual será la que dará potencia para generar energía y acoplada al generador eléctrico. Este tipo de configuración son provistas en turbinas aeroderivadas y de menor potencia puesto que presentan buen comportamiento enfrente de variaciones de carga.

Figura 35. Estructura de una turbina multieje



Fuente: Tipos de Turbinas de gas (<http://www.cicloscombinados.com>)

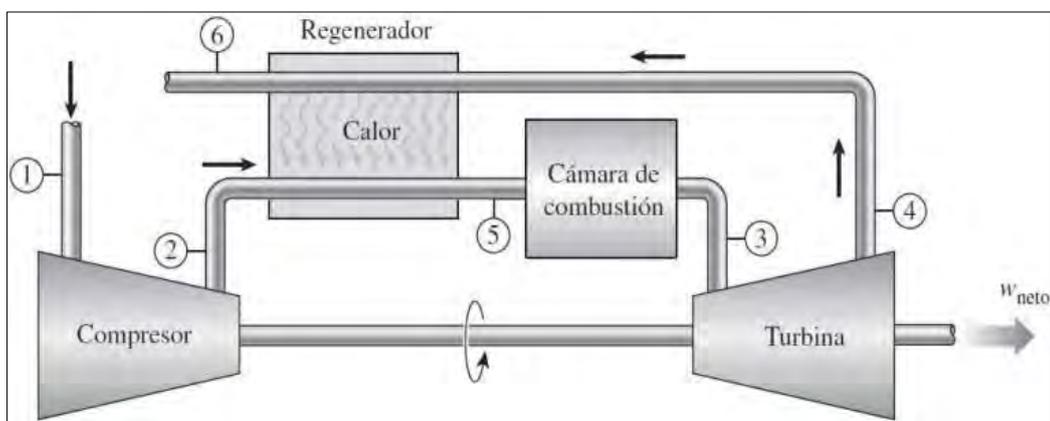
2.4.10. CONFIGURACIONES ESPECIALES PARA EL MEJORAMIENTO DEL CICLO BRAYTON

El ciclo Brayton puede ser partícipe de varias modificaciones con el objetivo de incrementar su rendimiento en la turbina de gas, los cuales son calentamientos o enfriamientos en los procesos de compresión o expansión de la turbina.

2.4.10.1. CICLO BRAYTON REGENERATIVO

En un ciclo Brayton la presencia de un sistema variable en la turbina de gas es el de incorporar un regenerador. El regenerador es un intercambiador de calor que aprovecha la energía de los gases calientes de escape en el proceso de precalentamiento del aire que entra a la cámara de combustión. Este ciclo normalmente es utilizado en turbinas que trabajan con relación de bajas presiones en el momento de la expansión. La temperatura de los gases calientes a la salida que son expulsados de la turbina acostumbran ser superiores a la del aire que despiende del compresor; por consiguiente, el aire caliente a alta presión que es expulsado del compresor, necesita elevar y calentarse el aire para poder llevar a su punto determinado de temperatura y presión, lo cual se instalara un regenerador o recuperador el cual aumentará el rendimiento así como también disminuirá el combustible al momento del escape y salida de trabajo realizado.

Figura.36. Ciclo Brayton con Regeneración



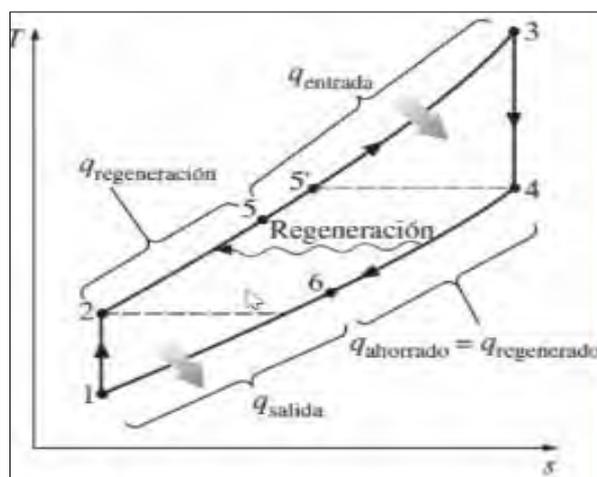
Fuente: Ciclo Brayton (Pagina web: [http:// utpterminamica2](http://utpterminamica2))

Los regeneradores al ser intercambiadores de calor y que su función es precalentar el aire a la salida del compresor, tienen inconvenientes los cuales intervenir a una causa vertiginosa en el enfriamiento. Los cuales podrían ser:

- ✓ Gran superficie de intercambio de calor
- ✓ Dificultad para la limpieza de la misma
- ✓ Aumento de la resistencia al paso de los gases de escape

Para poder preservar la temperatura máxima predeterminada en el compresor es necesario realizar el proceso de precalentado para poder obtener el incremento de la temperatura del aire, sin embargo, esta subida de temperatura provoca una caída de presión mayor, sin mencionar que económicamente se ahorrara el valor del combustible para el proceso de combustión. Cabe mencionar que la gran mayoría de recuperadores o regeneradores de calor prácticamente el rendimiento que optan es del 0.85. Esta eficiencia térmica dependerá de la variación del mínimo y máximo valor de temperatura como también la relación de presiones que dispongan. Se determinará la eficiencia, o efectividad del regenerador como el índice del calor transmitido a los gases del compresor en el regenerador, a la transmisión de calor máximo posible a los gases del compresor, esto es:

Figura 37. Diagrama Temperatura-Entropía del ciclo Brayton regenerativo real-ideal



Fuente: Ciclo Brayton ([http:// utptermodinamica2](http://utptermodinamica2))

Se determinará la eficiencia, eficacia o efectividad del regenerador como el índice del calor transmitido a los gases del compresor en el regenerador, a la transmisión de calor máximo posible a los gases del compresor de la **Figura**

$$\epsilon_{REGENERADOR} = \frac{Q_{REGENER.REAL}}{Q_{REGENER.MAX}} = \frac{h_5 - h_2}{h_4 - h_2} \quad (2.28)$$

Para los gases en ciclos ideales que funcionan para suposiciones de ciclos de aire frío, con calores específicos constantes quedara como el rendimiento en función de la temperatura:

$$\epsilon_{REGENERADOR} = \frac{Q_{REGENER.REAL}}{Q_{REGENER.MAX}} = \frac{T_5 - T_2}{T_4 - T_2} \quad (2.29)$$

Al considerar un regenerador o recuperador ideal donde $\epsilon_{REGENERADOR} = 1$, así como el valor del calor o capacidad calorífica constante, se afirmaría que el total del calor de la corriente superior se difiere a la corriente inferior, en caso sea de no contemplar con datos o información suficiente y no tener el valor de la eficiencia del regenerador, el cual se estaría dado por la ecuación (2.26)

Utilizando un ciclo cerrado, presentes en el suministro y el enfriamiento de calor como procesos de flujo estable, así la eficiencia térmica del ciclo regenerativo será:

$$\eta_{TERMICO} = 1 - \frac{Q_{SALIDA}}{Q_{ENTRADA}} = 1 - \frac{h_6 - h_1}{h_3 - h_5} \quad (2.30)$$

Donde:

$\epsilon_{REGENERADOR}$ = Rendimiento térmico isoentrópico del compresor

$Q_{REGENER.REAL}$ = Calor real del regenerador o recuperador

$Q_{REGENER.MAXIMO}$ = Calor máxima del regenerador o recuperador

$Q_{ENTRADA}$ = Calor de entrada del ciclo regenerativo

Q_{SALIDA} = Calor de salida del ciclo regenerativo

$h_1, h_2, h_3, h_4, h_5, h_6$ = Diferenciales de entalpia del ciclo regenerativo

T_1, T_4, T_5 = Diferenciales de temperatura del ciclo regenerativo

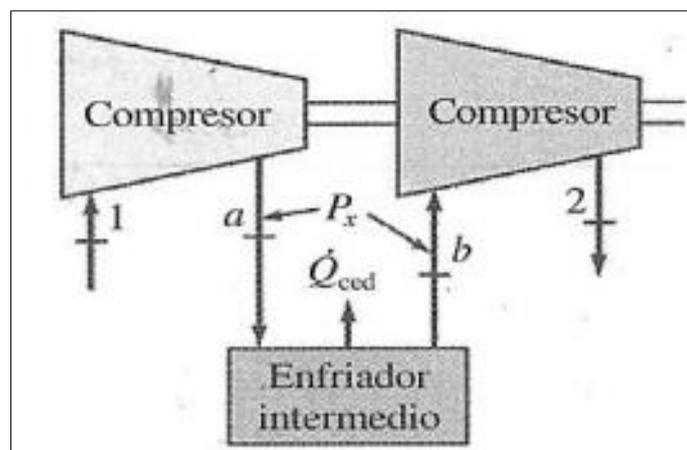
$\eta_{TERMICO}$ = Eficiencia térmica del ciclo regenerativo

2.4.10.2. CICLO BRAYTON CON INTERENFRIAMIENTO

El interenfriamiento o enfriamiento intermedio está dada por el manejo de la salida de trabajo de la turbina y la entrada de trabajo del compresor, pudiendo variar aumentado este trabajo ya sea si se disminuye el trabajo del compresor o incrementa el trabajo de la turbina. En el proceso de compresión, el número de etapas influirá en la disminución de trabajo que requiere la cámara de combustión.

Cuando se emplea la compresión en múltiples etapas, al momento de enfriar el fluido de aire entre las etapas, se reducirá el trabajo necesario para el compresor. En el proceso de enfriamiento del fluido de trabajo perjudicara en la reducción del volumen específico es por eso que el trabajo del realizado en el compresor será mínimo y limitado para posteriormente alcance el valor de incremento de la presión que se requiere.

Figura 38. Enfriamiento Intermedio entre dos compresores



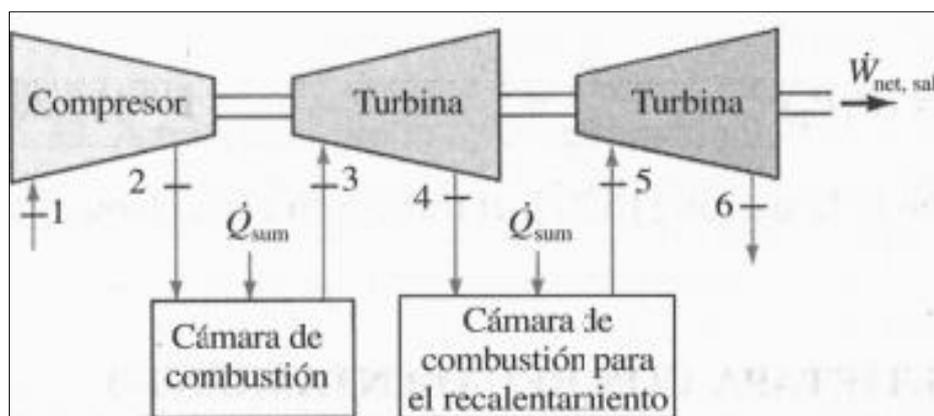
Fuente: Termodinámica Aplicada (pág. 26 -Universidad Nacional Experimental Francisco Miranda)

Como se observa en la **Figura 38** , el enfriamiento intermedio se realiza entre cada número de etapas al pasar el fluido a través de ellos, para luego ingresar a otro enfriador lo que otorgara la compresión hasta adquirir la presión determinada con el descenso del valor de trabajo neto en función de la relación de presiones obtenida.

2.4.10.3. CICLO BRAYTON DE RECALENTAMIENTO INTERMEDIO

El recalentamiento en la turbina de gas lleva a cabo en dos etapas en la expansión de los gases a la salida de la de la turbina de alta presión con doble eje con un trabajo determinado y una alta temperatura para la entrada de la turbina de potencia acoplada al generador eléctrico. Cuando los gases de salida de la turbina de alta presión son preparados a una temperatura superior antes de ingresar a la turbina de baja presión y finalmente obtener la temperatura de entrada luego de realizar la combustión requerida en la cámara de combustión.

Figura 39. Recalentamiento de la cámara de combustión -turbina



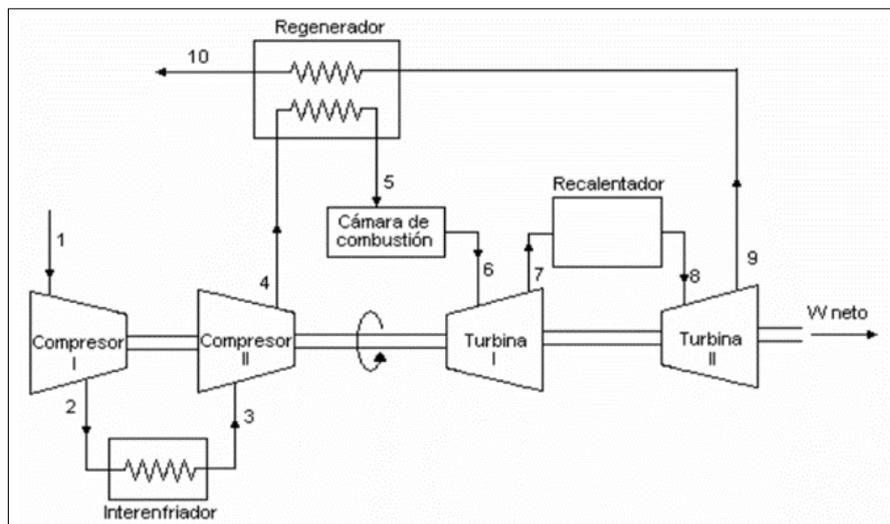
Fuente: Termodinámica Aplicada (pag.29 – Universidad Nacional Experimental Francisco Miranda)

Suele utilizarse el ciclo con enfriamiento intermedio en el compresor junto al recalentamiento en la turbina, puesto que al tener dos turbinas entre etapas se expandirá parcialmente uno de otro para luego pasar de una cámara a otra con una presión constante ideal y llegar a la temperatura límite a la entrada de la segunda turbina y luego alcanzar la presión atmosférica de los gases de escape.

El valor de la presión intermedia óptima en el proceso de recalentamiento, es la cual eleva el trabajo de la turbina, en donde es: $P_3/P_4 = P_5/P_6$; y considerando en condiciones de un recalentamiento ideal de valores de temperatura: $T_3 = T_5$.

2.4.10.4. INTERENFRIAMIENTO, RECALENTAMIENTO Y REGENERACIÓN EN UN CICLO BRAYTON

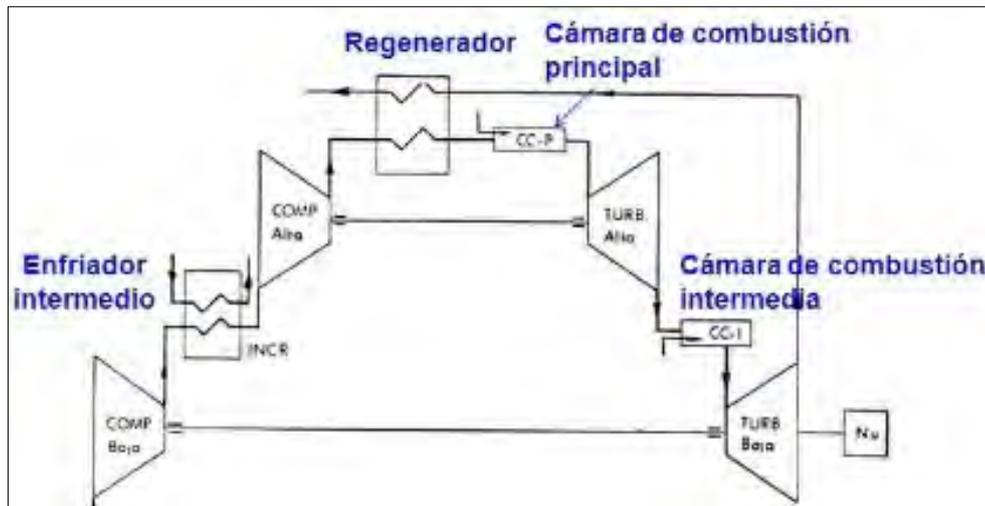
Figura 40. Esquema del ciclo Brayton con recalentamiento, enfriamiento y regeneración.



Fuente: Termodinámica Aplicada (pág. 34 – Universidad Nacional Experimental Francisco Miranda)

Durante el procedimiento del enfriamiento, recalentamiento y la regeneración del ciclo de turbina de gas, incrementará la relación de trabajo, sin embargo, la eficiencia térmica no incrementará paulatinamente, ya que la presión disminuirá al momento de ganar trabajo; es por eso que el proceso de regeneración siempre debe ir acoplado al sistema de enfriamiento y recalentamiento para su equilibrio de relación de presiones y el rechazo de calor del incremento de la temperatura.

Figura 41. Modelo de un ciclo con enfriamiento, recalentamiento y regeneración con doble eje de una turbina de gas



Fuente: Revista de Motores térmicos (pag.11 – Universidad Politécnica de Valencia)

El montaje de un ciclo Brayton compuesto de interenfriador, recalentar y un regenerador es óptimo para el rendimiento térmico elevado que se obtendrá luego del trabajo neto del compresor, cámara de combustión y la turbina de expansión. Se tendrá un número determinado de compresores con sus enfriadores intermedios correspondientes y las turbinas de potencia con su cámara de combustión intermedia. El conjunto se suele montar con varios ejes ya sea agrupando los compresores y las turbinas de baja presión.

2.4.10.5. PARÁMETROS CONSIDERANDO EL CICLO BRAYTON CON INTERENFRIAMIENTO, RECALENTAMIENTO Y REGENERACIÓN

1. Se exige de datos de eficiencias isoentrópicas de compresores y turbinas, así como de la eficiencia del regenerador. Así mismo cuando el ciclo real labora normalmente proporciona más cantidad de datos sobre los valores de presión y temperaturas.
2. Se podrá realizar los cálculos a la salida de los compresores y turbinas, la eficiencia determinada por valores reales del ciclo Brayton real.
3. Como la eficacia del regenerador no llega al 100%, entonces la temperatura en el punto T_5 es diferente en el punto T_9 .

4. Las temperaturas en diferentes puntos serán variables, tal cual el punto a la entrada de cada escalonamiento de la compresión variara con respecto a la de la turbina en el instante de la expansión, al tener un intercambio o transferencia de calor pésima.

2.4.11. CICLO RANKINE

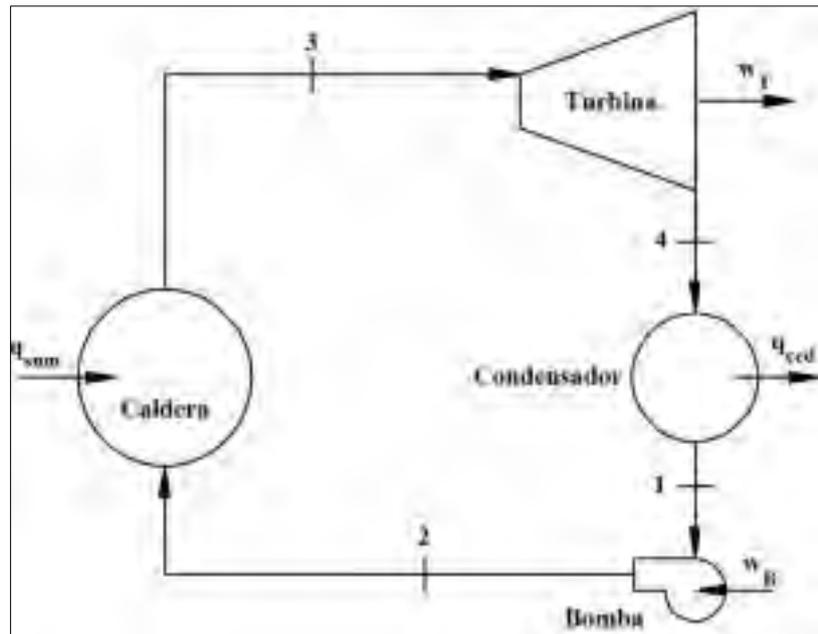
Es un ciclo termodinámico de potencia, el cual, a la salida del proceso de expansión de la turbina de gas, los gases de salida ingresan en un nuevo ciclo para completar y aprovechar las pérdidas de su fluido de trabajo, donde se aplicará en un ciclo combinado de una central térmica de biogás. La eficiencia que presenta; está determinado por el ciclo de Carnot, al laborar con los mismos focos térmicos de la segunda ley de la termodinámica.

2.4.12. CICLO VAPOR

Ciclo de potencia cuyo fluido de trabajo es el agua, cuya turbina de vapor es el elemento transformador de energía térmica contenida en el proceso de evaporación en energía mecánica hacia el eje y posteriormente en energía eléctrica. Su diseño suele tener características de diseño para cada finalidad el cual se requiera.

Los gases calientes o el calor residual que entran en el recuperador o caldera de vapor ingresan a alta presión, donde pasará por diferentes niveles de presión hasta llegar a una presión y temperatura determinada para luego entrar a la turbina al sobrecalentarse el vapor y expandirse para ser convertida la energía calorífica en energía mecánica transmitida en el eje del rotor donde perderá presión, finalmente llega al condensador donde convertirá el fluido gaseoso en líquido para luego ser bombeado en un proceso de ciclo cerrado y empezar de nuevo el ciclo . La bomba tiene la función de ser fuente de alimentación de agua para dar la presión precisa para la cesión de calor en la caldera y lograr el nivel de presión y temperatura prescindible para la turbina.

Figura 42. Esquema de un Ciclo Rankine agua-vapor

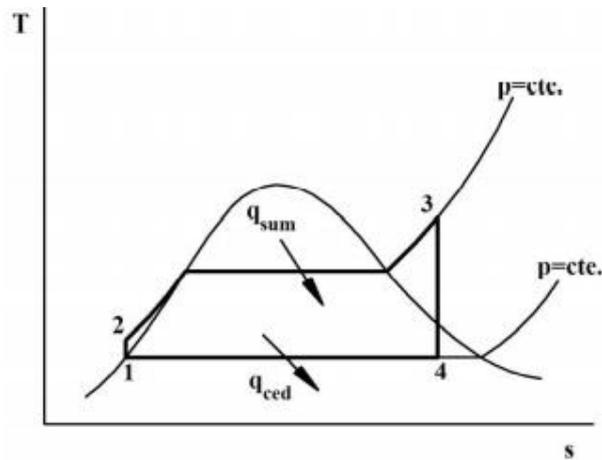


Fuente: Tesis de diseño de una central térmica (pag.33, UCSM – 2014)

El ciclo Rankine de vapor, no existe ninguna irreversibilidad que se produce dentro del sistema, debido a que no se encuentra en equilibrio, donde existe 4 procesos como se muestra en la **Figura 42**, los cuales son:

- **Compresión Isoentrópica de la Bomba:** De (1-2), hay un incremento importante de la presión desde el punto más bajo (1) hasta el punto más alto (2).
- **Suministro o adición de calor isobárico de la caldera:** De (2-3), calentamiento del calor conservando la presión constante en la caldera recuperadora de calor.
- **Expansión isoentrópica en la turbina:** De (3-4), disminución de la presión en la turbina de vapor.
- **Rechazo de calor isobárico en el condensador:** De (4-1), Cesión de calor al permanecer la presión constante en el condensador, hasta llegar al estado termodinámico inicial.

Figura 43. Diagrama Temperatura-Entropía del ciclo de Rankine ideal



Fuente: Tesis de diseño de una central térmica (Universidad Católica de Santa María, pag.45-2014)

Los procesos isoentrópicos e isobáricos presentes en el ciclo agua-vapor siempre serán comprendidos en un ciclo ideal dado que la presión constante y las pérdidas de carga no se ajustan al ciclo con los valores reales correspondientes; es así que al observarse un ciclo real perjudicaría en la eficiencia isoentrópicos de la bomba y el rendimiento térmico del ciclo.

En un ciclo más realista que el ciclo Rankine ideal descrito, los procesos en la bomba y en la turbina no serían isoentrópicos y el condensador y la caldera presentarían pérdidas de carga. Todo ello generaría una reducción del rendimiento térmico del ciclo. El rendimiento isoentrópicos de la turbina, que representa el grado de alejamiento de una turbina respecto al proceso ideal isoentrópicos, jugaría un papel principal en las desviaciones al ciclo ideal y en la reducción del rendimiento. El rendimiento isoentrópicos de la bomba y las pérdidas de carga en el condensador y la caldera tendrían una influencia mucho menor sobre la reducción de rendimiento del ciclo.

El balance de energía del ciclo es:

$$q + W = \Delta h + \Delta e_C + \Delta e_P \quad (2.31)$$

Al considerar a $\Delta e_C = 0$ y $\Delta e_P = 0$ en los procesos adiabáticos:

$W = \Delta h \rightarrow (1-2 \text{ y } 3-4)$ sin intercambio de calor

$q = \Delta h \rightarrow (2-3 \text{ y } 4-1)$ Sin Trabajo

$$q = 0 \rightarrow W_{BOMBA.ENTRADA} = h_2 - h_1(\text{Bomba}) \quad (2.32)$$

$$q = 0 \rightarrow W_{TURBINA.SALIDA} = h_3 - h_4(\text{Turbina}) \quad (2.33)$$

$$W = 0 \rightarrow Q_{ENTRADA \text{ o } SUMINISTRO} = h_3 - h_2(\text{Caldera}) \quad (2.34)$$

$$W = 0 \rightarrow Q_{SALIDA \text{ o } CEDIO} = h_4 - h_1(\text{Condensador}) \quad (2.35)$$

El volumen específico es muy pequeño

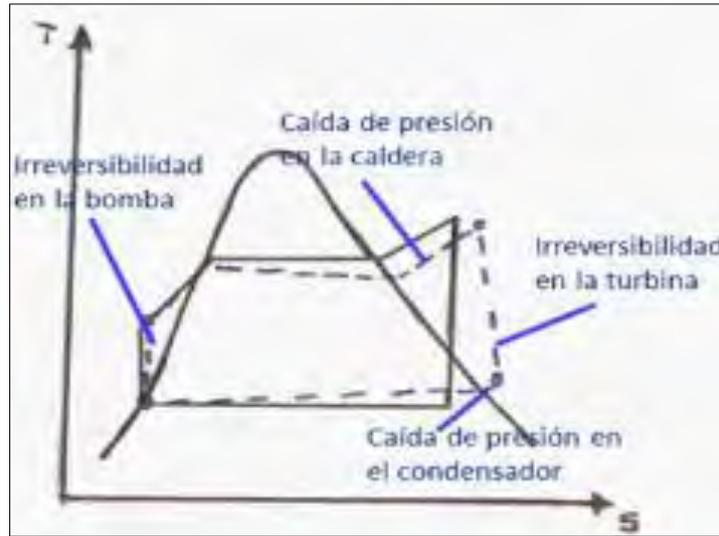
$$W_{BOMBA.ENTRADA} = v(P_2 - P_1) \quad (2.36)$$

$$\eta_{TERMICA} = \frac{W_{NETO}}{Q_{ENTRADA \text{ o } SUMINISTRO}} = 1 - \frac{Q_{SALIDA}}{Q_{ENTRADA}} = 1 - \frac{h_4 - h_1}{h_3 - h_2} \quad (2.37)$$

2.4.13. CICLO RANKINE REAL

En un ciclo Rankine real existe una diferencia al comparar con un ciclo Rankine ideal, ya sea obligado por las irreversibilidades que presenta tanto principalmente de fricción y por las pérdidas de calor.

Figura 44. Diagrama de Temperatura-Entropía de un ciclo Rankine real



Fuente: Libro de Termodinámica-Plantas térmicas (Ing. Gabriel García Sánchez, pág. 44)

En la **Figura 44** , se observa el ciclo Rankine real en el área punteada, donde debido a la fricción hay menor presión a la salida de la caldera y a la entrada de la turbina, por consiguiente, menor caída de presión en el condensador, por lo tanto, necesitamos una bomba de mayor capacidad para compensar esas pérdidas. Debido a las pérdidas de calor de vapor tenemos que incorporar más calor a la caldera para lograr el efecto deseado eso hace que no se pueda mantener una presión constante que no se tenga el proceso isoentrópico real y que la presión caiga un poco en el condensador.

2.4.13.1. EFICIENCIA ISOENTRÓPICA

Es una expresión de la eficiencia de las turbinas y de las bombas reales con respecto a las ideales

$$\eta_{BOMBA} = \frac{W_s}{W_a} = \frac{h_{2s} - h_1}{h_{2a} - h_1} \quad (2.38)$$

$$\eta_{TURBINA} = \frac{W_a}{W_s} = \frac{h_3 - h_{4a}}{h_3 - h_{4s}} \quad (2.39)$$

Donde:

η_{TERMICA} = Rendimiento térmico del ciclo Rankine

η_{TURBINA} = Rendimiento Térmico de la turbina

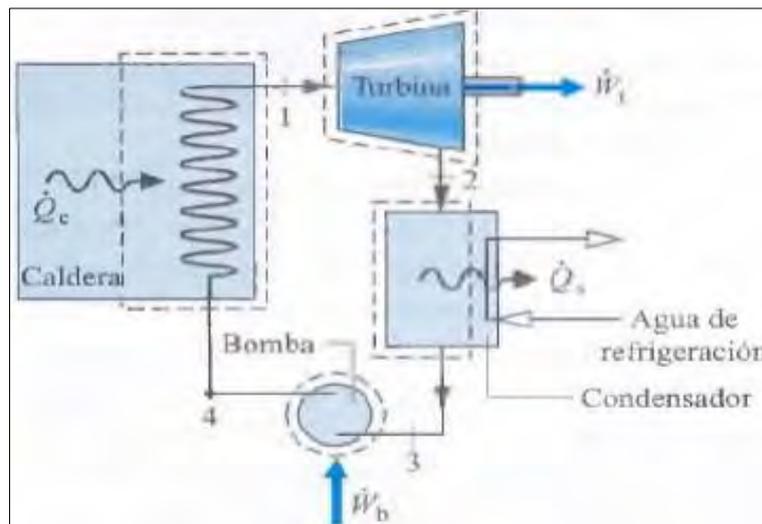
η_{BOMBA} = Rendimiento Térmico de la Bomba

W_s = Trabajo isoentrópico para la bomba

W_a = Trabajo real para la bomba

2.4.13.2. ELEMENTOS PRINCIPALES QUE CONFORMAN EL CICLO DE VAPOR (RANKINE)

Figura 45. Elementos principales de un ciclo Rankine



Fuente: Libro de Tesis-Análisis de una central térmica de biomasa (Borja Marín Oscos, pag.11)

- CALDERA:** Los gases calientes que ingresan a la caldera junto con el fluido de trabajo que es el agua de alimentación de la caldera, el cual se calienta hasta un punto de saturación y evaporarse a una determinada temperatura Tomando en cuenta el control de volumen del fluido en los tubos y elementos auxiliares.
- TURBINA:** El vapor producido en la caldera pasara a ser expandido en la turbina, que chocaran en los alabes a una temperatura y presión elevadas y así producir el trabajo que sea necesario y luego para ser descargado en el condensador.

- c) **CONDENSADOR:** Transforma el líquido evaporado en su estado líquido inicial, así transmitir el calor del vapor hacia el agua de refrigeración del mar, río o lago que recorre en un flujo aislado. El fluido líquido evaporado se condensa y la temperatura del agua de refrigeración se eleva.
- d) **BOMBA:** Una vez que se haya realizado el proceso de condensación cuyos fluidos calientes se refrigeran en el exterior: el fluido en estado líquido es enviado a a bomba de una presión menor da otra presión alta.

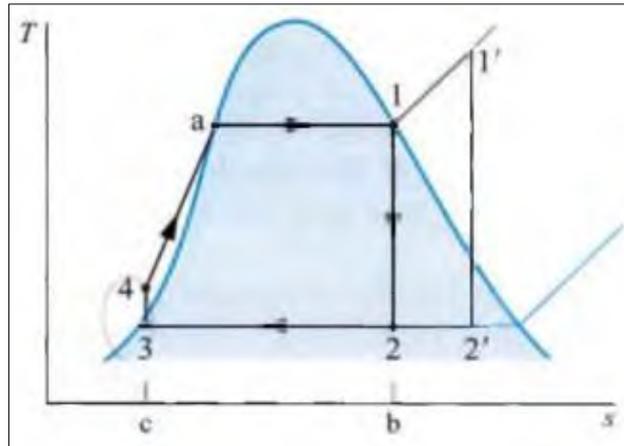
2.4.14. MEJORAS DEL FUNCIONAMIENTO E INCREMENTO DE LA EFICIENCIA DEL CICLO RANKINE

Existen modificaciones las cuales ayuda en un incremento del rendimiento del ciclo Rankine, ya sea para posteriores circunstancias. Siempre hay que tener en cuenta, que un aumento de la presión en la caldera o una disminución de presión en el condensador ya que ello provocaría una reducción de la calidad de vapor que se encuentra a la salida de la turbina; es así que se pretende mantener la calidad de vapor que se suministra que sea por encima del 90%.

2.4.14.1. SOBRECALENTAMIENTO

El desarrollo del sobrecalentamiento radica en la transferencia de una energía suplementaria mediante el agregado de fluido de vapor, es decir el proceso del sobrecalentar. EL sobrecalentamiento es la aplicación de un equipo auxiliar del sobrecalentador al complementarse con la caldera realizan el proceso como generador de vapor. Este ciclo termodinámico como modificación del ciclo Rankine se le atribuye de una elevada temperatura de impregnación al obtener mayor rendimiento superior.

Figura 46. Diagrama Temperatura-Entropía en un ciclo con sobrecalentamiento



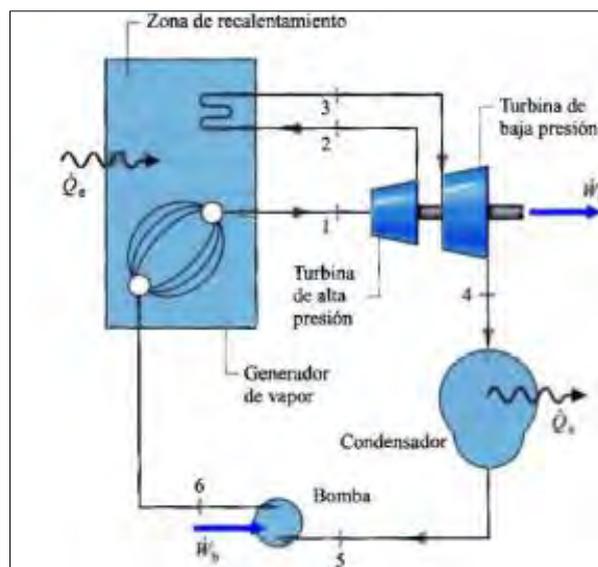
Fuente: Libro de Tesis-Análisis de una central térmica de biomasa (Borja Marín Oscos)

En la **Figura 46**, se puede observar una diferencia entre el ciclo Rankine con sobrecalentamiento en los puntos (1'-2'-3-4) y el ciclo Rankine sin sobrecalentamiento en los puntos (1-2-3-4). Puede deducirse de este diagrama que, si se consigue suficiente sobrecalentamiento, y ser considerado como vapor sobrecalentado a la salida de la turbina.

2.4.14.2. RECALENTAMIENTO

El proceso de recalentamiento adecuado incrementara el rendimiento del ciclo al aumentar la presión y conseguir una óptima calidad de vapor que se obtenga a la salida de la turbina.

Figura 47. Diagrama del Recalentamiento del ciclo Rankine

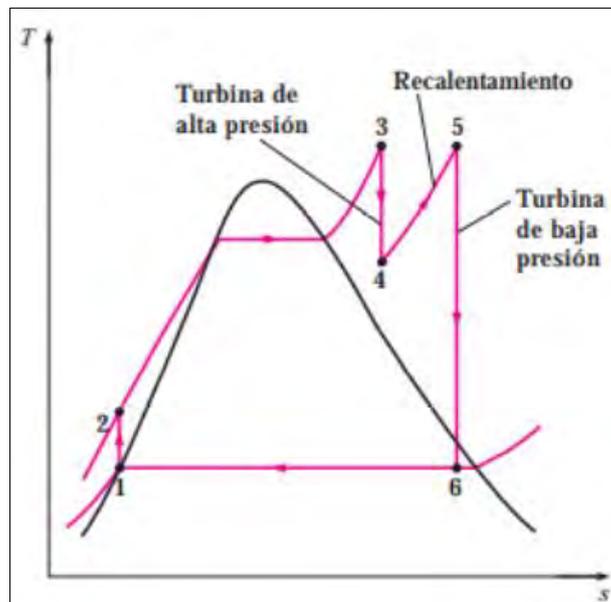


Fuente: Libro de Tesis-Análisis de una central térmica de biomasa (Borja Marín Oscos, pag.15)

El ciclo Rankine con recalentamiento está dividido en dos etapas de turbinas de vapor, el cual una será turbina de alta presión y otra turbina de baja presión.

- **PROCESO 1-2:** La primera se expande isoentrópicamente en la turbina de alta presión donde se aloja la temperatura intermedia hasta una presión constante a la caldera.
- **PROCESO 2-3:** Se realiza el recalentamiento al suministrar calor a una presión constante
- **PROCESO 3-4:** El vapor ingresa a la segunda etapa de la turbina de baja presión hasta la presión del condensador y se expande isoentrópicamente.
- **PROCESO 4-5:** Cesión de calor a presión constante en el condensador.
- **PROCESO 5-6:** Se realiza la compresión isoentrópica mediante la bomba que hará retronar a la caldera para su proceso correspondiente.

Figura 48. Diagrama Temperatura-Entropía de un Ciclo Rankine con recalentamiento

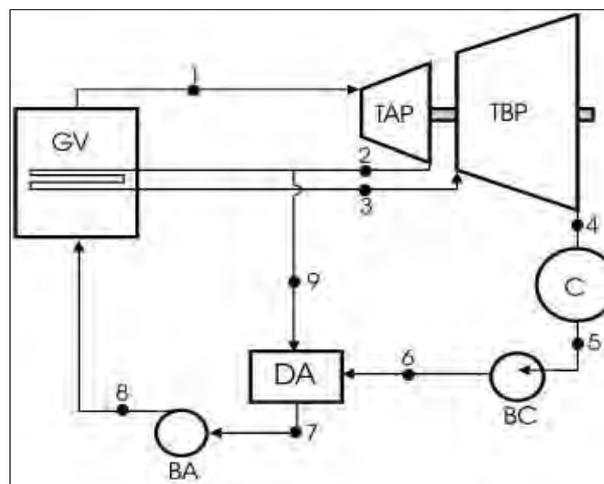


Fuente: Libro de Tesis-Análisis de una central térmica de biomasa (Borja Marín Ocos, pag.25)

2.4.14.3. CICLO REGENERATIVO

Este ciclo está definido por el calentamiento con un foco de calor interno al sistema en vez de utilizar un foco externo, ya que permite que la temperatura de entrada del fluido a la caldera sea más elevada. Para este ciclo regenerativo se utiliza calentadores de agua de alimentación abiertos o cerrados el cual ejercen la función de cámara de mezcla o intercambiar de calor que transfiere dicho calor a la salida de condensador respectivamente.

Figura 49. Esquema de un Ciclo Rankine con regeneración con calentador abierto

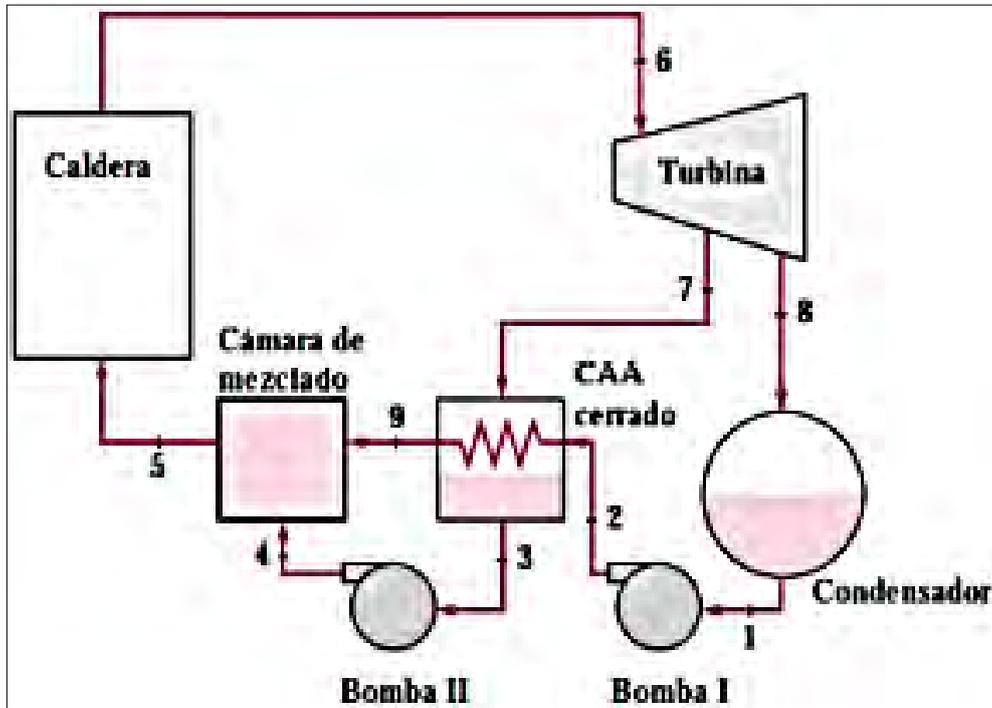


Fuente: Informa de Termodinámica-Universidad Politécnica de Valencia (Galindo Lucas José, pag.10)

En la **Figura 49**, en el ciclo Rankine con recalentamiento se va a realizar el calentamiento del agua que se encuentra a la salida de la bomba de condensado (BC) para introducirlo en un calentador (DA), en donde se mezclará el vapor extraído del recalentamiento a la salida de la turbina de alta presión (TAP) y el agua de condensación a la salida de la bomba del condensador (BC), por lo cual la temperatura a la salida del calentador estará superior a la temperatura del agua en estado normal de fase. Una vez calentada el agua ingresa a la bomba de alimentación de la caldera para elevar la presión hasta alcanzar el valor de presión de la caldera y con una temperatura mayor que a la salida de bomba del condensador. Cabe resaltar que tanto la incorporación de un calentador de agua de alimentación de tipo abierto o cerrado, ayudara al

rendimiento del ciclo Rankine ya que minimizara el calor imprescindible que ingresa al ciclo Rankine ideal.

Figura 50. Esquema de un ciclo Rankine con regeneración con calentador cerrado



Fuente: Informa de Termodinámica-Universidad Politécnica de Valencia (Galindo Lucas José)

2.5. EQUIPAMIENTO DE LA CENTRAL TÉRMICA DE RESIDUOS SOLIDOS

La caldera de recuperación de calor; HRSG (Heat Recovery Steam Generator) o también llamado generador de vapor el cual es el encargado de transformar el calor contenido en los gases de escape en energía potencial de su fase líquida en forma de vapor con una determinada presión y temperatura. Existen diferentes tipos de caldera para cada tipo de central, así mismo en un central de ciclo combinado se utilizará calderas y se elegirá ya sea por el tipo de caldera que presente y por el fabricante adecuado. Las principales características que distinguen una caldera de recuperación y una caldera de combustión convencional son las siguientes.

- La caldera de recuperación de calor se modela considerando las características propias de la turbina de gas al momento del ajuste.

- conservar la caída de pérdidas de carga va depender de la velocidad de paso de los gases ya que erradica que se necesitara la disposición de un mayor espacio de calentamiento para así obtener un coeficiente de transmisión en estado descendente.
- Al realizarse la divergencia y diferencias entre la temperatura de los gases y el método a realizarse el calentamiento de fluido es pésima, lo que ocasionaría sobre el modelamiento de economizador y evaporador.
- La principal diferencia es el mecanismo de transmisión de calor de una caldera en el instante de la combustión, al mostrar focos de temperatura a muy elevadas de un proceso de transferencia de calor de tipo radial, en cambio en una caldera de tipo generador de vapor de tipo convectivo, al decir que transporta el calor a una zona con diferente temperatura.

2.5.1. PARÁMETROS CARACTERÍSTICOS DE UNA CALDERA RECUPERADORA DE VAPOR

Los parámetros característicos más importantes que definen a un generador de vapor por recuperación de calor son:

1. **Tipos de caldera:** La clase de caldera recuperadora es imprescindible ya sea para su mejor optimización y rendimiento del ciclo combinado; pudiendo ser de tipos con o sin combustión, y en calderas horizontales o verticales.
2. **Caudal de vapor producido:** La cantidad de vapor en el calentamiento será importante para poder calcular y diseñar la turbina y el mismo generador de vapor.
3. **Presión y Temperatura del vapor producido:** El valor de la presión de baja, media y alta presión en la caldera calificara para poder determinar el valor de la temperatura de salida en el ciclo Rankine.

4. **Niveles de Presión:** Pudiendo ser de un, dos o tres niveles de presión dependiendo el valor de presión y temperatura que se desea mantener a la salida de la caldera de recuperación de calor.
5. **Pinch Point:** Llamado también punto de pellizco, que viene a ser la razón que difiere entre la temperatura del fluido gaseoso que se encuentra a la salida del evaporador y la temperatura del agua a la entrada del evaporador en la caldera recuperadora de calor. Este valor de la diferencia de temperaturas prioriza y facilita para el incremento de la eficiencia de la caldera ya que cuanto menor sea el valor mayor será su eficiencia y por lo tanto el área de calentamiento del fluido será mayor cuyo valor optima varía entre los 5°C a 30°C en valores reales de un ciclo Rankine real
6. **Approach point:** Se define como el punto de aproximación en la razón de la diferencia de la temperatura de agua de la salida del economizador entre la temperatura de saturación del agua a la presión de trabajo. Este intervalo de diferencia ayuda al protocolo de seguridad al prevenir en caso se realiza la evaporación en el economizador, cuyo valor variara al nivel de presión de trabajo en la caldera, con un intervalo del valor de la temperatura de 5°C a 20°C. Sin embargo, tener rangos de temperaturas bajos perjudicaría en la generación de vapor y por ende la superficie de transferencia sería mayor.
7. **Superficie de calefacción:** Es el espacio donde se da lugar al intercambio de calor de la caldera recuperadora de calor del ciclo Rankine.

2.5.2. ELEMENTOS QUE CONFORMAN UNA CALDERA DE RECUPERACIÓN DE CALOR

En el interior de la caldera de recuperación de calor existen componentes que constituyen la generación de vapor, las cuales son:

- **Desgasificador:** Tiene la función de suprimir los gases disueltos en el sistema de agua de alimentación, ya que gases con otras propiedades podrían provocar el desgaste.
- **Tanque de agua de alimentación:** Es el embalse; lugar de acopio de agua que será fuente de suministro para el sistema del ciclo correspondiente, ya que eliminara y librara de sustancias nocivas en el interior del sistema que ocasionarían interceptar y obstaculizar estas sustancias en los ductos, tuberías que posteriormente habría un desgaste o erosión en estas.
- **Calderín:** Es el espacio o depósito de separación de vapor de una mezcla agua-vapor donde se suministra el agua para abastecer el evaporador y el sobrecalentador de la caldera recuperadora de calor, teniendo siempre en cuenta el nivel de presión ya sea baja, media o alta con que se trabaje.
- **Bomba de alimentación:** Tiene la función de bombear o succionar el agua desde el tanque de suministro o alimentación de agua a su calderín respectivo.

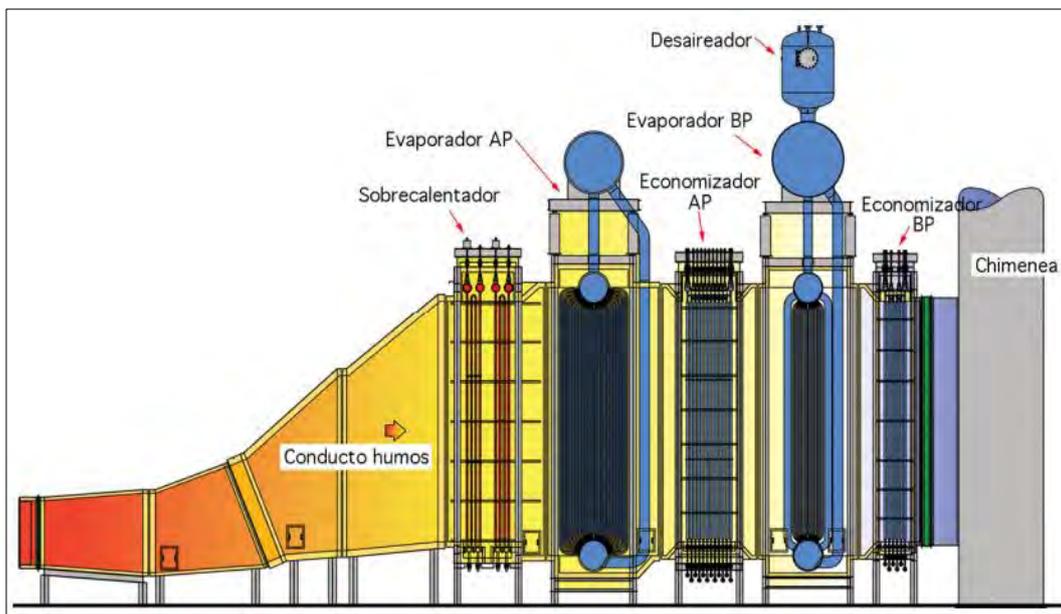
Dentro de los elementos que conforman el proceso de calentamiento, existe la presencia de 3 fraccionamientos de punto de ebullición:

- I. **Economizador:** Son intercambiadores de trasferen calor el cual sirve para calentar el líquido del agua de alimentación en condiciones subenfriado hasta condiciones de saturación hasta su temperatura en ebullición. Normalmente se encuentran a la salida de la caldera e ingresar a la chimenea de refrigeración.
- II. **Evaporador:** Espacio intercambiador el cual se produce la transición de fase del fluido de trabajo del agua en líquido evaporado del vapor, donde a través de los ductos vaporizadores se realiza la transformación de fase; mediante los tubos de salida y los tubos de alimentación que forman parte de los vaporizadores, podrían

instalarse uno, dos o tres vaporizadores dependiendo el nivel de presión que se necesite para luego ser devuelto al calderín.

- III. **Sobrecalentador:** También Es un intercambiador con un conjunto de ductos o haces de tubos, el cual eleva la temperatura a una máxima que se vaporizado en el evaporador, recibiendo vapor del calderín.
- IV. **Recalentador:** Este tipo de intercambiador va ajustaba al sobrecalentador, normalmente no presenta las secciones de ductos o haces tubulares ya que el calentamiento ejercido al separar el vapor a la salida de la turbina se volverá a realizar llegando a su temperatura máxima del proceso cabe mencionar que están distribuidas compartiendo con el sobrecalentar las líneas tubulares.

Figura 51. Esquema de constituyentes de una caldera recuperadora de calor horizontal



Fuente: Informa de Termodinámica-Universidad Politécnica de Valencia (Galindo Lucas José)

2.5.3. CLASIFICACIÓN DE UNA CALDERA DE RECUPERACIÓN DE CALOR

Se tiene la clasificación de una caldera recuperadora de calor según la existencia de postcombustión, mencionadas a continuación:

2.5.3.1. CALDERA CON POSTCOMBUSTIÓN

Proceso el cual aprovechando el caudal abundante de oxígeno producto de los gases caliente a la salida de la turbina se reutilizada con una segunda combustión para generar mayor vapor por tanto aumenta la temperatura sin exceder el límite de la temperatura, generalmente no sobrepasan del 800°C.

2.5.3.2. CALDERA SIN POSTCOMBUSTIÓN

Este proceso de transmisión de calor es por convección, es decir que el intercambio de calor se realiza dirigida hacia una zona o superficie frente al fluido a una temperatura diferente.

I. POR EL TIPO DE CIRCULACIÓN DE AGUA:

2.5.3.3. CALDERA CON CIRCULACIÓN NATURAL

Teniendo como circulación la presencia de fenómenos naturales cuando la circulación del fluido del agua naturalmente a causa del efecto térmica es decir de la diferencia de densidades entre el fluido en condiciones frías y la combinación de mezcla del agua-vapor. Normalmente se utiliza en generadores de vapor de una alta potencia cabe resaltar que en circulación natural no se presencia la utilización de bombas de alta presión para utilización del fluido del agua.

2.5.3.4. CALDERA CON CIRCULACIÓN FORZADA

A diferencia de la circulación natural, el manejo del fluido en las diferencias de densidades de intercambios y procesos de subida y bajadas se realiza mediante bombas de empuje de fluidos en la vaporización que transcurre a través del banco de haces tubulares que se encuentran paralelo uno de otro, este proceso de bombeo no se encierra en una circulación cerrada, ya que el líquido vaporizado es expulsado hacia la salida exterior de la caldera.

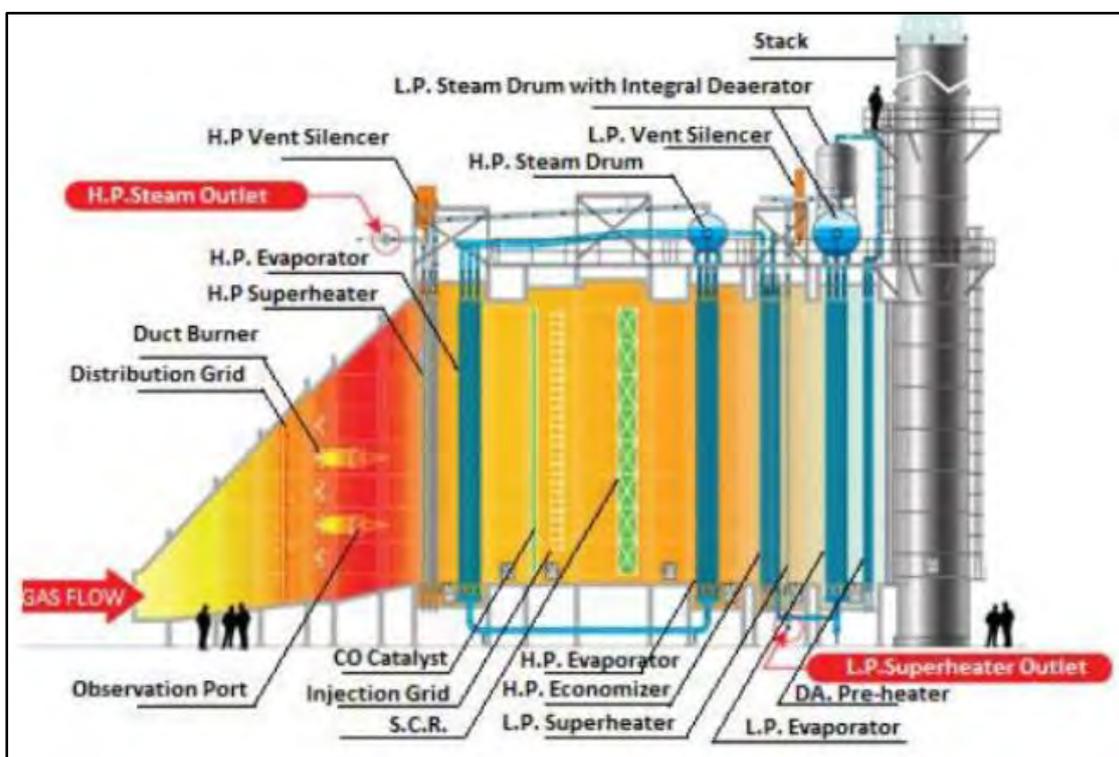
II. POR SU DISPOSICIÓN SE CLASIFICAN:

2.5.3.5. CALDERA DE RECUPERACIÓN DE CALOR HORIZONTAL

El fluido gaseoso toma un desplazamiento horizontal comenzando desde el ingreso de gas caliente a la salida de la turbina ingresando con dirección hasta la chimenea pasando por los

procesos de calentamiento y evaporación. Normalmente la instalación de los ductos o conductos están en posición vertical, lo que favorece en la circulación natural ayudando en el instante de la diferencia de densidades del fluido de agua ascendente y la combinación de agua-vapor que ingre descendentemente. Este tipo de caldera es más resistente a cambios de temperatura interiormente como exteriormente por tanto su estructura de apoyo es consistente que constará de poco material para su instalación, no obstante, en casos de una fractura en los conductos o tubos, será complicado realizar un mantenimiento instantáneo e inaccesible

Figura 52. Esquema de una caldera Horizontal



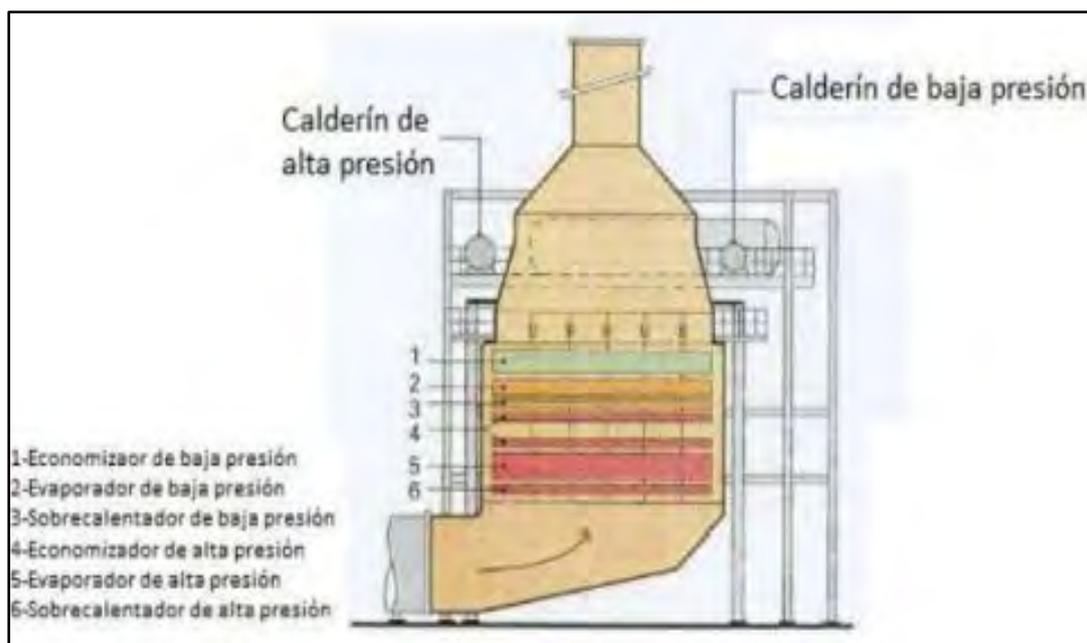
Fuente: Tesis sobre la Optimización de una caldera recuperadora de gases (Enrique B.P- Madrid 2015)

2.5.3.6. CALDERA DE RECUPERACIÓN DE CALOR VERTICAL

Este tipo de calderas tienen la posición en sentido vertical, conformada con un banco de haces tubulares en posición horizontal de manera que posicione el equilibrio de los materiales de circulación de fluido agua-vapor. Están instaladas con estructuras que soporten el peso de los calderines, secciones tubulares que presenta en la caldera, así mismo facilita en la dilatación

de los haces tubulares al no estar sujeta al exceso de intercambio de calor y presentar una tensión o estrés térmico. La forma de los haces tubulares colocados ayuda en el mantenimiento de la caldera en caso sea necesario. La circulación natural y forzada son propias de este tipo de calderas verticales, ya que es necesario tener la diferencia de densidades que se encuentra en los tubos horizontales de bajada y los tubos a la salida del evaporador para lo cual se tendrá que desplazar a los calderines en otra posición. Estos ductos o secciones de haz de ductos están cubiertos con aislamiento cerámico permitiendo la protección ante fluidos y procesos de calentamiento e intercambio de calor; estas características de los haces tubulares también predominan en las calderas horizontales con la subida y bajada de fluidos.

Figura 53. Esquema de una caldera de calor vertical



Fuente: Tesis sobre la Optimización de una caldera recuperadora de gases (Enrique B.P- Madrid 2015)

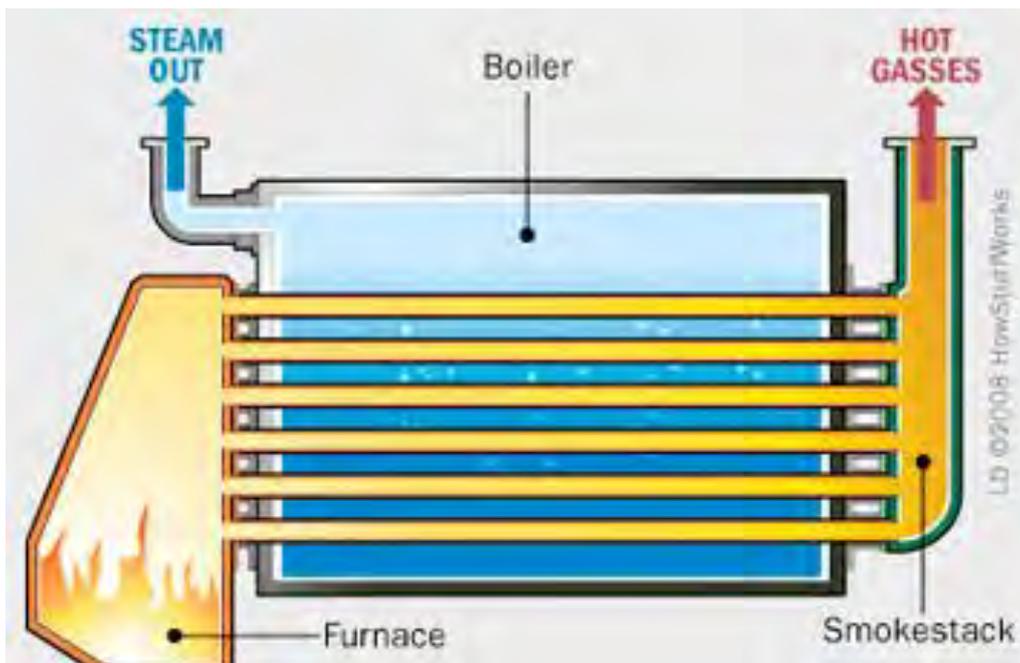
III. POR EL TIPO DE FUNCIONAMIENTO:

2.5.3.7. CALDERAS PIROTUBULARES

Al producirse el gas de combustión en el quemador circula por las secciones tubulares este fluido gaseoso bordeado alrededor de agua, cabe mencionar que estos bancos de tubos son denominados tubos de humos al circular el humo por el interior de los ductos o tubos

sometiendo su calor liberado al agua que se encuentra alrededor de los haces tubulares y de esa manera intercambiando calor de los gases de combustión con el agua. Este tipo de calderas pirotubulares trabajan hasta 30 bares con temperaturas de hasta 300°C de un vapor sobrecalentado y la utilidad de caudal producida abarca el valor de 55Tn/Hr.

Figura 54. Esquema de una caldera pirotubular

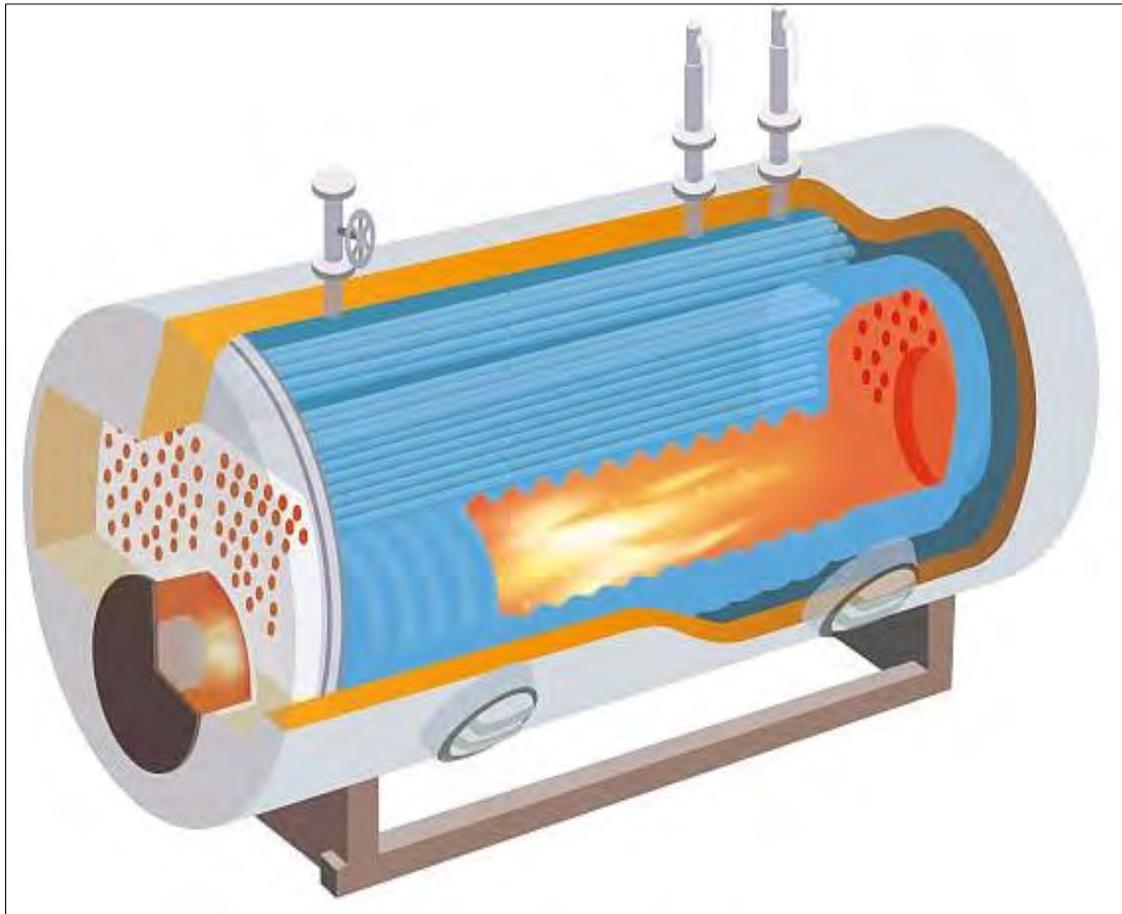


Fuente: <https://www.eisa.cl/esquema-caldera-pirotubular> (Energías Industriales)

2.5.3.8. CALDERAS ACUOTUBULARES

A diferencia de las calderas pirotubulares, este tipo de calderas la circulación que presentan, es mediante el paso del agua por el interior de los haces tubulares y los humos o gases producto de la combustión a la entrada de las calderas se encuentran rodeando a las secciones tubulares al exterior de ellas. La distribución de los calderines que se colocan, son puestas en cada extrema de los haces tubulares; el extremo caliente e cual es evaporada el agua y sube rápidamente por la menor densidad que predomina con el agua y el extremo frio, para la separación de mezclas del agua y vapor. Son calderas industriales que contiene la capacidad de albergar hasta 350 bares de presión a 600 ° C y una producción de 2000Tm/Hr.

Figura 55. Esquema de caldera acuotubular



Fuente: Características de la caldera-2014(<https://slideplayer.es>)

La configuración de la caldera es contracorrientes, donde los gases se enfrían circulando de arriba hacia abajo, mientras que el agua se calienta circulando de abajo hacia arriba, de esta manera el intercambio de calor es más óptimo. El intercambio de calor será plasmado en la variación de un diagrama de temperatura respecto a la longitud esta cambia conforme a una evolución de la temperatura de los gases a lo largo de la caldera recuperadora circulando en un sentido directo y el agua en sentido inverso.

2.5.4. CONFIGURACIÓN EN EL NIVEL DE PRESIÓN DE UNA CALDERA RECUPERADORA DE CALOR

Para el aprovechamiento de una adecuada instalación y su optimización de la caldera recuperadora de calor, es conveniente la relevancia de configuraciones en los niveles de presión

en diferentes tipos de calderas y para cada diferente tipo de finalidad, como en este caso especial será imprescindible para el incremento del rendimiento con su adecuado diseño de la caldera recuperadora de calor, es por eso que se tiene tres niveles de presión los cuales según (Inmaculada Fernandez Diego, pág. 45):

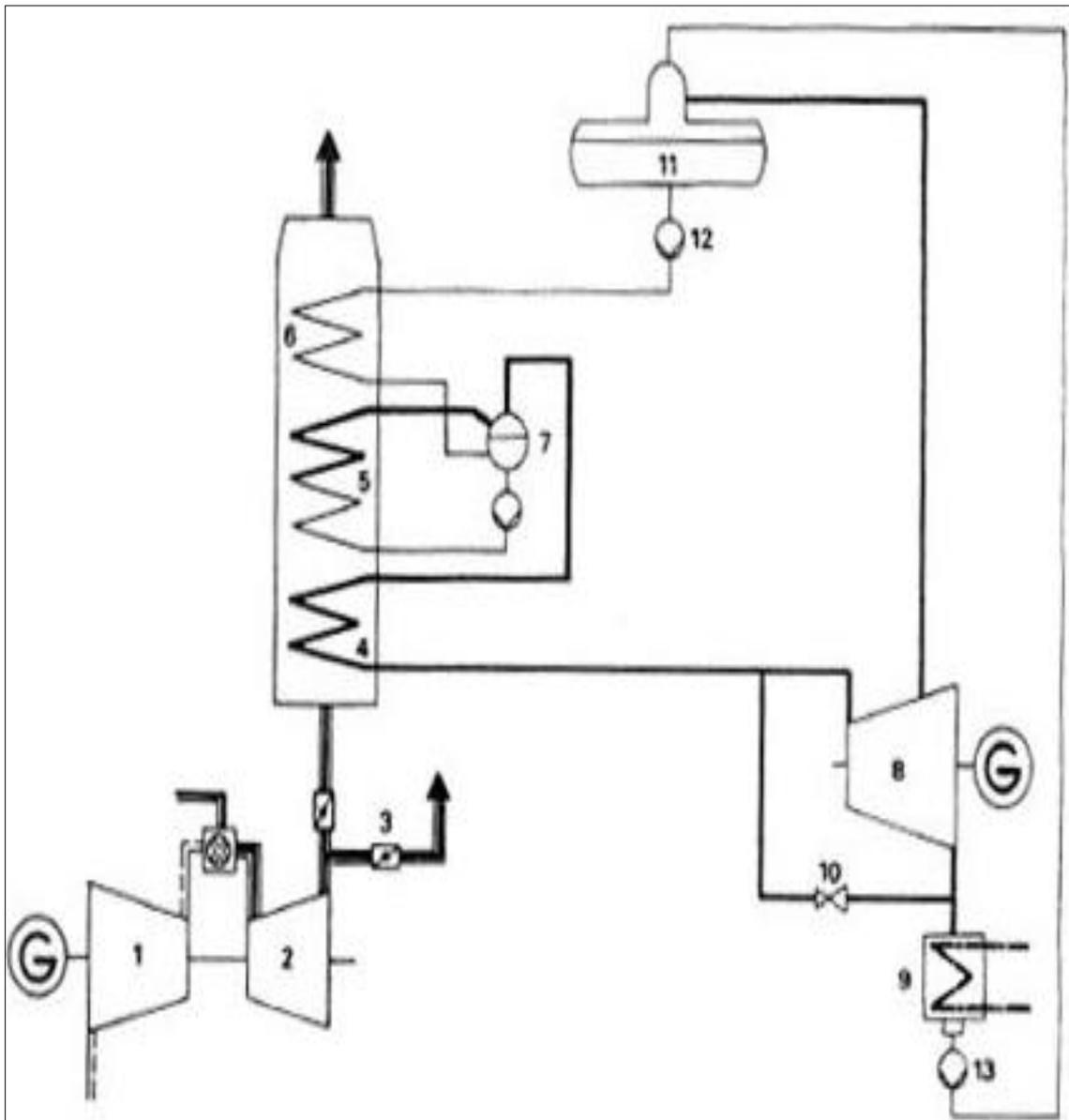
- I. VAPOR DE ALTA PRESIÓN:** Donde tiene presenta una alta presión en la caldera, donde no varía de los 120 bares con una temperatura desde los 320°C hasta 570°C.
- II. VAPOR DE MEDIA PRESIÓN:** Este valor de presión varía alrededor de los 25 bares con una temperatura de 230°C a 570°C.
- III. VAPOR DE BAJA PRESIÓN:** Con 4 bar de valor de presión y una temperatura de 150°C.

Esta configuración de niveles de presiones está dispuesta en la caldera recuperadora de calor y considerados en todo el proceso del ciclo combinado durante el ciclo agua-vapor. Estos niveles de presiones se denotan en el sobrecalentamiento de la caldera ya que atravesará el fluido de agua por los haces tubulares donde cada nivel de presión estará independientemente en un proceso de intercambio de calor. Así mismo se tiene configuraciones por la cantidad de nivel de presión el cual se presenta a continuación:

2.5.4.1. CALDERA DE UN SOLO NIVEL DE PRESIÓN

Las calderas de un solo nivel de presión es el más simple, donde la instalación de un ciclo agua-vapor en el proceso de precalentamiento, vaporización y sobrecalentamiento, trabajan con un número limitado de componentes para el sobrecalentamiento y evaporación del fluido, es por eso que están constituidos por: una caldera con sobrecalentador, economizador y evaporador obteniendo el vapor requerido con un solo valor adecuado de presión.

Figura 56. Ciclo Combinado de gas-vapor de un nivel de presión



Fuente: Caldera de recuperación de vapor (<http://opex-energy.com/ciclos>)

Como se muestra en el ciclo gas-vapor, en el proceso de calentamiento de la caldera existe solo un nivel de presión para un sobrecalentador (4), evaporador (5) y economizador (6) y un calderín (7) ya que la presión determinada que se necesita para el trabajo a la salida de la caldera. Una presión elevada refleja en un incremento también de la temperatura esto ayudaría para la generación de vapor sin embargo esta alta presión provocaría en la humedad que llegaría a la turbina de vapor, teniendo como consecuencia la corrosión y desgaste de los alabes donde

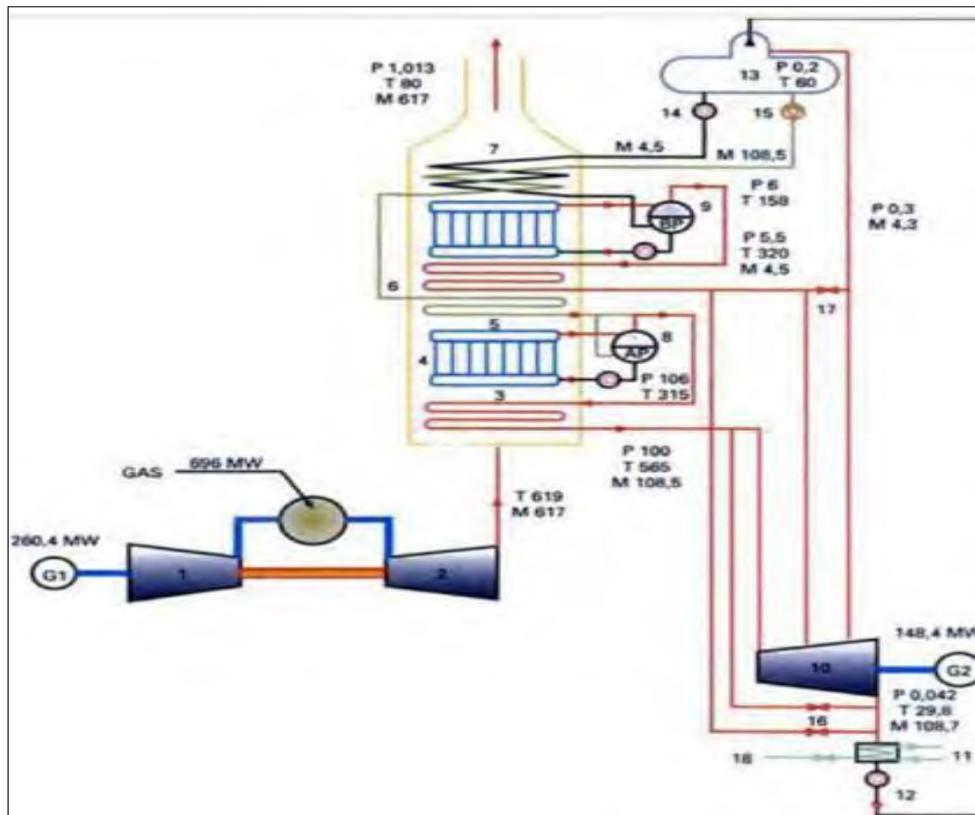
afectaría a la vida útil de la turbina de vapor, es por eso que no debe superar el 16% de humedad en la turbina.

- I. **PRESIÓN DEL VAPOR:** La presión en un solo nivel esta dado un parámetro indispensable en la caldera para la optimización y rendimiento de la turbina de vapor del ciclo gas-vapor. La temperatura de salida de la turbina de gas debe tener un margen donde no exceda el 25°C para su adecuado aprovechamiento, así como también el valor de la presión en el condensador que tiene como límite 0.04 bar y contenido máximo permitido de humedad encontrado en la etapa final de la turbina de vapor es de 16 al 18%. (Sadubal Garcia S. & Gomez Moñux F., 2006)
- II. **TEMPERATURA DEL VAPOR:** El valor de la temperatura máxima admisible el cual puede tomar en la caldera recuperadora tiene que ser menor o igual que el de los gases calientes de la entrada al ciclo gas-vapor con un valor de 25°C, considerando que la expansión o salto térmico en la turbina de vapor tendrá mejor equilibrio con el valor de temperatura determinada. No obstante, durante expansión térmica o salto dependerá de la temperatura de vapor al momento de incrementarse por la disminución del caudal de vapor. (Sadubal Garcia S. & Gomez Moñux F., 2006)

2.5.4.2. CALDERA DE DOS NIVELES DE PRESIÓN

Esta caldera trabaja con dos tipos de nivel de presión, donde como parámetros característicos tiene equipos en la producción de vapor, como son: La bomba para cada nivel de presión, economizador, evaporador y sobrecalentadores para cada nivel de alta y baja presión.

Figura 57. Esquema de un Ciclo Combinado con un ciclo gas-vapor de dos niveles de presión



Fuente: Libro de Centrales Térmicas de Ciclo Combinado-Sabudal García Gómez Monux (España-2006)

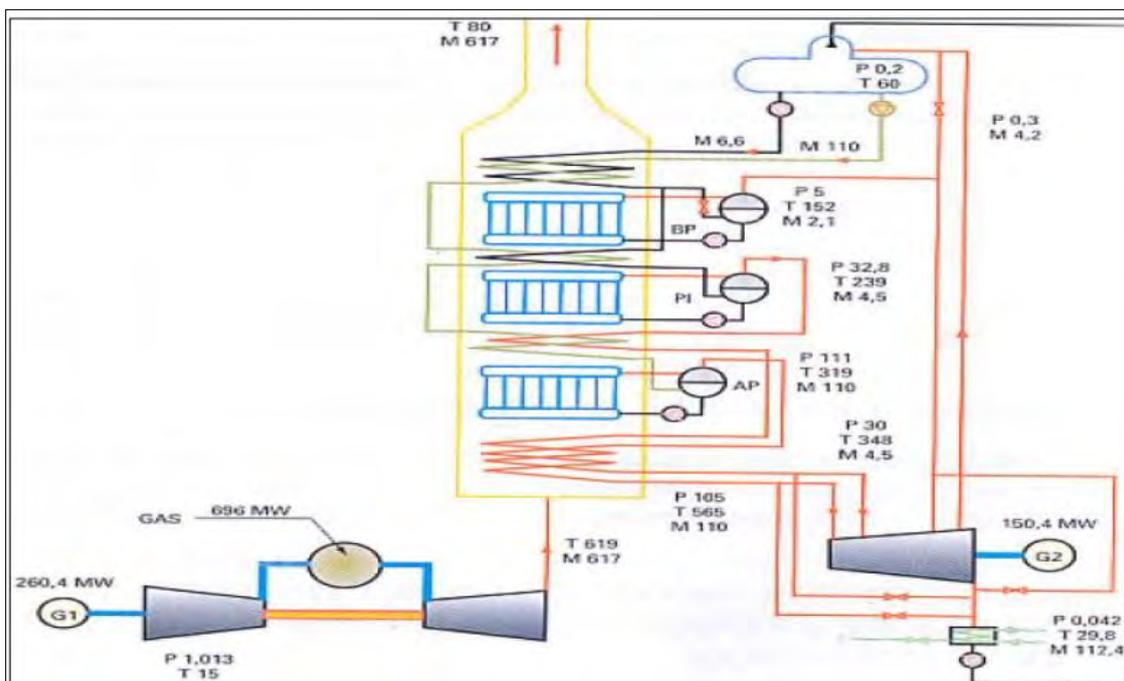
Como se aprecia en la **Figura 57**, en el proceso de recuperación de calor en la caldera, existe la utilización de dos tipos de intercambiadores de calor para cada nivel de presión con economizador de alta presión (5), economizador de baja presión (7), evaporadores de alta presión (4), evaporadores de baja presión, sobrecalentadores de alta presión (3), sobrecalentadores de baja presión (6), calderín de alta presión (8) y calderín de baja presión (9). En este sistema de recuperación de vapor con una incorporación de un nivel de presión más; se tiene que considerar una presión elevada para así tener como resultado un rendimiento exérgico, logrado del potencial de trabajo útil aprovechado de los gases calientes de escape del sistema, sin embargo, obtener una presión baja también ayudaría a equilibrar utilidad exérgica y energética del sistema en el proceso de evaporación. Al momento de seleccionar el valor de la presión debe de ser de 3 a 5 bar esto significa un valore de presión menor y así

poder mejorar en el rendimiento del sistema de recuperación con una potencia de salida óptima. Es por eso que se seleccionara para el diseño de una caldera una presión de vapor de un alto nivel de presión en 100bares y la baja de 5bar. (Sadubal Garcia S. & Gomez Moñux F., 2006)

2.5.4.3. CALDERA DE TRES NIVELES DE PRESIÓN

Teniendo tres niveles de presión se podrá recuperar más la energía aprovechada de los gases calientes de escape, el calor contenido y así mejorar e incrementar en la eficiencia de la turbina de vapor. Para contemplar un sistema equilibrado en una caldera de tres niveles será óptimo que la temperatura de los gases de escape se minimice ya que, al tener una presión alta, intermedia y baja generará más vapor con más espacio de intercambio de calor.

Figura 58. Esquema de un Ciclo Combinado con un ciclo gas-vapor de tres niveles de presión



Fuente: Libro de Centrales Térmicas de Ciclo Combinado-Sadubal García Gómez Monux (España-2006)

Para tener un sistema equilibrado de presión y temperatura a la salida de turbina de vapor será necesario un nivel de baja presión donde la presión a la salida compensará la pequeña disminución de presión intermedia y de alta. Es decir, se dos casos en donde dependerá de la temperatura de entrada del ciclo gas-vapor, si estos gases calientes de salida de la turbina de

gas tienen una temperatura alta se obtendrá a mayor trabajo por el hecho de generar más vapor; sin embargo, si se tiene una temperatura menor en los gases, la recuperación de calor en la temperatura será la función del nivel de presión intermedia para poder equilibrarlo. La diferencia entre estos dos niveles de presión no variara a gran tamaño es por eso que se acostumbran a modelar ciclo combinado con temperaturas menores a 600°C con dos niveles de presión.

2.5.4.4. CALDERA DE TRES NIVELES DE PRESIÓN CON RECALENTAMIENTO EN UN CICLO COMBINADO

Este tipo de configuración en la caldera es importante para su aprovechamiento de vapor en la turbina de vapor ya que reflejara el rendimiento con la que la turbina trabaje, puesto que la humedad en las cucharas, alabes de esta turbina, ocasionaría la corrosión y deficiencia del ciclo gas-vapor. Por consiguiente, es recomendable utilizar el recalentamiento, donde después de haberse realizado la expansión del fluido en alta presión en la turbina de vapor nuevamente al proceso de sobrecalentamiento, pero el nivel de presión intermedia para poder luego expandirse en la segunda etapa de la turbina de vapor. En el sobrecalentador existe una combinación de fluidos del vapor expandido y parte del vapor sobrecalentado de alta presión, es así que el rendimiento aumentara por la diferencia de temperatura en comparación con la temperatura sin recalentamiento. (Sadubal Garcia S. & Gomez Moñux F., 2006)

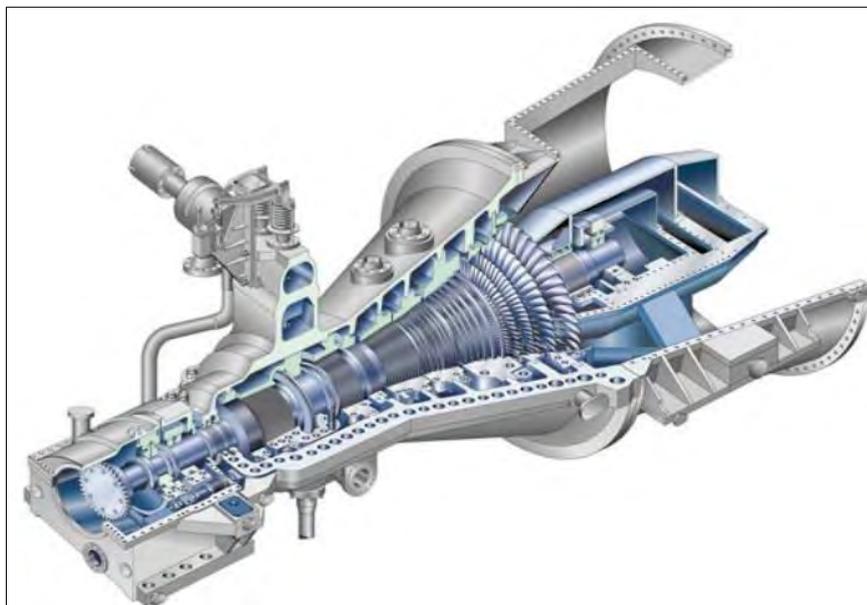
2.5.5. TURBINA DE VAPOR

Se dice aquella maquina térmica o turbomáquina que utiliza el fluido del vapor generador en la caldera y liberar la energía calorífica térmica para poder mover los alabes de la turbina y generar energía mecánica de rotación en los alabes para luego mediante el alternador o generador eléctrica producir energía eléctrica. Forma parte de ciclo Rankine de vapor en condiciones de presión y temperatura alta. A diferencia de una turbina de vapor convencional, las turbinas de vapor en un ciclo combinado al, estas turbinas de vapor tienen un menor tiempo

de encendido, también son de menor tamaño y por consiguiente de una potencia baja o menor al trabajar a un nivel de potencia de vapor bajo, puesto que la caldera de recuperación de calor trabaja con una temperatura baja. (Condo, 2014, pág. 60)

Normalmente existen valores de parámetros aproximados donde la presión y temperatura varían de 100 a 170bar y 520 a 570°C respectivamente. Como se sabe si se desea una turbina con valores específicos de presión y temperatura la empresa fabricante se encargará de este criterio. (Condo, 2014)

Figura 59. Turbina de vapor



Fuente: Tesis de Estudio Termodinámico de una planta de Ciclo Combinado-Carlos Daniel Martin Díaz (España-2015)

La turbina de vapor se constituye por dos partes esenciales de las turbomáquinas los cuales son:

- I. **ROTOR:** Parte móvil donde se encuentra los alabes móviles, también denominado rodete, el cual está constituida por una rueda de paletas o alabes que están unidas a un eje.
- II. **ESTATOR:** Parte estática posee alabes estáticos que constituyen a la turbina, sin embargo, no están unidas a eje, están unidas a la carcasa de la turbina de vapor.

Así mismo también existen partes secundarios de apoyo que ayudan a la generación de energía eléctrica a partir del vapor.

- III. VÁLVULA DE REGULACIÓN:** Ajusta la cantidad de vapor que ingresa a la turbina, esta válvula puede ser dirigida en funcionamiento por medio de un grupo de presión de aceite o presión de aire (hidráulica y neumática) ya sea motor eléctrico, motor hidráulico o un motor neumático. Habitualmente se utiliza aceite para su accionamiento de un sistema de control de vapor.
- IV. CARCASA:** Esta carcasa tiene como función evitar la salida y contener el vapor para el aprovechamiento de la energía y su rendimiento.
- V. COJINETES:** Existe los cojinetes de apoyo donde, ayuda a realizar el giro de roto y medio de suspensión en el eje que se encuentra, como también el cojinete de empuje donde obstaculiza el desplazamiento del rotor en sentido del eje.

2.5.6. CLASIFICACIÓN DE LA TURBINA DE VAPOR

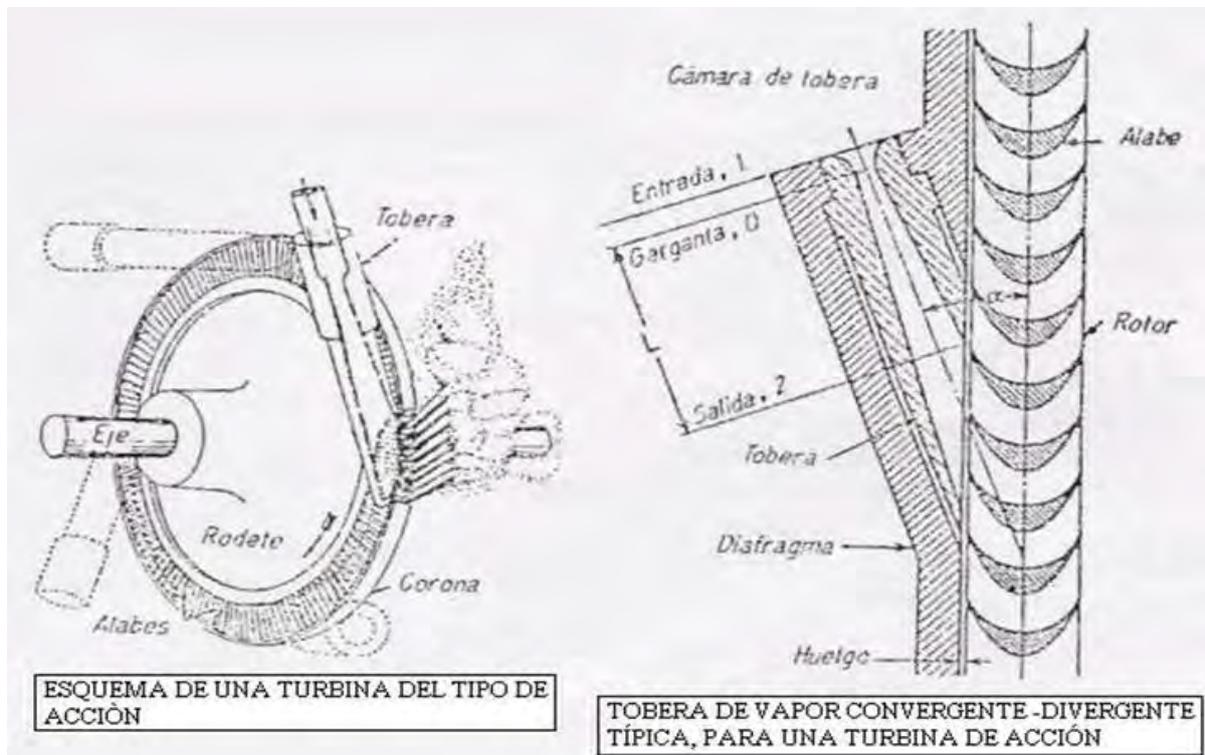
Existe diferentes tipos de turbina de vapor, unidades de menor tamaño, así como de gran tamaño. Turbinas de vapor desde 1HP (0,75kW) hasta 2000000 HP (1500MW); así mismo se tiene tipos de turbinas modernas para que circunstancia.

Según la forma o el modo de conversión de energía contenida en el vapor:

2.5.6.1. TURBINA DE ACCIÓN

La transformación de energía ocurre en los alabes fijos de la turbina de vapor como también choca con la tobera de inyección que se encuentra en los primeros escalonamientos de la turbina para ganar velocidad y para luego hacer girar el rotor juntamente girando con el eje al que está unido. En las turbinas de acción normalmente esta formadas por varias etapas conforme van perdiendo presión hasta llegar a la salida de esta.

Figura 60. Partes y estructuración de una turbina de acción y reacción

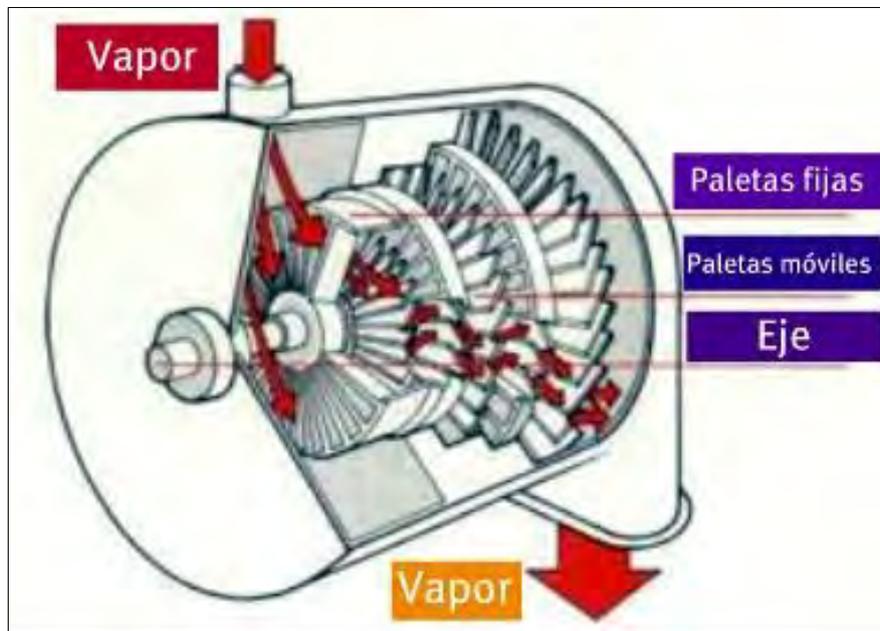


Fuente; Informe de Maquinas Térmicas, hidráulicas y de fluidos (<https://slideplayer.es/>)

2.5.6.2. TURBINA DE REACCIÓN

La transformación de la energía térmica contenida lo realiza mediante los alabes móviles y alabes fijos, los alabes fijos están puestas de manera que por cada par existe una boquilla al transcurrir el vapor para su expansión, para su debido empuje y sea impulsada por el valor diferente de presión que se obtiene en el rotor, poco a poco va perdiendo presión al chocar y discurrir en la rueda de alabes móvil, esta disminución de presión pasa de etapa en etapa normalmente en las tobera instaladas, teniendo como resultado la velocidad producto del vapor aprovechándolo en la acción de los alabes que sea posible y orientados mediante enderezadores que guía y reforma para poder ingresar a la siguiente etapa de la turbina de vapor.

Figura 61. Partes y estructuración de una turbina de reacción



Fuente: Informe de turbinas de reacción pura, Colombia-2012(<https://benitosacalugarodriguez.blogspot.com>)

Según el número de etapas dispuestos para su aprovechamiento energético:

2.5.6.3. TURBINA MONOETAPA

Las turbinas monoetapas son propias de turbinas de pequeña y mediana potencia, con valores de hasta 2MW de potencia, con algunas características al ser más hostiles y robustos.

2.5.6.4. TURBINA MULTIETAPA

Están provistas de varias etapas a diferencia de una monoetapa. Estas turbinas son de mayor potencia debido a la alta demanda, aprovechando su característica del uso de los escalonamientos en el rotor que gira perdiendo velocidad, así mismo la velocidad de las alabes conserva su valor similar al vapor del chorro del vapor, como una turbina de mayor rendimiento en comparación con la monoetapas aspira mayor cantidad de presión del vapor en la expansión. Según la dirección de flujo en el rotor.

2.5.6.5. TURBINA DE FLUJO AXIAL

Existe la presencia de un cono que encamina el vapor que coincide en una misma dirección al eje.

2.5.6.6. TURBINA DE FLUJO RADIAL

La dirección del flujo es perpendicular al eje de la turbina al encaminar la transmisión de vapor según la presión de vapor de salida.

2.5.6.7. TURBINA DE CONTRAPRESIÓN

La presión superior de vapor superior a la atmosfera a la salida de la turbina es reutilizada en un proceso térmico luego de un resultado de agua sobrecalentada después de la condensación como un procedimiento posterior. (Energiza.org, 2011)

2.5.6.8. TURBINA DE CONDENSACIÓN

En este tipo de turbina el rendimiento energético que surge es superior en comparación con la turbina de contrapresión ya que la presión de vapor a salida de la turbina es baja con respecto a la atmosfera, también es reutilizado el agua condensada en agua de alimentación. (Energiza.org, 2011)

2.5.6.9. TURBINA DE ESCAPE LIBRE

La característica de esta turbina reside en la expulsión del fluido del vapor a la atmosfera. No es recomendado para un aprovechamiento cogenerativo, al malgastar el vapor para generar energía con algún proceso de calentamiento. (Energiza.org, 2011)

2.5.6.10. TURBINA CON O SIN EXTRACCIÓN

Se succiona mediante la extracción de la corriente de vapor en etapas intermedias de las turbinas de vapor antes de llegar a la salida, ya sea para aprovechamientos de otros procesos adversos. (Energiza.org, 2011)

2.5.7. EFICIENCIA DE UNA TURBINA DE VAPOR

La eficiencia de las turbinas de vapor está dada por la expansión o salto entálpico que se produce en el interior de la turbina de vapor proveniente de la caldera recuperadora de calor.

Definida como la siguiente ecuación:

$$\eta_{TV} = \frac{W_T - W_B}{Q_C} = \frac{m_V(h_3 - h_4) - m_V(h_2 - h_1)}{Q_C} \quad (2.40)$$

Donde:

η_{TTV} = Rendimiento térmico de la turbina de vapor

Q_C = Calor que circula por el ciclo a través de los haces tubulares de la caldera

W_T =Potencia generada en el proceso de expansión en la turbina de vapor

W_B = Potencia necesaria para el bombeo del fluido

m_V = Mas de vapor que transcurre en el ciclo

h_1 = Entalpia a la salida del condensador

h_2 = Entalpia a la entrada de la caldera recuperadora de calor

h_3 =Entalpia a la entrada dl cuerpo de turbinas

h_4 =Entalpia a la salida del cuerpo de turbinas

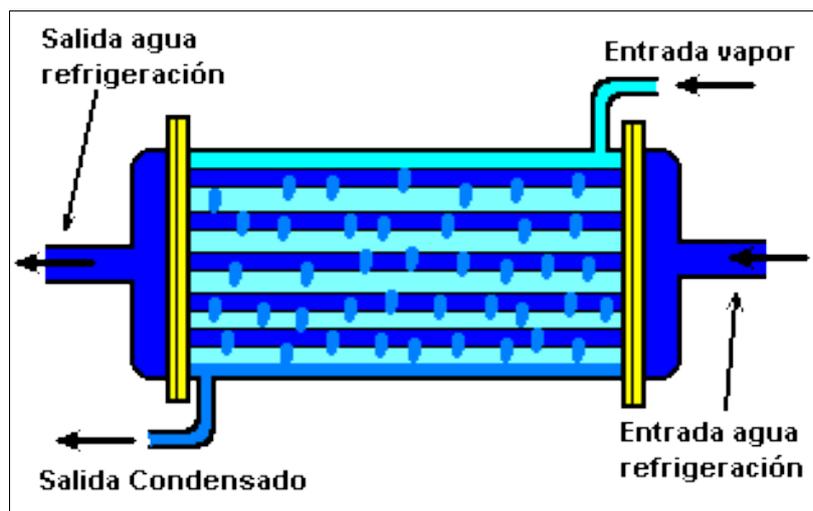
Cabe mencionar que el valor del rendimiento de una turbina de vapor no difiere del rendimiento de una turbina de gas, ya que el factor de potencia solo varia en el trabajo de compresión de la turbina de gas con el bombeo de la turbina de vapor en términos generalizada en la formula. Este rendimiento de la turbina de vapor dependerá de la cantidad de caudal de vapor que sea suministrado en el instante de la expansión, ya que también dependerá el área de la boquilla del estator para producirse la diferencia de presión y temperatura con el rodete y ganar

velocidad. Es por eso que cumplen un aspecto fundamental en cuanto al nivel de presiones que existe en la turbina de vapor.

2.5.8. CONDENSADOR DE UN CICLO DE VAPOR

Es denominado sumidero de vapor, es el condensador de ciclo vapor, tiene la función de intercambiar los fluidos térmicamente de calor, cuyos fluidos transforma de su fase de vapor a su fase líquida, donde extrae el calor latente contenida en el fluido gaseoso, tiene como objetivo realizar el cambio de fase o condensar a la salida de la turbina de vapor para aprovechar y maximizar el rendimiento obtenido y para luego regresar a la caldera con el fluido líquido en condiciones de evaporación.

Figura 62. Condensador de haces tubulares de un ciclo agua-vapor



Fuente: Informe de Termodinámica FIEEE (<http://termoindustrial1ii132.blogspot.com>)

Como todo condensador en un ciclo combinado para el proceso de condensación se necesita la forma de refrigeración para su transformación en el proceso de condensación, los cuales pueden ser:

1. **AEROCONDENSADORES:** Estos equipos de ventilación mediante el uso de un ventilador que utiliza el aire que refrigerar el fluido de vapor y convierten en fluido líquido al ceder el calor de agua para su refrigeración. Este tipo de condensación se

realiza cuando no se dispone del agua necesaria para poder abastecer la torre de refrigeración, así mismo afecta al rendimiento del ciclo agua-vapor en un porcentaje de pérdida en su eficiencia. En el ciclo combinado la instalación de aerocondensadores implica en los costos altos que estos presentan a diferencia de los condensadores con su refrigeración hídrica. (Garrido, Condensador-Ciclo agua-vapor de una central termoelectrica)

2. **CONDENSACIÓN POR MEDIO DEL AGUA:** El proceso de condensación se emplea por medios hídricos como son los mares, ríos, lagos o embalses, etc. Para poder refrigerar y transformar el vapor, es imprescindible la utilización y ser abastecido de gran cantidad y almacenamiento de agua de donde será tomada el agua del embalse que ingresará al ciclo agua-vapor en condiciones frías luego de ser refrigerado mediante una bomba de condensado, que bombea al exterior y retorna respetivamente donde luego regresa al condensador. Para centrales térmicas de generación se emplea este tipo o forma de condensado, el cual cuando el agua sea mínima o se encuentre escaso, su refrigeración será sustituida por la torre de refrigeración (Garrido, Condensador-Ciclo agua-vapor de una central termoelectrica)

El proceso de condensación se realiza a causa de circunstancias de:

- I. La reutilización del vapor a la salida de la turbina de vapor siempre será imprescindible para el mejor aprovechamiento y la generación eléctrica.
- II. El rendimiento y la potencia de la turbina se incrementarán debido a la disminución de la presión de entrada, el proceso de cambio de presión también aumentara.
- III. En el instante del accionamiento de la bomba de agua, se realiza el incremento de la presión esto causa de la energía necesaria para realizar el

bombeo será pequeño comparando con los que necesitará para el funcionamiento de la caldera o de la turbina.

2.5.8.1. PARÁMETROS CARACTERÍSTICOS DE UN CONDENSADOR DE VAPOR

Como sistema de condensación del fluido de vapor que pierde al extraerle su calor latente contenido en el agua por medio del enfriamiento se da lugar a los parámetros característicos que presenta un condensador en un sistema de cambio de fase.

- I. TEMPERATURA:** La presión con la que trabaja el condensador será importante para poder conocer la temperatura del vapor con la que ingresa al condensador, donde la temperatura de entrada será el punto de vapor para el cambio de fase es decir la temperatura de saturación a una determinada presión, sin embargo, si la temperatura de saturación logra ingresar con un desbalance y exceso de temperatura será necesario que esta se reduzca.
- II. PRESIÓN:** El valor debe tener un rango de proximidad el cual tiene como referencia a la presión de vacío absoluto el cual vendría a ser cero para poder tener determina el valor de la presión real del condensador con respeto a este. Por lo tanto, debe ser menor a la presión atmosférica y más próxima al valor de la presión de referencia de vacío absoluta.
- III. FLUJO DE AGUA DE ENFRIAMIENTO:** La elevación o disminución de temperatura dependerá del fluido de trabajo del agua que pasa a través de los haces tubulares que se encuentra bajo condiciones de enfriamiento del sistema de refrigeración.
- IV. COEFICIENTE DE TRANSMISIÓN DE CALOR:** Este es un parámetro de diseño del condensador para poder satisfacer las necesidades de trabajo

del caudal de vapor. Consiste en la cantidad de energía calorífica que intercambiará el vapor con el agua de enfriamiento, para lo cual es indispensable conocer el espacio donde se efectuara el cambio de energía. Esta superficie de intercambio dependiendo del material el cual este fabricado será posible saber el valor del calor que producirá.

2.5.8.2. DESCRIPCIÓN CONSTRUCTIVA DE UN CONDENSADOR DE VAPOR

Existen las partes más significativas propios de un condensador sin embargo algunas partes constructivas varían de acuerdo al tipo de condensador, según su función, su forma y su posición presenten. Las secciones principales son:

- I. CARCAZA:** Es la parte que cubre al condensador cuyo espacio aloja en el interior los haces tubulares de condensación y que permanece cerrada permitiendo el almacenamiento del fluido convertido en líquido. Normalmente es de acero al carbón. (Wikipedia, 2020)
- II. TUBOS O SECCIÓN DE TUBOS:** Son los encargados de realizar el intercambio de agua y vapor la ubicación de los tubos es ubicados normalmente en forma vertical para poder extraer paralelamente la caída del vapor convertido en agua. (Casado, 2011, pág. 23)
- III. CUELLO:** Es el componente el cual es la forma de conexión o enlace de la salida de la turbina de vapor con el cuerpo del condensador. Esta unión consta de compensadores de dilatación con desplazamientos relativos que será sometida a presiones donde producirán deformaciones los cuales se tienen que evitar, así como también proporciona rigidez puesto que el material fabricado es de acero al carbono lo que le permite sus características. (Casado, 2011, pág. 18)

- IV. PLACAS DE TUBOS:** Están adheridas al proceso de soporte de los extremos de los tubos, al ser solo taladradas por los dos extremos al largo de los tubos, y perpendicular a ellos. Cumplen la función de fijación de los haces tubulares juntos con las de palca de soporte, instaladas a lo largo de estas mismas secciones. Establecen el muro de distanciamiento entre las cajas de agua y la zona de circulación de agua de enfriamiento. (Wikipedia, 2020)
- V. TUBOS:** Son los realizan la transformación térmica del fluido al intercambiar el calor del fluido de vapor a través de los haces tubulares dispuestas perpendicularmente al eje de la turbina. Comúnmente se producen algunos fallos en el proceso de circulación de agua, como las estocadas por la corrosión de los tubos debido a la elevada velocidad y circulada por los tubos, también la desunión de soldadura de los haces tubulares y de las placas de tubo causa d las vibraciones de fluido de circulación y otro deterioro de los haces tubulares. (Casado, 2011, pág. 23)
- VI. CAJAS DE AGUA:** Esta parte constructiva se presenta a los costados o extremos del condensador de la sección tubular o haces tubulares el cual tiene la función de distribuir el agua de enfriamiento en todas las áreas de los haces tubulares de intercambio, que circularan hasta la salida del condensador. Existen dos tipos según la función que cumplen en el condensador, ya sea las **cajas de agua de entrada-salida**, que son las que, al estar interconectados con la relación de entrada y salida del fluido de paso de agua, sin embargo, las **cajas de agua de retorno**, que presentan un sistema de retroceso o regreso del fluido de circulación. (Casado, 2011, pág. 21)
- VII. PLACAS SOPORTE:** Estas placas taladradas con la acción de sujeción de los haces tubulares al sostener la sección de tubos impuestas en cada tramo

del tubo hasta llegar al otro extremo. Su propósito de sostener los haces tubulares es la de evitar y prevenir las vibraciones en el interior de la carcasa al presentar los tubos una mayor longitud, el cual se tiene que evitar que se produzcan. (Wikipedia, 2020)

VIII. POZO CALIENTE O POZO DE CONDENSADO: Se ubica en la parte inferior del condensador, cuya función es almacenar el vapor condensado (agua) obtenido del proceso de enfriamiento-condensación. El depósito de condensado está provisto de una cierta cantidad de circunspección para poder contener y abastecer el sistema de bombeo y condensación de las bombas de extracción. Presenta un sumidero con mallas de filtro el cual expulsa y extrae el vapor condensado (agua), así como no permite que el fluido condensado vuelva al ciclo con suciedad o impurezas. En su interior está formado por riostras que elementos constructivos que posibilitan y aseguran la inmovilidad de los elementos que se disponen. (Casado, 2011, pág. 20)

2.5.8.3. CLASIFICACIÓN DE CONDENSADORES DE VAPOR

En las centrales térmicas se emplea dos tipos de condensadores, su incorporación al ciclo de agua-vapor ayuda a la recuperación del vapor convertido en agua para la alimentación de la caldera en un ciclo cerrado, por consiguiente, un incremento de la energía a la salida de la turbina al reducir o disminuirse la presión de salida. Se puede distinguir dos tipos de condensadores, según la presencia o no de contacto, mencionando a continuación:

a. CONDENSADOR DE MEZCLA

También denominado condensador de chorro, donde el agua generado producto de la condensación se une y mezclada al agua de circulación (enfriamiento) que atraviesa a través de los haces tubulares a una baja presión de escape luego es bombeada al exterior para la liberación de fluido

mezclado, en el transcurso o pasar del fluido de chorro se presenta las válvulas de rompe-vacíos, válvulas de evacuación de aire y agua. Este tipo de condensador de chorro tiene la facilidad de construcción al exigir menor espacio para su construcción, sin embargo, no se suelen utilizar este tipo de condensadores en centrales térmicas empleando turbinas de vapor de mayor capacidad ya que las pérdidas de condensado que genera son mayores. Cabe mencionar que luego de la mezcla de los dos fluidos de vapor condensado y agua de enfriamiento no son aprovechados (Javier, 2009, pág. 6)

b. CONDENSADOR DE SUPERFICIE

Principalmente se denominada al no presentar la mezcla de los dos fluidos de agua de enfriamiento y del vapor condensado a un pésimo valor de presión reducido cuya finalidad es la recuperación y aprovechamiento del vapor condensado, así mismo este tipo de condensadores son empleadas en centrales térmicas por su aprovechamiento del fluido mezclado-residual, el cual es recuperado en el sistema de evaporación de la caldera junto a una mayor eficiencia y confiabilidad en el ciclo agua-vapor. (Javier, 2009, pág. 13).

Según el número de pasos en la circulación del fluido:

c. CONDENSADOR DE UN PASO O DE PASO SIMPLE

Durante la circulación del agua de refrigeración por medio de los haces tubulares, solo ingresan o fluye una sola vez en un sentido de una única entrada y una única salida en cada cuerpo que se encuentra en el cuerpo o parte voluminosa del condensador. (Express) (Wikipedia, 2020)

d. CONDENSADOR DE DOBLE PASO O DE PASO MÚLTIPLE

El fluido entra y sale dos veces en la circulación del agua de enfriamiento o refrigeración por cada parte voluminosa o cuerpo del condensador. (Wikipedia, 2020)

Por el número de cuerpo instaladas en el condensador:

e. CONDENSADOR DE UN SOLO CUERPO

La presencia de un único cuerpo en el condensador donde se produce la condensación en relación con la potencia y el caudal obtenida de la turbina de vapor, así circulando directamente con los haces tubulares sin la distribución del fluido hacia otro cuerpo condensador. (Casado, 2011, pág. 13)

f. CONDENSADOR DE DOS CUERPOS

Existe la circulación del fluido mediante la implementación y distribución de dos o varios cuerpos dirigiéndose hacia varios condensadores operando bajo el carácter del enfriamiento correspondiente del proceso de refrigeración. La utilización de condensadores con más de un cuerpo permite trabajar con la parte media o la mitad del condensador en funcionamiento. (Casado, 2011, pág. 13)

Según la disposición relativa de la turbina de vapor que presenta, pudiendo clasificarse en:

g. CONDENSADOR AXIAL

Son utilizadas al trabajar con turbinas de vapor hasta 150MW, asimismo el flujo de vapor producido es debido a la condensación al ser provocado por la caída de presión en el condensador en el cuerpo del condensador. La característica de operación con el cuerpo a una baja presión es la circulación

de un solo flujo de vapor a través de las tuberías y el escape axial de la condensación de la turbina de vapor. (Wikipedia, 2020)

h. CONDENSADOR LATERAL

Son consideradas a la misma altura que la turbina de gas, donde turbina de vapor con la baja presión que presenta es de dos flujos. (Wikipedia, 2020)

i. CONDENSADOR INFERIOR

A diferencia de otros condensadores, estos condensadores están colocados por debajo de la turbina de vapor de baja presión a la salida de este escalonamiento de a turbina., por esa razón están ubicadas en una cavidad donde el apoyo de la base de la turbina se encuentra a una altura. Estos condensadores son empleados mayormente en central térmicas convencionales por su mayor accesibilidad y eficiencia de la utilización de condensadores de varios cuerpos. (Wikipedia, 2020)

2.5.9. AEROCONDENSADOR

Son un tipo de condensadores que cumplen el rol como intercambiadores de calor cuyo flujo con un solo paso de circulación de fluido. Como medio refrigerante se tiene al aire para su enfriamiento. Las configuraciones posibles para su refrigeración dispuestas son:

2.5.9.1. AEROCONDENSADOR DE CONVECCIÓN FORZADA

Los aerocondensadores con este tipo de convección se refieren a la utilización de ventiladores, el cual se instalan bajo la sección de tubos de circulación, así también la temperatura ambiente a la cual está sometida estos condensadores es menor debido a la ubicación de los ventiladores. (Oscoz & Bermejo, 2013)

2.5.9.2. AEROCONDENSADOR DE CONVECCIÓN INDUCIDA

También se emplea condensadores de refrigeración compuesto de ventiladores a la salida del condensador sin embargo el flujo de aire de trabajo dispuestos en estos ventiladores es menor al ser atraído por los ventiladores al lado de la salida. (Oscoz & Bermejo, 2013).

2.5.10. BOMBAS DEL CICLO AGUA-VAPOR

Es una maquina donde se produce un cambio o transformación de energía mecánica en energía hidráulica en presión y velocidad contenida en el fluido de trabajo, que tiene como función impulsar, elevar o extraer el fluido hacia otro contexto o espacio de trabajo. En una central térmica se necesitará la utilización de bombas que inyecten o impulsen agua de alimentación a la caldera.

Figura 63. Bomba de un ciclo agua-vapor



Fuente: equipos y productos industriales-(<https://www.directindustry.es/prod/ksb/product-7053-431292.html>)

2.5.10.1. PARÁMETROS CARACTERÍSTICOS DE UNA BOMBA

- I. **CAUDAL:** Es el volumen del fluido del trabajo (agua) que se empleara en el sistema de bombeo, cuyas unidades son el Volumen/Tiempo.

- II. **ALTURA DE ASPIRACIÓN:** Sera necesario saber la medida de la altura que será desde la fuente de alimentación del agua hasta el punto destino.
- III. **POTENCIA:** El trabajo necesario para poder impulsar la bomba de tal manera llegue al punto de intercambio de presión para dar el paso y circulación de fluido.
- IV. **VELOCIDAD:** Se refiere a la velocidad de impulso del fluido que circulara a través del sistema.
- V. **PRESIÓN:** Es un factor indispensable para el diseño de la bomba, donde dependerá su incremento o reducción de presión en la aspiración e impulsión del fluido.

2.5.10.2. CLASIFICACIÓN DE UNA BOMBA DE AGUA

a) **BOMBA DE DESPLAZAMIENTO POSITIVO O VOLUMÉTRICO:** Consiste en aquellas bombas donde el movimiento del fluido se realiza mediante un sistema de bombeo con un determinada y limitado variación del valor de volumen de manera positivamente debido al incremento de la presión por la impulsión de las paredes de la cámara. (*Bombas de desplazamiento positivo, s.f.*) A su vez se subdivide en dos tipos de bombas, las cuales son:

- I. **BOMBA TIPO EMBOLO O RECIPROCANES:** Tiene como característica la utilización de presiones altas al ser puestas con bombas de mayor capacidad y resistencia ante presiones elevadas, puesto que estas máquinas proporcionan presiones al fluido de trabajo para ser accionadas por medio de un embolo o pistón (pieza hidráulica) en el interior de un cilindro. (Bombas de desplazamiento positivo, s.f.)
- II. **BOMBAS VOLUMÉTRICAS ROTATIVAS:** Este tipo de bombas presenta una caja firme que comprende diferencias tipos de piezas contenidas como son pistones,

levas, engranajes, lóbulos etc. Que laboran mínimamente. El fluido de trabajo tiene la función de quedar atrapado para luego ser impulsada contra la caja firme o fija, así mismo la bomba rotatoria descarga todos tipos de fluido que esté libre de sólidos corrosivos. (Bombas de desplazamiento positivo o volumetrico, s.f.)

b) BOMBA DINÁMICA O TURBOBOMBA

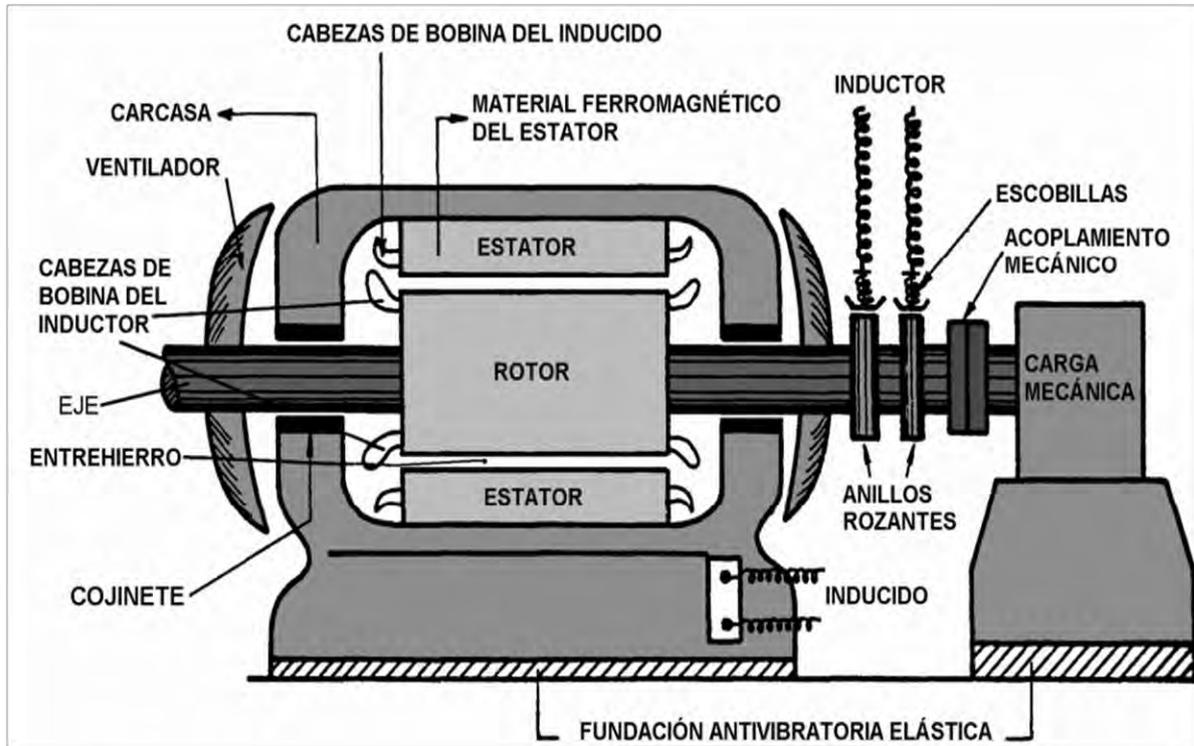
Aquellas máquinas de un sistema de bombeo hidráulico donde proporciona o da energía al fluido, al incrementarse energía cinética para luego convertirla esa en energía en valor de energía de presión ya que la velocidad se reducirá.

- I. BOMBA CENTRIFUGA:** Para poder alcanzar sus valores de presión se utiliza un impulsor o rodete giratorio el cual permite que acrecenté su presión. Son las más empleadas en procesos de impulsión o empuje y movimiento de fluidos incompresibles en sistema de tuberías. Tiene una carcasa en forma de caracol que resalta en este tipo de bombas llamada voluta. Según la dirección de circulación del fluido se tiene el axial, radial y el radioaxial en referencia a la salida y entrada del líquido. (Universidad Central de Ecuador, 2018)

2.5.11. GENERADOR ELÉCTRICO

Es una maquina eléctrica de rotación, el cual convierte la energía mecánica contenida en el eje en la turbina de gas o de vapor en energía eléctrica ya sea a través de una o varios ejes unida a un generador para dos turbinas o independientemente de cada turbina, por la diferencia potencial entre los bornes o polos del efecto electromagnético producto de un electroimán al generar un campo magnético en el rotor. Pudiendo ser una fase (monofásica) o tres fases (trifásico) así mismo de corriente continua o corriente alterna. (Garrido, Generador electrico, 2010)

Figura 64. Partes de un Generador Síncrono



Fuente: Libro de Maquinas Eléctricas II- Miguel A. Rodríguez Pozueta. Universidad de Cantabria

2.5.11.1. PARÁMETROS CARACTERÍSTICOS DE UN GENERADOR ELÉCTRICO

- I. **TENSIÓN NOMINAL:** El nivel de voltaje permitido será la obtenida entre los terminales o bornes del generador eléctrico, predispuesta en la placa de datos de la maquina eléctrica.
- II. **VELOCIDAD NOMINAL:** Es la velocidad de poco giro, a la cual gira el generador eléctrico en revoluciones por minuto. (Danish Wind Industry Association, s.f.)
- III. **FRECUENCIA:** Es la rapidez o velocidad con la que el rotor gira, para generar energía eléctrica mediante la energía mecánica producida en el motor. Este valor de la velocidad origina en la potencia de la maquina eléctrica de forma efectiva. (Danish Wind Industry Association, s.f.)

IV. POTENCIA NOMINAL: Este valor de la potencia está dada bajo condiciones de operación de la turbina de vapor y de gas en caso sea necesario.

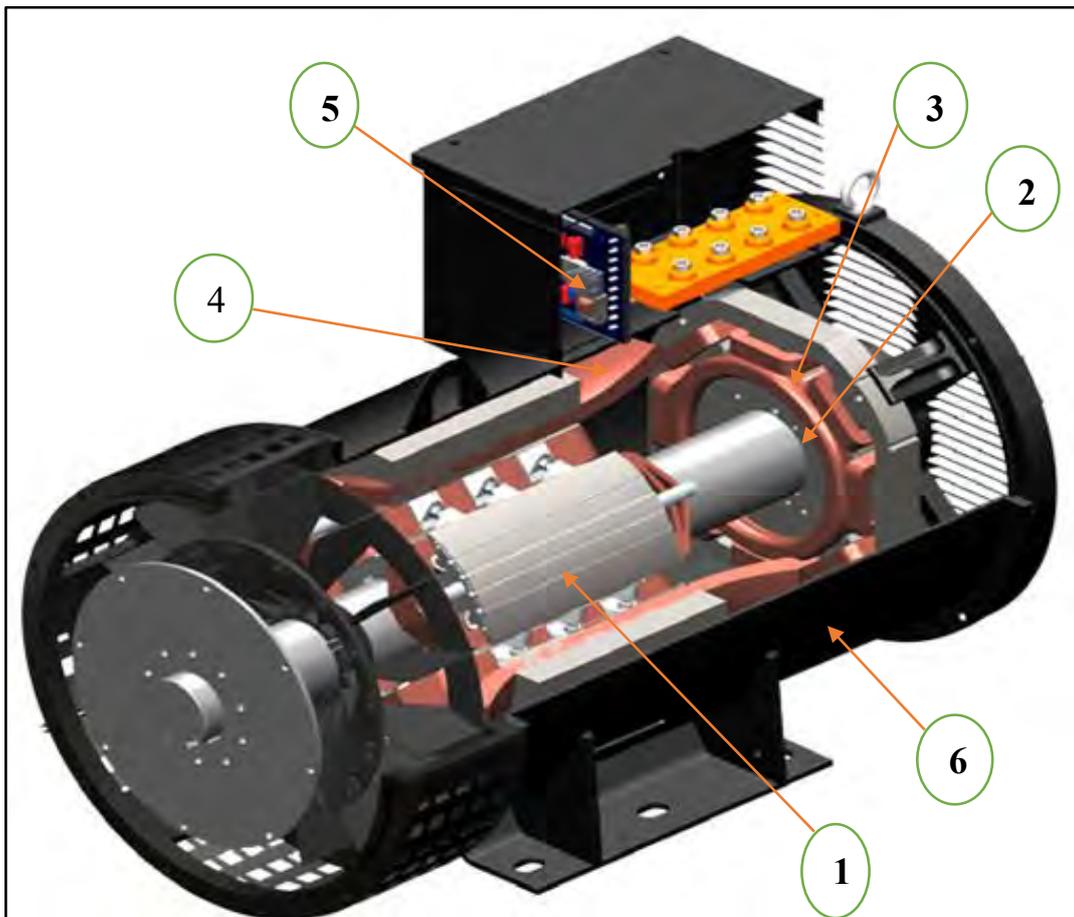
2.5.11.2. TIPOS DE GENERADORES ELÉCTRICO

2.5.11.3. GENERADOR SÍNCRONO

Es denominado como alternador, el cual como maquina eléctrica capaz de transforma energía mecánica en energía eléctrica, donde le velocidad del giro del rotor gira a la misma frecuencia o es múltiplo de esta que la velocidad de la corriente alterna o a la misma velocidad del campo magnético.

a) PARTES DE UN GENERADOR SÍNCRONO

Figura 65. Partes de un Generador Síncrono



Fuente: Elaboración Propia, Catalogo de máquinas generadoras.

1. **ROTOR:** Es la pieza móvil o giratoria, el cual está cubierto con un material con un enrollamiento o bobinado de tal manera genere campo magnético con una velocidad de giro constante que tiene que permanecer. También llamado inductor al generar flujo magnético.
2. **COJINETES:** Tienen la función de apoyo, soporte para su giro adecuado del generador.
3. **ANILLOS ROZANTES:** También llamado anillos colectores o deslizantes, cuyas piezas metálicas que sirve de enlace o contacto eléctrico del rotor y el estator, el cual al ser rozadas o hacer contacto con las escobillas para así transmitir corriente eléctrica.
4. **ESTATOR:** Es la parte estática, compuesta por un material ferromagnético que está cubierto o enrollado con ranuras en la sección inferior en toda la parte de la circunferencia, se le denomina parte inducida ya que en estas se induce la fuerza electromotriz y así producir energía.
5. **REGULADOR DE TENSION:** Se emplea para poder controlar o regular el valor de la tensión máxima a la salida del generador síncrono.
6. **CARCAZA:** Parte voluminosa y cuerpo que cubre al rotor y estator, de cuyo material está cubierto de aluminio con una sección de ranuras con pequeños orificios para su refrigeración adecuada.

b) TIPOS DE UN GENERADOR SÍNCRONO

POR EL TIPO DE ROTOR DE UN GENERADOR SÍNCRONO

La diferencia entre los tipos de rotor empleado en un generador síncrono es dada en función de la velocidad de sincronismo, de la planta generadora, el cual se tiene como:

a. ROTOR DE POLOS SALIENTES DE UN GENERADOR SÍNCRONO

Presentan de rotores con cuatro polos o más, al girar a bajas velocidades, normalmente no se emplea para aplicación de centrales térmicas.

b. ROTOR DE POLOS LISOS DE UN GENERADOR SÍNCRONO

La velocidad de giro en el rotor es alta, al estar provistas de 2 a 4 números de polos. Que varían entre los 1800 a 3600 rpm de velocidad.

POR EL TIPO DE EXCITACIÓN DE UN GENERADOR SÍNCRONO

Cabe mencionar que el proceso de excitatriz es el proceso de suministro de corriente continua al devanado de campo donde un electroimán actuara para poder inducir en el estator.

I. EXCITACIÓN INDEPENDIENTE CON ESCOBILLAS

Se producir la excitación al ser alimentada independientemente con una fuente al rotor, una corriente directa o continua, el cual se transfiere a través de los anillos rozantes o deslizantes que hacen contacto de rozamiento eléctrico con las escobillas.

II. EXCITACIÓN SIN ESCOBILLAS O AUTOEXCITACIÓN

Este tipo de excitación consiste la producción de un campo magnético y fuerza electromotriz por la presencia de un imán permanente, el cual no necesita una fuente externa de tensión de alimentación para su suministro de corriente, es decir, el flujo magnético remanente producto del magnético residual que genera energía en el momento del arranque.

2.5.11.4. GENERADOR ASÍNCRONO (DE INDUCCIÓN)

Se le denomina así, a aquella máquina de transformación de energía de alimentadas de corriente alterna, ya sea el motor como generador, el cual cuyo valor de tensión de regulación que será necesario para la inducción electromagnética es controlado por una red externa en con circuito de arranque dependiente. Como característica se tiene la velocidad de sincronismo que difiere el inductor del inducido debido al deslizamiento entre las frecuencias.

2.5.11.5. TIPOS DE GENERADORES ASÍNCRONOS

SEGÚN EL TIPO DE ROTOR EN LOS GENERADORES ASÍNCRONOS

a) ROTOR DE JAULA DE ARDILLA:

Llamado así, por la forma de una jaula con barras metálicas de cobre o aluminio que cubren y forman parte del rotor. Normalmente se emplean como motores de inducción para producir energía, esta velocidad de giro que no está sincronizada y son velocidades altas por la cual son utilizadas en sistemas de generación eléctrica eólica e hidráulica.

b) ROTOR RANURADO O DE BOBINADO:

Un generador asíncrono de rotor bobinado se distingue de otros tipos porque su rotor está compuesto por conductores enrollados o bobinados en lugar de una jaula de ardilla convencional. Estos conductores se ubican en ranuras específicas en la superficie del rotor. Este diseño genera un bobinado que interactúa dentro del campo magnético producido por el estator, con el mismo número de polos, y se encuentra en constante movimiento. Aunque este tipo de rotor es más complejo de fabricar y mantener en comparación con el de jaula de ardilla.

2.5.12. SISTEMA DE DEPURACIÓN DE GASES DE COMBUSTIÓN

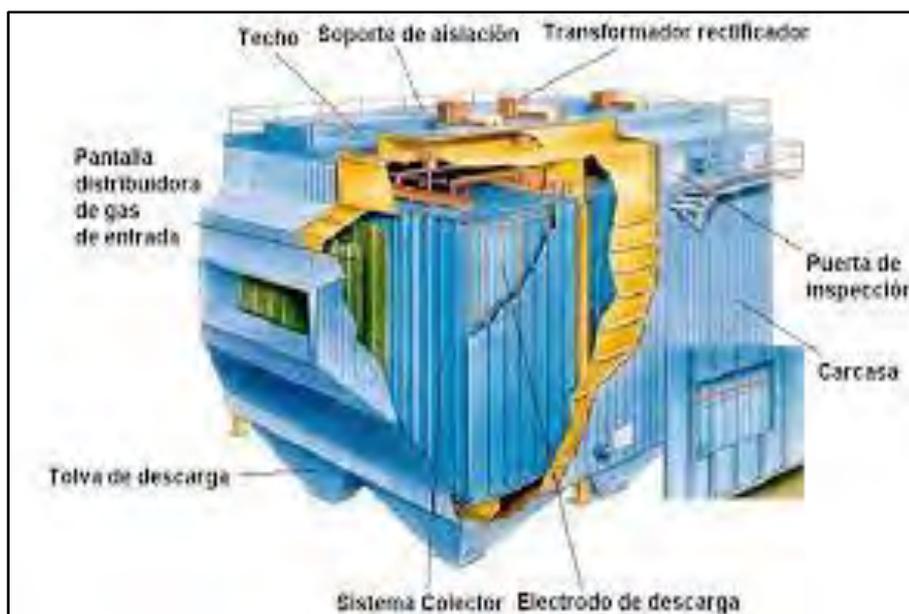
Los gases contaminantes de salida en una central térmica que producto del proceso de combustión, al expulsar dióxido de carbono, metano y porciones derivadas de la combustión de, los cuales este sistema tiene como objetivo eliminar o minimizar los gases de combustión a la salida de los equipos o unidades de generación dependerá del tipo de ciclo que presente ya sea ciclo de vapor, de gas o combinado. Se tiene como gases de efecto contaminante como: compuestos alcalinos (derivados de sulfatos), compuesto de azufre (derivados de óxidos), Cloruro de hidrogeno (derivados del cloro).

Las unidades o equipos con mecanismo para capturar materiales en forma de partícula de gases de combustión son:

2.5.12.1. *PRECIPITADORES ELECTROESTÁTICOS*

Es una unidad descontaminante de control de emisiones a partir de la fuerza de una carga electrostática inducida. Los electrodos colectores, el cual se encuentra en una cámara contenida con una serie de pasillos verticales entre estos, se encuentran conductores de alambre al que se le denomina electrodos de descarga. Este electro de descarga es alimentada por una tensión continua cargada negativamente produciendo un campo eléctrico entre estos electrodos de descarga y colectores; lugar donde es ionizada los materiales húmedos y partículas de origen gaseoso mediante el campo eléctrico a una elevada intensidad para luego las partículas son captadas o retenidas por electrodos de descarga(cargas electrostáticas inducidas)para ser quitadas gradualmente de las placas colectoras con el martilleo o golpe seco, el cual es un movimiento de golpe periódico para que se separe y se recoja en la zona inferior del precipitador.

Figura 66. Precipitador Electrostático Industrial



Fuente: Seguridad y Saneamiento Industrial (Fernández, M. A. (s. f.))

2.5.12.2. TIPOS DE PRECIPITADOR ELECTROESTÁTICO

a) PRECIPITADOR ELECTROESTÁTICO DE PLACA-ALAMBRE

Este tipo de precipitador es el más convencional y el más utilizado a nivel industrial, con el propósito de controlar fluidos o compuesto orgánicos volátiles el cual presenta electrodos de alambre el cual se encuentra entre electrodos de placa, ya que el gas fluye a través de estos electrodos que están apoyada y soportadas sobre estructuras macizas y sólidas. Las líneas de flujo generado se encuentran en paralelo entre electrodos son muy altas, lo cual permiten que se depuración sea manejada a altas magnitudes de volumen de gas. Este tipo de precipitadores son de gran tamaño lo que implica su construcción y ubicación en un solo lugar par tipos de lavado en seco y húmedo.

b) PRECIPITADOR ELECTROSTÁTICO DE PLACA-PLANA

Los precipitadores tipo placa-plana son de menor tamaño, así mismo se emplean placas planas en lugar de los electrodos, esta sustitución de materiales implica a una mayor generación de campo eléctrico y tiene como objetivo recaudar y recolectar mayor número de partículas en el área exterior. (Oscoz & Bermejo, 2013, pág. 125)

c) PRECIPITADOR ELECTROESTÁTICO TUBULAR

Esta forma por una sección de tubos en dirección paralelo, el cual al agruparse tienen una forma de panel. La instalación del electrodo a alto tensión estos puestos en todo el eje del tubo, ya que serán apartados el material nocivo o partículas de tipo húmedo y pegajoso al circular la corriente a través de estos tubos. (Oscoz & Bermejo, 2013, pág. 125)

2.5.12.3. FILTROS DE LECHO GRANULAR

Equipo de cama granular, el cual tiene la función de suprimir o eliminar los contaminantes gaseosos de gases originados del proceso de combustión. Consiste en la circulación de una corriente de gas sucio el cual transcurre mediante cama o lecho de material o partículas abultados. En el desarrollo existe una separación entre las partículas voluminosas al tocarse

con los gránulos. Las partículas usadas como recursos filtrantes son de uno a 2 directivas de intensidad más grandes que el polvo a dividir. (INTECH GmbH, s.f.). Divididas en tipos de filtros a continuación:

a) FILTRO DE LECHO FLUIDO MÓVIL

Sección de espacios vacíos, cuya función es de depurar o clasificar los elementos nocivos con propiedades ajenas al fluido. Este tipo de filtros al presentar una cavidad transcurre por medio de un distribuidor que circula gas sucio hacia un sentido inclinado superior mediante el lecho cama móvil, el componente filtrante se separa por la zona inferior del recipiente así incrementándose el movimiento de sólidos de una corriente de aire a una velocidad y dirección específica con destino a un cama o lecho de fluido en con ciclo de regeneración de material y de retorno al recipiente.

Existe algunas características que influyen drásticamente debido a la dificultad de la instalación en los sistemas a elaborar sin embargo es conveniente, la adaptabilidad de los sistemas en la presión y temperatura. (Oscóz & Bermejo, 2013, pág. 127)

Figura 67. Filtro de lecho-fluido

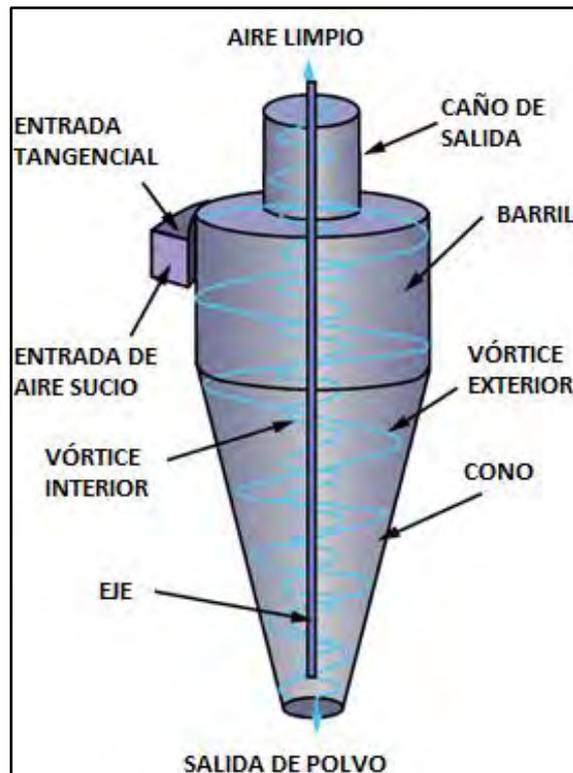


Fuente: Artículo sobre tecnología de lecho-fluido (<https://www.interempresas.net/Farmacia/Articulos/161187>)

2.5.12.4. CICLÓN

Son grupos mecánicos de posición inmóvil(fijo), el cual son empleados en industrias, que acceden a la división de fracciones de un sólido o liquido al estar retenidos en un fluido gaseoso por medio de una fuerza circular centrífuga.

Figura 68. Ciclón y sus válvulas rotativas



Fuente: Artículo de productos de depuradores y ciclones (<http://millerspanish.com/ciclones>)

El proceso de división de partículas se da por medio de la entrada del fluido gaseoso a través del canal tipo tubo de acceso al ciclón para comenzar a realizar la circulación en dirección descendente inferior en un desplazamiento en espiral. El sentido al variar, producirá un campo centrífugo, el cual es varias veces el campo gravitacional terrestre. La división de materia (partículas atómicas) es transferida por el fluido gaseoso a causa de su inercia; es así que, en este campo centrífugo con las líneas de fuerza, las partículas se apartan de la zona central de giro. Al llegar a los muros del interior de la cuba o tonel del ciclón para llegar tal punto de menor desplazamiento y así su caída con dirección al cono. (Wikipedia, s.f.)

a) CICLÓN ACS (ADVANCED CYCLONE SYSTEMS)

El sistema avanzado de ciclones (ACS) es una compañía que se ocupa del avance y la distribución comercial mundial de sistema de ciclones de depuración de gases de alto rendimiento.

Presenta sistemas que se emplean para su mejor aprovechamiento las cuales son:

- I. HURRICANE (Huracán):** Es tu tipo de sistema de separación de partículas (Ciclón), el cual tiene una alta eficiencia en un sistema que mejorara progresivamente. (Oscoz & Bermejo, 2013)
- II. SISTEMA RECYCLONE MECÁNICO:** Está constituido por el sistema Hurricane (Huracán) con un divisor de materia atómica o partículas, cuya finalidad es la incrementar su rendimiento y reutilizar del proceso de recirculación de las partículas no captadas en el ciclón. (ADVANCED CYCLONE SYSTEMS, s.f.)
- III. SISTEMA RECYCLONE ELECTROSTÁTICO:** Tiene el las características de optimización que el sistema anterior. Sin embargo, la aplicación de una corriente continúa frente a la sección de recirculación. Las materias captadas son tenues y compactos frente a la fuerza centrífuga, cargándose eléctricamente y son captados por los muros de recirculación, centralizándose y acumulándose a las partículas mayores al sumarse poco a poco al sistema (Ingenierias proyectos energeticos, medio ambiente, 2010)

2.5.12.5. FILTROS DE MANGAS

Son equipos o dispositivos que son reemplazados por precipitadores electroestáticos en caso sea necesario que dividen sólidos y gas mediante la retención de una corriente gaseosa, al pasar la corriente a través de un tejido por una vía porosa. Los filtros de mangas están compuestos por una fila de pliegues tipo bolsa de fibra artificial o natural, se encuentran suspendidas en

unos soportes, al contener en una carcasa cerrada, le dará más resistencia. Existe un lugar bajo la placa, donde el gas sucio ingresara al dispositivo, así ingresara en las mangas, al salir el gas por las mangas, se queda atrás los sólidos ajenos y el gas limpio fluye por el espacio exterior para ser expulsados por a chimenea. (Oscosz & Bermejo, 2013).

2.5.12.6. MULTICICLÓN

Estas formada por una serie de equipos de ciclón, el cual tiene la finalidad de limpieza de gases, valiéndose del desarrollo de rotación, centrifuga y el cambio de dirección de los gases, así se realiza la división o separación de materia atómica o partículas de los gases de combustión. Se instalan una serie de multiciclones, en done el primer multiciclón actúa donde los gases atraviesan a través de este multiciclón para retener y dividir las partículas de mayor tamaño. Luego ingresa al segundo multiciclón para separar y depurar el aire en la materia de menor peso, para finalmente ser arrojados a la atmosfera. (INNERGY HEAVY INDUSTRY, s.f.)

2.5.13. TRATAMIENTO DE AGUAS

2.5.13.1. SISTEMA DE DESINFECCIÓN Y CONTROL DE CALIDAD DEL AGUA

Sera imprescindible realizar el control de la calidad del agua y evitar que agentes microbianos se inserten en el fluido de agua, desde el diseño de sistema de refrigeración, desinfección y control del agua hasta la expulsión de estos fluidos.

Existen algunos fenómenos dentro del sistema de desinfección y control de agua, el cual se tiene que tomar en cuenta para prevenir y evitar problemas y disturbios en los equipos y el sistema del agua a tratar.

- I. CONTROL DE CRECIMIENTO DE ALGAS:** Sera necesario controlar la aparición de algas en la superficie inferior de la torres o chimenea de refrigeración, ya que si no se realiza la debida eliminación de estos elementos naturales podrían obstaculizar el paso del aire. No obstante, se tendrá que minimizar la presencia de

rayos solares que impactan con las superficies más cercanas a la salida, es por eso que se tendrá algunas soluciones como son la de utilización de biocidas químicas y realizar mantenimiento de las salidas de las torres o chimeneas, teniendo en cuenta siempre los rayos de sol que perjudican con daños parciales.

- II. **CONTROL DE CRECIMIENTO DE ORGANISMOS:** Los organismos o microorganismos que son agentes directos que dañan y se adhieren a los equipos de expulsión. Sin embargo, los tratamientos químicos- bioquímicos, químico-físicos para contrarrestar la presencia de estos organismos.
- III. **CONTROL DE CORROSIÓN:** Se refiere al deterioro de los segmentos de materiales de fabricación tanto como físicas o químicas. La disipación del metal por el efecto de restablecimiento de la pila electrolítica es el resultado al haber corrosión en el material y como único resultado se tiene la de fortalecer la parte de la superficie con una capa muy fina para poder proteger ante corrosiones.
- IV. **CONTROL DE SÓLIDOS EN SUSPENSIÓN:** Es importante conocer y controlar la presencia de sólidos en suspensión en el agua es por eso que se instalan filtros para el agua de suministro y la toma de aire para evitar la retención de estos materiales sólidos. Así también la variación la velocidad y la utilización de biodispersadores favorece y reduce la inclinación y detención.
- V. **CONTROL DE SÓLIDOS DISUELTOS EN EL AGUA:** La evaporación del paso del fluido del agua perjudica en la obtención del agua en condiciones de salinidad, como un remedio se tiene que cambiar el agua de la balsa de la chimenea cada cierto tiempo.
- VI. tratamientos y productos biodispersantes que eliminan esta biocapa, que perjudican en la salida de los fluidos de las chimeneas.

2.5.14. CRITERIOS DE SELECCIÓN DE UNA GENERADOR DE VAPOR Y RECUPERADOR DE CALOR

2.5.14.1. POTENCIA DE LA CALDERA RECUPERADORA DE CALOR

La potencia de una caldera recuperadora de calor o generador de vapor está dada por la capacidad del equipo recuperador donde las unidades de medidas son los BHP, el cual es caballos fuerza de una caldera o la potencia de la caldera en caballos de fuerza. El valor de 1 BHP (caballos de fuerza de caldera) equivalente a 34.5 lb, 9.809 Kg/Hora, 33479 BTU (unidades térmicas británicas).

2.5.14.2. TIPO DE CALDERA RECUPERADORA DE CALOR

Según el espacio que se requiere implementar el generador de vapor dentro de los estándares de espacio y tiempo se presenta calderas horizontales y verticales para instalaciones de generación de vapor en condiciones limitados y de fácil acceso.

2.5.14.3. EFICIENCIA DEL FABRICANTE DE LA CALDERA RECUPERADORA DE CALOR

Para poder seleccionar una caldera generadora de vapor es indispensable el rendimiento para generar mayor cantidad de vapor al máximo con una alta presión y temperatura aprovechando adecuadamente mediante regeneradores, calderines, evaporadores. Dentro del instrumento generador y recuperador de vapor serán óptimo las calderas acuotubulares el cual dispone de características de eficiencia térmica con presión de hasta 350Pas con temperaturas de hasta 300°C en sus máximos valores de combustión teniendo seguridad, eficiencia y capacidad térmica en presiones altas.

2.5.14.4. EL COMBUSTIBLE EMPLEADA EN UNA CALDERA RECUPERADORA DE CALOR

Una de las características de la máxima eficiencia en el sistema de generación es la utilización de la materia prima que es el fluido gaseoso o vapor donde dependerá de la capacidad máxima

de la caldera recupera de vapor para poder producir vapor donde cada caldera está determinada por el fluido que será trabajado.

2.5.15. CRITERIOS DE SELECCIÓN DE UNA TURBINA DE GAS

2.5.15.1. CONDICIONES AMBIENTALES

Los aspectos atmosféricos o meteorológicos en la condición de entrada al compresor son importante para la generación de potencia y heate rate o consumo específico, tales parámetros de generación son producto de la variación de temperatura, presión y altitud, el cual tendrán como consecuencia la capacidad máxima de potencia.

2.5.15.2. POTENCIA NOMINAL REQUERIDA DE LA TURBINA DE GAS

La potencia nominal requerida de la turbina de gas es necesario para la selección de la turbina de gas de fábrica o de catálogo. Aquella potencia mecánica que será transmitida al eje que realizará un determinado trabajo en el tiempo.

2.5.15.3. TIPO DE COMBUSTIBLE DE LA TURBINA DE GAS

El flujo masico gaseoso utilizado en la expansión de la turbina de gas, siempre será primordial en el rendimiento de la turbina, por eso el dimensionamiento de la turbina siempre tiene que ser para determinados fluidos específicos. El sistema de combustible se verá perjudicado deteriorándose por el grado de pureza que será generado por los niveles de emisiones que presentan en el sistema.

2.5.15.4. ESPECIFICACIONES DE LA CÁMARA DE COMBUSTIÓN

Para aprovechar el máximo el fluido gaseoso y obtener una combustión de la mezcla de gas y aire se seleccionará una cámara de combustión de tipo barril o anular, las cámaras de combustión anular con más compactas y eficientes al presentar un solo tubo de llamas permite la estabilidad con la misma temperatura a nivel del sesto combustor. Así mismo las cámaras de combustión tubulares o de barril presenta más de dos pares de tubos de llamas de ignición, así

como la presencia de múltiples combustores en la turbina al tener como desventaja la variación de temperatura en el escalonamiento de la turbina de por los menos la primera etapa.

2.5.15.5. NIVELES DE EMISIONES

Los niveles de emisiones son la cantidad de emisiones suministrada en la cámara de combustión y a la salida de la turbina de gas donde la mezcla de aire y gas permitían el control de la emisión de gases a la salida del ciclo, Por lo tanto, el dimensionamiento de las características y capacidades de una turbina de gas era indispensable para su modelamiento preliminar.

2.5.16. CRITERIOS DE SELECCIÓN DE UNA GENERADOR ELÉCTRICO

En una central termoeléctrica, el sistema de generación consta del alternador o generador síncrono donde con la ayuda de la turbina de gas a la salida de turbina de expansión producirá la energía mecánica necesaria para que sea transformada.

2.5.16.1. POTENCIA NOMINAL REQUERIDA DEL GENERADOR ELÉCTRICO

A partir de la energía mecánica a la salida de la turbina de gas, será proporcional la potencia del generador que seleccionaremos, cuyo valor de potencia será propio del fabricante y marca a tratar.

2.5.16.2. EFICIENCIA DE FABRICANTE DEL GENERADOR ELÉCTRICO

La eficiencia de un proveedor o fabricante de instrumentos de generación está dada por el rendimiento y la relación de potencia de salida y la de entrada, donde el valor de la eficiencia será

$$\eta_{GENERADOR ELECTRICO} = \frac{P_{SALIDA}}{P_{ENTRADA}} \times 100\%$$

$$\eta_{\text{GENERADOR ELECTRICO}} = \frac{P_{\text{SALIDA}}}{P_{\text{SALIDA}} + P_{\text{PERDIDAS}}} \times 100\%$$

$$\eta_{\text{GENERADOR ELECTRICO}} = \frac{P_{\text{ENTRADA}} - P_{\text{PERDIDAS}}}{P_{\text{ENTRADA}}} \times 100\%$$

2.5.17. CRITERIOS DE SELECCIÓN DE UNA TURBINA DE VAPOR

2.5.17.1. VELOCIDAD DE GIRO DE LA TURBINA DE VAPOR

El giro de velocidad de la turbina de vapor a seleccionar, precede de la función de control y revoluciones por minutos que girara la turbina. Existe como característica propia de la turbina, la alta y baja velocidad el cual rota donde normalmente son utilizadas en compresores, bombas y alternadores respectivamente, el cual varía entre los 1800 y 300 RPM.

2.5.17.2. PRESIÓN DE VAPOR DE LA TURBINA

La presión de entrada a la turbina de vapor esta dimensionada y requerida en el diseño de los instrumentos de generación los niveles de presión en la turbina de vapor son variables a lo largo de su aprovechamiento, donde cada rango de presiones está dado por el nivel de presión apropiada.

Baja Presión: No superan del 1Mpa

Media Presión: Varían desde los 1Mpa hasta los 8.8Mpa.

Alta Presión: Desde los 8.8Mpa hasta los 22.4Mpa.

Super Alta Presión: Valores superiores a los 22.4Mpa.

2.5.17.3. TEMPERATURA DE VAPOR DE LA TURBINA

La temperatura de entrada y salida en condiciones máximas críticas esta dadas por valores en un intervalo de 538°C a 600°C teniendo en cuenta que la presión admisible sea en un intervalo de 241 bar a 310 bar en centrales térmica supercríticas. Dicho ciclo Rankine con precalentamiento, recalentamiento y sobrecalentamiento estas permisibles en un rango de

operación de 120 a 160 bares y 538 a 560°C de presión y temperatura respectivamente, los valores de intervención y rango de operación son estimaciones generales a nivel de turbinas de vapor en ciclo abiertas, cerrados y combinados. Sin embargo, turbinas de vapor en condiciones normales, presentan el valor de la temperatura a diferentes niveles a la entrada de la turbina de vapor como son:

Temperatura de vapor saturado (muy por debajo de los 485°C)

Temperatura media (menor a los 485°C)

Temperatura Alta (485°C-565°C)

Temperatura muy alta (mayor a los 565°C)

2.5.17.4. PRESIÓN A LA SALIDA DE LA TURBINA DE VAPOR

En una central termoeléctrica de ciclo combinado, la presión a la salida de la turbina de vapor está determinada por la condensación del vapor, ya que la presión de salida de la turbina tiene que ser menor a la presión atmosférica, para así ser aprovechada en el proceso de cambio de estado de la materia a líquido y obtener un mejor rendimiento térmico.

2.5.18. CRITERIOS DE SELECCIÓN DE UN CONDENSADOR

2.5.18.1. ENTRADA DE VAPOR

El sistema de condensación va dirigido por la dirección del fluido de vapor de agua, donde el vapor expandido de la turbina de vapor ingresará tanto horizontalmente y extremo como verticalmente e inferior del condensador, por lo tanto, dependerá de la forma y característica de entrada y salida de fluido del instrumento o equipo para su selección apropiada en el ciclo cerrado del sistema de enfriamiento.

2.5.18.2. NÚMERO DE CUERPOS

Para la determinación y elección de un equipo refrigerante en condensación sea adecuada y óptima, será imprescindible seleccionar el número de cuerpos que tendrá el condensador. El número de cuerpos o carcazas consiste en la cantidad de armadura o armazón en una unidad

condensadora donde la turbina deposita sobre los haces tubulares albergados en una sola estructura o cuerpo. En los condensadores multicuerpo o multicarcaza el vapor se separa en diferentes condensadores que operaran en las mismas condiciones.

2.5.18.3. NÚMERO DE PASOS

La circulación de fluido de agua de refrigeración o enfriamiento está dada por la cantidad del recorrido en el condensador de entrada y salida del agua de enfriamiento, ya sea de un solo o varios trayectos, es así, que será importante saber el número de pasos o recorridos del fluido.

2.5.19. CRITERIOS DE SELECCIÓN DE UNA BOMBA DE AGUA

2.5.19.1. CAUDAL REQUERIDO DE LA BOMBA

El caudal esta determinadas en unidades de metros cubico por tiempo, donde el equipo adecuado de bombeo proporciona la cantidad de fluido de trabajo en la transformación de líquido saturado en líquido de refrigeración de la caldera. Es importante saber el dato característico de la bomba en el diseño y selección.

2.5.19.2. TIPO DE FLUIDO

Es fundamental saber las características técnicas del fluido a suministrar para un determinado tipo de bomba, ya que el fluido con características de viscosidad y densidad contenida en el material fluyente permitirá evitar la corrosión o desgaste en una bomba inadecuada en un ciclo Rankine. El agua es tipo de fluido de una bomba definida utilizada en este ciclo combinado.

2.5.19.3. TEMPERATURA DE BOMBEO

La temperatura idónea esta permisible en un rango de variación limitada que permita la succión e impulsión del fluido en términos de presión y temperatura.

2.5.19.4. PRESIÓN DE FLUIDO

La presión del fluido proporciona la aspiración y la impulsión del fluido para poder retornar el agua de alimentación a la caldera, donde la bomba al estar en vacío con diferencias de presiones y así elevar la fuerza del agua en las tuberías en las instalaciones.

3. CAPÍTULO III: ESTIMACIÓN, PROYECCIÓN Y GENERACIÓN ELÉCTRICA DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS GENERADOS EN LA REGIÓN DEL CUSCO

3.1. GENERACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS DE LA REGIÓN DEL CUSCO

La estimación de la cantidad de residuos sólidos generado es recolectada del Estudio de Caracterización de Residuos Sólidos (RS) 2020, investigado y realizado por el área de Medio Ambiente de cada una de las municipalidades de los distritos del Cusco. La proyección generada de residuos sólidos para años futuros se dará según la cantidad de población estimada.

Tasa de Crecimiento Poblacional o Intercensal: El valor de la tasa de crecimiento población está dada mediante la información territorial del Viceministerio de Gobernanza Territorial del Cusco; el cual a través de la curva de proyección poblacional 2020-2030 presenta un decrecimiento de la tasa de crecimiento anual departamental del 1.7% al 1% en el departamento del Cusco. (Gobernanza Territorial, 2020)

Tasa de Crecimiento de Generación Per Cápita: El valor de la tasa de crecimiento o incremento de generación per cápita está dada por el Sistema Nacional de Información Ambiental y el Ministerio del Ambiente de nuestro país, el cual a través de la generación per cápita y la generación de residuos sólidos departamental donde se muestra un crecimiento del 0.5% al 1% de generación per cápita en el departamento del Cusco. (Ministerio del Ambiente, 2020)

3.1.1. ESTIMACIÓN Y PROYECCIÓN DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS SEGÚN LA POBLACIÓN DEL DISTRITO DEL CUSCO

La tasa de crecimiento es fundamental para poder estimar y proyectar a años posteriores, es por eso que en los últimos censos realizados a nivel nacional se recolectó datos de población 2020 y tasa de crecimiento de años pasados según el último censo nacional para así poder tomar datos de referencia, así como también los datos obtenidos en la Tabla 23.

Tabla 23. Resultados de la proyección de la generación de residuos sólidos y la población del distrito del Cusco 2020-2030

Año	Poblacion (Hab.)	Tasa de Crecimiento Poblacional (%)	Generacion Per Capita (kg./Hab./dia)	Tasa de Crecimiento de Generacion Per Capita (%)	Generacion de residuos solidos Toneladas/dia
2020	121741	1.7%	4.4508	0.50%	118.142
2021	123811	1.6%	4.4753	0.55%	118.792
2022	125668	1.6%	4.5044	0.60%	119.564
2023	127679	1.5%	4.5381	0.65%	120.461
2024	129211	1.5%	4.5767	0.70%	121.485
2025	131150	1.4%	4.6202	0.75%	122.639
2026	132332	1.4%	4.6687	0.80%	123.927
2027	134185	1.2%	4.7225	0.85%	125.353
2028	133931	1.2%	4.7815	0.90%	126.921
2029	135538	1.1%	4.8461	0.95%	128.636
2030	135815	1.1%	4.9164	1.00%	130.502

Elaboración Propia, Plan Integral de Gestión Ambiental de Residuos Sólidos de la provincia del Cusco, 2020

En la **Tabla 23**. De generación y proyección de residuos sólidos del distrito del Cusco, se puede observar que la tasa de crecimiento varía de manera negativa, descendente; posteriormente, la población se proyecta a 10 años, hasta el 2030, siendo necesario para los cálculos de la proyección de la generación de residuos sólidos el uso de la **fórmula 2.2 de Proyección de la Población** y la **fórmula 2.7 de generación de residuos sólidos**.

3.1.1.1. PROYECCIÓN DE LA GENERACIÓN PER CÁPITA DEL DISTRITO DEL CUSCO

La proyección de la generación per cápita del distrito del Cusco está establecida a partir de la siguiente formula 2.6:

$$G_{pf} = G_{pc} (1+r)^n$$

Donde:

G_{pf} = Generación per cápita futura (Kg. /hab./día)

G_{pc} = Generación per cápita actual (Kg. /hab./día); el valor de la generación per cápita inicial es de 4.45079 kg/hab./día del año 2020, este valor está establecido por la Gerencia de Medioambiente Provincial del Cusco

r = Tasa de crecimiento de generación per cápita; este valor está determinado por el Ministerio del Ambiente (2020) que varía de 0.5% a 1%.

N = Número de años del 2020 al 2030 (1 a 10 años)

3.1.1.2. ESTIMACIÓN Y PROYECCIÓN DE GENERACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS ORGÁNICOS DEL DISTRITO DEL CUSCO

La cantidad estimada y proyectada de residuos sólidos orgánicos del distrito del Cusco, se determinó mediante el 73.34% de residuos sólidos orgánicos de la composición porcentual de los residuos sólidos generados en el distrito del Cusco, el cual es el producto de la generación de residuos sólidos y el porcentaje de residuos sólidos orgánicos del distrito del Cusco; posteriormente se realizó la proyección adecuado para cada año del 2020 al 2030, tal como se puede apreciar en la **Tabla 24**.

Tabla 24. Resultados de la Proyección de la Generación de Residuos Sólidos Orgánicos del distrito del Cusco 2020-2030

Año	Generación Residuos Sólidos (Tonelada/día)	Generación Residuos Sólidos Orgánico (Tonelada/día)	Generación Residuos Sólidos Orgánico (Tonelada/año)	Porcentaje de residuos Orgánicos (%)
2020	118.142	84.283	30763.114	71.34%
2021	118.792	84.746	30932.311	
2022	119.564	85.297	31133.378	
2023	120.461	85.937	31366.902	
2024	121.485	86.667	31633.567	
2025	122.639	87.491	31934.165	
2026	123.927	88.410	32269.592	
2027	125.353	89.427	32640.861	
2028	126.921	90.545	33049.099	
2029	128.636	91.769	33495.557	
2030	130.502	93.100	33981.616	

Fuente: Elaboración Propia, Plan Integral de Gestión Ambiental de Residuos Sólidos de la provincia del Cusco, 2020

3.1.2. ESTIMACIÓN Y PROYECCIÓN DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS SEGÚN LA POBLACIÓN DEL DISTRITO DE SANTIAGO

Dentro de las estimaciones determinadas durante los años futuros como población inicial se tiene el valor de 94756 habitantes a nivel del distrito de Santiago, así para calcular la población proyectada hasta el 2030 es dada por la tasa de crecimiento y de 1 a 10 años de tiempo en población a estimar, despejado de la **fórmula 2.2.** y posteriormente obtener los valores de generación de residuos sólidos proyectada también hasta el 2030; por consiguiente, se obtuvo los valores de la generación per cápita el cual es de 1.021 Kg. De residuos sólidos generado por persona al día en el año 2020 hasta el 1.128 de Kg. de residuos sólidos generado por persona en un día en el año 2030 aproximadamente, y finalmente se calculó los valores de la generación de residuos sólidos del año 2020 al 2030 utilizando los valores de la generación per cápita y la población proyecta a 10 años desde el año 2020 al 2030.

Tabla 25. Resultados de la proyección de la generación de residuos sólidos y la población del Distrito de Santiago 2020-2030

Año	Población (Hab.)	Tasa de crecimiento Poblacional (%)	Generación Per cápita (Kg. /Hab./día)	Tasa de Crecimiento Per cápita (%)	Generación Residuos Sólidos (Ton/día)
2020	94756	1.70%	1.021	0.50%	96.738
2021	96367	1.60%	1.027	0.55%	98.932
2022	97812	1.60%	1.033	0.60%	101.068
2023	99377	1.50%	1.041	0.65%	103.455
2024	100571	1.50%	1.050	0.70%	105.588
2025	102079	1.40%	1.060	0.75%	108.190
2026	102999	1.40%	1.071	0.80%	110.312
2027	104441	1.20%	1.083	0.85%	113.143
2028	104244	1.20%	1.097	0.90%	114.342
2029	105495	1.10%	1.112	0.95%	117.277
2030	105711	1.10%	1.128	1.00%	119.223

Fuente: Elaboración Propia, Plan Integral de Gestión Ambiental de Residuos Sólidos del distrito de Santiago, 2020

En la **Tabla 25.** Se observa la proyección de la generación de residuos sólidos el cual se determinó mediante la **fórmula 2.7** el producto de la cantidad de población proyectada y la

cantidad de generación per cápita proyecta del 2020 al 2030 se determinó la cantidad de generación de residuos sólidos proyectado del 2020 al 2030.

3.1.2.1. PROYECCIÓN DE LA GENERACIÓN PER CÁPITA DEL DISTRITO DE SANTIAGO

La proyección de la generación per cápita del distrito del Cusco está establecida a partir de la siguiente **formula 2.6**:

$$G_{pf} = G_{pc} (1 + r)^n$$

Donde:

G_{pf} = Generación per cápita futura (Kg. /hab./día)

G_{pc} = Generación per cápita actual (Kg. /hab./día); el valor de la generación per cápita inicial 1.021 kg/hab./día del año 2020, este valor está establecido por la Gerencia de Medioambiente Distrital de Santiago.

R = Tasa de crecimiento de generación per cápita; este valor está determinado el Ministerio del Ambiente y el Sistema Nacional de Información Ambiental que varía de 0.5% a 1%.

N = Número de años del 2020 al 2030 (1 a 10 años)

3.1.2.2. ESTIMACIÓN DE GENERACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS ORGÁNICOS DEL DISTRITO DE SANTIAGO

En la siguiente **Tabla 26**. Se presentan los datos de generación de residuos sólidos, junto con los resultados específicos de la generación de residuos sólidos orgánicos domiciliarios en el periodo comprendido entre 2020 y 2030. Es importante destacar que los residuos sólidos orgánicos constituyen el 62.81% del total de generación de residuos sólidos. Este porcentaje es crucial para calcular la proporción que se utilizará en la generación de biogás.

Tabla 26. Resultados de la Proyección de la Generación de Residuos Sólidos Orgánicos Domiciliarios del distrito de Santiago 2020-2030

Año	Generación Residuos Sólidos (Tonelada/día)	Generación Residuos Sólidos Orgánicos Domiciliarios (Tonelada/día)	Generación Residuos Sólidos Orgánicos Domiciliarios (Tonelada/año)	Porcentaje de residuos Orgánicos (%)
2020	96.738	60.761	22177.883	62.81%
2021	98.932	62.139	22680.771	
2022	101.068	63.481	23170.505	
2023	103.455	64.980	23717.812	
2024	105.588	66.320	24206.837	
2025	108.190	67.954	24803.278	
2026	110.312	69.287	25289.696	
2027	113.143	71.065	25938.792	
2028	114.342	71.818	26213.668	
2029	117.277	73.662	26886.619	
2030	119.223	74.884	27332.623	

Fuente: Elaboración Propia, Plan Integral de Gestión Ambiental de Residuos Sólidos del distrito de Santiago, 2020.

En la **Tabla 27**. Se proporcionan los datos sobre la producción de residuos sólidos orgánicos no domiciliarios, así como los resultados generales de la generación de residuos sólidos durante el período que abarca desde 2020 hasta 2030. Es importante señalar que los residuos sólidos orgánicos representan el 23.64% del total de la generación de residuos sólidos.

Tabla 27. Resultados de la Proyección de la Generación de Residuos Sólidos Orgánicos No Domiciliarios del distrito de Santiago 2020-2030

Año	Generación Residuos Sólidos (Tonelada/día)	Generación Residuos Sólidos Orgánicos No Domiciliarios (Tonelada/día)	Generación Residuos Sólidos Orgánicos No Domiciliarios (Tonelada/año)	Porcentaje de residuos Orgánicos (%)
2020	96.738	22.869	8347.161	23.64%
2021	98.932	23.387	8536.434	
2022	101.068	23.892	8720.757	
2023	103.455	24.457	8926.748	
2024	105.588	24.961	9110.805	
2025	108.190	25.576	9335.289	
2026	110.312	26.078	9518.363	
2027	113.143	26.747	9762.666	
2028	114.342	27.030	9866.122	
2029	117.277	27.724	10119.402	
2030	119.223	28.184	10287.267	

Fuente: Elaboración Propia, Plan Integral de Gestión Ambiental de Residuos Sólidos del distrito de Santiago, 2020.

Tabla 28. Resultados de la Proyección de la Generación de Residuos Sólidos Orgánicos Total del distrito de Santiago 2020-2030

Generación Residuos Sólidos Orgánicos Domiciliarios (Tonelada/año)	Generación Residuos Sólidos Orgánicos No Domiciliarios (Tonelada/año)	Generación Residuos Sólidos Orgánicos Total (Tonelada/año)
22177.883	8347.161	30525.044
22680.771	8536.434	31217.205
23170.505	8720.757	31891.262
23717.812	8926.748	32644.560
24206.837	9110.805	33317.642
24803.278	9335.289	34138.567
25289.696	9518.363	34808.059
25938.792	9762.666	35701.457
26213.668	9866.122	36079.790
26886.619	10119.402	37006.021
27332.623	10287.267	37619.890

Fuente: Elaboración Propia, Plan Integral de Gestión Ambiental de Residuos Sólidos del distrito de Santiago, 2020.

En la **Tabla 28**. Se presenta la cantidad total de residuos sólidos orgánicos generados en el distrito de Santiago. Este valor se determinó mediante la suma de la generación de residuos sólidos orgánicos domiciliarios y no domiciliarios. Los cálculos se llevaron a cabo utilizando la composición porcentual de residuos domiciliarios y no domiciliarios obtenida del Plan Integral de Gestión Ambiental de Residuos Sólidos del distrito de Santiago. Además, se efectuó la proyección de la generación total de residuos sólidos orgánicos desde el año 2020 hasta el 2030 para el distrito de Santiago.

3.1.3. ESTIMACIÓN Y PROYECCIÓN DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS SEGÚN LA POBLACIÓN DEL DISTRITO DEL WANCHAQ

En la **Tabla 29**. Se exponen los datos relativos a la generación de residuos sólidos, incluyendo los resultados específicos de la generación de residuos sólidos orgánicos domiciliarios durante el periodo que abarca desde 2020 hasta 2030. Es relevante resaltar que los residuos sólidos orgánicos representan el 59.69% del total de la generación de residuos sólidos. Este porcentaje

desempeña un papel crucial en el cálculo de la proporción que se empleará en la generación de biogás en el distrito de Wanchaq.

Tabla 29. Resultados de la Proyección de la Generación de Residuos Sólidos Orgánicos Domiciliarios del distrito de Wanchaq 2020-2030

Año	Población (Hab.)	Tasa de crecimiento Poblacional (%)	Generación Per cápita Kg. /Hab./día)	Tasa de Crecimiento Per cápita (%)	Generación Residuos Sólidos (Ton/día)
2020	69655	1.70%	1.140	0.50%	80.125
2021	70839	1.60%	1.146	0.55%	81.201
2022	71902	1.60%	1.154	0.60%	82.955
2023	73052	1.50%	1.162	0.65%	84.914
2024	73929	1.50%	1.172	0.70%	86.664
2025	75038	1.40%	1.183	0.75%	88.800
2026	75715	1.40%	1.196	0.80%	90.542
2027	76775	1.20%	1.210	0.85%	92.866
2028	76630	1.20%	1.225	0.90%	93.850
2029	77549	1.10%	1.241	0.95%	96.258
2030	77708	1.10%	1.259	1.00%	97.855

Fuente: Elaboración Propia, Plan Integral de Gestión Ambiental de Residuos Sólidos del distrito de Wanchaq, 2020

En la **Tabla 29**. Se observa la generación de residuos sólidos orgánicos domiciliarios del distrito de Wanchaq, el cual es de 80.125 Toneladas por día de residuos sólidos almacenados en el 2020 y 97.855 Toneladas por día en el año 2030. Asimismo, la población inicial del año 2020 es de 69655 habitantes; al ser proyectada hasta el 2030 obteniendo 77708 habitantes en el distrito de Wanchaq. Los valores de proyección de generación de residuos sólidos del año 2020 al 2030 se calcularon mediante la **fórmula 2.7** y para la proyección de la población del año 2020 al 2030 se utilizó la **fórmula 2.2**.

3.1.3.1. PROYECCIÓN DE LA GENERACIÓN PER CÁPITA DEL DISTRITO DEL WANCHAQ

La tasa de crecimiento poblacional y per cápita son valores importantes para poder generar el cálculo de la proyección de la generación per cápita; dicho valor oscila del 0.66% al 1% de la tasa de crecimiento per cápita en el departamento del Cusco. La tasa de crecimiento per cápita tiene como finalidad, obtener los valores de la generación per cápita desde el año actual 2020 al año 2030 en condiciones de incremento de la tasa de crecimiento. Asimismo, los valores de la tasa de crecimiento de generación per cápita de residuos sólidos y la tasa de crecimiento poblacional están establecido por el Plan Integral de Gerencia Ambiental de Residuos Sólidos de la Gerencia de Medioambiente del distrito de Wanchaq.

La proyección de la generación per cápita del distrito del Wanchaq está establecida a partir de la siguiente **formula 2.6**:

$$G_{pf} = G_{pc} (1+r)^n$$

Donde:

G_{pf} = Generación per cápita futura del distrito de Wanchaq (Kg. /hab./día).

G_{pc} = Generación per cápita actual (Kg. /hab./día); el valor de la generación per cápita inicial 1.15 kg/hab./día del año 2020, este valor está establecido por la Gerencia de Medioambiente Distrital de Wanchaq.

R = Tasa de crecimiento de generación per cápita; este valor está determinado por el Plan Integral de la Gestión Ambiental de Residuos Sólidos del distrito de Santiago que varía de 0.5% a 1%.

N = Número de años del 2020 al 2030 (1 a 10 años)

**3.1.3.2. ESTIMACIÓN DE LA GENERACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS
ORGÁNICOS DEL DISTRITO DE WANCHAQ**

Tabla 30. Resultados de la Proyección de la Generación de Residuos Sólidos Orgánicos Domiciliarios del distrito de Wanchaq 2020-2030

Año	Generación Residuos Sólidos (Tonelada/día)	Generación Residuos Sólidos Orgánicos Domiciliarios Tonelada/día	Generación Residuos Sólidos Orgánicos Domiciliarios (Tonelada/año)	Porcentaje de residuos Orgánicos (%)
2020	80.125	47.827	17456.714	59.69%
2021	81.201	48.469	17691.057	
2022	82.950	49.513	18072.135	
2023	84.780	50.605	18470.806	
2024	86.664	51.730	18881.305	
2025	88.800	53.005	19346.652	
2026	90.542	54.045	19726.245	
2027	92.866	55.432	20232.541	
2028	93.850	56.019	20446.899	
2029	96.258	57.457	20971.641	
2030	97.855	58.410	21319.586	

Fuente: Elaboración Propia, Plan Integral de Gestión Ambiental de Residuos Sólidos del distrito de Wanchaq, 2020

En la **Tabla 30**, se observó la determinación de la generación de residuos sólidos orgánicos domiciliarios con proyección hasta el 2030 a partir de la población y la generación per cápita proyectada.

Se utilizó donde la composición de materia orgánica se concentra en mayor porcentaje en el distrito de Wanchaq, donde el 59.69% es de materia desechable orgánica, el cual llevara el proceso de descomposición y de generación de biogás. La determinación de los valores de la generación de residuos sólidos orgánicos domiciliarios desde el año 2020 al 2030 está establecido por el 59.69% de composición orgánica del total de los residuos sólidos del distrito de Wanchaq teniendo como valor inicial 47.827 Toneladas al día en el año 2020 y proyectado 58.410 Toneladas al día en el año 2030.

Tabla 31. Resultados de la Proyección de la Generación de Residuos Sólidos Orgánicos No Domiciliarios del distrito de Wanchaq 2020-2030

Año	Generación Residuos Sólidos (Tonelada/día)	Generación Residuos Sólidos Orgánicos No Domiciliarios Tonelada/día	Generación Residuos Sólidos Orgánicos No Domiciliarios (Tonelada/año)	Porcentaje de residuos Orgánicos (%)
2020	80.125	44.886	16383.399	56.02%
2021	81.201	45.489	16603.334	
2022	82.950	46.468	16960.982	
2023	84.780	47.494	17335.141	
2024	86.664	48.549	17720.401	
2025	88.800	49.746	18157.136	
2026	90.542	50.722	18513.390	
2027	92.866	52.023	18988.557	
2028	93.850	52.575	19189.735	
2029	96.258	53.924	19682.213	
2030	97.855	54.819	20008.765	

Fuente: Elaboración Propia, Plan Integral de Gestión Ambiental de Residuos Sólidos del distrito de Wanchaq, 2020

En la **Tabla 32**. Se proporciona la cantidad total de residuos sólidos orgánicos generados en el distrito de Wanchaq. Este valor se obtuvo mediante la suma de la generación de residuos sólidos orgánicos domiciliarios y no domiciliarios. Los cálculos se realizaron utilizando la composición porcentual de residuos domiciliarios y no domiciliarios.

Tabla 32. Resultados de la Proyección de la Generación de Residuos Sólidos Orgánicos Total del distrito de Wanchaq 2020-2030

Generación Residuos Sólidos Orgánicos Domiciliarios (Tonelada/año)	Generación Residuos Sólidos Orgánicos No Domiciliarios (Tonelada/año)	Generación Residuos Sólidos Orgánicos Total (Tonelada/año)
17456.714	16383.399	33840.113
17691.057	16603.334	34294.391
18072.135	16960.982	35033.117
18470.806	17335.141	35805.947
18881.305	17720.401	36601.706
19346.652	18157.136	37503.788
19726.245	18513.39	38239.635
20232.541	18988.557	39221.098
20446.899	19189.735	39636.634
20971.641	19682.213	40653.854
21319.586	20008.765	41328.351

Fuente: Elaboración Propia, Plan Integral de Gestión Ambiental de Residuos Sólidos del distrito de Wanchaq, 2020

3.1.4. ESTIMACIÓN Y PROYECCIÓN DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS SEGÚN LA POBLACIÓN DEL DISTRITO DE SAN SEBASTIÁN

En una proyección de la población siempre se considera el factor de la tasa o índice de crecimiento intercedido por el Instituto Nacional de Estadística e Informática, el cual a lo largo del tiempo proporciona el valor de este índice. En la región del Cusco, este factor de población en los últimos años ha variado lentamente desde el 1% a 1.7%, este valor es considerado en todo el ámbito del cusco, ya sea provincias, distritos etc.

Tabla 33. Resultados de la proyección de la generación de residuos sólidos y la población del Distrito de San Sebastián 2020-2030

Año	Población (Hab.)	Tasa de crecimiento Poblacional (%)	Generación Per cápita (kg/hab./día)	Tasa de Crecimiento Per cápita (%)	Generación Residuos Sólidos (Ton/día)
2020	138017	1.70%	0.620	0.50%	84.996
2021	140363	1.60%	0.623	0.55%	87.504
2022	142469	1.60%	0.627	0.60%	89.323
2023	144748	1.50%	0.630	0.65%	91.261
2024	146486	1.50%	0.638	0.70%	93.391
2025	148684	1.40%	0.644	0.75%	95.693
2026	150024	1.40%	0.650	0.80%	97.570
2027	152124	1.20%	0.658	0.85%	100.074
2028	151837	1.20%	0.666	0.90%	101.134
2029	153659	1.10%	0.675	0.95%	103.731
2030	153973	1.10%	0.685	1.00%	105.451

Fuente: Elaboración Propia, Plan Integral de Gestión Ambiental de Residuos Sólidos del distrito de San Sebastián, 2020

Como se observa en la **Tabla 33**, mediante la **fórmula 2.2**, se determinó el resultado de la población final en varios años proyectados desde el año 2020 con 138017 habitantes como población actual, hasta el año 2030 con 153973 habitantes. A partir de ello, se calculó la generación de residuos sólidos generales al multiplicar la población estimada con la generación per cápita estimada por habitante donde su valor inicial de generación per cápita, el cual a su vez también es proyectada por la tasa de crecimiento per cápita propuesta por el Instituto Nacional de Estadística e Informática.

3.1.4.1. PROYECCIÓN DE LA GENERACIÓN PER CÁPITA DEL DISTRITO DE SAN SEBASTIÁN

La proyección de la generación per cápita del distrito del San Sebastián está establecida a partir de la siguiente **formula 2.6**:

$$G_{pf} = G_{pc} (1+r)^n$$

Donde:

G_{pf} = Generación per cápita futura (Kg. /hab./día)

G_{pc} = Generación per cápita actual (Kg. /hab./día); el valor de la generación per cápita inicial 0.62 kg/hab./día del año 2020, este valor está establecido por la Gerencia de Medioambiente Distrital de Santiago.

R = Tasa de crecimiento de generación per cápita; este valor está determinado por el Plan Integral de la Gestión Ambiental de Residuos Sólidos del distrito de Santiago que varía de 0.5% a 1%.

N = Número de años del 2020 al 2030 (1 a 10 años)

3.1.4.2. ESTIMACIÓN DE GENERACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS ORGÁNICOS DEL DISTRITO DE SAN SEBASTIÁN

El cálculo de la generación de residuos sólidos se realizó por medio de la operación al multiplicar el número de habitantes con la generación per cápita, así mismo para la determinación de la generación de residuos sólidos orgánicos se tomará en cuenta:

- La variación de la tasa de crecimiento población y tasa de crecimiento per cápita.
- El porcentaje de materia orgánica predispuesta en la descomposición del relleno sanitario.

Tabla 34. Resultados de la Proyección de la Generación de Residuos Sólidos Orgánicos del distrito de San Sebastián 2020-2030

Año	Generación Residuos Sólidos (Ton/día)	Generación Residuos Sólidos Orgánicos (Tonelada/día)	Generación Residuos Sólidos Orgánicos (Tonelada/año)	Porcentaje de residuos Orgánicos (%)
2020	84.996	71.159	26148.474	83.72%
2021	87.504	73.258	26739.205	
2022	89.323	74.781	27295.208	
2023	91.261	76.403	27887.230	
2024	93.391	78.187	28538.279	
2025	95.693	80.114	29241.745	
2026	97.570	81.685	29815.199	
2027	100.074	83.782	30580.376	
2028	101.134	84.670	30904.429	
2029	103.731	86.843	31697.768	
2030	105.451	88.283	32223.453	

Fuente: Elaboración Propia, Plan Integral de Gestión Ambiental de Residuos Sólidos del distrito de San Sebastián ,2020

En la **Tabla 34**. Se puede ver la variación en cuanto a la generación de residuos sólidos del distrito de San Sebastián, donde la generación de residuos sólidos es de 84.996 Toneladas al día conteniendo el 83.72 % de material orgánico en su composición física y así obteniendo 71.159 Toneladas por día de residuos sólidos orgánicos en el distrito de San Sebastián.

La generación de residuos sólidos orgánicos está proyectada hasta el 2030 obteniendo 88.283 Toneladas/día de residuos sólidos y 32223.453 Toneladas/año de la generación de residuos sólidos orgánicos aprovechados.

3.1.5. ESTIMACIÓN Y PROYECCIÓN DE LOS RESIDUOS SOLIDOS SEGÚN LA POBLACIÓN DEL DISTRITO DE SAN JERÓNIMO

Como ya se sabe en las anteriores tablas, la población actual inicial es considerada para determinar el número de habitantes proyectada mediante el producto del porcentaje (%) de la tasa de crecimiento poblacional y el número de años.

Tabla 35. Resultados de la proyección de la generación de residuos sólidos y la población del Distrito de San Jerónimo 2020-2030

Año	Población (Hab.)	Tasa de crecimiento Poblacional (%)	Generación Per cápita (Kg. /Hab./día)	Tasa de Crecimiento Per cápita (%)	Generación Residuos Sólidos (Tonelada/día)
2020	48540	1.70%	0.796	0.50%	38.652
2021	49416	1.60%	0.801	0.55%	39.566
2022	50157	1.60%	0.806	0.60%	40.420
2023	50960	1.50%	0.812	0.65%	41.375
2024	51572	1.50%	0.819	0.70%	42.228
2025	52345	1.40%	0.827	0.75%	43.268
2026	52817	1.40%	0.835	0.80%	44.117
2027	53557	1.20%	0.845	0.85%	45.250
2028	53455	1.20%	0.855	0.90%	45.729
2029	54097	1.10%	0.867	0.95%	46.903
2030	54207	1.10%	0.880	1.00%	47.680

Fuente: Elaboración Propia, Plan Integral de Gestión Ambiental de Residuos Sólidos del distrito de San Jerónimo, 2020

Teniendo como población actual o inicial 2020 de 48590 habitantes en el distrito de San Jerónimo se realizó la proyección de la población del San Jerónimo del año 2020 al 2030 mediante la **fórmula 2.2**. Los valores de la generación de residuos sólidos están determinados a través de la **fórmula 2.7**.

3.1.5.1. PROYECCIÓN DE LA GENERACIÓN PER CÁPITA DEL DISTRITO DE SAN JERÓNIMO

La proyección de generación per cápita se determinó mediante la **fórmula 2.4**, donde a partir se proyectó a partir de la generación per cápita inicial de 0.796 kg/hab./día del distrito de San Jerónimo. Para poder hallar estos resultados de proyecciones se utilizó la tasa de crecimiento per cápita donde este valor está determinado por el Instituto Nacional de Estadística e Informática dada a nivel departamental del Cusco, el cual sigue variando desde los 0.5% hasta el 1%.

3.1.5.2. ESTIMACIÓN DE GENERACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS

ORGÁNICOS DEL DISTRITO DE SAN JERÓNIMO

En la **fórmula 2.5** se emplea en las proyecciones de la generación de residuos sólidos orgánicos, al tener el producto del porcentaje del 64.15% de la generación de residuos sólidos total, posteriormente se obtuvo el resultado de la generación de materia orgánica proyectada hasta el 2030 teniendo valores entre 12 a 15 toneladas por día de material de descomposición para la generación del biogás.

Tabla 36. Resultados de la Proyección de la Generación de Residuos Sólidos Orgánicos del distrito de San Jerónimo 2020-2030

Año	Generación Residuos Sólidos (Ton/día)	Generación Residuos Orgánicos (Tonelada/día)	Generación Residuos Orgánicos (Tonelada/año)	Porcentaje de Residuos Orgánicos (%)
2020	38.652	24.795	9050.250	64.15%
2021	39.566	25.382	9264.254	
2022	40.420	25.930	9464.296	
2023	41.375	26.542	9687.942	
2024	42.228	27.089	9887.640	
2025	43.268	27.757	10131.209	
2026	44.117	28.301	10329.938	
2027	45.250	29.028	10595.180	
2028	45.729	29.335	10707.263	
2029	46.903	30.088	10982.239	
2030	47.680	30.587	11164.259	

Fuente: Elaboración Propia, Plan Integral de Gestión Ambiental de Residuos Sólidos del distrito de San Jerónimo, 2020

En la **Tabla 36**. Como en las demás tablas los valores de proyección de la generación de materia orgánica han sido predispuestos tomando en cuenta la composición de materia orgánica que contiene en porcentaje en los residuos sólidos, así han sido multiplicados con el porcentaje dado.

3.1.6. ESTIMACIÓN Y PROYECCIÓN DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS SEGÚN LA POBLACIÓN DE LOS DISTRITOS CERCANOS DE LA REGIÓN DEL CUSCO

Dentro del departamento y ciudad del Cusco existe alrededor de ella, diferentes distritos de donde se recolecta materia de residuos sólidos urbanos para su aprovechamiento. Así mismo se tomó en cuenta lo diferentes sectores de recolección y generación de los residuos sólidos urbanos de las principales lugares y pequeños distritos alejadas a la ciudad del Cusco, como son: Saylla, Poroy, Ccorca y otros.

3.1.6.1. ESTIMACIÓN Y PROYECCIÓN DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS SEGÚN LA POBLACIÓN EN EL DISTRITO DE SAYLLA

Tabla 37. Resultados de la proyección de la generación de residuos sólidos y la población del Distrito de Saylla 2020 – 2030

Año	Población (Hab.)	Tasa de crecimiento Poblacional	Generación Per cápita (Kg. /Hab./día)	Tasa de Crecimiento Per cápita (%)	Generación Residuos Sólidos (Ton/día)
2020	9146	1.70%	0.221	0.50%	1.707
2021	9292	1.60%	0.222	0.55%	2.065
2022	9441	1.60%	0.224	0.60%	2.112
2023	9564	1.50%	0.225	0.65%	2.155
2024	9707	1.50%	0.227	0.70%	2.206
2025	9804	1.40%	0.229	0.75%	2.249
2026	9942	1.40%	0.232	0.80%	2.305
2027	9942	1.20%	0.234	0.85%	2.331
2028	10062	1.20%	0.237	0.90%	2.389
2029	10092	1.10%	0.241	0.95%	2.429
2030	10203	1.10%	0.244	1.00%	2.491

Fuente: Elaboración Propia, Plan Integral de Gestión Ambiental de Residuos Sólidos de la provincia del Cusco, 2020

En la **Tabla 37**. Se observa la proyección de la población del distrito de Saylla mediante de la **fórmula 2.2**. Asimismo, la generación de residuos sólidos está determinada través de la

fórmula 2.7 teniendo en cuenta los valores y proyecciones de la tasa de crecimiento per cápita y la generación per cápita de los residuos sólidos.

La población inicial del año 2020 es de 9146 habitantes en el distrito de Saylla el cual al aplicar en la **fórmula 2.2** junto a la tasa de crecimiento población del distrito se obtuvo los valores de población proyectados hasta el 2030.

A. ESTIMACIÓN DE GENERACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS ORGÁNICOS DEL DISTRITO DE SAYLLA

Dentro de los valores de generación de residuos sólidos urbanos se tiene la generación de materia orgánica dentro del distrito de Saylla, para su proceso de descomposición de generación de biogás al ser incluida en el análisis de los residuos sólidos urbanos de la ciudad del Cusco.

Tabla 38. Resultados de la Proyección de la Generación de Residuos Sólidos Orgánicos del distrito de Saylla.

Año	Generación Residuos Sólidos Tonelada/día	Generación Residuos Orgánicos Tonelada/día	Generación Residuos Orgánicos Tonelada/año	Porcentaje de Residuos Orgánicos (%)
2020	1.707	0.930	339.512	54.50%
2021	2.065	1.125	410.760	
2022	2.112	1.151	420.045	
2023	2.155	1.175	428.699	
2024	2.206	1.202	438.829	
2025	2.249	1.226	447.433	
2026	2.305	1.256	458.462	
2027	2.331	1.271	463.775	
2028	2.389	1.302	475.211	
2029	2.429	1.324	483.092	
2030	2.491	1.358	495.494	

Fuente: Elaboración Propia, Plan Integral de Gestión Ambiental de Residuos Sólidos de la provincia del Cusco, 2020

En la **Tabla 38**. Se realiza la determinación de la cantidad de materia orgánica contenida en los residuos sólidos urbanos, hallando los valores de la generación de materia sólida urbana y realizando su porcentaje de multiplicación del 54.50%, sin embargo el valor del porcentaje de

residuos sólidos no fue recolectado del Estudio de Caracterización de los Residuos Sólidos de la provincia del Cusco, tan solo la determinación similar de recolección de datos del distrito de San Jerónimo, el cual se encuentra más cerca al lugar de recolección del distrito de Saylla.

B. ESTIMACIÓN Y PROYECCIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS SEGÚN LA POBLACIÓN EN EL DISTRITO DE POROY

Al ser un distrito un poco fuera de la ciudad del Cusco, su recolección y almacenamiento de residuos sólidos urbanos abarca y está determinada por el distrito de Santiago, al ser el distrito dentro de la ciudad del Cusco y más próximo al distrito de Poroy.

Tabla 39. Resultados de la proyección de la generación de residuos sólidos y la población del Distrito de Poroy 2020-2030

Año	Población (Hab.)	Tasa de crecimiento Poblacional (%)	Generación Per cápita (Kg. /Hab./día)	Tasa de Crecimiento Per cápita (%)	Generación Residuos Sólidos (Ton/día)
2020	13497	1.70%	0.295	0.50%	4.051
2021	13713	1.60%	0.297	0.55%	4.068
2022	13932	1.60%	0.299	0.60%	4.160
2023	14114	1.50%	0.301	0.65%	4.245
2024	14325	1.50%	0.303	0.70%	4.346
2025	14469	1.40%	0.306	0.75%	4.431
2026	14671	1.40%	0.309	0.80%	4.540
2027	14672	1.20%	0.313	0.85%	4.593
2028	14848	1.20%	0.317	0.90%	4.706
2029	14894	1.10%	0.321	0.95%	4.784
2030	15057	1.10%	0.326	1.00%	4.907

Fuente: Elaboración Propia, Plan Integral de Gestión Ambiental de Residuos Sólidos de la provincia del Cusco, 2020

La proyección de la población de distrito de Poroy está determinada por la **fórmula 2.2**, el cual, mediante la población inicial, la tasa de crecimiento poblacional y los números de años se determinó la proyección de la población desde el año 2020 al 2030.

En la **Tabla 39**. Se realizó la proyección de la generación de residuos sólidos del año 2020 al 2030 a través de la generación per cápita y la población del distrito de Poroy, mediante la **fórmula 2.7**

**a. ESTIMACIÓN DE GENERACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS
ORGÁNICOS DEL DISTRITO DE POROY**

Tabla 40. Resultados de la Proyección de la Generación de Residuos Sólidos Orgánicos del distrito de Poroy

Año	Generación Residuos Sólidos (Tonelada/día)	Generación Residuos Sólidos Orgánica (Tonelada/día)	Generación Residuos Sólidos Orgánica (Tonelada/año)	Porcentaje de residuos Orgánicos (%)
2020	4.051	1.418	517.515	35.00%
2021	4.068	1.424	519.632	
2022	4.160	1.456	531.378	
2023	4.245	1.486	542.325	
2024	4.346	1.521	555.140	
2025	4.431	1.551	566.024	
2026	4.540	1.589	579.977	
2027	4.593	1.607	586.699	
2028	4.706	1.647	601.165	
2029	4.784	1.674	611.135	
2030	4.907	1.717	626.824	

Fuente: Elaboración Propia, Plan Integral de Gestión Ambiental de Residuos Sólidos de la provincia del Cusco, 2020

El porcentaje de residuos orgánicos es de 35% ya que la generación de desechos sólidos proveniente del distrito de Poroy es similar en el número de población, es por eso que se consideró el valor de fracción de materia orgánica de distrito de Santiago.

Los resultados fueron del producto de la fracción de materia orgánica del 35% con el valor de la producción de residuos sólidos. La generación de residuos sólidos en el año 2020 es de 4.051 Toneladas/ día y 517.515 Toneladas/año, así mismo la generación de residuos sólidos orgánicos aprovechados es de 1.418 Toneladas/ día. Asimismo, la proyección de generación de residuos sólidos para el año 2030 es de 4.907 Toneladas/día y la generación de residuos sólidos orgánicos es de 1.717 Toneladas/ día y 626.824 Toneladas/año del distrito de Poroy.

**C. ESTIMACIÓN Y PROYECCIÓN DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS SEGÚN LA
POBLACIÓN DEL DISTRITO DE CCORCA**

La población actual 2020 es la principal característica para la evaluación de las proyecciones de la población y su producción de residuos sólidos urbanos en años posteriores.

Tabla 41. Resultados de la proyección de la generación de residuos sólidos y la población del distrito de Ccorca 2020-2030

Año	Población (Hab.)	Tasa de crecimiento Poblacional (%)	Generación Per cápita (Kg. /Hab./día)	Tasa de Crecimiento Per cápita (%)	Generación Residuos Sólidos (Tonelada/día)
2020	2407	1.70%	0.753	0.50%	1.813
2021	2446	1.60%	0.757	0.55%	1.852
2022	2485	1.60%	0.809	0.60%	2.011
2023	2517	1.50%	0.768	0.65%	1.933
2024	2555	1.50%	0.775	0.70%	1.979
2025	2580	1.40%	0.782	0.75%	2.018
2026	2616	1.40%	0.790	0.80%	2.067
2027	2617	1.20%	0.799	0.85%	2.091
2028	2648	1.20%	0.809	0.90%	2.143
2029	2656	1.10%	0.820	0.95%	2.179
2030	2685	1.10%	0.832	1.00%	2.234

Fuente: Elaboración Propia, Plan Integral de Gestión Ambiental de Residuos Sólidos de la provincia del Cusco, 2020

En la **Tabla 41**. La población del distrito de Ccorca es de 2407 habitantes en el año 2020 asimismo se realizó la proyección de la población del año 2030 el cual es 2685 habitantes; dicho valor está determinado a partir de la **fórmula 2.2**. La generación de residuos sólidos se calculó mediante la **fórmula 2.7**, el cual es el producto de la población inicial y la generación per cápita, obteniendo 1.813 Toneladas/día de residuos sólidos en el año 2020 y 2.234 Toneladas/día de residuos sólidos en el año 2030. La información ha sido compartida por la Gerencia de Medioambiente de la municipalidad distrital de San Jerónimo.

**D. ESTIMACIÓN DE GENERACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS ORGÁNICOS DEL
DISTRITO DE CCORCA**

Tabla 42. Resultados de la Proyección de la Generación de Residuos Sólidos Orgánicos del distrito de Ccorca 2020-2030

Año	Generación Residuos Sólidos (Tonelada/día)	Generación Residuos Sólidos Orgánicos (Tonelada/día)	Generación Residuos Sólidos Orgánicos (Tonelada/año)	Porcentaje de residuos Orgánicos (%)
2020	1.813	1.128	411.649	62.20%
2021	1.852	1.152	420.536	
2022	2.011	1.251	456.552	
2023	1.933	1.202	438.901	
2024	1.979	1.231	449.272	
2025	2.018	1.255	458.081	
2026	2.067	1.286	469.373	
2027	2.091	1.301	474.813	
2028	2.143	1.333	486.520	
2029	2.179	1.355	494.589	
2030	2.234	1.390	507.286	

Fuente: Elaboración Propia, Plan Integral de Gestión Ambiental de Residuos Sólidos de la provincia del Cusco, 2020

La generación de residuos sólidos orgánicos del distrito de Ccorca en el año 2020 es de 1.128 Toneladas/día y 411.649 Toneladas/año; cuyo valor ha sido cálculo a partir del 62.20% de materia orgánica contenida en la composición física de la producción de residuos sólidos del distrito del Ccorca.

3.1.7. GENERACIÓN TOTAL DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS

Para la determinación de la cantidad total de producción de residuos sólidos orgánicos han sido consideradas, los 5 distritos de la ciudad del Cusco como son: Cusco, Santiago, Wánchaq, San Sebastián y San Jerónimo. Así mismo también existe distritos alejados de la ciudad del Cusco los cuales son: Saylla, Poroy y Ccorca.

Tabla 43. Resultados de la Generación Total de Residuos Sólidos Orgánicos de los distritos de la provincia del Cusco

Año	Cusco Tonelada/año	Santiago Tonelada/año	Wanchaq Tonelada/año	San Sebastián Tonelada/año	San Jerónimo Tonelada/año	Saylla Tonelada/año	Poroy Tonelada/año	Ccorca Tonelada/año	Total Tonelada/año
2020	30763.114	30525.044	33840.113	26148.474	9050.25	339.512	517.515	411.649	131595.671
2020-2021	30932.311	31217.205	34294.391	26739.205	9264.254	410.76	519.632	420.536	133798.294
2021-2022	31133.378	31891.262	35033.117	27295.208	9464.296	420.045	531.378	456.552	136225.236
2022-2023	31366.902	32644.56	35805.947	27887.23	9687.942	428.699	542.325	438.901	138802.506
2023-2024	31633.567	33317.642	36601.706	28538.279	9887.64	438.829	555.14	449.272	141422.075
2024-2025	31934.165	34138.567	37503.788	29241.745	10131.209	447.433	566.024	458.081	144421.012
2025-2026	32269.592	34808.059	38239.635	29815.199	10329.938	458.462	579.977	469.373	146970.235
2026-2027	32640.861	35701.457	39221.098	30580.376	10595.18	463.775	586.699	474.813	150264.259
2027-2028	33049.099	36079.79	39636.634	30904.429	10707.263	475.211	601.165	486.52	151940.111
2028-2029	33495.557	37006.021	40653.854	31697.768	10982.239	483.092	611.135	494.589	155424.255
2029-2030	33981.616	37619.89	41328.351	32223.453	11164.259	495.494	626.824	507.286	157947.173

Fuente: Elaboración Propia, Plan Integral de Gestión Ambiental de Residuos Sólidos de la provincia del Cusco, Gerencia de Medioambiente de la Municipalidad Provincial del Cusco, 2020

En la **Tabla 43.** se realizó los cálculos de la generación de residuos sólidos urbanos de cada distrito sin embargo los distritos de Saylla, Poroy y Ccorca como espacios apartados de la capital del Cusco y la mínima cantidad de población o habitantes proporciona la reducida cantidad de producción de residuos sólidos urbanos por ende la producción de biogás será menor. Consecuentemente, los valores de la generación absoluta de materia sólida urbana aumento, obteniendo 293.405 Ton/día \approx 107092.842 Ton/año Toneladas de residuos sólidos urbanos anualmente en el año 2020. Las proyecciones estimadas hasta el 2030 ha ido incrementándose hasta llegar a 361.608 Toneladas/día \approx 131986.933 Tonelada /año de materia sólida urbana acumulada en la provincia del Cusco.

3.2. GENERACIÓN DE BIOGÁS DE LA DESCOMPOSICIÓN DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS

Para el cálculo del biogás producto de la descomposición de la materia orgánica se utilizó aplicando el modelo Scholl Canyon, conforme van pasando los años y el tiempo de descomposición se va incrementando la generación de biogás en el relleno sanitario desde el año 2020 hasta el 2030 sin embargo el 2020 ha sido considerado como el día 0 es decir que no existe producción de biogás, teniendo un crecimiento ascendentemente desde el año 0 hasta el año 10.

3.2.1. DETERMINACIÓN DEL FACTOR DE CORRECCIÓN PARA EL METANO (*MCF*)

Para vertederos con un manejo de recolección de residuos sólidos urbanos y con una altura de profundidad mayor a los 5 metros, se considera el valor de 1 como factor de corrección del metano.

Tabla 44. Resumen de la composición porcentual de los residuos sólidos de los distritos de la provincia del Cusco

COMPOSICION FISICA DE LOS RESIDUOS SOLIDOS DE LA REGION DEL CUSCO								
TIPOS DE RESIDUOS SOLIDOS	CUSCO	SANTIAGO	WANCHAQ	SAN SEBASTIAN	SAN JERONIMO	SAYLLA	POROY	CCORCA
	Composicion Porcentual(%)							
Residuo Organico de Alimentos	65.83	66.62	64.38	67.37	66.35	52.842	39.674	66.11
Residuos Organico de Jardines	26.15	25	18.41	24.49	21.43	17.4852	13.58	23.096
Madera, Follaje	10.96	8.41	8.74	9.27	9.37	7.346	5.284	9.35
Papel	7.99	9.64	10.36	11.46	12.27	8.8868	6.292	10.344
Carton	9.47	10.19	7.49	7.91	8.13	6.4336	5.118	8.638
Vidrio	1.04	1.67	2.22	1.62	1.49	1.3876	1.102	1.608
Plastico PET	3	1.25	3.12	2.89	1.85	2.0564	1.452	2.422
Plastico Duro	0.86	1.28	1.92	0.33	4.11	1.612	0.706	1.7
Bolsas	3.69	4.62	5.66	1.89	3.39	2.958	2.434	3.85
Tetrapack	0.75	2.3	0.54	0.03	0	0.2588	0.574	0.724
Tecnopor y similares	0.56	2.27	1.25	0.66	0.75	0.7516	0.836	1.098
Metal	1.14	3.48	1.57	1.59	1.73	1.3584	1.328	1.902
Telas,Textiles	10.45	10.25	11.73	10.32	10.36	8.6064	6.46	10.622
Caucho,Cuero y Jebe	1.5	4.89	2.87	2.6	2.44	2.154	2.072	2.86
Pilas	0.06	0.28	0.23	0.01	0.89	0.2848	0.104	0.294
Restos de Medicina	0.08	1.63	0.39	0	0.1	0.186	0.404	0.44
Residuos Sanitarios	11.83	2.31	5.64	3.83	14.61	6.3448	2.356	7.644
Residuos Inertes	1.72	2.61	1.05	1.23	2.02	1.2052	0.978	1.726
Envolturas	0.45	1.39	0.97	0.46	0.12	0.4456	0.564	0.678
Latas	0.86	0.97	1.2	1.15	0.39	0.7308	0.664	0.914
Huesos	0.09	0.45	0.35	0.94	0.71	0.5016	0.348	0.508
Otros	0.1	0.4	0.42	0.35	0.15	0.2408	0.234	0.284

Fuente: Elaboración Propia, Estudio de Caracterización de Residuos Sólidos del Plan Integral de Gestión Ambiental de Residuos Sólidos de la provincia del Cusco, 2020

1.1.1. DETERMINACIÓN DEL CARBONO ORGÁNICO DEGRADABLE DEL RESIDUO SOLIDO (DOC)

Se realizó los cálculos del carbono orgánicos degradable de los residuos sólidos a partir de la composición porcentual de residuos sólidos de los 8 distritos, teniendo los diferentes tipos de residuos sólidos clasificados, así obteniendo los valores a través de la fórmula siguiente:

a. Carbono orgánico degradable del residuo solido del distrito del Cusco

$$DOC = 0.40 \times (A) + 0.17 \times (B) + 0.15 \times (C) + 0.30 \times (D)$$

$$DOC = 0.40 \times (27.91) + 0.17 \times (26.15) + 0.15 \times (65.83) + 0.30 \times (10.96)$$

$$DOC = 28.812\%$$

$$DOC = 0.28812$$

Los valores de carbono orgánico degradable del residuo solido se determinaron para los distritos de Cusco, Santiago, Wanchaq, San Sebastián, San Jerónimo, Ccorca, Poroy y Saylla, a través de la composición porcentual de residuos sólidos orgánicos degradables.

Tabla 45. Valores de carbonos orgánicos degradables de residuos sólidos generados de los distritos del Cusco

DISTRITOS DEL CUSCO	CARBONO ORGÁNICO DEGRADABLE DE RESIDUOS SOLIDOS(DOC)
CUSCO	0.28812
SANTIAGO	0.28798
WANCHAQ	0.44269
SAN SEBASTIÁN	0.28926
SAN JERÓNIMO	0.28711
SAYLLA	0.22673
POROY	0.16993
CCORCA	0.28489

Fuente: Elaboración Propia, Estudio de Caracterización de Residuos Sólidos del Plan Integral de Gestión Ambiental de Residuos Sólidos de la provincia del Cusco, 2020

1.1.2. DETERMINACIÓN DE LA FRACCIÓN DEL CARBONO ORGÁNICO DEGRADABLE (DOC_f)

Según (IPCC, 2006) la variable T es la temperatura ambiente que es igual a 35°C asignada por defecto de una zona anaeróbica:

$$DOC_f = 0.014 \times T + 0.28$$

$$DOC_f = 0.014 \times 35 + 0.28$$

$$DOC_f = 0.77$$

1.1.3. DETERMINACIÓN DEL POTENCIAL DE GENERACIÓN DEL METANO

Se determinó la producción de biogás contenida en la materia sólida urbana al establecer el potencial de generación del metano, el cual se calculó por medio de la **Ecuación 2.9**:

Donde:

L_0 = Potencial de generación de metano (Gg de CH₄/Gg de residuos)

MCF = Factor de Corrección para el metano (Fracción)

DOC = Carbono orgánico degradable en la basura (Gg C/Gg de residuos)

DOC_f = Fracción de carbono orgánico degradable que se convierte a gas asimilado

F = Fracción del metano (CH₄) en el gas gestionado del vertedero generado.

$\frac{16}{12}$ = Constante estequiométrica (CH₄/C)

a) Factor de Corrección para el metano (MCF)

El factor de corrección del metano o factor de corrección de la gestión de los desechos se refiere a la variación de generación de metano de un vertedero controlado respecto al vertedero no controlado ya que un vertedero controlado de residuos sólidos urbanos genera más cantidad de

desechos urbanos y por consiguiente genera mayor cantidad de metano, tomando en cuenta el grado de degradación anaeróbica que posee el vertedero por consiguiente el valor del factor de corrección para el metano del vertedero del relleno sanitario del Haquira es igual a 1.

b) Fracción del metano en el gas gestionado del vertedero (F)

Comúnmente, se utiliza un valor predeterminado de 0.45, ya que, en la composición física del gas, el 45% corresponde al metano en un bajo escenario.

Tabla 46. Componentes del biogás de residuos sólidos

Componente	Porcentaje
Metano (CH ₄)	45-65 %
Dióxido de Carbono (CO ₂)	35-55%
Oxígeno(O ₂)	0-5%
Nitrógeno(N ₂)	0-20%
Hidrogeno(H ₂)	0-1%
Humedad(H ₂ O)	Saturado
Monóxido de Carbono (CO)	Trazas
Amoniac (NH ₃)	Trazas
Sulfuro de Hidrogeno(H ₂ S)	0.5-100 ppm
Compuestos Orgánicos	5 ppm

Fuente: Elaboración Propia, Tesis, Ronald E. Chonlón Velicoso

c) Constante Estequiométrica

Es el cociente del peso molecular donde su valor típico es 16/12, cuyos pesos moleculares son del metano y carbono (CH₄/C) adimensional.

Para calcular el potencial de generación de metano, se tomarán en cuenta los valores calculados de carbono orgánico degradable presentes en los residuos sólidos, los cuales fueron determinados en los escenarios de los distritos de Cusco, Santiago, Wanchaq, San Sebastián, San Jerónimo, Ccorca, Poroy y Saylla según se detalla en la **Tabla 45**. De igual manera, en el siguiente cálculo y en la tabla 2, se evidencia la determinación del potencial de generación de metano para el distrito de Cusco. Los valores cruciales para este cálculo se basarán en el carbono orgánico degradable, con un valor específico de 0.28812, y la

fracción del carbono orgánico degradable determinada en los residuos sólidos, la cual es 0.77. A continuación, se ha calculado el potencial de generación de metano para el distrito de Cusco utilizando la siguiente fórmula.

$$L_0 = MCF \times DOC \times DOC_f \times F \times \frac{16}{12}$$

$$L_0 = 1 \times 0.28812 \times 0.77 \times 0.45 \times \frac{16}{12} \times 1000$$

$$L_0 = 133.11144 \frac{m^3}{Tonelada}$$

Igualmente, se llevó a cabo el cálculo del potencial de generación del metano utilizando el mismo procedimiento y la fórmula para los distritos de Santiago, Wanchaq, San Sebastián, San Jerónimo, Ccorca, Poroy y Saylla.

Tabla 47. Calculo del potencial de generación de metano del distrito del Cusco

DISTRITOS DEL CUSCO	POTENCIAL DE GENERACIÓN DE METANO (m ³ /Tonelada)
CUSCO	133.11144
SANTIAGO	133.04676
WANCHAQ	204.52139
SAN SEBASTIÁN	133.63720
SAN JERÓNIMO	132.64297
SAYLLA	104.75066
POROY	78.50720
CCORCA	131.62112

Fuente: Elaboración Propia.

1.1.4. DETERMINACIÓN DEL BIOGÁS EN EL MODELO SCHOLL CANYON

La determinación del valor de biogás generado se realiza mediante la aplicación de la **fórmula 2.8**, sobre el cual se tiene parámetro de cálculo, la generación total de los residuos sólidos orgánicos producidos 293.405 Toneladas/día, así como el valor de la constante de la generación de metano $k=0.05$ 1/año y el potencial de generación del metano $L_0=181.3093$ m³/Toneladas

anualmente. Ahora se mostrará a continuación el cálculo del flujo de metano-biogás del año actual 2020, donde los valores por defecto son:

a) Constante o Índice de la generación de metano(k)

La constante de generación de metano se refiere al periodo o tiempo de vida de los residuos o desechos. Asimismo, según el modelo mexicano de biogás versión 2.0 ha definido valores de k para las cuatro categorías de degradación de residuos: muy rápida (DR); moderadamente rápida (DMR); moderadamente lenta (DML) y muy lenta (DL) específicamente adaptados a cada una de las cinco regiones climáticas de México. Estos valores de k se ajustan según la precipitación promedio anual en la región donde se encuentra el relleno sanitario, el tipo de residuo y las características climáticas, tal como se indica en SCS Engineers (Ingeniería y consultoría medioambiental, 2009). En el caso de la Región 5, que abarca los valores de k que son: DR k=0.10, DMR k=0.05, DML k=0.20 y DL k=0.10. Estas cifras específicas se determinaron mediante una adaptación de los valores estándar del modelo original, considerando el porcentaje de residuos clasificados en cada una de las categorías mencionadas en el área de estudio.

1.1.5. CAUDAL DEL METANO DE LOS RESIDUOS SOLIDOS ORGÁNICOS

El flujo de metano se calcula utilizando la fórmula proporcionada. El proceso se inicia con la evaluación para el distrito de Cusco, seguido por los distritos de Santiago, Wanchaq, San Sebastián, San Jerónimo, Ccorca, Poroy y Saylla, abarcando del año 2020 al 2021. Finalmente, se llevará a cabo una proyección hasta el año 2030.

$$Q_{CH_4} = k \times L_0 \times m_i \times e^{-k \cdot ti}$$

Donde:

Q_{CH_4} = Metano producido en el año 2021 en el distrito de Cusco, $\left[\frac{m^3 CH_4}{año}\right]$

k = Constante de generación de metano, $\frac{1}{año} = 0.05 \left[\frac{1}{año}\right]$

L_0 = Potencial de generación de metano del distrito del Cusco, $\left[\frac{m^3 CH_4}{t}\right] = 133.11144 \left[\frac{m^3}{año}\right]$

m_i = Masa depositada en el año 2020 al 2021, t al año = 30763.114 Toneladas

$t_i = t_{2020}$ = Periodo de disposición de los residuos en el relleno sanitario = 1 año.

e = Logaritmo natural, adimensional.

$$Q_{CH_4} = k \times L_0 \times m_i \times e^{-k \cdot t_i}$$

$$Q_{CH_4} = 0.05 \frac{1}{año} \times 133.11144 \frac{m^3}{Toneladas} \times 30763.114 \text{ Toneladas} \times e^{-0.05 \cdot 1}$$

$$Q_{CH_4 \text{ primer año}(2020-2021)} = 194760.53406 \frac{m^3}{Año}$$

El caudal de metano generado es de 194760.53406 m³/año del año 2020 al 2021, considerando la degradación orgánica desde el año 2020 hasta año 2021 por consiguiente siendo 1 año de generación de metano en el relleno sanitario de Haquira.

Tabla 48. Flujo del Caudal del metano generado de residuos sólidos orgánicos del 2020 al 2021

DISTRITOS DEL CUSCO	CAUDAL DEL METANO DE RESIDUOS SOLIDOS ORGÁNICOS (2020-2021) m ³ /año
CUSCO	194760.534
SANTIAGO	193159.415
WANCHAQ	329174.231
SAN SEBASTIÁN	166199.221
SAN JERÓNIMO	57095.266
SAYLLA	1691.481
POROY	1932.358
CCORCA	2576.961

Fuente: Elaboración Propia.

Luego, se efectuó el cálculo de los flujos de metano, teniendo en cuenta los años de permanencia hasta el año 2030 y considerando la cantidad de residuos sólidos orgánicos generados en el vertedero del relleno sanitario de Haquira de la provincia del Cusco, a medida que se proyectan estos años hasta el 2030 para cada distrito.

$$Q_{CH_4} = k \times L_0 \times m_i \times e^{-k \cdot t_i}$$

Donde:

$$Q_{CH_4} = \text{Metano producido en el año } i \frac{m^3 CH_4}{\text{año}},$$

$$k = \text{Constante de generación de metano, } \frac{1}{\text{año}} = 0.05 \left[\frac{1}{\text{año}} \right]$$

$$L_0 = \text{Potencial de generación de metano, } \left[\frac{m^3 CH_4}{t} \right] = 133.11144 \left[\frac{m^3}{\text{año}} \right]$$

$$m_i = \text{Masa depositada en el año } i, t \text{ al año} = 30932.311 \text{ Toneladas}$$

$$t_i = \text{Periodo de disposición de los residuos en el relleno sanitario} = 1 \text{ año}$$

$$e = \text{Logaritmo natural, adimensional.}$$

$$Q_{CH_4} = 0.05 \times 133.11144 \times 30932.311 \times e^{-0.05 \cdot 1}$$

$$Q_{CH_4} = 195831.716 \frac{m^3}{\text{Año}}$$

El caudal de metano generado es de 195831.716 m³/año del distrito del Cusco del año 2021 al 2022, considerando un año de haber generado el flujo de caudal en el vertedero en el proceso de degradación orgánica de los residuos sólidos orgánicos.

Se llevaron a cabo las proyecciones de la producción de metano a partir de residuos sólidos orgánicos para el período comprendido entre 2021 y 2031. Se calculó el flujo volumétrico anual en los ocho distritos previamente mencionados, y al final se obtuvo la producción total de metano sumando los caudales individuales de cada distrito para cada año.

Tabla 49. Calculo de la proyección de la generación del biogás de los distritos de la provincia del Cusco

Año	Cusco m ³ /año	Santiago m ³ /año	Wanchaq m ³ /año	San Sebastián m ³ /año	San Jerónimo m ³ /año	Saylla m ³ /año	Poroy m ³ /año	Ccorca m ³ /año	Total m ³ /año
2020	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2020-2021	194760.534	193159.415	329174.231	166199.221	57095.266	1691.481	1932.358	2576.961	946589.468
2021-2022	195831.716	197539.341	333593.146	169953.896	58445.352	2046.446	1940.263	2632.595	961982.755
2022-2023	197104.667	201804.706	340778.984	173487.841	59707.356	2092.704	1984.122	2858.058	979818.438
2023-2024	198583.101	206571.499	348296.563	177250.722	61118.270	2135.819	2024.997	2747.562	998728.535
2024-2025	200271.351	210830.695	356037.180	181388.778	62378.104	2186.288	2072.847	2812.485	1017977.728
2025-2026	202174.430	216025.426	364812.037	185859.995	63914.707	2229.154	2113.487	2867.630	1039996.865
2026-2027	204298.010	220261.904	371969.870	189504.858	65168.427	2284.102	2165.586	2938.319	1058591.076
2027-2028	206648.505	225915.237	381516.893	194368.309	66841.758	2310.571	2190.686	2972.374	1082764.333
2028-2029	209233.050	228309.290	385558.952	196427.984	67548.855	2367.547	2244.701	3045.661	1094736.040
2029-2030	212059.565	234170.387	395453.795	201470.432	69283.595	2406.811	2281.928	3096.174	1120222.686
2029-2031	215136.793	238054.889	402014.856	204811.676	70431.904	2468.599	2340.509	3175.658	1138434.883

Fuente: Elaboración Propia, Estudio de Caracterización de Residuos Sólidos del Plan Integral de Gestión Ambiental de Residuos Sólidos de la provincia del Cusco, 2020

Los resultados de la generación de metano (Q_{CH_4}) fueron aplicados, al sustituir los valores de la generación total de residuos sólidos, el potencial de generación de metano y la constante de la generación de metano.

Tabla 50. Generacion del Biogás en m³/hora

Numero de años	Año	Caudal de metano producido (m ³ /año)	Caudal de biogas (m ³ /año)	Composicion del biogas(Metano)
0	2020	0	0	45%
1	2020-2021	946589.468	2103532.15	
2	2021-2022	961982.755	2137739.46	
3	2022-2023	979818.438	2177374.31	
4	2023-2024	998728.535	2219396.74	
5	2024-2025	1017977.728	2262172.73	
6	2025-2026	1039996.865	2311104.15	
7	2026-2027	1058591.076	2352424.61	
8	2027-2028	1082764.333	2406142.96	
9	2028-2029	1094736.040	2432746.76	
10	2029-2030	1120222.686	2489383.75	
11	2030-2031	1138434.883	2529855.29	

Fuente: Elaboración Propia, Estudio de Caracterización de Residuos Sólidos del Plan Integral de Gestión Ambiental de Residuos Sólidos de la provincia del Cusco, 2020

La producción de biogás se ha determinado en un 45% a partir de la generación de metano, dado que la composición físico-química del biogás incluye un rango del 45 al 65% de metano. Después de calcular los caudales de biogás generados anualmente desde 2020 hasta 2030, se procedió a convertir los volúmenes de metros cúbicos por año a metros cúbicos por hora (m³/año a m³/hora).

Tabla 51. Conversión de unidades de la generación del biogás total

Generación del Biogás Total		
Año	m ³ /año	m ³ /hora
2020	0	0
2020-2021	2103532.150	240.129
2021-2022	2137739.460	244.034
2022-2023	2177374.310	248.559
2023-2024	2219396.740	253.356
2024-2025	2262172.730	258.239
2025-2026	2311104.150	263.825
2026-2027	2352424.610	268.542
2027-2028	2406142.960	274.674
2028-2029	2432746.760	277.711
2029-2030	2489383.750	284.176
2030-2031	2529855.290	288.796

Fuente: Elaboración Propia, Estudio de Caracterización de Residuos Sólidos del Plan Integral de Gestión Ambiental de Residuos Sólidos de la provincia del Cusco, 2020

La producción del biogás generado desde el año al 2030 ha establecido el flujo volumétrico del residuo sólidos orgánico mediante su degradación anaeróbica, cuyo proceso es la biometalización de los residuos sólidos orgánicos en ausencia del oxígeno, el cual actuará de manera eficaz y completa en el vertedero o biodigestor del relleno sanitario de Haquira.

1.2. EFICIENCIA DE RECUPERACIÓN DE BIOGÁS

Se estableció que la eficiencia de recuperación del biogás determinara del valor del porcentaje de un 50% de la generación de biogás capturada del modelo **SCHOLL CANYON**, el cual es un valor módico que es sencillamente accesible de poder llegar. Esta determinación del porcentaje de 50% ha sido utilizada en el relleno sanitario de Huaycoloro para su cálculo de la potencia. Para poder facilitar la determinación y cálculo de la potencia se realizó la conversión del biogás a pie³/hora para luego multiplicarse con la eficiencia de recuperación y obtener el resultado de Heat Rate, mostrada en la **Tabla 52**.

Tabla 52. Resultados de la cantidad del biogás recuperado

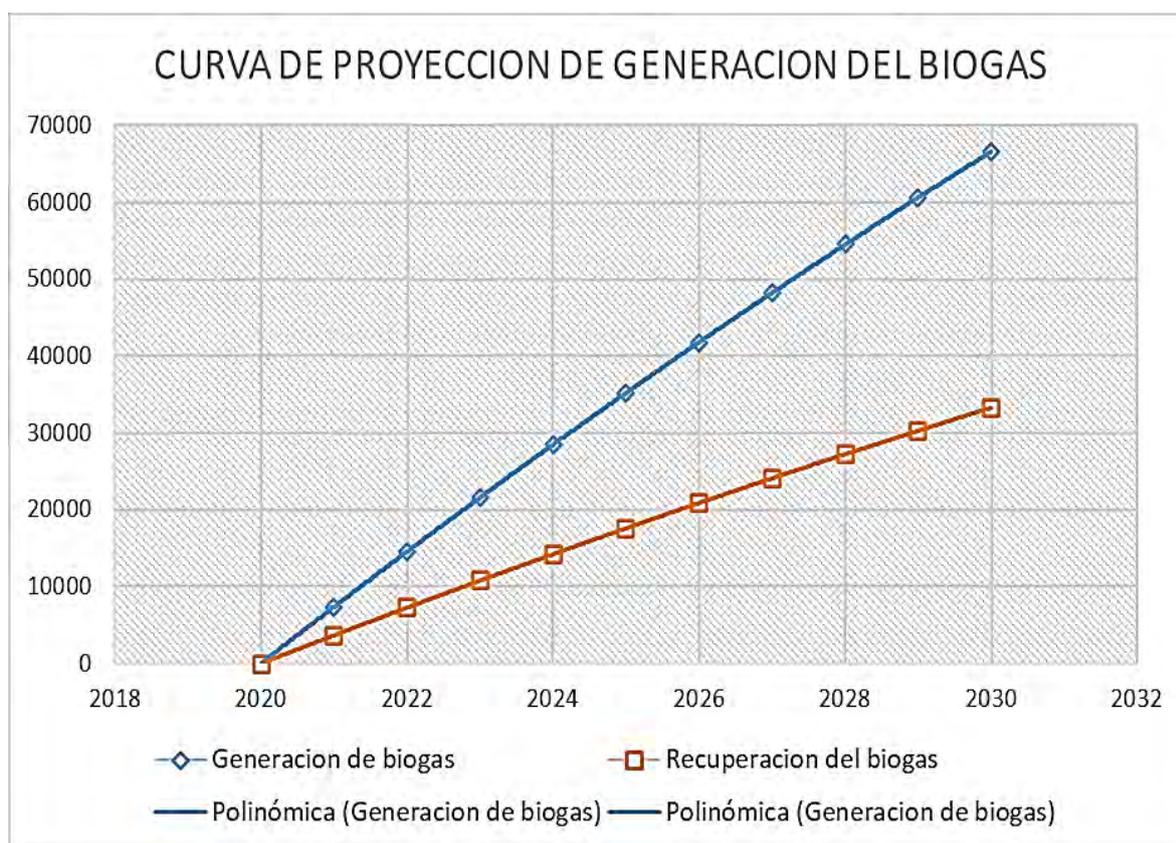
Año	Generación de biogás SCHOLL CANYON (m ³ (hora))	Caudal del Biogás (m ³ /hora)	Eficiencia del sistema de captura (%)
2020	0	0	50%
2020-2021	240.129	120.065	
2021-2022	244.034	122.017	
2022-2023	248.559	124.280	
2023-2024	253.356	126.678	
2024-2025	258.239	129.120	
2025-2026	263.825	131.913	
2026-2027	268.542	134.271	
2027-2028	274.674	137.337	
2028-2029	277.711	138.856	
2029-2030	284.176	142.088	
2030-2031	288.796	144.398	

Fuente: Elaboración Propia, Estudio de Caracterización de Residuos Sólidos del Plan Integral de Gestión Ambiental de Residuos Sólidos de la provincia del Cusco, 2020

En la **Tabla 52**. Se observa la generación del biogás recuperado de los residuos sólidos orgánicos del relleno de Haqira, el cual es de 120.065 m³/hora del año 2020 al 2021. Asimismo, se realizó la proyección de la generación del biogás recuperado hasta el año 2030 al 2031 obteniendo una recuperación de 144.398 m³/hora de biogás aprovechado, desempeñando una eficiencia del 50% del sistema de captura del relleno sanitario de Haqira. La eficiencia de sistema de captura de residuos sólidos es el sistema de gestión y manejo del biogás generado del relleno sanitario de Haqira. La eficiencia de recuperación de biogás se calculó con un porcentaje del 50%, lo cual se considera una cifra moderada y alcanzable. Este mismo porcentaje se empleó en el análisis del estudio destinado a capturar y quemar el gas

metano producido en el relleno sanitario Huaycoloro. Para llevar a cabo los cálculos, se multiplicó este valor por la eficiencia de recuperación. Los resultados obtenidos se presentan en la **Tabla 43**.

Figura 68. Curva de proyección de generación del biogás



Fuente: Elaboración Propia, Estudio de Caracterización de Residuos Sólidos

Como se puede observar dentro del pronóstico de la generación de biogás en los próximos años, se estima que va dirección ascendentemente, el cual está incrementando a través de los años, así mismo la recuperación del biogás estimada es menor a la generación de biogás en un 50% de la eficiencia del sistema de captura proyectada hasta el 2030 y acabando su ciclo de generación de biogás en el relleno sanitario y posteriormente dejando de recibir residuos sólidos urbanos hasta el 2030 con el cierre del relleno sanitario.

1.3. POTENCIA ELÉCTRICA GENERADA A PARTIR DEL BIOGÁS PROVENIENTES DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS

Para la determinación de la potencia eléctrica generada, se utiliza la **fórmula 2.12**, donde se tiene los parámetros ya determinados del rendimiento térmico de la generación eléctrica, el caudal del biogás recuperado o capturado y el poder calorífico inferior del biogás, así mismo las unidades de trabajo se alinearon para así facilitar su cálculo.

Tabla 53. Resultados de la conversión de los valores de recuperación del biogás

Caudal de biogás recuperado	
Año	m ³ /Hora
2020	0
2020-2021	120.065
2021-2022	122.017
2022-2023	124.280
2023-2024	126.678
2024-2025	129.120
2025-2026	131.913
2026-2027	134.271
2027-2028	137.337
2028-2029	138.856
2029-2030	142.088
2030-2031	144.398

Fuente: Elaboración Propia, Estudio de Caracterización de Residuos Sólidos, 2020

En la siguiente formula, se dio a conocer, los valores de la potencia eléctrica generada a partir de la producción recolectada de biogás en el relleno sanitario de Haquira del 2020 al 2021.

$$Potencia_{Generada} = \eta_t \times PCI_{biogas} \times Q_{biogas}$$

Donde:

η_t = Rendimiento Térmico de la generación eléctrica = 25%,33%,40% para escenarios de bajo, medio, alto respectivamente.

PCI_{biogas} = Poder calorífico inferior del biogás = 4.48076 kWh/m³

Q_{biogas} = Caudal de biogás recuperado, escenarios bajo, medio y alto = 120.065 m³/hora

$$Potencia_{Generada\ 2020-2021} = 0,25 \times 4.48076 \frac{kWh}{m^3} \times 120.065 \frac{m^3}{H}$$

$$Potencia_{Generada(2020-2021)} = 134.496\ kW$$

Para calcular potencia generada eléctrica mediante el biogás recolectado, se tomaron en cuenta los tres escenarios mencionados previamente, que indican niveles bajo, medio y alto de metano disponible. Estos escenarios están establecidos por el Banco Interamericano de Desarrollo a través de la nota técnico titulada: “generación de electricidad a través del biogás capturado de residuos sólidos urbanos “.

Tabla 54. Potencia eléctrica generada a partir del biogás recuperado

Año	Caudal del Biogás Recuperado	Potencia generada(kW)		
	(m ³ /hora)			
	PCI=4.48076 kWh/m ³	Bajo (25%)	Medio (33%)	Alto (40%)
2020	0	0	0	0
2020-2021	120.065	134.4956124	177.534208	215.19298
2021-2022	122.017	136.6822232	180.420535	218.691557
2022-2023	124.280	139.2172132	183.766721	222.747541
2023-2024	126.678	141.9034288	187.312526	227.045486
2024-2025	129.120	144.6389328	190.923391	231.422292
2025-2026	131.913	147.7676235	195.053263	236.428198
2026-2027	134.271	150.4090315	198.539922	240.65445
2027-2028	137.337	153.843534	203.073465	246.149654
2028-2029	138.856	155.5451026	205.319535	248.872164
2029-2030	142.088	159.1655567	210.098535	254.664891
2030-2031	144.398	161.7531956	213.514218	258.805113

Fuente: Elaboración Propia, Estudio de Caracterización de Residuos Sólidos

La potencia eléctrica generada del año 2020-2021 es de 134.496 kW en un régimen del 25%, también se obtuvo 177.534 kW en un régimen del 33% y 215.193 kW en un régimen del 40% del régimen térmico.

La proyección de la generación del caudal de biogás recuperado es de 161.753 kW para un escenario del 25%, 213.514 kW para un régimen del 33% y 258.805 kW para un régimen del 40% del año 2031.

2. CAPITULO IV: PROCESO DE ESTRUCTURACIÓN Y SELECCIÓN DE EQUIPOS PARA LA GENERACIÓN ELÉCTRICA A PARTIR DEL BIOGÁS DE RESIDUOS SÓLIDOS ORGÁNICOS URBANOS

2.1. ESTRUCTURACIÓN Y EQUIPAMIENTO DE INSTRUMENTOS DEL CICLO COMBINADO

Dentro la selección de los equipos de implementación de la central térmica se determinará mediante los parámetros técnicos aproximado de los equipos de generación, para poder realizar el cálculo de potencia y trabajo en los diferentes puntos del ciclo combinado cerrado así mismo se determinará valores termodinámicos de ciclo gas-vapor con variaciones en la entalpia, entropía, rendimiento térmico para la ejecución de la central térmica.

Los parámetros típicos seleccionados son valores aproximados y recomendados al ser recolectados a fabricantes de equipos de generación de energía en general.

2.2. PARÁMETROS DE DISEÑO DEL CICLO BRAYTON

PARÁMETRO	DESCRIPCIÓN	ALCANCE	OBSERVACIÓN
$P_{atmosferica}$	Es la presión atmosférica a nivel del mar.	101.325kPa	Valor determinado acorde a ubicación geográfica de montaje de la central térmica
$T_{ambiente}$	Es la temperatura ambiente de la central térmica en Haqira, Ccorca	24°C(297.15°K)	Valor determinado acorde a ubicación geográfica de montaje de la central térmica
$T_{gases,escape}$	Es la temperatura de los gases de escape a la salida de la caldera recuperadora de calor	180°C-200°C	Valor establecido por las fabricantes de calderas recuperadoras de vapor de la marca VYC INDUSTRIAL
$R_{presion}$		4	Valor establecido acorde a los datos del fabricante de la

	Es la relación de presiones de ciclo de gas		microturbina de gas marca CAPSTONE
$n_{compresor}$	Es la eficiencia isoentrópica del compresor	0.80	Valor fijado por nuestro grupo de acuerdo a los datos de ciertos fabricantes de compresores CAPSTONE C30
$n_{turbina\ de\ gas}$	Es la eficiencia isoentrópica de la microturbina de gas	0.85	Valor fijado por nuestro grupo de acuerdo a los datos de ciertos fabricantes de microturbinas de gas marca CAPSTONE
$n_{mecanica}$	Es la eficiencia de conversión de la energía de los gases de combustión en energía mecánica en el eje.	0.80	Valor fijado por nuestro grupo
$n_{generador}$	Es la eficiencia de conversión del generador eléctrica	0.96	Valor fijado por nuestro grupo acorde a los datos de ciertos fabricantes de generadores eléctrico marca LEROY SOMER
$n_{combustible}$	Es la eficiencia de la cámara de combustión	0.95	Valor típico establecido por nuestro grupo
PCI_{biogas}	Es el poder calorífico inferior del biogás	16130.732 kJ/m^3	Valor calculado en la generación de biogás
a	Es el porcentaje de aire teórico	3.4	Valor teórico
$n_{CALDERA\ RECUPERADORA}$	Es la eficiencia de la caldera recuperadora de vapor	0.70	Valor establecido por ciertos fabricantes de calderas recuperadoras de vapor
PCI_{metano}	Es el poder calorífico inferior del GLP	35846.071 kJ/m^3	Valor para el biogás

$P_{gas\ neto}$	Es la potencia neta en los terminales del generador eléctrico	500kW	Valor de la potencia neta calculado fraccionada y proyectada hasta el cuarto año
		700kW	Valor de la potencia neta calculado fraccionada y proyectado hasta el séptimo año
		1000kW	Valor de la potencia neta calculado fraccionada y proyectado hasta el décimo año
$C_{p_{aire}} = C_{p_{gases}}$	Es el calor específico a presión constante del aire y los gases de combustión	1.0035 kJ/kg-k	Valores teóricos
K_{aire}	Es la relación de calores específicos del aire	1.4	Valor teórico del aire
K_{gases}	Es la relación de calores específicos de los gases de combustión	1.35	Valor teórico siempre será menor al aire

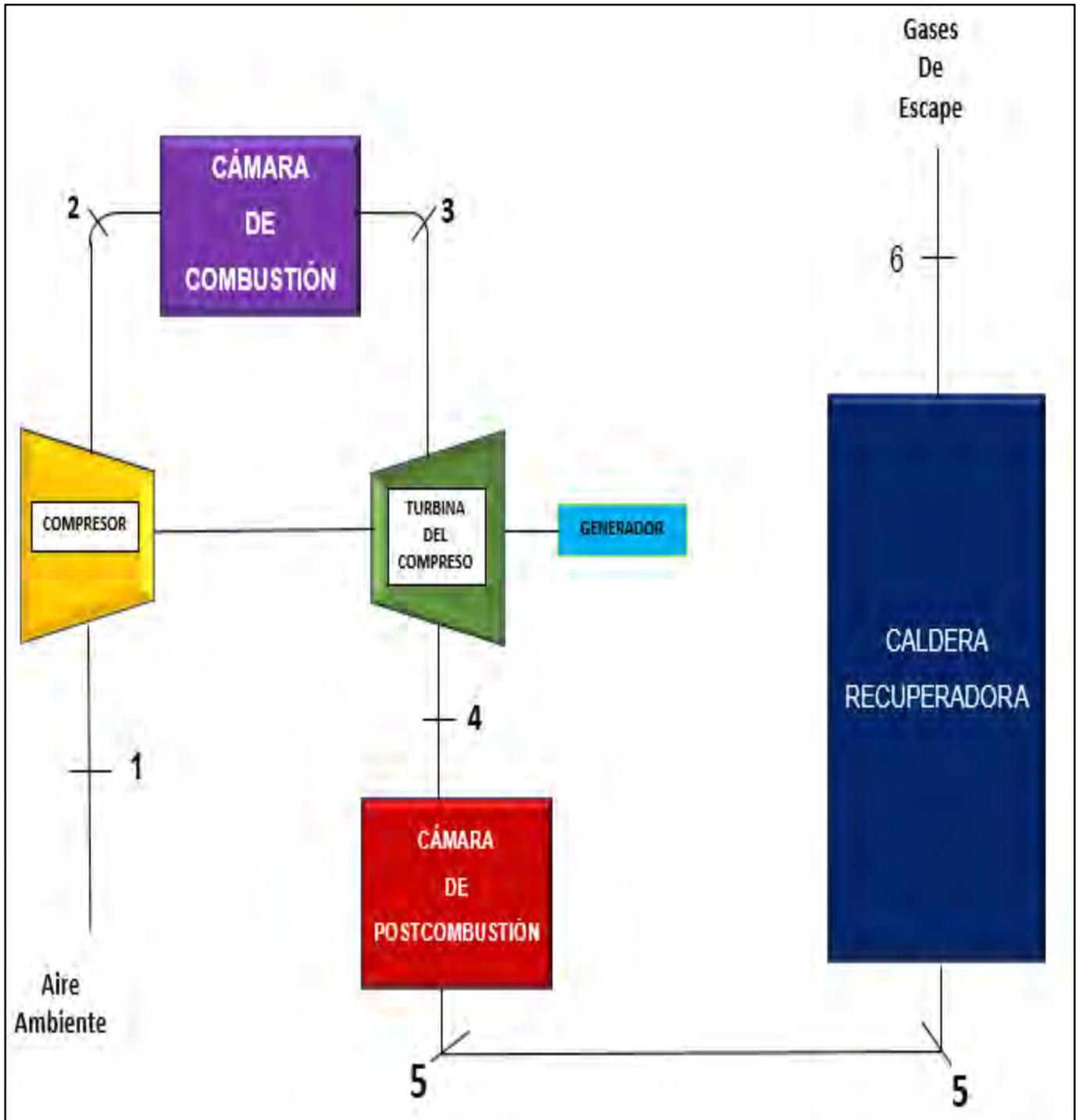
2.3. PARÁMETROS DE DISEÑO DEL CICLO RANKINE

PARÁMETRO	DESCRIPCIÓN	ALCANCE	OBSERVACIÓN
$P_{\text{turbina, vapor, entrada}}$	Es la presión máxima del ciclo de vapor.	12000 KPa	Valor fijado
$T_{\text{turbina, vapor, entrada}}$	Es la temperatura máxima del ciclo de vapor.	400 °C (673 K)	Valor establecido por nuestro grupo de acuerdo a las limitaciones metalúrgicas de la turbina de vapor. (Catálogo HOWDEN)
$P_{\text{calentador, proceso}}$	Es la presión del calor de proceso.	700 KPa	Valor establecido por nuestro grupo de acuerdo a los calores de proceso que se requieren en la central térmica (la mayoría entre 5 y 7 atmósferas).
$P_{\text{condensador}}$	Es la presión del condensador.	9.80665 kPa	Valor establecido por nuestro grupo de acuerdo a la calidad del vapor a la salida de la turbina de vapor ($x > 90\%$)
$n_{\text{turbina, vapor}}$	Es la eficiencia isoentrópica de la turbina de vapor.	0.87	Valor fijado por nuestro grupo de acuerdo a los datos de ciertos fabricantes de turbinas de vapor HOWDEN BASE KK&K
$n_{\text{mecánica, turbina, vapor}}$	Es la eficiencia de conversión de la energía del vapor en energía mecánica en el eje de la turbina de vapor.	0.97	Valor establecido por nuestro grupo.
$n_{\text{generador}}$	Es la eficiencia de conversión del generador eléctrico	0.96	Valor establecido de acuerdo a los datos de fabricantes de alternadores con alto grado de rendimiento en marcas LEROY SOMER
n_{bomba}	Es la eficiencia isoentrópica de la bomba	0.85	Valor fijado por nuestro grupo de acuerdo a los datos de ciertos fabricantes de la bomba de extracción de condensada marca VTP RUHRPUMPEN

$n_{\text{mecánica, bomba}}$	Es la eficiencia mecánica de la bomba.	0.97	Valor fijado de acorde a fabricantes de moto
$n_{\text{motor, bomba}}$	Es la eficiencia del motor acoplado a las bombas.	0.96	Valor establecido acuerdo a los datos de ciertos fabricantes de Motor marca FRANKLIN ELECTRIC
$N_{\text{vapor neto}}$	Es la potencia neta en los terminales del generador.	250kW	Valor de la potencia neta calculado fraccionada y proyectada hasta el cuarto año
		500kW	Valor de la potencia neta calculado fraccionada y proyectado hasta el séptimo año
		700kW	Valor de la potencia neta calculado fraccionada y proyectado hasta el décimo año
Q_{proceso}	Es el calor de proceso que se requiere.	600kW	Valor de la potencia neta calculado fraccionada y proyectada hasta el cuarto año
		1200kW	Valor de la potencia neta calculado fraccionada y proyectado hasta el séptimo año
		1800kW	Valor de la potencia neta calculado fraccionada y proyectado hasta el décimo año
$\dot{m}_7 = \dot{m}_{17}$	Es el flujo másico total de vapor en el ciclo de vapor.	250 kg/h (0.0694 Kg/s)	Valor establecido por Las características técnicas de la caldera.
Puntos 13 y 14	Se considera que el agua en los puntos 13 y 14 sale como líquido saturado.	$x=0$	Criterio fijado por nuestro grupo.

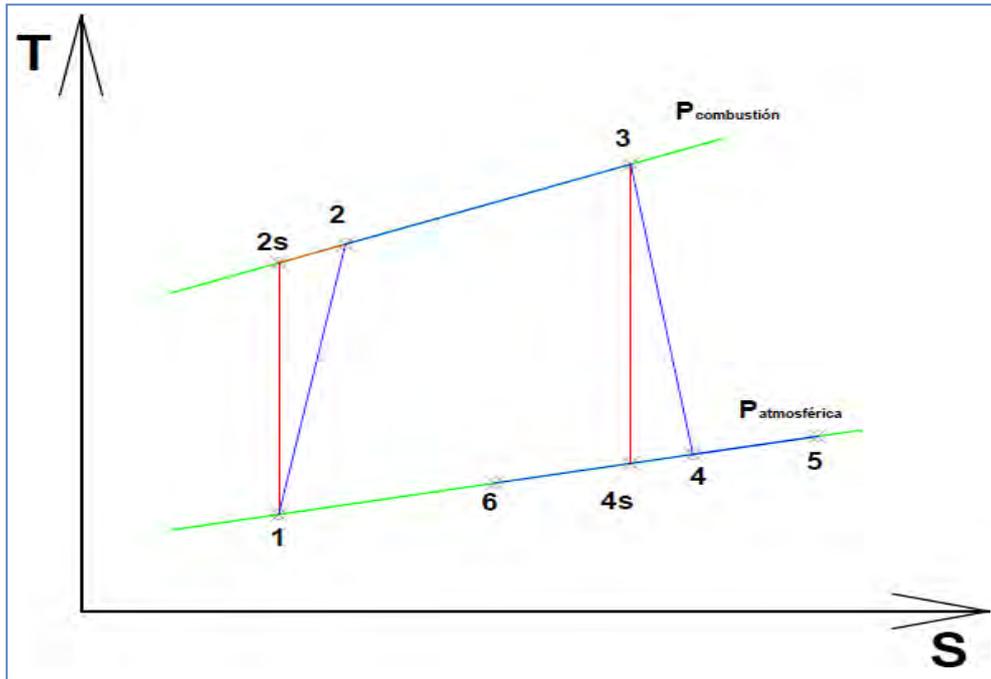
2.4. PUNTOS DE ENTRADA Y SALIDA DE DISEÑO EN EL CICLO BRAYTON-RANKINE

Figura 69. Esquema del ciclo combinado propuesto



Fuente: Elaboración propia, ciclos de una central térmica

Figura 70. Diagrama de curva de Temperatura-Entropía del proceso del ciclo combinado



Fuente: Elaboración Propia

2.5. ANÁLISIS DEL CICLO TERMODINÁMICO

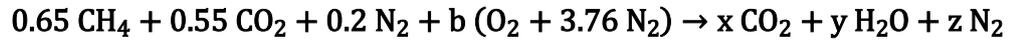
2.5.1. CÁLCULO DE LA RELACIÓN AIRE-COMBUSTIBLE ESTEQUIOMÉTRICO

El biogás es un tipo de gas proveniente de la descomposición de los residuos sólidos orgánicos el cual está compuesto por elementos químicos que constituyen el biogás cuya composición física son: metano (CH_4), dióxido de carbono (CO_2), de nitrógeno (N_2) y otros compuestos orgánicos. La determinación de la reacción de combustión completa sin exceso de aire denominado reacción estequiométrica del biogás está establecido mediante los porcentajes de compuestos contenidos en el biogás.

Figura.71. Composición del biogás

Componentes	Cantidades (%)
Metano	65%
Dioxido de carbono	55%
Oxigeno	5%
Nitrogeno	20%
Hiidrogeno	1%

La composición del biogás está establecida por el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático para gases de efecto invernadero.



Determinaremos los valores de **X**, **Y** y **Z**, cuyas variables son las reacciones químicas de aire combustible donde el carbono, hidrogeno, oxígeno y nitrógeno son los valores de medida y cuantificación de reactivos y productos con su número de moles respectivo.

$$\text{C: } 0.65+0.55 = 1.2 \rightarrow \mathbf{x = 1.2}$$

$$\text{H: } 0.65 \times 4 = 2.6; 2.6 = 2y \rightarrow \mathbf{y=1.3}$$

$$\text{O: } 0.45 \times 2 + 2b = 2x + y \rightarrow 0.9 + 2b = 2(1.2) + 1.3 \rightarrow \mathbf{b=1.4}$$

$$\text{N}_2: 0.2 + 3.76b = z \rightarrow \mathbf{z=0.2+3.76 \times (1.4) \rightarrow z=5.464}$$

Ahora determinaremos el valor de la relación de aire y combustible estequiométrico:

$$\begin{aligned} (r_{a/c})_0 &= \frac{1.4 \times (32 + 3.76 \times 28)}{0.65 \times 16 + 0.55 \times 14 + 0.2 \times 28} = \frac{192.192}{23.7} \\ &= 8.11 \frac{\text{Kg de aire}}{\text{Kg de biogas}} \end{aligned}$$

PUNTO 1

$$P_1 = P_{\text{ATMOSFERICA}} = 101.325 \text{ kPA}$$

$$T_1 = T_{\text{AMBIENTE}} = 24^\circ\text{C} = 297^\circ\text{K}$$

PUNTO 2S

$$P_{2S} = P_1 \times R_{\text{PRESION}} = 405.3 \text{ kPA}$$

$$T_{2S} = T_1 \times \left(\frac{P_{2S}}{P_1}\right)^{K_{\text{AIRE}} - 1 / K_{\text{AIRE}}} = 297.15 \times (4)^{1.4 - 1 / 1.4} = 441.563^\circ\text{K}$$

$$T_{2S} = 441.563^\circ\text{K}$$

PUNTO 2

$$P_2 = P_1 \times R_{\text{PRESION}} = 405.3 \text{ kPA}$$

$$n_{COMPRESOR} = \frac{T_2 S - T_1}{T_2 - T_1} \rightarrow 0.80 = \frac{441.563^\circ K - 297.15^\circ K}{T_2 - 297.15^\circ K}$$

$$T_2 = 477.666^\circ K$$

PUNTO 3

$$P_3 = P_2 = 405.3 \text{ kPa}$$

La T_3 sera determinada por el balance de energía en el sexto combustor o cámara de combustión.

Figura 72. Esquema de la cámara de combustión del ciclo de gas (Brayton)



Fuente: Elaboración Propia

$$m_{biogas} \times PCI_{biogas} \times n_{combustion} = m_{gases} \times C_{P_{gases}} \times T_3 - m_{aire} \times C_{P_{aire}} \times T_2$$

Para despejarlas variables, dividimos entre m_{biogas} a las dos ecuaciones:

$$PCI_{biogas} \times n_{combustion} = \frac{m_{gases}}{m_{biogas}} \times C_{P_{gases}} \times T_3 - \frac{m_{aire}}{m_{biogas}} \times C_{P_{aire}} \times T_2 \dots \dots \dots (A)$$

Donde:

$$\frac{m_{aire}}{m_{biogas}} = a \times (ra/c)_0 \rightarrow \frac{m_{gases}}{m_{biogas}} = 1 + a \times (ra/c)_0$$

Reemplazando (A) tenemos:

$$PCI_{biogas} \times n_{combustion} = (1 + a \times (ra/c)_0) \times C_{P_{gases}} \times T_3 - (a \times (ra/c)_0) \times C_{P_{aire}} \times T_2$$

$$21507.643 \times 0.95 = (1 + 3.4 \times (8.11)) \times 1.0035 \times T_3 - 3.4 \times 8.11 \times 1.0035 \times 477.666$$

Despejando T_3 :

$$T_3 = 1173.52^\circ K$$

PUNTO 4S

$$P_{4S} = P_4 = P_5 = P_6 = P_{ATMOSFERICA} = 101.325 \text{ kPa}$$

$$T_{4S} = \frac{T_3}{\left(\frac{P_3}{P_{4S}}\right)^{K_{AIRE}-1/K_{AIRE}}} = \frac{1173.52}{\left(\frac{405.3}{101.325}\right)^{1.4-1/1.4}} = 789.72039^\circ K$$

$$T_{4S} = 789.72039^\circ K$$

PUNTO 4

$$P_4 = P_5 = P_6 = P_{ATMOSFERICA} = 101.325 \text{ kPa}$$

$$n_{TURBINA GAS} = \frac{T_3 - T_4}{T_3 - T_{4S}} \rightarrow 0.85 = \frac{1173.52^\circ K - T_4}{1173.52^\circ K - 789.72039^\circ K}$$

$$T_4 = 847.29033^\circ K$$

Para poder hallar la T_5 en el punto 5 es necesario la determinación de los flujos masivos del ciclo

2.5.1.1. FLUJO MASIVOS

$$N_{gas\ neto} = \left[m_{gases} \times C_{P_{gases}} \times (T_3 - T_4) - m_{aire} \times C_{P_{aire}} \times (T_2 - T_1) \right] \times n_{mecanico} \times n_{generador}$$

Sabiendo que:

$$\frac{m_{aire}}{m_{biogas}} = a \times (r_{a/c})_0; \quad \frac{m_{gases}}{m_{biogas}} = 1 + a \times (r_{a/c})_0$$

Se puede despejar m_{aire} y m_{gases} en función al flujo masico del biogás (m_{biogas})

$$N_{gas\ neto} = \left[m_{gases} \times C_{P_{gases}} \times (T_3 - T_4) - m_{aire} \times C_{P_{aire}} \times (T_2 - T_1) \right] \times n_{mecanico} \times n_{generador}$$

$$N_{gas\ neto} = \left[m_{biogas} (1 + a(r_{a/c})_0) C_{P_{gases}} (T_3 - T_4) - m_{biogas} a(r_{a/c})_0 C_{P_{aire}} (T_2 - T_1) \right] n_{mc} \cdot n_g$$

$$500 = [m_{biogas} (1 + 3.4(8.11))(1.0035)(1173.52 - 847.29) - m_{biogas} 3.4(8.11)(1.0035)(477.666 - 297)] 0.97 \times 0.96$$

$$m_{biogas} = 0.12317 \text{ Kg/s}; m_{aire} = 3.3963 \text{ Kg/s}; m_{gases} = 3.5195 \text{ Kg/s}$$

$$m_{BIOGAS.POST\ COMB.} = \frac{Q_{CICLO\ VAPOR\ ENTRADA} - Q_{CALD.SIN\ POSTCOMBUSTION}}{n_{CALDERA\ RECUPERAD.} \times PCI_{BIOGAS} \times n_{COMBUSTION}}$$

$$m_{BIOGAS.POST\ COMB.} = \frac{935\ kW - 727.195\ kW}{0.70 \times 21507.643 \times 0.95}$$

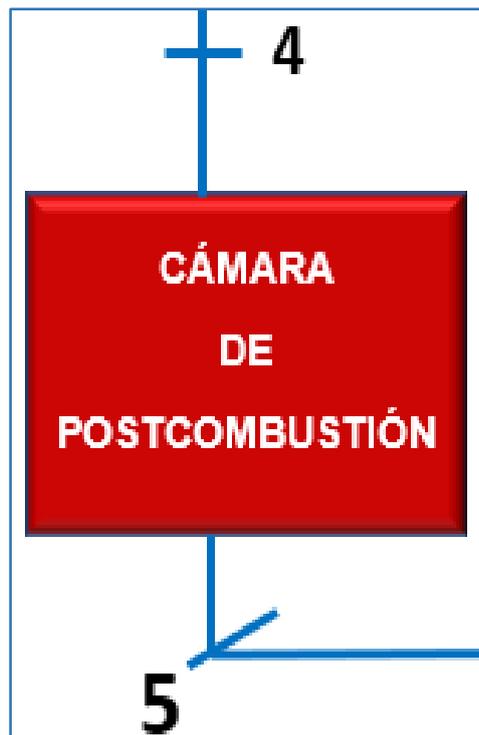
$$m_{BIOGAS.POST\ COMB.} = 0.014529\ \text{Kg/s}$$

PUNTO 5

$$P_5 = P_6 = P_{ATMOSFERICA} = 101.325\ \text{kPa}$$

Para determinar será importante realizar un balance de energía en la cámara de postcombustión.

Figura 73. Esquema de la cámara de postcombustión del ciclo de gas propuesto



Fuente: Elaboración Propia

$$m_{BIOGAS} \times PCI_{BIOGAS} \times n_{COMBUSTION} = (m_{GASES} + m_{BIOGAS}) C_{P_{GASES}} T_5 - m_{GASES} C_{P_{GASES}} T_4$$

$$0.014529 \times 21507.643 \times 0.95 = (3.5195 + 0.12317) \times 1.0035 \times T_5 - 3.5195 \times 1.0035 \times 847.29033$$

$$T_5 = 899.853^\circ\text{K}$$

PUNTO 6

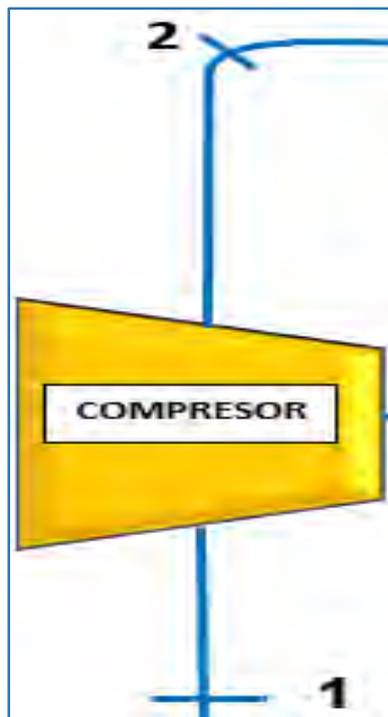
$$P_6 = P_{ATMOSFERICA} = 101.325 \text{ kPa}$$

$$T_6 = T_{GASES DE ESCAPE} = 180 \text{ }^\circ\text{C} = 453.15^\circ\text{K}$$

2.5.3. POTENCIA DEL COMPRESOR AXIAL PROPIO DE LA MICROTURBINA DE GAS

Se procederá a calcular las potencias en los puntos del ciclo en los puntos de entrada y admisión de aire (1 y 2).

Figura 74. Esquema del compresor del ciclo de gas propuesto



Fuente: Elaboración Propia

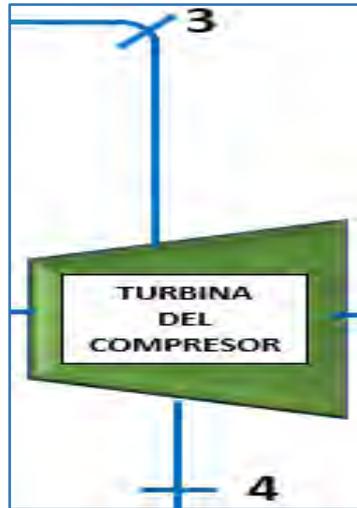
$$W_{COMPRESOR} = m_{AIRE} \times C_{P_{AIRE}} \times (T_2 - T_1)$$

$$W_{COMPRESOR} = 3.3963 \times 1.0035 \times (477.666 - 297.15)$$

$$W_{COMPRESOR} = 615.2323 \text{ kW}$$

2.5.3.1. POTENCIA DE LA MICROTURBINA DE BIOGÁS

Figura 75. Esquema de la turbina del compresor del ciclo de gas propuesto



Fuente: Elaboración Propia

$$W_{TURBINA DE GAS} = m_{GASES} \times C_{P_{GASES}} \times (T_3 - T_4)$$

$$W_{TURBINA DE GAS} = 3.5195 \times 1.0035 \times (1173.52 - 847.29)$$

$$W_{TURBINA DE GAS} = 1152.1851 \text{ kW}$$

2.5.3.2. POTENCIA ADQUIRIDA EN LA CÁMARA DE COMBUSTIÓN

Figura 76. Cámara de combustión entre los puntos 2 y 3 del ciclo de gas propuesto



Fuente: Elaboración Propia

$$Q_{CAMARA DE COMBUSTION} = m_{GASES} \times C_{P_{GASES}} \times T_3 - m_{AIRE} \times C_{P_{AIRE}} \times T_2$$

$$Q_{CAMARA DE COMBUSTION} = 3.5195 \times 1.0035 \times 1173.52 - 3.3963 \times 1.0035 \times 477.666$$

$$Q_{CAMARA DE COMBUSTION} = 2516.6843 \text{ kW}$$

2.5.3.3. POTENCIA ADQUIRIDA EN LA CÁMARA DE POST-COMBUSTIÓN

Figura 77. Cámara de postcombustión entre los puntos 4 y 5 del ciclo de gas propuesto

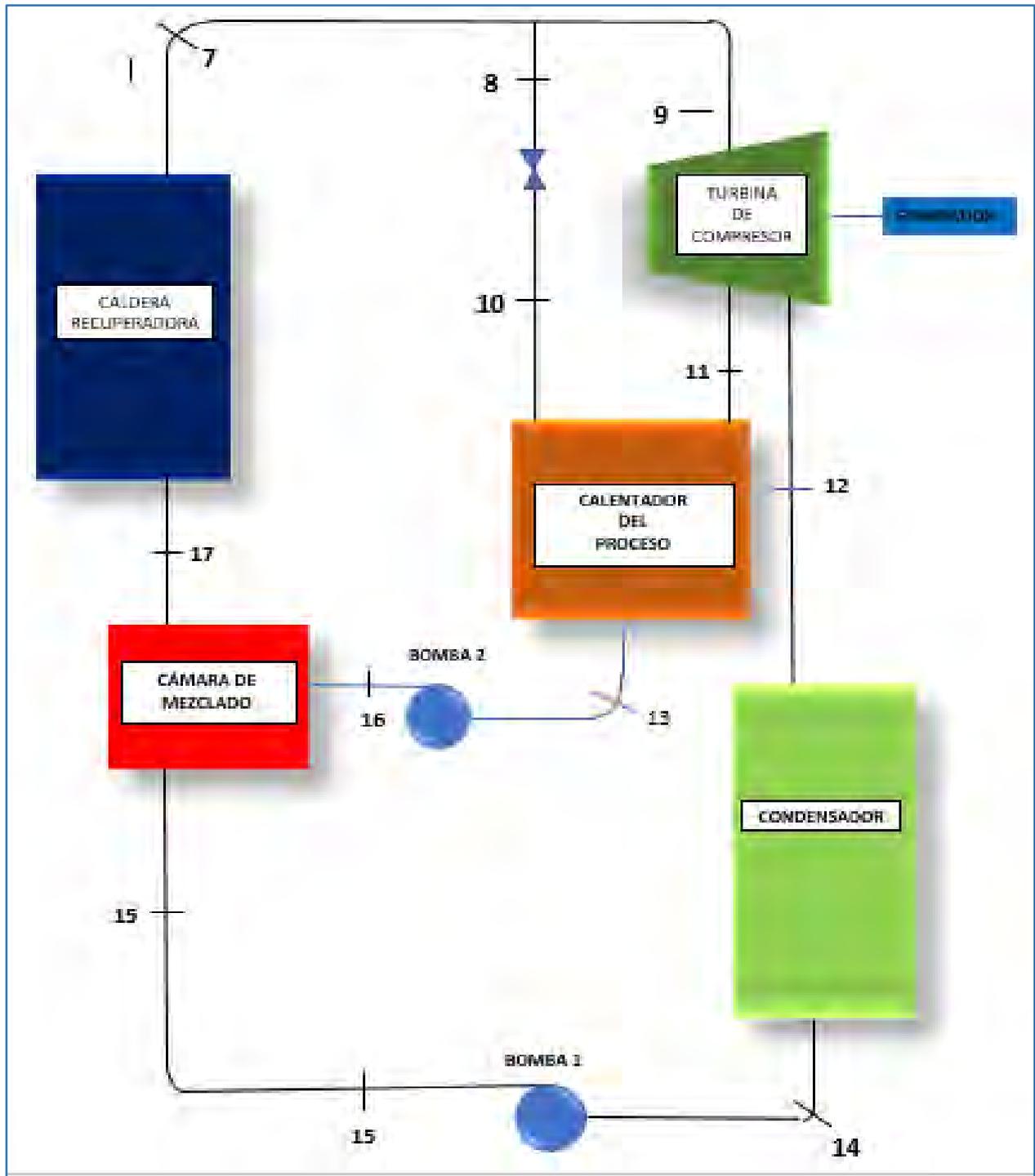


Fuente: Elaboración Propia

$$\begin{aligned}
 Q_{CAMARA\ DE\ POST.COMBUSTION} &= (m_{GASES} + m_{BIOG.POS.}) \times C_{P_{GASES}} \times T_5 - m_{GASES} \times C_{P_{GASES}} \times T_4 \\
 Q_{CAMARA\ POST.} &= (3.5195 + 0.014529) \times 1.0035 \times 899.853 - 3.5195 \times 1.0035 \\
 &\quad \times 847.29033 \\
 Q_{CAMARA\ DE\ POST.COMBUSTION} &= 198.762\ kW
 \end{aligned}$$

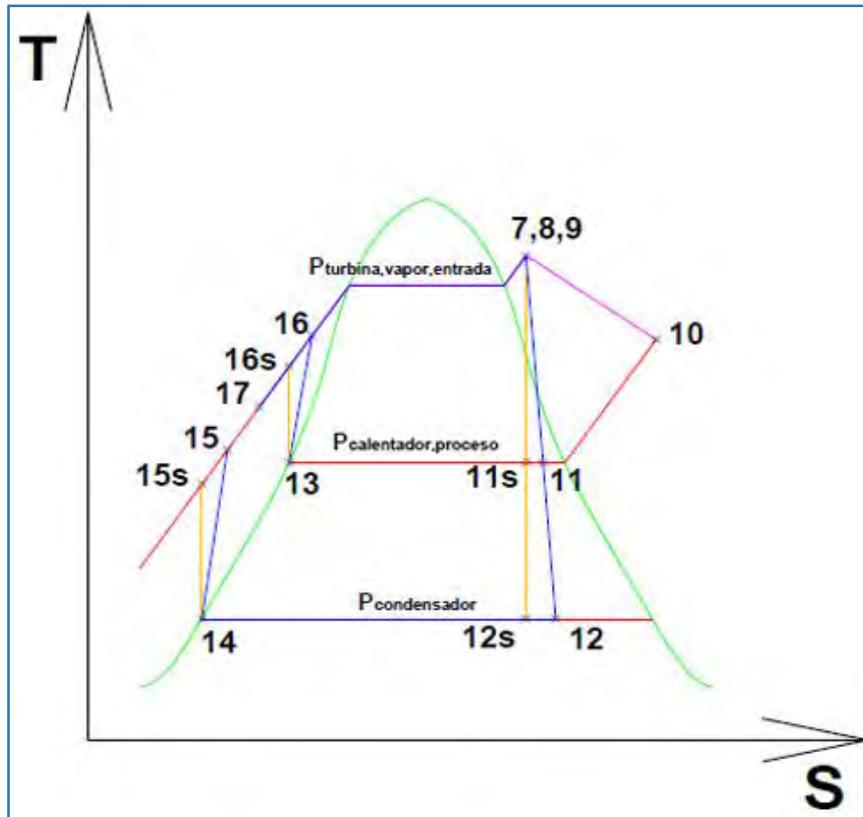
2.5.4. ANÁLISIS DE CÁLCULO DEL CICLO VAPOR

Figura 78. Esquema del ciclo de vapor propuesto



Fuente: Elaboración Propia

Figura 79. Diagrama de curva de Temperatura- Entropía del proceso del ciclo de vapor propuesto



Fuente: Elaboración Propia

PUNTO 7

$$P_7 = P_{TURBINA VAPOR ENTRADA} = 40 \text{ Bar} = 4000 \text{ kPa}$$

$$T_7 = T_{TURBINA VAPOR ENTRADA} = 400 \text{ }^\circ\text{C} = 673.15 \text{ K}$$

El análisis de cálculo se realiza en estado de vapor sobrecalentado de acuerdo a la tabla de vapor sobrecalentado del sistema internación de unidades, donde mediante la temperatura y presión dadas, se determinará la entalpía y entropía.

Entalpía Específica del Vapor Sobrecalentado en el punto 7:

$$h_7 = h_{(P=4000 \text{ KPa a } T=673.15 \text{ K})} \rightarrow h_7 = 3214.374 \text{ KJ/Kg}$$

Entropía Específica del Vapor Sobrecalentado en el punto 7:

$$S_7 = S_{(P=4000 \text{ KPa a } T=673.15 \text{ K})} \rightarrow S_7 = 6.7712 \text{ KJ/Kg - K}$$

PUNTO 8

$$P_8 = P_7 = 40 \text{ Bar} = 4000 \text{ kPa}$$

$$T_8 = T_7 = 400 \text{ }^\circ\text{C} = 673.15 \text{ }^\circ\text{K}$$

$$h_8 = h_7 = 3214.374 \text{ KJ/Kg}$$

$$S_8 = S_7 = 6.7712 \text{ KJ/Kg} - \text{K}$$

PUNTO 9

$$P_9 = P_7 = 40 \text{ Bar} = 4000 \text{ kPa}$$

$$T_9 = T_7 = 400 \text{ }^\circ\text{C} = 673.15 \text{ }^\circ\text{K}$$

$$h_9 = h_7 = 3214.374 \text{ KJ/Kg}$$

$$S_9 = S_7 = 6.7712 \text{ KJ/Kg} - \text{K}$$

PUNTO 10

$$P_{10} = P_{\text{CALENTADOR PROCESO}} = 7 \text{ Bar} = 700 \text{ kPa}$$

$$h_{10} = h_7 = 3214.374 \text{ KJ/Kg}$$

Estado: Vapor Sobre-calentado

El análisis de cálculo se realiza en estado de vapor sobrecalentado de acuerdo a la tabla de vapor sobrecalentado del sistema internación de unidades, donde mediante la entalpia específica y presión dados, se determinará la temperatura en el punto 10.

Temperatura del Vapor Sobre-calentado en el punto 10:

$$T_{10} = T_{(P=700 \text{ KPa a } h=3214.374 \text{ KJ/Kg})} \rightarrow T_{10} = 374 \text{ }^\circ\text{C} = 647.15 \text{ }^\circ\text{K}$$

Entropía Específica del Vapor Sobre-calentado en el punto 10:

$$S_{10} = S_{(P=700 \text{ KPa a } h=3214.374 \text{ KJ/Kg})} \rightarrow S_{10} = 7.5538 \text{ KJ/Kg} - \text{K}$$

PUNTO 11S

$$P_{11S} = P_{11} = P_{\text{CALENTADOR PROCESO}} = 7 \text{ Bar} = 700 \text{ kPa}$$

$$S_{11S} = S_9 = 6.7712 \text{ KJ/Kg} - \text{K}$$

Estado: Mezcla saturada liquido vapor

Se determinará la temperatura de saturación donde la presión de vapor del líquido o agua en condiciones de saturación es de 700kPa.

$$T_{11S} = T_{\text{SATURACION}(P=700 \text{ kPa})} \rightarrow T_{11S} = 164.9 \text{ }^\circ\text{C} = 438.05 \text{ }^\circ\text{K}$$

La determinación y selección de la temperatura de saturación se delimito por la tabla de vapor de saturación de acuerdo al sistema internacional de unidades.

Por otra parte, es necesaria calcular la calidad del vapor del sistema para poder hallar las propiedades termodinámicas del vapor saturado en la mezcla saturada liquido-vapor luego de haber estado en un estado de agua o liquido saturado.

$$X_{11S} = \frac{S_{11S} - S_{f(P=700kPa)}}{S_{fg(P=700kPa)}}$$

Los valores fijados serán establecidos de acuerdo a la tabla de propiedades de los cambios de estado del sistema internacional de unidades teniendo como valor determinado la entropía del líquido ($S_{f(P=700kPa)}$) y la entropía de evaporación ($S_{fg(P=700kPa)}$) con una presión de 700kPa.

$$X_{11S} = \frac{6.7712 - 1.9918}{4.7153}$$

$$X_{11S} = 1.01359$$

$$h_{11S} = h_{f(P=700kPa)} + (X_{11S}) \cdot (h_{fg(P=700kPa)})$$

Los valores de entalpia en liquido saturado y evaporación se tomarán siempre en cuenta en las condiciones de la tabla de propiedades termodinámicas de mezcla de saturación.

$$h_{11S} = 697 + (1.01359) \cdot (2065.8)$$

$$h_{11S} = 2790.8742 \text{ KJ/Kg}$$

PUNTO 11

$$P_{11} = P_{\text{CALENTADOR PROCESO}} = 7 \text{ bar} = 700 \text{ kPa}$$

$$n_{\text{TURBINA VAPOR}} = \frac{h_9 - h_{11}}{h_9 - h_{11S}}$$

$$0.87 = \frac{3214.374 - h_{11}}{3214.374 - 2790.8742}$$

Despejando h_{11} :

$$h_{11} = 2845.9292 \text{ KJ/Kg}$$

Estado mezcla saturada liquida-vapor:

$$T_{11} = T_{\text{SATURACION}(P=700\text{kPa})} \rightarrow T_{11} = 164.9^{\circ}\text{C} = 438.05^{\circ}\text{K}$$

Cálculo de la calidad de vapor para determinar su entropía de cantidad de energía útil en el ciclo Rankine.

$$X_{11} = \frac{h_{11} - h_{f(P=700\text{kPa})}}{h_{fg(P=700\text{kPa})}}$$

$$X_{11} = \frac{2845.9292 - 697}{2065.8}$$

$$X_{11S} = 1.04024$$

Cálculo de la entropía en el punto 11:

$$S_{11} = S_{f(P=700\text{kPa})} + (X_{11}) \cdot (S_{fg(P=700\text{kPa})})$$

$$S_{11} = 1.9918 + (1.04024) \cdot (4.7153)$$

$$S_{11} = 6.8968 \text{ KJ/Kg}$$

PUNTO 12S

$$P_{12S} = P_{12} = P_{\text{CONDENSADOR}} = 0.098 \text{ Bar} = 9.80665 \text{ kPa} = 10 \text{ kPa}$$

$$S_{12S} = S_9 = 6.7712 \text{ KJ/Kg} - \text{K}$$

Estado mezcla saturada líquida-vapor:

A partir de la presión del condensador se determinará la temperatura de saturación acorde a la tabla de las propiedades de mezcla de saturación.

$$T_{12S} = T_{\text{SATURACION}(P=10 \text{ kPa})} \rightarrow T_{12S} = 45.81^{\circ}\text{C} = 318.96^{\circ}\text{K}$$

Ahora hallaremos el título o calidad de vapor del sistema.

$$X_{12S} = \frac{S_{12S} - S_{f(P=10\text{kPa})}}{S_{fg(P=10\text{kPa})}}$$

$$X_{12S} = \frac{6.7712 - 0.6492}{7.4996}$$

$$X_{12S} = 0.8163$$

Determinación de la entropía en el punto 12S:

$$h_{12S} = h_{f(P=10\text{kPa})} + (X_{12S}) \cdot (h_{fg(P=10\text{kPa})})$$

$$h_{12S} = 191.81 + (0.8163) \cdot (2392.1)$$

$$h_{12S} = 2144.4812 \text{ KJ/Kg}$$

PUNTO 12

$$P_{12} = P_{\text{CONDENSADOR}} = 0.098 \text{ Bar} = 9.80665 \text{ kPa} = 10 \text{ kPa}$$

$$n_{TURBINA VAPOR} = \frac{h_9 - h_{12}}{h_9 - h_{12S}}$$

$$0.87 = \frac{3214.374 - h_{11}}{3214.374 - 2144.4812}$$

Despejando h_{12} :

$$h_{12} = 2283.5673 \text{ KJ/Kg}$$

Estado mezcla saturada líquida-vapor:

$$T_{12} = T_{SATURACION(P=10 \text{ kPa})} \rightarrow T_{12} = 45.81^\circ\text{C} = 318.96^\circ\text{K}$$

Cálculo del título o calidad de vapor del sistema:

$$X_{12} = \frac{h_{12} - h_{f(P=10\text{kPa})}}{h_{fg(P=10\text{kPa})}}$$

$$X_{12} = \frac{2283.5673 - 191.81}{2392.1}$$

$$X_{12} = 0.87444$$

Determinación de la entropía en el punto 12:

$$S_{12} = S_{f(P=10\text{kPa})} + (X_{12}) \cdot (S_{fg(P=10\text{kPa})})$$

$$S_{12} = 0.6492 + (0.87444) \cdot (7.4996)$$

$$S_{12} = 7.2072 \text{ KJ/Kg}$$

PUNTO 13

$$P_{13} = P_{CALENTADOR PROCESO} = 7 \text{ bar} = 700 \text{ kPa}$$

$$X_{13} = 0$$

Estado de líquido saturado

De acuerdo a la tabla de mezcla saturada, se determina la temperatura saturada, entalpia y entropía respectivamente:

$$T_{13} = T_{SATURACION(P=700\text{kPa})} \rightarrow T_{13} = 164.9^\circ\text{C} = 438.05^\circ\text{K}$$

$$h_{13} = h_{f(P=700\text{kPa})} = 697 \text{ KJ/Kg}$$

$$S_{13} = S_{f(P=700\text{kPa})} = 1.9918 \text{ KJ/Kg}$$

PUNTO 14

$$P_{14} = P_{CONDENSADOR} = 0.098 \text{ Bar} = 9.80665 \text{ kPa} = 10 \text{ kPa}$$

$$X_{14} = 0$$

Estado de líquido Saturado

$$T_{14} = T_{\text{SATURACION}(P=10\text{kPa})} \rightarrow T_{14} = 45.8^\circ\text{C} = 318.96^\circ\text{K}$$

$$h_{14} = h_{f(P=10\text{kPa})} = 191.81 \text{ KJ/Kg}$$

$$S_{14} = S_{f(P=10\text{kPa})} = 0.6492 \text{ KJ/Kg}$$

PUNTO 15S

$$P_{15S} = P_{15} = P_{16} = P_{17} = P_7 = P_{\text{TURBINA VAPOR ENTRADA}} = 40\text{Bar} = 4000\text{kPa}$$

$$S_{15S} = S_{14} = 0.6492 \text{ KJ/Kg}$$

Ahora el estado está en líquido comprimido

$$T_{15S} = T_{(P=4000\text{kPa y } S=0.6492 \text{ KJ/Kg})} \rightarrow T_{15S} = 45.94^\circ\text{C} = 319.09^\circ\text{K}$$

$$T_{15S} = 319.09^\circ\text{K}$$

$$h_{15S} = h_{(P=4000\text{kPa y } S=0.6492 \text{ KJ/Kg})} \rightarrow h_{15S} = 195.8421 \text{ KJ/Kg}$$

$$h_{15S} = 195.8421 \text{ KJ/Kg}$$

Los valores de temperatura y entalpia en el punto 15S son designadas a partir de la tabla de líquido comprimido en las propiedades termodinámicas.

PUNTO 15

$$P_{15} = P_{16} = P_{17} = P_7 = P_{\text{TURBINA VAPOR ENTRADA}} = 40\text{Bar} = 4000\text{kPa}$$

Ahora realizamos el cálculo de la entalpia, a partir del rendimiento de la bomba y las entalpias en los puntos ya calculados:

$$n_{\text{BOMBA}} = \frac{h_{15S} - h_{14}}{h_{15} - h_{14}}$$
$$0.85 = \frac{195.8421 - 191.81}{h_{15} - 191.81}$$

$$h_{15} = 196.5536 \text{ KJ/Kg}$$

Ahora el estado está en líquido comprimido

$$T_{15} = T_{(P=4000\text{kPa y } h=196.5536 \text{ KJ/Kg})} \rightarrow T_{15} = 46.11^\circ\text{C} = 319.261^\circ\text{K}$$

$$T_{15S} = 319.261^\circ\text{K}$$

$$S_{15} = S_{(P=4000\text{kPa y } h=196.5536 \text{ KJ/Kg})} \rightarrow S_{15} = \mathbf{0.651455 \text{ KJ/Kg}}$$

$$S_{15} = \mathbf{0.65145521 \text{ KJ/Kg}}$$

PUNTO 16S

$$P_{16S} = P_{16} = P_{17} = P_7 = P_{\text{TURBINA VAPOR ENTRADA}} = \mathbf{40\text{Bar} = 4000\text{kPa}}$$

$$S_{16S} = S_{13} = \mathbf{1.9918 \text{ KJ/Kg}}$$

Ahora el estado está en líquido comprimido

$$T_{16S} = T_{(P=4000\text{kPa y } S=1.9918 \text{ KJ/Kg})} \rightarrow T_{16S} = 165.3377^\circ\text{C} = 438.4877^\circ\text{K}$$

$$T_{16S} = \mathbf{438.4877^\circ\text{K}}$$

$$h_{16S} = h_{(P=4000\text{kPa y } S=1.9918 \text{ KJ/Kg})} \rightarrow h_{16S} = 700.6881 \text{ KJ/Kg}$$

$$h_{16S} = \mathbf{700.6881 \text{ KJ/Kg}}$$

PUNTO 16

$$P_{16} = P_{17} = P_7 = P_{\text{TURBINA VAPOR ENTRADA}} = \mathbf{40\text{Bar} = 4000\text{kPa}}$$

$$n_{\text{BOMBA}} = \frac{h_{16S} - h_{13}}{h_{16} - h_{13}}$$

$$0.85 = \frac{700.6881 - 697}{h_{16} - 697}$$

Despejando h_{16} :

$$h_{16} = \mathbf{701.3389 \text{ KJ/Kg}}$$

Ahora el estado está en líquido comprimido

$$T_{16} = T_{(P=4000\text{kPa y } h=701.3389 \text{ KJ/Kg})} \rightarrow T_{16} = 165.4876^\circ\text{C} = 438.6376^\circ\text{K}$$

$$T_{16} = \mathbf{438.6376^\circ\text{K}}$$

$$S_{16} = S_{(P=4000\text{kPa y } h=701.3389 \text{ KJ/Kg})} \rightarrow S_{16} = 1.99332 \text{ KJ/Kg}$$

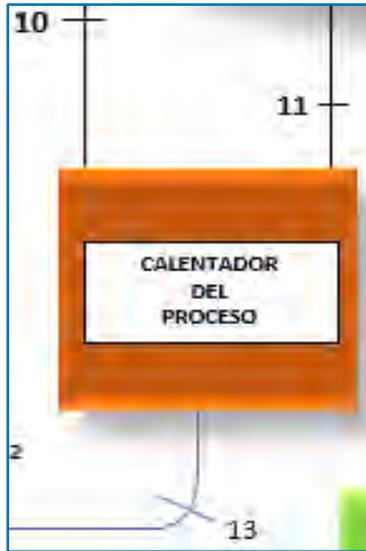
$$S_{16} = \mathbf{1.99332 \text{ KJ/Kg}}$$

PUNTO 17

Para poder hallar h_{17} se realizará el balance de energía de flujos masicos

2.5.5. BALANCE DE ENERGÍA EN EL CALENTADOR DE PROCESO

Figura 80. Calentador del proceso del ciclo de vapor propuesto



Fuente: Elaboración Propia

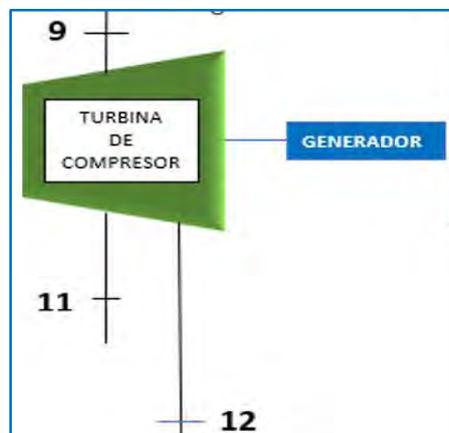
$$Q_{PROCESO} = m_{10} \times h_{10} + m_{11} \times h_{11} - m_{13} \times h_{13}$$

Sustituimos los valores de entalpia calculados anteriormente y obtenemos una ecuación para obtener los flujos de masas más adelante.

$$600kW = 3214.374m_{10} + 2845.9292m_{11} - 697m_{13} \dots \dots \dots \mathbf{F (1)}$$

3.2.1.1. POTENCIA DE LA TURBINA DE VAPOR

Figura 81. Esquema de la turbina de compresor del ciclo de vapor propuesto



Fuente: Elaboración Propia

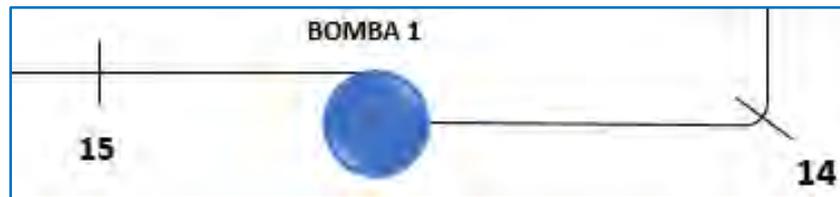
$$W_{TURBINA\ DE\ VAPOR} = m_9 \times h_9 - m_{11} \times h_{11} - m_{12} \times h_{12}$$

Reemplazando los valores de entalpia determinados anteriormente y obtenemos una segunda ecuación.

$$W_{TURBINA\ DE\ VAPOR} = 3214.374m_9 - 2845.9292m_{11} - 2283.5673m_{12}$$

3.2.1.2. POTENCIA DE LA BOMBA 1 EXTRACCIÓN DE CONDENSADO

Figura 82. Bomba 1 en los puntos 14 y 15 del ciclo de vapor propuesto



Fuente: Elaboración Propia

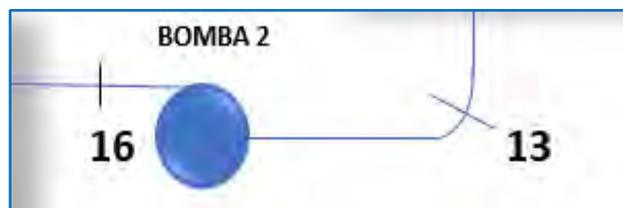
$$W_{BOMBA\ 1} = m_{15} \times h_{15} - m_{14} \times h_{14}$$

Reemplazamos las entalpias determinadas (h_{15} ; h_{14}) anteriormente para obtener una ecuación:

$$W_{BOMBA\ 1} = 196.5536m_{15} - 191.81m_{14}$$

3.2.1.3. POTENCIA DE LA BOMBA 2 DE ALIMENTACIÓN A LA CALDERA RECUPERADORA DE VAPOR

Figura 83. Bomba 2 en los puntos 13 y 16 del ciclo de vapor propuesto



Fuente: Elaboración Propia

$$W_{BOMBA\ 2} = m_{16} \times h_{16} - m_{13} \times h_{13}$$

Reemplazamos las entalpias determinadas (h_{16} ; h_{13}) anteriormente para obtener una ecuación:

$$W_{BOMBA\ 2} = 701.3389m_{16} - 697m_{13}$$

3.2.1.4. POTENCIA NETA DEL CICLO DE VAPOR

$$N_{VAPOR N.} = W_{TURBIN.VAPOR} \times n_{mecanic.turb.vapor} \times n_{generad.} - \frac{W_{BOMBA 1}}{n_{meca.bomb} \times n_{mot.bomb}} - \frac{W_{BOMBA 2}}{n_{meca.bomb} \times n_{mot.bomb}}$$

$$N_{VAPOR N.} = W_{TURBIN.VAPOR} \times n_{mecanic.turb.vapor} \times n_{generad.} - \left(\frac{W_{BOMBA 1} + W_{BOMBA 2}}{n_{meca.bomb} \times n_{mot.bomb}} \right)$$

$$250kW = (3214.374m_9 - 2845.9292m_{11} - 2283.5673m_{12}) \times 0.97 \times 0.96 \left(\frac{(196.5536m_{15} - 191.81m_{14}) + (701.3389m_{16} - 697m_{13})}{0.97 \times 0.96} \right) \dots \mathbf{F (2)}$$

$$232.8kW = 0.867133(3214.374m_9 - 2845.9292m_{11} - 2283.5673m_{12}) - (196.5536m_{15} - 191.81m_{14}) + (701.3389m_{16} - 697m_{13}))$$

La ecuación a partir de los flujos másicos estará determinada por la relación de masas.

3.2.1.5. RELACIÓN DE FLUJOS DE MASAS

$$m_{17} = m_7 = m_8 + m_{11} + m_{12} = 0.0694 \text{ Kg/s} = 250 \text{ Kg/h} \dots \dots \dots \mathbf{F(3)}$$

$$m_9 = m_{12} + m_{11} \dots \dots \dots \mathbf{F(4)}$$

$$m_{10} = m_8 \dots \dots \dots \mathbf{F(5)}$$

$$m_{13} = m_8 + m_{11} \dots \dots \dots \mathbf{F(6)}$$

$$m_{14} = m_{12} \dots \dots \dots \mathbf{F(7)}$$

$$m_{15} = m_{12} \dots \dots \dots \mathbf{F(8)}$$

$$m_{16} = m_8 + m_{11} \dots \dots \dots \mathbf{F(9)}$$

Ahora calculamos el sistema de ecuaciones:

F(1); F(2); F(3); F(4); F(3); F(4); F(5); F(6); F(7); F(8); F(9), donde a partir de un

sistema de matrices se calculó los valores de flujo másico en los diferentes puntos del ciclo

Rankine.

$$m_7 = 0.0694 \text{ Kg/s}$$

$$m_8 = 0.002351 \text{ Kg/s}$$

$$m_9 = 0.4858 \text{ Kg/s}$$

$$m_{10} = 0.002351 \text{ Kg/s}$$

$$m_{11} = 0.2764 \text{ Kg/s}$$

$$m_{12} = 0.2094 \text{ Kg/s}$$

$$m_{13} = 0.2788 \text{ Kg/s}$$

$$m_{14} = 0.2094 \text{ Kg/s}$$

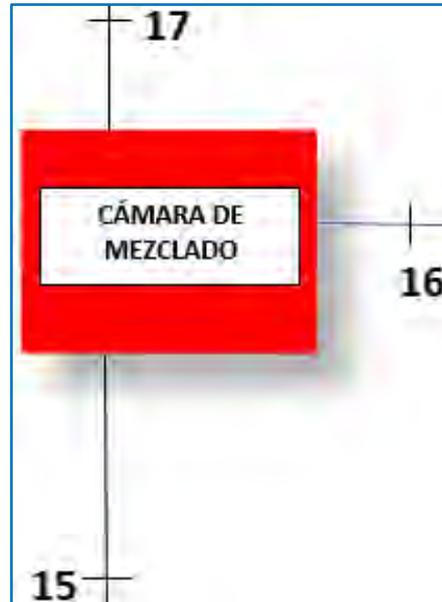
$$m_{15} = 0.2094 \text{ Kg/s}$$

$$m_{16} = 0.2788 \text{ Kg/s}$$

$$m_{17} = 0.0694 \text{ Kg/s}$$

3.2.1.6. ENTALPIA EN EL PUNTO 17

Figura 84. Cámara de combustión en los puntos 15,16 y 17 del ciclo de vapor propuesto



Fuente: Elaboración Propia

A continuación, se realiza el balance de energía em el mesclador

$$m_{15} \times h_{15} + m_{16} \times h_{16} = m_{17} \times h_{17}$$

$$0.2094 \times 196.5536 + 0.2788 \times 701.3389 = 0.0694 \times h_{17}$$

$$h_{17} = 3410.54 \text{ KJ/Kg}$$

$$P_{17} = P_7 = P_{\text{TURBINA VAPOR ENTRADA}} = 40 \text{ Bar} = 4000 \text{ kPa}$$

Ahora el estado está en líquido comprimido

$$T_{17} = T_{(P=4000 \text{ kPa y } h=3410.54 \text{ KJ/Kg})} \rightarrow T_{17} = 484.5924^\circ\text{C} = 757.7424^\circ\text{K}$$

$$T_{17} = 757.7424^\circ\text{K}$$

$$S_{17} = S_{(P=4000 \text{ kPa y } h=3410.54 \text{ KJ/Kg})} \rightarrow S_{17} = 7.04578 \text{ KJ/Kg}$$

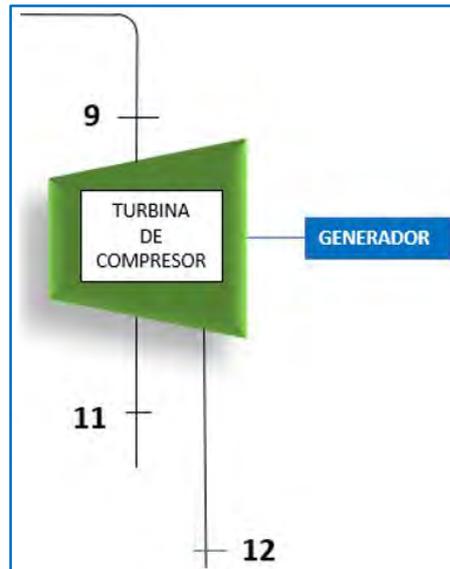
$$S_{16} = 7.04578 \text{ KJ/Kg}$$

2.5.6. POTENCIAS

Luego de obtener y tener los valores de entalpías, entropías, flujos másicos en todos los puntos del ciclo Rankine, procederemos a calcular las potencias.

3.2.1.7. POTENCIA DE LA TURBINA DE VAPOR

Figura 85. Turbina de compresor en los puntos 9,11 y 12 del ciclo de vapor propuesto



Fuente: Elaboración Propia

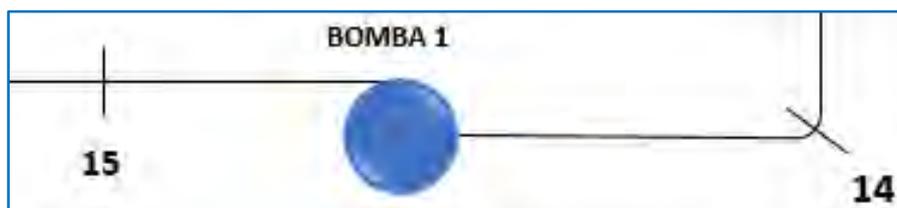
$$W_{TURBINA DE VAPOR} = m_9 \times h_9 - m_{11} \times h_{11} - m_{12} \times h_{12}$$

$$W_{TURBINA DE VAPOR} = 0.4858 \times 3214.374 - 0.2764 \times 2845.9292 - 0.2094 \times 2283.0567$$

$$W_{TURBINA DE VAPOR} = 296.7491 \text{ kW}$$

3.2.1.8. POTENCIA DE LA BOMBA 1 DE EXTRACCIÓN DE CONDENSADO

Figura 86. Bomba 1 en los puntos 14 y 15 del ciclo de vapor propuesto



Fuente: Elaboración Propia

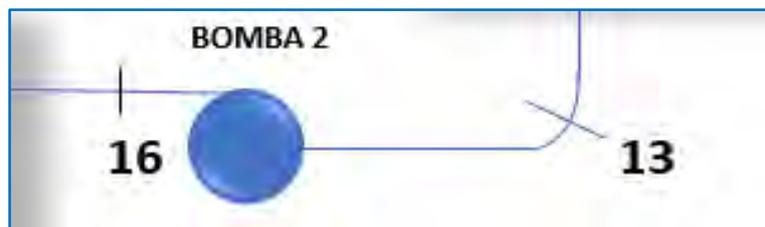
$$W_{BOMBA1} = m_{15} \times h_{15} - m_{14} \times h_{14}$$

$$W_{BOMBA1} = 0.2094 \times 196.5536 - 0.2094 \times 191.81$$

$$W_{BOMBA1} = 0.9933 \text{ kW}$$

3.2.1.9. POTENCIA DE LA BOMBA 2 DE ALIMENTACIÓN A LA CALDERA RECUPERADORA DE VAPOR

Figura 87. Bomba 2 en los puntos 13 y 16 del ciclo de vapor propuesto



Fuente: Elaboración Propia

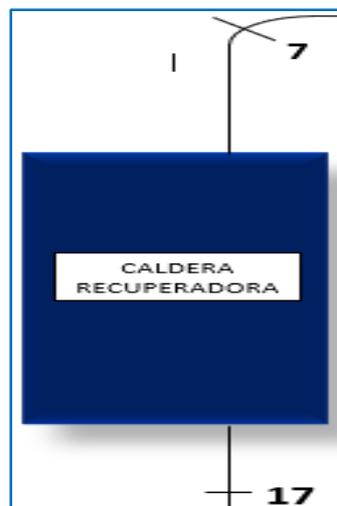
$$W_{BOMBA2} = m_{16} \times h_{16} - m_{13} \times h_{13}$$

$$W_{BOMBA2} = 0.2788 \times 701.3389 - 0.2788 \times 697$$

$$W_{BOMBA2} = 1.2097 \text{ kW}$$

3.2.1.10. POTENCIA DE ENTRADA AL CICLO VAPOR

Figura 88. Caldera recuperadora de vapor en los puntos 7 y 17 del ciclo de vapor propuesto



Fuente: Elaboración Propia

$$Q_{\text{CICLO VAPOR ENTRADA}} = m_7 \times h_7 - m_{17} \times h_{17}$$

$$Q_{\text{CICLO VAPOR ENTRADA}} = 0.0694 \times 3214.374 - 0.0694 \times 3410.54$$

$$Q_{\text{CICLO VAPOR ENTRADA}} = 13.6139 \text{ kW}$$

3.2.1.11. POTENCIA RECHAZADA EN EL CONDENSADOR

Figura 89. Condensador en el punto 12 y 14 del ciclo de vapor propuesto



Fuente: Elaboración Propia

$$Q_{\text{RECHAZADA CICLO VAPOR}} = m_{12} \times h_{12} - m_{14} \times h_{14}$$

$$Q_{\text{RECHAZADA CICLO VAPOR}} = 0.2094 \times 2283.5673 - 0.2094 \times 191.81$$

$$Q_{\text{RECHAZADA CICLO VAPOR}} = 438.014 \text{ kW}$$

2.5.7. PARÁMETROS DE SALIDA

3.2.1.12. EFICIENCIA DEL CICLO DE GAS

$$n_{\text{CICLO GAS}} = \frac{N_{\text{GAS NETO}}}{m_{\text{BIOGAS}} \times PCI_{\text{BIOGAS}}}$$

$$n_{\text{CICLO GAS}} = \frac{500 \text{ kW}}{0.12317 \times 21507.643}$$

$$n_{\text{CICLO GAS}} = 18.87\%$$

3.2.1.13. RENDIMIENTO ENERGÉTICO PARA LA OBTENCIÓN DE POTENCIA

$$n_{ELECTRICO CENTRAL} = \frac{N_{GAS NETO} + N_{VAPOR NETO}}{m_{BIOGAS} \times PCI_{BIOGAS} + m_{BIOGAS POST-COMBUSTION} \times PCI_{BIOGAS}}$$

$$n_{ELECTRICO CENTRAL} = \frac{500kW + 250kW}{0.12317 \times 21507.643 + 0.014529 \times 21507.643}$$

$$n_{ELECTRICO CENTRAL} = 25.32\%$$

3.2.1.14. RENDIMIENTO ENERGÉTICO PARA LA GENERACIÓN DE CALOR

$$n_{CALOR CENTRAL} = \frac{Q_{PROCESO}}{m_{BIOGAS} \times PCI_{BIOGAS} + m_{BIOGAS POST-COMBUSTION} \times PCI_{BIOGAS}}$$

$$n_{CALOR CENTRAL} = \frac{600kW}{0.12317 \times 21507.643 + 0.014529 \times 21507.643}$$

$$n_{CALOR CENTRAL} = 20.26\%$$

3.2.1.15. FACTOR DE UTILIZACIÓN DE LA CENTRAL TÉRMICA

$$\epsilon_{\mu} = \frac{POTENCIA_{NETA CENTRAL} + CALOR_{PROCESO}}{ENTRADA_{CALOR}}$$

$$\epsilon_{\mu} = \frac{N_{GAS NETO} + N_{VAPOR NETO} + Q_{PROCESO}}{m_{BIOGAS} \times PCI_{BIOGAS} + m_{BIOGAS POST-COMBUSTION} \times PCI_{BIOGAS}}$$

$$\epsilon_{\mu} = \frac{500kW + 250kW + 600kW}{0.12317 \times 21507.643 + 0.014529 \times 21507.643}$$

$$\epsilon_{\mu} = 45.58\%$$

3.2.1.16. ÍNDICE DE CALOR-ELECTRICIDAD

$$\frac{Q}{E} = \frac{Q_{PROCESO}}{N_{GAS NETO} + N_{VAPOR NETO}}$$

$$\frac{Q}{E} = \frac{600kW}{500kW + 250kW}$$

$$\frac{Q}{E} = 0.8$$

2.5.8. ANÁLISIS DE SELECCIÓN DEL DISEÑO DEL CICLO COMBINADO

La selección de las componentes y equipos de implementación de una central térmica abarco tecnología de acorde al espacio de instalación y funcionamiento de la central termoeléctrica de biogás (gas natural) con características de presión y temperatura ambiente para su modelamiento específico de acuerdo a su principio de cálculo y resultados de materia orgánica aprovechada y luego es transformada en biogás.

3.2.1.17. ELECCIÓN DE LA CONFIGURACIÓN DEL CICLO COMBINADO

El modelamiento del ciclo combinado más óptima para el funcionamiento de la Central Termoeléctrica es constituido por la configuración **multieje de tipo del 1X1**, el cual está establecida con la implementación de dos turbinas de gas de la misma potencia ajustada o acoplada individualmente un generador para cada turbina así como una calderas recuperadoras de calor (HRSG) con un sistema autónomo para cada sección independientemente para luego producir vapor en una única turbina de vapor del Ciclo Rankine con su respectivo generador eléctrico.

Esta configuración ha sido determinada ya que:

- Favorece a la facilidad del mantenimiento de los equipos de generación como el generador eléctrico sin embargo los costos de inversión de los equipos diferirán al momento de la instalarlos.

3.2.1.18. ELECCIÓN DE LA CALDERA RECUPERADORA DE CALOR (HRSG)

Al tener ventajas y desventajas, en facilitar el mantenimiento y una alta eficiencia dentro de las exigencias que debe tener la caldera. Es por eso que se escogió un generador de vapor acuo tubular que presenta características en el espacio del relleno sanitario de Haquira de:

- Generación de vapor a las altas presiones lo que proporciona mayor generación de fluido de vapor para poder producir energía mecánica a altas velocidades de giro y producir energía eléctrica, ya que la circulación de fluido de agua es calentada de los gases de la salida de la turbina de gas que se encuentran a una alta temperatura, teniendo como producto mayor capacidad de generación de vapor
- El tipo de posición del generador de vapor en situación de reducir el espacio de instalación de la central térmica permitió la posición **vertical** con la sección de haces tubulares en dirección horizontal.
- Se estableció en emplear el proceso de postcombustión a la salida de la caldera recuperadora de calor, para ganar mayor aprovechamiento del fluido de vapor a altas temperaturas.
- El paso de circulación del agua de alimentación es de tres pasos de humos, de tal manera facilite la aceleración de generación y proporcione un rendimiento de vapor saturado.
- En el punto 7 y 17 del cálculo de potencia del análisis del ciclo termodinámico en la entrada del ciclo vapor, el valor del flujo másico $m_7=m_{17}$ el cual es de 0.0694 kg/s está determinada para la selección de la caldera recuperadora donde la producción de vapor es de 250 kg/h.
- Los generadores de vapor más eficiencias son las VYC INDUSTRIAL con una eficiencia del 70 al 90% de su máxima capacidad puesto que su mecanismo de generación de vapor está establecido por la presencia de precalentamiento, calentamiento y postcalentamiento, reemplazando a intercambiadores de calor convencionales con solo 50% máximo de efectividad.
- El modelamiento del intercambiador de calor se realizará a partir del acoplamiento de la instalación de quemadores adicionales en la entrada y espacio alrededor del gas

caliente de la caldera recuperadora de vapor lo que proporcionará mayor temperatura a la salida del generador de vapor hasta llegar a los 1000°C de temperatura. Así los quemadores adicionales también pueden ser incorporados como economizadores, sobrecalentadores y evaporadores y recalentadores.

Figura 90. Caldera recuperadora de calor VYC INDUSTRIAL modelo HK 250



Fuente: Catalogo de generadores de vapor VYC INDUSTRIAL.

Tabla 55. Características Técnicas de una Caldera recuperadora de calor VYC INDUSTRIAL modelo Hk250

Características Técnicas de un HRSG marca VYC INDUSTRIAL	
Modelo	HK
Fluido	Vapor saturado-Alta presión
Tipo	Caldera Acuotubular Vertical
Producción	de 250 a 2500 Kg/h
Presión de diseño	Hasta 16 Bar
Temperatura máxima	hasta 206 °C
Combustible	Gas, Petroleo, Fueloleo

Fuente: Elaboración propia (Cuadro de características de la caldera recuperadora VYC INSTRUL)

Esta caldera recuperadora de calor o generador de vapor se basa en la circulación del fluido mediante 3 pasos de humos, al presentar el proceso de postcombustión para ganar la presión y la temperatura, será necesario utilizar los pasos al circular por el quemador o cámara de combustión.

3.2.1.19. ELECCIÓN DE LA TURBINA DE GAS

En la selección de la turbina del ciclo Brayton se implementará al optar la turbomáquina **microturbina de gas marca Capstone modelo C600**, el cual tiene características que predominaron para su selección en las maquinas generadoras, estas son:

- Esta microturbina presenta un ciclo Brayton regenerativo Ciclo Brayton regenerativo cuya función es aumentar su rendimiento que llega hasta 75 veces de la eficiencia de una turbina de potencia.
- Una sola pieza móvil con cojinetes de aire. Ausencia total de vibraciones y líquidos lubricantes.
- Las emisiones que son expulsadas a la salida de la microturbina y posteriormente eyectadas a la atmosfera por medio de la chimenea son menores de 9 ppm (partes por millón de óxidos de nitrógeno (NO_x)).
- El sistema de refrigeración es mediante el aire.

Figura 91. Sección de la microturbina de Gas Capstone C600



Fuente: Catálogo de microturbinas de gas Capstone Turbine Corporation

Tabla 56. Características Técnicas de una microturbina Capstone C600

Características Técnicas de una Microturbina de gas CAPSTONE	
Modelo	C600
Potencia Térmica(kWt)	275
Potencia Eléctrica(kWe)	600
Consumo de Gas(kW)	606
Rendimiento Térmico (%)	45.37%
Rendimiento Eléctrico (%)	33%
Rendimiento Global (%)	78%
Emisiones de CO2(g/kWh)	283.49
Emisiones de NOX(g/kWh)	0.18
Temperatura de gases de escape	280°C
Flujo de masas de gases de escape	4.0 kg/s
Dimensionamiento	2.4 x 9.1 x 2.9

Fuente: Elaboración Propia-Catalogo CAPSTONE

3.2.1.20. ELECCIÓN DE LA TURBINA DE VAPOR

Esta turbina de vapor del ciclo Rankine es la que se encarga de transformar la energía del vapor en energía mecánica procedente de la caldera de recuperación de calor. Así mismo se selección la Turbina Siemens SST-040.

Figura 92. Vista Perfil de Turbina de vapor HOWDEN BASE KK&K



Fuente: Catálogo de turbinas de vapor HOWDEN

Tabla 57. Características Técnicas de una turbina de vapor HOWDEN BASE KK&K 1M

Características Técnicas de una Turbina de Vapor SIEMENS SST-040	
Modelo	Turbogenerador BASE CORE
Potencia Salida(kW)	1000Kw
Presión de vapor de entrada	40bar (580 psi)
Temperatura de vapor saturado de entrada seco	400°C (673°K)
Presión de vapor de escape o contrapresión	7bar

Fuente: Elaboración Propia-Catalogo de turbinas de gas HOWDEN

Presentan características propias de esta turbina de vapor HOWDEN BASE-CORE, las cuales fueron parte fundamental para su determinada elección:

- Según el valor de la presión a la salida de la turbina, estas turbomáquinas de vapor muestran contrapresión cuyo valor es de 7 bares en comparación con la presión atmosférica de 1,013bar.
- Según el flujo de circulación de vapor será expulsado a la salida de la turbina de vapor en dirección perpendicular al eje de la turbina, es decir de flujo radial.
- El eje de la turbina Siemens SST-040 es monoeje, proporcionando mayor eficiencia a las salidas de la turbina, donde la velocidad de giro constante no requiere la inercia que presenta en el instante del cambio de carga.
- El arranque es activamente acelerado así llegar a la velocidad de giro de la turbina de vapor.

3.2.1.21. ELECCIÓN DEL CONDENSADOR

La selección del condensador de vapor es de tipo **Condensador de agua**, donde circula el fluido de agua por la sección de tubos que son más eficientes que los aerocondensadores con torres de refrigeración. Los **Condensadores AISI 304 / 316L de la marca XINREN**, que son intercambiadores de calor de tubos de superficie, es decir que el fluido de agua de enfriamiento

y el vapor saturado no se mezclan y son aprovechados únicamente para la función de cumplir específicamente lo que consigue mayor eficiencia y confiabilidad. Su transición del fluido condensador es de un solo paso

El alto grado de temperatura en el fluido condensado y su diferencia de presiones a la salida de la turbina mejor eficiencia en la turbina de vapor

Figura 93. Condensadores AISI 304 / 316L de la marca EQUIREPSA



Fuente: Catalogo de Condensadores AISI.

Tabla 58. Características Técnicas de un Condensador AISI 304 / 316L de la marca EQUIREPSA

Características Técnicas de un Condensador de vapor XINREN	
Modelo	AISI 304 / 316L
Presión Máxima de entrada (kPa)	9.80665 KPa
Temperatura de los gases a la entrada	130°C
Temperatura máxima de trabajo(°C)	150°C
Caudal de Fluido(m ³ /s)	450 kg/h vapor/aire

Fuente: Elaboración Propia-Catalogo de Condensadores EQUIREPSA

3.2.1.22. *ELECCIÓN DE LA BOMBA DE EXTRACCIÓN DE CONDENSADO*

Este tipo de bomba ha sido seleccionado para la función de extraer el agua condensada y parte del agua en condiciones de ebullición de la caldera recuperadora de calor, ya que podrían absorber fluido con impurezas que podrían corroer los instrumentos de transformación de energía. Ha sido denominado y elegido como **Bomba VSP-VSP CHEM de la marca RUHRPUMPEN**, donde:

- La bomba vertical de sumidero VSP-VSP CHEM se comporta como bomba de extracción de fluido, que está compuesta por varias etapas dispuestas de secciones de tazones e impulsores entre abiertos y semiabiertos donde al estar ensamblados en el acoplamiento de una carcasa de descarga, campana de succión y principalmente los tazones mencionados, así al estar colocados en el interior de los pozos o suministros propios de este tipo de bomba.
- La bomba VSP-VSP CHEM presenta un impulsor semiabierto el cual las paredes permiten la succión o impulsión de sólidos o fluido determinadas con tiene una mayor resistencia y eficiencia al mismo tiempo.
- El flujo másico m_{14} y m_{15} como variación de la masa en los puntos 14 y 15 en la entrada y salida de la bomba de extracción de fluido se determinó el caudal apropiado para la selección del condensador. El valor del flujo másico m_{14} y m_{15} es igual a 0,2094 kg/s al ser convertido su valor sería igual 0,7538 m^3/h por consiguiente la selección de la capacidad del caudal tiene que ser mayor a 0,7538 m^3/h .

Figura 94. Perfil de una bomba VSP/VSP CHEM RUHRPUMPRN vertical tipo turbina



Fuente: Catalogo de Bomba VSP CHEM

Tabla 59. Características Técnicas de una bomba VSP/VSP CHEM RUHRPUMPEN

Características Técnicas de una bomba VSP/VSP CHEM RUHRPUMPEN	
Modelo	VSP CHEM RUHRPUMPEN
Capacidad del Caudal	1.931 m ³ /h (8,500 galones por minuto)
Carga	130 m (425 pies)
Presión	40 bar (580 libras por pulga cuadrada)
Temperatura	200°C(400°F)

Fuente: Elaboración Propia-Catalogo de bomba RUHRPUMPEN

3.2.1.23. ELECCIÓN DE LA BOMBA DE ALIMENTACIÓN

La implementación de la bomba de alimentación de la central térmica ha sido determinada por la elección del instrumento de bombeo a la caldera recuperadora de calor a la **Bomba BEK BEL de marca IMBIL**, cuya bomba centrífuga multietapa horizontal tiene funciones de suministro, condensado, circulación y destilamiento de aguas residuales y potables en un sistema de procesos de filtrado, incendios y alimentación de una central térmica. Está compuesta por un rotor entre cojinetes que pueden ser de uno o más escalonamientos, teniendo como parámetro de diseño la altura neta positiva de aspiración, el cual determina la distancia de cercanía de la instalación a la cavitación, donde es mínimo de acuerdo al equipo que se requiera, su doble cámara para contrarrestar tensiones mecánicas, así como también la presencia de cojinetes hidrodinámicos.

Figura 95. Bomba centrífuga BEK BEL marca IMBIL



Fuente: Catalogo de Bomba Centrifugo BEK BEL

Tabla 60. Característica Técnicas de una bomba BEK BEL

Característica Técnicas de una bomba BEK BEL	
Modelo	BEK-BEL línea
Caudal de fluido de entrada BEK	200 m ³ /h
Caudal de BEL-Línea	350 m ³ /h
Altura manométrica	400 m. c. a
Temperatura	180°C

Fuente: Elaboración Propia-Catalogo de bomba BEK BEL

3.2.1.24. ELECCIÓN DEL GENERADOR ELÉCTRICO

En una central térmica es imprescindible la selección de características de instrumentos o equipos dentro de sus necesidades. Todos los parámetros influyen en el dimensionamiento del generador eléctrico. El generador eléctrico se rige a partir de sus valores y procedimientos técnicos de montaje de los parámetros característicos a seleccionar:

- **POTENCIA APARENTE MÁXIMA:** Dicha potencia tendrá un rango mayor a la potencia activa o útil ya que técnicamente es la potencia total de la potencia activa y reactiva y por ende tendrá un valor mayor a la potencia útil de ejercida en el trabajo.
- **POTENCIA ACTIVA:** La potencia que será suministrada por la carga, será a partir de la potencia mecánica de la microturbina que permita la rotación de la generación como fuente de alimentación al eje del rotor.
- **FACTOR DE POTENCIA:** En una central térmica, el coseno o factor de potencia está dada por la relación de la potencia aparente sobre la potencia activa donde normalmente es del 0.8.

- **VOLTAJE NOMINAL:** La tensión al ser de conexión estrella, existirá dos niveles preliminares de voltaje 220/380V con 3 fases y un neutro o 3 fases.
- **INTENSIDAD NOMINAL:** A partir de la potencia aparente calculada y la tensión nominal, se obtendrá la corriente nominal.

$$\text{Corriente nominal} = \frac{\text{Potencia}}{\text{Voltaje nominal} \times \sqrt{3} \times \text{coseno}\alpha}$$

$$\text{Corriente nominal}(220V) = \frac{600 \text{ KW}}{220 \times \sqrt{3} \times 0.80}$$

$$\text{Corriente nominal}(220V) = 1.9682 \text{ KA}$$

$$\text{Corriente nominal}(380V) = \frac{600 \text{ KW}}{380 \times \sqrt{3} \times 0.80}$$

$$\text{Corriente nominal}(380V) = 1.1395 \text{ KA}$$

- **NÚMERO DE POLOS DEL ROTOR:** Es imprescindible la velocidad de giro del rotor por ende para que la velocidad sea constante y con giro rápido será de 2 polos en el rotor.
- **NÚMERO DE FASES DEL ESTATOR:** Un generador de 3 fases o arrollamientos en el estator proporciona la eficiencia al proporcionar una corriente alterna trifásica con conexión estrella, permitiendo la baja cantidad de aislamiento y un menor torque.
- **VELOCIDAD DEL ROTACIÓN:** será de 3600 revoluciones por minuto al presentar 2 números de polos.
- **TIPO DE REFRIGERACIÓN:** Existe 3 tipos de refrigeración, agua, aire e hidrogeno como medio de enfriamiento al generador síncrono trifásico. Este generador síncrono propiamente seleccionado presenta un sistema de enfriamiento sellado en donde el agua recircula por el interior de los tubos a una determinada

temperatura de aire que recorre completamente cerrado puesto que el aire no es expulsado al exterior. Así mismo este sistema cerrado evita el ingreso de impurezas o suciedad q pueda deteriorar el aislamiento de los arrollamientos.

- **TIPO DE EXCITATRIZ**

Normalmente las centrales térmicas utilizan un sistema de excitación de anillos colectores por su facilidad de mantenimiento y menos costo. La utilización de anillos rozantes y escobillas será necesaria en este sistema de excitación ya que será suministra a través de los diodos giratorios el cual rectificará y permitirá alimentar de corriente continua al campo inductor. Al carecer de un sistema de autoexcitación mediante imanes permanentes proporciona una diferencia en el mantenimiento de las escobillas y al precio costoso de estos imanes en una magnetización remanente.

- **TIPO DE AISLAMIENTO:** Normalmente son de clase F con una temperatura máxima de 155°C para el recubrimiento de los devanados del rotor y del estator que están expuestos y son los más propensos al desgaste y el deterioro del material aislante. Este generador síncrono deberá de ser de material de fibra de vidrio o de cintas especiales de mica cubiertas de resina epoxica para mantener su periodo de vida en los arrollamientos del alternador.

- **GRADO DE PROTECCIÓN:** Generalmente las maquinas eléctricas poseen una envoltura contra el acceso a partes expuestas. Por consiguiente, es esencial saber el nivel de protección a determinados sólidos, líquidos. Los generadores síncronos habitualmente son de tipo IP o protección de entrada el cual presenta un envoltorio idóneo que soporta la fibra, partículas de polvo, y chorros de agua, bajo definidos valores de presión y ángulo de incidencia, evitando la inserción que pueda ser nocivo al funcionamiento del alternador. El valor del IP es 55, el cual es una protección completamente al contacto de cualquier partícula menor a 1mm.

a) CONTROL DEL SISTEMA DE EXCITACIÓN

El control y regulación del sistema de excitación da lugar al control de la corriente de excitación o corriente continua ya que la tensión inducida generada en los bornes del estator será limitada por dicha corriente, la velocidad de giro y la fuerza electromotriz.

b) REGULADOR AUTOMÁTICO DE VOLTAJE (AVR)

EL controlador o regulador de tensión del generador síncrono a seleccionar estará establecida por las correcciones de voltaje inducido. Por ello necesitaremos un AVR electromecánico ya que facilitan el espacio y el peso que presentan estos dispositivos. Este dispositivo se encuentre adherido al alternador el cual esta encapsulado y protegido contra humedad, aire y vibraciones. El adecuado alternador propio con características técnicas y parámetros apropiados ha sido seleccionado como el generador síncrono de alta eficiencia, las cuales permiten un control perfecto del voltaje y de la energía reactiva ya sea capacitiva o inductiva que vierten a la red. El alternador que será implementada a la central térmica de ciclo combinado será **LEROY SOMMER modelo LSA 47.2 M7** por la cual estará regida de características específicas, el cual son las siguientes:

Es una maquina sincrónica-alternador con un sistema autorregulado, teniendo como sistema de transmisión de contacto al rotor usando unos rectificadores giratorios que rotan junto al eje de la excitatriz, estos rectificadores acoplados directamente con el devanado de campo o del rotor del generador síncrono.

Figura 96. Alternador LSA 47.2 M7 marca LEROY SOMMER



Fuente: Catalogo de Alternador LEROY SOMMER

Tabla 61. Características Técnicas de un Alternador Síncrono LEROY SOMMER LSA 47.2 M7

Características Técnicas de un Alternador Síncrono LEROY SOMER LSA 47.2 M7	
Modelo	LSA 47.2 M7
Tensión(V)	480/277
Frecuencia (Hz)	60
Velocidad de giro (RPM)	3600
Potencia Aparente (KVA)	680
Potencia Instalada (KW)	544
Acoplamiento	1
Factor de potencia	0.8
Clase de aislamiento	H
Clase de calentamiento	F
Excitación	Control Electrónico
Nivel de Protección	IP-23
Ajuste de Voltaje	-0.5%
Capacidad corriente de cortocircuito a 300% (3 IN)	30s
Temperatura Ambiente	<40°C
Flujo de Aire	0.9M/s
Rendimiento al 75% f.d.p. 0,8 (%)	95
Rendimiento al 100% f.d.p. 0,8 (%)	95
Reactancia sub. directa, X''d (p.u.)	11.6
Reactancia homopolar (Xo) (ms)	0.1
Constante de tiempo sub. directa (T''d)	10
Relación de cortocircuito (Kcc)	0.35

Fuente: Elaboración Propia-Catalogo del generador síncrono LEROY SOMMER

3. CAPITULO V: IMPACTO AMBIENTAL Y SOCIAL

3.1. IMPACTO AMBIENTAL

La generación de biogás procedente de la materia orgánica de los residuos sólidos urbanos ha reflejado en un resultado de reducción de los gases de efecto invernadero y derivados que han sido causantes contaminantes de nuestro planeta a su vez imponiendo al calentamiento global por una excesiva acumulación de gases nocivos de biogás a lo largo de los años. El adecuado aprovechamiento del biogás ha permitido emplearla en procesos descomposición en sistemas de compostaje de metano como uno de los gases con mayor efecto contaminante producto de la biodigestión anaeróbica.

3.2. OBJETIVO

Evaluar los impactos ambientales potenciales positivos y negativos de la tesis, estableciendo la sustentabilidad ambiental y los medios para su inserción en armonía con la naturaleza, el desarrollo económico y el bienestar social del ámbito del Proyecto de Tesis.

3.3. METODOLOGÍA

La metodología empleada en la identificación, evaluación y descripción de los impactos ambientales; se basa en la interrelación sistémica procesal causa-efecto entre los componentes del proyecto y los componentes del medio ambiente. Esta interrelación se efectúa mediante la aplicación de tres procedimientos sistémicos.

La identificación de los impactos se realiza mediante la relación sistémica en campo; basado en el diagnóstico físico, biológico, social, económico y cultural; así como, en el diseño estructura y composición de la obra, de los procesos y actividades durante la construcción, funcionamiento y abandono.

3.4. CRITERIOS DE EVALUACIÓN DE IMPACTOS

En esta sección se indican los criterios que se toman en la evaluación de los impactos potenciales positivos y negativos, y los que ocurrirán en las diferentes etapas del proyecto. Los recursos que serán afectados directamente (suelo, aire, cultural y humano).

3.4.1. TIPO DEL IMPACTO

La naturaleza del impacto está referida al beneficio de ocurrencia del impacto. Un impacto Negativo es aquel cuyo efecto se traduce en pérdida de calidad ambiental y Positivo es aquel admitido como tal en el contexto de un análisis completo.

3.4.2. MAGNITUD DEL IMPACTO

Se refiere al grado de construcción del impacto, pudiendo ser Alta, Moderada (alteración del recurso) y Baja (el impacto es despreciable).

3.4.3. DURACIÓN DEL IMPACTO

Determina la persistencia del impacto en el tiempo, calificándose como Temporal, si es menor de un mes; Moderada, si supera el año y Permanente si su duración es de varios años. Asimismo, la duración puede calificarse como Estacional, si está determinada por factores climáticos.

3.5. MITIGACIÓN DEL IMPACTO

Determina si los impactos ambientales negativos son mitigables en cuanto a uno o varios de los criterios utilizados para su evaluación y se les califica como no mitigables, de mitigabilidad baja, moderadamente mitigable y de alta mitigabilidad.

3.6. SIGNIFICANCIA DEL IMPACTO

Incluye un análisis global del impacto, teniendo en cuenta sobre todo los criterios anteriores y determina el grado de importancia de estos sobre el ambiente receptor, su calificación cualitativa, se presenta como baja, moderada y alta.

Tabla 62. Criterios para la Evaluación de Impacto Ambiental Potencial

Criterios de Evaluación	Símbolo	Escala Jerárquica Cualitativa	Ponderación de Impactos	
			Negativos	Positivos
Tipo de Impacto	TI	Positivo		+
		Negativo	-	
Magnitud	M	Baja	1	1
		Moderada	2	2
		Alta	3	3
Duración	D	Temporal	1	1
		Moderada	2	2
		Permanente	3	3
Mitigabilidad (*)	MI	Baja	3	
		Moderada	2	
		Alta	1	
		No Mitigable	3	
Significancia (**)	S	Baja	3 - 4	2 - 3
		Moderada	3 - 7	4
		Alta	8 - 9	5 - 6

Fuente: Elaboración Propia

(*) Criterio aplicable sólo a los impactos negativos

(**) Su valor es la resultante de la valoración de los demás criterios que intervienen en la evaluación.

Luego de haber examinado cada impacto de acuerdo a los criterios seleccionados, se procede a determinar la Significancia de los mismos, que viene a ser la importancia de los impactos sobre el ambiente receptor. Su valor, que según la escala cualitativa puede ser Alta, Media o Baja, depende de los valores asignados a los criterios anteriores, según la ecuación siguiente:

$$(S) = TI (M + D + MI)$$

3.7. DIAGNÓSTICO AMBIENTAL

El diagnóstico ambiental del área de trabajo es importante para una óptima evaluación de los impactos que se podrían generar durante la construcción y operación del proyecto. El diagnóstico ambiental es un instrumento que permite trabajar la problemática ambiental de la zona del proyecto de una forma planificada, de los problemas que tengan en su entorno cercano, capaz de involucrar a la población afectada en los procesos de solución.

Los factores ambientales que serán alterados por las actividades de ejecución y operación de las actividades de enseñanza con los posibles impactos ambientales durante las etapas de construcción y operación indicados.

3.8. ÁREA DE INFLUENCIA DEL PROYECTO

El proyecto estaría ubicado en la cercanía del relleno sanitario de Haqira, del distrito de Ccorca, o en las proximidades del nuevo relleno sanitario propuesto por la Municipalidad Provincial del Cusco. Con el cual se verán beneficiados más de 1 millón habitantes.

Tabla 63. Carácter de los Posibles Impactos Ambientales en la Ejecución de la Obra y Puesta en Marcha de la Central Térmica a Biogás

Factores Ambientales	Etapas del Proyecto	
		Operación y Mantenimiento
I. Aspectos Físico –Químicos		
a) Aire		
Emisión de partículas y Polvo	Regular	No presenta
Emisión de Gases de combustión	No presenta	No presenta
Emisión de Gases Enrarecidos	No presenta	No presenta
Ruido	Regular	Mínimo
Vibración	Regular	No presenta

b) Suelo		
Residuos Sólidos	Regular	No presenta
Derrame de Combustible Aceites	Mínimo	No presenta
c) Agua		
Agua de Mar	No presenta	No presenta
II. Aspectos Biológicos		
d) Flora y Fauna		
Flora	Presenta	No presenta
Fauna	Presenta	No presenta
III. Aspectos Socio – Económico y Cultural		
Calidad de Vida	Presenta	Favorable
Congestión de tráfico	Presenta	No presenta
Salud e Higiene	Mínimo	Favorable
Seguridad	Mínimo	No presenta
Empleo	Favorable	Favorable
Comercio	Favorable	Favorable
Paisaje	Regular	Favorable

Fuente: Elaboración Propia

3.9. IDENTIFICACIÓN Y EVALUACIÓN DE LOS IMPACTOS AMBIENTALES

En este ítem se describen los impactos ambientales potenciales más importantes que se generarían por la ejecución de las obras de construcción del conjunto.

Así mismo, se describen los impactos de acuerdo al período y duración en que ocurrirían, considerando las etapas de construcción, operación y abandono de las obras del proyecto.

La identificación, análisis y descripción se realiza en base de la Matriz de Impactos Ambientales, establecido las relaciones de causa-efecto entre los componentes del Medio Ambiente y del Proyecto; así como el grado de incidencia.

3.9.1. IMPACTO AMBIENTAL EN SUELOS

El desgaste del suelo es producto del acopio y la contaminación de sustancias tóxicas y peligrosas. Así mismo este proceso de contaminación es perjudicial para los terrenos o suelos cuyas propiedades físicas o mecánicas de permeabilidad, drenaje y consistencia desgastan sus valores y propiedades de altos niveles de minerales y nutrientes.

3.9.2. IMPACTO AMBIENTAL EN LOS RÍOS

Los lixiviados son líquidos del proceso de percolación de un fluido sólido que es degradado originados en los rellenos sanitarios, el cual son los principales causantes de la contaminación de los ríos, lagos, mares, el cual estos afluentes arrastran compuestos con alto grado de toxicidad, conforme a los años posteriores, los lixiviados se incrementarán, así como los residuos sólidos urbanos que son destinados a los rellenos sanitarios. La ciudad del Cusco tiene como cuenca hídrica del río Huatanay y Velille que son las que transcurren cerca del Cusco, el cual perjudicarían por el desemboque de estos fluidos de lixiviados.

3.9.3. IMPACTO AMBIENTAL EN EL AIRE

La contaminación de los gases de efecto invernadero presentes en la atmósfera, incrementan la solución de los gases de dióxido de carbono, nitrógeno y otros, que son emitidas en menor cantidad al medio ambiente luego del proceso de transformación del biogás en energía eléctrica, ya que, en exceso, serán dañinas para la población en general.

3.9.4. IMPACTO SOCIAL

La generación de energía eléctrica será un reflejo de ayuda a las comunidades aledañas al relleno sanitario, ya que les permitirá hacer uso de la energía eléctrica proveniente de los residuos sólidos.

3.10. RESULTADOS

Figura 97. Proyección del caudal de biogás recuperado y potencia eléctrica generada

Año	Caudal del Biogás Recuperado	Potencia generada(kW)		
	(m ³ /hora)			
	PCI=4.48076 kWh/m ³	Bajo (25%)	Medio (33%)	Alto (40%)
2020	0	0	0	0
2020-2021	120.065	134.4956124	177.534208	215.19298
2021-2022	122.017	136.6822232	180.420535	218.691557
2022-2023	124.280	139.2172132	183.766721	222.747541
2023-2024	126.678	141.9034288	187.312526	227.045486
2024-2025	129.120	144.6389328	190.923391	231.422292
2025-2026	131.913	147.7676235	195.053263	236.428198
2026-2027	134.271	150.4090315	198.539922	240.65445
2027-2028	137.337	153.843534	203.073465	246.149654
2028-2029	138.856	155.5451026	205.319535	248.872164
2029-2030	142.088	159.1655567	210.098535	254.664891
2030-2031	144.398	161.7531956	213.514218	258.805113

Fuente: Elaboración propia

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CONCLUSIÓN

1. En el presente estudio de ingeniería se determinó un caudal de 120.065 m³/hora del biogás recuperado durante el período comprendido entre 2020 y 2021. Además, mediante las proyecciones futuras, se estima que este caudal aumentará significativamente, alcanzando una cantidad proyectada de 144.398 m³/hora para el período comprendido entre 2030 y 2031. Este caudal destaca la relevancia y el potencial de aprovechamiento de los residuos sólidos orgánicos, minimizando las emisiones contaminantes de efecto invernadero en el relleno sanitario de Haquira.
2. El presente estudio de ingeniería determinó la capacidad de generación eléctrica a partir del biogás recuperado de los residuos sólidos orgánicos del relleno sanitario de Haquira. Según los resultados obtenidos, se determinaron diferentes niveles de potencia eléctrica según el régimen de operación: 134.4956 kW para un régimen del 25%, 177.534 kW para un régimen del 33%, y 215.193 kW para un régimen del 40% del año 2020 al 2021. Estos valores demuestran el potencial energético del biogás y su capacidad para alimentar sistemas de generación eléctrica con eficiencias variadas. Además, las proyecciones realizadas para el período de 2030 a 2031 incrementaron considerablemente en la potencia eléctrica generada a partir del biogás: 161.753 kW para un régimen del 25%, 213.514 kW para un régimen del 33%, y 258.805 kW para un régimen del 40%. Estas proyecciones reflejan un crecimiento considerable en la capacidad de generación eléctrica, lo que destaca la importancia y el potencial de continuar desarrollando y optimizando sistemas de conversión energética basados en biogás.
3. Basándonos en los resultados obtenidos del estudio de ingeniería realizado entre los años 2020 y 2021 se determinó la selección de equipamiento realizada en función de

los parámetros obtenidos en el estudio de ingeniería, el cual ha sido un paso determinante para validar la viabilidad del estudio de ingeniería. Esta elección cuidadosa y fundamentada asegura que las instalaciones sean capaces de operar de manera eficiente y confiable, maximizando así la generación de energía a partir del biogás recuperado; por lo que concluimos con la viabilidad del estudio de ingeniería siendo sustentable, ecológico y beneficioso energéticamente.

4. Se estableció el impacto satisfactorio el cual mostró el desarrollo de una central termoeléctrica de biogás respecto a la contaminación e infección medioambiental en el relleno sanitario de Haqira, el cual redujo la emisión de gases de efecto invernadero o metano de los residuos sólidos orgánicos. Este estudio de ingeniería, determinó la reducción sustancial en la emisión de gases de efecto invernadero, que son conocidos por su contribución al calentamiento global y otros impactos ambientales adversos. Al capturar y utilizar el biogás generado a partir de los residuos orgánicos como fuente de energía, se ha evitado la liberación directa de estos gases a la atmósfera, lo que representa un avance significativo en la protección del medio ambiente. Asimismo, en este estudio de ingeniería se realizó el estudio de conversión energética de una central termoeléctrica de biogás a partir de los residuos sólidos orgánicos del relleno sanitario de Haqira.

Finalmente, la implementación de este estudio de ingeniería logró reducir las emisiones de gases de efecto invernadero contribuyendo a la mitigación del calentamiento global obteniendo así un modelo energético equitativo y sostenible para el relleno sanitario de Haqira.

RECOMENDACIONES

- Se aconseja definir y efectuar el desarrollo del proyecto de ingeniería de detalle de una central termoeléctrica de biogás en el relleno sanitario de Haqira, de esa manera minimizar los gases de efecto invernadero los cuales son emitidas a la atmosfera teniendo como consecuencia el deterioro del proceso de destrucción de la capa de ozono y posteriormente el cambio climático del planeta.
- Así también se recomienda la implementación de biodigestores de alta eficiencia y tecnología en el relleno sanitario de Haqira para incrementar el potencial de la generación de biogás.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y Agricultura. (2011). *Manual del Biogas*. Santiago, Chile: MINENERGIA.
- Adolfo, G. P. (2014). *generación y distribución de energía renovable*. argentina.
- ADVANCED CYCLONE SYSTEMS. (s.f.). *CICLONES DE ALTA EFICIENCIA*. Obtenido de [https://www.advancedcyclonesystems.com/es/recyclone-mh/#:~:text=Un%20ReCyclone%20mecánico%20\(ReCyclone,%2C%20denominad%20el%20«recirculador»](https://www.advancedcyclonesystems.com/es/recyclone-mh/#:~:text=Un%20ReCyclone%20mecánico%20(ReCyclone,%2C%20denominad%20el%20«recirculador»).
- Aguilar Diaz, I. (2006). *Finanzas Corporativas en la Práctica*. España: Delta.
- ALCIVAR GONZALEZ, B. F. (2007). *ESTUDIO DE DISEÑO DE IMPLANTACION DE UN SISTEMA DE GENERACION DE ENERGIA ELECTRICA*. GUAYAQUIL.
- Beltran, A., & Cueva, H. (2007). *Evaluación Privada de Proyectos*. Lima: Pearson.
- *Bombas de desplazamiento positivo*. (s.f.). Obtenido de <http://tecnologiampk4.blogspot.com>
- *Bombas de desplazamiento positivo o volumetrico*. (s.f.). Obtenido de <https://www.academia.edu>.
- CALLAO, U. N. (2014). *SEGUNDA LEY DE LA TERMODINAMICA-CICLO DE CARNOT*. CALLAO-PERU.
- Casado, V. T. (2011). *Diseño y Montaje de un condensador de vapor Down Flow para central termica de ciclo combinado*. Madrid-España: Universidad Carlos III de Madrid.
- Chonlón Velicoso, R. E. (2016). *Estudio de Factibilidad de Producir BIOGÁS con residuos orgánicos ganaderos para satisfacer la demanda energética*. Motupe.

- Condo, Y. E. (2014). *conversion del Ciclo Simple con Diesel B5 S-50 a Ciclo Combinado con gas natural de la Central Termoelectrica Puerto Bravo*. Arequipa-Peru.
- Condori, L. B. (2014). *Beneficios del Biogas capturados en el relleno sanitario*. Huancayo.
- Cusco, M. d. (2020). Estudio de Caracterizacion de los Residuos Solidos Municipales. pág. 126.
- *Danish Wind Industry Association*. (s.f.). Obtenido de <http://xn--drmstrre-64ad.dk/wp-content/wind/miller/windpower%20web/es/tour/wtrb/genpoles.htm>
- Diego, i. F., & Ramon, R. D. (s.f.). *Centrales de Generacion de Energia Electrica*. Universidad de Cantabria-España.
- Distrito.pe. (6 de Abril de 2020). *Distrito.pe*. Obtenido de <http://www.distrito.pe/departamento-cusco.html>
- *EMISON*. (s.f.). Obtenido de *EMISON-DIGESTORES*: <https://www.emison.com/digestores>
- Endesa. (2023). *Endesa*. Obtenido de Endesa : <https://www.fundacionendesa.org/es/educacion/endesa-educa/recursos/centrales-electricas-convencionales/central-termica-convencional-ciclo-combinado#:~:text=%C2%BFQu%C3%A9%20es%20una%20central%20t%C3%A9rmica,gas%20y%20otra%20de%20vapor>.
- Endesa S.A. (2008). https://www.ampla.com/media/339146/e-mt-011_2008%20r-02.
- Energiza.org. (2011). *Especial Turbinas de Vapor*. España: renovetec.

- Engineers, S. (2005). *Informa de la prueba de bomba y el estudio de prefactibilidad para la recuperacion de gas de relleno sanitario y la produccion de energia en el relleno sanitario de Huaycoloro*. Lima-Peru: World Bank Group.
- Express, W. (s.f.). *Refrigeracion, Aire Acondicionado y Electricidad*. Obtenido de <https://refrielectriclasose.wordpress.com/informacion/condensador>
- Garrido, S. G. (2008). *Biomasa fuente de energia*.
- Garrido, S. G. (2010). *Generador electrico*. España: Renovetec.
- Garrido, S. G. (s.f.). Condensador-Ciclo agua-vapor de una central termoelectrica. En Renovetec, *Centrales termoelectricas*. Madrid-España: Renovetec.
- Gomez Exposito, A. (2002). *Análisis y Operación de Sistemas de Energía Eléctrica*. España: McGraw-Hill.
- GONZALEZ, B. F. (2007). *ESTUDIO PARA EL DISEÑO DE IMPLANTACION DE UNA SISTENA DE GENERACION DE ENERGIA ELECTRICA*. GUAYAQUIL.
- Hernandez Zapata, F., & Lozano Palomino, E. (2014). *SEGUNDA LEY DE LA TERMODINAMICA-CICLO DE CARNOT*. UNC-CALLAO.
- Ingenierias proyectos energeticos, medio ambiente. (24 de 02 de 2010). *Ciclos de alta eficiencia*. Obtenido de <http://www.revistapq.com/es/notices>
- Inmaculada Fernandez Diego, R. D. (s.f.). *Centrales de Generacion de Energia Electrica*. Universidad de Cantabria-España: Creative Commons 3.0 BY-NC-SA.
- INNERGY HEAVY INDUSTRY. (s.f.). *Soluciones de equipos auxiliares*. Obtenido de FILTRAJE DE GASES: <https://innergy-global.com/es/divisiones/innergy-heavy-industries>
- INTECH GmbH. (s.f.). *Distribuidor de filtros de lecho granular para la Industria de Rusia*. Obtenido de https://intech-gmbh.es/granular_filters/

- IPCC, P. I. (2006). *Pautas para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero. Instituto de Estrategias Ambientales Globales. Japon.*
- Javier, O. S. (2009). *Evaluacion Termica del Condensador principal de una unidad de 160MW de una central termoelectrica. Mexico DF.: Instituto Politecnico Nacional.*
- Koch, F. H. (2001). *Analisis de emsiones de GEI para la produccion de energia electrica. Paris,Francia: Agencia de energia nuclear.*
- Kumar S., G. S. (2004). *Método de estimación de la emisión nacional de metano de los vertederos de residuos sólidos. Mexico.*
- Mario, B. P., & Gabriela, R. T. (2015). *ESTUDIO DE LA DETERMINACION DE LA PRODUCCION DE ENERGIA ELECTRICA A PARTIR DEL BIOGAS. Cuenca,Ecuador.*
- Megawatsoft. (s.f.). *Tablas de vapor en linea. Obtenido de Tablas de vapor en linea: https://www.steamtablesonline.com/es/contactus_es.aspx*
- Organismo de Evaluacion y Fiscalizacion Ambiental(OEFA). (2014).
- Oscoz, B. M., & Bermejo, J. A. (2013). *Diseño y Analisis de una central termica de biomasa de 2 MW de potencia electrica. España.*
- Panesso, A. F., Cadena, J. A., Mora Flórez, J. J., & Ordoñez, M. d. (2011). *ANÁLISIS DEL BIOGÁS CAPTADO EN UN RELLENO SANITARIO COMO COMBUSTIBLE. 5.*
- Rosales, M. F. (2006). *PRODUCCION DE ENERGIA A BASE DE BIOGAS PROCEDENTE DE VERTEDEROS. GUATEMALA.*
- Sadubal Garcia S. & Gomez Moñux F. (2006). *Centrales Termicas de Ciclo Combinado. España: Diaz de Santos.*
- Santiago, M. d. (2019). *Estudio de Caracterizacion.*

- Sosa, I. A. (2018). *Determinacion de la potencia electrica a partir del biogas*. Huancayo.
- Universidad Central de Ecuador. (2018). *Bombas Dinamicas*. Ecuador: UCE.
- Wesley Longman, A. (1998). *Fundamentos de Electromagnetismo para Ingenieria*. Mexico.
- Faires Virgil M. (1983). *Termodinamica y Maquinas Termicas*. Mexico.
- Marta Muñoz D ; Antonio Jose Rovira A. (2014). *Máquinas Termicas*. Universidad Nacional de Educación a Distancia, Madrid.
- Chonlón, R. E. (2016). *Estudio de factibilidad de producir biogás con residuos orgánicos ganaderos para satisfacer la demanda energética, caserío el Tambo, Motupe 2016* (Universidad Cesar Vallejo).
- Ministerio del Ambiente (2020). *Guía metodológica para el desarrollo del Estudio de Caracterización para Residuos Sólidos Municipales (EC-RSM)* (1.a ed.; M. del Ambiente, Ed.).
Recuperado de <http://redrrss.minam.gob.pe/material/20150302182233.pd>
- Viceministerio de Gobernanza Territorial. *Información Territorial Departamental del Cusco*.(2020).Recuperadode:https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/1919887/Cusco_Informaci%C3%B3n%20Territorial%20Completo.pdf

ANEXO

Tabla 64. Valores de t temperatura de agua saturada desde los 0°C a 200°C

TABLAS DE PROPIEDADES, FIGURAS Y DIAGRAMAS (UNIDADES SI)												
Tabla A-4												
Agua saturada. Tabla de temperaturas												
Temp., $T^{\circ}\text{C}$	Pres. sat., P_{sat} kPa	Volumen específico, m^3/kg		Energía interna, kJ/kg			Entalpía, kJ/kg			Entropía, $\text{kJ}/\text{kg} \cdot \text{K}$		
		Líqu. sat., v_f	Vapor sat., v_g	Líqu. sat., u_f	Evap., u_{fg}	Vapor sat., u_g	Líqu. sat., h_f	Evap., h_{fg}	Vapor sat., h_g	Líqu. sat., s_f	Evap., s_{fg}	Vapor sat., s_g
0.01	0.6117	0.001000	206.00	0.000	2374.9	2374.9	0.001	2500.9	2500.9	0.0000	9.1556	9.1556
5	0.8725	0.001000	147.03	21.019	2360.8	2381.8	21.020	2489.1	2510.1	0.0763	8.9487	9.0249
10	1.2281	0.001000	106.32	42.020	2346.6	2388.7	42.022	2477.2	2519.2	0.1511	8.7488	8.8999
15	1.7057	0.001001	77.885	62.980	2332.5	2395.5	62.982	2465.4	2528.3	0.2245	8.5559	8.7803
20	2.3392	0.001002	57.762	83.913	2318.4	2402.3	83.915	2453.5	2537.4	0.2965	8.3696	8.6661
25	3.1698	0.001003	43.340	104.83	2304.3	2409.1	104.83	2441.7	2546.5	0.3672	8.1895	8.5567
30	4.2469	0.001004	32.879	125.73	2290.2	2415.9	125.74	2429.8	2555.6	0.4368	8.0152	8.4520
35	5.6291	0.001006	25.205	146.63	2276.0	2422.7	146.64	2417.9	2564.6	0.5051	7.8466	8.3517
40	7.3851	0.001008	19.515	167.53	2261.9	2429.4	167.53	2406.0	2573.5	0.5724	7.6832	8.2556
45	9.5953	0.001010	15.251	188.43	2247.7	2436.1	188.44	2394.0	2582.4	0.6386	7.5247	8.1633
50	12.352	0.001012	12.026	209.33	2233.4	2442.7	209.34	2382.0	2591.3	0.7038	7.3710	8.0748
55	15.763	0.001015	9.5639	230.24	2219.1	2449.3	230.26	2369.8	2600.1	0.7680	7.2218	7.9898
60	19.947	0.001017	7.6670	251.16	2204.7	2455.9	251.18	2357.7	2608.8	0.8313	7.0769	7.9082
65	25.043	0.001020	6.1935	272.09	2190.3	2462.4	272.12	2345.4	2617.5	0.8937	6.9360	7.8296
70	31.202	0.001023	5.0396	293.04	2175.8	2468.9	293.07	2333.0	2626.1	0.9551	6.7989	7.7540
75	38.597	0.001026	4.1291	313.99	2161.3	2475.3	314.03	2320.6	2634.6	1.0158	6.6655	7.6812
80	47.416	0.001029	3.4053	334.97	2146.6	2481.6	335.02	2308.0	2643.0	1.0756	6.5355	7.6111
85	57.868	0.001032	2.8261	355.96	2131.9	2487.8	356.02	2295.3	2651.4	1.1346	6.4089	7.5435
90	70.183	0.001036	2.3593	376.97	2117.0	2494.0	377.04	2282.5	2659.6	1.1929	6.2853	7.4782
95	84.609	0.001040	1.9808	398.00	2102.0	2500.1	398.09	2269.6	2667.6	1.2504	6.1647	7.4151
100	101.42	0.001043	1.6720	419.06	2087.0	2506.0	419.17	2256.4	2675.6	1.3072	6.0470	7.3542
105	120.90	0.001047	1.4186	440.15	2071.8	2511.9	440.28	2243.1	2683.4	1.3634	5.9319	7.2952
110	143.38	0.001052	1.2094	461.27	2056.4	2517.7	461.42	2229.7	2691.1	1.4188	5.8193	7.2382
115	169.18	0.001056	1.0360	482.42	2040.9	2523.3	482.59	2216.0	2698.6	1.4737	5.7092	7.1829
120	198.67	0.001060	0.89133	503.60	2025.3	2528.9	503.81	2202.1	2706.0	1.5279	5.6013	7.1292
125	232.23	0.001065	0.77012	524.83	2009.5	2534.3	525.07	2188.1	2713.1	1.5816	5.4956	7.0771
130	270.28	0.001070	0.66808	546.10	1993.4	2539.5	546.38	2173.7	2720.1	1.6346	5.3919	7.0265
135	313.22	0.001075	0.58179	567.41	1977.3	2544.7	567.75	2159.1	2726.9	1.6872	5.2901	6.9773
140	361.53	0.001080	0.50850	588.77	1960.9	2549.6	589.16	2144.3	2733.5	1.7392	5.1901	6.9294
145	415.68	0.001085	0.44600	610.19	1944.2	2554.4	610.64	2129.2	2739.8	1.7908	5.0919	6.8827
150	476.16	0.001091	0.39248	631.66	1927.4	2559.1	632.18	2113.8	2745.9	1.8418	4.9953	6.8371
155	543.49	0.001096	0.34648	653.19	1910.3	2563.5	653.79	2098.0	2751.8	1.8924	4.9002	6.7927
160	618.23	0.001102	0.30680	674.79	1893.0	2567.8	675.47	2082.0	2757.5	1.9426	4.8066	6.7492
165	700.93	0.001108	0.27244	696.46	1875.4	2571.9	697.24	2065.6	2762.8	1.9923	4.7143	6.7067
170	792.18	0.001114	0.24260	718.20	1857.5	2575.7	719.08	2048.8	2767.9	2.0417	4.6233	6.6650
175	892.60	0.001121	0.21659	740.02	1839.4	2579.4	741.02	2031.7	2772.7	2.0906	4.5335	6.6242
180	1002.8	0.001127	0.19384	761.92	1820.9	2582.8	763.05	2014.2	2777.2	2.1392	4.4448	6.5841
185	1123.5	0.001134	0.17390	783.91	1802.1	2586.0	785.19	1996.2	2781.4	2.1875	4.3572	6.5447
190	1255.2	0.001141	0.15636	806.00	1783.0	2589.0	807.43	1977.9	2785.3	2.2355	4.2705	6.5059
195	1398.8	0.001149	0.14089	828.18	1763.6	2591.7	829.78	1959.0	2788.8	2.2831	4.1847	6.4678
200	1554.9	0.001157	0.12721	850.46	1743.7	2594.2	852.26	1939.8	2792.0	2.3305	4.0997	6.4302

Fuente: Libro de termodinámica, McGraw Hill 2020

Tabla 65. Valores de temperatura de agua saturada desde los 205°C a 373.95°C

Tabla A-4												
Agua saturada. Tabla de temperaturas (conclusión)												
Temp., T °C	Pres. sat., P_{sat} kPa	Volumen específico, m^3/kg		Energía interna, kJ/kg			Entalpía, kJ/kg			Entropía, $kJ/kg \cdot K$		
		Líqu. sat., v_f	Vapor sat., v_g	Líqu. sat., u_f	Evap., u_{fg}	Vapor sat., u_g	Líqu. sat., h_f	Evap., h_{fg}	Vapor sat., h_g	Líqu. sat., s_f	Evap., s_{fg}	Vapor sat., s_g
205	1724.3	0.001164	0.11508	872.86	1723.5	2596.4	874.87	1920.0	2794.8	2.3776	4.0154	6.3930
210	1907.7	0.001173	0.10429	895.38	1702.9	2598.3	897.61	1899.7	2797.3	2.4245	3.9318	6.3563
215	2105.9	0.001181	0.094680	918.02	1681.9	2599.9	920.50	1878.8	2799.3	2.4712	3.8489	6.3200
220	2319.6	0.001190	0.086094	940.79	1660.5	2601.3	943.55	1857.4	2801.0	2.5176	3.7664	6.2840
225	2549.7	0.001199	0.078405	963.70	1638.6	2602.3	966.76	1835.4	2802.2	2.5639	3.6844	6.2483
230	2797.1	0.001209	0.071505	986.76	1616.1	2602.9	990.14	1812.8	2802.9	2.6100	3.6028	6.2128
235	3062.6	0.001219	0.065300	1010.0	1593.2	2603.2	1013.7	1789.5	2803.2	2.6560	3.5216	6.1775
240	3347.0	0.001229	0.059707	1033.4	1569.8	2603.1	1037.5	1765.5	2803.0	2.7018	3.4405	6.1424
245	3651.2	0.001240	0.054656	1056.9	1545.7	2602.7	1061.5	1740.8	2802.2	2.7476	3.3596	6.1072
250	3976.2	0.001252	0.050085	1080.7	1521.1	2601.8	1085.7	1715.3	2801.0	2.7933	3.2788	6.0721
255	4322.9	0.001263	0.045941	1104.7	1495.8	2600.5	1110.1	1689.0	2799.1	2.8390	3.1979	6.0369
260	4692.3	0.001276	0.042175	1128.8	1469.9	2598.7	1134.8	1661.8	2796.6	2.8847	3.1169	6.0017
265	5085.3	0.001289	0.038748	1153.3	1443.2	2596.5	1159.8	1633.7	2793.5	2.9304	3.0358	5.9662
270	5503.0	0.001303	0.035622	1177.9	1415.7	2593.7	1185.1	1604.6	2789.7	2.9762	2.9542	5.9305
275	5946.4	0.001317	0.032767	1202.9	1387.4	2590.3	1210.7	1574.5	2785.2	3.0221	2.8723	5.8944
280	6416.6	0.001333	0.030153	1228.2	1358.2	2586.4	1236.7	1543.2	2779.9	3.0681	2.7898	5.8579
285	6914.6	0.001349	0.027756	1253.7	1328.1	2581.8	1263.1	1510.7	2773.7	3.1144	2.7066	5.8210
290	7441.8	0.001366	0.025554	1279.7	1296.9	2576.5	1289.8	1476.9	2766.7	3.1608	2.6225	5.7834
295	7999.0	0.001384	0.023528	1306.0	1264.5	2570.5	1317.1	1441.6	2758.7	3.2076	2.5374	5.7450
300	8587.9	0.001404	0.021659	1332.7	1230.9	2563.6	1344.8	1404.8	2749.6	3.2548	2.4511	5.7059
305	9209.4	0.001425	0.019932	1360.0	1195.9	2555.8	1373.1	1366.3	2739.4	3.3024	2.3633	5.6657
310	9865.0	0.001447	0.018333	1387.7	1159.3	2547.1	1402.0	1325.9	2727.9	3.3506	2.2737	5.6243
315	10,556	0.001472	0.016849	1416.1	1121.1	2537.2	1431.6	1283.4	2715.0	3.3994	2.1821	5.5816
320	11,284	0.001499	0.015470	1445.1	1080.9	2526.0	1462.0	1238.5	2700.6	3.4491	2.0881	5.5372
325	12,051	0.001528	0.014183	1475.0	1038.5	2513.4	1493.4	1191.0	2684.3	3.4998	1.9911	5.4908
330	12,858	0.001560	0.012979	1505.7	993.5	2499.2	1525.8	1140.3	2666.0	3.5516	1.8906	5.4422
335	13,707	0.001597	0.011848	1537.5	945.5	2483.0	1559.4	1086.0	2645.4	3.6050	1.7857	5.3907
340	14,601	0.001638	0.010783	1570.7	893.8	2464.5	1594.6	1027.4	2622.0	3.6602	1.6756	5.3358
345	15,541	0.001685	0.009772	1605.5	837.7	2443.2	1631.7	963.4	2595.1	3.7179	1.5585	5.2765
350	16,529	0.001741	0.008806	1642.4	775.9	2418.3	1671.2	892.7	2563.9	3.7788	1.4326	5.2114
355	17,570	0.001808	0.007872	1682.2	706.4	2388.6	1714.0	812.9	2526.9	3.8442	1.2942	5.1384
360	18,666	0.001895	0.006950	1726.2	625.7	2351.9	1761.5	720.1	2481.6	3.9165	1.1373	5.0537
365	19,822	0.002015	0.006009	1777.2	526.4	2303.6	1817.2	605.5	2422.7	4.0004	0.9489	4.9493
370	21,044	0.002217	0.004953	1844.5	385.6	2230.1	1891.2	443.1	2334.3	4.1119	0.6890	4.8009
373.95	22,064	0.003106	0.003106	2015.7	0	2015.7	2084.3	0	2084.3	4.4070	0	4.4070

Fuente: Libro de termodinámica, Mcgraw Hill 2020

Tabla 66. Valores de presión de agua saturada desde 1kPa a 750kPa

Tabla A-5												
Agua saturada. Tabla de presiones												
Pres., P kPa	Temp. sat., T _{sat} °C	Volumen específico, m ³ /kg		Energía interna, kJ/kg			Entalpía, kJ/kg			Entropía, kJ/kg · K		
		Liq. sat., v _f	Vapor sat., v _g	Liq. sat., u _f	Evap., u _{fg}	Vapor sat., u _g	Liq. sat., h _f	Evap., h _{fg}	Vapor sat., h _g	Liq. sat., s _f	Evap., s _{fg}	Vapor sat., s _g
1.0	6.97	0.001000	129.19	29.302	2355.2	2384.5	29.303	2484.4	2513.7	0.1059	8.8690	8.9749
1.5	13.02	0.001001	87.964	54.686	2338.1	2392.8	54.688	2470.1	2524.7	0.1956	8.6314	8.8270
2.0	17.50	0.001001	66.990	73.431	2325.5	2398.9	73.433	2459.5	2532.9	0.2606	8.4621	8.7227
2.5	21.08	0.001002	54.242	88.422	2315.4	2403.8	88.424	2451.0	2539.4	0.3118	8.3302	8.6421
3.0	24.08	0.001003	45.654	100.98	2306.9	2407.9	100.98	2443.9	2544.8	0.3543	8.2222	8.5765
4.0	28.96	0.001004	34.791	121.39	2293.1	2414.5	121.39	2432.3	2553.7	0.4224	8.0510	8.4734
5.0	32.87	0.001005	28.185	137.75	2282.1	2419.8	137.75	2423.0	2560.7	0.4762	7.9176	8.3938
7.5	40.29	0.001008	19.233	168.74	2261.1	2429.8	168.75	2405.3	2574.0	0.5763	7.6738	8.2501
10	45.81	0.001010	14.670	191.79	2245.4	2437.2	191.81	2392.1	2583.9	0.6492	7.4996	8.1488
15	53.97	0.001014	10.020	225.93	2222.1	2448.0	225.94	2372.3	2598.3	0.7549	7.2522	8.0071
20	60.06	0.001017	7.6481	251.40	2204.6	2456.0	251.42	2357.5	2608.9	0.8320	7.0752	7.9073
25	64.96	0.001020	6.2034	271.93	2190.4	2462.4	271.96	2345.5	2617.5	0.8932	6.9370	7.8302
30	69.09	0.001022	5.2287	289.24	2178.5	2467.7	289.27	2335.3	2624.6	0.9441	6.8234	7.7675
40	75.86	0.001026	3.9933	317.58	2158.8	2476.3	317.62	2318.4	2636.1	1.0261	6.6430	7.6691
50	81.32	0.001030	3.2403	340.49	2142.7	2483.2	340.54	2304.7	2645.2	1.0912	6.5019	7.5931
75	91.76	0.001037	2.2172	384.36	2111.8	2496.1	384.44	2278.0	2662.4	1.2132	6.2426	7.4558
100	99.61	0.001043	1.6941	417.40	2088.2	2505.6	417.51	2257.5	2675.0	1.3028	6.0562	7.3589
101.325	99.97	0.001043	1.6734	418.95	2087.0	2506.0	419.06	2256.5	2675.6	1.3069	6.0476	7.3545
125	105.97	0.001048	1.3750	444.23	2068.8	2513.0	444.36	2240.6	2684.9	1.3741	5.9100	7.2841
150	111.35	0.001053	1.1594	466.97	2052.3	2519.2	467.13	2226.0	2693.1	1.4337	5.7894	7.2231
175	116.04	0.001057	1.0037	486.82	2037.7	2524.5	487.01	2213.1	2700.2	1.4850	5.6865	7.1716
200	120.21	0.001061	0.88578	504.50	2024.6	2529.1	504.71	2201.6	2706.3	1.5302	5.5968	7.1270
225	123.97	0.001064	0.79329	520.47	2012.7	2533.2	520.71	2191.0	2711.7	1.5706	5.5171	7.0877
250	127.41	0.001067	0.71873	535.08	2001.8	2536.8	535.35	2181.2	2716.5	1.6072	5.4453	7.0525
275	130.58	0.001070	0.65732	548.57	1991.6	2540.1	548.86	2172.0	2720.9	1.6408	5.3800	7.0207
300	133.52	0.001073	0.60582	561.11	1982.1	2543.2	561.43	2163.5	2724.9	1.6717	5.3200	6.9917
325	136.27	0.001076	0.56199	572.84	1973.1	2545.9	573.19	2155.4	2728.6	1.7005	5.2645	6.9650
350	138.86	0.001079	0.52422	583.89	1964.6	2548.5	584.26	2147.7	2732.0	1.7274	5.2128	6.9402
375	141.30	0.001081	0.49133	594.32	1956.6	2550.9	594.73	2140.4	2735.1	1.7526	5.1645	6.9171
400	143.61	0.001084	0.46242	604.22	1948.9	2553.1	604.66	2133.4	2738.1	1.7765	5.1191	6.8955
450	147.90	0.001088	0.41392	622.65	1934.5	2557.1	623.14	2120.3	2743.4	1.8205	5.0356	6.8561
500	151.83	0.001093	0.37483	639.54	1921.2	2560.7	640.09	2108.0	2748.1	1.8604	4.9603	6.8207
550	155.46	0.001097	0.34261	655.16	1908.8	2563.9	655.77	2096.6	2752.4	1.8970	4.8916	6.7886
600	158.83	0.001101	0.31560	669.72	1897.1	2566.8	670.38	2085.8	2756.2	1.9308	4.8285	6.7593
650	161.98	0.001104	0.29260	683.37	1886.1	2569.4	684.08	2075.5	2759.6	1.9623	4.7699	6.7322
700	164.95	0.001108	0.27278	696.23	1875.6	2571.8	697.00	2065.8	2762.8	1.9918	4.7153	6.7071
750	167.75	0.001111	0.25552	708.40	1865.6	2574.0	709.24	2056.4	2765.7	2.0195	4.6642	6.6837

Fuente: Libro de termodinámica, Mcgraw Hill 2020

Tabla 67. Valores de presión de agua saturada desde los 800kPa hasta los 22064kPa

Tabla A-5												
Agua saturada. Tabla de presiones (conclusión)												
Pres., P kPa	Temp. sat., T _{sat} °C	Volumen específico, m ³ /kg		Energía interna, kJ/kg			Entalpía, kJ/kg			Entropía, kJ/kg · K		
		Liq. sat., v _f	Vapor sat., v _g	Liq. sat., u _f	Evap., u _{fg}	Vapor sat., u _g	Liq. sat., h _f	Evap., h _{fg}	Vapor sat., h _g	Liq. sat., s _f	Evap., s _{fg}	Vapor sat., s _g
800	170.41	0.001115	0.24035	719.97	1856.1	2576.0	720.87	2047.5	2768.3	2.0457	4.6160	6.6616
850	172.94	0.001118	0.22690	731.00	1846.9	2577.9	731.95	2038.8	2770.8	2.0705	4.5705	6.6409
900	175.35	0.001121	0.21489	741.55	1838.1	2579.6	742.56	2030.5	2773.0	2.0941	4.5273	6.6213
950	177.66	0.001124	0.20411	751.67	1829.6	2581.3	752.74	2022.4	2775.2	2.1166	4.4862	6.6027
1000	179.88	0.001127	0.19436	761.39	1821.4	2582.8	762.51	2014.6	2777.1	2.1381	4.4470	6.5850
1100	184.06	0.001133	0.17745	779.78	1805.7	2585.5	781.03	1999.6	2780.7	2.1785	4.3735	6.5520
1200	187.96	0.001138	0.16326	796.96	1790.9	2587.8	798.33	1985.4	2783.8	2.2159	4.3058	6.5217
1300	191.60	0.001144	0.15119	813.10	1776.8	2589.9	814.59	1971.9	2786.5	2.2508	4.2428	6.4936
1400	195.04	0.001149	0.14078	828.35	1763.4	2591.8	829.96	1958.9	2788.9	2.2835	4.1840	6.4675
1500	198.29	0.001154	0.13171	842.82	1750.6	2593.4	844.55	1946.4	2791.0	2.3143	4.1287	6.4430
1750	205.72	0.001166	0.11344	876.12	1720.6	2596.7	878.16	1917.1	2795.2	2.3844	4.0033	6.3877
2000	212.38	0.001177	0.099587	906.12	1693.0	2599.1	908.47	1889.8	2798.3	2.4467	3.8923	6.3390
2250	218.41	0.001187	0.088717	933.54	1667.3	2600.9	936.21	1864.3	2800.5	2.5029	3.7926	6.2954
2500	223.95	0.001197	0.079952	958.87	1643.2	2602.1	961.87	1840.1	2801.9	2.5542	3.7016	6.2558
3000	233.85	0.001217	0.066667	1004.6	1598.5	2603.2	1008.3	1794.9	2803.2	2.6454	3.5402	6.1856
3500	242.56	0.001235	0.057061	1045.4	1557.6	2603.0	1049.7	1753.0	2802.7	2.7253	3.3991	6.1244
4000	250.35	0.001252	0.049779	1082.4	1519.3	2601.7	1087.4	1713.5	2800.8	2.7966	3.2731	6.0696
5000	263.94	0.001286	0.039448	1148.1	1448.9	2597.0	1154.5	1639.7	2794.2	2.9207	3.0530	5.9737
6000	275.59	0.001319	0.032449	1205.8	1384.1	2589.9	1213.8	1570.9	2784.6	3.0275	2.8627	5.8902
7000	285.83	0.001352	0.027378	1258.0	1323.0	2581.0	1267.5	1505.2	2772.6	3.1220	2.6927	5.8148
8000	295.01	0.001384	0.023525	1306.0	1264.5	2570.5	1317.1	1441.6	2758.7	3.2077	2.5373	5.7450
9000	303.35	0.001418	0.020489	1350.9	1207.6	2558.5	1363.7	1379.3	2742.9	3.2866	2.3925	5.6791
10,000	311.00	0.001452	0.018028	1393.3	1151.8	2545.2	1407.8	1317.6	2725.5	3.3603	2.2556	5.6159
11,000	318.08	0.001488	0.015988	1433.9	1096.6	2530.4	1450.2	1256.1	2706.3	3.4299	2.1245	5.5544
12,000	324.68	0.001526	0.014264	1473.0	1041.3	2514.3	1491.3	1194.1	2685.4	3.4964	1.9975	5.4939
13,000	330.85	0.001566	0.012781	1511.0	985.5	2496.6	1531.4	1131.3	2662.7	3.5606	1.8730	5.4336
14,000	336.67	0.001610	0.011487	1548.4	928.7	2477.1	1571.0	1067.0	2637.9	3.6232	1.7497	5.3728
15,000	342.16	0.001657	0.010341	1585.5	870.3	2455.7	1610.3	1000.5	2610.8	3.6848	1.6261	5.3108
16,000	347.36	0.001710	0.009312	1622.6	809.4	2432.0	1649.9	931.1	2581.0	3.7461	1.5005	5.2466
17,000	352.29	0.001770	0.008374	1660.2	745.1	2405.4	1690.3	857.4	2547.7	3.8082	1.3709	5.1791
18,000	356.99	0.001840	0.007504	1699.1	675.9	2375.0	1732.2	777.8	2510.0	3.8720	1.2343	5.1064
19,000	361.47	0.001926	0.006677	1740.3	598.9	2339.2	1776.8	689.2	2466.0	3.9396	1.0860	5.0256
20,000	365.75	0.002038	0.005862	1785.8	509.0	2294.8	1826.6	585.5	2412.1	4.0146	0.9164	4.9310
21,000	369.83	0.002207	0.004994	1841.6	391.9	2233.5	1888.0	450.4	2338.4	4.1071	0.7005	4.8076
22,000	373.71	0.002703	0.003644	1951.7	140.8	2092.4	2011.1	161.5	2172.6	4.2942	0.2496	4.5439
22,064	373.95	0.003106	0.003106	2015.7	0	2015.7	2084.3	0	2084.3	4.4070	0	4.4070

Fuente: Libro de termodinámica, Mcgraw Hill 2020

Tabla 68. Valores de temperatura de vapor de agua sobrecalentado a diferentes presiones desde los 50°C hasta los 1300°C

Tabla A-6													
Vapor de agua sobrecalentado													
T	v	u	h	s	v	u	h	s	v	u	h	s	
°C	m ³ /kg	kJ/kg	kJ/kg	kJ/kg · K	m ³ /kg	kJ/kg	kJ/kg	kJ/kg · K	m ³ /kg	kJ/kg	kJ/kg	kJ/kg · K	
	P = 0.01 MPa (45.81 °C)*				P = 0.05 MPa (81.32 °C)				P = 0.10 MPa (99.61 °C)				
Sat. ^a	14.670	2437.2	2583.9	8.1488	3.2403	2483.2	2645.2	7.5931	1.6941	2505.6	2675.0	7.3589	
50	14.867	2443.3	2592.0	8.1741									
100	17.196	2515.5	2687.5	8.4489	3.4187	2511.5	2682.4	7.6953	1.6959	2506.2	2675.8	7.3611	
150	19.513	2587.9	2783.0	8.6893	3.8897	2585.7	2780.2	7.9413	1.9367	2582.9	2776.6	7.6148	
200	21.826	2661.4	2879.6	8.9049	4.3562	2660.0	2877.8	8.1592	2.1724	2658.2	2875.5	7.8356	
250	24.136	2736.1	2977.5	9.1015	4.8206	2735.1	2976.2	8.3568	2.4062	2733.9	2974.5	8.0346	
300	26.446	2812.3	3076.7	9.2827	5.2841	2811.6	3075.8	8.5387	2.6389	2810.7	3074.5	8.2172	
400	31.063	2969.3	3280.0	9.6094	6.2094	2968.9	3279.3	8.8659	3.1027	2968.3	3278.6	8.5452	
500	35.680	3132.9	3489.7	9.8998	7.1338	3132.6	3489.3	9.1566	3.5655	3132.2	3488.7	8.8362	
600	40.296	3303.3	3706.3	10.1631	8.0577	3303.1	3706.0	9.4201	4.0279	3302.8	3705.6	9.0999	
700	44.911	3480.8	3929.9	10.4056	8.9813	3480.6	3929.7	9.6626	4.4900	3480.4	3929.4	9.3424	
800	49.527	3665.4	4160.6	10.6312	9.9047	3665.2	4160.4	9.8883	4.9519	3665.0	4160.2	9.5682	
900	54.143	3856.9	4398.3	10.8429	10.8280	3856.8	4398.2	10.1000	5.4137	3856.7	4398.0	9.7800	
1000	58.758	4055.3	4642.8	11.0429	11.7513	4055.2	4642.7	10.3000	5.8755	4055.0	4642.6	9.9800	
1100	63.373	4260.0	4893.8	11.2326	12.6745	4259.9	4893.7	10.4897	6.3372	4259.8	4893.6	10.1698	
1200	67.989	4470.9	5150.8	11.4132	13.5977	4470.8	5150.7	10.6704	6.7988	4470.7	5150.6	10.3504	
1300	72.604	4687.4	5413.4	11.5857	14.5209	4687.3	5413.3	10.8429	7.2605	4687.2	5413.3	10.5229	
	P = 0.20 MPa (120.21 °C)				P = 0.30 MPa (133.52 °C)				P = 0.40 MPa (143.61 °C)				
Sat.	0.88578	2529.1	2706.3	7.1270	0.60582	2543.2	2724.9	6.9917	0.46242	2553.1	2738.1	6.8955	
150	0.95986	2577.1	2769.1	7.2810	0.63402	2571.0	2761.2	7.0792	0.47088	2564.4	2752.8	6.9306	
200	1.08049	2654.6	2870.7	7.5081	0.71643	2651.0	2865.9	7.3132	0.53434	2647.2	2860.9	7.1723	
250	1.19890	2731.4	2971.2	7.7100	0.79645	2728.9	2967.9	7.5180	0.59520	2726.4	2964.5	7.3804	
300	1.31623	2808.8	3072.1	7.8941	0.87535	2807.0	3069.6	7.7037	0.65489	2805.1	3067.1	7.5677	
400	1.54934	2967.2	3277.0	8.2236	1.03155	2966.0	3275.5	8.0347	0.77265	2964.9	3273.9	7.9003	
500	1.78142	3131.4	3487.7	8.5153	1.18672	3130.6	3486.6	8.3271	0.88936	3129.8	3485.5	8.1933	
600	2.01302	3302.2	3704.8	8.7793	1.34139	3301.6	3704.0	8.5915	1.00558	3301.0	3703.3	8.4580	
700	2.24434	3479.9	3928.8	9.0221	1.49580	3479.5	3928.2	8.8345	1.12152	3479.0	3927.6	8.7012	
800	2.47550	3664.7	4159.8	9.2479	1.65004	3664.3	4159.3	9.0605	1.23730	3663.9	4158.9	8.9274	
900	2.70656	3856.3	4397.7	9.4598	1.80417	3856.0	4397.3	9.2725	1.35298	3855.7	4396.9	9.1394	
1000	2.93755	4054.8	4642.3	9.6599	1.95824	4054.5	4642.0	9.4726	1.46859	4054.3	4641.7	9.3396	
1100	3.16848	4259.6	4893.3	9.8497	2.11226	4259.4	4893.1	9.6624	1.58414	4259.2	4892.9	9.5295	
1200	3.39938	4470.5	5150.4	10.0304	2.26624	4470.3	5150.2	9.8431	1.69966	4470.2	5150.0	9.7102	
1300	3.63026	4687.1	5413.1	10.2029	2.42019	4686.9	5413.0	10.0157	1.81516	4686.7	5412.8	9.8828	
	P = 0.50 MPa (151.83 °C)				P = 0.60 MPa (158.83 °C)				P = 0.80 MPa (170.41 °C)				
Sat.	0.37483	2560.7	2748.1	6.8207	0.31560	2566.8	2756.2	6.7593	0.24035	2576.0	2768.3	6.6616	
200	0.42503	2643.3	2855.8	7.0610	0.35212	2639.4	2850.6	6.9683	0.26088	2631.1	2839.8	6.8177	
250	0.47443	2723.8	2961.0	7.2725	0.39390	2721.2	2957.6	7.1833	0.29321	2715.9	2950.4	7.0402	
300	0.52261	2803.3	3064.6	7.4614	0.43442	2801.4	3062.0	7.3740	0.32416	2797.5	3056.9	7.2345	
350	0.57015	2883.0	3168.1	7.6346	0.47428	2881.6	3166.1	7.5481	0.35442	2878.6	3162.2	7.4107	
400	0.61731	2963.7	3272.4	7.7956	0.51374	2962.5	3270.8	7.7097	0.38429	2960.2	3267.7	7.5735	
500	0.71095	3129.0	3484.5	8.0893	0.59200	3128.2	3483.4	8.0041	0.44332	3126.6	3481.3	7.8692	
600	0.80409	3300.4	3702.5	8.3544	0.66976	3299.8	3701.7	8.2695	0.50186	3298.7	3700.1	8.1354	
700	0.89696	3478.6	3927.0	8.5978	0.74725	3478.1	3926.4	8.5132	0.56011	3477.2	3925.3	8.3794	
800	0.98966	3663.6	4158.4	8.8240	0.82457	3663.2	4157.9	8.7395	0.61820	3662.5	4157.0	8.6061	
900	1.08227	3855.4	4396.6	9.0362	0.90179	3855.1	4396.2	8.9518	0.67619	3854.5	4395.5	8.8185	
1000	1.17480	4054.0	4641.4	9.2364	0.97893	4053.8	4641.1	9.1521	0.73411	4053.3	4640.5	9.0189	
1100	1.26728	4259.0	4892.6	9.4263	1.05603	4258.8	4892.4	9.3420	0.79197	4258.3	4891.9	9.2090	
1200	1.35972	4470.0	5149.8	9.6071	1.13309	4469.8	5149.6	9.5229	0.84980	4469.4	5149.3	9.3898	
1300	1.45214	4686.6	5412.6	9.7797	1.21012	4686.4	5412.5	9.6955	0.90761	4686.1	5412.2	9.5625	

Fuente: Libro de termodinámica, Mcgraw Hill 2020

Tabla 69. Valores de temperatura de vapor de agua sobrecalentado a diferentes presiones desde los 50°C hasta los 1300°C

Tabla A-6																
Vapor de agua sobrecalentado (continuación)																
<i>T</i> °C	<i>v</i> m ³ /kg	<i>u</i> kJ/kg	<i>h</i> kJ/kg	<i>s</i> kJ/kg · K	<i>v</i> m ³ /kg	<i>u</i> kJ/kg	<i>h</i> kJ/kg	<i>s</i> kJ/kg · K	<i>v</i> m ³ /kg	<i>u</i> kJ/kg	<i>h</i> kJ/kg	<i>s</i> kJ/kg · K	<i>v</i> m ³ /kg	<i>u</i> kJ/kg	<i>h</i> kJ/kg	<i>s</i> kJ/kg · K
<i>P</i> = 1.00 MPa (179.88 °C)				<i>P</i> = 1.20 MPa (187.96 °C)				<i>P</i> = 1.40 MPa (195.04 °C)								
Sat.	0.19437	2582.8	2777.1	6.5850	0.16326	2587.8	2783.8	6.5217	0.14078	2591.8	2788.9	6.4675				
200	0.20602	2622.3	2828.3	6.6956	0.16934	2612.9	2816.1	6.5909	0.14303	2602.7	2803.0	6.4975				
250	0.23275	2710.4	2943.1	6.9265	0.19241	2704.7	2935.6	6.8313	0.16356	2698.9	2927.9	6.7488				
300	0.25799	2793.7	3051.6	7.1246	0.21386	2789.7	3046.3	7.0335	0.18233	2785.7	3040.9	6.9553				
350	0.28250	2875.7	3158.2	7.3029	0.23455	2872.7	3154.2	7.2139	0.20029	2869.7	3150.1	7.1379				
400	0.30661	2957.9	3264.5	7.4670	0.25482	2955.5	3261.3	7.3793	0.21782	2953.1	3258.1	7.3046				
500	0.35411	3125.0	3479.1	7.7642	0.29464	3123.4	3477.0	7.6779	0.25216	3121.8	3474.8	7.6047				
600	0.40111	3297.5	3698.6	8.0311	0.33395	3296.3	3697.0	7.9456	0.28597	3295.1	3695.5	7.8730				
700	0.44783	3476.3	3924.1	8.2755	0.37297	3475.3	3922.9	8.1904	0.31951	3474.4	3921.7	8.1183				
800	0.49438	3661.7	4156.1	8.5024	0.41184	3661.0	4155.2	8.4176	0.35288	3660.3	4154.3	8.3458				
900	0.54083	3853.9	4394.8	8.7150	0.45059	3853.3	4394.0	8.6303	0.38614	3852.7	4393.3	8.5587				
1000	0.58721	4052.7	4640.0	8.9155	0.48928	4052.2	4639.4	8.8310	0.41933	4051.7	4638.8	8.7595				
1100	0.63354	4257.9	4891.4	9.1057	0.52792	4257.5	4891.0	9.0212	0.45247	4257.0	4890.5	8.9497				
1200	0.67983	4469.0	5148.9	9.2866	0.56652	4468.7	5148.5	9.2022	0.48558	4468.3	5148.1	9.1308				
1300	0.72610	4685.8	5411.9	9.4593	0.60509	4685.5	5411.6	9.3750	0.51866	4685.1	5411.3	9.3036				
<i>P</i> = 1.60 MPa (201.37 °C)				<i>P</i> = 1.80 MPa (207.11 °C)				<i>P</i> = 2.00 MPa (212.38 °C)								
Sat.	0.12374	2594.8	2792.8	6.4200	0.11037	2597.3	2795.9	6.3775	0.09959	2599.1	2798.3	6.3390				
225	0.13293	2645.1	2857.8	6.5537	0.11678	2637.0	2847.2	6.4825	0.10381	2628.5	2836.1	6.4160				
250	0.14190	2692.9	2919.9	6.6753	0.12502	2686.7	2911.7	6.6088	0.11150	2680.3	2903.3	6.5475				
300	0.15866	2781.6	3035.4	6.8864	0.14025	2777.4	3029.9	6.8246	0.12551	2773.2	3024.2	6.7684				
350	0.17459	2866.6	3146.0	7.0713	0.15460	2863.6	3141.9	7.0120	0.13860	2860.5	3137.7	6.9583				
400	0.19007	2950.8	3254.9	7.2394	0.16849	2948.3	3251.6	7.1814	0.15122	2945.9	3248.4	7.1292				
500	0.22029	3120.1	3472.6	7.5410	0.19551	3118.5	3470.4	7.4845	0.17568	3116.9	3468.3	7.4337				
600	0.24999	3293.9	3693.9	7.8101	0.22200	3292.7	3692.3	7.7543	0.19962	3291.5	3690.7	7.7043				
700	0.27941	3473.5	3920.5	8.0558	0.24822	3472.6	3919.4	8.0005	0.22326	3471.7	3918.2	7.9509				
800	0.30865	3659.5	4153.4	8.2834	0.27426	3658.8	4152.4	8.2284	0.24674	3658.0	4151.5	8.1791				
900	0.33780	3852.1	4392.6	8.4965	0.30020	3851.5	4391.9	8.4417	0.27012	3850.9	4391.1	8.3925				
1000	0.36687	4051.2	4638.2	8.6974	0.32606	4050.7	4637.6	8.6427	0.29342	4050.2	4637.1	8.5936				
1100	0.39589	4256.6	4890.0	8.8878	0.35188	4256.2	4889.6	8.8331	0.31667	4255.7	4889.1	8.7842				
1200	0.42488	4467.9	5147.7	9.0689	0.37766	4467.6	5147.3	9.0143	0.33989	4467.2	5147.0	8.9654				
1300	0.45383	4684.8	5410.9	9.2418	0.40341	4684.5	5410.6	9.1872	0.36308	4684.2	5410.3	9.1384				
<i>P</i> = 2.50 MPa (223.95 °C)				<i>P</i> = 3.00 MPa (233.85 °C)				<i>P</i> = 3.50 MPa (242.56 °C)								
Sat.	0.07995	2602.1	2801.9	6.2558	0.06667	2603.2	2803.2	6.1856	0.05706	2603.0	2802.7	6.1244				
225	0.08026	2604.8	2805.5	6.2629												
250	0.08705	2663.3	2880.9	6.4107	0.07063	2644.7	2856.5	6.2893	0.05876	2624.0	2829.7	6.1764				
300	0.09894	2762.2	3009.6	6.6459	0.08118	2750.8	2994.3	6.5412	0.06845	2738.8	2978.4	6.4484				
350	0.10979	2852.5	3127.0	6.8424	0.09056	2844.4	3116.1	6.7450	0.07680	2836.0	3104.9	6.6601				
400	0.12012	2939.8	3240.1	7.0170	0.09938	2933.6	3231.7	6.9235	0.08456	2927.2	3223.2	6.8428				
450	0.13015	3026.2	3351.6	7.1768	0.10789	3021.2	3344.9	7.0856	0.09198	3016.1	3338.1	7.0074				
500	0.13999	3112.8	3462.8	7.3254	0.11620	3108.6	3457.2	7.2359	0.09919	3104.5	3451.7	7.1593				
600	0.15931	3288.5	3686.8	7.5979	0.13245	3285.5	3682.8	7.5103	0.11325	3282.5	3678.9	7.4357				
700	0.17835	3469.3	3915.2	7.8455	0.14841	3467.0	3912.2	7.7590	0.12702	3464.7	3909.3	7.6855				
800	0.19722	3656.2	4149.2	8.0744	0.16420	3654.3	4146.9	7.9885	0.14061	3652.5	4144.6	7.9156				
900	0.21597	3849.4	4389.3	8.2882	0.17988	3847.9	4387.5	8.2028	0.15410	3846.4	4385.7	8.1304				
1000	0.23466	4049.0	4635.6	8.4897	0.19549	4047.7	4634.2	8.4045	0.16751	4046.4	4632.7	8.3324				
1100	0.25330	4254.7	4887.9	8.6804	0.21105	4253.6	4886.7	8.5955	0.18087	4252.5	4885.6	8.5236				
1200	0.27190	4466.3	5146.0	8.8618	0.22658	4465.3	5145.1	8.7771	0.19420	4464.4	5144.1	8.7053				
1300	0.29048	4683.4	5409.5	9.0349	0.24207	4682.6	5408.8	8.9502	0.20750	4681.8	5408.0	8.8786				

Fuente: Libro de termodinámica, Mcgraw Hill 2020

Tabla 70. Valores de temperaturas de vapor de agua sobrecalentado a diferentes presiones desde 275°C hasta los 1300°C

Tabla A-6													
Vapor de agua sobrecalentado (continuación)													
T	v	u	h	s	v	u	h	s	v	u	h	s	
°C	m ³ /kg	kJ/kg	kJ/kg	kJ/kg · K	m ³ /kg	kJ/kg	kJ/kg	kJ/kg · K	m ³ /kg	kJ/kg	kJ/kg	kJ/kg · K	
	P = 4.0 MPa (250.35 °C)				P = 4.5 MPa (257.44 °C)				P = 5.0 MPa (263.94 °C)				
Sat.	0.04978	2601.7	2800.8	6.0696	0.04406	2599.7	2798.0	6.0198	0.03945	2597.0	2794.2	5.9737	
275	0.05461	2668.9	2887.3	6.2312	0.04733	2651.4	2864.4	6.1429	0.04144	2632.3	2839.5	6.0571	
300	0.05887	2726.2	2961.7	6.3639	0.05138	2713.0	2944.2	6.2854	0.04535	2699.0	2925.7	6.2111	
350	0.06647	2827.4	3093.3	6.5843	0.05842	2818.6	3081.5	6.5153	0.05197	2809.5	3069.3	6.4516	
400	0.07343	2920.8	3214.5	6.7714	0.06477	2914.2	3205.7	6.7071	0.05784	2907.5	3196.7	6.6483	
450	0.08004	3011.0	3331.2	6.9386	0.07076	3005.8	3324.2	6.8770	0.06332	3000.6	3317.2	6.8210	
500	0.08644	3100.3	3446.0	7.0922	0.07652	3096.0	3440.4	7.0323	0.06858	3091.8	3434.7	6.9781	
600	0.09886	3279.4	3674.9	7.3706	0.08766	3276.4	3670.9	7.3127	0.07870	3273.3	3666.9	7.2605	
700	0.11098	3462.4	3906.3	7.6214	0.09850	3460.0	3903.3	7.5647	0.08852	3457.7	3900.3	7.5136	
800	0.12292	3650.6	4142.3	7.8523	0.10916	3648.8	4140.0	7.7962	0.09816	3646.9	4137.7	7.7458	
900	0.13476	3844.8	4383.9	8.0675	0.11972	3843.3	4382.1	8.0118	0.10769	3841.8	4380.2	7.9619	
1000	0.14653	4045.1	4631.2	8.2698	0.13020	4043.9	4629.8	8.2144	0.11715	4042.6	4628.3	8.1648	
1100	0.15824	4251.4	4884.4	8.4612	0.14064	4250.4	4883.2	8.4060	0.12655	4249.3	4882.1	8.3566	
1200	0.16992	4463.5	5143.2	8.6430	0.15103	4462.6	5142.2	8.5880	0.13592	4461.6	5141.3	8.5388	
1300	0.18157	4680.9	5407.2	8.8164	0.16140	4680.1	5406.5	8.7616	0.14527	4679.3	5405.7	8.7124	
	P = 6.0 MPa (275.59 °C)				P = 7.0 MPa (285.83 °C)				P = 8.0 MPa (295.01 °C)				
Sat.	0.03245	2589.9	2784.6	5.8902	0.027378	2581.0	2772.6	5.8148	0.023525	2570.5	2758.7	5.7450	
300	0.03619	2668.4	2885.6	6.0703	0.029492	2633.5	2839.9	5.9337	0.024279	2592.3	2786.5	5.7937	
350	0.04225	2790.4	3043.9	6.3357	0.035262	2770.1	3016.9	6.2305	0.029975	2748.3	2988.1	6.1321	
400	0.04742	2893.7	3178.3	6.5432	0.039958	2879.5	3159.2	6.4502	0.034344	2864.6	3139.4	6.3658	
450	0.05217	2989.9	3302.9	6.7219	0.044187	2979.0	3288.3	6.6353	0.038194	2967.8	3273.3	6.5579	
500	0.05667	3083.1	3423.1	6.8826	0.048157	3074.3	3411.4	6.8000	0.041767	3065.4	3399.5	6.7266	
550	0.06102	3175.2	3541.3	7.0308	0.051966	3167.9	3531.6	6.9507	0.045172	3160.5	3521.8	6.8800	
600	0.06527	3267.2	3658.8	7.1693	0.055665	3261.0	3650.6	7.0910	0.048463	3254.7	3642.4	7.0221	
700	0.07355	3453.0	3894.3	7.4247	0.062850	3448.3	3888.3	7.3487	0.054829	3443.6	3882.2	7.2822	
800	0.08165	3643.2	4133.1	7.6582	0.069856	3639.5	4128.5	7.5836	0.061011	3635.7	4123.8	7.5185	
900	0.08964	3838.8	4376.6	7.8751	0.076750	3835.7	4373.0	7.8014	0.067082	3832.7	4369.3	7.7372	
1000	0.09756	4040.1	4625.4	8.0786	0.083571	4037.5	4622.5	8.0055	0.073079	4035.0	4619.6	7.9419	
1100	0.10543	4247.1	4879.7	8.2709	0.090341	4245.0	4877.4	8.1982	0.079025	4242.8	4875.0	8.1350	
1200	0.11326	4459.8	5139.4	8.4534	0.097075	4457.9	5137.4	8.3810	0.084934	4456.1	5135.5	8.3181	
1300	0.12107	4677.7	5404.1	8.6273	0.103781	4676.1	5402.6	8.5551	0.090817	4674.5	5401.0	8.4925	
	P = 9.0 MPa (303.35 °C)				P = 10.0 MPa (311.00 °C)				P = 12.5 MPa (327.81 °C)				
Sat.	0.020489	2558.5	2742.9	5.6791	0.018028	2545.2	2725.5	5.6159	0.013496	2505.6	2674.3	5.4638	
325	0.023284	2647.6	2857.1	5.8738	0.019877	2611.6	2810.3	5.7596					
350	0.025816	2725.0	2957.3	6.0380	0.022440	2699.6	2924.0	5.9460	0.016138	2624.9	2826.6	5.7130	
400	0.029960	2849.2	3118.8	6.2876	0.026436	2833.1	3097.5	6.2141	0.020030	2789.6	3040.0	6.0433	
450	0.033524	2956.3	3258.0	6.4872	0.029782	2944.5	3242.4	6.4219	0.023019	2913.7	3201.5	6.2749	
500	0.036793	3056.3	3387.4	6.6603	0.032811	3047.0	3375.1	6.5995	0.025630	3023.2	3343.6	6.4651	
550	0.039885	3153.0	3512.0	6.8164	0.035655	3145.4	3502.0	6.7585	0.028033	3126.1	3476.5	6.6317	
600	0.042861	3248.4	3634.1	6.9605	0.038378	3242.0	3625.8	6.9045	0.030306	3225.8	3604.6	6.7828	
650	0.045755	3343.4	3755.2	7.0954	0.041018	3338.0	3748.1	7.0408	0.032491	3324.1	3730.2	6.9227	
700	0.048589	3438.8	3876.1	7.2229	0.043597	3434.0	3870.0	7.1693	0.034612	3422.0	3854.6	7.0540	
800	0.054132	3632.0	4119.2	7.4606	0.048629	3628.2	4114.5	7.4085	0.038724	3618.8	4102.8	7.2967	
900	0.059562	3829.6	4365.7	7.6802	0.053547	3826.5	4362.0	7.6290	0.042720	3818.9	4352.9	7.5195	
1000	0.064919	4032.4	4616.7	7.8855	0.058391	4029.9	4613.8	7.8349	0.046641	4023.5	4606.5	7.7269	
1100	0.070224	4240.7	4872.7	8.0791	0.063183	4238.5	4870.3	8.0289	0.050510	4233.1	4864.5	7.9220	
1200	0.075492	4454.2	5133.6	8.2625	0.067938	4452.4	5131.7	8.2126	0.054342	4447.7	5127.0	8.1065	
1300	0.080733	4672.9	5399.5	8.4371	0.072667	4671.3	5398.0	8.3874	0.058147	4667.3	5394.1	8.2819	

Fuente: Libro de termodinámica, Mcgraw Hill 2020

Tabla 71. Valores de temperatura de vapor de agua sobrecalentada a diferentes presiones desde los 375°C hasta los 1300°C

Tabla A-6													
Vapor de agua sobrecalentado (conclusión)													
<i>T</i>	<i>v</i>	<i>u</i>	<i>h</i>	<i>s</i>	<i>v</i>	<i>u</i>	<i>h</i>	<i>s</i>	<i>v</i>	<i>u</i>	<i>h</i>	<i>s</i>	<i>v</i>
°C	m ³ /kg	kJ/kg	kJ/kg	kJ/kg · K	m ³ /kg	kJ/kg	kJ/kg	kJ/kg · K	m ³ /kg	kJ/kg	kJ/kg	kJ/kg · K	m ³ /kg
	<i>P</i> = 15.0 MPa (342.16 °C)				<i>P</i> = 17.5 MPa (354.67 °C)				<i>P</i> = 20.0 MPa (365.75 °C)				
Sat.	0.010341	2455.7	2610.8	5.3108	0.007932	2390.7	2529.5	5.1435	0.005862	2294.8	2412.1	4.9310	
350	0.011481	2520.9	2693.1	5.4438									
400	0.015671	2740.6	2975.7	5.8819	0.012463	2684.3	2902.4	5.7211	0.009950	2617.9	2816.9	5.5526	
450	0.018477	2880.8	3157.9	6.1434	0.015204	2845.4	3111.4	6.0212	0.012721	2807.3	3061.7	5.9043	
500	0.020828	2998.4	3310.8	6.3480	0.017385	2972.4	3276.7	6.2424	0.014793	2945.3	3241.2	6.1446	
550	0.022945	3106.2	3450.4	6.5230	0.019305	3085.8	3423.6	6.4266	0.016571	3064.7	3396.2	6.3390	
600	0.024921	3209.3	3583.1	6.6796	0.021073	3192.5	3561.3	6.5890	0.018185	3175.3	3539.0	6.5075	
650	0.026804	3310.1	3712.1	6.8233	0.022742	3295.8	3693.8	6.7366	0.019695	3281.4	3675.3	6.6593	
700	0.028621	3409.8	3839.1	6.9573	0.024342	3397.5	3823.5	6.8735	0.021134	3385.1	3807.8	6.7991	
800	0.032121	3609.3	4091.1	7.2037	0.027405	3599.7	4079.3	7.1237	0.023870	3590.1	4067.5	7.0531	
900	0.035503	3811.2	4343.7	7.4288	0.030348	3803.5	4334.6	7.3511	0.026484	3795.7	4325.4	7.2829	
1000	0.038808	4017.1	4599.2	7.6378	0.033215	4010.7	4592.0	7.5616	0.029020	4004.3	4584.7	7.4950	
1100	0.042062	4227.7	4858.6	7.8339	0.036029	4222.3	4852.8	7.7588	0.031504	4216.9	4847.0	7.6933	
1200	0.045279	4443.1	5122.3	8.0192	0.038806	4438.5	5117.6	7.9449	0.033952	4433.8	5112.9	7.8802	
1300	0.048469	4663.3	5390.3	8.1952	0.041556	4659.2	5386.5	8.1215	0.036371	4655.2	5382.7	8.0574	
	<i>P</i> = 25.0 MPa				<i>P</i> = 30.0 MPa				<i>P</i> = 35.0 MPa				
375	0.001978	1799.9	1849.4	4.0345	0.001792	1738.1	1791.9	3.9313	0.001701	1702.8	1762.4	3.8724	
400	0.006005	2428.5	2578.7	5.1400	0.002798	2068.9	2152.8	4.4758	0.002105	1914.9	1988.6	4.2144	
425	0.007886	2607.8	2805.0	5.4708	0.005299	2452.9	2611.8	5.1473	0.003434	2253.3	2373.5	4.7751	
450	0.009176	2721.2	2950.6	5.6759	0.006737	2618.9	2821.0	5.4422	0.004957	2497.5	2671.0	5.1946	
500	0.011143	2887.3	3165.9	5.9643	0.008691	2824.0	3084.8	5.7956	0.006933	2755.3	2997.9	5.6331	
550	0.012736	3020.8	3339.2	6.1816	0.010175	2974.5	3279.7	6.0403	0.008348	2925.8	3218.0	5.9093	
600	0.014140	3140.0	3493.5	6.3637	0.011445	3103.4	3446.8	6.2373	0.009523	3065.6	3399.0	6.1229	
650	0.015430	3251.9	3637.7	6.5243	0.012590	3221.7	3599.4	6.4074	0.010565	3190.9	3560.7	6.3030	
700	0.016643	3359.9	3776.0	6.6702	0.013654	3334.3	3743.9	6.5599	0.011523	3308.3	3711.6	6.4623	
800	0.018922	3570.7	4043.8	6.9322	0.015628	3551.2	4020.0	6.8301	0.013278	3531.6	3996.3	6.7409	
900	0.021075	3780.2	4307.1	7.1668	0.017473	3764.6	4288.8	7.0695	0.014904	3749.0	4270.6	6.9853	
1000	0.023150	3991.5	4570.2	7.3821	0.019240	3978.6	4555.8	7.2880	0.016450	3965.8	4541.5	7.2069	
1100	0.025172	4206.1	4835.4	7.5825	0.020954	4195.2	4823.9	7.4906	0.017942	4184.4	4812.4	7.4118	
1200	0.027157	4424.6	5103.5	7.7710	0.022630	4415.3	5094.2	7.6807	0.019398	4406.1	5085.0	7.6034	
1300	0.029115	4647.2	5375.1	7.9494	0.024279	4639.2	5367.6	7.8602	0.020827	4631.2	5360.2	7.7841	
	<i>P</i> = 40.0 MPa				<i>P</i> = 50.0 MPa				<i>P</i> = 60.0 MPa				
375	0.001641	1677.0	1742.6	3.8290	0.001560	1638.6	1716.6	3.7642	0.001503	1609.7	1699.9	3.7149	
400	0.001911	1855.0	1931.4	4.1145	0.001731	1787.8	1874.4	4.0029	0.001633	1745.2	1843.2	3.9317	
425	0.002538	2097.5	2199.0	4.5044	0.002009	1960.3	2060.7	4.2746	0.001816	1892.9	2001.8	4.1630	
450	0.003692	2364.2	2511.8	4.9449	0.002487	2160.3	2284.7	4.5896	0.002086	2055.1	2180.2	4.4140	
500	0.005623	2681.6	2906.5	5.4744	0.003890	2528.1	2722.6	5.1762	0.002952	2393.2	2570.3	4.9356	
550	0.006985	2875.1	3154.4	5.7857	0.005118	2769.5	3025.4	5.5563	0.003955	2664.6	2901.9	5.3517	
600	0.008089	3026.8	3350.4	6.0170	0.006108	2947.1	3252.6	5.8245	0.004833	2866.8	3156.8	5.6527	
650	0.009053	3159.5	3521.6	6.2078	0.006957	3095.6	3443.5	6.0373	0.005591	3031.3	3366.8	5.8867	
700	0.009930	3282.0	3679.2	6.3740	0.007717	3228.7	3614.6	6.2179	0.006265	3175.4	3551.3	6.0814	
800	0.011521	3511.8	3972.6	6.6613	0.009073	3472.2	3925.8	6.5225	0.007456	3432.6	3880.0	6.4033	
900	0.012980	3733.3	4252.5	6.9107	0.010296	3702.0	4216.8	6.7819	0.008519	3670.9	4182.1	6.6725	
1000	0.014360	3952.9	4527.3	7.1355	0.011441	3927.4	4499.4	7.0131	0.009504	3902.0	4472.2	6.9099	
1100	0.015686	4173.7	4801.1	7.3425	0.012534	4152.2	4778.9	7.2244	0.010439	4130.9	4757.3	7.1255	
1200	0.016976	4396.9	5075.9	7.5357	0.013590	4378.6	5058.1	7.4207	0.011339	4360.5	5040.8	7.3248	
1300	0.018239	4623.3	5352.8	7.7175	0.014620	4607.5	5338.5	7.6048	0.012213	4591.8	5324.5	7.5111	

Fuente: Libro de termodinámica, Mcgraw Hill 2020

Tabla 72. Valores de temperatura de agua de líquido comprimida diferentes presiones desde los 0°C hasta los 380°C

Tabla A-7													
Agua líquida comprimida													
T °C	v m ³ /kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/kg · K	v m ³ /kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/kg · K	v m ³ /kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/kg · K	
	$P = 5 \text{ MPa (263.94 °C)}$				$P = 10 \text{ MPa (311.00 °C)}$				$P = 15 \text{ MPa (342.16 °C)}$				
Sat.	0.0012862	1148.1	1154.5	2.9207	0.0014522	1393.3	1407.9	3.3603	0.0016572	1585.5	1610.3	3.6848	
0	0.0009977	0.04	5.03	0.0001	0.0009952	0.12	10.07	0.0003	0.0009928	0.18	15.07	0.0004	
20	0.0009996	83.61	88.61	0.2954	0.0009973	83.31	93.28	0.2943	0.0009951	83.01	97.93	0.2932	
40	0.0010057	166.92	171.95	0.5705	0.0010035	166.33	176.37	0.5685	0.0010013	165.75	180.77	0.5666	
60	0.0010149	250.29	255.36	0.8287	0.0010127	249.43	259.55	0.8260	0.0010105	248.58	263.74	0.8234	
80	0.0010267	333.82	338.96	1.0723	0.0010244	332.69	342.94	1.0691	0.0010221	331.59	346.92	1.0659	
100	0.0010410	417.65	422.85	1.3034	0.0010385	416.23	426.62	1.2996	0.0010361	414.85	430.39	1.2958	
120	0.0010576	501.91	507.19	1.5236	0.0010549	500.18	510.73	1.5191	0.0010522	498.50	514.28	1.5148	
140	0.0010769	586.80	592.18	1.7344	0.0010738	584.72	595.45	1.7293	0.0010708	582.69	598.75	1.7243	
160	0.0010988	672.55	678.04	1.9374	0.0010954	670.06	681.01	1.9316	0.0010920	667.63	684.01	1.9259	
180	0.0011240	759.47	765.09	2.1338	0.0011200	756.48	767.68	2.1271	0.0011160	753.58	770.32	2.1206	
200	0.0011531	847.92	853.68	2.3251	0.0011482	844.32	855.80	2.3174	0.0011435	840.84	858.00	2.3100	
220	0.0011868	938.39	944.32	2.5127	0.0011809	934.01	945.82	2.5037	0.0011752	929.81	947.43	2.4951	
240	0.0012268	1031.6	1037.7	2.6983	0.0012192	1026.2	1038.3	2.6876	0.0012121	1021.0	1039.2	2.6774	
260	0.0012755	1128.5	1134.9	2.8841	0.0012653	1121.6	1134.3	2.8710	0.0012560	1115.1	1134.0	2.8586	
280					0.0013226	1221.8	1235.0	3.0565	0.0013096	1213.4	1233.0	3.0410	
300					0.0013980	1329.4	1343.3	3.2488	0.0013783	1317.6	1338.3	3.2279	
320									0.0014733	1431.9	1454.0	3.4263	
340									0.0016311	1567.9	1592.4	3.6555	
	$P = 20 \text{ MPa (365.75 °C)}$				$P = 30 \text{ MPa}$				$P = 50 \text{ MPa}$				
Sat.	0.0020378	1785.8	1826.6	4.0146	0.0009857	0.29	29.86	0.0003	0.0009767	0.29	49.13	-0.0010	
0	0.0009904	0.23	20.03	0.0005	0.0009886	82.11	111.77	0.2897	0.0009805	80.93	129.95	0.2845	
20	0.0009929	82.71	102.57	0.2921	0.0009886	82.11	111.77	0.2897	0.0009805	80.93	129.95	0.2845	
40	0.0009992	165.17	185.16	0.5646	0.0009951	164.05	193.90	0.5607	0.0009872	161.90	211.25	0.5528	
60	0.0010084	247.75	267.92	0.8208	0.0010042	246.14	276.26	0.8156	0.0009962	243.08	292.88	0.8055	
80	0.0010199	330.50	350.90	1.0627	0.0010155	328.40	358.86	1.0564	0.0010072	324.42	374.78	1.0442	
100	0.0010337	413.50	434.17	1.2920	0.0010290	410.87	441.74	1.2847	0.0010201	405.94	456.94	1.2705	
120	0.0010496	496.85	517.84	1.5105	0.0010445	493.66	525.00	1.5020	0.0010349	487.69	539.43	1.4859	
140	0.0010679	580.71	602.07	1.7194	0.0010623	576.90	608.76	1.7098	0.0010517	569.77	622.36	1.6916	
160	0.0010886	665.28	687.05	1.9203	0.0010823	660.74	693.21	1.9094	0.0010704	652.33	705.85	1.8889	
180	0.0011122	750.78	773.02	2.1143	0.0011049	745.40	778.55	2.1020	0.0010914	735.49	790.06	2.0790	
200	0.0011390	837.49	860.27	2.3027	0.0011304	831.11	865.02	2.2888	0.0011149	819.45	875.19	2.2628	
220	0.0011697	925.77	949.16	2.4867	0.0011595	918.15	952.93	2.4707	0.0011412	904.39	961.45	2.4414	
240	0.0012053	1016.1	1040.2	2.6676	0.0011927	1006.9	1042.7	2.6491	0.0011708	990.55	1049.1	2.6156	
260	0.0012472	1109.0	1134.0	2.8469	0.0012314	1097.8	1134.7	2.8250	0.0012044	1078.2	1138.4	2.7864	
280	0.0012978	1205.6	1231.5	3.0265	0.0012770	1191.5	1229.8	3.0001	0.0012430	1167.7	1229.9	2.9547	
300	0.0013611	1307.2	1334.4	3.2091	0.0013322	1288.9	1328.9	3.1761	0.0012879	1259.6	1324.0	3.1218	
320	0.0014450	1416.6	1445.5	3.3996	0.0014014	1391.7	1433.7	3.3558	0.0013409	1354.3	1421.4	3.2888	
340	0.0015693	1540.2	1571.6	3.6086	0.0014932	1502.4	1547.1	3.5438	0.0014049	1452.9	1523.1	3.4575	
360	0.0018248	1703.6	1740.1	3.8787	0.0016276	1626.8	1675.6	3.7499	0.0014848	1556.5	1630.7	3.6301	
380					0.0018729	1782.0	1838.2	4.0026	0.0015884	1667.1	1746.5	3.8102	

Fuente: Libro de termodinámica, McGraw Hill 2020

Tabla 73. Valores de temperatura de hielo saturado de vapor de agua desde los 0°C hasta los 40°C

Tabla A-8												
Hielo saturado. Vapor de agua												
Temp., T °C	Pres. sat., P _{sat} kPa	Volumen específico, m ³ /kg		Energía interna, kJ/kg			Entalpía, kJ/kg			Entropía, kJ/kg · K		
		Hielo sat., v _i	Vapor sat., v _g	Hielo sat., u _i	Subl., u _{ig}	Vapor sat., u _g	Hielo sat., h _i	Subl., h _{ig}	Vapor sat., h _g	Hielo sat., s _i	Subl., s _{ig}	Vapor sat., s _g
0.01	0.61169	0.001091	205.99	-333.40	2707.9	2374.5	-333.40	2833.9	2500.5	-1.2202	10.374	9.154
0	0.61115	0.001091	206.17	-333.43	2707.9	2374.5	-333.43	2833.9	2500.5	-1.2204	10.375	9.154
-2	0.51772	0.001091	241.62	-337.63	2709.4	2371.8	-337.63	2834.5	2496.8	-1.2358	10.453	9.218
-4	0.43748	0.001090	283.84	-341.80	2710.8	2369.0	-341.80	2835.0	2493.2	-1.2513	10.533	9.282
-6	0.36873	0.001090	334.27	-345.94	2712.2	2366.2	-345.93	2835.4	2489.5	-1.2667	10.613	9.347
-8	0.30998	0.001090	394.66	-350.04	2713.5	2363.5	-350.04	2835.8	2485.8	-1.2821	10.695	9.413
-10	0.25990	0.001089	467.17	-354.12	2714.8	2360.7	-354.12	2836.2	2482.1	-1.2976	10.778	9.480
-12	0.21732	0.001089	554.47	-358.17	2716.1	2357.9	-358.17	2836.6	2478.4	-1.3130	10.862	9.549
-14	0.18121	0.001088	659.88	-362.18	2717.3	2355.2	-362.18	2836.9	2474.7	-1.3284	10.947	9.618
-16	0.15068	0.001088	787.51	-366.17	2718.6	2352.4	-366.17	2837.2	2471.0	-1.3439	11.033	9.689
-18	0.12492	0.001088	942.51	-370.13	2719.7	2349.6	-370.13	2837.5	2467.3	-1.3593	11.121	9.761
-20	0.10326	0.001087	1131.3	-374.06	2720.9	2346.8	-374.06	2837.7	2463.6	-1.3748	11.209	9.835
-22	0.08510	0.001087	1362.0	-377.95	2722.0	2344.1	-377.95	2837.9	2459.9	-1.3903	11.300	9.909
-24	0.06991	0.001087	1644.7	-381.82	2723.1	2341.3	-381.82	2838.1	2456.2	-1.4057	11.391	9.985
-26	0.05725	0.001087	1992.2	-385.66	2724.2	2338.5	-385.66	2838.2	2452.5	-1.4212	11.484	10.063
-28	0.04673	0.001086	2421.0	-389.47	2725.2	2335.7	-389.47	2838.3	2448.8	-1.4367	11.578	10.141
-30	0.03802	0.001086	2951.7	-393.25	2726.2	2332.9	-393.25	2838.4	2445.1	-1.4521	11.673	10.221
-32	0.03082	0.001086	3610.9	-397.00	2727.2	2330.2	-397.00	2838.4	2441.4	-1.4676	11.770	10.303
-34	0.02490	0.001085	4432.4	-400.72	2728.1	2327.4	-400.72	2838.5	2437.7	-1.4831	11.869	10.386
-36	0.02004	0.001085	5460.1	-404.40	2729.0	2324.6	-404.40	2838.4	2434.0	-1.4986	11.969	10.470
-38	0.01608	0.001085	6750.5	-408.07	2729.9	2321.8	-408.07	2838.4	2430.3	-1.5141	12.071	10.557
-40	0.01285	0.001084	8376.7	-411.70	2730.7	2319.0	-411.70	2838.3	2426.6	-1.5296	12.174	10.644

Fuente: Libro de termodinámica, Mcgraw Hill 2020