ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL

GESTIÓN DE DESECHOS TÓXICOS Y PELIGROSOS CON MATERIALES IMPREGNADOS CON HIDROCARBUROS, FÁRMACOS, BIOPELIGROSOS Y RESINAS DE LA EMPRESA HAZWAT MEDIANTE LA INCINERACIÓN.

TRABAJO DE TITULACIÓN, PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO AMBIENTAL

AUTORES:

ADRIANA ELIZABETH MOGOLLÓN ESTÉVEZ

DAMARIS HIPATIA VALLEJO CORAL

DIRECTORA:

ING. LUCÍA MONTENEGRO A. M.Sc.

Quito, 19 julio 2022

DECLARACIÓN

Nosotros, Mogollón Estévez Adriana Elizabeth y Vallejo Coral Dámaris Hipatia, declaramos que el trabajo aquí descrito es de nuestra autoría, que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional, y que hemos consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

La Escuela Politécnica Nacional puede hacer uso de los derechos correspondientes ar este trabajo, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normativa institucional vigente.

ADRIANA ELIZABETH MOGOLLÓN ESTÉVEZ

DÁMARIS HIPATIA VALLEJO CORAL

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado Adriana Elizabeth Mogollón Estévez y Damaris Hipatia Vallejo Coral, bajo mi supervisión.

_____

Lucía Montenegro. M.Sc.
DIRECTORA DEL PROYECTO

AGRADECIMIENTO

Agradezco con todo mi corazón a Dios y mi Virgencita María quienes me han guiado y bendecido para hacer las cosas de la mejor manera, por darme fortaleza y sabiduría.

A mi madre, que es un pilar fundamental dentro de mi vida, por regalarme su apoyo infinito, al enseñarme a ser una persona con excelentes valores y nunca darme por vencida, ella siempre encuentra las palabras adecuadas para alentarme.

A mi ñaño Miguel, que a pesar de que no está presente de forma física en mi vida, estuvo conmigo cuando empecé este viaje de altibajos en mi querida POLI, aún recuerdo todos tus consejos.

A mi pequeño Cris, quien ha tenido que estar a cuidados de los demás para verme llegar a ser una profesional, gracias por tus cariñitos y ocurrencias, eres el motor por el cual siempre busco salir a delante.

A mi padre y hermanos que han estado presentes de una u otra forma ayudándome para poder culminar mi carrera.

Un agradecimiento especial a la M.Sc. Lucia Montenegro por todas sus enseñanzas, dirección, esfuerzo y dedicación al ser nuestra directora de tesis.

A los diferentes laboratorios (LAI, LDIA, LOU y LPQ) que nos brindaron su ayuda para la realización de los ensayos y al centro de investigación CICAM por su colaboración.

A mis amigos incondicionales que siempre estuvieron ahí para explicarme cualquier duda, ustedes me enseñaron que no se necesita ser de un mismo lugar para ayudar a los demás, gracias por el acolite y la diversión.

A mis compañeros de clase, por hacer de este viaje una etapa de mi vida muy especial y sobre todo a mi amiga de tesis Damy quien se aventuró conmigo a realizar este arduo trabajo.

Adriana

DEDICATORIA

Mi trabajo de titulación va dedicado, a mi querida mamita Ufe, quiero que sepa que esto lo logre por ella, por su tiempo, paciencia y dinero.

A mi pequeño Cris quien siempre ha estado en mis pensamientos para poder culminar mi carrera y darle un buen futuro, demostrarle que no importa las etapas de la vida en las que te encuentres, que los sueños se cumplen al no darse por vencido siendo una buena persona.

Adriana

AGRADECIMIENTO

Doy gracias a la vida por brindarme una familia hermosa, que siempre agradeceré infinitamente por el apoyo y el amor que me han ofrecido en cada etapa de mi vida.

Mi agradecimiento a M.Sc. Lucía Montenegro por el apoyo impartido para la culminación del presente trabajo de titulación.

Dámaris

DEDICATORIA

A mi abuela Luz Marina Pazos, mi luz desde el cielo.

A mis padres Marisol y Ramiro, mis guías en este camino llamado vida.

A mis hermanos Anthony y Keily, familia, amigos y personas que me han apoyado en cada paso que he dado.

A mis mascotas, mis compañeras de aventuras desde que empecé el pregrado.

Dámaris

ÍNDICE

DECLARACIÓN ..... **I**
CERTIFICACIÓN ..... **II**
AGRADECIMIENTO ..... **III**
DEDICATORÍA ..... **V**
AGRADECIMIENTO ..... **VI**
DEDICATORÍA ..... **VII**
ÍNDICE ..... **VIII**
ÍNDICE DE FIGURAS ..... **XIII**
ÍNDICE DE TABLAS ..... **XVI**
SIGLAS Y SIMBOLOGÍA ..... **XIX**
GLOSARIO DE TÉRMINOS ..... **XXI**
RESUMEN ..... **XXIV**
ABSTRACT ..... **XXVI**
CAPÍTULO 1 ..... **1**
INTRODUCCIÓN **1**
1.1 ANTECEDENTES 1
1.2 JUSTIFICACIÓN 3
1.3 ALCANCE 4
1.4 OBJETIVOS 5
1.4.1 OBJETIVO GENERAL 5
1.4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS 5
1.5 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA 6
CAPÍTULO 2 ..... **8**
MARCO TEÓRICO **8**
2.1 DESECHOS PELIGROSOS 8
2.2 DISPOSICIÓN FINAL DE LOS DESECHOS PELIGROSOS 10
2.2.1 RECICLAJE DE MATERIALES 10
2.2.2 BIORREMEDIACIÓN 11
2.2.3 INACTIVACIÓN POR AUTOCLAVE 11
2.2.4 INCINERACIÓN 12
2.2.5 CELDA DE SEGURIDAD Y ESTABILIZACIÓN 13

2.3 INCINERACIÓN DE DESECHOS PELIGROSOS 13
2.3.1 TIPOS DE INCINERADORES Y PROCESOS DE COMBUSTIÓN..... 15
2.3.1.1 Tipos de incineradores 15
2.3.1.2 Cámaras de Combustión 19
2.3.2 PRINCIPALES CRITERIOS PARA ANALIZAR EN UNA PLANTA DE INCINERACIÓN 22
2.3.3 CARACTERIZACIÓN DE DESECHOS PARA INCINERACIÓN 27
2.3.4 DESCRIPCIÓN DEL INCINERADOR DE HAZWAT 31
2.4 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LA INCINERACIÓN 32
2.4.1 VENTAJAS DEL PROCESO DE LA INCINERACIÓN..... 32
2.4.2 DESVENTAJAS DEL PROCESO DE LA INCINERACIÓN 33
2.5 EMISIONES ATMOSFÉRICAS Y MATERIAL PARTICULADO 34
2.6 CATEGORÍAS DE DESECHOS PELIGROSOS QUE RECIBE HAZWAT..... 39
2.6.1 MATERIALES ADSORBENTES/FILTRANTES/ENVASES/EMBALAJE - TIPO “0”..... 40
2.6.2 APROVECHABLES – TIPO “0”..... 40
2.6.3 MATERIALES IMPREGNADOS CON HIDROCARBUROS-TIPO “1”..... 40
2.6.4 FÁRMACOS - TIPO “2” 41
2.6.5 BIOPELIGROSOS - TIPO “3” 41
2.6.6 SOLVENTES/PINTURAS/RESINAS - TIPO “4” 41
2.7 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE DISPOSICIÓN FINAL DE DESECHOS EN LA EMPRESA HAZWAT..... 42
2.8 DESCRIPCIÓN DE LA OPERACIÓN Y CONTROL DE EMISIONES GASEOSAS DEL INCINERADOR DE LA EMPRESA HAZWAT 45
2.8.1 CALDERO DE RECUPERACIÓN DE CALOR 46
2.8.2 TANQUE DE ALIMENTACIÓN DEL CALDERO 46
2.8.3 TANQUE DE RETORNO DE CONDENSADO..... 47
2.8.4 VENTILADOR DE TIRO INDUCIDO 47
2.8.5 VENTURI..... 48
2.8.6 DEPURADOR HÚMEDO 50
2.8.7 PROCESO DE TRATAMIENTO DE AGUAS DEL LAVADOR DE GASES..... 51
2.9 BALANCE DE MASA Y ENERGÍA 52

2.9.1 BALANCE DE MASA 53
2.9.2 BALANCE DE ENERGÍA 54
2.9.3 BALANCE DE MASA Y ENERGÍA EN SISTEMAS CON REACCIÓN QUÍMICA DE COMBUSTIÓN 54
2.10 NORMATIVA AMBIENTAL NACIONAL 55
2.10.1 ACUERDO MINISTERIAL No. 061, REFORMA DEL LIBRO VI DEL TEXTO UNIFICADO DE LEGISLACIÓN SECUNDARIA, ... 55
2.10.2 ACUERDO MINISTERIAL No. 026, PROCEDIMIENTOS PARA REGISTRO DE GENERADORES DE DESECHOS PELIGROSOS, GESTIÓN DE DESECHOS PELIGROSOS PREVIO AL LICENCIAMIENTO AMBIENTA, Y PARA EL TRANSPORTE DE MATERIALES PELIGROSOS 56
2.10.3 ACUERDO MINISTERIAL No. 142, LISTADO NACIONAL SUSTANCIAS QUIMICAS PELIGROSAS DESECHOS PELIGROSOS 58
2.10.4 ORDENANZA MUNICIPAL DEL DISTRITO METROPOLITANO DE QUITO No. 138 58
CAPÍTULO 3 60
METODOLOGÍA 60
3.1 ÁREA DE ESTUDIO 60
3.2 RECOPILACIÓN DE DATOS 61
3.3 RECONOCIMIENTO DE LOS DESECHOS PELIGROSOS EN LA EMPRESA 62
3.4 ELABORACIÓN DEL MENÚ DE CARGA DE INCINERACIÓN 63
3.5 MUESTREO DE DESECHOS 64
3.6 ANÁLISIS DE LABORATORIO DE LAS MUESTRAS A INCINERAR 65
3.6.1 PORCENTAJE DE HUMEDAD 66
3.6.2 PODER CALÓRICO 68
3.6.3 ANÁLISIS DE IDENTIFICACIÓN DE COMPUESTOS 69
3.6.4 ANÁLISIS DE ACEITES Y GRASAS 70
3.6.5 PORCENTAJE DE CENIZAS DE LOS MENÚS PLANTEADOS 72
3.6.5.1 Determinación de la variación de porcentaje de cada desecho en los menús de cargas 73

3.6.5.2 Determinación del porcentaje de ceniza 73
3.7 DISEÑO EXPERIMENTAL DEL MENÚ 75
3.8 PRUEBA PILOTO (IN-SITU). 76
3.8.1 CARACTERIZACIÓN DE EMISIONES ATMOSFÉRICAS 78
3.8.2 ANÁLISIS DE ÁCIDO CLORHÍDRICO 80
3.8.3 CARACTERIZACIÓN DE METALES PRESENTES EN LA CENIZA 82
3.9 BALANCE DE MASA Y ENERGÍA EN EL PROCESO DE INCINERACIÓN 85
3.10 EVALUACIÓN DE LA IMPLEMENTACIÓN DE LOS MENÚS EN LA PLANTA 87
CAPÍTULO 4 88
RESULTADOS Y DISCUSIÓN 88
4.1 INVENTARIO DE DESECHOS PRESENTES EN LA PLANTA HAZWAT 89
4.2 DETERMINACIÓN DE DESECHOS A CONSIDERAR EN EL MENÚ DE INCINERACIÓN 89
4.2.1 DESECHOS SELECCIONADOS PARA EL MENÚ DE INCINERACIÓN 90
4.2.2 MUESTREO DE DESECHOS SELECCIONADOS 91
4.3 RESULTADOS DE LA CARACTERIZACIÓN DE LOS DESECHOS 93
4.3.1 PORCENTAJE DE HUMEDAD 93
4.3.2 PODER CALÓRICO 95
4.3.3 ANÁLISIS DE IDENTIFICACIÓN DE COMPUESTOS 97
4.3.4 ACEITES Y GRASAS 99
4.3.5 PORCENTAJE DE CENIZAS 100
4.4 DISEÑO EXPERIMENTAL 102
4.5 PRUEBAS PILOTO 104
4.5.1 CARACTERIZACIÓN DE EMISIONES ATMOSFÉRICAS 104
4.5.2 ÁCIDO CLORHÍDRICO 108
4.5.3 CONTENIDO DE METALES EN CENIZAS 109
4.6 BALANCE DE MASA Y ENERGÍA 111
4.6.1 RESULTADOS DEL BALANCE DE MASA 111
4.6.2 RESULTADOS DEL BALANCE DE ENERGÍA 117
4.7 MENÚS ÓPTIMOS PARA EL PROCESO DE INCINERACIÓN 118

4.7.1 DATOS DEL CONTENIDO DE HUMEDAD Y PODER CALÓRICO PONDERADO DEL MENÚ DE CARGA 119
4.7.2 MENÚS DE INCINERACIÓN. 120
CAPÍTULO 5 122
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 122
5.1 CONCLUSIONES 122
5.2 RECOMENDACIONES 123
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 124
ANEXOS 135
ANEXO 1 136
Inventario de desechos peligrosos presentes en cada galpón de HAZWAT 136
ANEXO 2 145
Resultados de la cuantificación del Poder Calórico de los desechos seleccionados 145
ANEXO 3 152
Reportes del análisis de espectroscopia de infrarrojo con transformadas de Fourier 152
ANEXO 4 163
Datos obtenidos del diseño experimental 163
ANEXO 5 166
Toma de muestras de cloro 166
ANEXO 6 171
Informes de monitoreo de la emisión de gases en el incinerador de la prueba piloto 171
ANEXO 7 178
Informe de resultados del contenido de metales en cenizas 178
ANEXO 8 180
Cálculo de balance de masa y energía 180
ANEXO 9 203
Gráfica para la determinación del Cp para gases de combustión 203

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Horno rotatorio con cámara de postcombustión 16
Figura 2. Horno múltiple 18
Figura 3. Horno fijo de dos cámaras o de aire controlado 19
Figura 4. Tratamiento de depuración de gases de combustión de 24
Figura 5. Variación del PCI vs humedad en el residuo. 28
Figura 6. Triángulo de Tanner para la evaluación de la combustibilidad de los desechos 30
Figura 7. Incinerador PENNRAM 31
Figura 8. Diagrama de flujo del proceso de la disposición 43
Figura 9. *Diagrama de flujo del proceso de depuración de gases.* 45
Figura 10. Caldero de recuperación de calor 46
Figura 11. Inductor del sistema de lavador de gases 48
Figura 12. Esquema de funcionamiento Venturi 49
Figura 13. Depurador húmedo-Scrubber 50
Figura 14. Esquema de proceso para el tratamiento fisicoquímicos del agua residual de un sistema de tratamiento húmedo de gases de combustión. 52
Figura 15. Esquema de balance de masa y energía en un proceso de combustión 53
Figura 16. Descripción del balance de masa global 53
Figura 17. Descripción del balance de energía global 54
Figura 18. Ubicación de la Planta Cayambe HAZWAT 61
Figura 19. Recolección de plásticos, pastillas 65
Figura 20. Recipiente utilizado para la 65
Figura 21. Procedimiento realizado en el ensayo de aceites y grasas 71
Figura 22. Desechos en el área de combustión 76
Figura 23. Pesaje de desechos 77
Figura 24. Alimentación de carga al incinerador 77
Figura 25. Preparación de impingers 79
Figura 26. Monitoreo de gases 79
Figura 27. Pretratamiento de la muestra 82

Figura 28. Procedimiento para la digestión de sólidos 83
Figura 29. Proceso de absorción atómica 84
Figura 30. Datos obtenidos del ensayo de poder calórico del Aserrín 1 96
Figura 31. Clasificación del grupo funcional Poliamidas 98
Figura 32. Porcentaje de aceite y grasas contenida en el EPP..... 100
Figura 33. Promedio del porcentaje de cenizas de cada menú..... 102
Figura 34. Intervalos de ceniza vs. Recetas..... 103
Figura 35. Histograma de los 10 menús..... 104
Figura 36. Balance de masa del proceso de incineración. 115
Figura 37. Balance de energía del proceso de incineración..... 118
Figura 38. Datos obtenidos del ensayo de poder calórico del EPP 1..... 146
Figura 39. Datos obtenidos del ensayo de poder calórico del EPP 2..... 146
Figura 40. Datos obtenidos del ensayo de poder calórico del EPP 3..... 147
Figura 41. Datos obtenidos del ensayo de poder calórico de las Pastillas 1..... 147
Figura 42. Datos obtenidos del ensayo de poder calórico de las Pastillas 2..... 148
Figura 43. Datos obtenidos del ensayo de poder calórico de las Pastillas 3..... 148
Figura 44. Datos obtenidos del ensayo de poder calórico del Aserrín 2 149
Figura 45. Datos obtenidos del ensayo de poder calórico del Aserrín 3 149
Figura 46. Datos obtenidos del ensayo de poder calórico del Aceite 1 150
Figura 47. Datos obtenidos del ensayo de poder calórico del Aceite 2 150
Figura 48. Datos obtenidos del ensayo de poder calórico del Aceite 3 151
Figura 49. Clasificación de los grupos funcionales Alcanos y Alquenos 153
Figura 50. Clasificación del grupo funcional Poliéteres 153
Figura 51. Identificación del grupo funcional Carbo-ácidos..... 154
Figura 52. Clasificación del grupo funcional Nitratos..... 154
Figura 53. Clasificación del grupo funcional Poliéteres 155
Figura 54. Clasificación del grupo funcional Compuestos de Azufre..... 155
Figura 55. Clasificación del grupo funcional Amidas 156
Figura 56. Clasificación del grupo funcional Poliamidas 156
Figura 57. Clasificación del grupo funcional Carbo-Ácidos 157
Figura 58. Clasificación del grupo funcional Amidas y Poliamidas..... 157
Figura 59. Clasificación del grupo funcional Alcanos 158
Figura 60. Clasificación del grupo funcional Poliureas 158

Figura 61. Clasificación del grupo funcional Poliamidas 159
Figura 62. Correlación del análisis de la muestra Pastillas caducadas_1 vs. Pastillas caducadas_3..... 160
Figura 63. Correlación del análisis de la muestra Pastillas caducadas_2 vs. Pastillas caducadas_1..... 161
Figura 64. Correlación del análisis de la muestra Pastillas caducadas_2 vs. Pastillas caducadas_3..... 162
Figura 65. Guía de tomas de muestra de HCl..... 167
Figura 66. Informe del monitoreo realizado después del lavador de gases 172
Figura 67. Informe del monitoreo realizado de la chimenea con salida directa del incinerador..... 175
Figura 68. *Informe de contenido de metales en las cenizas* 179
Figura 69. Propiedades de gases de combustión a P=1atm..... 204

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. *Criterios aplicados para valorar el desempeño de las plantas de incineración.* 22
Tabla 2. *Concentración de gases de combustión después de la caldera (gas de combustión sin tratamiento en diversas plantas de incineración de residuos* 35
Tabla 3 *Clasificación de los desechos que ingresan a la planta de Tipo "0", "1", "2", "3", "4", que son susceptibles a la incineración, desarrollada por HAZWAT.* 39
Tabla 4. *Datos a obtenerse del monitoreo de emisiones a la atmósfera.* 57
Tabla 5. *Anexos del Listado 142* 58
Tabla 6. *Límites máximos permisibles para emisiones al aire para incineradores contaminante.* 59
Tabla 7 *Métodos usados a los desechos peligrosos para la incineración.* 66
Tabla 8 *Variaciones de porcentaje en peso de cada desecho dentro de las diferentes categorías.* 72
Tabla 9. *Menús propuestos, variando su composición porcentual de cada categoría.* 73
Tabla 10. *Procedimiento para la determinación de metales por absorción atómica en sólido (ceniza) por medio de flama, horno de grafito e hidruros.* 85
Tabla 11. *Desechos seleccionados para el menú de carga de incineración.* 90
Tabla 12. *Resultados del tamaño de muestra representativa de los desechos seleccionados para el menú de carga.* 92
Tabla 13. *Datos obtenidos del cálculo del porcentaje de humedad del análisis de laboratorio* 93
Tabla 14. *Contenido de humedad de cada uno de los desechos elegidos.* 94
Tabla 15. *Resultados obtenidos del ensayo de poder calórico.* 95
Tabla 16. *Contenido de poder calórico de cada uno de los desechos seleccionados.* 96
Tabla 17. *Clasificación de los grupos funcionales encontrados en el análisis FTIR de pastillas trituradas* 99

Tabla 18 *Datos obtenidos del análisis de porcentaje de cenizas de los 10 menús establecidas en las tres replicas realizadas*..... 101
Tabla 19. *Datos obtenidos en los monitoreos de los parámetros de la emisión de gases*..... 105
Tabla 20. *Comparación de los límites máximos permisibles con la Ordenanza Municipal 138 DQM.*..... 106
Tabla 21. *Comparación de los límites máximos permisibles con el Decreto 2008/98/CE Europeo.*..... 107
Tabla 22. *Comparación de los límites máximos permisibles con la Norma SEMARNAT NOM-098 mexicana.*..... 108
Tabla 23. Datos obtenidos del análisis de los cloruros totales en los gases de combustión..... 109
Tabla 24. *Comparación de los límites máximos permisibles para la extracción de metales pesados en base seca, con la Ordenanza Municipal 404 DQM.*..... 110
Tabla 25. *Resultados del flujo de C y H presente en el menú de carga seis.* 112
Tabla 26 Composición en fracción, porcentaje y flujo másico del menú de carga número seis..... 113
Tabla 27. *Determinación del promedio ponderado del menú del contenido de humedad y el poder calórico.* 119
Tabla 28. *Menú 6 propuesto para la alimentación del incinerador.* 120
Tabla 29. *Menú 7 propuesto para la alimentación del incinerador.* 121
Tabla A1.1 *Galpón de fármacos*..... 137
Tabla A1.2 *Galpón de pinturas y resinas* 138
Tabla A1.3 *Galpón de químicos* 140
Tabla A1.4 *Galpón de aceites y grasas*..... 141
Tabla A1.5 *Galpón de refinerías*..... 144
Tabla A4.1 *Menús propuestos para el diseño experimental.*..... 164
Tabla A8.1 *Contenido de carbono e hidrógeno presentes en los desechos de pastillas trituradas*. 181
Tabla A8.2 *Contenido de carbono e hidrógeno presentes en el desecho de EPP contaminado con hidrocarburos*..... 182

Tabla A8.3 *Contenido de carbono e hidrógeno presentes en desechos biopeligrosos.* 182
Tabla A8.4 *Contenido de carbono e hidrógeno presentes enla ropa*. 183
Tabla A8.5 *Contenido de carbono e hidrogeno presentes en el aceite contaminado, resina epóxica, aserrín y plástico.*..... 183

SIGLAS Y SIMBOLOGÍA

AAN: Autoridad Ambiental Nacional

AM: Acuerdo Ministerial

ASTM: Sociedad Americana para Pruebas y Materiales

CCS: Cámara de Combustión Secundaria

CH_4: Metano

CICAM: Centro de investigación y Control Ambiental

CO: Monóxido de carbono

COT: Compuestos orgánicos totales

CO_2: Dióxido de carbono

CRETIB: Corrosivo, Reactivo, Explosivo, Tóxico, Infeccioso y Biológico

cSt: centistokes

DQM: Distrito Metropolitano de Quito

EPA: Agencia para la Protección Ambiental

EPP: Equipo de Protección Personal

ERAS: Estaciones de Remediación Ambiental

INEN: Instituto Ecuatoriano de Normalización

INEC: Instituto Nacional de Estadística y Censos

LAI: Laboratorio de Análisis Instrumental de la Escuela Politécnica Nacional

LDIA: Laboratorio Docente de Ingeniería Ambiental de la Escuela Politécnica Nacional

LOU: Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Escuela Politécnica Nacional

LPQ: Laboratorio de Procesos Químicos de la Escuela Politécnica Nacional

MAATE: Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica

MP: Material particulado

NO_X: Óxidos de nitrógeno

NTE: Norma Técnica Ecuatoriana

OM: Ordenanza Municipal

OMS: Organización Mundial de la Salud

PCS: Poder calórico superior

PCI: Poder calórico inferior

RDF: Combustible derivado de residuos

SO_2: Dióxido de azufre

TULSMA: Texto Unificado de Legislación Secundaria del Ministerio del Ambiente.

GLOSARIO DE TÉRMINOS

Almacenamiento: labor de acopiar temporalmente residuos en tanto se procesan para su aprovechamiento, se transfiere al servicio de recolección o se dispone de ellos (Echanique et al., 2006).

Bulk tanks: es un recipiente con forma cúbica con una rejilla rígida de acero tubular por fuera de la estructura en forma de soporte. Se utiliza para el transporte y el almacenamiento de líquidos o material a granel (Precision IBC, 2017).

Calidad ambiental: agrupación de características ambientales y naturales, incluidos el aire, el agua, el suelo y la biodiversidad, relacionada con la presencia o ausencia de sustancias nocivas que pueden afectar el mantenimiento y la regeneración de los ciclos de vida naturales, la estructura, la función y los procesos evolutivos (MAE, 2015).

Caracterización de los residuos: proceso para una comprensión integral de las propiedades estadísticamente confiables de los residuos, incluido el muestreo y la determinación de los componentes fisicoquímicos, biológicos y microbiológicos. Los datos de caracterización generalmente se refieren a mediciones de campo y determinaciones de laboratorio que arrojan concentraciones de contaminantes, masa por unidad de tiempo y masa por unidad de producto (Echanique et al., 2006).

Contaminación: presencia de uno o más contaminantes, o una combinación de ellos, en el ambiente en concentraciones y persistencia suficientes para causar condiciones adversas para la vida, la salud y el bienestar humano, la flora, la fauna y los ecosistemas, o para causar una degradación significativa de los hábitats biológicos. aire, agua, suelo, paisaje o recursos naturales (MAE, 2015).

Control: gama de actividades realizadas por la autoridad ambiental, encaminadas a garantizar la gestión técnica de los desechos peligrosos (Echanique et al., 2006).

Desecho: sustancias (sólidas, semisólidas, gaseosas o líquidas), o materiales compuestos resultantes de procesos de producción, transformación, reciclaje, uso o consumo, cuya destrucción o disposición final se realice de conformidad con lo dispuesto en la legislación ambiental nacional e internacional vigente (MAE, 2015).

Disposición final: es la etapa final de la gestión de desechos y/o residuos sólidos, peligrosos y especiales donde se disponen de forma definitiva y sanitaria mediante procesos de segregación y contención previa, en un lugar específicamente elegido y diseñado para evitar la contaminación, daño o riesgo para la salud humana o el ambiente. La disposición final se realizará luego de excluir técnicamente todo tipo de tratamiento, tanto dentro como fuera del Ecuador (MAE, 2015).

Envases: el recipiente que tiene almacenado el producto (Echanique et al., 2006).

Etiqueta: es cualquier expresión escrita, no gráfica, que está directamente impresa o grabada en el envase y empaque de un producto para exhibición comercial e identificación (Echanique et al., 2006).

Extracto PECT: El lixiviado a partir del cual se determinan los constituyentes tóxicos del desecho y su concentración con la finalidad de identificar si éste es peligroso por su toxicidad al ambiente (MAATE, 2015).

Generación: cantidad de desechos de una fuente determinada en un intervalo de tiempo dado (Echanique et al., 2006).

Gestión Integral: Conjunto de procesos como: la recogida, almacenamiento, transporte, reciclado y tratamiento, eliminación de desechos, incluidas las actividades de control, lugar de almacenamiento y eliminación (Echanique et al., 2006).

Gestor de residuos y/o desechos: persona natural o jurídica, de derecho público o privado, registrada para disponer total o parcialmente de los desechos sólidos no

peligrosos o desechos peligrosos especiales, sin causar perjuicios a la salud humana o al medio ambiente (MAE, 2015).

Manejo: gestión de procesos en: recolección, empaque, etiquetado, almacenamiento, reutilización, reciclaje, transporte, manejo y disposición final (Echanique et al., 2006).

Metales alcalinotérreos: pertenecen al Grupo II A de la tabla periódica, así: Berilio (Be), Estroncio (Sr), Magnesio (Mg), Calcio (Ca) y Bario (Ba). Son metales blandos no ferrosos de baja densidad. Reaccionan fácilmente con halógenos para conformar sales iónicas (Reymond, 2006).

Pasivo ambiental: es el daño ambiental y/o impacto ambiental negativo causado por una obra, proyecto o actividad productiva o económica que no ha sido reparada, restaurada o intervenida previamente de manera inadecuada o incompleta, y que persiste en el ambiente, donde sus componentes constituyen un riesgo. En términos generales, el pasivo ambiental está asociada con las fuentes de contaminación y aumenta con el tiempo (MAE, 2015).

Residuos: se refiere a un objeto, sustancia o elemento que se puede reutilizar o reciclar (Echanique et al., 2006).

Residuos peligrosos: son aquellos desechos líquidos, sólidos, pastosos o gaseosos, generados en cualquier proceso de fabricación, transformación, reciclaje, uso o consumo y que contienen sustancias reactivas, inflamables, corrosivas, infecciosas o tóxicas que representan un riesgo para el ser humano, la salud, los recursos naturales y el ambiente (Echanique et al., 2006).

RESUMEN

El objetivo fundamental de este proyecto de investigación es elaborar menús de carga para la disposición final de desechos peligrosos en la empresa HAZWAT, mediante el proceso térmico de incineración; para lo cual, se consideró el inventario existente sobre la disponibilidad de desechos peligrosos en la planta, tomando en cuenta su tiempo de almacenamiento y suministro.

Para la determinación de los menús de carga se partió de la elección de los desechos con los que se iba a trabajar. Tomando en cuenta sus características químicas, físicas y biológicas, al igual que el volumen de ingreso de desechos y su tiempo de estancia en la planta. De manera que, mediante un muestreo aleatorio, se obtuvo una muestra representativa de 5 a 7 kg aproximadamente, para cada uno de los desechos.

En los ensayos de laboratorio se realizaron los análisis dependiendo los datos que se necesitaba de cada uno de los desechos. Dentro de estos ensayos se efectuó la determinación de contenido de humedad mediante el método (ASTM C566-97), el poder calórico (ASTM D5865-10a), porcentaje de aceites y grasas (ASTM D 5369-93) y el análisis espectroscópico (ASHTO T302). A través de los datos obtenidos se determinó 10 menús con diferente composición porcentual, tanto en su contenido de tipo de desechos y energía proporcionada. Los menús fueron sometidos a una simulación de incineración utilizando una mufla, llegando a una temperatura máxima de 900 ºC, con el fin de determinar el porcentaje de cenizas producido en la incineración.

Para contrastar los resultados obtenidos en la cuantificación del porcentaje de ceniza, se realizó una prueba piloto en la planta HAZWAT, seleccionando la mezcla del menú 6 que obtuvo el menor porcentaje de cenizas con un valor de 5,19 %, y así verificar la eficiencia de producción de ceniza real. Simultáneamente a este proceso se efectuó el monitoreo de emisiones de gases de combustión antes y después del lavador de gases, los resultados fueron comparados con la OM-138 DMQ, el primer punto de muestreo después del lavador de gases cumplió con la

normativa en todos los parámetros; sin embargo, el segundo punto antes del lavador de gases sobrepasaba exorbitantemente el límite máximo permisible en las emisiones de CO con un valor de 2 386 mg/Nm^3. Además, se efectuó el análisis de contenido de metales en la cenizas producto de la incineración de dicha mezcla para conocer su composición, la cual se comparó con la OM 404 DMQ, incumpliendo en el zinc con una concentración de 3 713 mg/kg.

Se determinó los menús de carga óptimos para incinerar de desechos peligrosos los cuales están compuestos por: EPP contaminado con hidrocarburos 0,7 a 0,8 %, envases plásticos 2,0 a 2,5 %, aserrín 8,5 a 9,0 %, aceite contaminado 69,0 a 71,0 %, pastillas trituradas 5,2 a 5,5 %, biopeligrosos 5,0 a 8,0 %, resina epóxica 4,0 a 5,0 % y ropa 1,5 a 2,0 %, los cuales tienen un poder calórico de aproximadamente 8 611,33 kcal/kg.

Finalmente, se determinó la eficiencia de generación de ceniza del incinerador al utilizar el menú de carga propuesto, la cual alcanzo un 95 %, demostrando que este es óptimo y viable económicamente, al disminuir el consumo de combustible auxiliar y la producción de contaminantes al ambiente.

ABSTRACT

The main objective of this research project is to develop a loading menu for the treatment of hazardous waste by thermal incineration in the HAZWAT company. The availability lists of existing hazardous waste in the plant are considered in terms of useful life and availability.

The starting point for determining the load menu is to select the waste to be processed. Consider its chemical, physical and biological properties, as well as the amount of waste input and its residence time in the facility. A representative sample of approximately 5 to 7 kg was obtained for each residue by random sampling.

In laboratory tests, the analysis is based on the data required for each type of waste. In these tests, moisture content was determined using methods (ASTM C566-97), heat content (ASTM D5865-10a), percentage of oil (ASTM D 5369-93), and spectral analysis (ASHTO T302). From the data obtained, 10 menus were identified with different percentages, including type of waste content and energy provided. Use a muffle furnace to simulate the combustion of the menu up to 900 ºC. How to determine the percentage of ash produced during combustion.

To compare the results obtained with the ash quantification, a pilot test was carried out at the HAZWAT plant, selecting the Menu 6 mixture that yielded a minimum ash content of 5,19 %, thus validating the efficiency of true ash production. Parallel to this process, the monitoring of atmospheric emissions was carried out before and after the scrubber and the results were compared with the DMQ OM-138, all the parameters were fulfilled in the first sampling point and all the parameters were fulfilled in the second. sampling point. In contrast, the value of 2 386 mg/Nm3 exceeds the maximum permissible limit for CO emissions. In addition, the metal content of the incineration ash product of this mixture was analyzed to understand its composition and compared to OM 404 DMQ, excluding zinc at a concentration of 3 713 mg/kg.

The optimal feeding menu for the incineration of hazardous waste was identified, including: EPP contaminated with hydrocarbons 0,7 to 0.8 %, plastic containers 2,0 to 2,5 %, sawdust 8,5 to9,0 %, contaminated oil 69,0 to 71,0 %, rubble 5,2 to 5,5 %, biohazard 5,0 to 8,0 %, epoxy 4,0 to 5,0%, garment 1,5 to 2,0 %, its calorific value is about 8 611,33 (kcal/kg).

Finally, the ash generation efficiency of the incinerator was determined using the suggested load menu, reaching 95 %, which indicates that it is optimal and economically feasible by reducing the consumption of auxiliary fuel and the production of pollutants to the environment.

CAPÍTULO 1
INTRODUCCIÓN

1.1 ANTECEDENTES

La gestión de desechos constituye un problema a nivel global; factores como el rápido crecimiento poblacional, la alta concentración demográfica en grandes ciudades, el desarrollo económico, las operaciones ineficientes del sector industrial y/o comercial, la mejora de los niveles de vida, etc., aumentan la generación de desechos en las ciudades y comunidades (Sáez & Urdaneta, 2014).

Además, la gran mayoría de procesos industriales y de consumo generan desechos peligrosos que son arrojados al ambiente tales como: metales pesados, hidrocarburos, plaguicidas, etc.; de esta forma afectando a factores bióticos y abióticos (Suárez, 2000). Ya que la mayoría de estos desechos no pueden ser degradados fácilmente y tienen un tiempo de descomposición muy largo (Valdovinos, 2010), en consecuencia la mala gestión de desechos peligrosos genera perjuicios a la salud de la población, afectación a la calidad de vida y al ambiente (Moreno, 2011).

En el Ecuador se generan 24 948 951,51 ton/año de desechos peligrosos líquidos, así como 917 622,54 ton/año de desechos peligrosos sólidos, provenientes de la industria manufacturera, minas, construcción, comercio transporte, almacenamiento, entre otras (INEC, 2020). Hay que tomar en cuenta, que Colombia siendo un país vecino produce anualmente alrededor de 400 000 ton/año de desechos peligrosos sólidos procedentes de los procesos industriales, hospitales, centros de salud, industria farmacéutica y textil (Artunduaga et al., 2015).

Considerando los datos mencionados anteriormente, no hay que dejar de lado los impactos negativos que se produce en la salud de las personas y el ambiente por la mala manipulación de desechos y sustancias tóxicas en su

disposición final. Dado que, en el 2012 en el estudio realizado por la Organización Mundial de la Salud (OMS), se considera que 12,6 millones de personas perdieron la vida por la exposición a riesgos ambientales en el planeta, por vivir o trabajar en un ambiente insalubre o estar expuesto a productos químicos (OMS, 2016a).

En nuestro país, se realiza la gestión de los desechos peligrosos mediante un gestor autorizado, el cual se encarga de todos los tratamientos para la disposición final que se les da a los mismos, puede llevarse desechos que se encuentren definidos en las actividades de su licencia ambiental de acuerdo con lo constituido en el Reglamento del Código Orgánico del Ambiente (MAATE, 2019), el cobro de la prestación de los servicios varía de acuerdo con el gestor proponente y la cantidad de desechos que se envía, de manera que la gestión de desechos peligrosos se vincula a la acogida de convenios internacionales para el manejo integral de sustancias y desechos peligrosos, emitidas por el Ministerio de Ambiente, Agua y Transición Ecológica (MAATE).

Uno de los procesos de disposición final que se ofrece a los desechos peligrosos es la incineración, la misma que se ha venido utilizando a nivel mundial desde décadas atrás con el fin de eliminar restos patológicos o sustancias tóxicas (Rosas et al., 2009). Los principales gestores autorizados dentro del país, para el manejo de desechos peligrosos que se encargan de la disposición final, por medio de la incineración son: Incinerox, Gadere, G&M, Ecuambiente y HAZWAT, las mismas que disponen con una Licencia Ambiental para la regularización de esta actividad (MAE, 2016).

En este contexto, HAZWAT es uno de los principales gestores ambientales autorizados, inició sus operaciones a partir del año 2003, cuenta con dos plantas industriales, una ubicada en Cayambe y la otra en Lago Agrio, ofrece un servicio de gestión integral, siendo su principal actividad la incineración. Cubre los sectores industriales como: petrolero, alimenticio, farmacéutico, hospitalario, floricultor, etc., teniendo una capacidad anual de aproximadamente 5 362,22 ton/año. Uno de sus problemas es reducción de las cenizas y el consumo de combustible (HAZWAT, 2017).

1.2 JUSTIFICACIÓN

La disposición final de desechos peligrosos mediante la incineración constituye una forma factible para la destrucción de elementos que pueden llegar a ocasionar grandes afectaciones a la salud y al ambiente. En la incineración se destruyen los compuestos orgánicos quemándolos a altas temperaturas, oxidando la materia orgánica para formar dióxido de carbono, agua y otros subproductos de la reacción (cenizas o escorias resultantes del material no combustible). De esta forma, todos los desechos peligrosos pierden sus características químicas, físicas y biológicas que en un principio amenazaban a la salud de seres vivos y el ambiente (Martínez, 2005).

Es importante recalcar, que gracias a la incineración se reduce del 70 al 90 % en masa y volumen de los desechos dependiendo de su composición (Kanhar et al., 2020). En ese sentido es fundamental que desde un inicio en el proceso de incineración se pueda garantizar la reducción de volumen de desechos y a su vez, rebajar los niveles de contaminantes en las emisiones de gases (CO_2, SO_2, NO_x, entre otros), así como la ceniza. Esta situación se puede lograr escogiendo los tipos de desechos que serán alimentados a la incineradora (Hernández, 2010).

Para la elección de incineración, como sistema de tratamiento de desechos peligrosos se debe tomar en cuenta las características de los desechos, por ejemplo su porción orgánica, considerando la presencia de elementos como el azufre (S); fósforo (P); cloro (Cl) que pueden producir compuestos tóxicos (Rodríguez & Irabien, 2013), de igual modo, que los desechos sean semejantes entre los mismos, estén libres de metales pesados, el contenido de humedad y el poder calórico. De ese modo, se asegura que el menú de carga (mezcla de los desechos seleccionados que serán alimentados al incinerador) sea apto de entrar a un proceso de incineración (Hernández, 2010).

Las mezclas a partir del menú de carga de incineración resultarán de gran ayuda para la disposición final de desechos peligrosos producidos principalmente en los sectores industrial, petrolero, farmacéutico, hospitalario, entre otros, para una

óptima gestión en HAZWAT. Este proyecto resultará una herramienta eficiente y adaptable que asegurará bajos costos de operación, funcionamiento y un menú de carga de fácil aplicabilidad, además de que sus emisiones atmosféricas tendrán bajas concentraciones de contaminantes.

1.3 ALCANCE

El proyecto de titulación tiene la finalidad de elaborar dos menús de carga con los diferentes desechos peligrosos que llegan a la empresa HAZWAT, estableciendo una composición porcentual específica que mejore el proceso de incineración y así se disminuya las concentraciones de emisiones atmosféricas, la generación de cenizas y el consumo de combustible.

El proyecto se enfocó en la identificación y realización de un inventario de los diferentes desechos presentes en la empresa, luego, se determinó los desechos que se encontraban en mayor porcentaje, para considerarlos en la mezcla de incineración, tomando en cuenta que su composición química tenga concentraciones bajas de cloro y metales, sea una mezcla homogénea, evitando que se formen dioxinas en el proceso de incineración. Así pues, se procedió a realizar los ensayos de laboratorio para conocer las características intrínsecas de los desechos seleccionados, como: poder calórico, humedad, contenido de aceites y grasas, análisis espectroscópico y contenido de cenizas, dependiendo el requerimiento de cada uno de los desechos.

A partir de los datos obtenidos de los análisis de laboratorio, se estableció un menú de carga para realizar una prueba piloto dentro de la empresa, donde se monitoreó las emisiones atmosféricas de los siguientes parámetros: NO_x, SO_2, CO, CO_2, HCl y MP emitida por el incinerador antes y después del lavador de gases; combustible utilizado, la producción de ceniza y su contenido de metales.

Este proyecto ayudará a mejorar el proceso de incineración dentro de la Planta Cayambe de HAZWAT, utilizando los principales desechos peligrosos, que se generan en mayor cantidad en nuestro país y los que han permanecido durante

varios años en la empresa (INEC, 2020). Con todo lo expuesto anteriormente la empresa deberá instaurar distintos menús de carga tomando como referencia los porcentajes de contenido de humedad, poder calórico, composición química y física establecidos en los menús de carga presentados, los cuales servirán como una guía para ser replicados con los diferentes desechos que llegan a la planta.

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 OBJETIVO GENERAL

Elaborar menús de desechos peligrosos para obtener mezclas eficientes en el proceso de incineración, de diferentes desechos tóxicos y peligrosos.

1.4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Identificar los desechos peligrosos en la empresa HAZWAT para definir el menú de incineración con el cual se trabajará por medio la inspección in situ en los diferentes galpones de esta.

- Analizar y/o determinar analíticamente el contenido de humedad, sólidos volátiles, el poder calórico de cada desecho a través de ensayos de laboratorio con un diseño experimental definido, para determinar porcentajes que permitan hacer diferentes mezclas en base a las categorías del menú propuesto.

- Realizar los balances de masa y energía en el proceso de incineración para determinar el porcentaje de salidas de: emisiones atmosféricas, cenizas y escorias.

- Definir las mezclas de incineración para lograr una mayor eficiencia dentro del incinerador.

- Realizar pruebas piloto de incinerador.

1.5 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El tratamiento de los desechos en América Latina y el Caribe ha permanecido bajo el esquema de “recolección y disposición final” sin darle un tratamiento adecuado a los mismos, haciendo que cada vez se necesite mayor cantidad de espacios idóneos para poder depositarlos, los desechos per cápita siguen aumentando en estos países, para el año 2050 se tiene una expectativa de desechos producidos de 671 000 ton/día (Green Economy, 2017; Sáez & Urdaneta, 2014).

La gestión de desechos sólidos y en especial de los desechos peligrosos es aun de mayor cuidado, por su gran impacto negativo al ambiente. En Quito se producen 2 000 ton/día de desechos domiciliarios, el 1,19 % corresponden a desechos peligrosos entre los cuales están: medicamentos caducados, electrodomésticos, tecnología, pilas o baterías, focos fluorescentes, espray, entre otros, que no llegan a tener ningún tipo de tratamiento específico para eliminar su toxicidad, ocupando un espacio considerable de los rellenos sanitarios (Jácome, 2017).

Ahora bien, considerando el parque industrial en el Ecuador, según el INEC (2018), 13 998 empresas pertenecientes al sector manufacturero, minero, de construcción, comercio, transporte, etc., el 73,4 % no poseía ningún tipo de permiso ambiental. Por ende, al no ser controlados por un ente autorizado, dejan de lado su responsabilidad ambiental y no manejan de forma adecuada los desechos que se producen generando así una contaminación ambiental con mayor impacto.

Dentro de la categoría de desecho peligroso, también tienen una gran importancia los desechos resultantes de las atenciones médicas y sus servicios, como son: objetos cortopunzantes, químicos peligrosos, anatomopatológicos, etc. A nivel nacional se producen alrededor de 14 877.95 ton/año de estos desechos biopeligrosos, de los cuales el 20,43 % son gestionados mediante la incineración,

asegurando así, la eliminación de la carga viral que estos contienen (Cando et al., 2018).

Un ejemplo puntual de la utilización de la incineración como una técnica viable para la reducción de desechos es Singapur, el cual incinera el 57 % de residuos domiciliarios y un 43 % de desechos industriales, ya que afirman, que es un tecnología que resulta conveniente para reducir el volumen de desechos hasta en un 10% de su peso inicial (BCN, 2013). Sin embargo, se debe considerar que este tratamiento, también tiene grandes limitaciones al momento de reducir por completo los contaminantes existentes en los desechos, ya que estos son emitidos a la atmósfera a través de los gases de combustión y en las cenizas que se generan del proceso, necesitando así una inversión extra para su depuración y tratamiento final (Hernández, 2010).

El empleo de menús de carga de desechos en el proceso de incineración consiste en una elección acertada de los mismos, tomando en cuenta principalmente su composición química, contenido de humedad y poder calórico; es crucial considerar estos aspectos para asegurar un menor costo operacional debido a que se disminuye la cantidad de combustible auxiliar utilizado, se mantiene la temperatura necesaria entre 850 a 1 200 ºC para eliminar contaminantes como dioxinas y furanos, hay una mayor reducción en el volumen de los desechos y se reduce los contaminantes de las emisiones de gases debido a que se crea un ambiente factible para aproximarse una combustión completa (Hernández, 2010).

Lamentablemente en nuestro país el control de procesos térmicos no es monitoreado de forma continua para que exista una mejora en este ámbito. Con el fin de dar una solución a esta problemática dentro de la empresa HAZWAT, se busca la implementación de menús de carga para dar tratamiento de incineración a los desechos peligrosos, siendo esta, una herramienta clave para la reducción de costos operacionales y ambientales.

CAPÍTULO 2
MARCO TEÓRICO

2.1 DESECHOS PELIGROSOS

Según el MAATE, mediante el Acuerdo Ministerial 061 se define como desechos peligrosos al material sólido, líquido, pastoso o gaseoso que son procedentes de un proceso de transformación, extracción, producción, beneficio, reciclaje, uso o consumo el cual presente una o diferentes características peligrosas, las cuales pueden generar un riesgo para la salud humana y la calidad ambiente mediante las condiciones legales y los cuales han sido establecidos en los listados nacionales de desechos peligrosos (MAATE, 2015).

CARACTERISTICAS CRETIB

El acrónimo de clasificación CRETIB sirve para identificar las principales características que contiene un desecho peligroso, se representan por siglas de la siguiente manera:

- **(C) Corrosivo**: Es un elemento que puede estar en estado sólido o líquido. A un desecho se lo considera como corrosivo en estado líquido no acuoso si presenta un pH inferior o igual a 2; o superior o igual a 12,5. A su vez, es un sólido que al mezclarse con agua destilada indica un pH menor o igual a 2 o mayor o igual a 12,5 (Cabrera, 2011).

- **(R) Reactivo:** un desecho se considera reactivo si en una muestra estando en estado físico ya sea líquido o sólido al ponerse en contacto con aire se inflama en un tiempo menor a 5 min, sin ningún tipo de ignición. Y al tener contacto con agua reacciona espontáneamente generando gases inflamables (Cabrera, 2011).

- **(E) Explosivo:** Toda sustancia que por alguna causa externa puede reaccionar de forma exotérmica. Está característica debe ser fundamentada por el origen del residuo y su constante de explosividad. Por otro lado, si el desecho se expone a una fuente de energía o calentado en confinamiento este puede ocasionar una reacción o descomposición detonante o explosiva (MAATE, 2015).

- **(T) Tóxico:** Un desecho puede considerarse como tóxico, al poseer alguno de los contaminantes en concentraciones superiores a los límites máximos permisibles, la determinación de estas concentraciones se realizan mediante una prueba de lixiviación de desechos determinando el extracto PECT (MAATE, 2015).

- **(I) Inflamable:** Un desecho puede ser considerado inflamable si tiene una de las siguientes peculiaridades (Cabrera, 2011):

  - Esté en estado líquido y posea un punto de ignición inferior a 60 ºC, establecido conforme la norma NTE INEN 1047, sin tomar en cuenta las soluciones acuosas con menos de 24 % de alcohol en volumen.

  - Que no se encuentre en estado líquido y sea capaz de provocar absorción de humedad, fuego por fricción o por alteraciones químicas espontáneas generando una quema fuerte y permanente, dificultando la extinción del fuego.

  - Una sustancia que sea definida como un oxidante que puede liberar oxígeno y; como resultado, estimular la combustión e incrementar el grado de magnitud de fuego en otro material.

- **(B) Biológico-Infeccioso:** Un desecho presenta un riesgo cuando contiene agentes biológico-infecciosos o son aquellos materiales que han resultado de una atención médica los cuales contengan patógenos en cantidad o

concentraciones nocivas para la salud y el ambiente, causando enfermedades (MAATE, 2015).

2.2 DISPOSICIÓN FINAL DE LOS DESECHOS PELIGROSOS

La disposición final que se les da a los desechos peligrosos tiene por objetivo recluir, aislar y confinar de manera permanente los desechos, los mismos que deben ser previamente tratados, para minimizar que cualquier constituyente tóxico entre al ambiente, de manera que, estas formas de tratamiento pueden ser individuales para un solo tipo de desecho o colectivas que son diseñadas para el manejo múltiple de desechos (Martínez et al., 2005), entre las más destacadas tenemos:

2.2.1 RECICLAJE DE MATERIALES

El reciclaje tiene como objetivo impulsar la recuperación de materiales para convertirlos en nuevos productos en un ámbito de eficiencia ambiental y económica, ya que, con ayuda del reciclaje de materiales posiblemente útiles se llega a rebajar el consumo de energía y materia prima. A su vez, disminuye la contaminación del aire producida en la incineración (Martínez et al., 2005).

Entonces, para favorecer el reciclaje, resulta clave ejecutar una oportuna separación de desechos en la fuente, puesto que esto facilita gestionarlos de forma conveniente desde un punto de vista ambiental y sanitario. Por ende, los materiales que pueden ser reciclados son muchos, como: la chatarra, el papel, fundas, cartón, el vidrio, los metales, los envases plásticos, textiles, maderas, equipos electrónicos, etc., (Martínez et al., 2005).

En el caso de la empresa HAZWAT, se debería considerar reciclar gran variedad de productos que son incinerados por pedido del cliente que contrata el servicio de destrucción de marca. Viéndolo desde un ámbito económico, las empresas realizan esto por la baja de inventario, evitándose pagar más costos por tener mercadería guardada (Fundación EROSKI, 2010).

No obstante, si se enfoca en el ámbito ambiental, es ilógico destruir materiales que están en perfecto estado como: ropa, joyería, aparatos electrónicos, utensilios de cocina, entre otros. Los cuales podrían ser reciclados desde la empresa de donde provienen los artículos, de esta forma generando ganancias y dando una segunda oportunidad a estos objetos. Por otra parte también se puede donar los artículos a organizaciones sin fines de lucro para que sean aprovechados (Fundación EROSKI, 2010).

2.2.2 BIORREMEDIACIÓN

La biorremediación es un método de tratamiento basado en la degradación de ciertos contaminantes y compuestos orgánicos, donde implica el uso de las propiedades químicas físicas y biológicas naturales del suelo con ayuda de organismos como bacterias, protozoarios, hongos o plantas. Este tipo de tratamientos pueden ser facultativos, aerobios o anaerobios, dependiendo las características en el cual se encuentren los desechos (Martínez et al., 2005).

Este tratamiento es muy limitado para ser utilizado en desechos peligrosos, ya que por su alto contenido de toxicidad afectan a los microrganismos que son sensibles a sustancias tóxicas. Con respecto a las condiciones que se debe cumplir en un proceso de biorremediación las principales son: que el compuesto contaminado aporte alimento y energía a los microorganismos garantizando su reproducción, cantidades suficientes de oxígeno, agua, carbono y nutrientes para apoyar al crecimiento microbiano, temperatura cálida y control de pH neutro del medio. La degradación de contaminantes orgánicos varía según la composición química del desecho y la especie microbiana que se utilice, por lo que es importante que los microorganismos tengan la capacidad de aclimatarse al medio dónde van a ser expuestos (Waste 2 Water, 2020).

2.2.3 INACTIVACIÓN POR AUTOCLAVE

Este tratamiento conlleva la inactivación de la carga viral por medio de un proceso de esterilización de los desechos biológico infeccioso o hospitalarios, a

través del empleo de altas temperaturas (121 ºC) y presión (29,82 psi), en un tiempo determinado (30 min). Para este tratamiento se utiliza el equipo de autoclave, que permite la eliminación parcial de los agentes infecciosos, considerando que la esterilidad no se puede obtener de manera absoluta (Méndez, 2014).

La empresa HAZWAT recibe gran cantidad de desechos hospitalarios, por motivo de la crisis sanitaria que se originó por la pandemia del COVID-19. Los desechos son almacenados y recolectados en *bulk tanks*, los cuales entran a un proceso de esterilización cuando el incinerador se encuentra en mantenimiento, para así evitar que cualquier patología pueda repercutir la salud de las personas que trabajan con estos desechos (PTT, 2021).

En el proceso de autoclave, la cámara se alimenta con 4 coches de 110 kg de desechos biopeligrosos seleccionando un ciclo preexistente que permanece de 15 a 30 minutos, a una temperatura de 145 ºC y presión de 60 psi. El esterilizador posee un mecanismo automático de seguridad de cerrado, el cual se activa cuando inicia el ciclo. El proceso termina cuando la temperatura de la cámara descienda hasta un valor seguro y que la aguja del manómetro indique cero. Para finalizar se deja enfriar la carga de desechos, para su remoción y disposición final mediante el proceso térmico (PTT, 2021).

2.2.4 INCINERACIÓN

El proceso de incineración ayuda al tratamiento de desechos peligrosos usando cualquier tipo de horno que implique un proceso de combustión a altas temperaturas. Al ser un proceso complicado, debe ser cuidadosamente diseñado y operado, por lo tanto, se necesita una gran inversión en la implementación, mantenimiento y operación, tal como personal calificado, en un estudio de plantas de incineración en Europa se estableció que esta inversión inicial es de aproximadamente 1 777,93 millones de euros lo que es igual a 1 868,92 millones de dólares (Greenpeace, 2009). Este tratamiento se describe de mejor manera y de forma más amplia en la sección 2.3 del presente trabajo, dónde se detalla tos diferentes tipos de hornos y los procesos de combustión que se producen.

2.2.5 CELDA DE SEGURIDAD Y ESTABILIZACIÓN

Las celdas o rellenos de seguridad tienen el propósito de acondicionar y confinar desechos, como un procedimiento de disposición final. Por otro lado, la celda debe contar con criterios de compatibilidad de desechos dependiendo la estructura de la celda, además contará con planes de contingencia, un registro de control de ingreso de desechos y una apreciación de su funcionamiento. Este tratamiento tiene como objetivo, reducir los contaminantes químicos dentro del desecho y a su vez el área superficial que ocupará en la celda de seguridad es utilizado para la ceniza resultante de la incineración, escorias, baterías, focos, lámparas fluorescentes, pilas, lodos con metales pesados, vidrios, entre otros. El encapsulamiento considera los siguientes subprocesos (Martínez et al., 2005).

- **Estabilización:** se lo realiza a través de la agregación de aglomerantes de tipo inorgánico y compuestos químicos que disminuyen la actividad química del desecho, para ser de fácil manejo, reduciendo el riesgo.

- **Encapsulamiento:** radica en combinar, homogenizar, amalgamar, modelar y conformar bloques con aglomerados que actúan como un sistema de sellado de desechos que se funden en la celda de seguridad para evitar los lixiviados.

2.3 INCINERACIÓN DE DESECHOS PELIGROSOS

Dentro de los instrumentos para la disposición final de los desechos peligrosos se encuentra la incineración, ya que es una técnica que puede tratar una gran variedad de desechos que son producidos dentro de una sociedad (Camacho et al., 2011). A su vez, la incineración es utilizada principalmente para aminorar el volumen y masa de los desechos entre un 70 al 90 % generalmente, mientras que, en incineradores modernos, la reducción se encuentra entre un 95 y un 96 %, según la composición de los desechos (Kanhar et al., 2020; LaGrega et al., 2000). Además este tratamiento térmico, mejora la disponibilidad de espacios en vertederos,

garantizando así la reducción de su peligrosidad ante la salud de los seres vivos y el ambiente (Martínez et al., 2005).

En el proceso de incineración, se considera que los desechos son totalmente heterogéneos, muchos de ellos con alto poderes calóricos como: residuos líquidos de hidrocarburos (8 192 kcal/kg), residuos plásticos (7 834 kcal/kg), entre otros, que ayudarán a alcanzar una temperatura de ignición adecuada, puesto que, al combinarse con el oxígeno existente en la cámara, liberarán la energía necesaria para una combustión autoalimentada, de esta forma el uso de combustibles auxiliares es casi imprescindible. Además, la energía de combustión se manifiesta en forma de calor que puede ser aprovechada para recuperar el contenido energético de los desechos mediante la generación de vapor o energía eléctrica (Camacho et al., 2011).

La aplicación de incineración puede ser aplicada para los siguientes subsectores (Camacho et al., 2011):

- **Incineración de residuos urbanos mixtos:** Generalmente trabajan con residuos domésticos mixtos casi siempre sin tratarlos, sin embargo, en ciertas circunstancias puede incluirse restos industriales o comerciales.

- **Incineración de residuos urbanos y otros residuos pretratados:** En esta, se gestionan residuos ya clasificados de algún modo, de esta forma se diferencian de los residuos mixtos. Dentro de esta categoría se incluye la fracción de residuos que no pueden ser reciclados.

- **Incineración de desechos peligrosos:** Son los desechos generados en plantas industriales y comerciales que se producen al tratar su materia prima para convertirla en productos y estos al no ser vendidos pasan a ser destruidos para la protección de la marca.

- **Incineración de desechos clínicos:** Dentro de la gestión final hay instalaciones específicas para el tratamiento de estos mediante la

incineración. Pero, también hay instalaciones que trata los mismos junto con residuos urbanos o desechos peligrosos. En Ecuador de los 14 877 953 kg de desechos sanitarios producidos en el 2018, remitidos por el 96,52 % de los establecimientos de salud, el 20,43 % son incinerados (Cando et al., 2018).

La empresa HAZWAT presta su servicio de incineración, en la mayoría de los subsectores mencionados, ya sea para desechos peligrosos generados de varios procesos industriales como: textil, hidrocarburífero, agropecuario, cosmético; desechos resultantes de la atención médica, destrucción de marca de productos (aseo personal, cosméticos, joyería, etc.), destrucción de alimentos caducados, entre otros. De tal manera, gestiona la disposición final de una gran gama de desechos.

2.3.1 TIPOS DE INCINERADORES Y PROCESOS DE COMBUSTIÓN

2.3.1.1 Tipos de incineradores

Al existir variedad de desechos peligrosos, surgen variantes técnicas para llevar a cabo la incineración de estos. El estado físico de los residuos resulta un factor importante para decidir el tipo de horno que se pueda llegar a emplear, además del punto de vista económico y la optimización energética. Cabe destacar que para empresas medianas y pequeñas, existe unidades transportables que han adquirido un desarrollo importante en USA, en donde su uso ha aumentado en los últimos 20 años, debido que permite modular su diseño y construcción, montar y desmontar sus componentes, tal es el caso de los hornos rotativos e infrarrojos (Rodríguez & Irabien, 2013).

Los sistemas de incineración pueden operar en dos formas: en atmósfera oxidante o pirolítica. En donde se produce pirólisis, se acopla una cámara de postcombustión para la destrucción total de los desechos y los gases de combustión puedan ser emitidos a la atmósfera (Santos, 2012). De la diversidad de

sistemas de incineración utilizados para tratamientos de desechos peligrosos, se menciona los principales a continuación:

- **Horno rotativo**

  Es una de las tecnologías más utilizadas, tal es el caso que en USA alcanza niveles de las tres cuartas partes del volumen de desechos peligrosos incinerados, debido a su posibilidad de calcinar residuos líquidos, sólidos o pastosos. Está formado por un cilindro refractario en su interior, (ver Figura 1) de un diámetro comprendido entre 1,8 y 5,0 metros y su longitud varía de 7 a 50 metros, los tiempos de residencia oscilan entre 10 y 30 minutos dependiendo de las propiedades del desecho, y las condiciones de temperatura y exceso de aire; resistente a la corrosión de gases ácidos generados en el proceso. Cuenta con una capacidad de rotación de 0,5 a 3,0 rpm sobre su eje longitudinal (Rodríguez & Irabien, 2013; Santos, 2012a).

  Posee una pendiente de 1,0 a 5,0 % entre la entrada y salida, provocando que el desecho se calcine, de forma que se va moviendo horizontalmente y de formal radial a través del área del cilindro, además de proporcionar condiciones para que la mezcla sea adecuada (heterogénea) y una mayor exposición de los residuos al calor de combustión, generando un aumento en la eficacia de la destrucción (Rodríguez & Irabien, 2013).

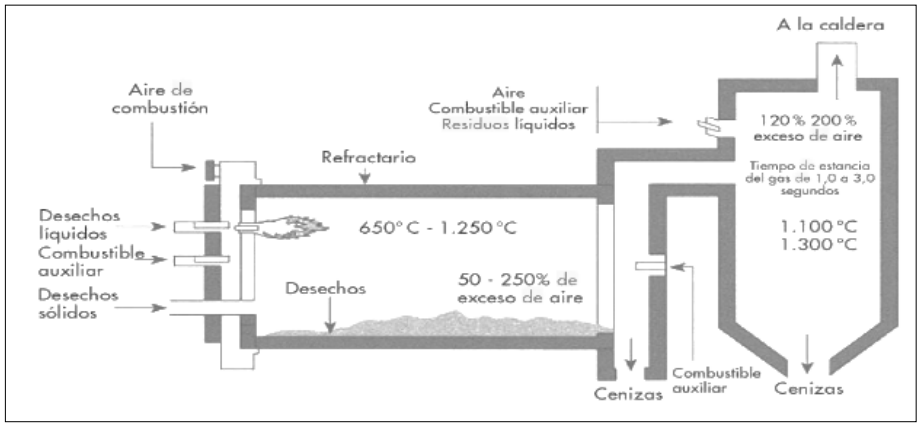


Figura 1. Horno rotatorio con cámara de postcombustión

Fuente: (Elías, 2005a)

El horno se acopla a una cámara de postcombustión, que trabaja a temperaturas entre 950 °C y 1 200 °C para completar su destrucción, el tiempo de residencia de los gases varía entre 1 y 3 segundos (Rodríguez & Irabien, 2013).

- **Horno múltiple u horno de pisos**

Está conformado de dos a seis hornos horizontales, con plataformas ligeramente inclinadas, acondicionados verticalmente, como se observa en la Figura 2, su utilización para la incineración de desechos peligrosos es muy limitada, debido a que las temperaturas que se necesitan para proporcionar rendimientos de una destrucción razonable afectan al equipo, reduciendo su tiempo de vida útil (LaGrega et al., 2000). Su aplicación para desechos peligrosos, es en lodos de estaciones depuradoras de aguas residuales (Elías, 2005a).

El proceso inicia cuando, el desecho se introduce por la parte superior del horno, y se expone a ignición a través de quemadores de combustión. Los brazos agitadores sobre la superficie de cada horno se mueven en forma de carrusel, con ayuda del pozo central de aire refrigerado, mientras que el residuo se mueve por la superficie del horno gracias a los cepillos de los brazos hasta llegar a una brecha circular, enseguida el desecho cae por la cobertura del siguiente horno y persiste quemándose hasta que se transforma en ceniza (LaGrega et al., 2000).

Los gases de combustión se desplazan verticalmente hacia arriba, dentro del equipo de control de la contaminación del aire y el revestimiento exterior, de forma que la combustión donde puede alcanzar los 1 000°C en la sección intermedia del horno. La parte superior corresponde al secado o calentamiento de los desechos y en la parte inferior se enfrían las cenizas y se precalienta el aire. Resulta un técnica interesante para desechos con alto contenido de humedad, pues presenta una importante eficiencia térmica (Rodríguez & Irabien, 2013).

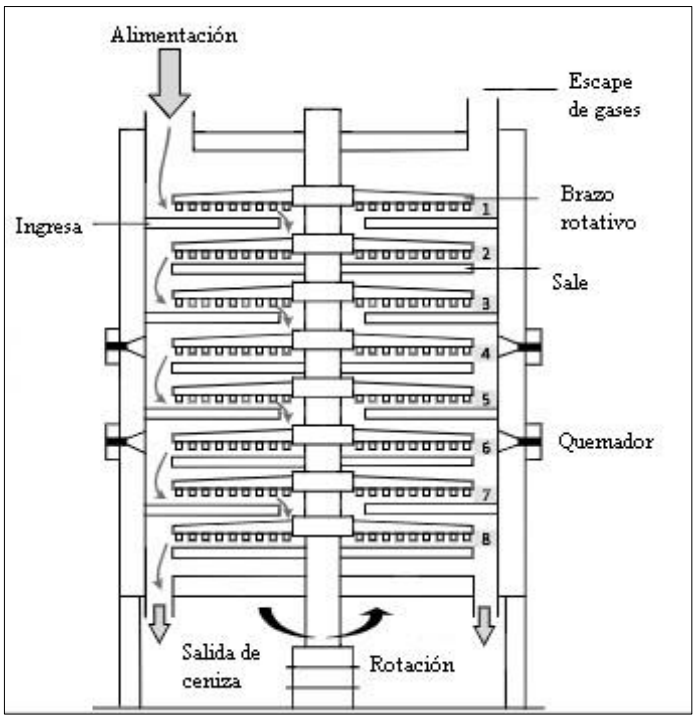


Figura 2. Horno múltiple
Fuente: (Jämsä et al., 2018)

- **Horno de aire controlado u horno fijo de dos cámaras.**

Proceso que presenta dos unidades o etapas de combustión, en la que la alimentación de residuo se alimenta en la primera cámara, en dónde se incinera en condiciones de pirólisis, con defecto de aire entre un 50 a 80 % de aire estequiométrico necesario. Las condiciones de ausencia de oxígeno hacen que el arrastre de partículas hacia la depuración de gases sea menor. Los humos y productos de pirólisis resultantes son hidrocarburos y monóxido de carbono, pasan entonces a la cámara de postcombustión donde se mantienen temperaturas más elevadas que en la primera debido generalmente al aporte de combustible auxiliar.

Este incinerador, siempre y cuando no se disponga de sistema automático de retirada de escoria, trabaja con un ciclo discontinuo de operación, (ver Figura 3) de modo que no es un modo de operación recomendable, ya que se puede producir escapes de residuos peligrosos, además de aumentar el esfuerzo térmico del horno. El ciclo consta de una limpieza de restos, un

precalentamiento, carga de residuos en continuo durante un periodo de tiempo determinado, combustión completa del desecho y enfriamiento (Elías, 2005a). Este tipo de incinerador es usado por Hazwat.

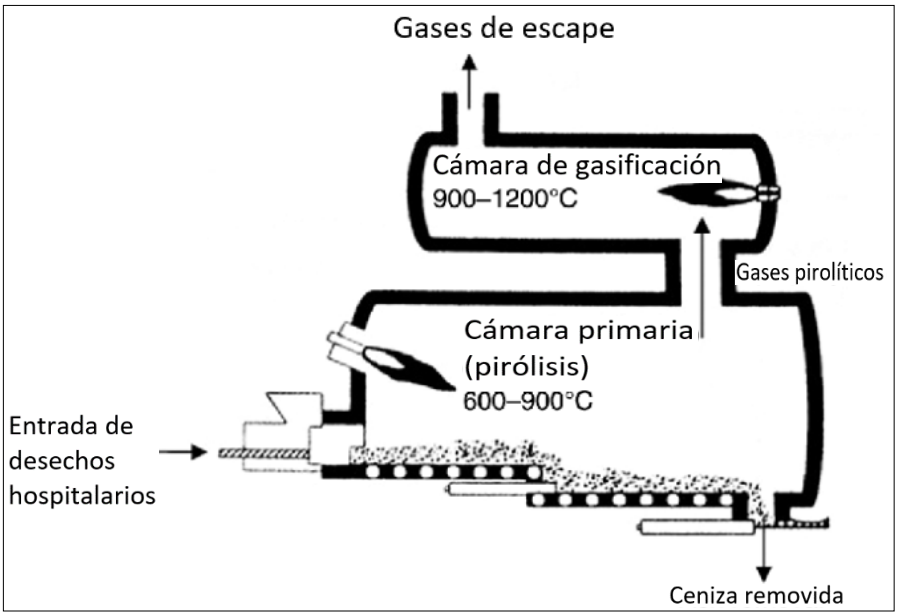


Figura 3. Horno fijo de dos cámaras o de aire controlado

Fuente: (Gielar & Helios-Rybicka, 2013)

2.3.1.2 Cámaras de Combustión

- **Cámara primaria:** su función es volatilizar la porción orgánica del desecho. Generalmente es un recipiente de forma vertical u horizontal, recubierto con material refractario. Los quemadores de líquido o gas tienen suficiente potencia para calentar los gases de combustión, hasta una temperatura final necesaria para la destrucción de los desechos. En cuanto a la carga, es preferible usar recipientes verticales antes que los horizontales, debido a que la fuerza de la gravedad provocará depósitos de partículas en el fondo de la cámara, produciendo problemas en la eliminación (LaGrega et al., 2000).

El parámetro de temperatura está sujeta a varios aspectos, como es el tipo de desecho o el incinerador, los rangos reportados varían de 400 a 1 600 °C, sin embargo, es preferible que para desechos hospitalarios la temperatura sea mayor a 760 °C. Además es importante que la temperatura no supere

los 1 000 °C, pues las cenizas pueden fundirse y provocar incrustaciones en el material refractario, causando un menor tiempo de vida útil del equipo (Rosas et al., 2009).

En esta cámara de acuerdo con la tecnología del horno, pueden existir los siguientes procesos:

Oxidación*:* es una reacción química que se produce cuando un componente orgánico (hidrógeno y carbono) entra en contacto con el oxígeno. Para alcanzarlo, el aire que contiene 21 % de O_2 en volumen se mezcla con el C y H del desecho para producir la oxidación estequiométricamente CO_2 y H_2O. Sin embargo, el aire contiene 79 % de N_2 que es inerte y entra al proceso de combustión. Si se disminuye uno de factores, ya sea el tiempo, la turbulencia o la temperatura, los otros dos deben aumentar para aproximarse a la combustión completa. Por consiguiente, se indica las reacciones típicas en el proceso de combustión (LaGrega et al., 2000):

$$C + aire \rightarrow CO_2 + N_2 + \Delta calor \quad (1)$$

$$H_2 + aire \rightarrow H_2O + N_2 + O_2 + \Delta calor \quad (2)$$

$$CH_4 + aire \rightarrow CO_2 + H_2O + N_2 + O_2 + \Delta calor \quad (3)$$

Pirólisis: implica la transformación química de un desecho al someterla a temperaturas entre 400 °C a 1 000 °C. Mediante el cual, un sólido o líquido, se degrada térmicamente en moléculas volátiles más pequeñas, sin interactuar con el oxígeno ni con ninguno otro tipo de oxidante (Lord & Pfannkoch, 2012). A continuación, se presenta las reacciones típicas de pirólisis exotérmica (Centeno et al., 2010):

$$C_6H_{10}O_5 + \Delta calor \rightarrow 2C + 3CO + CO_2 + SH_2 \quad (4)$$

$$CH_2 + \Delta calor \rightarrow C + H_2 \quad (5)$$

$$CO_2 + C \rightarrow 2CO \quad (6)$$

Gasificación: Proceso en el cual se expone a los desechos sólidos a temperaturas mayores a 600 °C casi sin presencia de oxígeno y de esta forma prevenir la combustión inmediata. Es por esto, que la composición de C de los desechos se descompone en gas de síntesis (combustible gaseoso) y un sobrante en cenizas o escoria de carbón (Tangri & Wilson, 2017). Se presenta a continuación, las reacciones de gasificación (Centeno et al., 2010):

$$C_6H_{10}O_5 + 2O_2 + \beta N_2 \rightarrow 2CO_2 + 4CO + H_2O + 4H_2 + \beta N_2 \quad (7)$$

$$CH_2 + O_2 + \beta N_2 \rightarrow CO + H_2O + \beta N_2 \quad (8)$$

- **Cámara de combustión secundaria**

Esta cámara es indispensable en todos los equipos de incineración de desechos peligrosos, su función es calentar los componentes orgánicos vaporizados hasta una temperatura entre 900 y 1 600 ºC donde se oxiden completamente los gases en este proceso. En condiciones menos favorables, se debe alcanzar una temperatura mínima de 850 °C y si se incinera desechos que contengan cloro alcanzar una temperatura de aproximadamente 1 000 °C (LaGrega et al., 2000; Rosas et al., 2009).

La EPA, menciona que la temperatura no debe superar los 1 200 °C, y así prevenir daños en el material refractario. Generalmente en las cámaras secundarias, se usa combustible adicional como fuente de calor, la temperatura menor con la que se puede lograr que la Eficacia de Destrucción y Eliminación (EDE), será la más económica (LaGrega et al., 2000; Rosas et al., 2009).

El tiempo de retención del gas de combustión en la cámara secundaria es de por lo menos dos segundos, para asegurar la eliminación de los desechos orgánicos en el gas de combustión, este proceso no es función de un solo factor, sino del triángulo de temperatura, turbulencia y tiempo (tres T)

(LaGrega et al., 2000). En donde a mayor tiempo de retención, se reduce la temperatura para la destrucción de los desechos (Rosas et al., 2009).

Sin embargo, cuando se incineran líquidos, no se emplea de una cámara de combustión secundaria, debido a las tres T, se pueden conseguir en una sola cámara. Las velocidades de gas usadas para el diseño de la cámara de combustión secundaria son, entre 4,5 a 7,5 m/s normalmente, en un rango de temperatura de 983 °C o superiores (LaGrega et al., 2000).

2.3.2 PRINCIPALES CRITERIOS PARA ANALIZAR EN UNA PLANTA DE INCINERACIÓN

Como se observa en la Tabla 1, los criterios que más se destacan son, los rangos de temperatura de la cámara primaria y secundaria, que se detallaron anteriormente en la sección 2.3.1.2, la pérdida de material volátil, criterios para tratamiento de gases, almacenamiento de residuos, manejos de cenizas y tratamiento de aguas.

Tabla 1.
Criterios aplicados para valorar el desempeño de las plantas de incineración.

PARÁMETRO	RANGO	VALOR	OBSERVACIONES
Criterios de combustión			
Temperatura CC1	< 800 ºC	0	Combustión incompleta
	800 a 1 000 ºC	2	Operación adecuada
	> 1 000 ºC	1	Daño al material refractario
Temperatura CC2	< 850 ºC	0	Combustión incompleta
	850 a 1 200 ºC	2	Operación adecuada
	> 1 200 ºC	1	Daño al material refractario
Tiempo de retención en CC1	15-30 min	1	Suficiente para destrucción de materia orgánica
Tiempo de retención en CC2	< 2 s	0	Insuficiente para destrucción de compuestos orgánicos
	> 2 s	2	Suficiente para destrucción de compuestos orgánicos
Perdida de material volátil de las cenizas	> 10%	0	Representa combustión incompleta
	5 a 10%	1	Representa combustión satisfactoria
	< 5%	2	Garantiza la mejor combustión

PARÁMETRO	RANGO	VALOR	OBSERVACIONES
Criterios para el tratamiento de gases			
Control de partículas y gases ácidos	Nulo	0	Se emiten contaminantes a la atmósfera
	Básico	1	Hay remoción de partículas
	Avanzado	2	Hay remoción de partículas y gases ácidos
Temperatura de salida de los gases	> 250 ºC	0	Altas probabilidades de generación de dnx
	250 a 200 ºC	1	Se reduce la generación de dnx
	< 200 ºC	2	La generación de dnx es casi nula
Otros criterios importantes			
Almacenamiento de desechos	No adecuado	0	Genera condiciones de inseguridad en la planta
	Adecuado	2	Existe buen manejo de los desechos
Manejo de cenizas	Sin separación	0	Poca dilución y disposición inadecuada
	Con separación	0	Evita la dilución
	Separación y estabilización	2	Provee el manejo adecuado
Tratamiento de agua	Nulo	0	Provoca descarga de contaminantes
	Físico/químico	2	Provee tratamiento adecuado

*CC1= Cámara de combustión primaria; CC2= Cámara de combustión secundaria

0 = insuficiente; 1= satisfactorio; 2= excelente; dnx= dioxinas y furanos

Fuente:(Rosas et al., 2009)

- **Pérdida de material volátil de cenizas**: es un acercamiento para conocer la eficiencia de la combustión de los desechos, puesto que se exponen a temperaturas mayores o iguales a 550 °C (Rosas et al., 2009).

- **Criterios para el tratamiento de gases**

  - **Control de partículas y gases ácidos:** se originan por productos de combustión incompleta o por la condensación de compuestos, la concentración que es emitida a la atmósfera depende tanto de la velocidad como de la turbulencia de los gases en la cámara secundaria. Los equipos que se utilizan para su depuración son: filtros de bolsas, lavadores de gases, ciclones y precipitadores electrostáticos, se detalla en la Figura 4, el tratamiento de los mismos (Rodríguez & Irabien, 2013; Rosas et al., 2009). Cabe destacar el uso del carbón activado en pellets

para los gases combustión, se utiliza en fase de gas de los contaminantes, en donde el carbón se pulveriza y se peletiza, reteniendo entre 0,2 y 0,8 kg de contaminante por kg de carbón activado, en donde la velocidad del gas este entre 10 y 30 m/min (Carbotecnia, 2020).

Los gases ácidos que se producen generalmente son: SO_x y HCl que se pueden remover, utilizando reactivos alcalinos como NaOH y/o $Ca(OH)_2$ (Rosas et al., 2009). Mientras que para el NO_X depende de la temperatura de combustión, si es igual o mayor a 1 000 °C, se aumentará el NOx formado mediante NOx térmico, y si está por debajo de este valor se verá favorecida la formación de NOx del combustible. Asimismo, conforme se aumente la temperatura de los 1200 ºC, la formación de NOx térmico irá incrementando de forma exponencial, por ende es importante adoptar medidas en la propia combustión tendentes a reducir la concentración de este (Rodríguez & Irabien, 2013).

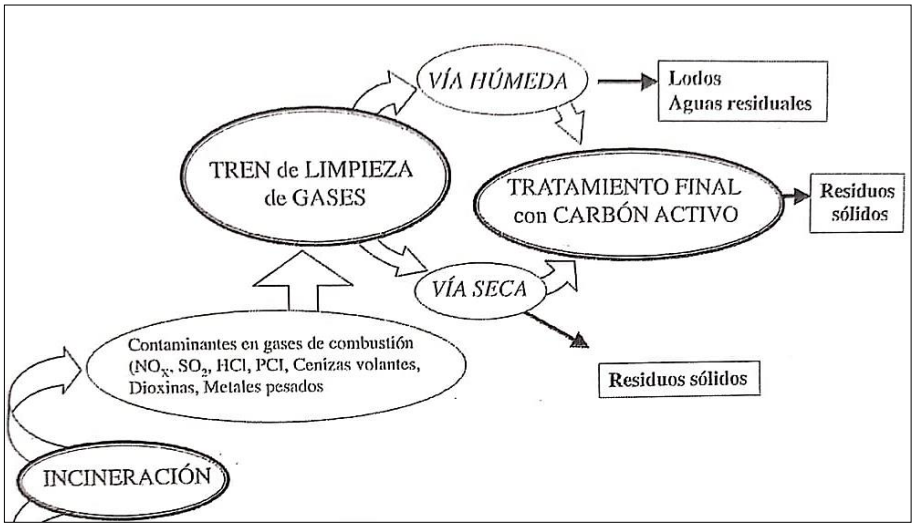


Figura 4. Tratamiento de depuración de gases de combustión de la incineración

Fuente: (Rodríguez & Irabien, 2013)

- **Temperatura de salida de gases:** Es importante conocer los rangos de temperatura para minimizar la formación de dioxina y furanos, cuando se

encuentra a 250 °C, siendo este valor el máximo para los gases que se emiten hacia la atmósfera (Rosas et al., 2009).

- **Tratamiento de aguas residuales:** las aguas residuales resultantes de los desechos en los procesos de la incineración son de menor prioridad en comparación con el tratamiento de los gases de combustión generados. Sin embargo, es una obligación que los efluentes originados en las diferentes operaciones, las aguas contaminantes producidas exigen un tratamiento antes de la descarga (Rodríguez & Irabien, 2013).

A continuación, se menciona las posibles fuentes de procedencia de aguas residuales en una planta de incineración:

- **Aguas del tanque de descargas de las cenizas fijas y escorias del horno:** la propia estructura de las cenizas determina las características contaminantes del agua. Luego de la separación por decantación de la fase sólida, el líquido sobrenadante, puede contener materia en suspensión remanente y sales solubles de metales alcalinos y alcalinotérreos (sulfatos y cloruros de K, Na, Mg y Ca). Siendo el mayor problema la contaminación por materiales pesados y cloro (Rodríguez & Irabien, 2013).

- **Aguas de los lavadores:** empleados para la detención de HCl, Cl_2, HF, HBr. Según la composición del líquido absorbente empleado, los reactivos pueden ser HCl, HCl, NaCl, NaOCl, $CaCl_2$ y $Ca(OCl)_2$. Generalmente se presentan problemas de pH ácido. Si existe concentración de Hg en los gases, puede quedar almacenado en una proporción importante si el pH de las aguas es bajo. La utilización de $CaCO_3$ como reactivo, produce aguas residuales que contienen lodos resultantes de la precipitación de $CaSO_4$ y $CaSO_3$, los que pueden estar acompañados de $CaCO_3$ y $Ca(HCO_3)_2$ y las sales magnésicas que se pueden utilizar $Mg(OH)_2$ en la mezcla reactiva. (Rodríguez & Irabien, 2013).

En algunas plantas, se tratan en forma homogénea las aguas procedentes de las operaciones mencionadas. Lo cual no resulta viable, si en la corriente que pertenece a los lavadores de HCl, existe presencia de Hg, F o Br, complica su tratamiento, empeorando aún más si existe presencia de metales pesados y dioxinas. Generalmente, los efluentes de la depuración de gases ácidos se separan por sedimentación, lo que genera un lodo por el precipitado de la desulfurización, junto con las cenizas volantes presentes en la sustancia líquida (Rodríguez & Irabien, 2013).

El proceso de deshidratación de lodos puede ser por centrifugación o filtración, en donde la fase líquida pasa a las aguas residuales. Luego se acondiciona el pH, si fuera el caso para su evacuación. Cabe mencionar, que los metales pesados se pueden eliminar por precipitación alcalina o Na_2S si hay presencia de Hg. Si se usa $Ca(OH)_2$ como agente precipitador se puede eliminar tanto metales como F^-. En lo que corresponde a dioxinas existen alternativas, como destrucción fotocatalítica, oxidación catalítica y adsorción con carbón activo (Rodríguez & Irabien, 2013).

- **Manejo de cenizas:** Las escorias, que se encuentran en la cámara de combustión primaria estas constituidas generalmente de material inerte, en tanto que las cenizas que se atrapa por los dispositivos de control de emisiones indican mayor concentración de materia orgánica y de metales solubles relativamente. En Japón y Europa, manejan las dos corrientes por separado, estabilizando las cenizas volantes antes de la disposición (Rosas et al., 2009).

- **Almacenamiento de residuos:** Se detalla en el AM 026 Procedimientos para registro de generadores de desechos peligrosos, gestión de desechos peligrosos previo al licenciamiento ambienta, y para el transporte de materiales peligrosos, del Registro Oficial No. 334, en la sección II, párrafo II, lo referente a el almacenamiento de desechos peligrosos y/o especiales. Hay que considerarse a los desechos patológicos en cámaras de temperaturas menores o iguales a 4 °C (Rosas et al., 2009).

2.3.3 CARACTERIZACIÓN DE DESECHOS PARA INCINERACIÓN

Es necesario caracterizar los desechos para su incineración ya que, al destruirlos sin conocer su origen, composición o en condiciones erradas de operatividad, pueden generar impactos en el ambiente. Puesto que no se tiene basto conocimiento acerca de la liberación de contaminantes, por la combustión de desechos en los incineradores, solo algunos parámetros han sido estudiados a fondo (Tangri, 2005), los cuales son descritos a continuación:

- **Poder Calorífico:** es cantidad de calor que se desprende por unidad de masa o volumen, hasta ser consumido en el proceso de combustión. Es decir, la cantidad de calor que suministra un metro cúbico o un kilogramo de combustible al oxidarse de forma completa. Se lo expresar en diferentes formas como: kcal/kg, kcal/m^3, BTU/lb, BTU/ft^3 (Fernández, 2010).

  El poder calórico de un material se puede expresar de dos formas: el poder calórico superior (PCS), se define como el calor que desprende una unidad de combustible seco y contempla el calor latente de vaporización del agua, la cual se forma por la combustión del hidrógeno. En cambio, en el poder calórico inferior (PCI), no considera el calor latente de vaporización del agua, de esta manera no existe una contribución adicional de calor, puesto que la cantidad de calor liberado es menor y solo se dispone del calor que se genera de la oxidación del combustible (Fernández, 2010).

  En relación con la combustión, el valor del PCI de un material utilizado como combustible nos da una idea más real del proceso. Debido a que indica cuánto calor se libera durante la combustión del desecho y esto ayuda a disminuir el consumo de combustible. Hay que tomar en cuenta que, el PCI de una carga se calcula con las fracciones del PC de cada uno de los desechos que la componen, un PCI muy variable puede complicar el control de la temperatura en el interior de las cámaras del incinerador y de esta forma causar: emisión de material particulado tóxico a través de la chimenea; una combustión incompleta; fusión y acumulación de cenizas por causa de

temperaturas excesivas, generación de monóxido de carbono (CO), consumo excesivo de combustible, etc (Ambientum, 2018; CEMPRE, 2000).

Los residuos que generalmente tienen un alto contenido de poder calórico aproximadamente de 10 000 kcal/kg, son las grasas, los aceites usados, lodos de pinturas y orgánicos, adhesivos, solventes gastados, desechos plásticos, etc. (Ayala, 2018; Elías, 2005a).

- **Contenido de humedad:** denota el contenido de agua existente en el desecho. Una carga de desechos a incinerar con alto porcentaje de humedad perjudica los costos operacionales de la empresa, dado que, es necesario el uso de mayor cantidad de combustible auxiliar, afecta a la combustión completa e incrementa los tiempos de incineración hasta alcanzar una temperatura adecuada para las cámaras de combustión. (Camacho et al., 2011).

En la Figura 5, se presenta la relación que existe entre la variación del PCI vs. humedad presente en RDF (Combustible derivado de residuos).

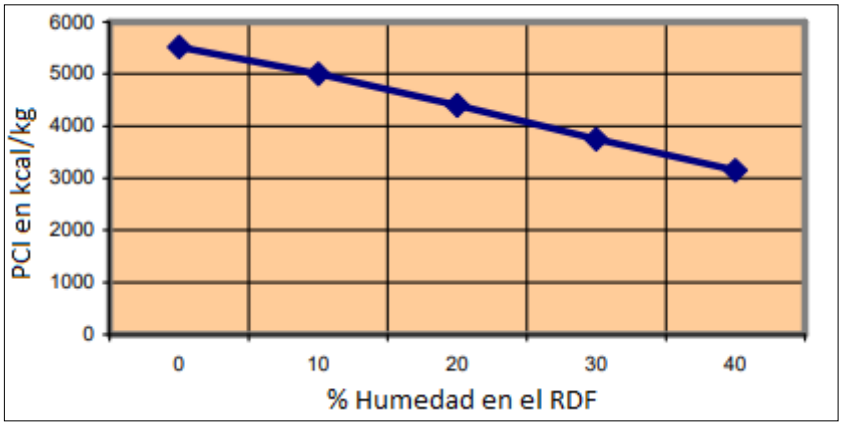


Figura 5. Variación del PCI vs humedad en el residuo.
Fuente: (Elías, 2005)

- **Cenizas resultantes de la incineración:** es el material que queda sólido después del proceso de la incineración, están compuestas por minerales, carbono no quemado y una concentración grande de metales. La producción

media de cenizas y escoria en las plantas de incineración europeas es del 22,5 % del peso total de los desechos incinerados (Greenpeace, 2009). El porcentaje producido de cenizas de fondo (clinker) permite considerar el espacio necesario para el relleno o celda de seguridad, ya que son también consideradas como un desecho peligroso, debido a que pueden abarcar importantes concentraciones de metales pesados, órgano-halogenados y diferentes contaminantes químicos; ocupa el 90% de las cenizas totales producidas (Tangri, 2005).

Las cenizas están constituidas por la escoria y material particulado volátil que es atrapado en los filtros de gases. En las cuales se encuentran contaminantes como compuestos orgánicos halogenados, gases de efecto invernadero, metales pesados y dioxinas, perjudiciales para la salud y el ambiente, la concentración de estos contaminantes en las cenizas estará sujeto al tipo de desecho incinerado (Mugica et al., 2003).

- **Composición de elementos químicos** (Camacho et al., 2011)**:**

  - **Carbono, oxígeno e hidrógeno:** son elementos químicos esenciales de los desechos los cuales posibilitan calcular las condiciones de la combustión que se requiere para la incineración. Debido a, que el porcentaje de volumen que se reduce en la incineración va entre 70 a 90 %, se considera que la materia orgánica que contienen los desechos es equivalente a ese porcentaje, el cual varía dependiendo al origen de los mismos (Kanhar et al., 2020).

  - **Azufre, ácido clorhídrico y nitrógeno:** estos elementos pueden estar presentes en la composición de los desechos peligrosos y conducen a la conformación de subproductos como: HCl, SO_2, NO_x y otros derivados como los gases ácidos corrosivos los cuales pueden repercutir la vida útil del equipo disminuyendo su eficiencia (Rodríguez & Irabien, 2013).

- **Metales pesados:** mercurio, cromo, cadmio, zinc, plomo y otros, aportan una enorme toxicidad a los restos de ceniza y escoria que salen por las corrientes gaseosas y líquidas de un incinerador, considerados como la parte inorgánica del desecho (Mugica et al., 2003).

- **Valoración energética:** en la incineración, los desechos peligrosos son un combustible no homogéneo y para que un desecho sea incinerable se debe considerar tres aspectos, utilizando el triángulo de Tanner (ver Figura 6): el porcentaje de humedad (W) no debe ser mayor al 50%, el porcentaje de cenizas (A) no debe alcanzar el 60% y la fracción combustible (C) debe ser como mínimo el 25%, para considerar si el desecho es teóricamente viable para la incineración sin combustible auxiliar (Elías, 2005b; World Bank, 2000).

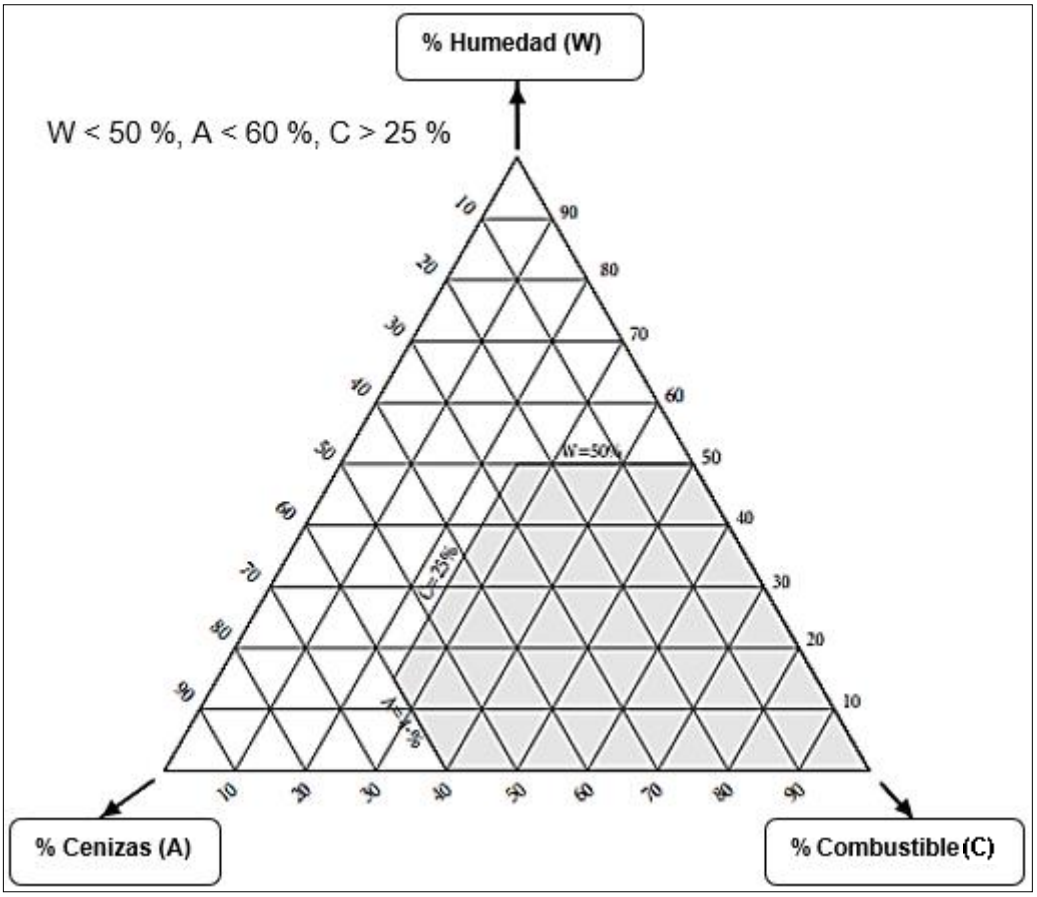


Figura 6. Triángulo de Tanner para la evaluación de la combustibilidad de los desechos

Fuente: (Elías, 2005b)

2.3.4 DESCRIPCIÓN DEL INCINERADOR DE HAZWAT

La empresa HAZWAT opera con un incinerador PENNRAM, los cuales son construidos específicamente para la incineración de desechos resultantes de operaciones industriales, médicas, campamentos de construcción, residuos municipales y más (PENNRAM, 2022). En la Figura 7, se muestra el incinerador que operan en la planta. Las características principales del incinerador PENNRAM modelo PHCA-1100, se detallan a continuación, según PENNRAM, (2015):

Ciclo de precalentamiento: temperatura de cámara secundaria 870 – 980 °C.
Temperatura de precalentamiento: necesaria para encender los quemadores cuando el sistema está en arranque en frío o en modo de espera calentado al reiniciar. El objetivo es llevar la temperatura de funcionamiento del incinerador térmico por encima del punto de autoignición (aproximadamente 760 °C), así como por encima de la temperatura reglamentaria requerida de 1 000 °C, antes de cargar los desechos en el incinerador.
Máxima capacidad operativa: 0,14 kg/s
Tolva carga promedio: 100 kg de desechos por ciclo de 12 minutos.
Temperatura mínima secundaria: 871 a 1 000°C.

Figura 7. Incinerador PENNRAM
Fuente: HAZWAT

El soplador de aire de combustión del quemador de alta presión proporciona aire de combustión y aire de atomización. El 20 % se quema en la cámara primara,

mientras que el 80 % de residuos colocados en el incinerador se oxidan en la cámara secundaria; los vapores de carbono expulsados de la cámara primaria se oxidan en la cámara secundaria, el proceso tiene potencial para producir temperaturas 1 650 °C. Conforme al aumento de la temperatura de escape de 870 a 1 090 °C, la compuerta de control de aire de combustión secundaria se modula desde un 5,0 %. Dado que los quemadores de diésel secundarios se apagan a los 1 000 °C (PENNRAM, 2015).

Los gases de la combustión son expulsados del horno principal hacia el horno de postcombustión. El horno de combustión alcanza 870 °C, y suelta los gases hacia el horno de postcombustión, a 1 200 °C, con un tiempo de residencia de tres segundos hasta pasar a los enfriadores (PENNRAM, 2015).

2.4 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LA INCINERACIÓN

En Ecuador, a través de la Normativa Ambiental del Acuerdo Ministerial No. 061 Reforma del libro VI del Texto Unificado de Legislación Secundaria, se regula que el generador de desechos peligrosos tiene la obligación de dar un tratamiento y disposición final adecuada, con ayuda de un gestor autorizado para la destrucción de los desechos. Se debe considerar que uno de los tratamientos más utilizados para manejar este tipo de desechos es la incineración, se presenta a continuación las ventajas y desventajas de este proceso:

2.4.1 VENTAJAS DEL PROCESO DE LA INCINERACIÓN

- **Gran reducción del volumen a ser destruido**: mediante el proceso de incineración se logra reducir aproximadamente el 70,0 % en peso y 90,0 % en volumen de desecho, lo que deja como sobras las cenizas, escorias que ocupan un volumen menor dentro del relleno de seguridad (Ambientum, 2018).

- **Disminución del impacto ambiental***:* tomando en cuenta el almacenamiento de los desechos en un relleno sanitario, la incineración

reduce los impactos generados a la capa freática del suelo ya que los desechos tóxicos son destruidos mas no guardados (Rodríguez & Irabien, 2013). En la incineración los gases producidos en el proceso de combustión pueden ser tratados mediante un sistema de depuración evitando su emisión al agua y al suelo (Tello et al., 2019; Ungureanu et al., 2021).

- **Destrucción de carga viral:** Con el proceso de incineración se destruye todo tipo de patologías como bacterias, virus, compuestos orgánicos que pueden desatar enfermedades desconocidas al estar expuestas al ambiente en los desechos biopeligrosos (MAYPA S.A, 2009).

- **Recuperación de energía***:* Se puede aprovechar la incineración de desechos para producir electricidad y recuperar parte de la energía que es consumida en el proceso (Camacho et al., 2011).

2.4.2 DESVENTAJAS DEL PROCESO DE LA INCINERACIÓN

- **Costos elevados de implementación, operación y mantenimiento:** Todo el proceso para implementar una planta incineradora es costoso, desde la construcción inicial hasta la operación, ya que, como sistema de gestión de desechos llega a ser un 35 a 50 % más costoso que un relleno sanitario (FARN, 2018).

  El propósito inicial del uso de incineradores era considerado para desechos no reciclados, sin embargo, a través de los años la demanda ha crecido por la falta de espacio en rellenos sanitarios, las sobreproducciones han llegado a aumentar el costo operacional de los incineradores donde sus servicios son cada vez más demandados (FARN, 2018; Rodríguez & Irabien, 2013).

  El costo que más se destaca es el consumo de combustible auxiliar para alcanzar una temperatura deseada en el incinerador se utiliza alrededor de 2 500 gal/mes de combustible dato proporcionado por HAZWAT, el cual tiene un costo de 1,80 $ por galón, obteniendo un valor total de 4 500,00 $ al mes,

hay que mencionar que el gasto de diésel dependerá del tiempo de operación y el tipo de desechos a ser tratados (FARN, 2018; Rodríguez & Irabien, 2013).

- **Contaminación atmosférica:** si no se tratan adecuadamente las emisiones a la atmosfera (CO, NO_x, SO_2, HCl, MP, metales pesados, dioxinas y furanos) puede causar problemas la salud afectando principalmente al sistema respiratorio, cardiovascular y derrames cerebrales sin dejar de lado, la contaminación a la calidad ambiental de la zona aledaña a la incineradora (Vargas et al., 2008).

- **Deja desechos altamente tóxicos:** Las cenizas resultantes de la incineración contienen toda clase de elementos tóxicos y requieren ser gestionados en celdas de seguridad, sin eliminar totalmente el problema de los desechos peligrosos, puesto que requieren de un sistema de inertización y eliminación (FARN, 2018).

- **Pasivos ambientales por mala de gestión de las cenizas:** En muchos países, las cenizas de incineración con una carga de contaminante considerable son arrojadas a en un relleno común, sin membrana de protección donde corren el riesgo de contaminar las capas freáticas del suelo, a su vez estos rellenos o celdas no tienen un manejo adecuado y a través del tiempo pueden convertirse en un pasivo ambiental siendo un peligro para el ambiente y la salud de las personas (Tangri, 2005).

2.5 EMISIONES ATMOSFÉRICAS Y MATERIAL PARTICULADO

- **EMISIONES GASEOSAS DE INCINERADORES**

Las plantas incineradoras que gestionan desechos peligrosos producen generalmente volúmenes de gases de combustión entre 6 500 y 10 000 m^3, dependiendo principalmente del valor térmico medio de los desechos (Camacho et al., 2011). Cabe mencionar que la composición de gas de combustión crudo en

residuos, (ver Tabla 2) depende de la estructura del residuo y los parámetros técnicos del horno. Hay que considerar que las plantas de incineración que utilizan procesos como pirólisis, gasificación y suministro de aire enriquecido con oxígeno generan un menor volumen de gas de combustión se tiene por tonelada de desecho incinerado (Camacho et al., 2011).

Tabla 2.
Concentración de gases de combustión después de la caldera (gas de combustión sin tratamiento en diversas plantas de incineración de residuos referencia O_2 de 11%)

Componentes	**Unidades**	**Plantas incineradoras de residuos peligrosos**
MP	mg/Nm^3	1 000 – 10 000
CO	mg/Nm^3	<30
TOC	mg/Nm^3	1 – 10
Dioxinas	ngTEQ/Nm^3	0,5 - 10
Hg	mg/Nm^3	0,05 – 3
Cd + Tl	mg/Nm^3	<5
Otros metales pesados (Pb, Sb, As, Cr, Co, Cu, Mn, Ni, V, Sn)	mg/Nm^3	<100
HCl	mg/Nm^3	3 000 – 100 000
HF	mg/Nm^3	50 – 550
Compuestos de S, total SO_2	mg/Nm^3	1 500 – 10 000
NO_2	mg/Nm^3	100 – 1 500
N_2O	mg/Nm^3	<20
CO_2	%	5 – 8
Vapor de agua (H_2O)	%	6 – 20

Los valores de los residuos peligrosos hacen referencia a plantas comerciales de residuos peligrosos comerciales mixtos más que a plantas para residuos específicos.

Fuente: (Camacho et al., 2011)

No existe un rango típico en las concentraciones de los gases de combustión, debido a que cada prestador de servicios tiene sus propias condiciones de operación. Existen plantas de incineración como HAZWAT, que particularmente gestionan desechos heterogéneos, donde se desconoce una gran parte de la composición química de los mismos, teniendo en cuenta que dentro de las reacciones que se generan en las cámaras de combustión por la presencia de

distintos elementos (N, S, P, Cl) que conducen a la formación de subproductos (NOx, SO_2, HCl) los cuales pueden provocar en el proceso de incineración condiciones temporales, que dan lugar a concentraciones de emisiones instantáneas que fluctúan fuera del límite de los valores promedio (Rodríguez & Irabien, 2013).

Sin embargo, las emisiones también están determinadas por las características técnicas del incinerador, dependen principalmente del diseño y operación del horno, la temperatura, limpieza de los gases de combustión, tiempo de residencia y la estructura de los desechos (Camacho et al., 2011).

De esta forma, se estudia los diferentes elementos de las emisiones gaseosas producidas dentro de un horno incinerador en la cámara de poscombustión, los principales son: vapor de agua, nitrógeno (N_2), dióxido de carbono (CO_2), material particulado (MP) y oxígeno (O_2). Además, conforme a la composición de los desechos incinerados y las circunstancias de operación se producen cantidades menores de (CO), (HCl) donde el hidrógeno también reacciona con el cloro. Así mismo, ocurren muchas otras reacciones, produciendo óxidos de azufre (SO_x), óxidos de nitrógeno (NOx), óxidos metálicos, compuestos orgánicos volátiles COV, dioxinas y furanos, entre otros (Camacho et al., 2011; National Research Counci, 2000).

- **PRINCIPALES CONTAMINANTES DE LAS EMISIONES A LA ATMÓSFERA DE INCINERADORES**

  - **Monóxido de carbono CO:** Es un gas tóxico e inodoro resultante de la combustión incompleta de compuestos de carbono. Además, se genera en condiciones de insuficiencia de oxígeno dentro de las cámaras de combustión en un ambiente pirolítico y una baja temperatura incapaz de realizar la oxidación completa a CO_2. Es así como esto puede suceder si hay sustancias que combustionan o se evaporan fácilmente. Además, se puede comprobar la eficiencia en el transcurso del proceso de incineración de desechos con la medición de los niveles de CO, es decir

a menor nivel de CO mejor es la calidad de combustión (LaGrega et al., 2000).

- **Óxidos de azufre SO_x:** Son generados principalmente por el contenido de azufre que se tiene dentro del combustible utilizado, en el caso de la empresa HAZWAT se usa diésel. De igual modo, es probable que los desechos incinerados como: EPP contaminado, textiles, pinturas, entre otros, tengan contenido de azufre los cuales darán paso a que se forme principalmente SO_2 siendo este un gas incoloro y tóxico el cual se origina por la oxidación del azufre (Camacho et al., 2011).

- **Óxidos de nitrógeno NO_X:** En la incineración de desechos peligrosos se emiten diferentes óxidos de nitrógeno los cuales tienen efectos tóxicos y ácidos dependiendo el óxido en cuestión. Dentro de los monitoreos se toma en cuenta el NO y el NO_2 se forman de la conversión del nitrógeno contenido en los desechos a ser incinerados y de la transformación de nitrógeno atmosférico en óxidos de nitrógeno (NO_x térmico) en el aire de combustión. En plantas de incineración de desechos peligrosos la porción de NO_X térmico pende de la forma y cantidad de suministro de aire secundario en la cámara secundaria, donde se evidencia un aumento de NO_X a temperaturas de inyección por encima de los 1 300 ºC (Camacho et al., 2011).

- **Material particulado MP:** Se constituye principalmente por emisiones de partículas finas resultantes de la incineración, son arrastradas en el flujo de gas. Así pues, en el material particulado se agrupan otros elementos y compuestos que pueden ser separados mediante el uso de dispositivos de depuración o de control de contaminación donde se eliminan la mayor parte del material particulado y sustancias orgánicas e inorgánicas (Camacho et al., 2011).

- **Ácido clorhídrico HCl:** Tomando en cuenta la variabilidad de los desechos que son incinerados muchos de ellos tienen cloruros o

compuestos orgánicos clorados. Es así como en este proceso térmico, el componente orgánico de estos elementos se deshace y el cloro es transformado a HCl. Por lo tanto, parte del HCl puede reaccionar formando productos secundarios como las dioxinas y furanos (Camacho et al., 2011; Rodríguez & Irabien, 2013).

- **Metales pesados:** Se incluye los metales pesados como el manganeso, antimonio, estaño, arsénico, cromo, níquel, cobre, cobalto, vanadio, plomo, entre otros. Estos compuestos metálicos llegan a ser perjudiciales para la salud y el ambiente por ende se debe realizar un monitoreo debido a su alto potencial tóxico.

  La retención de estos metales precisa principalmente de la separación eficaz del material particulado, debido a que se encuentran fijados al polvo por las presiones de vapor de sus compuestos, contenidos en el gas de combustión constituido por óxidos y cloruros (Camacho et al., 2011).

- **Dioxinas y furanos**: Compuestos resultantes de la reacción de carbono, oxígeno y flúor. Cabe destacar, que algunos de ellos son de extrema toxicidad por su estructura de moléculas de cloro fenoles que contienen. Las dioxinas y furanos han sido parte de discusión sobre la incineración de desechos durante muchos años. Su emisión y generación no es específica del proceso incineración de desechos, sin embargo son producidas en todos los procesos térmicos a determinadas condiciones de proceso, puede darse de forma sincrónica por tres vías (Camacho et al., 2011; Rodríguez & Irabien, 2013):
  -A partir de precursores, en fase gas
  -A partir de precursores, sobre la superficie de partículas sólida, algunos de cuyos constituyentes catalizan la reacción
  -A partir de materia carbonosa, resultante de la combustión en forma de carbonilla o coque.

2.6 CATEGORÍAS DE DESECHOS PELIGROSOS QUE RECIBE HAZWAT

Dentro de la empresa HAZWAT, los desechos se categorizan dependiendo su origen, sus características físicas y químicas, como se describe en la Tabla 3, en la cual se detalla el desecho y el tipo de categoría al que pertenece (PTT, 2021).

Tabla 3
Clasificación de los desechos que ingresan a la planta de Tipo "0", "1", "2", "3", "4", que son susceptibles a la incineración, desarrollada por HAZWAT.

TIPO "0"	Desechos "Tipo 0", principalmente papel, cartón y madera. Desechos que contienen máximo 10 % de plásticos, papel laminado o emplasticado, retazos de tela o derivados de la industria textil. / MATERIAL ABSORBENTE
TIPO "1"	Desechos "Tipo 1", material contaminado con hidrocarburos (75 % sólido – 25% líquido), residuos del sector automotriz como filtros de aceite, waipes contaminados, paños contaminados, cauchos y similares, residuos con hidrocarburos, contienen hasta el 50 % de material plástico. / MATERIAL CONTAMINADO CON HIDROCARBUROS
TIPO "2"	Desechos "Tipo 2", material de fuentes domésticas (materia prima caducada, farmacéuticos, mercadería obsoleta) contienen hasta el 60% plásticos. / FARMACÉUTICOS / MATERIAL CADUCADO
TIPO "3"	Desechos "Tipo 3", desechos médicos: objetos cortopunzantes, materiales de desechos infecciosos y materiales quirúrgicos asociados. Desechos anatomo-patológicos: órganos, tejidos, partes corporales que han sido extraídos mediante cirugía, necropsia u otro procedimiento médico. / DESECHOS BIOPELIGROSOS
TIPO "4"	Desechos "Tipo 4", material contaminado con tintas, solventes, resinas, lodos de hidrocarburos / caucho y similares (75 % líquido – 25 % sólido). Mezclas elaboradas con material absorbente. / MEZCLA DE LODOS CONTAMINADOS.

Fuente: Procedimiento interno HZ-OPS-04- Tratamiento térmico-Incineración
Empresa HAZWAT

Dentro de estas categorías, se trabajó con diferentes tipos de desechos, que se describen a continuación:

2.6.1 MATERIALES ADSORBENTES/FILTRANTES/ENVASES/EMBALAJE - TIPO “0”

Se consideró para este proyecto, el plástico polietileno de alta densidad, más conocido como HDPE o el número 2, el cual tiene como uso más común envases de detergentes, shampoo, cremas, lácteos, tuberías, maceteros y bolsas para compras en tiendas y supermercados (Chepe, 2017). Estos desechos son acondicionados antes de ser incinerados, donde son vaciados sin enjuague y triturados.

2.6.2 APROVECHABLES – TIPO “0”

En esta categoría se encuentras residuos que podrían ser utilizados para el reciclaje. Sin embargo, dentro de los servicios que presta la empresa HAZWAT se encuentra el de destrucción de marca, donde llega gran cantidad de ropa, zapatos, joyería, cosméticos, utensilios de cocina, electrodomésticos, producto sin especificación en buen estado que debe ser incinerados por petición del cliente (PTT, 2021).

Para el estudio se consideró:

- Ropa proveniente de empresas que piden el servicio de destrucción de marca, la ropa que se utilizó estaba constituida principalmente de poliéster 39 %; poliéster y algodón 33 % y poliamida 28 %.

- Aserrín libre de contaminantes el cual es utilizado para realizar mezclas con sustancias líquidas (químicos de laboratorio, aceites contaminados, entre otros) y formar mezclas con un mejor poder calórico.

2.6.3 MATERIALES IMPREGNADOS CON HIDROCARBUROS-TIPO “1”

Desechos peligrosos sólidos impregnados con hidrocarburos se considera a todo (EPP) Equipo de Protección Personal como: los textiles, overoles, uniformes

de trabajo, zapatos de seguridad, equipos de seguridad, guantes de trabajo, mandiles, waypes, trapos, materiales filtrantes (filtros de mascarillas de diferente particularidad) y material absorbente (salchichas o corchos absorbentes), que han sido utilizados en alguna contingencia de derrame de sustancias tóxicas (Organización Internacional del Trabajo, 2021; PTT, 2021)

2.6.4 FÁRMACOS - TIPO “2”

Dentro de los fármacos se engloba una gran cantidad de medicamentos caducados en presentaciones como pastillas, pipetas, jarabes, inyecciones, suplementos, artículos de aseo, etc. En esta categoría se eligió a las pastillas que no contengan cloro, para que dentro del proceso de incineración no se formen compuestos organoclorados, perjudiciales para el ambiente (PTT, 2021).

2.6.5 BIOPELIGROSOS - TIPO “3”

Son aquellos desechos que fueron generados durante la atención médica y tienen la condición de causar una enfermedad al poseer agentes biológico-infecciosos los cuales producen efectos perjudiciales a la salud y al ambiente (Valdovinos, 2007). Dentro de esta categoría se puede encontrar: desechos biológico-infecciosos, anatomopatológicos, cortopunzantes, farmacéuticos, radiactivos, químicos peligrosos, dispositivos médicos con mercurio, etc. (Cando et al., 2018).

2.6.6 SOLVENTES/PINTURAS/RESINAS - TIPO “4”

Dentro de esta categoría se encuentran sustancias provenientes de industrias, materiales de construcción, todo tipo de sellantes, variedad de pinturas, resinas de diferente origen, barnices, aditivos, solventes, etc. (PTT, 2021).
Para el estudio se consideró:

- La resina epóxica sirve para recubrir superficies y proteger elementos del polvo y la humedad, su composición química consta de epiclorohidrina o bisfenol A; propileno, fenol y acetona (SRT, 2017).

- El aceite contaminado que ha sido utilizado en procesos industriales, el cual puede ser de origen vegetal como animal debido a que están compuestos principalmente por triglicéridos (una molécula de glicerina y tres ácidos grasos) (Zábala et al., 2016).

2.7 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE DISPOSICIÓN FINAL DE DESECHOS EN LA EMPRESA HAZWAT

El proceso de disposición final en la empresa HAZWAT inicia con la llegada de los desechos a la planta, donde son clasificados por sus características, como se lo menciona en la sección 2.6. y almacenados temporalmente en las diferentes áreas establecidas por la empresa como se detalla en el ANEXO 1, las cuales son:

- Galpón “Fármacos”
- Galpón “Pinturas, resinas”
- Galpón “Químicos”
- Galpón “Aceites y grasas”
- Galpón “Agroquímicos”
- Bloque “Refinerías”
- Bloque “Biopeligrosos”

Como se detalla en la Figura 8, a continuación, se procede a identificar qué tipo de tratamiento es el que se acopla de mejor manera a la particularidad de las características del desecho, ya sea para el tratamiento de incineración, biorremediación, encapsulamiento o reciclaje, (PTT, 2021).

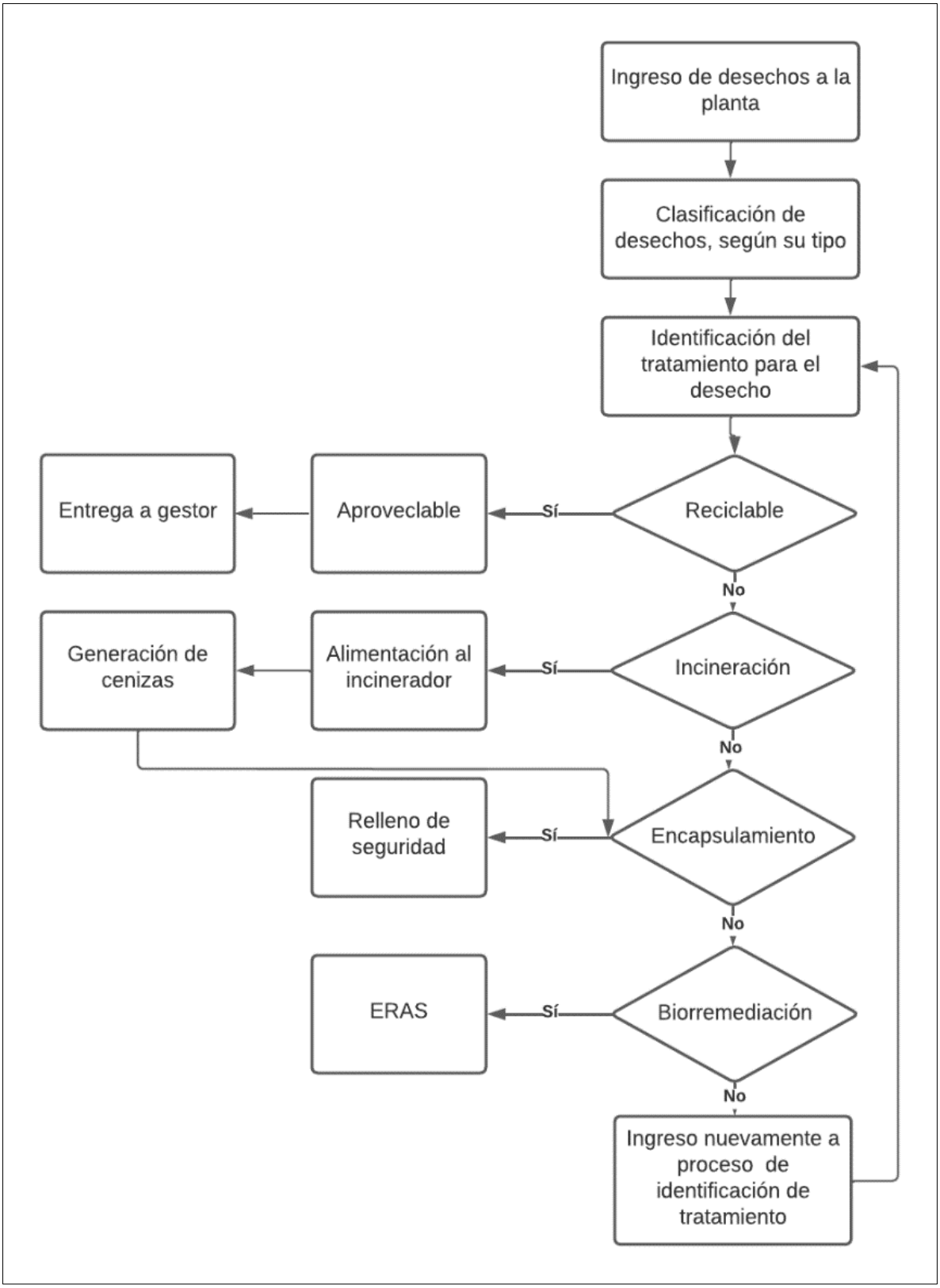


Figura 8. Diagrama de flujo del proceso de la disposición final de desechos en la empresa HAZWAT.

PROCESO DE INCINERACIÓN DE DESECHOS EN LA EMPRESA HAZWAT

El proceso de incineración comienza con la selección de desechos que serán tomados en cuenta para el tratamiento, una vez que los mismos sean liberados por el cliente y autorice la destrucción, ya en este punto, se procede a determinar si los desechos tienen características reciclables, su estado físico separando los que tienen características explosivas (spray o aerosoles), componentes eléctricos, componentes químicos persistentes, alto contenido de cloro e inclusive cualquier otra información importante para estimar su adecuación en el proceso de incineración (PTT, 2021).

Una vez seleccionados los desechos, se trasladan a el área de incineración, donde para facilitar la preparación de la mezcla se determina si el desecho necesita acondicionamiento (trituración) o ya sea por solicitud del cliente para destrucción de marca. Es importante mencionar que este proceso se realiza siempre y cuando los desechos sean susceptibles a este, se descarta objetos metálicos, cortopunzantes, pilas, químicos o desechos con características explosivas (PTT, 2021).

Se establecen los menús de carga a incinerar, el cual debe tener características energéticas altas que favorezcan la combustión, el menú se va alimentando al incinerador en intervalos de tiempo de aproximadamente 13 min, con cargas de 80 a 90 kg. En este punto se revisa la temperatura de combustión y el cierre de la compuerta (PTT, 2021).

Para finalizar se registra el peso de generación de ceniza por turno el cual es aproximadamente un 15% del peso inicial, la ceniza producida es trasladada al proceso de encapsulamiento y depositada en la celda de seguridad. Hay que destacar que el incinerador se encuentra operando por un lapso de 21 días seguidos, los operadores trabajan en 3 turnos de 8 h por día, luego de ese ciclo se realiza un mantenimiento preventivo por un periodo de 15 días, en el cual se limpia los restos de cenizas y escoria retenidos en las cámaras de combustión (PTT, 2021).

2.8 DESCRIPCIÓN DE LA OPERACIÓN Y CONTROL DE EMISIONES GASEOSAS DEL INCINERADOR DE LA EMPRESA HAZWAT

El sistema de depuración de gases en la empresa HAZWAT, busca como objetivo básico, eliminar el material particulado y los contaminantes que se encuentran en fase gaseosa con una eficacia que faculte a cumplir con los límites máximos permisibles dentro de la normativa aplicable (PTT, 2021; Rodríguez & Irabien, 2013).

El incinerador posee un sistema depuración de gases residuales que se detalla a continuación, cómo se observa en la Figura 9.

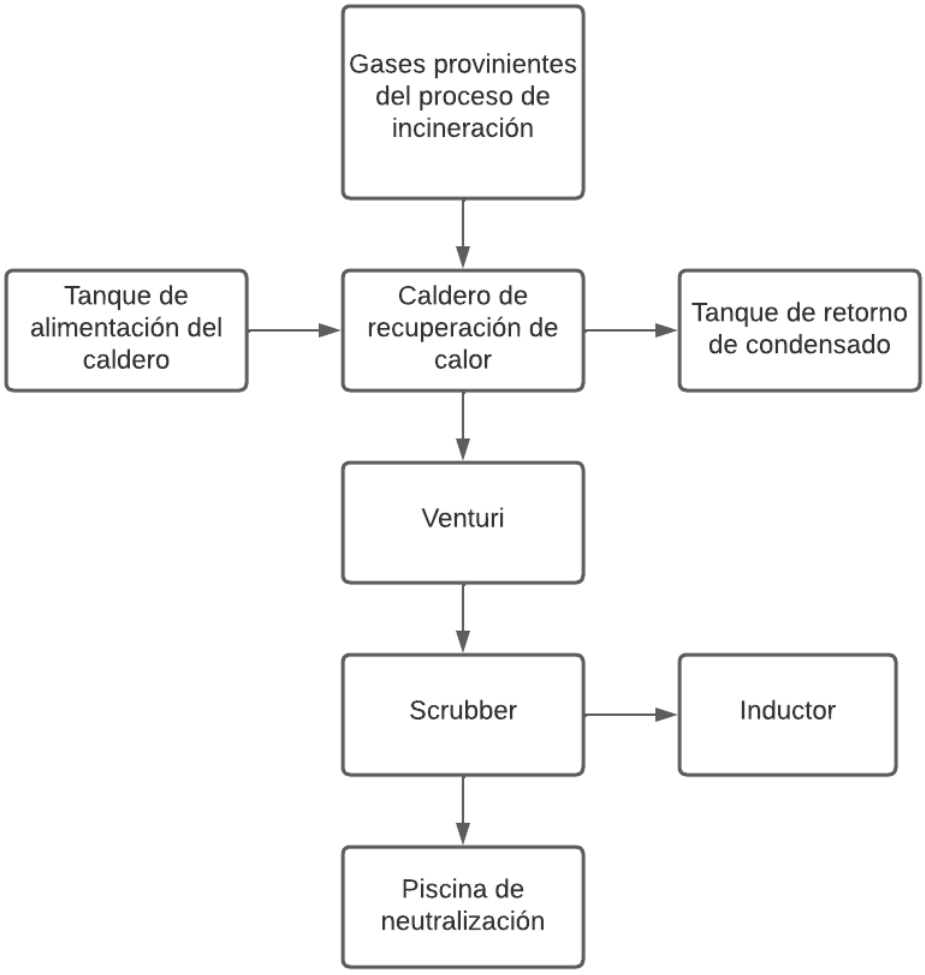


Figura 9. *Diagrama de flujo del proceso de depuración de gases.*

2.8.1 CALDERO DE RECUPERACIÓN DE CALOR

El caldero de recuperación de calor se utiliza para enfriar los gases residuales antes del filtrado. Al mismo tiempo, regula la temperatura de los gases que pasan a través del venturi, scrubber y el inductor, ver Figura 10. Opera entre 50 y 80 psi, con una temperatura de filtrado óptima de aproximadamente 200 °C (PENNRAM, 2015).

La configuración del caldero es contracorriente, los gases se enfrían desde la parte de arriba, mientras que el agua ingresa de abajo hacia arriba, de esta forma el intercambio de calor es más continuo, los gases ingresan con una temperatura de 1 200 ºC y salen a 250 ºC (PENNRAM, 2015).

Figura 10. Caldero de recuperación de calor

2.8.2 TANQUE DE ALIMENTACIÓN DEL CALDERO

El tanque de alimentación, opera como un tanque, un sitio donde se encuentra el agua de reposición fría con el retorno del condensado. En este, se utiliza la energía térmica del condensador de retorno, para disminuir su pérdida y promover de forma efectiva la circulación de vapor (Spirax Sarco, 2001).

El tanque, se mantiene a una temperatura de aproximadamente 88 °C, mediante la inyección de vapor en el agua de reposición fresca. Esto sirve para que se evite choques, en caso de que se necesite agua de reposición (PENNRAM, 2015).

2.8.3 TANQUE DE RETORNO DE CONDENSADO

El tanque de condensado convierte el vapor usado nuevamente en agua, y de esta forma, regresa al caldero de vapor como agua de abastecimiento, además de sostener baja la presión al final de la turbina de vapor y de este modo obtener una máxima energía posible (Parvez, 2018).

Este tanque es necesario, para recuperar agua valiosa en la reutilización del caldero de recuperación de calor. Si se introduce frecuentemente agua nueva al caldero con alto contenido de oxígeno e incrustaciones, es preciso el uso de productos químicos de tratamiento por el riesgo de oxidación de los tubos de la instalación, en un periodo corto de tiempo. Generalmente el costo de reactivos depende del fabricante, el contenido de 100 kg resina catiónica tiene un valor aproximado de 96,00 $. Por eso al condensar el agua para su reutilización una y otra vez, ninguno de estos problemas es un factor y así garantizar la vida útil del caldero (PENNRAM, 2015).

2.8.4 VENTILADOR DE TIRO INDUCIDO

El tiro inducido, también conocido como ventilador inductor o ventolin de tiro inducido, crea una presión negativa, la cual es necesaria para halar los gases a través de los conductos, el caldero de recuperación de calor, depurador húmedo, la chimenea y finalmente empujar los gases residuales limpios hacia la atmósfera, como se observa en la Figura 11. La velocidad del ventilador de tiro inducido, está controlada por un variador de frecuencia para una mejor eficiencia energética, en función de la presión en la cámara principal del incinerador (PENNRAM, 2015).

Garantizan la regulación de la presión en el caldero de recuperación de calor, consumen alrededor del 2% de la producción eléctrica bruta, la temperatura del gas que emplea el ventilador se basa en el rendimiento calculado de la unidad con la carga máxima del caldero. La temperatura afecta al rendimiento del mismo por lo que es importante incluir un margen de temperatura para permitir variaciones en la operación (Pugh, 2004).

Figura 11. Inductor del sistema de lavador de gases

2.8.5 VENTURI

Los depuradores venturi, se utilizan principalmente para controlar el material particulado (MP), incluidos el menor o igual a 2,5 y 10 micrómetros de diámetro aerodinámico, con una eficiencia que varía del 70,0 al 99,0 %. Generalmente este tipo de equipos (ver Figura 12), se limitan al control de MP y gases de alta solubilidad (EPA, 2002). El depurador venturi, usa un flujo de gas descendente vertical en un rango de 0,2 a 478 m^3 /s a una temperatura máxima de 400 °C, acelera la corriente de gas residual para rociar el líquido de depuración y tener un mejor contacto entre gas-líquido. Las cargas del contaminante de los gases residuales pueden oscilar entre 1 a 115 g/m. Está constituido por una sección llamada “garganta”, la cual obliga a la corriente de gas a acelerarse a medida que el conducto se apiña puesto que la presión aumenta, luego el conducto se expande; disminuyendo la velocidad tanto como la turbulencia del gas (EPA, 2002; PENNRAM, 2015).

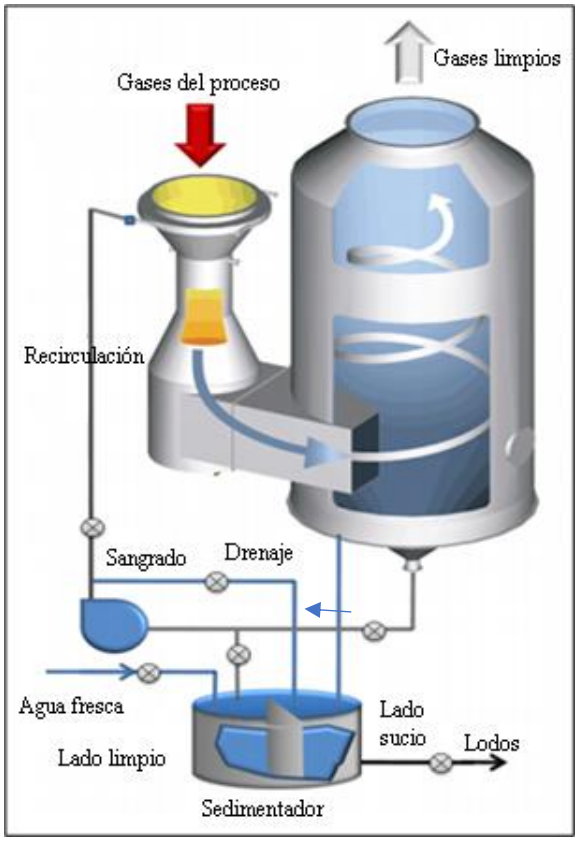


Figura 12. Esquema de funcionamiento Venturi

Fuente: (Verlek, 2022)

Posteriormente, se rocía la solución depuradora en contra corriente del flujo de gas. El líquido de lavado se atomiza en pequeñas gotas por la turbulencia a la que se sometió, incrementando la interacción entre gota y partículas. Luego de pasar por la sección de la garganta, la mezcla reduce la aceleración, ayudando a que las gotas se aglomeren. El exceso de gotas de líquido se separa de la corriente por medio de una sección de arrastre constituido por un separador ciclónico (EPA, 2002; PENNRAM, 2015).

Este equipo cuenta, con una entrada de pared húmeda para evitar la acumulación en una unión seca. Una garganta ajustable para permitir la modulación de la velocidad del gas y la caída de presión, y un codo ubicado debajo del equipo para disminuir el desgaste que producen las partículas abrasivas. Este sistema se lo utiliza como pretratamiento para el depurador húmedo (EPA, 2002; PENNRAM, 2015).

2.8.6 DEPURADOR HÚMEDO

El propósito del sistema de depuración es eliminar los compuestos que producen ácido de la corriente de gas residual. Los gases residuales salen del venturi y entran en una cámara de extinción de gases donde la temperatura se reduce a 80°C. La solución del depurador se rocía en la cámara de enfriamiento rápido, utilizando varios cabezales rociadores angulares, resistentes a las obstrucciones, operando cada uno a 30 psi, en la Figura 13 se observa una fotografía del depurador húmedo de HAZWAT (PENNRAM, 2015).

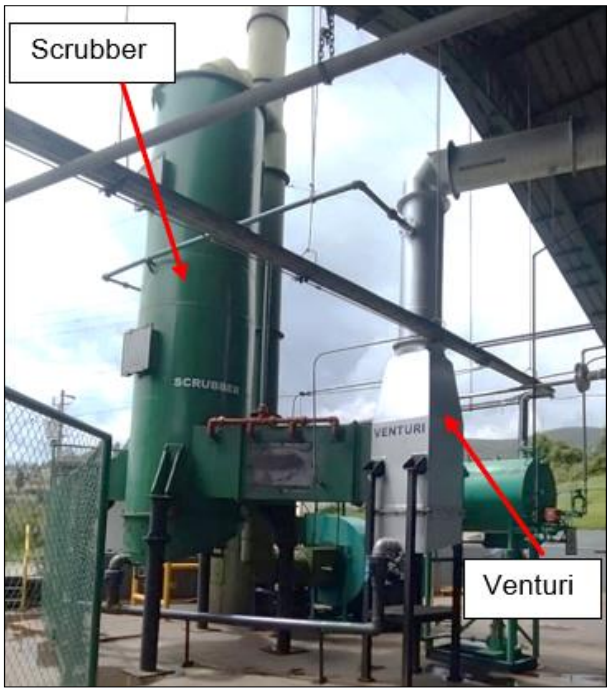


Figura 13. Depurador húmedo-Scrubber

El exceso de solución de depuración vuelve al tanque por el mismo conducto por el cual los gases ingresan nuevamente. El depurador tiene una placa de separación donde se elimina aproximadamente el 99,0% de los contaminantes ácidos (PENNRAM, 2015).

La placa separadora está perforada con aproximadamente 750 orificios direccionales de aproximadamente 5 mm de diámetro. El lado superior de la placa se inunda continuamente con solución de lavado. Los gases residuales pasan a

través de la placa desde el lado inferior y son impulsados a través de la solución de lavado. El nivel de solución se mantiene a unos 10 cm, mediante un cabezal rociador angular resistentes a obstrucciones que opera a 30 psi. El exceso de solución que se desborda por la placa separadora se drena de regreso al tanque (PENNRAM, 2015).

El pH de la solución se mantiene mediante una inyección de 40 % de cal $Ca(OH)_2$ que se bombea a pedido de las condiciones de operación, el nivel de pH de la solución se mantiene entre 6 y 7. A continuación, los gases residuales limpios llegan a la entrada del ventilador de tiro inducido y pasan por la chimenea. El vapor de agua se condensa en las paredes de la chimenea y se drena de regreso al tanque (PENNRAM, 2015).

La salida de la tapa depuradora está equipada con una trampa, para evitar que el agua condensada sea “soplada” hacia el área circundante. La solución del depurador de la cámara de enfriamiento rápido y la placa del separador es suministrada por dos bombas de 2 HP, cada una. La bomba es capaz de pasar sólidos de hasta 0,355 in de diámetro (PENNRAM, 2015).

- Las boquillas de rociado es ¾ in pasarán objetos de hasta 0,24/6 mm de diámetro.
- Y la boquilla rociadora de 1- ½ in a 20 psi pasará objetos de hasta 0,87 in.

2.8.7 PROCESO DE TRATAMIENTO DE AGUAS DEL LAVADOR DE GASES

En la Planta HAZWAT, el proceso de depuración de aguas se asemeja a la Figura 14. En la piscina de neutralización con una estructura de hormigón armado de 5 m^3 de volumen, llegan las aguas residuales resultantes del sistema del lavador de gases, ingresan con un caudal de 1,33 l/s, a una concentración de 8 g/l de $Ca(OH)_2$. En este proceso para neutralizar el pH se utiliza nuevamente $Ca(OH)_2$ para este modo disminuir la acidez del agua y a su vez exista una floculación seguida de precipitación. Los lodos resultantes son enviados nuevamente a la

incineración; mientras que el efluente resultante es descargado directamente al sistema de alcantarillado de la empresa (Camacho et al., 2011; PTT, 2021).

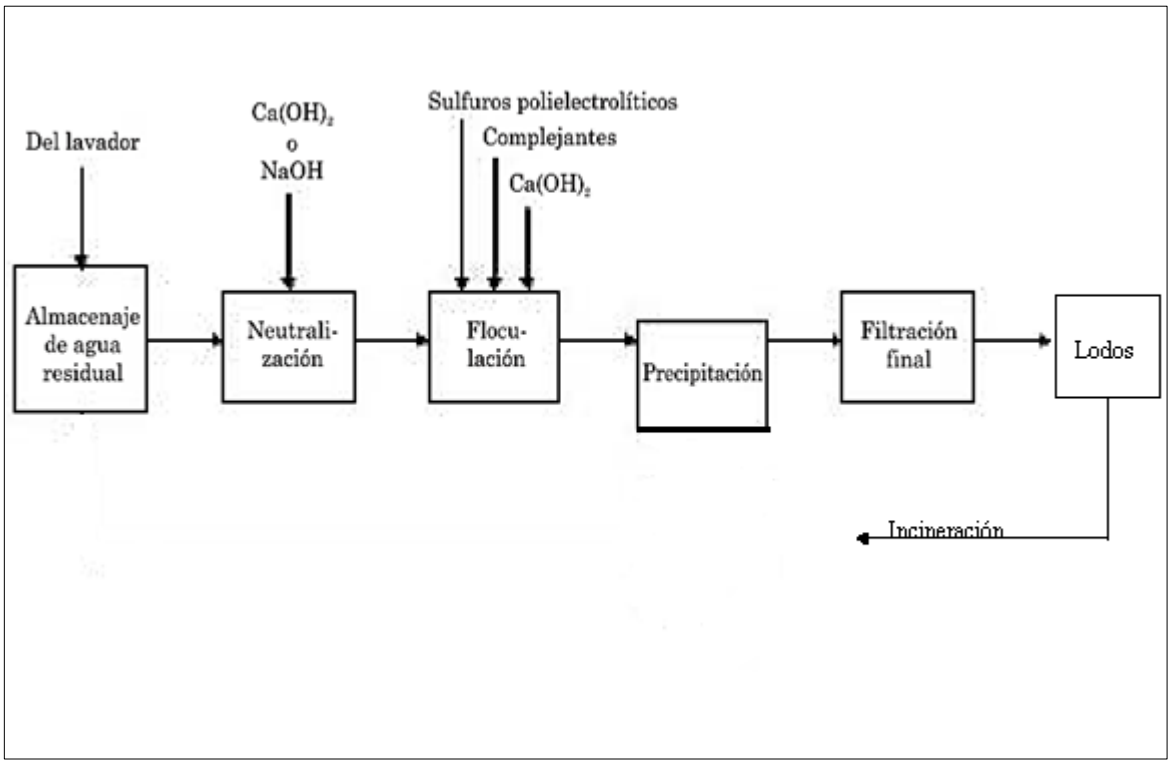


Figura 14. Esquema de proceso para el tratamiento fisicoquímicos del agua residual de un sistema de tratamiento húmedo de gases de combustión.

Fuente: (Camacho et al., 2011)

2.9 BALANCE DE MASA Y ENERGÍA

Para la realización del balance de masa y energía, se utiliza la ley de conservación de energía o la primera ley de termodinámica; es de mucha utilidad en la aplicación a procesos físico-químicos presentes en el sector industrial principalmente (Monsalvo et al., 2014).

En el balance de masa y energía del proceso de combustión en el incinerador, las entradas son: el aire, combustible auxiliar y desechos peligrosos, mientras que en las salidas se presentan las emisiones gaseosas cuyos rangos concentraciones se detallan en la Tabla 3, pérdidas de calor y la ceniza conforme se observa en la Figura 15 (Elías, 2003).

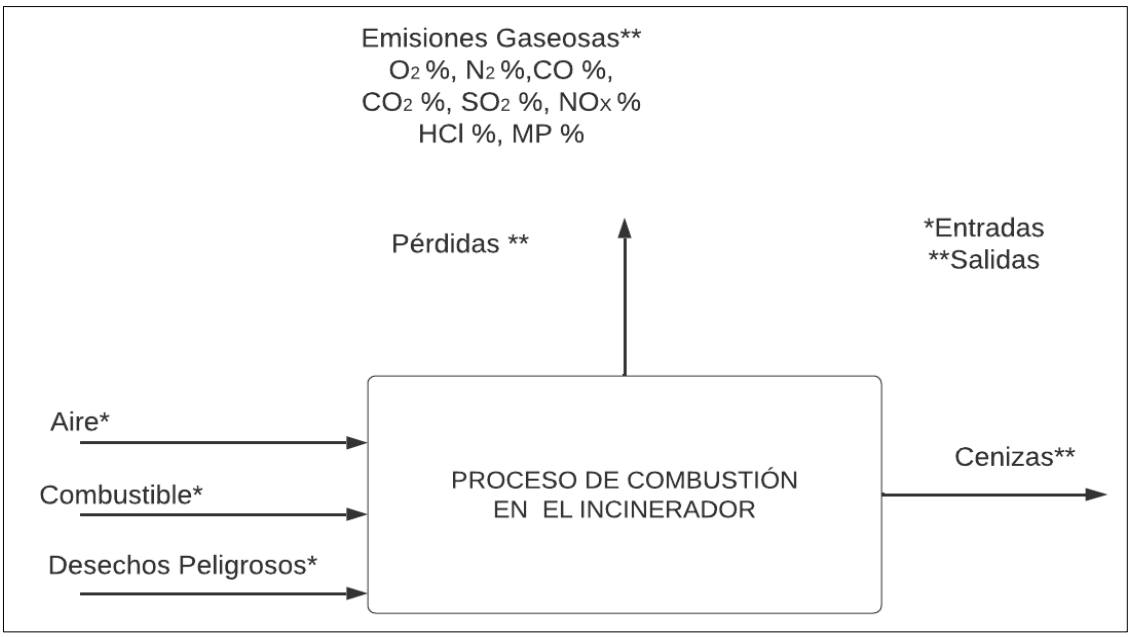


Figura 15. Esquema de balance de masa y energía en un proceso de combustión

*Flujos de entrada; **Flujos de salida

Fuente: (Elías, 2003)

2.9.1 BALANCE DE MASA

Se asume que la adición de las masas de tales elementos debe permanecer constante a diferentes tiempos de mediciones, en dónde la acumulación, la generación y la salida de la materia, es igual a la entrada más la generación de materia que se produzca, como se detalla en la Figura 16 (Felder & Ronal, 2004).

$$\begin{Bmatrix} Acumulación \\ dentro \\ del \\ sistema \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} entrada \\ por\ las \\ fronteras \\ del\ sistema \end{Bmatrix} - \begin{Bmatrix} salida \\ por\ las \\ fronteras \\ del\ sistema \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} \boldsymbol{generación} \\ \boldsymbol{dentro} \\ \boldsymbol{del} \\ \boldsymbol{sistema} \end{Bmatrix} - \begin{Bmatrix} \boldsymbol{Consumo} \\ \boldsymbol{dentro} \\ \boldsymbol{del} \\ \boldsymbol{sistema} \end{Bmatrix}$$

Figura 16. Descripción del balance de masa global

Fuente: (Felder & Ronal, 2004)

2.9.2 BALANCE DE ENERGÍA

Se plantea los cambios energéticos que se producen en un sistema que se desea analizar, en el que la acumulación, más la transferencia hacia fuera del sistema y el consumo de energía, es similar a la generación más la transferencia de energía al sistema, como se indica a continuación en la Figura 17 (Felder & Ronal, 2004).

$$\begin{Bmatrix} Acumulación \\ de\ energía \\ dentro \\ del\ sistema \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} transferencia\ de \\ energía\ al\ sistema \\ a\ través\ de \\ su\ frontera \end{Bmatrix} - \begin{Bmatrix} transferencia\ de \\ enegía\ hacia\ fuera\ del \\ sistema\ a\ través \\ de\ su\ frontera \end{Bmatrix}$$

$$+ \begin{Bmatrix} generación \\ de\ energía \\ dentro\ del \\ sistema \end{Bmatrix} - \begin{Bmatrix} Consumo \\ de\ energía \\ dentro\ del \\ sistema \end{Bmatrix}$$

Figura 17. Descripción del balance de energía global
Fuente:(Felder & Ronal, 2004)

La primera ley de la termodinámica, estable que "La energía no se crea ni se destruye, solo se transforma", que incluye los cambios posibles en la energía interna (Monsalvo et al., 2014).

2.9.3 BALANCE DE MASA Y ENERGÍA EN SISTEMAS CON REACCIÓN QUÍMICA DE COMBUSTIÓN

Las reacciones químicas que se producen en la combustión controlada se generan dependiendo del combustible, para el diésel se encuentra entre 850 °C a 1 200 °C lo que provoca que las reacciones de oxidación sean exotérmicas, produciéndose rápidamente entre el combustible y el oxígeno (Vatavuk, 2002). La combustión se produce mediante la incineración de gas natural, carbón, madera, gasolina, desechos sólidos municipales, desechos peligrosos o desechos médicos (National Research Counci, 2000).

Un incinerador bien diseñado, en su mayoría descompone las moléculas orgánicas e inorgánicas, lo que permite reacciones entre la mayoría de los componentes volátiles de los desechos, como se observa en las reacciones (9), (10) y (11) (National Research Counci, 2000).

A continuación, se indican las principales reacciones que se producen en la combustión:

$$C + O_2 \rightarrow CO_2 + \Delta(calor) \qquad (9)$$

$$S + O_2 \rightarrow SO_2 + \Delta(calor) \qquad (10)$$

$$H_2 + {}^{1}/_{2}\, O_2 \rightarrow H_2O + \Delta(calor) \qquad (11)$$

2.10 NORMATIVA AMBIENTAL NACIONAL

Para la gestión de los desechos peligrosos dentro del Ecuador, existen políticas y normativas ambientales establecidas por la Autoridad Ambiental Nacional (AAN), en las cuales se establece las responsabilidades y actividades que tiene el generador y gestor de desechos peligrosos, para asegurar un manejo integral de estos, garantizando la calidad ambiental mediante el seguimiento de los procedimientos y la evaluación.

2.10.1 ACUERDO MINISTERIAL No. 061, REFORMA DEL LIBRO VI DEL TEXTO UNIFICADO DE LEGISLACIÓN SECUNDARIA,

En el año 2015, el 04 de mayo se publica la Reforma del Libro VI del Texto Unificado de Legislación Secundaria, donde se establece mediante el: Art. 1 Ámbito. - los procedimientos, regula las actividades y responsabilidades públicas y privadas en materia de gestión ambiental. Hay que destacar que las normativas de calidad ambiental han tenido muy poca atención por parte del Estado, en la gestión de proyectos y actualización de estas.

En la SECCIÓN II, se detalla la gestión integral de desechos peligrosos y/o especiales, donde se presentan las actividades que se debe desarrollar en las fases de: generación, almacenamiento, recolección, transporte, aprovechamiento y disposición final. En el Art. 88 se mencionan las responsabilidades al ser generador desechos peligrosos y/o especiales para garantizar un manejo adecuado de los mismos, en conjunto con el Art. 85 Gestor o prestador de servicios el cual tiene la obligación de obtener un permiso ambiental para su debido funcionamiento y control.

2.10.2 ACUERDO MINISTERIAL No. 026, PROCEDIMIENTOS PARA REGISTRO DE GENERADORES DE DESECHOS PELIGROSOS, GESTIÓN DE DESECHOS PELIGROSOS PREVIO AL LICENCIAMIENTO AMBIENTA, Y PARA EL TRANSPORTE DE MATERIALES PELIGROSOS

El acuerdo fue publicado el 12 de marzo del 2007, en el cual se especifica los procedimientos para conseguir el registro generador desechos peligrosos, la gestión de desechos preliminar al licenciamiento ambiental y transporte de materiales peligrosos. Además, describe también los pasos para la solicitud de manejo de los distintos tratamientos previos a la disposición final que recibe un desecho peligroso.

El manejo de desechos peligrosos mediante la Incineración se presenta mediante la solicitud Modalidad D con la clave SGD-SM-INC-01. En este documento se encuentra detallados los requisitos que debe cumplir un gestor para ofrecer este servicio y poder obtener su licencia. Dentro de la información a presentarse, consta de: información general de la empresa, descripción de manejo de desechos peligrosos a través de la incineración y el protocolo de pruebas.

El protocolo de pruebas sirve para demostrar que el tratamiento será eficiente al implementarlo, por medio de un muestreo el cual se realizará en etapas, en series de tres, analizando las siguientes situaciones:

a) En blanco (operación del sistema sin carga).

b) Con subrogados (materiales no peligrosos como arena limpia, aserrín, etc.).
c) Con desechos peligrosos al 85% de la capacidad de diseño del sistema.
d) Con desechos peligrosos al 100% de la capacidad del diseño del sistema.

Los resultados serán presentados como se exhibe en la presente Tabla 4:

Tabla 4.
Datos a obtenerse del monitoreo de emisiones a la atmósfera.

Elementos	**Prueba en blanco (a)**	**Prueba con subrogados (b)**	**Prueba con desecho al 85% (c)**	**Prueba con desechos al 100% (d)**	**Límites máximos permisibles**
PST					30 mg/m^3
CO					63 mg/m^3
NO_x					300 mg/m^3
SO_2					80 mg/m^3
HCl					15 mg/m^3
HC_t					10 mg/m^3
Pb+Cr_{total}+Cu+Zn					0,7 mg/m^3
As+Co+Se+Ni+Mn+Sn					0,7 mg/m^3
Cd					0,07 mg/m^3
Hg					0,07 mg/m^3
Dioxinas y Furanos					0,5 ng/m^3 EQT

Fuente: (MAE, 2007)

Hay que añadir que se debe presentar un balance de masa y energía resultante del proceso de esta manera se puede establecer todas las entradas y salidas que se obtendrá en el proceso. Como es evidente, los procesos que se establecen en la normativa son importantes para analizar si el tratamiento cumple con todos los requisitos para ser implementado. Sin embargo, se puede concluir que falta seguimiento y reglamentos técnicos que faciliten el control de estos procesos (Cando et al., 2018). En lo referente a HAZWAT, se infiere que cumplió con los límites máximos permisibles de la Tabla 4, para la obtención de la licencia ambiental.

2.10.3 ACUERDO MINISTERIAL No. 142, LISTADO NACIONAL SUSTANCIAS QUIMICAS PELIGROSAS DESECHOS PELIGROSOS

Mediante el Registro Oficial Suplemento 856, el 21 de diciembre del 2012, se publica el Acuerdo Ministerial 142: Listado nacional sustancias químicas peligrosas, desechos peligrosos (MAE, 2012), la cual sirve para identificar si un desecho es considerado peligroso, especial o común. De esta forma, al clasificarlo se determinar qué tipo de tratamiento y disposición final se le puede dar al desecho, a continuación, se expone en la Tabla 5 los diferentes Anexos del listado 142. De esta manera, se hizo énfasis en el ANEXO B contenido en el registro oficial, puesto que ayuda a identificar los desechos por medio de la categoría o actividad de dónde proviene el mismo, indicando su característica CRITB, y principalmente señalando su código, para que así pueda ser identificado fácilmente tanto por quien los genera y realiza su gestión integral.

Tabla 5.
Anexos del Listado 142

ANEXO A	Listado N.º 1: Listado de sustancias químicas peligrosas prohibidas.
	Listado N.º 2: Listado de sustancias químicas peligrosas de toxicidad aguda
	Listado N.º 3: Listado nacional de sustancias químicas peligrosos de toxicidad crónica
ANEXO B	Listado N.º 1: Desechos peligrosos por fuente específica
	Listado N.º 2: Desechos peligrosos por fuente no específica
ANEXO C	Listado nacional de desechos especiales

Fuente:(MAE, 2012)

2.10.4 ORDENANZA MUNICIPAL DEL DISTRITO METROPOLITANO DE QUITO No. 138.

La Ordenanza Municipal mediante la sección NT001: Norma Técnica para Emisiones a la atmósfera de Fuentes Fijas tiene como alcance establecimientos públicos o privados que cuenten de fuentes fijas de combustión dentro del DMQ. Cabe mencionar que es la única normativa que establece parámetros de control de

gases para incineradoras a nivel nacional, es por ello, que se la considera para la comparación de criterios en los límites máximos permisibles de emisiones al aire

En la ordenanza se establece las metodologías con las cuales deben ser muestreadas las emisiones, los criterios analizados son: CO, HCl, NOx, SO_2, MP, metales pesados, mercurio, dioxinas y furanos, con una corrección de O_2 del 11 %. En el presente trabajo, la medición de dioxinas y furanos no se realizó debido a que dentro del país no hay un laboratorio que realice estos ensayos. En la Tabla 6, se muestran los límites máximos permisibles de los contaminantes en la emisión de gases en incineradoras.

Tabla 6.
Límites máximos permisibles para emisiones al aire para incineradores contaminante.

CONTAMINANTE	UNIDAD	LÍMITE DE EMISIÓN
CO	(mg/Nm^3)	87
HCL	(mg/Nm^3)	55
NO_x	(mg/Nm^3)	610
SO_2	(mg/Nm^3)	109
MP	(mg/Nm^3)	55

Nota: Todos los valores están reportados para condiciones normales (1 013 mbar, base seca 0º C y 11% de O_2).

Fuente: (Secretaría Del Ambiente, 2001)

CAPÍTULO 3
METODOLOGÍA

3.1 ÁREA DE ESTUDIO

HAZWAT CIA. LTDA, es una empresa especializada en la gestión de desechos no peligrosos, peligros y especiales, dedicada a la asesoría técnica de remediación ambiental, recuperación y co-procesamiento; además se encarga fundamentalmente de la gestión plena de desechos tóxicos peligrosos y/o especiales, de los principales sectores industriales del Ecuador. El otorgamiento de su Licencia Ambiental data del año 2003, en el tratamiento (biorremediación, gasificación térmica) y disposición final (celdas de seguridad) de desechos tóxicos y peligrosos, siendo la primera empresa en el país en obtener con una licencia en este ámbito (HAZWAT, 2017; MAE, 2016).

Cuenta con una oficina matriz en la ciudad de Quito, en el edificio Royal Business, piso 6; y sus plantas de operaciones industriales se encuentran ubicadas en la provincia de Sucumbíos - Lago Agrio, en la vía Lago Agrio-El Coca kilómetro 8 y en Cayambe, en la vía Quito-Cayambe kilómetro 37 ½. Posee certificaciones Internacionales en la Gestión de Calidad ISO 9001 y en la Gestión Ambiental ISO 14001 (HAZWAT, 2017).

El presente estudio se realizó en la Planta Industrial Cayambe, ubicada en las faldas del cerro Pambamarca, perteneciente a la parroquia Otón, del Cantón Cayambe, de la provincia de Pichincha, en la Figura 18 se observa la Planta de operaciones, donde se puede evidenciar que no hay poblaciones cercanas a la misma. Se encuentra a una altura de 2 830 msnm., con una temperatura y presión media anual de 14°C y 1,01 atmósferas respectivamente, siendo un clima templado y frío de alta montaña, cuenta con un área de aproximadamente de 42 852,2 m^2 (HAZWAT, 2017).

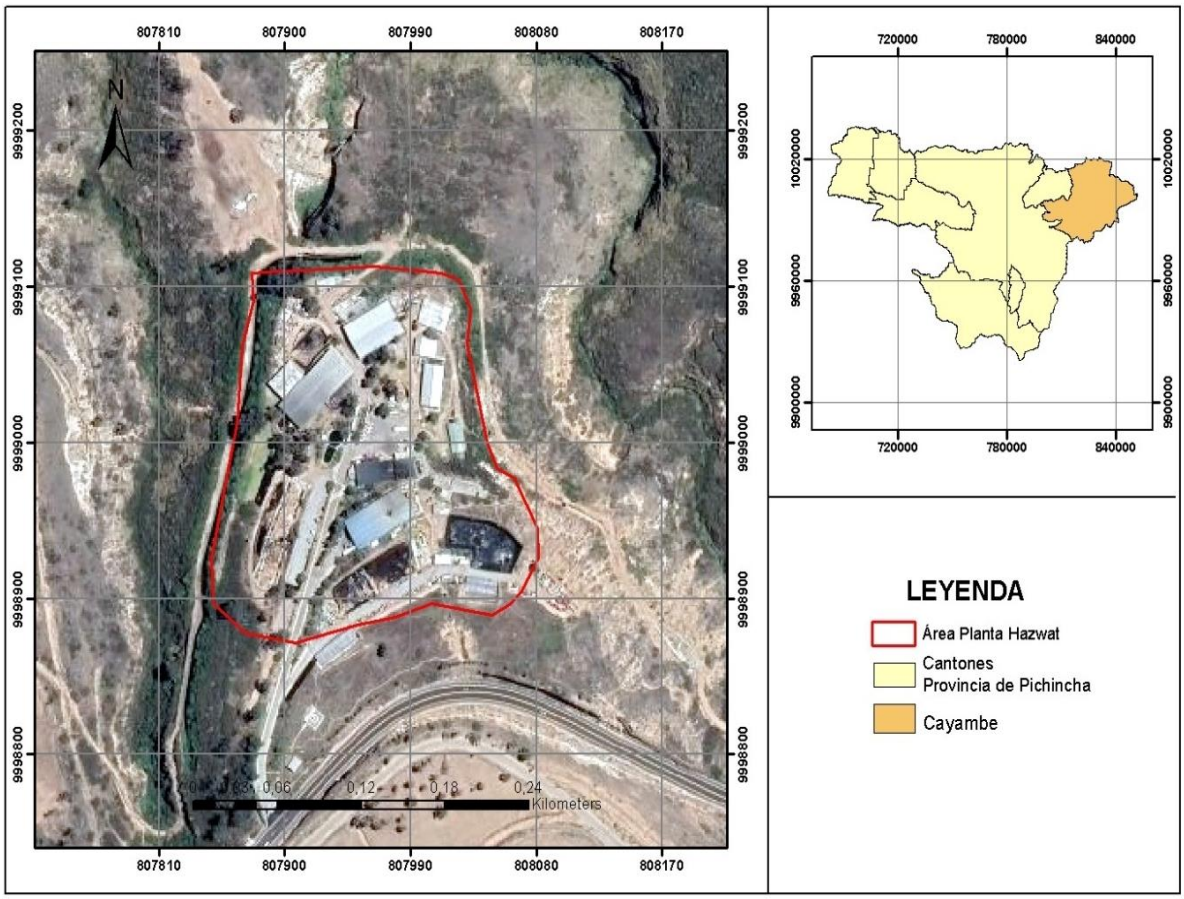


Figura 18. Ubicación de la Planta Cayambe HAZWAT

3.2 RECOPILACIÓN DE DATOS

Para comenzar con el presente proyecto, el 19 de agosto del 2021 se realizó una visita preliminar al Centro de Remediación Ambiental HAZWAT en Cayambe; donde, se conoció toda la infraestructura de la empresa, los servicios que ofrecen, las áreas de trabajo, el manejo de los desechos y los tratamientos de disposición final para su destrucción, la visita guiada por el encargado de la planta, quién mostró e informó sobre los procesos que se realiza en cada área de la empresa. Así pues, se detalló el método a seguir para cada desecho, ya sea para un tratamiento de incineración, encapsulamiento, biorremediación o reciclaje.

Se conoció el área de incineración, se tuvo una explicación de los procedimientos que se realizan para incinerar los desechos, las características básicas del equipo térmico y su forma de operar a través de un sistema de

autocontrol. Además, se hizo un reconocimiento general de todos los desechos que gestiona HAZWAT, uno de los que, en más medida llegaban es el tipo de desechos hospitalarios con una cantidad promedio de treinta toneladas al mes, es por lo que fueron considerados en el menú de carga. Para finalizar se conoció al personal de la empresa.

3.3 RECONOCIMIENTO DE LOS DESECHOS PELIGROSOS EN LA EMPRESA

Se realizó tres visitas técnicas a la empresa, debido a que era imprescindible reconocer la clasificación interna de los desechos y la variedad de sus características, con el fin de escoger los desechos con los que se trabajó en el presente estudio.

- La primera visita se realizó el 1 de septiembre del 2021, en la cual se procedió a inspeccionar cada uno de los galpones existentes en la empresa, donde se almacenaban temporalmente los desechos hasta que sean liberados por el cliente. Se comenzó con el galpón de fármacos, ya que era el que mayor cantidad tenía desde medicamentos, cosméticos, alimentos, entre otros.

- La segunda y tercera visita se efectuó el 7 y 8 de septiembre del 2021 respectivamente, en donde se terminó de reconocer los demás galpones: resinas y pinturas, agroquímicos, aceites y grasas, químicos, bloque de refinería y bloque de biopeligrosos.

Se identificó que muchos de los desechos que llegaron a los galpones no tenían una etiqueta acorde a sus características CRETIB. Se realizó un inventario de los desechos presentes, en el cual se colocó la fecha de llegada a la planta, la cantidad existente, características básicas, el material de presentación, etc. Sin embargo, para los desechos que se encontraban en áreas de difícil acceso y/o contenidos en bulk tanks, se utilizó y analizó la base de datos de los desechos de los últimos años, para identificar su procedencia y sus características. El inventario

obtenido a partir de las visitas técnicas se presenta en el ANEXO 1, se enlistan los desechos con mayor frecuencia en los galpones.

3.4 ELABORACIÓN DEL MENÚ DE CARGA DE INCINERACIÓN

Se elaboró 10 variaciones de un menú de carga de incineración, ya que en la empresa HAZWAT no manejan menús técnicos que aseguren un proceso eficiente de incineración. De esta manera, la finalidad de elaborar menús óptimos es la de disminuir las cargas y concentraciones de los contaminantes resultantes del proceso de incineración que afectan al aire, suelo y agua, garantizando la reducción de costos de operación en un proceso de combustión eficiente, en lo que se refiere a utilizar menor cantidad de combustible auxiliar (diésel), lo cual dará mejores resultados desde una perspectiva económica, social y ambiental.

Para determinar los desechos peligrosos, que serían parte de menú se consideró varios aspectos intrínsecos de cada desecho, como: el poder calorífico, el porcentaje de humedad, si están constituidos o mezclados con sustancias tóxicas, a su vez, que estén libres de metales pesados y compuestos clorados para evitar la formación de gases ácidos, dioxinas y furanos. Por otro lado, también se examinó el volumen de llegada de los desechos a la planta, el stock existente y la compatibilidad en las características de los materiales que los conforman.

Estos aspectos pudieron ser determinados mediante la investigación de datos bibliográficos, procedentes de otros estudios realizados en la incineración de desechos y a través de los análisis de laboratorio específicos efectuados a cada desecho dependiendo su origen y características. La elección final de los desechos tuvo algunas modificaciones, ya que la variación de llegada de los desechos a la planta es muy fluctuante, eligiendo los más frecuentes, los cuales son aceite contaminado, aserrín, pastillas trituradas, EPP contaminado, biopeligrosos, resina epóxica y ropa.

3.5 MUESTREO DE DESECHOS

El muestreo se realizó a fin de recolectar una muestra representativa de cada desecho con los que se trabajó, de este modo, poder realizar los análisis de laboratorio y distinguir sus características. Así pues, con los datos obtenidos en el inventario de desechos se estimó el tamaño representativo de la muestra, de acuerdo con Moreno, (2011), se determinó mediante la ecuación (12).

$$\boldsymbol{n} = \frac{\boldsymbol{T x(z)^2 x(\sigma)^2}}{\boldsymbol{(T-1)x(e)^2 + (z)^2 x(e)^2}} \qquad (12)$$

Donde

n: tamaño de la muestra a ser recolectada

T: kg de la muestra o desecho existente en la planta

z^2: nivel de confianza del 99% = 2,58

σ^2: desviación estándar = 0,01

e^2: Margen de error permitido =0,01

Ya con los datos obtenidos del tamaño de muestra que se necesitaba, se acudió a la empresa HAZWAT por tres ocasiones entre el 4 a 17 de noviembre del 2021, debido a problemas operativos en la despastilladora e inexistencia de los desechos en la planta. Las muestras representativas fueron proporcionadas por el personal operativo a cargo de cada galpón.

A fin de, preservar y evitar que exista algún derrame en el traslado de los desechos desde la empresa al laboratorio, se almacenó a los desechos sólidos o pastosos en fundas plásticas herméticas negras de alta densidad HPDE, como se muestra en la Figura 19 y los desechos líquidos en garrafas plásticas Figura 20. Luego de la recolección, las muestran fueron almacenados provisional en el Laboratorio de Operaciones Unitarias (LOU) de la Escuela Politécnica Nacional y así se garantizó, que el lugar tenga ventilación, se mantenga a temperatura ambiente, libre de agua y evadiendo la exposición al sol.

Figura 19. Recolección de plásticos, pastillas trituradas y resina epóxica

Figura 20. Recipiente utilizado para la recolección de aceite contaminado

3.6 ANÁLISIS DE LABORATORIO DE LAS MUESTRAS A INCINERAR

En la Tabla 7, se enlistan los ensayos que se realizaron en los distintos laboratorios de la Escuela Politécnica Nacional para los diferentes desechos provenientes de la planta HAZWAT. En los ensayos de laboratorio realizados se

describe el método guía, el laboratorio utilizado y el número de réplicas, dependiendo de los datos que se desea obtener para cada desecho y en base a los resultados obtenidos considerar una pertinente variación en la cantidad de cada desecho, expresado en forma de porcentaje en peso dentro de los menús de incineración propuestos

Tabla 7
Métodos usados a los desechos peligrosos para la incineración.

DESECHO	ANÁLISIS	MÉTODO USADO
Aserrín	Porcentaje de humedad Poder calorífico	ASTM -CS66-97 ASTM-5865-10ª
EPP contaminado	Porcentaje de humedad Análisis de Aceites y grasas Poder calorífico	ASTM -CS66-97 D 5369 – 93 ASTM-5865-10ª
Pastillas trituradas	Porcentaje de humedad Análisis FTIR Poder calorífico	ASTM -CS66-97 AASHTO T 302 ASTM-5865-10ª
Aceite contaminado	Poder calorífico	ASTM-5865-10ª
Recetas propuestas	Contenido de cenizas	NTE 0.544

3.6.1 PORCENTAJE DE HUMEDAD

Se realizó el análisis del porcentaje de humedad puesto que, se necesitó determinar el contenido de agua que poseía cada tipo de desecho. Con la finalidad de analizar si el porcentaje de humedad del menú de carga es el conveniente para que se efectué un adecuado proceso de incineración dentro de las cámaras de combustión.

El ensayo de laboratorio se realizó a los desechos: EPP contaminado, pastillas trituradas y aserrín, donde se tomó como referencia la Norma ASTM Método de ensayo estándar para contenido de humedad total del agregado por secado C566-97. (American Society for Testing and Materials, 2004). Para el resto de los desechos seleccionados se obtuvo los datos mediante revisión bibliográfica.

El ensayo se desarrolló en las instalaciones del Laboratorio de Análisis Instrumental (LAI) de la Escuela Politécnica Nacional, se comenzó efectuando un pretratamiento a los desechos para homogenizar la muestra. El proceso se realizó por triplicado en cada muestra de los desechos seleccionados. Para el ensayo se requirió de los siguientes equipos:

- Crisoles
- Pinzas
- Mortero
- Desecador con sílica gel
- Balanza analítica
- Estufa

Pretratamiento de desechos:

Dentro del pretratamiento se acondicionó a los desechos para que puedan ser homogéneos y manipularlos de mejor manera en los crisoles.

- Se volvió a triturar las pastillas con ayuda de un mortero, ya que estaban casi enteras por un problema técnico en la despastilladora de la planta.
- Se dividió el EPP contaminado con unas tijeras colocando pequeñas partes de los diferentes materiales que contenía la muestra representativa.

Análisis de contenido de humedad:

- Se tararon los crisoles usando la estufa a una temperatura de 102 ºC ± 2ºC por 3 horas.
- Se procedió a sacar los crisoles y colocarlos en un desecador con sílica gel por 30 minutos.
- Se pesó los crisoles en una balanza analítica de precisión 0,1 mg y se los etiquetó.
- Se pesó las muestras tomando en cuenta su volumen.

- Se colocó los crisoles dentro de la estufa a una temperatura de 102 $\pm$ 2 ºC por 24 horas.
- Al siguiente día se retiró los crisoles y se les colocó nuevamente en el desecador por 30 minutos.
- Se procedió a pesarlos y registrar los datos.
- Se realizó el cálculo de contenido de humedad de cada desecho con la ecuación (13):

$$\% H = \frac{W_2 - W_3}{W_2 - W_1} \times 100 \qquad (13)$$

% H: Porcentaje de humedad

W_1: Peso del crisol con la muestra húmeda (g)

W_2: Peso del crisol con la muestra seca (g)

W_3: Peso inicial del crisol (g)

3.6.2 PODER CALÓRICO

El análisis de poder calórico se realizó, para conocer la cantidad del calor desprendido al incinerar cada tipo de desecho. Con el fin de asegurar una incineración adecuada, a una temperatura estable y disminuir el consumo de combustible auxiliar.

En el ensayo de laboratorio se analizó a los desechos: EPP contaminado, pastillas trituradas, aceite contaminado y aserrín, en base a la Norma ASTM D 5865-10a: *Standard Test Método for gross calorific value of coal and coke* (ASTM, 2011). Los datos de poder calórico para los demás desechos se los obtuvo mediante revisión bibliográfica tomando en cuenta sus componentes principales detallados en el ANEXO 8.1.

El análisis se realizó en las instalaciones del LAI de la Escuela Politécnica Nacional, donde se utilizó los siguientes materiales:

- Bomba calorimétrica
- Cápsula de muestra
- Alambre de ignición

El proceso se realizó por triplicado y se lo describe a continuación:

- Se realizó la estandarización del equipo en las condiciones ambientales, dentro de lo establecido, a temperatura entre un rango de 15-30 °C y con una humedad relativa de máx. 80 % sin condensación.
- Se calibró la bomba calorimétrica con ácido benzoico.
- Se pesó en la cápsula 1 g de muestra.
- Se colocó el alambre que va a dar la chispa para la ignición en la cápsula con la muestra.
- Se introdujo la cápsula dentro de la bomba calorimétrica.
- Se inició al proceso dando paso al oxígeno hacia la bomba.
- Se esperó a que el equipo termine el proceso.
- Se desarmó la bomba calorimétrica desconectando la fuente de ignición.
- Se procedió a sacar la cápsula con los restos de muestra.
- Se obtuvo los datos registrados por el equipo.

3.6.3 ANÁLISIS DE IDENTIFICACIÓN DE COMPUESTOS

Se realizó el análisis de FTIR “Espectroscopía Infrarroja por Transformada de Fourier” para conocer la composición de las mezclas moleculares, de esta manera, garantizar que no existe compuestos halogenados dentro de la estructura del desecho, las cuales pueden generar emisiones tóxicas al momento de ser incinerados.

Para este ensayo se analizó únicamente las pastillas trituradas, ya que, podrían existir compuestos con cloro dentro de sus principios activos. El Método de ensayo AASHTO T302, *Polymer contend of polymer-modified emulsified asphalt* se utilizó para la determinación de grupos funcionales (Salazar Delgado, 2013). El ensayo se efectuó en las instalaciones del LAI de la EPN, por medio de un

espectrofotómetro. El proceso se realizó por triplicado y se lo describe a continuación:

- Se colocó la muestra, previamente molida, aproximadamente 1 g dentro del espectrofotómetro para que este en contacto con la luz infrarroja.
- Se corrió el análisis en tres muestras distintas para ver si la correlación entre las gráficas.
- Se obtuvo los resultados mediante una librería digital del equipo que designaba el grupo funcional perteneciente a un rango de longitud de onda.
- El equipo arrojó los datos para ser analizados dependiendo al grupo funcional al que pertenecía.

3.6.4 ANÁLISIS DE ACEITES Y GRASAS

El análisis de aceites y grasas se realizó para ver si el porcentaje dentro del desecho analizado es considerable como para aportar una mayor cantidad de calor al momento de ser incinerado. Así pues para conocer el contenido de grasas y aceites, de la muestra del EPP contaminado con hidrocarburos, se tomó como referencia la norma D 5369 – 93, *Extraction of solid waste samples for chemical analysis using soxhlet extraction* (American Society for Testing and Materials, 2003). El ensayo se lo realizó por duplicado, en dos partes en el LOU mediante el uso del equipo soxhlet y el LPQ para el uso del rotavapor y la estufa. Para efectuar el ensayo, se utilizó los siguientes materiales:

- Matraz redondo
- Desecador
- Balanza analítica
- Papel filtro
- Equipo soxhlet
- Estufa
- Equipo de rotavapor
- Solvente (hexano)
- Contenedor de baño maría

- Desecador
- Bomba de vacío

Debido a que el solvente que se utilizó fue el hexano debió reutilizarse por tratarse de una sustancia controlada y su uso fue limitado. El ensayo se realizó por duplicado, el solvente puro se lo utilizó en la primera corrida, mientras que para que la segunda corrida se lo destiló, por lo que la efectividad en esta corrida afectó el resultado del segundo análisis. A continuación, en la Figura 21 se describe brevemente los pasos realizados en el ensayo:

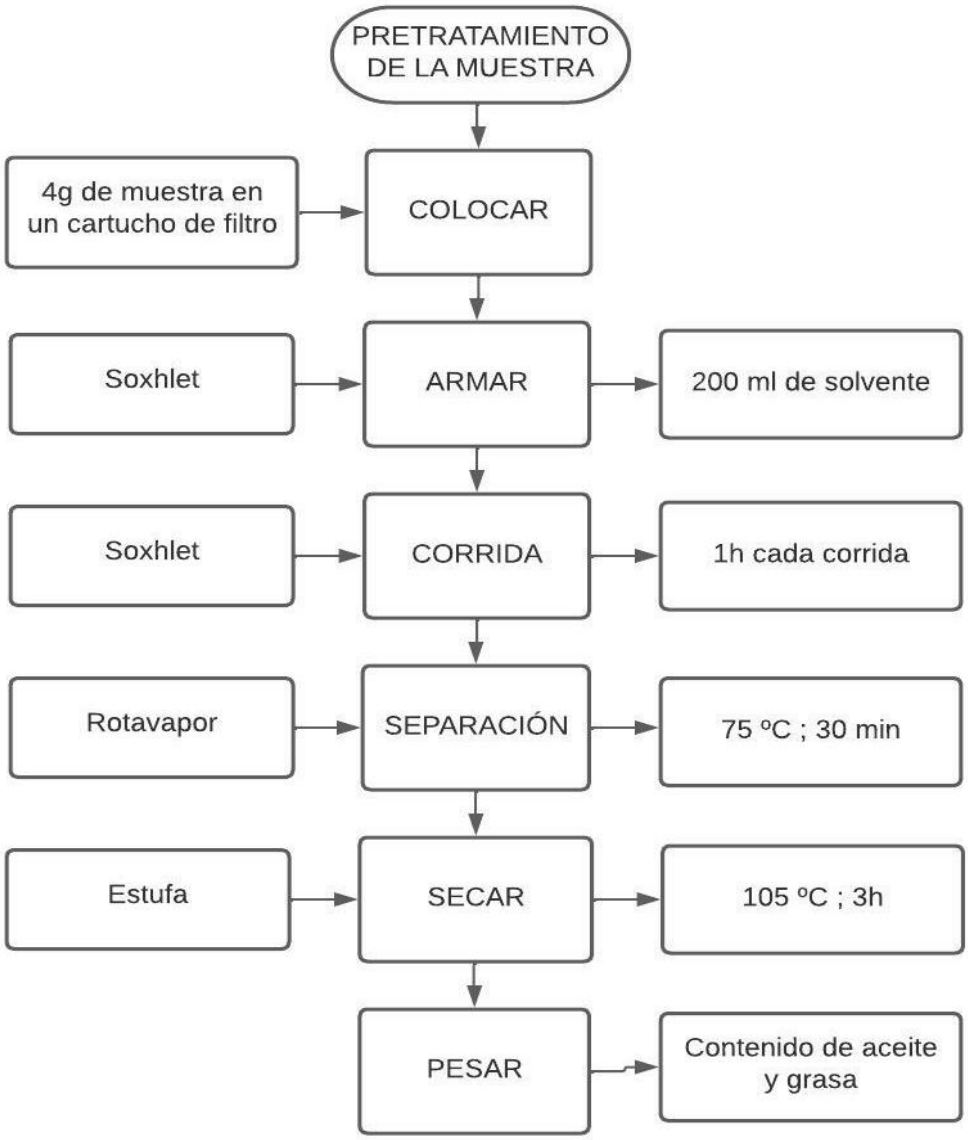


Figura 21. Procedimiento realizado en el ensayo de aceites y grasas

Para la determinación del porcentaje de grasas presentes, se utilizó ecuación (14), que se indica a continuación:

$$G(\%) = \frac{m_2 - m_1}{M} * 100 \qquad (14)$$

En dónde:

m_1 = Peso del matraz redondo vacío (g)
m_2 = Peso del matraz redondo con grasa tras el secado (g)
M = Peso de la muestra en (g)

3.6.5 PORCENTAJE DE CENIZAS DE LOS MENÚS PLANTEADOS

Para la determinación de porcentaje de cenizas, se inició variando los porcentajes en peso de los 8 desechos seleccionados para la conformación del menú de carga, las variaciones de porcentaje dentro de cada categoría se presentan en la Tabla 8.

Tabla 8
Variaciones de porcentaje en peso de cada desecho dentro de las diferentes categorías.

DESECHO	**RANGO %**
EPP contaminado	0,7 - 0,8
Envases plásticos triturados	2,0 - 2,5
Aserrín	4,0 - 10,0
Aceite contaminado	60,0 - 70,0
Pastillas trituradas	5,2 - 7,0
Biopeligrosos esterilizados	7,0 - 9,0
Resina epóxica	4,0 - 17,0
Ropa	1,5 - 2,5

3.6.5.1 Determinación de la variación de porcentaje de cada desecho en los menús de cargas

Para la elaboración de las 10 variaciones de los menús de carga se consideró su influencia de llegada a la planta, su contenido de humedad y poder calórico principalmente. El desecho que tuvo mayor influencia en los menús fue el aceite contaminado, puesto que su existencia en la planta era mayoritaria, además de poseer un buen poder calorífico, y un contenido de humedad muy bajo, los menús propuestos para el estudio se presentan en la Tabla 9.

Tabla 9.
Menús propuestos, variando su composición porcentual de cada categoría.

	COMPOSICIÓN DE LOS MENÚS (%)									
CATEGORÍAS	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**
EPP contaminado	0,8	0,7	0,7	0,7	0,8	0,8	0,7	0,7	0,7	0,8
Envases plásticos triturados	2,4	2,0	2,3	2,5	2,0	2,5	2,1	2,2	2,5	2,0
Aserrín	4,0	10,0	10,0	5,0	12,0	9,0	8,6	6,0	6,0	4,0
Aceite Contaminado	65	60	65	68	58	69	71	69	67	61
Pastillas trituradas	7,0	7,5	7,2	6,5	5,8	5,2	5,6	7,2	6,5	5,8
Biopeligrosos esterilizados	9,0	8,5	8,0	7,5	7,0	8,0	5,0	8,0	7,5	7,0
Resina epóxica	9,4	9,3	5,0	8,0	12,0	4,0	5,0	5,0	8,0	17,0
Ropa	2,40	2,00	1,80	1,80	2,50	1,50	2,00	1,90	1,80	2,50

3.6.5.2 Determinación del porcentaje de ceniza

Se determinó el porcentaje de cenizas debido a que se requería conocer la cantidad de cenizas que se generaba en cada una de las recetas al ser expuestas a un proceso de incineración, utilizando la norma peruana No. 0.544 (2006) como guía.

El ensayo se desarrolló en las instalaciones del Laboratorio Docente de Ingeniería Ambiental (LDIA) de la EPN; se realizó por triplicado y se requirió del uso de:

- Crisoles
- Pinza
- Cucharilla
- Desecador con sílica gel
- Balanza analítica
- Mufla.

El procedimiento realizado se lo describe a continuación:

- Se estableció 10 menús de 25 g cada una que contenían distintos porcentajes de los desechos.
- Se identificó el número de menú con todas sus características y el crisol en el cual se iban a colocar.
- Se procedió a tarar los crisoles usando la estufa a una temperatura de 102 ºC $\pm$ 2 ºC por 3 horas.
- Se traspasó a los crisoles a un desecador con sílica gel por 30 minutos.
- Se pesó los crisoles en una balanza analítica de precisión 0,1 mg y se los etiquetó.
- Se pesó las muestras colocando cada porcentaje de desechos respectivamente.
- Se procedió a programar la mufla por rampas, la primera fue de 0-300 °C subiendo la temperatura por 30 minutos, luego se mantiene la mayor temperatura por una hora, y así sucesivamente con la rampa dos (300-600 °C) y la rampa tres (600-900 °C) realizado el ensayo en un tiempo de 4h30m.
- Se finalizó el proceso de incineración y se dejó que la mufla descienda su temperatura a 150 ºC para retirar las muestras.
- Se colocó los crisoles a un desecador con sílica gel por 30 minutos.
- Se procedió a pesar los crisoles con los restos de ceniza que quedo en ellos.

Con los datos obtenidos se realizó el cálculo de cenizas por triplicado, con la ecuación (15) (Cano, 2016).

$$\%\,Cenizas = \frac{CC - W}{CS - W} * 100 \qquad (15)$$

Donde:

CC = Peso del crisol con la ceniza (g)
W = Peso del crisol vacío (g)
CS = Peso del crisol más la muestra seca (g)

3.7 DISEÑO EXPERIMENTAL DEL MENÚ

Se llevó a cabo el ensayo del porcentaje de cenizas contenido en cada receta, este valor fue considerado como variable dependiente en el diseño experimental, dónde se varió la composición de los desechos peligrosos seleccionados. Luego se realizó una comparación de las varianzas entre los promedios del porcentaje de ceniza resultantes de las diferentes recetas, determinando si las recetas que se propusieron son semejantes entre sí, mediante el análisis estadístico ANOVA (Dagnino, 2014). Para lo cual, se utilizó Minitab, como una herramienta informática para su determinación.

ANÁLISIS DE VARIANZA (ANOVA)

ANOVA con sus siglas en inglés *Analysis of variance*, es un instrumento estadístico, que se utilizó para determinar las diferencias entre las medias de los grupos experimentales. Es un diseño completamente aleatorio y se basa en análisis de la varianza de un factor (medida de dispersión de la variabilidad de un conjunto de datos en relación a su media) (Sawyer, 2009). Para su obtención, se necesitó conocer si las concentraciones medias del contenido de cenizas en los diez menús son iguales. Por ello se consideró que no hay diferencia en las medias de los menús frente a la alternativa de que al menos una media sea diferente de la otra. La variable respuesta es el porcentaje de ceniza, cada menú tiene tres unidades (medición por triplicado), con un total de 30 observaciones. Mientras que la hipótesis nula consiste en que el promedio de los porcentajes de ceniza es igual a la receta 1, como la de la receta 2 y así sucesivamente, por lo tanto, no existe diferencia entre las mismas.

3.8 PRUEBA PILOTO (IN-SITU).

La prueba piloto se realizó dado que se requería conocer si era factible operativamente la incineración del menú seleccionado de las 10 recetas propuestas, de esta forma corroborar la disminución de porcentaje de cenizas de acuerdo con el ensayo realizado a nivel de laboratorio.

La prueba piloto se efectuó en el incinerador PENNRAM ubicado en la Planta HAZWAT Cayambe, en donde se alimentó el menú de carga por tres horas con la ayuda de un carro de carga de 90 kg cada 13 minutos; es decir, 500 kg/h. El proceso de alimentación se describe a continuación:

- Los desechos fueron seleccionados y colocados en el área de almacenamiento de combustión, ver Figura 22.

Figura 22. Desechos en el área de combustión
Fuente: HAZWAT

- Luego, se fue pesando los desechos de acuerdo con los porcentajes del menú de carga establecido, ver Figura 23.

Figura 23. Pesaje de desechos

- Al completar los 90 kg en el carro de carga, se procedió a suministrarlos a la incineradora, ver Figura 24.

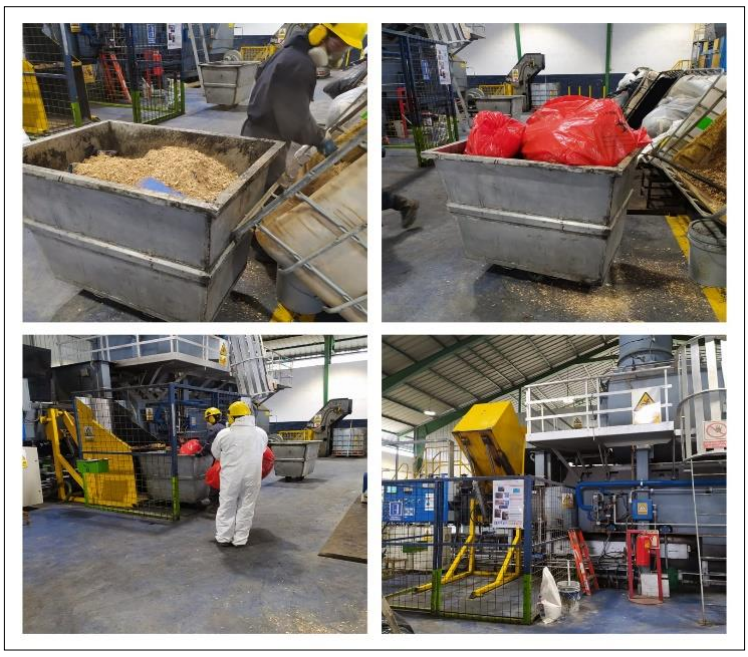


Figura 24. Alimentación de carga al incinerador

- Al final se registró el peso de la ceniza resultante por turno de incineración.

3.8.1 CARACTERIZACIÓN DE EMISIONES ATMOSFÉRICAS

Para realizar la caracterización de los contaminantes como: MP, CO, SO_2, NO_X y HCl los resultados de las valoraciones efectuadas deben presentarse en gas seco en condiciones normales (273 K y 101,3 kPa), ajustándose a un porcentaje de oxígeno a la salida, para que puedan ser comparados con los límites máximos permisibles (Rodríguez & Irabien, 2013). Para corregir la dilución por oxígeno se debe cotejar el oxígeno referencial con el oxígeno medido, este dependerá de la valoración del equipo con el que se toman las muestras, utilizando la siguiente ecuación (16) se corrige la medida con el porcentaje de oxígeno (MAE, 2015):

$$C_C = \frac{(21 - C_{OR})}{(21 - C_{OM})} C_{CM} \qquad (16)$$

C_C: concentración de contaminante relacionada al gas seco en condiciones normales y modificada con la concentración de oxígeno establecido en (mg/m^3 y ng/m^3).

C_{OR}: concentración de oxígeno de referencia (%).

C_{OM}: concentración de oxígeno medida, aludido a los gases a gas seco, en los gases de escape (mg/m^3).

C_{CM}: concentración de contaminante medida, aludido a gas seco en condiciones normales (mg/m^3 y ng/ m^3).

Para la caracterización de las emisiones atmosféricas, que se produjeron al incinerar el menú seleccionado en la prueba piloto de la Planta HAZWAT, se realizó un monitoreo en dos puntos, el primero fue realizado al final del sistema del lavador de gases y el segundo punto fue tomado en las emisiones de la chimenea que salía directamente del incinerador; con el fin de conocer las concentraciones de SO_2, CO, NO_X y MP, lo realizó el laboratorio acreditado (CICAM) Centro de Investigación y Control Ambiental ver Figura 25 y 26. En cuanto al monitoreo del material particulado, en el segundo punto hubo complicaciones, puesto que la sonda isocinética *Stainless Steel* tenía un rango de temperatura máximo de 650 ºC (APEX INSTRUMENTS, n.d.), y la emisión de gas de la chimenea salían una temperatura

de 820 ºC, lo que ocasionó que no se pueda tomar la medida con el equipo en ese punto.

Figura 25. Preparación de impingers

Figura 26. Monitoreo de gases

El CICAM utilizó la metodología PE-V-08 “Procedimientos de ensayo para la medición de gases de combustión”; PE-V-10 “Procedimiento de ensayos para la

medición de material particulado” con referencias de: Gases EPA CTM 30 Y EPA CTM 14 y Material Particulado EPA 1-5.

El proceso de instalación del equipo de análisis de MP duró una hora, (ver Figura 28), mientas que el tiempo de medición se llevó al cabo de dos horas, (ver Figura 29), donde se usó un analizador de gases portátil, de marca Testo, modelo 350 XL, serie 1810805; un anemómetro y GPS, para la medición de MP se necesitó de la consola de muestreo isocinético. Las incertidumbres para la cuantificación son: CO de 0,76 %, SO_2 de 1,04 %, NO y NO_2 de 1,20 % y 2, 58 % respectivamente; el O_2 de 0,12 % y MP de 4,22 ppm.

Posteriormente el CICAM entregó los informes de monitoreo, ver ANEXO 6, en dónde los resultados se compararon con la TABLA 2: límites máximos permisibles de concentración de emisión de contaminantes al aire para calderos (mg/Nm^3) del ANEXO 3 del libro VI del TULSMA, Norma de emisiones al aire para fuentes fijas, lo cual no es correcto debido a que se debe comparar con una normativa para incineradores, por lo que se utilizó la TABLA 3: Límites máximos permisibles para emisiones al aire en incineradores de la Ordenanza Municipal 138.

3.8.2 ANÁLISIS DE ÁCIDO CLORHÍDRICO

El análisis de ácido clorhídrico se realizó debido a que se necesitó conocer su concentración antes y después del lavador de gases en las emisiones resultantes de la incineración. Con la finalidad de comparar los resultados entre los límites máximos permisibles de las emisiones atmosféricas de la normativa vigente.

Para la toma de muestras de cloro, se preparó la solución absorbente, se tomó como referencia la Norma NTP 115 Instituto Nacional de Seguridad e Higiene del Trabajo (NTP 115: Toma de Muestras de Cloro, 2000), presente en el ANEXO 5. Una vez obtenida la muestrear se procedió a determinar el contenido de cloro presente mediante la Norma NMX-AA-073-SCFI-2001: *Determination of total chlorine in natural water, wastewaters and waste waters treated - test method* (Secretaría de Economia México, 2001).

El análisis se realizó en las instalaciones del LAI de la EPN, donde se utilizó los siguientes materiales:

- Bureta
- Soporte con base
- Pinzas
- Reactivos
- Pipetas
- Propipetas
- Balanza analítica
- Matraces
- Vasos de precipitación
- Tirillas de pH

El análisis se hizo por duplicado. A continuación de describe el proceso:

- Se acondicionó 50 ml de muestra ajustando el pH entre 7 y 10 empleando las disoluciones de ácido sulfúrico (0,1N) y/o hidróxido de sodio (0,1N).
- Para la valoración se utilizó la muestra acondicionada.
- Se adicionó 1 ml de disolución de cromato de potasio (indicador).
- Luego se procedió a titular con la disolución patrón de nitrato de plata hasta un viraje de color amarillo a naranja lechoso.
- A partir de los datos se determinó la concentración de iones de cloruro a partir de la ecuación (17).

$$Cl = \frac{[(A - B)x\ N\ X\ 35{,}450]}{ml\ de\ muestra} \qquad (17)$$

Donde:

A: ml de disolución de nitrato de plata utilizados en la titulación de la muestra.
B: ml de disolución de nitrato de plata utilizados en la titulación del blanco.
N: normalidad del nitrato de plata.

3.8.3 CARACTERIZACIÓN DE METALES PRESENTES EN LA CENIZA

Se realizó el ensayo debido a que se requirió conocer las concentraciones de metales existentes en la ceniza resultante de la incineración. Con la finalidad de comparar las mismas con los límites permisibles en la normativa vigente. Los ensayos fueron realizados por el CICAM utilizando la metodología de espectrofotometría de absorción atómica.

Primero se realizó el secado de muestra, triturado y homogenización siguiendo el procedimiento mostrado en la Figura 27, luego se continuó con la digestión de sólidos (ver Figura 28), para finalmente determinar la concentración de metales presentes por medio de absorción atómica (ver Figura 29), de acuerdo con el metal a analizar por medio de diferentes procedimientos que se exponen en la Tabla 10.

- Secado de la muestra, triturado y homogenizado

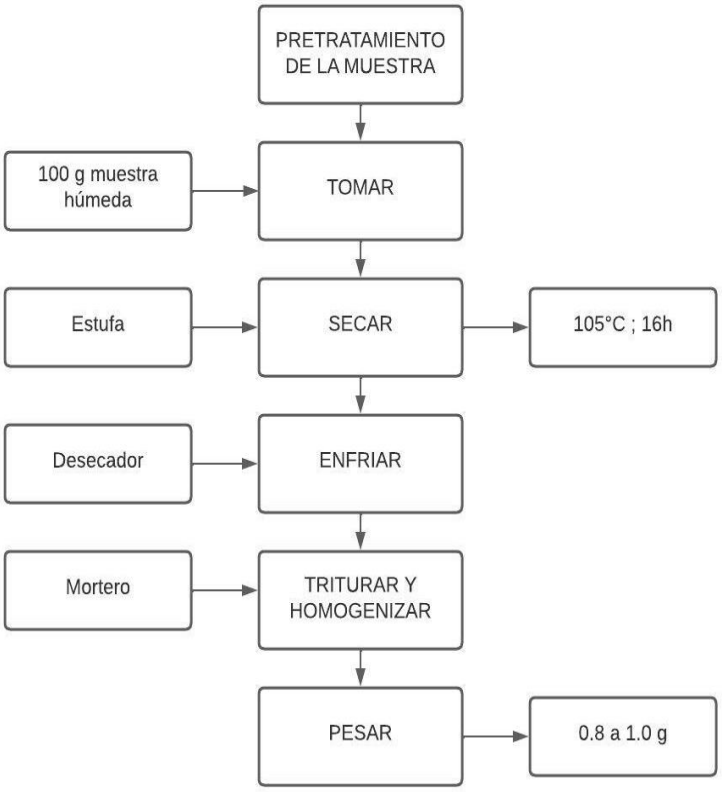


Figura 27. Pretratamiento de la muestra

Fuente: CICAM

- Digestión de sólidos

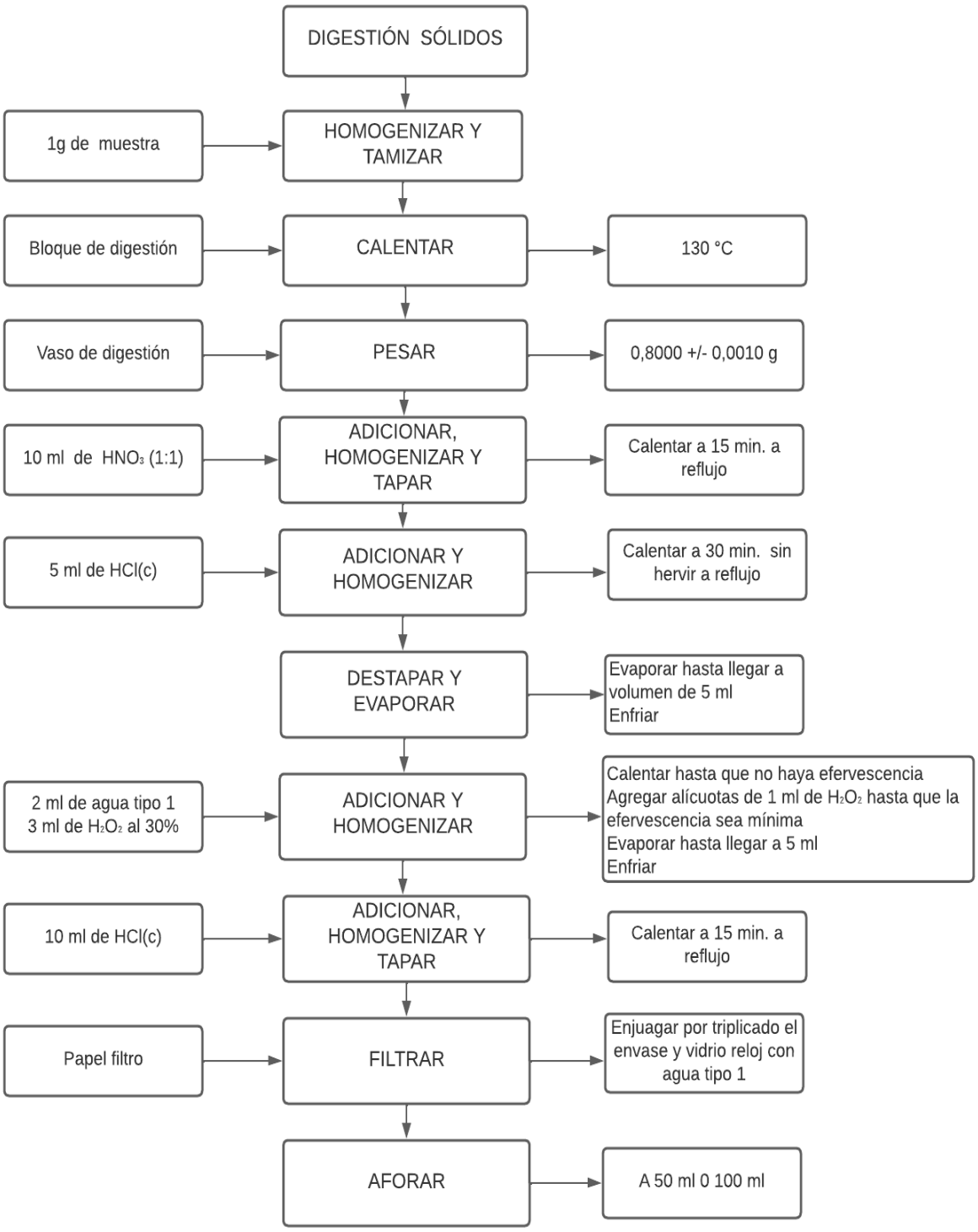


Figura 28. Procedimiento para la digestión de sólidos

Fuente: CICAM

- Absorción atómica

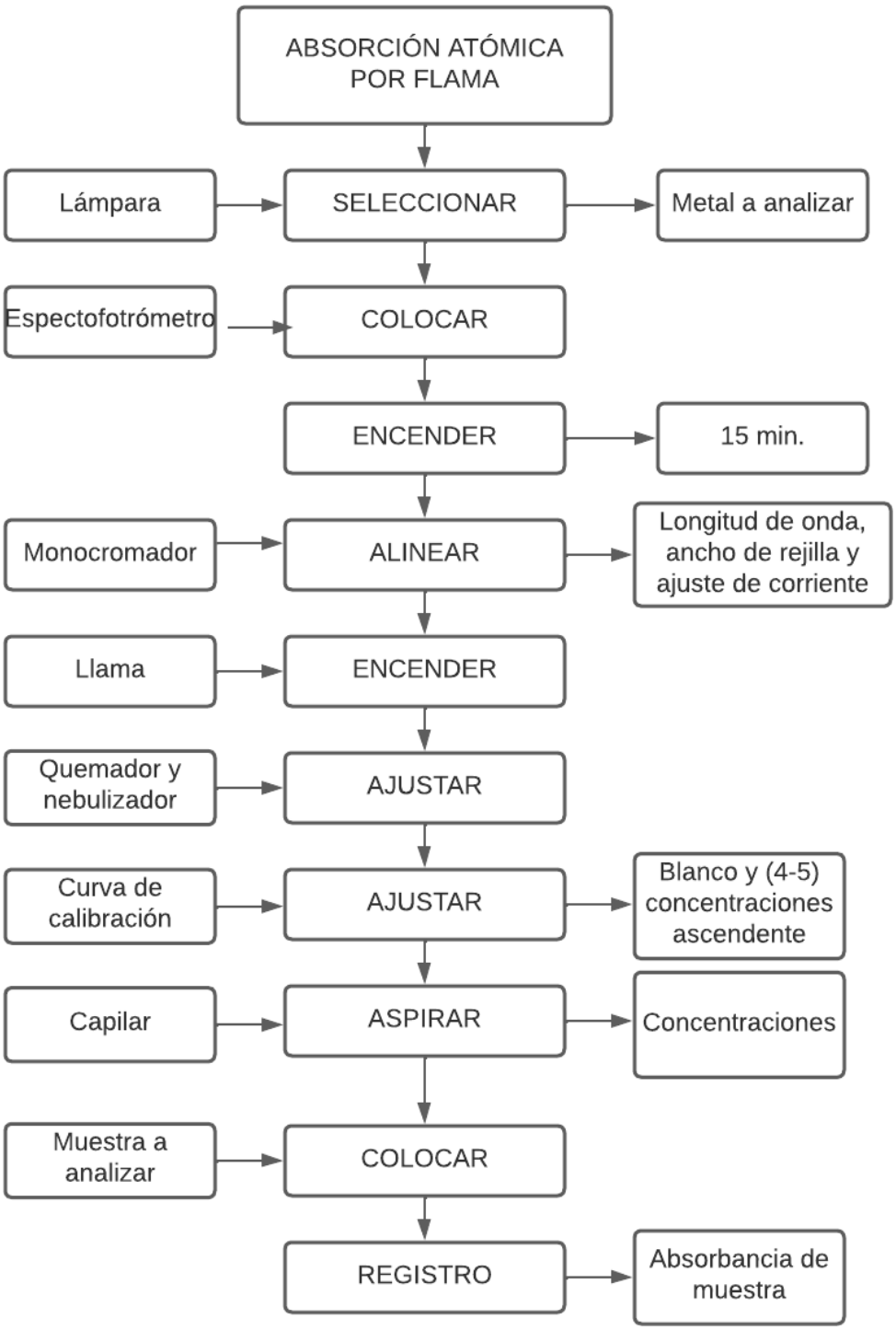


Figura 29. Proceso de absorción atómica

Fuente: Method 7000B, EPA.

Tabla 10.
Procedimiento para la determinación de metales por absorción atómica en sólido (ceniza) por medio de flama, horno de grafito e hidruros.

N.º	Parámetro	Procedimiento
1	Arsénico	EPA 7010
2	Bario	EPA 7000B
3	Cobalto	EPA 7000B
4	Cobre	EPA 7000B
5	Cromo total	EPA 7010
6	Estaño	EPA 7010
7	Manganeso	EPA 7000B
8	Mercurio	EPA 7074A
9	Níquel	EPA 7010
10	Plata	EPA 7000B
11	Plomo	EPA 7010
12	Selenio	EPA 7010
13	Zinc	EPA 7000B

Fuente: CICAM

3.9 BALANCE DE MASA Y ENERGÍA EN EL PROCESO DE INCINERACIÓN

Para el balance de masa y energía, se asumió que la combustión fue completa, tanto el C y el H reaccionaron con el O_2, las reacciones se presentaron anteriormente en la sección 2.9.3 del presente documento; mientras que la reacción con el S no sucedió, debido a que no se encontraba en la composición de los desechos peligrosos ni en la del combustible (diésel) que se utiliza en la alimentación del incinerador; a su vez tampoco existió acumulación ni generación de materia en el sistema, por lo tanto, la entrada fue igual a la salida.

El balance sirvió para conocer de manera teórica, los flujos molares y de calor antes y después en el proceso térmico; además del tiempo de residencia en el que la cámara postcombustión llega a disminuir la concentración de compuestos

tóxicos presentes en los gases, considerando el caudal de gas de la cámara y el volumen de esta.

Cabe destacar, que las cantidades de metales y cloro no se consideraron en el balance de masa por tener bajas concentraciones (ppm) en la composición química de los desechos. Además, se consideró un flujo de cenizas del 14 % valor típico de la producción de ceniza en la empresa HAZWAT (PTT, 2021).

Para el cálculo de los flujos de carbono e hidrógeno de entrada, se determinó con la composición porcentual química de cada uno de los desechos multiplicándolo por el porcentaje individual de actuación en el menú de carga seis, es preciso mencionar que para los desechos que se consideraron como heterogéneos (compuesto de diferentes tipos de materiales), se tomó en cuenta su composición química más predominante, ver ANEXO 8.1.

Para el cálculo del balance de masa y energía, se utilizó:

- La simplificación de la ecuación global de materia da como igualdad que la entrada (E) es igual a salida (S).

$$E = S$$

- Calor sensible (Q_s), calor necesario que un cuerpo recepta para aumentar su temperatura sin perjudicar su estructura molecular, proporcional a la masa del cuerpo, a un diferencial de temperatura y un calor específico (Felder & Ronal, 2004):

$$Q_s = \Delta H = m\ x\ Cp\ x\ \left(T_f - T_i\right) \qquad (18)$$

Dónde

ΔH: entalpía del sistema (kJ)
m: masa (kg)
Cp: calor específico a presión constante (kJ/kg*°C)
Ti: temperatura inicial (°C)
Tf: temperatura final (°C)

- Calor combustible (Q_D), calor que aporta el combustible para el aumento de temperatura, el diésel es utilizado en la primera cámara de combustión al encender el incinerador por un periodo de dos horas de precalentamiento, a partir de allí solo existe alimentación de desechos. En cuanto a la cámara de postcombustión el ingreso de diésel es automático, donde se lo utiliza para subir la temperatura de las cámaras de 870 a 1 200 ºC.

$$Q_D = \dot{m}_D x Pc_D \qquad (19)$$

Donde:

Q_D: Calor de diésel (kcal/h)
$\dot{m}_D$: Fujo másico (kg/h)
Pc_D: Poder calorífico del diésel (kcal/kg)

- Cálculo para la obtención de aire en exceso:

$$Aire_{exceso} = \frac{Aire_{\ alimentado} - Aire_{\ teórico}}{Aire_{\ teórico}} \qquad (20)$$

- El flujo másico que se consideró fue de 500 kg/h; el porcentaje de humedad y poder calórico se obtuvo tanto bibliográfica y experimentalmente del análisis global con la composición de la receta que generó menor residuos, el porcentaje de cenizas de la prueba del diseño experimental, el rango de temperaturas tanto de la cámara primaria y secundaria de la operación de la empresa.

3.10 EVALUACIÓN DE LA IMPLEMENTACIÓN DE LOS MENÚS EN LA PLANTA

Se seleccionó dos menús de los diez propuestos, los cuales generaron menor porcentaje de ceniza, alto poder calorífico y bajo porcentaje de humedad. Sin embargo, inconvenientes técnicos, administrativos, costos de producción, la

pandemia, el paro local y nacional, dificultaron la realización de las pruebas piloto en la empresa HAZWAT, por ende, solo se pudo realizar una prueba piloto aplicando un único menú de incineración. A través de todos los ensayos detallados anteriormente, se logró deducir el menú de carga óptimo de acuerdo con los desechos peligrosos utilizados en el presente proyecto de titulación.

Se decidió el mejor menú, principalmente por el porcentaje de ceniza producido en el proceso de incineración, un bajo contenido de humedad y un alto poder calorífico y se evaluó su efectividad a través de los resultados de la prueba piloto, mediante la caracterización de los gases de combustión y metales en el contenido de ceniza productos en el proceso de incineración.

CAPÍTULO 4
RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 INVENTARIO DE DESECHOS PRESENTES EN LA PLANTA HAZWAT

En las visitas que se realizaron a la empresa HAZWAT, se recopiló información acerca de las características de los desechos peligrosos y/o especiales presentes en la planta, para la realización de un inventario general por cada galpón, ver ANEXO 1. A continuación, se describe los desechos seleccionados de cada galpón:

- Galpón Fármacos: se tomó en consideración para el menú de carga a los medicamentos, correspondientes a pastillas trituradas, de los cosméticos a los envases plásticos de las cremas y shampoo. Además de la ropa que llega en mínimas cantidades por destrucción de marca, se los puede evidenciar en el ANEXO 1, Tabla A1.1

- Galpón Pinturas, resinas: se consideró la resina epóxica con mayor stock dentro de la planta, se puede evidenciar en el ANEXO 1, Tabla A1.2

- Galpón Químicos: dentro de esta área se tomó en cuenta el aserrín sin contaminantes, se lo puede evidenciar en el ANEXO 1, Tabla A1.3

- Galpón Aceites y grasas: en esta zona existe una gran variedad de aceites y grasas en distinto estado físico, para el menú se consideró el aceite contaminado en estado líquido a temperatura ambiente, se lo puede evidenciar en el ANEXO 1, Tabla A1.4

- Bloque Refinerías: dentro de esta zona se consideró el Equipo de Protección Personal contaminado con hidrocarburos, se puede evidenciar en el ANEXO 1, Tabla A1.5

4.2 DETERMINACIÓN DE DESECHOS A CONSIDERAR EN EL MENÚ DE INCINERACIÓN

4.2.1 DESECHOS SELECCIONADOS PARA EL MENÚ DE INCINERACIÓN

Una vez consideradas las particularidades propias de los desechos peligrosos y su disponibilidad dentro de la empresa HAZWAT, se establecieron los desechos con los cuales se trabajará dentro del menú. Se presenta la Tabla 11, dónde se detallan los desechos seleccionados en base a las categorías establecidas por la empresa.

Tabla 11.
*Desechos seleccionados para el menú de carga de incineración***.**

CATEGORÍA	DESECHO
Tipo “0”	Envases plásticos
	Aserrín
	Ropa
Tipo “1”	EPP contaminado
Tipo “2”	Pastillas trituradas
Tipo “3”	Biopeligrosos
Tipo “4”	Aceite contaminado
	Resina epóxica

Fuente: HAZWAT

Como se puede ver en Tabla 11, se trabajó con una amplia variedad de desechos, así pues, se tomó desechos de todas las categorías existentes en la empresa, para de esta forma garantizar que el menú sea operativo, debido a la diversidad de desechos que llegan a la planta. A su vez, se consideró la compatibilidad química entre ellos, por lo cual se eligió los que no contengan agroquímicos, metales y compuestos con cloro.

Hay que señalar que los componentes de cada desecho son variables, es por lo cual que se realizó una estimación de los más predominantes en las siguientes categorías: para los envases plásticos (HDPE), ropa (algodón, poliéster

y poliamida), EPP contaminado (algodón, poliéster y PVC polivinilo), pastillas trituradas (ácido acetil salicílico, vitamina C, ibuprofeno y paracetamol).

Según el INEC la suma de desechos peligrosos líquidos producidos en el año 2018, fueron de un total de 24 948 951,51ton/año, detallando el desecho con mayor presencia, los aceites usados con un porcentaje de 57,87 %. Mientras tanto, la generación de desechos peligrosos sólidos fue de 917 622,54 ton/año, en donde se especifica, los desechos biopeligrosos con el 0,79 %; los trapos y waypes contaminados el 1,45 % y de medicamentos no utilizados el 0,89 % (INEC, 2020). Comparando con lo antes expuesto, la empresa HAZWAT recibe una proporción similar en lo que se refiere a: aceite, EPP contaminado y medicamentos, para el tratamiento térmico de las pastillas se debe quitar el blíster mediante una despastilladora.

Es importante aclarar que para la selección del desecho se consideró las necesidades operativas de la empresa HAZWAT, principalmente la destrucción de desechos biopeligrosos, ya que llegan a la empresa en gran cantidad para ser gestionados; debido a que la sobreproducción de insumos médicos incremento un 16 % en las importaciones y exportaciones en el año 2020 en todo el mundo, por la emergencia sanitaria COVID-19, lo que provocó un incremento directo de generación de desechos con carga viral en equipo médico, respiradores, equipos de pruebas, reactivos de diagnósticos, medicamentos, mascarillas, entre otros (OMC, 2021).

Por lo antes expuesto, estos desechos peligrosos se tomaron en cuenta dentro del menú de carga para la incineración. A su vez, gestionar de manera definitiva desechos que se encontraban almacenados en la planta desde hace mucho tiempo, como fue la resina epóxica.

4.2.2 MUESTREO DE DESECHOS SELECCIONADOS

Considerando los desechos seleccionados de cada categoría y su ingreso recurrente a la planta, se determinó un tamaño de muestra representativo el cual se presenta en la Tabla 12.

Tabla 12.
Resultados del tamaño de muestra representativa de los desechos seleccionados para el menú de carga.

CATEGORÍA	DESECHO SELECCIONADO	UNIDAD (kg/mes)	TAMAÑO DE LA MUESTRA (kg)	ENVASE
Materiales adsorbentes	Envases plásticos triturados	4 750,0	6,6	Funda
Materiales adsorbentes	Aserrín	400,0	6,6	Funda
Residuos aprovechables	Ropa	180,0	6,5	Funda
Materiales impregnados con hidrocarburos, lodos aceitosos	EPP Contaminado	25,0	5,4	Funda
Fármacos	Pastillas trituradas	6 000,0	6,7	Funda
Biopeligrosos	Biopeligrosos	*	*	*
Material contaminado	Aceite contaminado	1 007,5	6,6	Caneca
Material contaminado	Resina epóxica	7 997,0	6,7	Balde

*Desecho no muestreado

El peso de las muestras a recolectar varía entre 5 a 7 kilogramos aproximadamente. Hay que recalcar que no se garantiza que la composición química de cada desecho seleccionado sea siempre la misma, puesto que surgen errores al momento de etiquetar el desecho según el AM 142, por parte de la persona jurídica o natural que adquiere el servicio con HAZWAT, lo que provoca que haya problemas al momento de agrupar y tratar los desechos. Tal es el caso de los aceites contaminados, se desconoce su composición química exacta en donde puede existir la presencia de metales, PCBs, azufre, cloro, entre otros

contaminantes (Padilla et al., 2018), dado que su origen cambia dependiendo del tipo de empresa del que procede.

Los desechos biopeligrosos no fueron tomados en cuenta para el muestreo ni los estudios de laboratorio, debido a que pueden llegar a ser un factor de riesgo al manipularlos, ya que contienen una carga viral nociva. Hay que señalar que para la determinación de contenido de humedad y poder calorífico se obtuvo los datos a través de bibliografía existente, y para la prueba piloto el desecho si se tomó en cuenta en el menú de carga de incineración.

4.3 RESULTADOS DE LA CARACTERIZACIÓN DE LOS DESECHOS

4.3.1 PORCENTAJE DE HUMEDAD

Para la obtención del contenido de porcentaje de humedad en cada desecho se utilizó el método de análisis de laboratorio y datos bibliográficos. Se realiza una clasificación de la información con una escala de colores, donde el color azul representa los datos obtenidos por el ensayo de laboratorio y el color gris los datos obtenidos bibliográficamente, los datos obtenidos en el análisis de laboratorio serán presentados en la Tabla 13.

Tabla 13.
Datos obtenidos del cálculo del porcentaje de humedad del análisis de laboratorio

Desecho	**Peso del crisol (g)**	**Peso del crisol + muestra (g)**	**Peso crisol + residuos secos (g)**	**% Humedad**	**%Humedad Promedio**
Pastillas	38,11	48,25	47,47	7,73	**7,64**
	35,75	45,76	44,99	7,69	
	36,74	46,90	46,14	7,49	
EPP	41,43	45,58	45,41	4,24	**4,17**
	33,82	37,83	37,67	3,90	
	34,21	38,44	38,26	4,36	
Desecho	**Peso del crisol (g)**	**Peso del crisol + muestra (g)**	**Peso crisol + residuos secos (g)**	**% Humedad**	**%Humedad Promedio**
Aserrín	37,87	42,91	42,39	10,37	**10,32**
	36,73	41,15	40,71	9,92	

	33,97	37,94	37,51	10,68	

Como se puede evidenciar en la Tabla 13, las tres repeticiones del ensayo en cada muestra de desecho tienen un valor similar entre resultados, garantizando de esta forma que los valores obtenidos son correctos, esto se puede demostrar a su vez al comparar los datos obtenidos de laboratorio con datos bibliográficos, como es el caso de las pastillas trituradas que tienen un contenido de humedad 3,0 a 8,0 % por medio de referencia bibliográfica y el obtenido en el laboratorio es de 7,64 % (Tews, 2007). Una vez conseguidos los datos de laboratorio se presenta en la Tabla 14 el contenido de humedad de cada uno de los desechos que se seleccionó para los menús de carga.

Tabla 14.
Contenido de humedad de cada uno de los desechos elegidos.

Categorías	**Humedad (%)**
EPP contaminado	4,17
Envases plásticos	1,50 [(a)]
Aserrín	10,32
Aceite contaminado	0,01 [(b)]
Pastillas trituradas	7,64
Biopeligrosos	44,75 [(c)]
Resina epóxica	0,58 [(d)]
Ropa	9,25 [(e)]

Escala de color: azul (datos ensayo de laboratorio); gris (datos bibliográficos)

Fuente: [(a)] (Harper & Petrie, 2003); [(b)](Brookfield Ametek, 2015); [(c)](Zhang et al., 2016); [(d)] (TA Instruments, 2005); [(e)](Hasan, 2015)

Como se observa en la Tabla 14, se pudo determinar que el desecho con mayor porcentaje es el de biopeligrosos con un valor de 44,75 %, debido a la cantidad de agua que posee en su composición general de: plástico 43,2 %, biomasa 26,3 %, fibra sintética 15,3 %, líquido 6,6 %, caucho 6,6 %, sales inorgánicas 0,3% y metales 1,7% (Zhang et al., 2016). Hay que hacer notar que, aunque el contenido de humedad del desecho es muy alto, también está compuesto

en su mayoría de plástico el cual tiene un poder calórico de 7 834 kcal/kg, compensando así el alto contenido de humedad.

Por otro lado, los demás desechos no sobrepasan el 10 % de contenido de humedad, beneficiando de esta forma el proceso de incineración al no verse afectada la temperatura de las cámaras de combustión por la cantidad de agua en los desechos a ser incinerados, de igual modo, este parámetro ayuda a determinar si un proceso puede ser autosuficiente, sin la necesidad del uso de combustibles auxiliares al alcanzar la temperatura de ignición (100 ºC), donde la humedad llega a ser evaporada (Hernández, 2010; Villaseñor, 2002).

4.3.2 PODER CALÓRICO

Mediante los ensayos de laboratorio se obtuvo los valores de poder calórico que se detallan en la Tabla 15, donde se evidencia los datos arrojados por el calorímetro como se observa en la Figura 30 y el promedio del triplicado de cada muestra. En el ANEXO 2, se presentan los valores registrados por el calorímetro del aceite contaminado, EPP contaminado, pastillas y aserrín.

Tabla 15.
Resultados obtenidos del ensayo de poder calórico.

Desecho	**Poder calórico (kcal/kg)**			
	Muestra 1	**Muestra 2**	**Muestra 3**	**Promedio**
EPP contaminado	4 119,20	4 184,87	4 204,16	**4 169,41**
Pastillas	5 011,36	4 853,35	5 048,88	**4 971,20**
Aceite contaminado	9 496,37	9 539,26	9 502,85	**9 512,83**
Aserrín	3 785,56	3 769,23	3 564,79	**3 706,53**

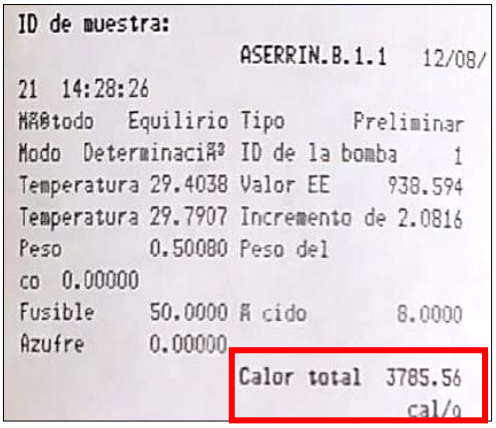

ID de muestra:
ASERRIN.B.1.1 12/08/
21 14:28:26
MÃ©todo Equilirio Tipo Preliminar
Modo DeterminaciÃ³ ID de la bomba 1
Temperatura 29.4038 Valor EE 938.594
Temperatura 29.7907 Incremento de 2.0816
Peso 0.50080 Peso del
co 0.00000
Fusible 50.0000 Ã cido 8.0000
Azufre 0.00000
Calor total 3785.56
cal/g

Figura 30. Datos obtenidos del ensayo de poder calórico del Aserrín 1

Comparando los resultados del promedio de poder caloríco obtenido en el ensayo de laboratorio con los datos bibliográficos de los desechos se puede determinar que los valores son confiables, validando su uso en el menú de carga, ya que el PC bibliográfico del aserrín y el aceite es de 3 780 kcal/kg y 10 000 kcal/kg respectivamente, siendo estos valores parecidos a los obtenidos en el ensayo (Eurostat, 2013). Por otro lado, en la Tabla 16 se presenta los poderes caloríficos de cada desecho seleccionado.

Tabla 16.
Contenido de poder calórico de cada uno de los desechos seleccionados.

Categorías	**Poder calórico (kcal/kg)**
EPP contaminado	4 169,41
Envases plásticos	11 145,00 [(a)]
Aserrín	3 706,53
Aceite contaminado	9 512,83
Pastillas trituradas	4 971,20
Biopeligrosos	7 770,00 [(b)]
Resina epóxica	10 987,00 [(c)]
Ropa	5 489,00 [(a)]

Escala de color: azul (datos ensayo de laboratorio); gris (datos bibliográficos)

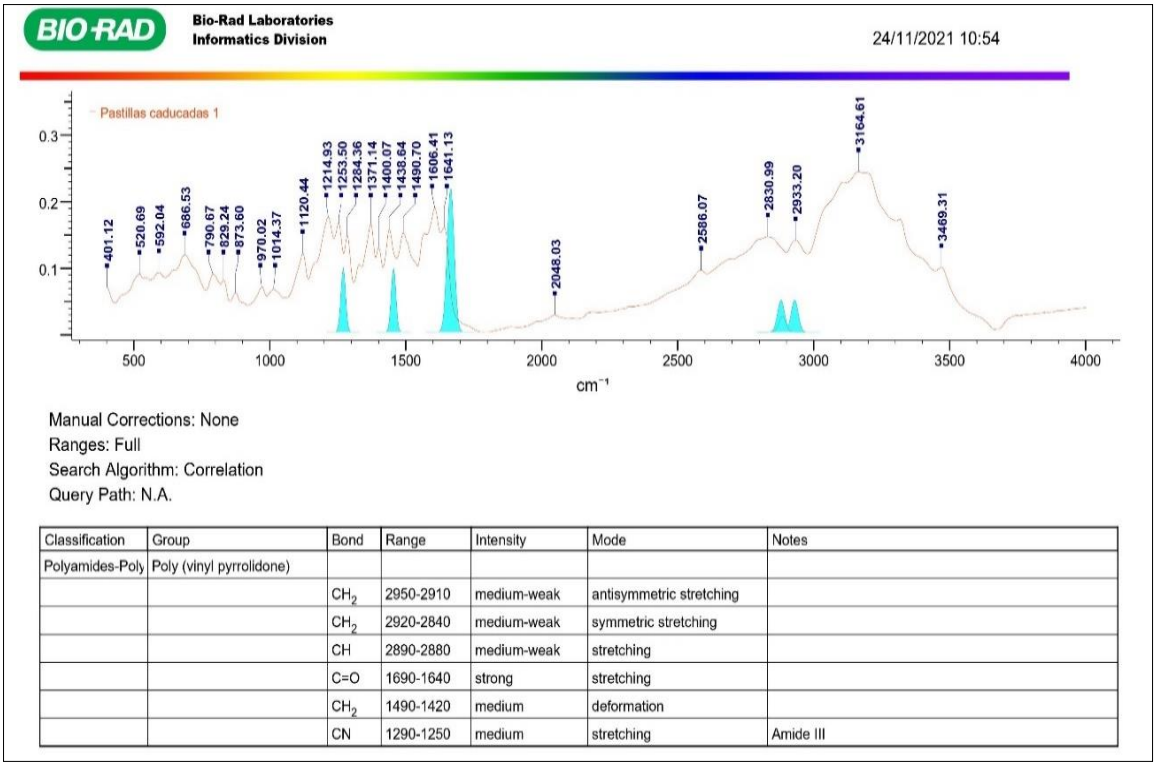
Fuente: [(a)](Beto, 2010); [(b)] (Eurostat, 2013) [(c)] (Kočí & Picková, 2020)

De los desechos que contiene mayor valor del parámetro analizado, fueron los envases plásticos y resina epóxica, con 11 000,00 kcal/kg aproximadamente; siguiéndole, el aceite contaminado con 9 512,53 kcal/kg. Según Elías, (2003), se puede considerar tanto a los residuos plásticos y aceites usados como desechos que aportan un alto contenido de poder calórico, mientras que los desechos sanitarios (hospitalarios) un bajo poder calórico. El poder calórico de los desechos biopeligrosos puede variar, puesto que su generación es diversa en los distintos niveles de atención y servicios de salud; debido a que cambia la composición y generación de los desechos de un consultorio general frente a un hospital de especialidades.

Existe gran variedad de combustibles que se utilizan en el proceso de incineración como el GLP, propano, diésel, coque. etc., dependiendo de las necesidades y características del incinerador. Comparando los desechos seleccionados, presentan un poder calórico mayor a 3 700 kcal/kg, siendo este un valor similar al del coque igual a 3 195 kcal/kg; mientras que, tanto los plásticos triturados como la resina epóxica muestran un valor parecido al del propano de aproximadamente 11 063 kcal/kg (Eurostat, 2013). Es por ello, que al usar desechos con un alto poder calórico se reducirá el uso de combustible auxiliar utilizado para mantener la temperatura adecuada en las cámaras de combustión en el proceso de incineración.

4.3.3 ANÁLISIS DE IDENTIFICACIÓN DE COMPUESTOS

Los resultados obtenidos de la muestra de las pastillas trituradas mediante el ensayo de espectroscopia de infrarrojo con transformadas de Fourier (FTIR) se determinaron a través de las gráficas generadas por el software del equipo, como se muestra en la Figura 31, además de analizar la correlación entre resultados con un valor mayor del 0,97 entre las tres muestras, ver ANEXO 3.



Classification	Group	Bond	Range	Intensity	Mode	Notes
Polyamides-Poly	Poly (vinyl pyrrolidone)					
		CH_2	2950-2910	medium-weak	antisymmetric stretching	
		CH_2	2920-2840	medium-weak	symmetric stretching	
		CH	2890-2880	medium-weak	stretching	
		C=O	1690-1640	strong	stretching	
		CH_2	1490-1420	medium	deformation	
		CN	1290-1250	medium	stretching	Amide III

Figura 31. Clasificación del grupo funcional Poliamidas

Por medio de los datos de los grupos funcionales encontrados en la muestra de pastillas trituradas presentados en la Tabla 17, se evidencia que no existe presencia de compuestos clorados, debido a que las pastillas trituradas no contenían ningún principio activo con cloro; de manera que se puede prevenir la generación de contaminantes tóxicos en las emisiones de la incineración, uno de los contaminantes más perjudiciales para la salud del ser humano y la calidad del ambiente son las dioxinas y furanos, ya que se bioacumulan en la cadena alimenticia, sobre todo en los tejidos adiposos o grasa corporal (OMS, 2016b).

Las dioxinas y furanos, así como también el HCl se forman de manera espontánea en procesos térmicos cuando existe reacción entre oxígeno, carbón, hidrógeno y cloro, es decir, no están ligados directamente a la incineración de desechos peligrosos. Con respecto a su destrucción se utiliza temperaturas altas de incineración y condiciones del proceso idóneas (O_2 en exceso, tiempo de residencia) en la cámara de poscombustión (Camacho et al., 2011).

Tabla 17.

Clasificación de los grupos funcionales encontrados en el análisis FTIR de pastillas trituradas

CLASIFICACIÓN	GRUPO
Amidas	$R\text{-}CO\text{-}NH_2$
	R-CO-NH-C
Alcanos	$C\text{-}(CH_3)_3$
	$R\text{-}CH_2\text{-}R$
Alquinos	RCH=CHR cis
Carboácidos	COOH
	NHRCOOH
Compuestos sulfurosos	$R\text{-}SO_3^{-}H3O^{+}$
Nitratos	$R\text{-}O\text{-}NO_2$
Poliamidas	Pirrolidona de vinilo
	Polimetracrilamida
	Poliacrilamida
	Nailon 6,6
Poliéteres	Oximetileno
	Óxido de polietileno
Poliureas	Poli (metileno úrea)

4.3.4 ACEITES Y GRASAS

Como se muestra en la Figura 32, los resultados obtenidos de la determinación de contenido de grasas y aceites del EPP contaminado difieren un poco entre sí, con valores de 26,87 y 23,32 % respectivamente, debido a que en la primera muestra se utilizó hexano puro, mientras que, en la segunda se empleó hexano reciclado (obtenido a partir de la destilación de ensayos anteriores), afectando relativamente la obtención del porcentaje de aceites y grasas de la muestra dos, ya que siempre hay influencia de impurezas al momento de destilar una sustancia por completo (Sawyer, 2009).

El promedio del contenido de grasas en la muestra es de aproximadamente 25 %, lo que indica que la cuarta parte de la composición de la muestra contiene

aceites y grasas provenientes de las sustancias con las cuales fueron contaminados los elementos, aportando mayor poder calórico al desecho. Ya que los textiles, trapos y materiales absorbentes solo tienen un PC de 4 169,41 kcal/kg y el contener aceites y grasas tienen un aporte de un PC de 9 512,83 kcal/kg (Elías, 2003). Por ende, el uso de EPP en la mezcla de incineración resulta de gran ayuda para que exista un incremento de poder calórico dentro de la combustión.

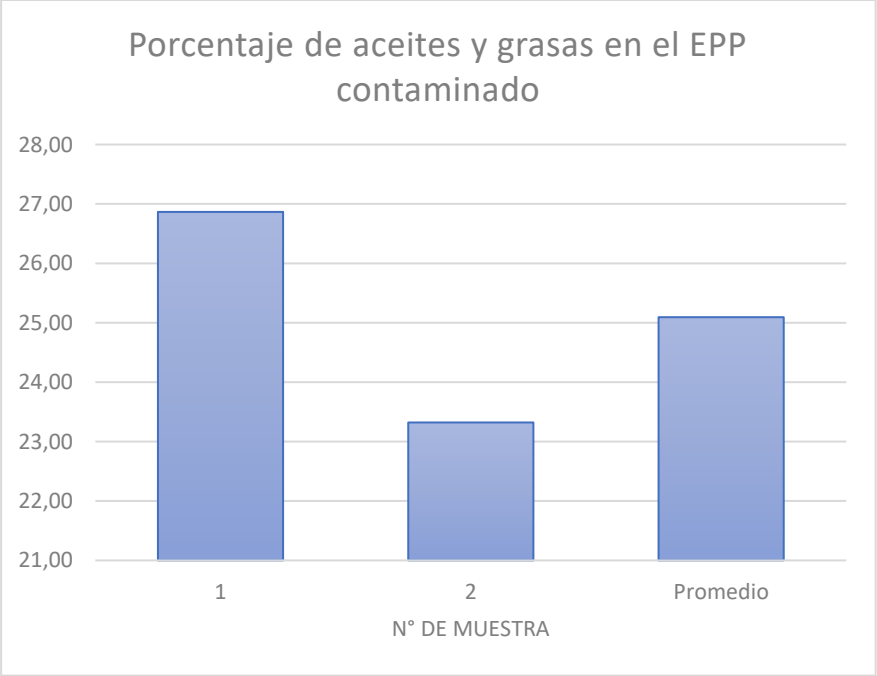


Figura 32. Porcentaje de aceite y grasas contenida en el EPP

Cabe recalcar que este ensayo solo se realizó al desecho de EPP contaminado debido a que era el único que tenía un porcentaje significativo de aceites y grasas en su composición. A su vez este ensayo es complejo de realizar ya que al utilizar una sustancia química controlada como solvente su disposición es muy limitada y costosa.

4.3.5 PORCENTAJE DE CENIZAS

Se muestra los porcentajes en peso de las diferentes categorías de desechos que se utilizó en cada uno de los menús propuestos en el ANEXO 4.1, se presentan las variaciones en peso para cada uno de los diez menús establecidos, luego de su ser

sometidos a la mufla, se cuantificó su generación de ceniza por triplicado, se puede observar en la Tabla 18, para finalmente tener una idea de cuáles menús son viables guiados por este parámetro.

Tabla 18
Datos obtenidos del análisis de porcentaje de cenizas de los 10 menús establecidas en las tres replicas realizadas

Número de menú	Porcentaje de ceniza (%)			
	Réplica 1 %	**Réplica 2 %**	**Réplica 3%**	**Promedio%**
1	6,01	6,25	7,45	6,57
2	7,65	9,11	10,64	9,13
3	6,87	4,96	7,69	6,5
4	5,36	5,34	6,66	5,79
5	9,13	10,00	13,54	10,89
6	5,58	4,09	5,9	5,19
7	5,34	7,25	6,65	6,41
8	5,66	6,72	6,14	6,17
9	6,43	6,35	7,72	6,83
10	9,50	10,97	10,98	10,48

En la Figura 33 se muestra los porcentajes de cenizas obtenidos del proceso de incineración en la mufla de los diez menús propuestos en la Tabla 18, en donde se puede evidenciar que el menú seis es el que menos cantidad de ceniza generó con 5,19%, cabe destacar, que esta producción es rentable a comparación con la producción media de cenizas en las plantas de incineración de Europa, las cuales tienen un 22,5% en cenizas del peso total de los desechos incinerados (Greenpeace, 2009).

Se comparó los resultados de todas las recetas, la que mayor generación de ceniza obtuvo fue el menú número cinco, aun así, la producción de cenizas obtenida sigue siendo aceptable, ya que, es la mitad del valor promedio de producción de cenizas en Europa.

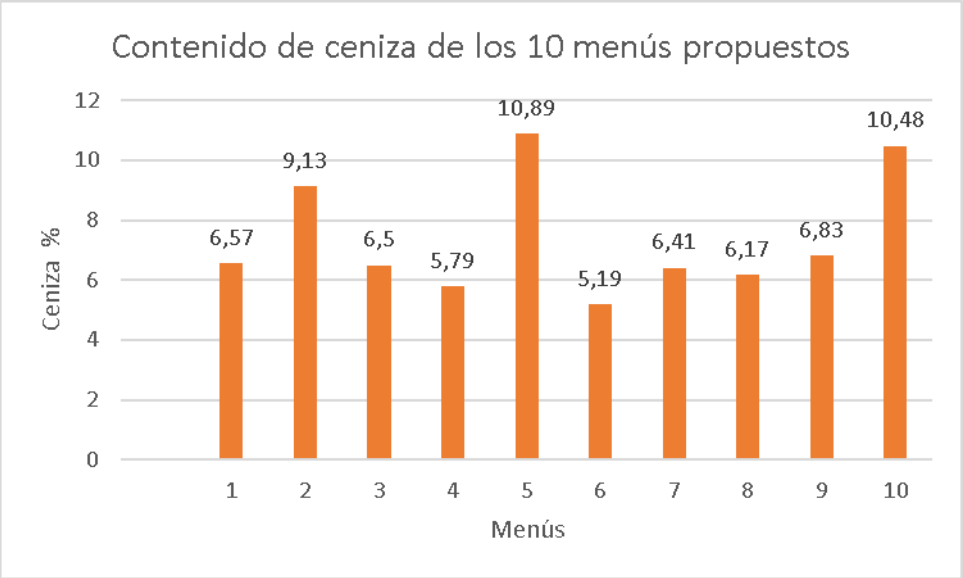


Figura 33. Promedio del porcentaje de cenizas de cada menú.

Por otra parte, a pesar de que se llegue a una temperatura adecuadamente alta en la cámara de poscombustión permitiendo reducir las emisiones y concentraciones de sustancias tóxicas, no desaparecen en su totalidad debido a que están presentes en las cenizas, es decir que la incineración de desechos peligrosos no resuelve el problema de los compuestos tóxicos presentes, sino que solo los transforma (Allsopp et al., 2001).

4.4 DISEÑO EXPERIMENTAL

El análisis ANOVA se realizó para conocer si existe una variación significativa entre los 10 menús de incineración propuestos por la variación de los porcentajes del contenido de los desechos en cada uno de los menús, la variable dependiente es el contenido de cenizas que se obtuvo.

Se utilizó el análisis de varianza para el porcentaje de cenizas, el cual indica la igualdad o diferencia entre las medias de la muestra (porcentaje de ceniza de cada receta); se calculó con un nivel de significancia ($\propto$) de 0,05. Hay que tener en cuenta que entre más dispersas estén las observaciones con respecto a la media de su menú, mayor será el valor de F, el cual fue de 8,49. El procesamiento de

datos, se encuentran en el ANEXO 4.3, en dónde se detallan los cálculos obtenidos para las medias y el nivel de confianza

El valor de la probabilidad (p) obtenido fue de $4x10^{-5}$, siendo así que $p \leq \propto$ lo que resulta en que las diferencias entre algunas de las medias son estadísticamente significativas. Al igual que el valor crítico es menor que F, confirmando que existe diferencias entre los 10 menús propuestos.

Mediante la Figura 34, se observa que para los intervalos de confianza para las medias de las recetas uno, tres, cuatro, seis, siete, ocho y nueve presentan una similitud, puesto a que se sobreponen entre las mismas, por ende, no hay diferencia significativa entre la variación del porcentaje de desechos para cada menú propuesto. Mientras que para las recetas dos, cinco y diez al no sobreponerse con los demás intervalos de confianza de las medias de las recetas, indica que existe una diferencia significativa, por la variación del contenido en peso para cada desecho presente en estos menús.

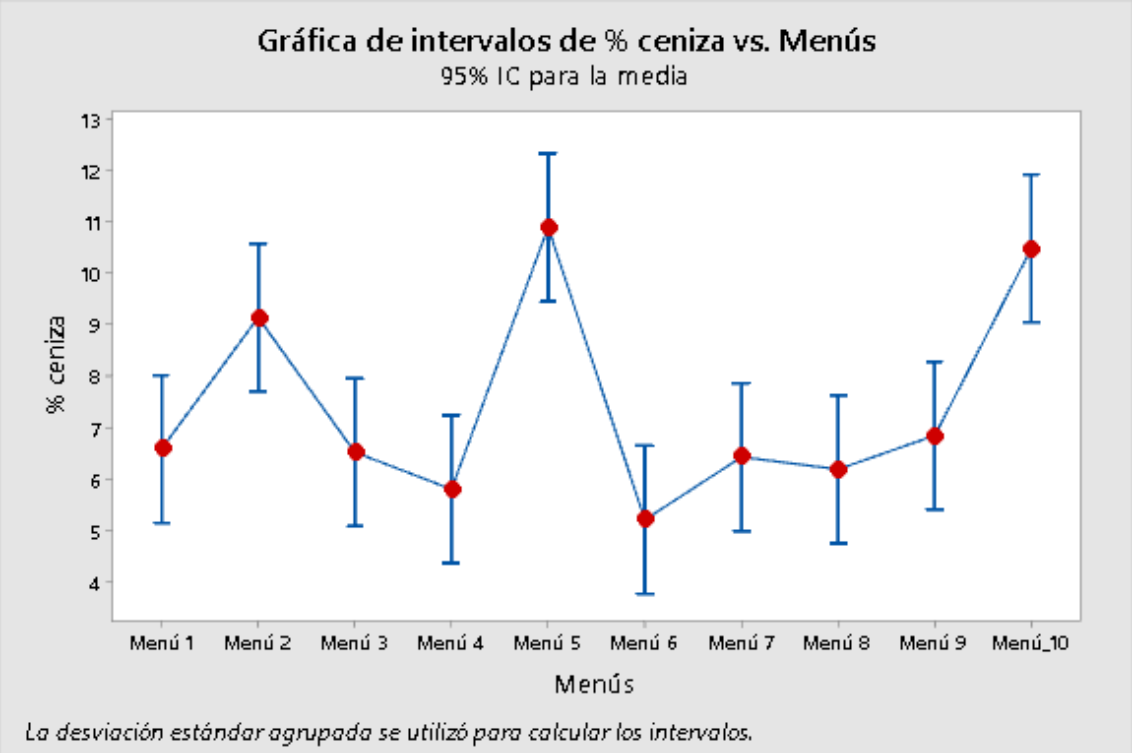


Figura 34. Intervalos de ceniza vs. Recetas

Como se observa en la Figura 35, en el histograma existe una mayor frecuencia del porcentaje de ceniza con un valor del 6 %, seguido por el 7 % en dónde se concentran la mayor cantidad de valores. Mientras que los porcentajes con menor frecuencia fueron 4 % y del 8 al 14 %, cabe recalcar que ningún menú obtuvo valores de 12 al 13 % de ceniza.

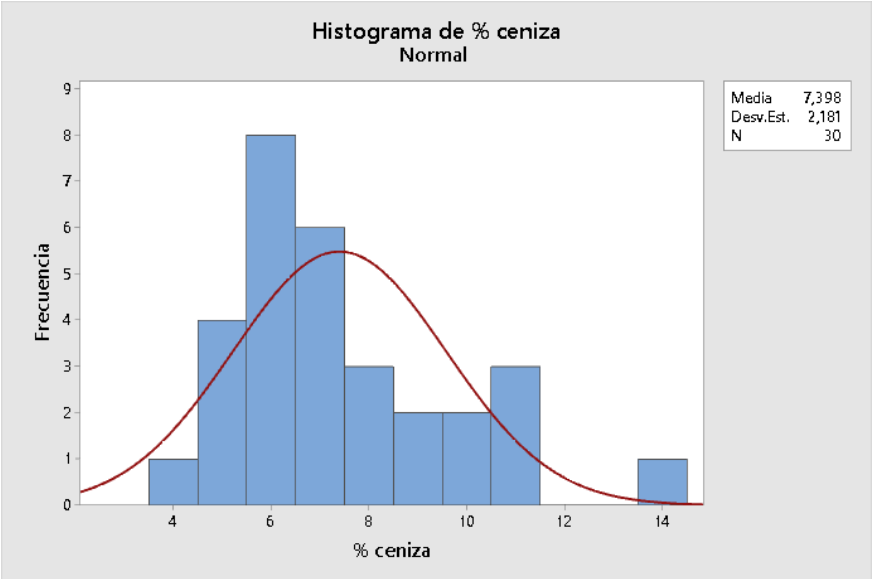


Figura 35. Histograma de los 10 menús.

4.5 PRUEBAS PILOTO

Dentro de la prueba piloto en la empresa HAZWAT se realizó la incineración del menú de carga seis por un tiempo de tres horas y durante este proceso se realizó el muestreo de las emisiones de gases de combustión para evaluar los parámetros con la normativa vigente.

4.5.1 CARACTERIZACIÓN DE EMISIONES ATMOSFÉRICAS

En la Tabla 19 se presentan los datos obtenidos de los monitoreos de emisiones realizado por el CICAM, ver ANEXO 6, resultantes de la prueba piloto, el monitoreo 1 fue realizado en el punto después del lavador de gases y el monitoreo 2 en la chimenea antes del lavador.

Tabla 19.
Datos obtenidos en los monitoreos de los parámetros de la emisión de gases

PARÁMETROS DE LA EMISIÓN DE GASES			
Parámetro	**Unidad**	**Punto 1**	**Punto 2**
Oxigeno (O_2)	%	14,73	9,35
Dióxido de carbono (CO_2)	%	4,63	8,63
Dióxido de azufre (SO_2)	ppm	14**	0**
Monóxido de Carbono (CO)	ppm	43**	2 224**
Monóxido de Nitrógeno (NO)	ppm	57	91
Dióxido de Nitrógeno (NO_2)	ppm	0**	0**
Óxidos de Nitrógeno (NO_x)	ppm	57	91
Ácido clorhídrico (HCl)	mg/m^3	3	-
Material Particulado	mg/m^3	1	-

(**) El valor está por fuera del rango de acreditación

(-) No se pudo muestrar el parámetro

Hay que destacar que no se pudo obtener el dato de MP y HCl en el monitoreo del punto dos, debido a que la sonda que recolecta los gases de combustión sobrepasaba el rango máximo de temperatura del material, el cual era de 650 ºC. Por ello, este parámetro no se toma en cuenta en la comparación de los criterios de cumplimiento en las normativas.

Es importante mencionar que para la comparación de criterios de cumplimiento se utilizó la Ordenanza Municipal DQM 138-NT001: Norma técnica para emisiones a la atmosfera de fuentes fijas, Tabla No.3: Límites máximos permisibles para emisiones al aire para incineradores. Por otro lado, como normativa extranjera se comparará los límites permisibles a nivel de México y Europa con las normativas NOM-098 Norma SEMARNAT y el Decreto 2008/98/CE Europeo respectivamente (SEMARNAT, 2002; Zero Waste Europe, 2015). En este sentido, se realizó una determinación de criterios con una escala de colores, donde el color verde representa el cumplimiento con el rango de límite máximo permisible y el color rojo el incumplimiento con el mismo.

En la Tabla 20 se realiza la comparación con la OM - 138 – NT001 (Secretaría Del Ambiente, 2001), se observa que en el monitoreo realizado en el primer punto los parámetros se encuentran dentro de los límites máximos permisibles. Debido a que la empresa HAZWAT tiene un sistema de depuración de gases eficiente que ayuda a controlar las emisiones gaseosas, sin embargo, este sistema no se encuentra operativo todo el tiempo, ya que solo se utiliza cuando van a realizar monitoreos de control para el cumplimiento al seguimiento del plan de manejo ambiental o en auditorías realizadas por el MAATE.

Tabla 20.
Comparación de los límites máximos permisibles con la Ordenanza Municipal 138 DQM.

Parámetro	**Concentración (mg/Nm^3) 4% de O_2**		**Concentración (mg/Nm^3) 11 % de O_2**		**Límite Max OM-138 Quito-Ecuador (mg/Nm^3 y 11% O_2)**
	Punto 1	**Punto 2**	**Punto 1**	**Punto 2**	
Dióxido de azufre (SO_2)	109	0	64	0	109
Monóxido de Carbono (CO)	146	4 056	86	2 386	87
Óxidos de Nitrógeno (NO_x)	317	271	186	160	610
Material particulado (PM)	3	-	2	-	55
HCl	8	-	5	-	55

Escala de color: verde (Cumple); rojo (Incumple)

(-) No se pudo muestrear el parámetro

Los resultados del monitoreo en el segundo punto incumplen en el parámetro de CO, esto puede ocurrir debido a que el CO que se produce no se oxida debido a la falta de oxígeno necesario dentro de las cámaras de combustión. Dado que, por recomendaciones de operación se debe asumir un exceso de 150 % para el aire suplementario (G. Gonzáles, 2003). Mientras que el Incinerador *PENNRAM* solo asume un 30 % de exceso en el aire, esto hace que no exista un ambiente

turbulento que permitan una mezcla ideal del gas para su oxidación del CO a CO_2 (Camacho et al., 2011).

En la Tabla 21 se realiza la comparación con el decreto Europeo, donde se evidencia que en el monitoreo realizado en el primer punto, detalla que los contaminantes de SO_2 y CO incumplen con los límites máximos permisibles. Mientras que los parámetros de NOx, HCl y MP cumplen perfectamente con el rango permisivo. No obstante, los resultados del monitoreo provenientes del segundo punto indican que se incumple con el parámetro de CO, para el caso del SO_2 no se registró el valor de este parámetro, debido a que la sonda no soportó las altas temperaturas, por ende, el poco tiempo al que fue expuesto el equipo de monitoreo no arrojó valores para su comparación.

Tabla 21.
Comparación de los límites máximos permisibles con el Decreto 2008/98/CE Europeo.

Parámetro	**Concentración (mg/Nm^3) 4 % de O_2**		**Concentración (mg/Nm^3) 11 % de O_2**		**Límite Max 2008/98/CE Europa (mg/Nm^3 y 11 % O_2)**
	Punto 1	**Punto 2**	**Punto 1**	**Punto 2**	
Dióxido de azufre (SO_2)	109	0	64	0	50
Monóxido de Carbono (CO)	146	4 056	86	2 386	50
Óxidos de Nitrógeno (NO_x)	317	271	186	160	400
Material particulado (PM)	3	-	2	-	10
HCl	8	-	5	-	10

Escala de color: verde (Cumple); rojo (Incumple)

(-) No se pudo muestrear el parámetro

En la Tabla 22 se realiza la comparación con la normativa Mexicana NOM-098-SEMARNAT, donde se evidencia que en el monitoreo realizado en el primer punto los parámetros de SO_2 y CO incumplen los límites máximos permisibles.

Mientras que los parámetros de NOx, HCl y MP cumplen con el rango permisivo. A su vez, el parámetro de CO en el monitoreo del segundo punto sobrepasa exorbitantemente el límite máximo permisible.

Tabla 22.
Comparación de los límites máximos permisibles con la Norma SEMARNAT NOM-098 mexicana.

Parámetro	**Concentración (mg/Nm^3) 4 % de O_2**		**Concentración (mg/Nm^3) 7 % de O_2**		**Límite Max NOM-098-SEMARNAT México (mg/Nm^3 y 7 % O_2)**
	Punto 1	**Punto 2**	**Punto 1**	**Punto 2**	
Dióxido de azufre (SO_2)	109	0	89	0	80
Monóxido de Carbono (CO)	146	4 056	120	3 341	63
Óxidos de Nitrógeno (NO_x)	317	271	261	224	300
Material particulado (PM)	3	-	2	-	50
HCl	8	-	7	-	15

Escala de color: verde (Cumple); rojo (Incumple)

(-) No se pudo muestrear el parámetro

Hay que tener en cuenta que las normas internacionales son mucho más estrictas en el rango permisible de los parámetros de las emisiones atmosféricas y considerar que en el Ecuador no existe una norma general para la regulación las emisiones de incineradores de desechos peligrosos que se aplique a nivel nacional, por lo que no se puede realizar una comparación más estricta de los parámetros ya mencionados.

4.5.2 ÁCIDO CLORHÍDRICO

En la Tabla 23 se presenta los datos obtenidos del ensayo, el resultado se lo multiplicó por cinco, ya que, al momento de realizar el muestreo la solución que se utilizó para captar los cloruros mediante los impingers fue diluida con la relación en peso 1/5 de agua destilada. A continuación, se realizó la conversión de cloruros

a ácido clorhídrico obteniendo un valor de 2,94 mg/m^3 el cual fue comparado con la normativa vigente en emisiones al ambiente.

Tabla 23.
Datos obtenidos del análisis de los cloruros totales en los gases de combustión

Cl^- (mg/l)		**Promedio (mg/l)**	**Solución x Factor 5**	**HCl (mg/m^3)**
Ensayo 1	**Ensayo 2**			
8,43	8,25	8,34	41,69	2,94

Aunque este valor es muy bajo, puesto que dentro del menú de incineración no se eligió desechos peligrosos que contengan cloro en su composición, hay que considerar que se puede producir emisiones ácidas, debido a que se desconoce el origen real de los desechos, en especial el de los biopeligrosos, es común utilizar en establecimientos de salud el hipoclorito de sodio para la sanitización de las diferentes áreas y la desinfección de productos (Centro Municipal de Salud Tres Arroyos, 2019). Es por ello que se presentan concentraciones muy bajas de (HCl), por ende, es importante regular su contenido en los menús de incineración (Hernández, 2010).

4.5.3 CONTENIDO DE METALES EN CENIZAS

Los datos del contenido de metales encontrado en la ceniza resultante de la prueba piloto del proceso de incineración se los puede evidenciar en el informe entregado por el CICAM (ANEXO 7). Por lo tanto, para la comparación de criterios de cumplimiento se utilizó la Ordenanza 404, TABLA No.2: Límites máximos permisibles para extracción de metales pesados en base seca, hay que añadir que, no se pudo comparar todos los metales existentes en la muestra debido a que no están normados. En este sentido, se realizó una determinación de criterios con una escala de colores, donde el color verde representa el cumplimiento con el rango de límite máximo permisible y el color rojo el incumplimiento con el mismo.

En la Tabla 24 se presenta la comparación de valores con los límites máximos permisibles fijados en la OM – 404 (Secretaría del Ambiente, 2014), se observa que el contaminante zinc es el único que incumple, el cual sobrepasa desmesuradamente el límite máximo permisible. La generación del metal zinc se puede dar por varias causas, una de ellas es que se halla de forma natural en la biosfera, el aire, el agua, el suelo y las rocas; por fenómenos naturales: incendios forestales, tormentas de arena y erupciones volcánicas, es un metal que pasa de un material a otro sin perder sus propiedades ni su calidad, cumpliendo un ciclo dentro de la naturaleza (International Zinc Association, 2010).

Tabla 24.
Comparación de los límites máximos permisibles para la extracción de metales pesados en base seca, con la Ordenanza Municipal 404 DQM.

Contaminante	**Muestra (mg/kg)**	**Límites Máximos Permisibles (mg/kg)**
Arsénico	< 0,125	75
Cadmio	-	85
Cromo	101,5	3 000
Plomo	58,74	4 300
Mercurio	0,26	840
Níquel	39,84	57
Zinc	3 713	420

Escala de color: verde (Cumple); rojo (Incumple)

(-) Parámetro no determinado

Además, el zinc se emite por fuentes antropogénicas mediante la producción del metal, la combustión de carbón, la eliminación de desechos y el uso de combustibles fósiles en la combustión, es por ello por lo que el zinc está presente en el proceso de incineración por varias fuentes, al no alterar sus propiedades al momento de ser combustionado pasa directamente a las cenizas, y puede llegar a contaminar aguas subterráneas si estas no son bien gestionadas (ATSDR, 2005).

Por lado, en el informe de resultados también se observa le existencia de metales en gran concentración como son: el Bario (Ba), el cual se utiliza en diferentes tipos de industrias manufactureras (pinturas, cerámicas, ladrillos, etc.) y se encuentra presente en desechos de limpieza (Agarwal, 2019); el Cromo (Cr), se lo encuentra en numerosos productos (madera tratada, cuero curtido, artículos de cocina de acero inoxidable, etc.), en el aire, el suelo y el agua después de ser liberado por industrias que usan cromo (ATSDR, 2012); el manganeso se utilizan como fertilizantes, secantes para el aceite, en la fabricación de vidrio, pinturas, abonos, como decolorantes de textiles y en el curtido de pieles (ATSDR, 2000; Nordberg et al., 2001)

Cabe recalcar que el muestreo de las cenizas fue recolectado luego de todo un día de operación del incinerador, pero la prueba piloto que se realizó al alimentar al incinerador el menú de carga establecido fue por un periodo de tres horas. Es por ello por lo que se infiere que la existencia de metales en la ceniza puede ser menor a la reportada por el informe.

4.6 BALANCE DE MASA Y ENERGÍA

4.6.1 RESULTADOS DEL BALANCE DE MASA

Para la obtención de las composiciones de carbono e hidrógeno global del menú de carga, se tomó los componentes principales de la categoría, para conocer su composición química y establecer el peso molecular total. En el ANEXO 8.1 se detalla los cálculos y las composiciones químicas más relevantes de las ocho categorías seleccionadas.

- Tabla A8.1, pastillas trituradas
- Tabla A8.2, EPP contaminado;
- Tabla A8.3, biopeligrosos,
- Tabla A8.4, ropa
- Tabla A8.5, aceite contaminado, resina epóxica, aserrín y plástico

Como se indica en la Tabla 25, para la obtención del porcentaje de carbono e hidrógeno global del menú de carga seis, se multiplicó el porcentaje del desecho por su porcentaje de composición química global, donde se obtuvo 75,17 % de C, mientras que para el H un valor de 9,72 %, donde claramente se observa que existe gran influencia de C.

Tabla 25.
Resultados del flujo de C y H presente en el menú de carga seis.

Categorías	**Porcentaje**	**Composición (%)**		
EPP contaminado	0,80	C	47,96	0,38
		H	5,00	0,04
Envases plásticos	2,50	C	85,70	2,14
		H	14,30	0,36
Aserrín	9,00	C	50,65	4,56
		H	6,03	0,54
Aceite Contaminado	69,00	C	78,95	54,47
		H	10,53	7,26
Pastillas trituradas	5,20	C	60,05	3,12
		H	5,92	0,31
Biopeligrosos	8,00	C	77,75	6,22
		H	10,58	0,85
Resina epóxica	4,00	C	85,71	3,43
		H	6,67	0,27
Ropa	1,50	C	56,32	0,84
		H	6,62	0,10
Total de desechos	100,00	**Flujo total de C (%)**		75,17
		Flujo total de H (%)		9,72

En la Tabla 26, se detalla el flujo másico de cada uno de los componentes que se encuentran presentes en el menú de incineración ya mencionado, se tomó en cuenta principalmente la presencia de C, H y el contenido de humedad perteneciente a el menú de carga seis; cabe mencionar que este menú arrojó un porcentaje de ceniza del 5,19 %, sin embargo debido a las condiciones operativas de la empresa, se trabajó con el 14 % promedio por turno que genera el incinerador, hasta que se establezca los menús que se están trabajando.

Este porcentaje de ceniza se encuentra dentro del rango de reducción de masa y volumen de los diferentes tipos de incineradoras con un valor del 70 a 90 % (Kanhar et al., 2020), no obstante sigue siendo una cantidad considerable de ceniza peligrosa que debe ser tratada en una celda de seguridad, puesto que con el pasar del tiempo esta producción que al parecer es mínima, será un problema al gestionar a largo plazo.

Tabla 26
Composición en fracción, porcentaje y flujo másico del menú de carga número seis.

Composición de desechos a incinerar			
	Fracción	**(%)**	**kg/h**
C	0,72	71,57	357,86
H	0,09	9,25	46,27
Metales	0,00	0,00	0,00
Ceniza	0,14	14,28	71,40
Humedad	0,05	4,89	24,47
	1,00	100,00	500

Este balance de masa y energía se realizó, en condiciones en las que el incinerador está operando exclusivamente con los desechos seleccionados, los cuales no tiene presencia de azufre, puesto que el combustible (diésel) soló se lo utiliza en la cámara de postcombustión por un tiempo máximo de residencia de 3 segundos. Además, las emisiones se monitorearon después de que el horno estuviera en operación durante dos horas.

Los flujos molares de HCl, CO_2 y SO_2, no se consideraron en el balance, debido a que su presencia es mínima, como se observa en el ANEXO 8.4., en dónde se indica que existe un 0,001 % de HCl; 0,005 % de CO_2 y 0,02 % SO_2, valores mínimos que no interfieren en los cálculos del balance de masa.

Para el cálculo del flujo de aire necesario que se llevó a cabo en la combustión tanto de los desechos y el diésel utilizado se utilizaron las siguientes reacciones de combustión (9), (11) y (21):

$$C + O_2 \rightarrow CO_2 \quad (9)$$

$$2H + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow H_2O \quad (11)$$

$$4C_{12}H_{23} + 71O_2 \rightarrow 48CO_2 + 46H_2O \quad (21)$$

En dónde se determinó que el oxígeno estequiométrico necesario para reaccionar con la materia combustionable de los desechos y el diésel, es de 1 358,81 kg/h; considerando que el aire tiene una concentración de 23 % w/w de oxígeno, el aire seco estequiométrico resultante es de 5 905,85 kg/h, el aire seco de alimentación es del 30 % en exceso del aire seco estequiométrico necesario, valor que establece la empresa para el proceso térmico, por lo cual se debe alimentar a la cámara de combustión con un flujo correspondiente a 7 680, 21 kg/h de aire seco que se detalla en el ANEXO 8.2, donde se realiza el balance global del horno de incineración. Por lo tanto, el flujo de aire alimentado al incinerador será de 7 728,30 kg/h.

Se presenta en la Figura 36, los flujos másicos de entrada y salida de todo el sistema del incinerador. En el ANEXO 8.3 se detallan de forma explícita la obtención de los flujos tanto del proceso térmico como el del lavador de gases.

Los flujos de entrada que se consideraron para el incinerador fueron:

- Menú de desechos
- Diésel (combustible)
- Aire en exceso con 30 %

Los flujos de salida que se consideraron fueron:

- Cenizas
- Gas seco
- Vapor

Mientras que en el lavador de gases los flujos de entrada fueron:

- Gas seco y vapor, provenientes del proceso de combustión,
- Agua y cal

Los flujos de salida que se consideraron son:

- Gases limpios y vapor que se emiten a la atmósfera
- Agua, lodos y cal que se depositan en la piscina de neutralización.

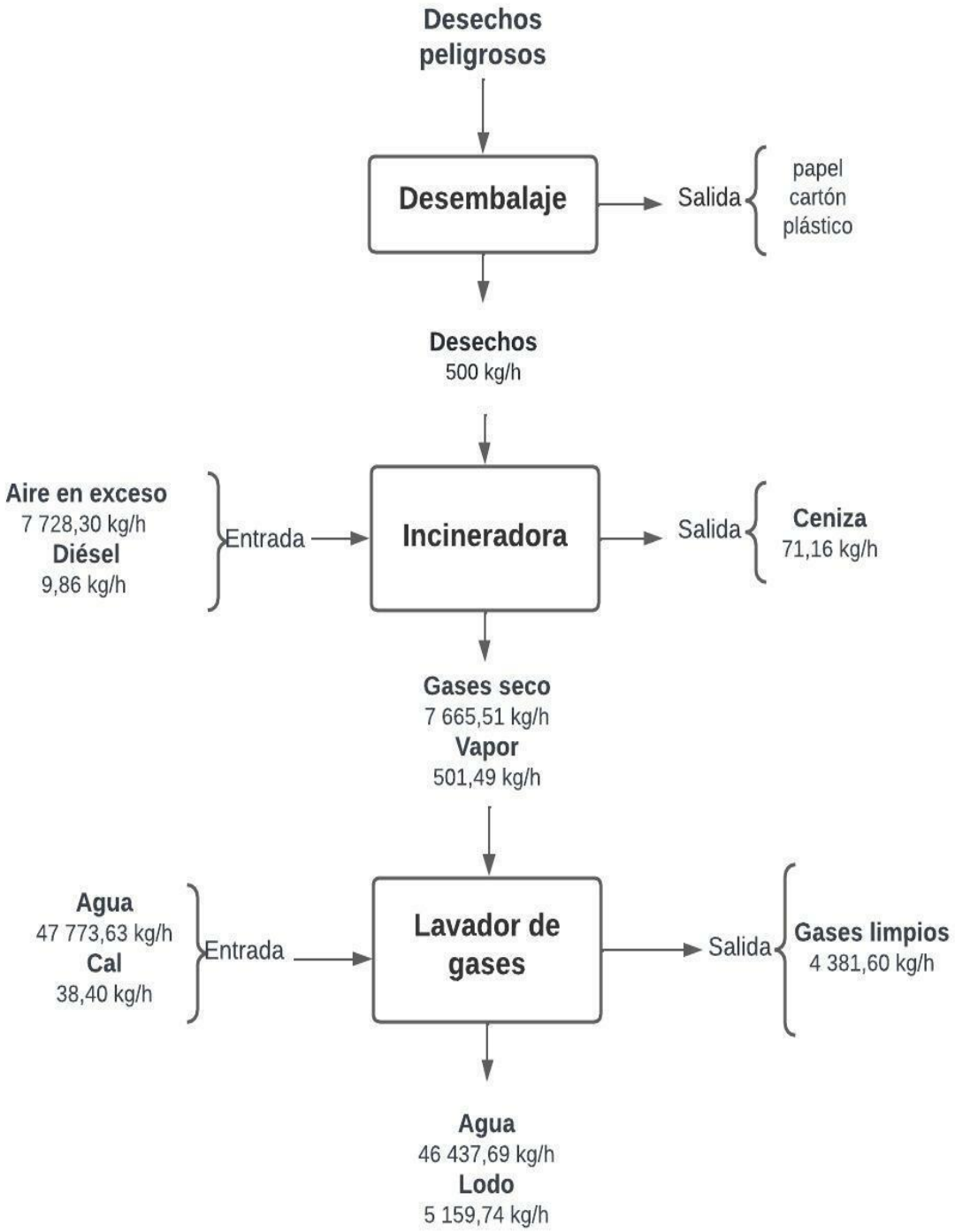


Figura 36. Balance de masa del proceso de incineración.

Para el cálculo de eficiencia de producción de ceniza, presentes en el ANEXO 8.3, se lo realizó en tres escenarios, en el primer caso se tomó la media de generación de contenido de ceniza de incineradoras europeas del 22,5 % (Greenpeace, 2009), la cual nos dio una eficiencia de 78 %; para el segundo caso se calculó con el 14 % de contenido de ceniza con una eficiencia igual a 86 % , y para el último caso se utilizó el contenido de ceniza del menú de carga seis obtenido en los ensayos de laboratorio iguala 5,19 % dando como resultado una eficiencia del 95%.

Se puede considerar que, al usar el menú de carga de incineración propuesto se tendrá una mayor eficiencia con la disminución en producción de cenizas, con un aumento del 9 % en comparación con la eficiencia que tiene la empresa.

Con respecto a la eficiencia del lavador de gases, en MP se encuentra en un rango de 70 a 99 % ; en referente a SO_2 en un rango de 95 a 99 % (EPA, 2012), esta eficiencia no se pudo confirmar debido a que no se obtuvo los valores de estos parámetros en el monitoreo de emisiones atmosféricas realizado en el punto dos antes del lavador de gases, sin embargo se infiere que el lavador de gases tiene una alta remoción de estos contaminantes debido a que las emisiones que salen hacia la atmosfera monitoreadas por el CICAM son concentraciones mínimas, ver ANEXO 6.1 las cuales no sobrepasan los límites máximos permisibles establecidos en la normativa vigente.

Por otro lado, tomando en cuenta los valores obtenidos presentados en los informes de monitoreo del CICAM, la remoción del CO_2 en el lavador de gases tiene una eficiencia de aproximadamente el 54 %, dato que se utilizó para el cálculo de los flujos másicos de salida en el proceso del lavador.

El tiempo de residencia que se obtuvo para la cámara de postcombustión, se describe en el ANEXO 8.2, fue de 2,02 segundos, valor mínimo que se necesita para la destrucción de compuestos orgánicos, el flujo volumétrico total de la cámara

fue 34515,12 m^3/h, lo que sígnica que las dimensiones de la cámara son adecuadas para el caudal que se maneja en el incinerador.

4.6.2 RESULTADOS DEL BALANCE DE ENERGÍA

Se presenta en la Figura 37, los flujos de energía del proceso de incineración y del intercambiador de calor, las entradas que se consideraron en el incinerador fueron: el calor que aportaba el combustible diésel y los desechos peligrosos, mientras que el calor de pérdidas fue por radiación, convección y cenizas, y el calor que se transfirió al gas seco y al vapor. Por otro, las entradas de calor al intercambiador de calor fueron del gas seco y vapor saliente del incinerador, en tanto la perdida de calor fue debido a la transferencia que se produjo en el sistema y calor que se transmite al lavador de gases es el de gas seco y vapor.

El aprovechamiento energético de los desechos peligrosos se puede obtener principalmente por el calor recuperado del proceso de incineración, para utilizarlo en forma de energía eléctrica, vapor o calor (Camacho et al., 2011). Para que esta energía sea considerable se debe incinerar al menos 50 000 ton/año de desechos (Ungureanu et al., 2021). Por lo tanto, la energía que se pierde en el proceso de incineración en la empresa HAZWAT es mínima puesto que la planta incinera aproximadamente 3 326,4 ton/año de desechos peligrosos, si se quisiese trabajar a una escalar mayor.

No obstante, la energía que se transfiere por medio de los gases de combustión que pasan a través del intercambiador es de 2 958 180,55 kcal/h equivalente a 3 440 363,93 vatios, puede ser utilizada para que el agua que se transforma en vapor en este equipo se emplee en forma de vapor esterilizador en el autoclave con el que cuenta la planta. Las pérdidas de energía en el incinerador pudieron ser debido a la radiación, la convección y pérdidas por cenizas con un valor de 1 448 985,86 kcal/h.

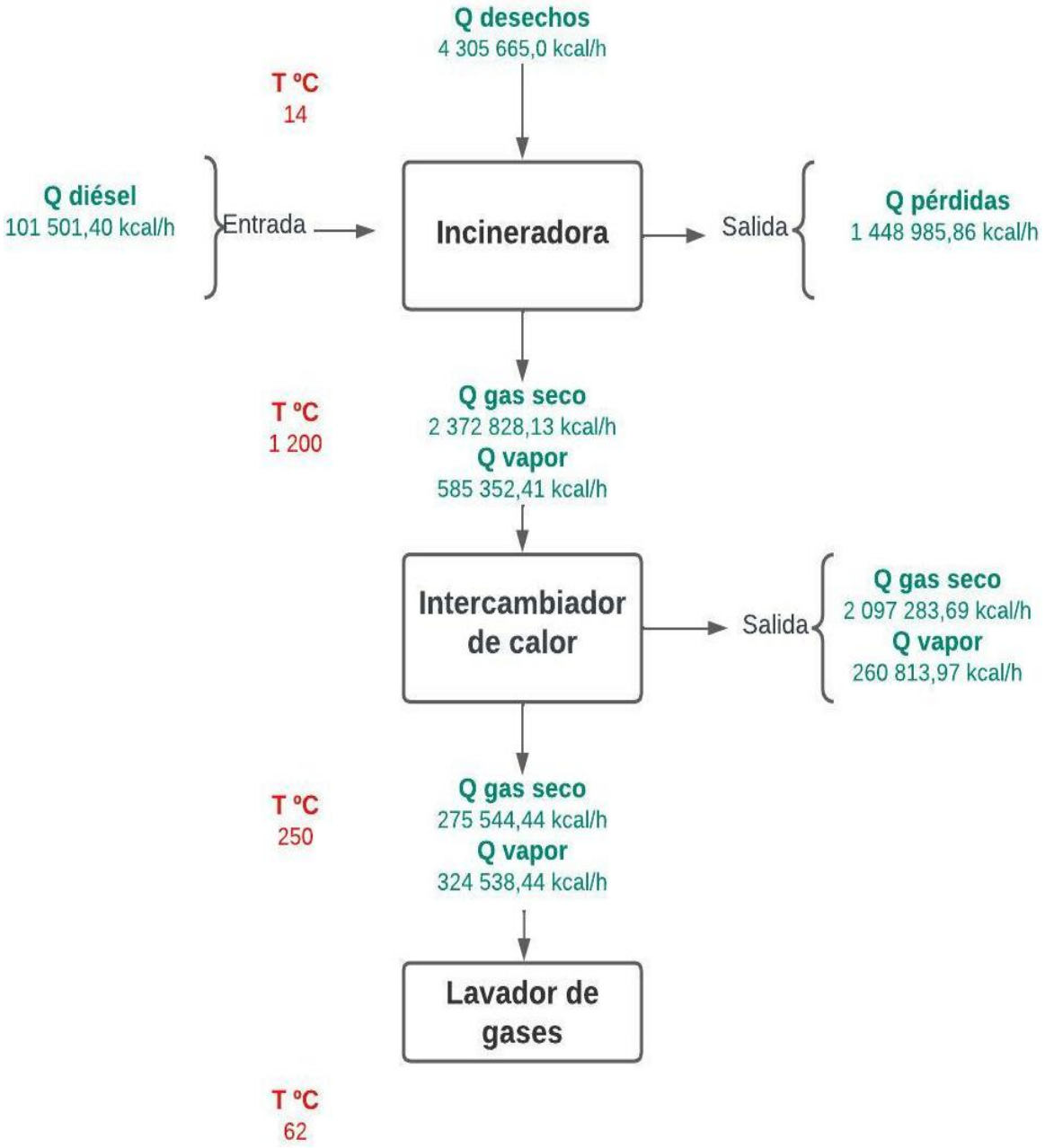


Figura 37. Balance de energía del proceso de incineración

4.7 MENÚS ÓPTIMOS PARA EL PROCESO DE INCINERACIÓN

Los resultados que se presentan a continuación son aquellos que se presentaron a la empresa HAZWAT, los cuales corresponden al menú de carga seis y siete, el menú de carga seis fue seleccionado para la realización de la prueba piloto donde se evidenció que las emisiones de gas de combustión cumplen con la normativa nacional vigente en el monitoreo en el punto 1, y en el monitoreo del punto 2 cumplen los parámetros con los límites máximos permisibles a excepción

del CO que es un parámetro operativo el cual puede ser corregido mejorando las condiciones de incineración (aire en exceso de alimentación, turbulencia y tiempo de residencia) en la cámara de postcombustión.

4.7.1 DATOS DEL CONTENIDO DE HUMEDAD Y PODER CALÓRICO PONDERADO DEL MENÚ DE CARGA

Como se puede observar en la Tabla 27, el porcentaje de humedad ponderado del menú de carga seleccionado tiene un valor de 5,14 %, dado que, para su determinación se tomó en cuenta el porcentaje de influencia de cada desecho en el menú, de la misma forma se calculó el poder calórico ponderado del menú, dando un valor de 8 611,353 kcal/kg. Esto se realizó para conocer el valor exacto de cada parámetro y su impacto en el proceso de incineración.

Tabla 27.
Determinación del promedio ponderado del menú del contenido de humedad y el poder calórico.

Categorías	Porcentaje dentro del menú	Contenido de humedad (%)	Poder calórico (kcal/kg)
EPP contaminado	0,80	0,03	33,36
Envases plásticos triturados	2,50	0,04	278,63
Aserrín	9,00	0,93	333,59
Aceite Contaminado	69,0	0,0	6 563,9
Pastillas trituradas	5,2	0,4	258,5
Biopeligrosos esterilizados	8,00	3,57	621,60
Resina epóxica	4,00	0,02	439,48
Ropa	1,50	0,14	82,34
Promedio ponderado del menú		**5,14**	**8 611,33**

Por lo tanto, se sustenta que el menú tiene un porcentaje de humedad óptimo para la incineración, debido a, que el desecho de mayor influencia es el aceite y este contiene solo un 0,005 % de humedad, y gracias a esto se puede asegurar un proceso de incineración eficiente, ya que, el contenido de humedad es menor al 50

% y no habrá problemas en la disminución de temperatura dentro de las cámaras de combustión (Hernández, 2010).

Así mismo, el valor de poder calórico ponderado de la muestra, servirá para mantener dicha temperatura de las cámaras, es importante porque se reduce costos económicos, ya que el alimentar desechos con un elevado poder calórico y en este caso muy similar al poder calórico del combustible auxiliar diésel 10 294,26 kcal/kg no habrá la necesidad de alimentar una cantidad mayor de este combustible para la operación óptima del incinerador (Camacho et al., 2011).

4.7.2 MENÚS DE INCINERACIÓN.

En la Tabla 28 se expone el menú seis y se especifica las cantidades en kilogramos que se necesita para cada desecho en una carga de 90 kg, por turno de 8 horas y finalmente por día.

Tabla 28.
Menú 6 propuesto para la alimentación del incinerador.

	Menú 6	**Por carga**	**Por turno**	**Por día**
CATEGORÍAS	%	kg		
EPP contaminado	0,80	0,72	28,80	86,40
Envases plásticos triturados	2,50	2,25	90,00	270,00
Aserrín	9,0	8,1	324,0	972,0
Aceite Contaminado	69,0	62,1	2 484,0	7 452,0
Pastillas trituradas	5,20	4,68	187,20	561,60
Biopeligrosos esterilizados	8,0	7,2	288,0	864,0
Resina epóxica	4,0	3,6	144,0	432,0
Ropa	1,50	1,35	54,00	162,00

En la Tabla 29 se muestra el segundo menú propuesto para la incineración, cabe destacar que no se pudo realizar una prueba piloto en la planta HAZWAT con este menú, debido a las diversas actividades que realiza la empresa por prestación de sus servicios. Se eligió este menú, ya que presenta similitudes con el menú propuesto en la tabla 28, principalmente en el porcentaje de cenizas generado igual

al 6,41 %; un poder calórico ponderado de 8 649,29 kcal/kg y un contenido de humedad ponderado de 3,81 %, con estas características se lo consideró apto para ser utilizado en el proceso de incineración.

Tabla 29.
Menú 7 propuesto para la alimentación del incinerador.

	Manú 7	**Por carga**	**Por turno**	**Por día**
CATEGORÍAS	%	Kg		
EPP contaminado	0,70	0,63	25,20	75,60
Envases plásticos triturados	2,10	1,89	75,60	226,80
Aserrín	8,60	7,74	309,60	928,80
Aceite Contaminado	71,0	63,9	2556,0	7668,0
Pastillas trituradas	5,6	5,04	201,6	604,8
Biopeligrosos esterilizados	5,0	4,5	180,0	540,0
Resina epóxica	5,0	4,5	180,0	540,0
Ropa	2,0	1,8	72,0	216,0

Los menús entregados a la empresa HAZWAT son óptimos para el proceso de incineración, ya que se garantiza una baja formación de HCl y por consiguiente una pequeña concentración de compuestos halogenados, los mismos que pueden ser destruidos al mejorar las condiciones operacionales de la cámara de postcombustión, se reducirá la producción de ceniza a un 5,19 % y se mantendrá la temperatura adecuada en las cámaras de combustión con la ayuda del poder calórico ponderado, mejorando la destrucción de componentes dentro de la cámara de combustión primaria.

CAPÍTULO 5
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES

- Los desechos peligrosos seleccionados para la elaboración de los menús de carga en la incineración fueron elegidos tomando en cuenta su frecuencia de llegada a la planta HAZWAT y su recurrencia dentro de la misma, los desechos con los que se trabajó son: aceite contaminado, aserrín, pastillas trituradas, EPP contaminado, biopeligrosos, resina epóxica y ropa.

- En la caracterización de los desechos se obtuvo que el porcentaje de humedad varía entre 4 a 10 % a excepción de los desechos biopeligrosos con un valor de 45 %; el poder calórico con mayor influencia fue el aceite contaminado con un valor de 9 512,83 kcal/kg debido a que se lo utilizó en mayor porcentaje dentro de los menús; en el análisis FTIR no se evidenció grupos funcionales con cloro.

- En el balance de masa del incinerador se consideró los flujos másicos de entrada: a los desechos 500 kg/h; diésel 9,86 kg/h y aire de alimentación de 7 728,30 kg/h; los flujos de salida fueron: gas de combustión 12 680,00 kg/h, y ceniza 71,16 kg/h. A su vez, para este proceso térmico se estimó un flujo de calor de entrada de 5 125 534,45 vatios; el tiempo de residencia para la cámara de postcombustión fue de 2,02 segundos.

- De los 10 menús de carga elaborados se seleccionó dos menús; el menú número seis el cual presenta un poder calórico de 8 611,33 kcal/kg, contenido de humedad de 5,14 % y un porcentaje de cenizas de 5,19 % y el menú número siete con un poder calórico de 8 642,29 kcal/kg, contenido de humedad de 3,81 % y un porcentaje de cenizas de 6,41 %.

- La prueba piloto fue realizada en la empresa HAZWAT, por un tiempo de tres horas, utilizando el menú de carga seis, el cual consiste en: 69,0 % de aceite contaminado; 9,0 % de aserrín; 8,0 % de biopeligrosos, 5,2 % de pastillas trituradas, 4,0 % de resina epóxica; 2,5 % de envases plásticos; 1,5 % de ropa y 0,8 % de EPP contaminado.

5.2 RECOMENDACIONES

- Realizar un monitoreo completo de emisiones atmosféricas y material particulado antes del lavador de gases, para lo que se debe colocar un puerto de muestreo más arriba del punto anterior, dónde se realizó la medición, de esta forma los gases que se emiten por la chimenea se puedan enfriar por convección, garantizando de esta manera una medición exacta de los gases por medio del equipo isocinético y el analizador de gases portátil.

- Realizar una prueba piloto de por lo menos 8 horas (turno de operación del incinerador), para obtener un monitoreo de emisiones y cenizas donde solo se considere los contaminantes producidos por el menú de carga establecido el cual deberá ser alimentado al incinerador durante todo este tiempo.

- Trabajar en la implementación de diferentes menús de carga de incineración con alguna composición en particular, dado que los desechos que llegan a la planta son muy cambiantes, se debe considerar establecer menús que se aproximen a rangos de poder calorífico similar al presentado, al igual que la humedad, para que pueda existir una relación dinámica entre la destrucción de distintos desechos peligrosos.

- Utilizar todo el tiempo el sistema de lavador de gases, suspendiendo el bypass de la chimenea que tiene salida directa al ambiente, ya que existe una gran cantidad de emisiones de contaminantes como el CO, MP, NOx, etc., que están siendo emitidos constantemente, afectando la salud de los operadores de la planta, habitantes de la zona y la calidad ambiental.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Agarwal, J. (2019). Waste management of residual black ash in barium industries. *Materials Today: Proceedings*, *18*, 4810–4815. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.07.469
2. Allsopp, M., Costner, P., & Johnston, P. (2001). *Incineración y Salud*. https://archivoes.greenpeace.org/espana/Global/espana/report/other/incineraci-n-y-salud-2.pdf
3. Ambientum. (2018, April 11). *Incineración y tratamientos térmicos*. https://www.ambientum.com/enciclopedia_medioambiental/suelos/incineracion_y_tratamientos_termicos.asp
4. American Society for Testing and Materials. (2003). *Standard Practice for Extraction of Solid Waste Samples for Chemical Analysis*. *93*(Reapproved 2003), 1–7.
5. American Society for Testing and Materials. (2004). *ASTM C566-97 Standard Test Method for Total Evaporable Moisture Content of Aggregate by Drying* (pp. 1–8). https://webstore.ansi.org/Standards/ASTM/astmc566972004?gclid=CjwKCAjw14uVBhBEEiwAaufYx_8wR_6l0xgdMPz4Byy2DRcmN8bGlHzurH_71PbAStzOjY18e71EDBoCoDAQAvD_BwE
6. APEX INSTRUMENTS. (n.d.). *PS-6-H – Apex Instruments*. Retrieved June 27, 2022, from https://www.apexinst.com/product/ps-6-h
7. Artunduaga, M., Losada, G., & García, T. (2015). Impacto en la salud por el inadecuado manejo de los residuos peligrosos. *Ingenierías USBMed*, *6*(2), 46–50. https://doi.org/https://doi.org/10.21500/20275846.1731
8. ASTM. (2011). *Standard Test Method for Gross Calorific Value of Coal and Coke*. https://tienda.aenor.com//norma-astm-d5865-10ae1-076058
9. ATSDR. (2000). Resumen de Salud Pública Manganeso. *Agencia de Sustancias Toxicas y El Registro de Enfermedades*, 12.
10. ATSDR. (2005). Resumen de Salud Pública: Cinc. *Salud Pública*, 1–8. www.atsdr.cdc.gov/es
11. ATSDR. (2012). Resumen de Salud Pública Cromo. *Agencia Para Sustancias Toxicas y El Registro de Enfermedades*, 8.

https://www.atsdr.cdc.gov/es/phs/es_phs7.pdf

12. Ayala, J. L. (2018). Valoración energética del aceite lubricante usado en sistemas térmicos de combustión de la industria cementera ecuatoriana. *Novasinergia Revista Digital De Ciencia, Ingeniería Y Tecnología*, *1*(2), 60–70. https://doi.org/10.37135/unach.ns.001.02.07
13. BCN. (2013). *Singapur: Expertos en reciclaje y en el manejo de residuos - Programa Asia Pacifico*. Asia Pacífico . https://www.bcn.cl/observatorio/asiapacifico/noticias/singapur-expertos-residuos
14. Beto, X. (2010, June 12). *Materiales sólidos poder calorífico*. http://betserpi-seguridadcontraincendio2.blogspot.com/2010/06/materiales-solidos-poder-calorifico-en.html
15. Brookfield Ametek. (2015). *Moisture in Oils: The Three-Headed Beast*. https://www.brookfieldengineering.com/blogs/2015/april/moisture-in-oils-the-three-headed-beast
16. Cabrera, C. (2011). *Manual para el manejo de los residuos peligrosos de tipo químico (CRETI)* (pp. 1–54). https://www.inper.mx/descargas/pdf/CRETI.pdf
17. Camacho, A., Abellán, J., García, C., & López, D. (2011). *Mejores Técnicas Disponibles de referencia europea para Incineración de Residuos* (M. de M. A. y M. R. y Marino (ed.); 1st ed.). https://prtr-es.es/Data/images/MTD_Incineracion_residuos_ES.pdf
18. Cando, C., Salazar, A., & Carvajal, S. (2018). *Módulo de Desechos Sanitarios en Establecimientos de Salud* . https://www.ecuadorencifras.gob.ec/documentos/web-inec/Encuestas_Ambientales/Establecimientos_Salud-Residuos_Peligrosos/2018/DOC_TEC_MOD_AGROAMB_2019_15_05_2020_2_3.pdf
19. Cano, L. (2016). *Cuantificación del porcentaje de humedad y cenizas contenidos en los residuos sólidos urbanos del distrito metropolitano de Quito* [Universidada Internacional SEK]. https://repositorio.uisek.edu.ec/bitstream/123456789/2499/1/Cano Leslie Tesis UISEK.pdf
20. Carbotecnia. (2020). *Carbón activado mineral peletizado*.

https://www.carbotecnia.info/producto/carbon-activado-para-aire-pelet-organicos-carvapur/

21. CEMPRE. (2000). Parte 4 Incineración 1 ¿Qué es la incineración? In *Manual de Gestión Integral* (ADAN VENEZ, pp. 267–287). http://www.cempre.org.uy/docs/manual_girsu/parte_4_incineracion.pdf
22. Centeno, M., Ramírez, J., & Muruais, J. (2010). *Guía de valoración energética de residuos* (M. 44.970-2010). https://www.oficemen.com/wp-content/uploads/2017/05/Guia-de-valorizacion-energetica-de-residuos.-Fenercom-2010.pdf
23. Centro Municipal de Salud Tres Arroyos. (2019). *Protocolo de limpieza y desinfección hospitalaria*. https://centrodesalud.com.ar/descargas/protocolo de limpieza hospitalaria CMS 2019.pdf
24. Chepe, N. (2017). *Guía de Diseño para Reciclabilidad Polietileno de Alta Densidad (HDPE, Código de Identificación de Resina # 2)*. 1–15. www.ecoce.mx
25. Dagnino, J. (2014). *Análisis de Varianza*. https://revistachilenadeanestesia.cl/PII/revchilanestv43n04.07.pdf
26. Echanique, P., Velasco, A., Lara, I., Carvajal, P., & Guarderas, J. (2006). *Plan de Gestión de Residuos Industriales Peligrosos del Municipio de Quito* (D. Gonzáles (ed.)). Gráficas Ayerve C.A.
27. Elías, X. (2003). 3ª Parte: Los residuos como combustibles. Nociones sobre la combustión. In *La incineración de residuos y su adecuación a la Resolución 005* (pp. 3–27). http://www.ingenieroambiental.com/4014/ponencias-id79.pdf
28. Elías, X. (2005a). *Tratamiento y valorización energética de residuos* (1st ed., Vol. 1). Díaz de Santos S. A. https://books.google.com.cu/books?id=qYmL8Q10TYcC&printsec=frontcover#v=onepage&q&f=false
29. Elías, X. (2005b). *Valorización energética de residuos*. http://www.ingenieroambiental.com/4014/ponencias-id69.pdf
30. EPA. (2002). *Air Pollution Control Technology Fact Sheet*. 1–4. https://www3.epa.gov/ttnchie1/mkb/documents/fcataly.pdf
31. EPA. (2012). *Hoja de Datos EPA-CICA Hoja de Datos-Tecnología de Control*

de Contaminación del Aire. https://www3.epa.gov/ttn/catc/cica/files/fsprytws.pdf

32. Eurostat. (2013, December). *Poder Calorífico*. https://ingemecanica.com/tutoriales/poder_calorifico.html#tabla1
33. FARN. (2018). Incineración de basura con recuperación de energía. *Fundación Ambiente y Recursos Naturales*, 1–33. https://farn.org.ar/wp-content/uploads/2020/06/Incineración-de-residuos_Documento-FARN.pdf
34. Felder, R., & Ronal, R. (2004). *Principios elementales de los procesos químicos* (Grupo Noriega Editores (ed.); 3rd ed.). LIMUSA WILEY, S.A,.
35. Fernández, J. (2010). *PODER CALORIFICO* (Vol. 1, pp. 1–22). edUTecNe. http://www.edutecne.utn.edu.ar/maquinas_termicas/01-poder_calorifico.pdf
36. Fundación EROSKI. (2010). La importancia de reciclar. *Revista Idea Sana EROSKI*, 1–28. www.ideasana.com
37. Gielar, A., & Helios-Rybicka, E. (2013). Enviromental impact of a hospital waste incineration plant in Krakow (Poland). *Waste Management and Research*, *31*(7), 722–728. https://doi.org/10.1177/0734242X13485868
38. Gonzáles, G. (2003). *Optimización del proceso de incineración de residuos sólidos municipales*. Universidad Autónoma Metropolitana.
39. Greenpeace. (2009). *Incineración de residuos: malos humos para el clima*. http://archivo-es.greenpeace.org/espana/Global/espana/report/costas/091124-02.pdf
40. Harper, C., & Petrie, E. (2003). Wiley: Plastics Materials and Processes: A Concise Encyclopedia . In CEM Corporation (Ed.), *Plastics Materials and Processes: A Concise Encyclopedia*. http://eu.wiley.com/WileyCDA/WileyTitle/productCd-0471456039.html
41. Hasan, M. (2015, August). *Standard Moisture Regain and Moisture Content of Fibers*. Textile Calculations. https://www.textilecalculations.com/standard-moisture-regain-and-moisture-content-of-fibers/
42. HAZWAT. (2017). *Empresa de gestión integral de desechos*. https://www.hazwat.com.ec/nuestra-empresa/
43. Hernández, S. (2010). *Determinación de una mezcla óptima a incinerar, de residuos peligrosos y de manejo especial; que facilite su tratamiento térmico y contribuya a disminuir los niveles de emisiones de contaminantes al*

ambiente. [INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL]. https://tesis.ipn.mx/jspui/bitstream/123456789/9608/1/66.pdf

44. INEC. (2020). *Información Económica Ambiental en Empresas ENESEM 2018*. https://www.ecuadorencifras.gob.ec/documentos/web-inec/Encuestas_Ambientales/EMPRESAS/Empresas_2018/PRINC_RESUL_MOD_AMBIENTAL_ENESEM_2018.pdf
45. NTP 115: Toma de muestras de cloro, Pub. L. No. NTP 115, 1 (2000). https://www.insst.es/documents/94886/326853/ntp_115.pdf/58188010-6ded-4f8d-95b3-3d7b099bc8d2?version=1.0&t=1617977223662#:~:text=Esta norma para la toma,impingers (NTP nº 22.82).
46. International Zinc Association. (2010). *Zinc un material sostenible*. https://www.zinq.fr/wp-content/uploads/pdf/zinc-materiau-durable-es.pdf
47. Jácome, E. (2017, March 7). *Arranca campaña para reciclar residuos especiales y peligrosos en Quito - El Comercio*. El Comercio. https://www.elcomercio.com/tendencias/campana-reciclaje-residuos-peligrosos-quito.html
48. Jämsä, S., Gomez, J., Hearle, J., Moseley, D., & Smirnov, A. (2018). Control strategy for a multiple hearth furnace in kaolin production. *Control Engineering Practice*, *81*, 18–27. https://doi.org/10.1016/J.CONENGPRAC.2018.08.020
49. Kanhar, A. H., Chen, S., & Wang, F. (2020). Incineration fly ash and its treatment to possible utilization: A review. *Energies*, *13*(24), 35. https://doi.org/10.3390/en13246681
50. Kočí, V., & Picková, E. (2020). Life cycle perspective of liquid epoxy resin use in the automotive industry. *Polish Journal of Environmental Studies*, *29*(1), 653–667. https://doi.org/10.15244/pjoes/100495
51. LaGrega, M., Buckingham, P., & Evans, J. (2000). *GESTIÓN DE RESIDUOS TÓXICOS, TRATAMIENTO, ELIMINACIÓN Y RECUPERACIÓN DE SUELOS: Vol. I* (McGraw-Hill (ed.)). https://www.urbe.edu/UDWLibrary/InfoBook.do?id=9032
52. Lord, H. L., & Pfannkoch, E. A. (2012). Sample Preparation Automation for GC Injection. *Comprehensive Sampling and Sample Preparation*, *2*, 597–

612. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-381373-2.00061-2

53. MAATE. (2015). *NORMA TÉCNICA DE DESECHOS PELIGROSOS Y ESPECIALES* (pp. 1–9).
54. MAATE. (2019). *RCOA*. https://site.inpc.gob.ec/pdfs/lotaip2020/REGLAMENTO AL CODIGO ORGANICO DEL AMBIENTE.pdf
55. MAE, Pub. L. No. AC. 026 Procedimiento para la gestión de desechos peligrosos, 1 (2007). https://www.ambiente.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2014/05/AM-026-Procedimientos-Registro-generadores-desechos-peligrosos.pdf
56. MAE, Pub. L. No. AM. 142 Listado nacional sustancias químicas peligrosas, desechos peligrosos, 48 (2012).
57. MAE, Pub. L. No. 061, 1 (2015). https://www.gob.ec/sites/default/files/regulations/2018-09/Documento_acuerdo-ministerial-061.pdf
58. MAE. (2016). *Prestadores de servicio (gestores) para el manejo de materiales peligrosos*. https://www.ambiente.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2016/03/BD_GESTORES_-24-02-16.pdf
59. Martínez, J. (2005). Fichas Temáticas. In Centro Coordinador del Convenio de Basilea para América Latina y el Caribe. (Ed.), *Guía para la Gestión Integral de Residuos Peligrosos* (Vol. 2, pp. 1–133). Montevideo - Uruguay. https://www.cempre.org.uy/docs/biblioteca/guia_para_la_gestion_integral_residuos/gestion_respel02-fichas_tematicas.pdf
60. Martínez, J., Mallo, M., Lucas, R., Álvarez, J., Salvarrey, A., & Gristo, P. (2005). Guía para la Gestión Integral de Residuos Peligrosos-Fundamentos. In Silvia Aguinaga (Ed.), *Guía para la Gestión Integral de Residuos Peligrosos* (Vol. 1, pp. 1–164). https://www.cempre.org.uy/docs/biblioteca/guia_para_la_gestion_integral_residuos/gestion_respel01_fundamentos.pdf
61. MAYPA S.A. (2009). *Incineración de Residuos Peligrosos: Industriales y Biológico-Infecciosos* [MAYPA PRISMA]. http://sinat.semarnat.gob.mx/dgiraDocs/documentos/bc/estudios/2009/02BC2009I0001.pdf

62. Méndez, M. (2014). *Mejoramiento del tratamiento de desechos hospitalarios por esterilización en autoclaves* [Universidad Central del Ecuador]. https://core.ac.uk/download/pdf/71903117.pdf
63. Monsalvo, R., Miranda, M., Romero, M., & Muñoz, G. (2014). *Balance de Materia y Energía: Procesos Industriales* (PATRIA (ed.); 1st ed.). Callejas, Javier. https://books.google.com.ec/books?id=afLhBAAAQBAJ&printsec=frontcover&hl=es&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false
64. Montenegro, L. (2016). *Material Auxiliar de Transferencia de Calor II*.
65. Moreno, J. (2011). *DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE MANEJO DE RESIDUOS PELIGROSOS GENERADOS EN LOS TERMINALES Y DEPÓSITOS DE EP PETROECUADOR* [UNIVERSIDAD INTERNACIONAL SEK]. https://repositorio.uisek.edu.ec/bitstream/123456789/101/1/Sistema de Manejo de Residuos Peligrosos EP PETROECUADOR.pdf
66. Mugica, V., Amador, M. A., Miguel, T., & Figueroa, J. (2003). MERCURIO Y METALES TÓXICOS EN CENIZAS PROVENIENTES DE PROCESOS DE COMBUSTIÓN E INCINERACIÓN. *Rev. Int. Contam. Ambient*, *19*(2), 93–100.
67. National Research Counci. (2000). Waste Incineration and Public Health. In *Waste Incineration and Public Health*. https://doi.org/10.17226/5803
68. Nordberg, G., Langard, S., Sunderman, F. W., Mager Stellman, J., Osinsky, D., Markkanen, P., & Dinman, B. (2001). Metales: propiedades quimicas y toxicidad. *Enciclopedia de Salud y Seguridad En El Trabajo*, 1–76.
69. OMC. (2021). El comercio de productos médicos en el contexto de la lucha contra la covid-19: evolución en 2020. *ORGANIZACIÓN MUNDIAL DEL COMERCIO*, *2021*, 1–15. https://www.wto.org/spanish/tratop_s/covid19_s/medical_goods_update_jun21_s.pdf
70. OMS. (2016a, March 15). *Cada año mueren 12,6 millones de personas a causa de la insalubridad del medio ambiente*. https://www.who.int/es/news/item/15-03-2016-an-estimated-12-6-million-deaths-each-year-are-attributable-to-unhealthy-environments

71. OMS. (2016b, October 4). *Las dioxinas y sus efectos en la salud humana*. https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/dioxins-and-their-effects-on-human-health
72. Organización Internacional del Trabajo. (2021). Equipos de Protección Personal (EPP). *Salud y Seguridad En El Trabajo*, 1–12. http://www.cepb.org.bo/wp-content/uploads/2021/04/9-EQUIPOS-DE-PROTECCION-PERSONAL.pdf
73. Padilla, C., Moreno, L., Buenaño, L., Cuaical, B., & Barrera, O. (2018). Análisis situacional del tratamiento de aceites automotrices residuales. *Polo Del Conocimiento*, *3*(7), 1–172. https://doi.org/10.23857/PC.V3I7.536
74. Parvez, M. (2018). *Steam Condenser*. *April*, 1–15. https://www.researchgate.net/publication/324168245_Steam_Condenser
75. PENNRAM. (2015). Highway PHCA-1100 MEDICAL WASTE INCINERATOR Pennram Job 214115. In *Pennram PHCA-1100*.
76. PENNRAM. (2022). *Incinerators – Pennram*. https://www.pennram.com/incinerators/
77. Precision IBC. (2017). *OUR COMMITMENT TO EXCELLENCE* (pp. 1–24). https://www.precisionibc.com/wp-content/uploads/2017/03/PIBC_Product_Catalog.pdf
78. PTT. (2021). *GESTIÓN INTEGRAL DE DESECHOS HAZWAT*.
79. Pugh, M. (2004). *Forced Draft and Induced Draft Fan* (Vol. 3, Issue 3).
80. Reymond, C. (2006). Familia IIA. Metales alcalinotérreos. In *Química general para bachillerato* (pp. 1–13). http://www.prepa9.unam.mx/etimologias_interactivas/textos/AreaII/QuimOrg/2 Metales_alcalino-terreos.pdf
81. Rodríguez, J., & Irabien, Á. (2013). Incineración de residuos peligrosos. In S. . Editorial Sintesis (Ed.), *Gestión sostenible de los residuos peligrosos* (p. 372). Sintesis.
82. Rosas, A., Peña, A., Rodríguez, G., Izumikawa, C., Aguilar, G., Trejo, J., Martínez, S., Ramos, A., Gutiérrez, A., Romero, L., & Figueroa, P. (2009). Evaluación de la incineración de residuos peligrosos. *Gaceta Ecológica*, *1*(66), 27–40. https://www.redalyc.org/pdf/539/53906603.pdf
83. Sáez, A., & Urdaneta, J. A. (2014). Manejo de residuos sólidos en América

Latina y el Caribe. *Omnia*, *20*(3), 121–135. https://www.redalyc.org/pdf/737/73737091009.pdf

84. Salazar Delgado, J. (2013). Método de ensayo para la determinación cualitativa y cuantitativa del contenido de polímero presente en ligantes asfálticos modificados. In *Métodos y Materiales* (Vol. 3, Issue 1). https://doi.org/10.15517/mym.v3i1.13482
85. Santos, H. (2012). *Incineración convencional de residuos peligrosos*. https://www.juntadeandalucia.es/medioambiente/consolidado/publicaciones digitales/40-542_TECNICAS_DE_PREVENCION_DE_LA_GENERACION_DE_SUELOS_CONTAMINADOS_TOMO_I/40-542/5_INCINERACION_CONVENCIONAL.PDF
86. Sawyer, S. F. (2009). Analysis of Variance: The Fundamental Concepts. *Journal of Manual & Manipulative Therapy*, *17*(2), 27E-38E. https://doi.org/10.1179/jmt.2009.17.2.27e
87. Secretaría de Economia México. (2001). Determinación De Cloruros Totales En Aguas Naturales, Residuales Y Residuales Tratadas - Método De Prueba. *Diario Oficial de La Federación*. https://aniq.org.mx/Pqta/pdf/NMX-AA-quimicosgpo2.pdf
88. Secretaría del Ambiente, Pub. L. No. 138, 1 1 (2001). http://www.quitoambiente.gob.ec/index.php/calidad-y-gestion-ambiental/normativas
89. Secretaría del Ambiente, Pub. L. No. 404, RESOLUCIÓN No 002-SA 1 (2014). https://www.cip.org.ec/attachments/article/2096/RESOLUCIÓN No 002-SA-2014.pdf
90. SEMARNAT, 8 Norma Oficial Mexicana NOM-015-CONAGUA-2007, Infiltración artificial de agua a los acuíferos.- Características y especificaciones de las obras y del agua. 18 (2002). https://www.gob.mx/profepa/documentos/norma-oficial-mexicana-nom-015-conagua-2007
91. Spirax Sarco. (2001). *Boiler feedtank systems* (7th ed., pp. 1–12). https://content.spiraxsarco.com/-/media/spiraxsarco/international/documents/ca/ti/pivotrol-ti-5-010-

en.ashx?rev=d6a62e63ec9943369270581df01146c8

92. SRT. (2017). *Ficha técnica de prevención SRT: Resinas Epoxi*. https://www.srt.gob.ar/wp-content/uploads/2017/03/Ficha_tecnica_Resinas.pdf
93. Suárez, C. (2000). Problemática y gestión de residuos sólidos peligrosos en Colombia. *INNOVAR*, *1*(15), 41–52. http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=81801504
94. TA Instruments. (2005). *Thermal Analysis Application Brief - Determination of moisture in Epoxi Resin*. http://www.tainstruments.com/pdf/literature/TA112.pdf
95. Tangri, N. (2005). *Incineración de residuos: una tecnología muriendo*. GAIA, Alianza Global Anti-Incineración. https://www2.congreso.gob.pe/sicr/cendocbib/con4_uibd.nsf/BEED4EBCBF98D22E05257D690071A2E9/$FILE/IncineracionResiduosTecnologíaMuriendo.pdf
96. Tangri, N., & Wilson, M. (2017). Gasificación y pirólisis de residuos : procedimientos de alto riesgo y baja rentabilidad para el tratamiento de residuos. *GAIA*, 1–16. https://www.no-burn.org/wp-content/uploads/Gasificación-y-pirólisis-2017-ESP-1.pdf
97. Tello, D., Peña, K., & Hernández. (2019). Estimación de emisión de metano (CH4) en el relleno sanitario Presidente por medio de imágenes satelitales | Revista de Topografía AZIMUT. *Revista de Topografía*. https://revistas.udistrital.edu.co/index.php/azimut/article/view/15654
98. Tews, M. (2007). *Innovadora tecnología de resonancia de microondas Medición de la humedad para procesos y laboratorio*. https://www.interempresas.net/FeriaVirtual/Catalogos_y_documentos/14541/Medicion_humedad.pdf
99. Ungureanu, M., Jozsef, J., & Brezoczki, V. M. (2021). *Investigación sobre la Recuperación Energética de Sólidos Municipales Residuos en el condado de Maramures mediante incineración*.
100. Valdovinos, G. (2007). *El manejo de los residuos peligrosos biológico-infecciosos (RPBI) en hospitales de nivel II y III del Sector Salud en México (un enfoque sistematico)*. 328.

101. Valdovinos, G. (2010). *El manejo de los residuos peligrosos biológico-infecciosos (RPBI) en hospitales de nivel II y III del sector salud en México (un enfoque sistemático).* 330. https://bvirtual.epn.edu.ec:2145/es/ereader/epn/74738

102. Vargas, S., Onatra, W. illia., Osorno, L., Páez, E., & Sáenz, O. (2008). Contaminación Atmosférica y efectos respiratorios. *Colciencias*, *55*, 45. http://www.scielo.org.co/pdf/rudca/v11n1/v11n1a06.pdf

103. Vatavuk, W. M. (2002). Capítulo 2 Incineradores. In *Manual de Costos de Incineración del aire de la EPA* (6th ed., Vol. 1, pp. 1–66). Enviromental Protection Agency, EPA.

104. Verlek. (2022). *Sistemas de control emisiones calderas*. https://verlek.com/2017/12/01/sistemas-control-emisiones/

105. Villaseñor, G. (2002). *Incineración y Oxidación por via humeda* [Universidad de Sonora]. http://tesis.uson.mx/digital/tesis/docs/4314/Capitulo9.pdf

106. Waste 2 Water. (2020). *Guía de biorremediación: beneficios de la biorremediación y más*. What Is Bioremediation, and What Are Its Benefits. https://www.waste2water.com/bioremediation-benefits-and-uses/

107. World Bank. (2000). Municipal solid waste incineration - Technical Guidance Report. *Municipal Waste Combustion*, 4. http://www.worldbank.org/urban/solid_wm/erm/CWG folder/Waste Incineration.pdf%5Cnhttp://inis.iaea.org/search/search.aspx?orig_q=RN:23086616

108. Zábala, C., Hernández, B., & Vargas, M. (2016). Aceites y grasas: efectos en la salud y regulación mundial Fat and oils: Effects on health and global regulation. *Rev. Fac. Med*, *64*(4), 761–769. https://doi.org/10.15446/revfacmed.v64n4.53684

109. Zero Waste Europe. (2015). *Contaminación atmosférica e incineración de residuos: peligroso respirar Informe*.

110. Zhang, L., Wu, L., Tian, F., & Wang, Z. (2016). Analysis of the Composition and Characteristics of Medical Waste at a Disaster Relief Site. *PLoS ONE*, *11*(7), 159261. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0159261

ANEXOS

ANEXO 1

Inventario de desechos peligrosos presentes en cada galpón de HAZWAT

Tabla A1.1
Galpón de fármacos

Tipo de desecho	% Peso	Características	Tipo de Envase						Estado		
			Vidrio	Papel	Blister	Plástico	Metal	Cartón	Líquido	Pastoso	Sólido
Medicamentos	60%	Tabletas (vitaminas, uso veterinario)		x	x						x
		Inyectables	x	x		x			x		
		Jarabes	x			x					x
		Ampollas	x			x			x		
Cosméticos	25%	Perfumes	x			x		x	x		
		Shampoo				x		x		x	
		Cremas				x			x		
		Pasta dental				x		x		x	
		Cepillos de dientes				x		x			x
		Desodorantes				x			x		
		Acetona				x			x		
		Bisutería					x	x			x
		Esmaltes	x			x			x		
		Aerosoles					x				
		Pañales				x	x				x
Alimentos	9%	Chocolates				x					x
		Helados						x			x
		Chicles				x		x			x
		Harinas, mantequilla				x					x
Otros	6%	Etiquetas		x							x
		Ropa				x					x
		Juguetes				x					x
		Electrodomésticos									x

Celdas resaltadas: desechos seleccionados

Tabla A1.2
Galpón de pinturas y resinas

Tipo de Desecho	Característica	N° Unidades	Volumen (l)	Peso (kg)	Estado	Tipo de envase	Etiqueta CRETIB
Desechos comunes inorgánicos, tabaco	Filtros de cigarrillo (termofibra - lana mineral)	75	-	9,87	Sólido	Cartón	-
Resina epóxica	Contiene ácido bórico	379	-	21,1	Líquido	Metal	T, C
Resina epóxica	Revestimiento epóxico fenólico, contiene butanol, acetatot de n-butilo y metil-etil-cetona.	34	15,1	-	Líquido	Plástico	I,C,T
Resina epóxica	Contiene polímero epoxy, fenilmetanol, éster de alquil glicidilo.	128	2,83	-	Líquido	Metal	I,T
Resina epóxica	Contiene compuestos aromáticos	106	9,46	-	Líquido	Metal	I,T
Resina epóxica	Contiene butanol, poliaminadas.	28	18,9	-	Sólidos y semisólidos		T
Plastificante Retardante para hormigones	Plastificante retardante formulado para hormigones, aditivo químico, su base química es polímeros.	2	-	200	Líquido	Plástico	-

Tipo de Desecho	Característica	N° Unidades	Volumen (l)	Peso (kg)	Estado	Tipo de envase	Etiqueta CRETIB
Sellador de emulsión de agua epoxi	Contiene poliuretano, polimero epoxy, propoxietanol, fenilmetanol.	48	3,78	-	Líquido	Plástico	T
Pintura Inorgánica de Zinc	Contiene tolueno, etanol, polisilicato de etilo, silicato de etilo	10	15,1	-	Líquido	Metal	I,T
Pintura alquídica	Contiene minerales, polímero alquídico de soja, etilbencina, dióxido de titanio.	32	3,66	-	Líquido	Metal	C,T
Tiñel "sucio"	Contiene acetato de etilo, alcoholes , rubber solvent.	3	-	200	Líquido	Plástico	I,C,T
Residuos varios	Base acuosa	4	-	180	Sólido	Plástico	C,T
Bulk tanks	Ácido benceno dicarboxílico.	16	-	200	Sólidos y semisólidos	Plástico	T,I
Látex	Contiene agua, carbonato de calcio, polímero acrílico, polímero de vinilo, dióxido de titanio.	19	3,48	-	Líquido	Metal	C,T

Celdas resaltadas: desechos seleccionados

Tabla A1.3
Galpón de químicos

Tipo de Desecho	Característica	N° Unidades	Peso (kg)	Volumen (l)	Estado	Tipo de envase	Información Adicional	Etiqueta CRETIB
Químicos de laboratorios	Mezcla de químicos no identificados	12	-	4 - 1 000	Líquido	Vidrio	Mezcla con aserrín para incinerar	T,C
Químicos de industrias	Mezcla de químicos no identificados	4	-	40	Líquido	Plástico	Mezcla con aserrín para incinerar	T,C
Polvos químicos	Polvos no identificados	6	0,03	-	Líquido	Plástico	Se diluyen y realiza mezcla e incineración	T,C
Químicos de laboratorios	Mezcla de químicos no identificados, con pH elevado.	10	-	25	Líquido	Vidrio	Se realiza neutralización.	T,C
Químicos de industrias	Mezcla de químicos no identificados, con pH elevado.	4	-	25	Líquido	Plástico	Se realiza neutralización.	T,C
Aserrín	Material utilizado para mezclar con químicos	-	700	-	Sólido	bulk tanks	-	-
Productos automotrices	Mezcla de hidrocarburos (incoloro y negro)	12	-	220	Sólido	Plástico	No se ha realizado ningún procedimiento	T,C
Lavado de gases	Contiene ácidos	4	-	220	Líquido	Plástico	Se realiza mezcla con aserrín y se incinera	T,C
Viales	Utilizados para DQO	-	-	-	Líquido	Vidrio	Se encapsulan	T,C,B

Celdas resaltadas: desechos seleccionados

Tabla A1.4
Galpón de aceites y grasas

Tipo de desecho	Características	N° Unidades	Peso (kg)	Estado	Tipo de envase	Código Producto HAZWAT	Información Adicional
Residuos de tintas, pinturas, resinas que contengan sustancias	Lodos con olor a pinturas, de diferentes colores, alcohol sucio.	22	200	Líquido	Metal	38 559	Empresa de embalaje (PET)
Lodos aceitosos	Olor a solventes, pinturas.	17	150-200	Semilíquido-pastosos	Metal	37 650	Empresa que opera en el sector dela minería y metales
		10	1 000	Pastosos	*Bulk tanks*		
		3	1 000	Semisólido-pastosos	*Bulk tanks*	35 670	
		1	1 000	Semisólido-pastosos	*Bulk tanks*	37 829	
		7	200	Sólidos	Metal	37 711	
		10	200	Semisólidos pastosos	Metal		
		5	1 000	Semisólidos pastos	*Bulk tanks*		

Tipo de desecho	Características	N° Unidades	Peso (kg)	Estado	Tipo de envase	Código Producto HAZWAT	Información Adicional
Aceites minerales y usados	-	2	200	Sólido	Metal	37 672	-
	-	1	200	Pastosos	Metal		
	-	7	200	Líquido	Metal		
	Apariencia a hidrocarburo	4	300	Semisólido	Metal	37 784	-
		1	300	Líquido	Metal		-
	Elementos de minería y metales	23	200	Líquido	Metal	35 631	Fragancias suavicel, material caducado.
	Hidrocarburos	1	1000	Semilíquido	*Bulk tanks*	37 832	Mezclas
	Hidrocarburos	1	1000	Semilíquido	*Bulk tanks*	37 833	Mezclas
	-	1	1000	Líquido	*Bulk tanks*	37 571	
	-	2	1000	Semisólido-pastosos	*Bulk tanks*	37 824	Color negro con mal olor
	-	7	1000	Semisólido	*Bulk tanks*	36 603	Lodos con tierra e hidrocarburos
	-	3	200	Semisólido	Metal		
	-	10		Semisólido	Metal	37 682	
	-	6	200	Semisólido	Plástico	38 419	
	-	6	195	Semilíquido	Metal	4 612	Producto quimicos caducados o fuera de especificaciones
	-	18	100	Semisólido	Metal	37 776	-

Tipo de desecho	Características	N° Unidades	Peso (kg)	Estado	Tipo de envase	Código Producto HAZWAT	Información Adicional
Residuos de tintas, pinturas, resinas que contengan sustancias	Contienen aceites y/o grasas.	1	180	Semisólido	Metal	37 683	Productos caducados, sin especificaciones
Petroleum Distillates	-	8	180	Líquido	Metal	-	-
Acetato de etilo	-	9	180	Semilíquido	Metal	-	-
Aceites y grasas de contaminados	-	8	200	Líquido	Metal	-	-
Lodos de aceites	-	4	200	Semisólido	Metal	37 834	-

Celdas resaltadas: desechos seleccionados

Tabla A1.5
*Galpón de refinería***s**

Tipo de desecho	Característica	N° Unidades	Peso (kg)	Estado	Tipo de envase
Fondo de tanque de brea	Derivado de petróleo	8	200	Semisólido	Metal
Lupranato		10	200	Sólido	Metal
Aceite con hidrocarburos	Mezcla semisólida de líquido (aceite) y sólido (hidrocarburo-color oscuro).	1	200	Semisólido	Metal
Minerales		4	200	Sólido	Metal
Carbón activado	Alto contenido de azufre. Carbono (50%) Oxígeno (30%) Azufre (6%).	87	200	Sólido	Metal
Catalizadores	Bolas de cerámica granulares del óxido de aluminio, catalizador de la recuperación de azufre para la refinería de petróleo.	11	200	Sólido	Metal
Carbón activado y aceite	Compuestos azufrados, nitrogenados y aromáticos.	5	200	Semisólido	Metal
Carbón activado con mezcla rosada	Bolitas pequeñas y medianas, contiene permanganato de potasio.	4	200	Sólido	Metal
Catalizador 2	Bolas de cerámica granulares del óxido de aluminio, catalizador de la recuperación de azufre para la refinería de petróleo.	4	200	Sólido	Metal
EPP contaminado	Equipo de protección personal contaminada con hidrocartburos	-	150	Sólido	Funda
Lodos	Alta concentración de hidrocarburos, moléculas tóxicas.	226	200	Semisólido	Metal

Celdas resaltadas: desechos seleccionados

ANEXO 2

Resultados de la cuantificación del Poder Calórico de los desechos seleccionados

ANEXO 2.1. DATOS OBTENIDOS DE LAS MUESTRAS DE EPP CON HIDROCARBUROS, PASTILLAS TRITURADAS, ASERRÍN Y ACEITE CONTAMINADO.

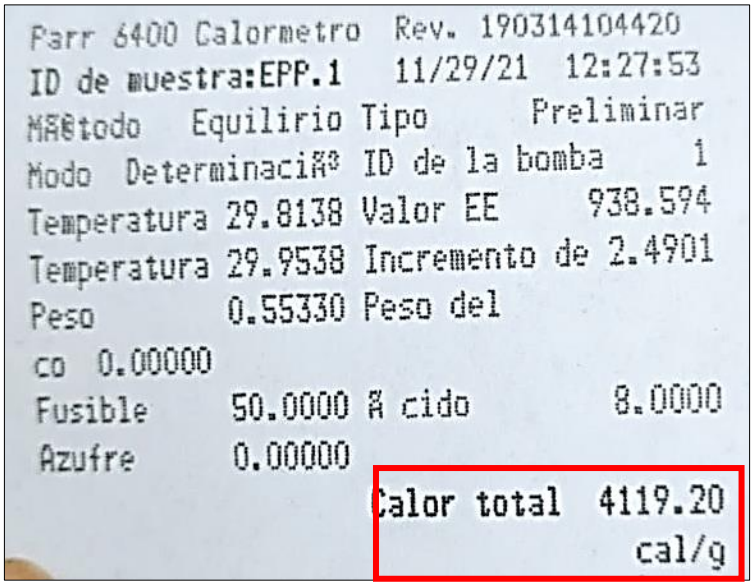

Parr 6400 Calormetro Rev. 190314104420
ID de muestra:EPP.1 11/29/21 12:27:53
MÃ©todo Equilirio Tipo Preliminar
Modo DeterminaciÃ³ ID de la bomba 1
Temperatura 29.8138 Valor EE 938.594
Temperatura 29.9538 Incremento de 2.4901
Peso 0.55330 Peso del
co 0.00000
Fusible 50.0000 Ã cido 8.0000
Azufre 0.00000
Calor total 4119.20
cal/g

Figura 38. Datos obtenidos del ensayo de poder calórico del EPP 1

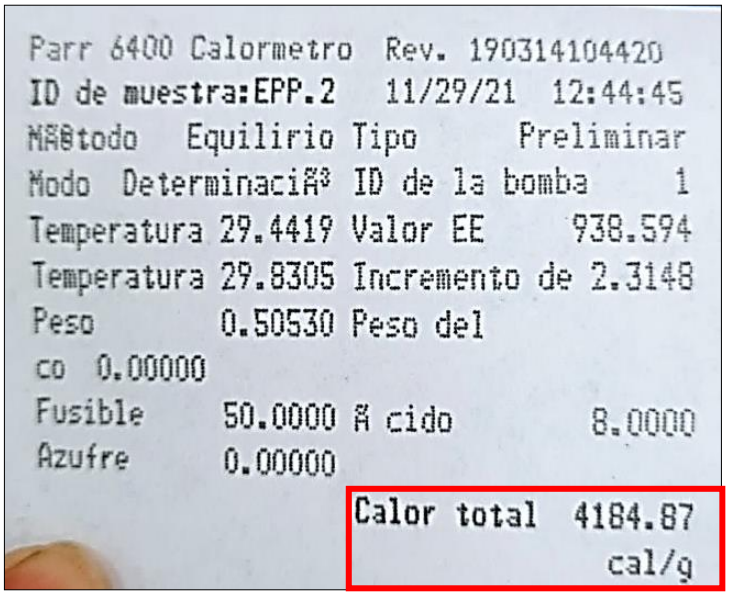
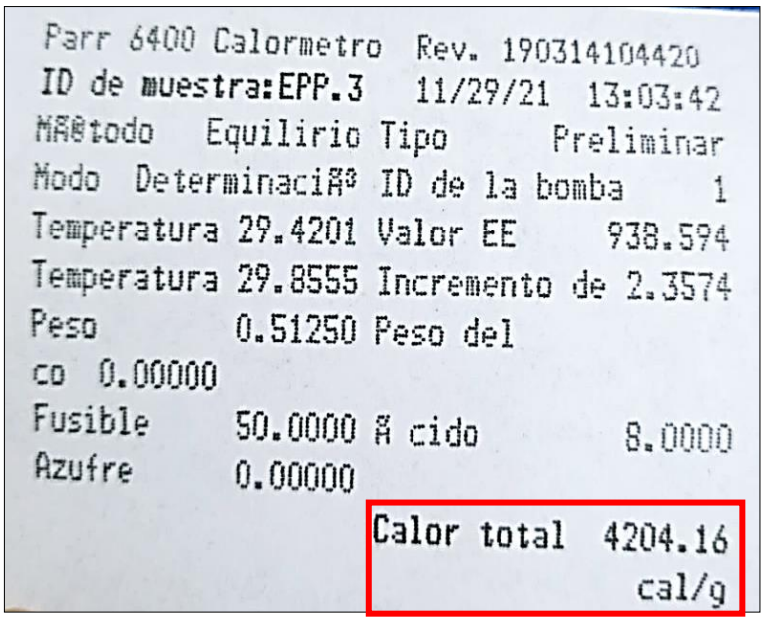
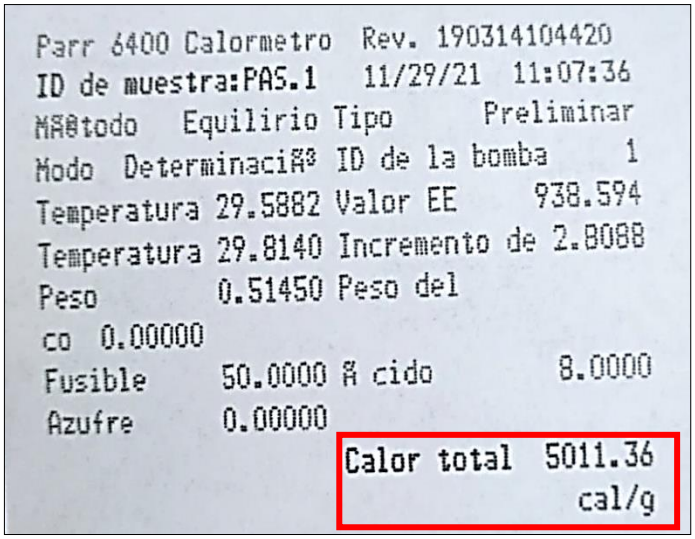

Parr 6400 Calormetro Rev. 190314104420
ID de muestra:EPP.2 11/29/21 12:44:45
MÃ©todo Equilirio Tipo Preliminar
Modo DeterminaciÃ³ ID de la bomba 1
Temperatura 29.4419 Valor EE 938.594
Temperatura 29.8305 Incremento de 2.3148
Peso 0.50530 Peso del
co 0.00000
Fusible 50.0000 Ã cido 8.0000
Azufre 0.00000
Calor total 4184.87
cal/g

Figura 39. Datos obtenidos del ensayo de poder calórico del EPP 2



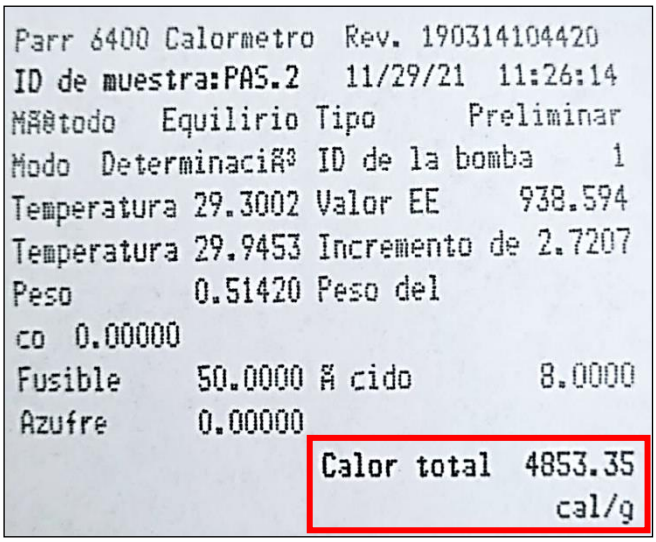
Parr 6400 Calormetro Rev. 190314104420
ID de muestra:EPP.3 11/29/21 13:03:42
MÃ©todo Equilirio Tipo Preliminar
Modo DeterminaciÃ³ ID de la bomba 1
Temperatura 29.4201 Valor EE 938.594
Temperatura 29.8555 Incremento de 2.3574
Peso 0.51250 Peso del
co 0.00000
Fusible 50.0000 Ã cido 8.0000
Azufre 0.00000
Calor total 4204.16
cal/g

Figura 40. Datos obtenidos del ensayo de poder calórico del EPP 3



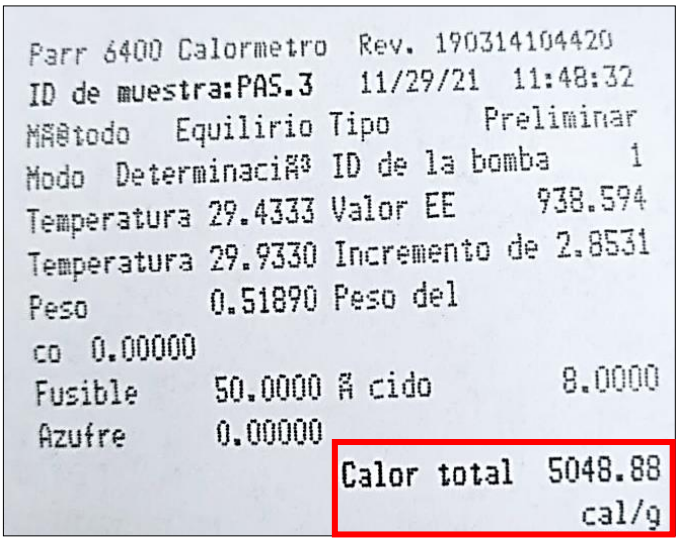
Parr 6400 Calormetro Rev. 190314104420
ID de muestra:PAS.1 11/29/21 11:07:36
MÃ©todo Equilirio Tipo Preliminar
Modo DeterminaciÃ³ ID de la bomba 1
Temperatura 29.5882 Valor EE 938.594
Temperatura 29.8140 Incremento de 2.8088
Peso 0.51450 Peso del
co 0.00000
Fusible 50.0000 Ã cido 8.0000
Azufre 0.00000
Calor total 5011.36
cal/g

Figura 41. Datos obtenidos del ensayo de poder calórico de las Pastillas 1



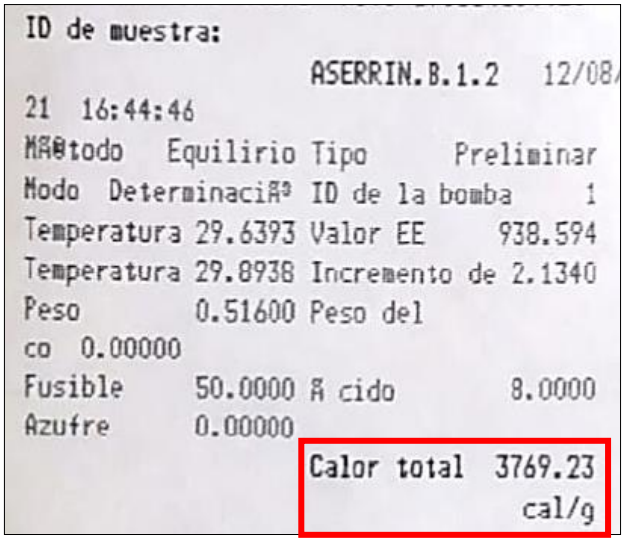
Parr 6400 Calormetro Rev. 190314104420
ID de muestra:PAS.2 11/29/21 11:26:14
MÃ©todo Equilirio Tipo Preliminar
Modo DeterminaciÃ³ ID de la bomba 1
Temperatura 29.3002 Valor EE 938.594
Temperatura 29.9453 Incremento de 2.7207
Peso 0.51420 Peso del
co 0.00000
Fusible 50.0000 Ã cido 8.0000
Azufre 0.00000
Calor total 4853.35
cal/g

Figura 42. Datos obtenidos del ensayo de poder calórico de las Pastillas 2



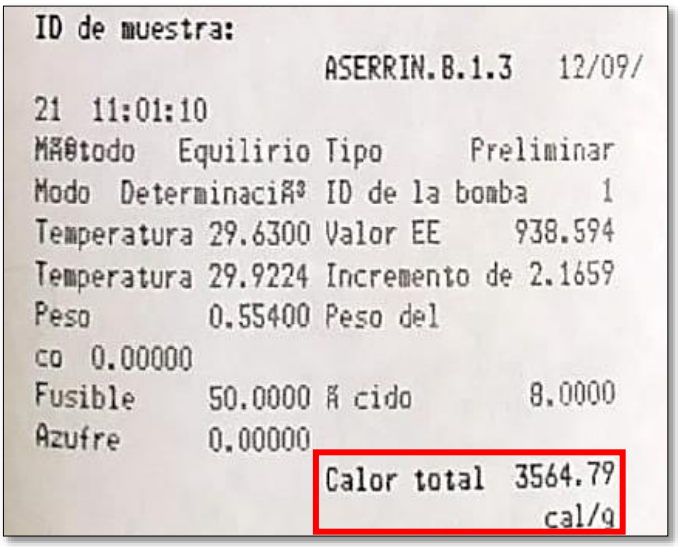
Parr 6400 Calormetro Rev. 190314104420
ID de muestra:PAS.3 11/29/21 11:48:32
MÃ©todo Equilirio Tipo Preliminar
Modo DeterminaciÃ³ ID de la bomba 1
Temperatura 29.4333 Valor EE 938.594
Temperatura 29.9330 Incremento de 2.8531
Peso 0.51890 Peso del
co 0.00000
Fusible 50.0000 Ã cido 8.0000
Azufre 0.00000
Calor total 5048.88
cal/g

Figura 43. Datos obtenidos del ensayo de poder calórico de las Pastillas 3



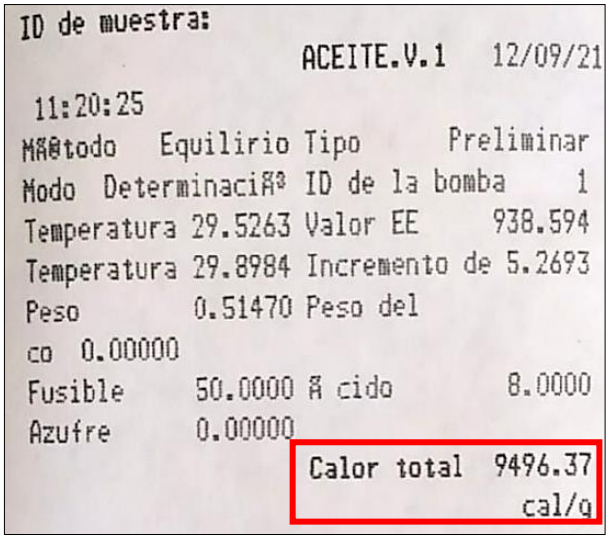
ID de muestra:
ASERRIN.B.1.2 12/08/
21 16:44:46
MÃ©todo Equilirio Tipo Preliminar
Modo DeterminaciÃ³ ID de la bomba 1
Temperatura 29.6393 Valor EE 938.594
Temperatura 29.8938 Incremento de 2.1340
Peso 0.51600 Peso del
co 0.00000
Fusible 50.0000 Ã cido 8.0000
Azufre 0.00000
Calor total 3769.23
cal/g

Figura 44. Datos obtenidos del ensayo de poder calórico del Aserrín 2



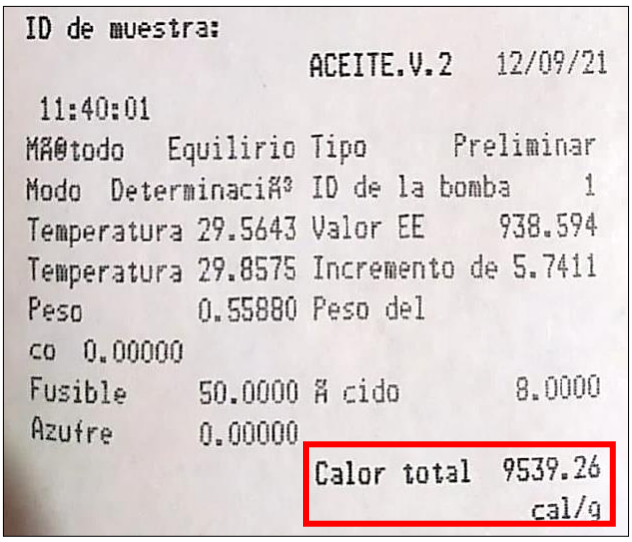
ID de muestra:
ASERRIN.B.1.3 12/09/
21 11:01:10
MÃ©todo Equilirio Tipo Preliminar
Modo DeterminaciÃ³ ID de la bomba 1
Temperatura 29.6300 Valor EE 938.594
Temperatura 29.9224 Incremento de 2.1659
Peso 0.55400 Peso del
co 0.00000
Fusible 50.0000 Ã cido 8.0000
Azufre 0.00000
Calor total 3564.79
cal/g

Figura 45. Datos obtenidos del ensayo de poder calórico del Aserrín 3



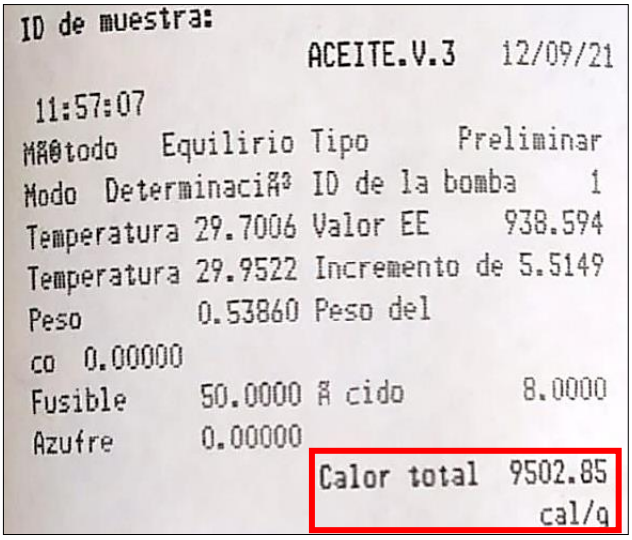
ID de muestra:
ACEITE.V.1 12/09/21
11:20:25
MÃ®todo Equilirio Tipo Preliminar
Modo DeterminaciÃ³ ID de la bomba 1
Temperatura 29.5263 Valor EE 938.594
Temperatura 29.8984 Incremento de 5.2693
Peso 0.51470 Peso del
co 0.00000
Fusible 50.0000 Ã cido 8.0000
Azufre 0.00000
Calor total 9496.37
cal/g

Figura 46. Datos obtenidos del ensayo de poder calórico del Aceite 1



ID de muestra:
ACEITE.V.2 12/09/21
11:40:01
MÃ®todo Equilirio Tipo Preliminar
Modo DeterminaciÃ³ ID de la bomba 1
Temperatura 29.5643 Valor EE 938.594
Temperatura 29.8575 Incremento de 5.7411
Peso 0.55880 Peso del
co 0.00000
Fusible 50.0000 Ã cido 8.0000
Azufre 0.00000
Calor total 9539.26
cal/g

Figura 47. Datos obtenidos del ensayo de poder calórico del Aceite 2



ID de muestra:

ACEITE.V.3 12/09/21

11:57:07

M®todo Equilirio Tipo Preliminar

Modo Determinaci® ID de la bomba 1

Temperatura 29.7006 Valor EE 938.594

Temperatura 29.9522 Incremento de 5.5149

Peso 0.53860 Peso del

co 0.00000

Fusible 50.0000 % cido 8.0000

Azufre 0.00000

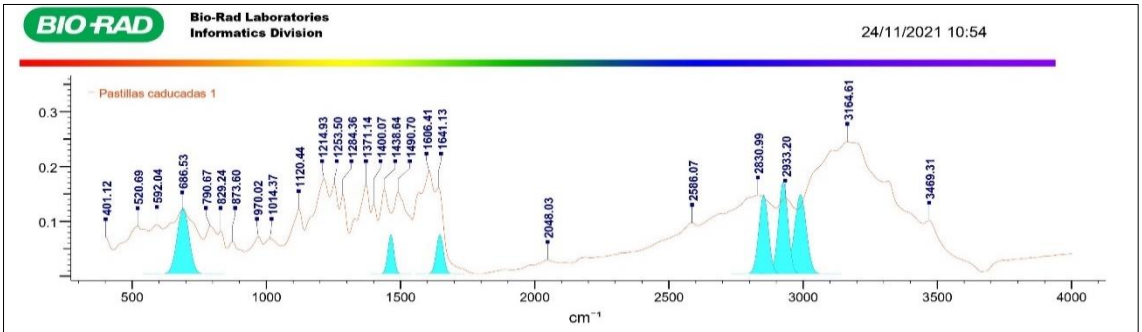
Calor total 9502.85 cal/g

Figura 48. Datos obtenidos del ensayo de poder calórico del Aceite 3

ANEXO 3

Reportes del análisis de espectroscopia de infrarrojo con transformadas de Fourier

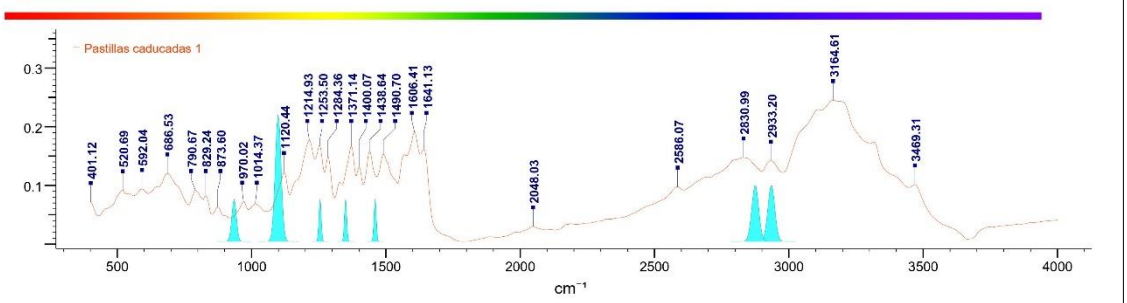
ANEXO 3.1. DETERMINACIÓN DE GRUPOS FUNCIONALES EN LA MUESTRA DE PASTILLAS TRITURADAS.



Manual Corrections: None
Ranges: Full
Search Algorithm: Correlation
Query Path: N.A.

Classification	Group	Bond	Range	Intensity	Mode	Notes
Alkanes	R-CH_2-R					
		CH	2936-2916	strong	antisymmetric stretching	
		CH	2863-2843	strong	symmetric stretching	
		CH	1485-1445	medium	deformation	
Alkenes	RCH=CHR cis					
		CH	3040-2940	medium	stretching	
		C=C	1662-1631	medium	stretching	
		CH	730-650	medium	deformation	CH out-of-plane deformation

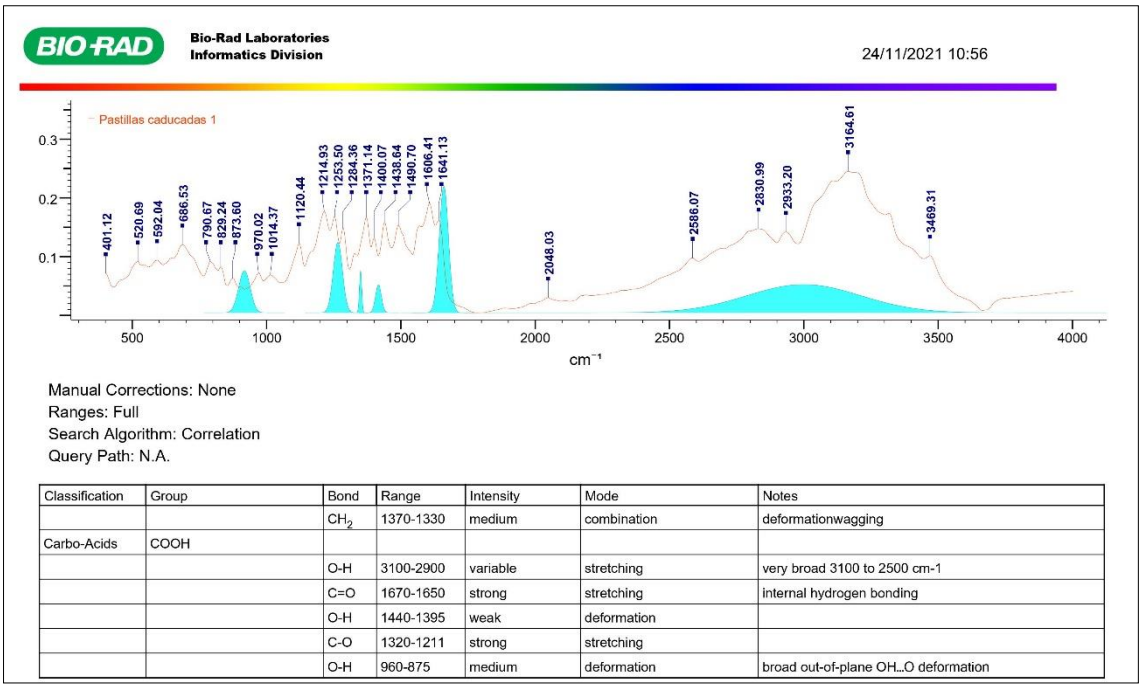
Figura 49. Clasificación de los grupos funcionales Alcanos y Alquenos



Manual Corrections: None
Ranges: Full
Search Algorithm: Correlation
Query Path: N.A.

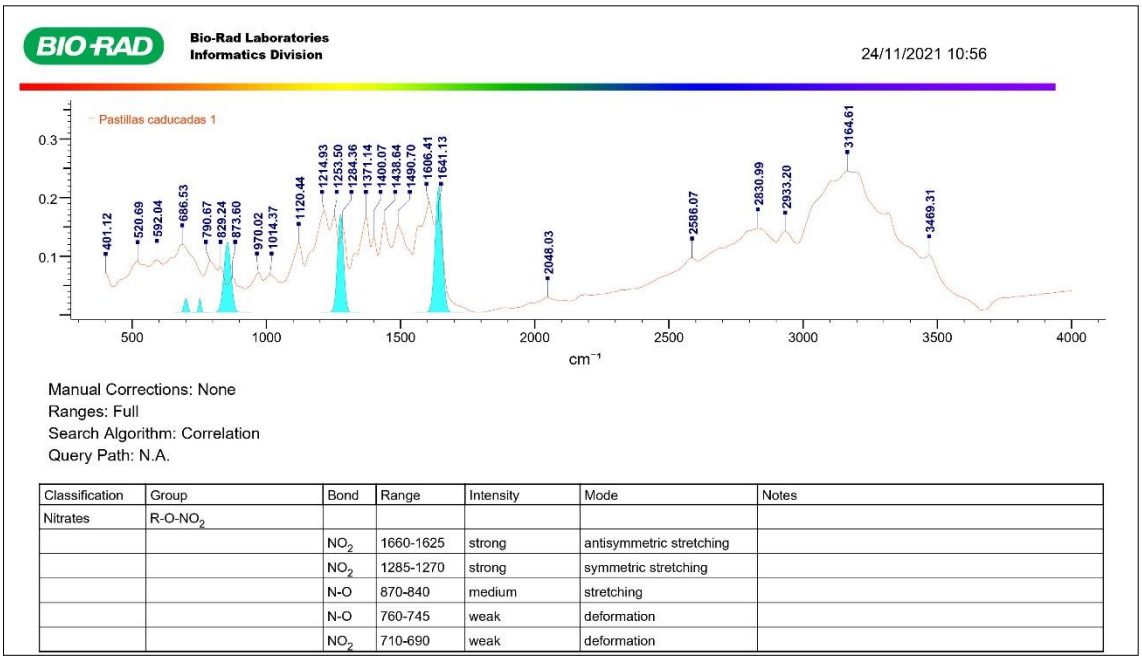
Classification	Group	Bond	Range	Intensity	Mode	Notes
Polyethers-Polyr	Polyethylene oxide					
		CH_2	2960-2910	medium	antisymmetric stretching	
		CH_2	2900-2850	medium	symmetric stretching	
		CH_2	1480-1440	medium	combination	deformationβending
		CH_2	1370-1330	medium	combination	deformationwagging
		CH_2	1280-1230	medium	combination	deformation≡wisting
		C-O	1130-1070	strong	antisymmetric stretching	
		C-O	1050-820	medium-weak	symmetric stretching	

Figura 50. Clasificación del grupo funcional Poliéteres



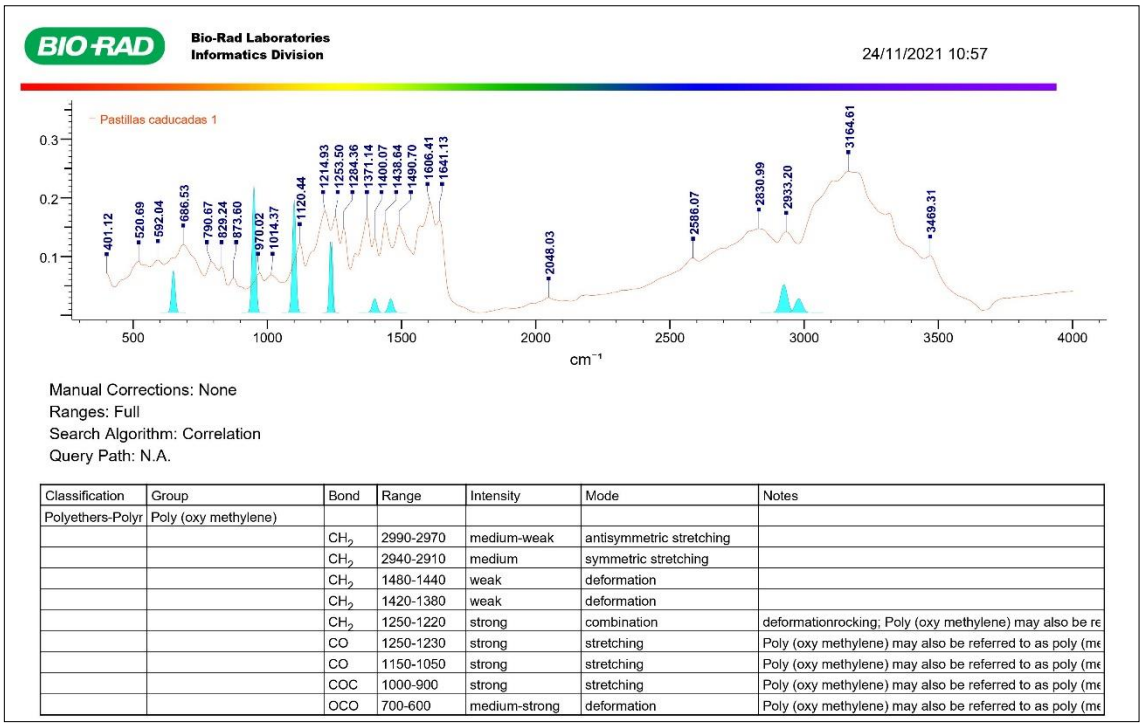
Classification	Group	Bond	Range	Intensity	Mode	Notes
		CH_2	1370-1330	medium	combination	deformationwagging
Carbo-Acids	COOH					
		O-H	3100-2900	variable	stretching	very broad 3100 to 2500 cm-1
		C=O	1670-1650	strong	stretching	internal hydrogen bonding
		O-H	1440-1395	weak	deformation	
		C-O	1320-1211	strong	stretching	
		O-H	960-875	medium	deformation	broad out-of-plane OH..O deformation

Figura 51. Identificación del grupo funcional Carbo-ácidos



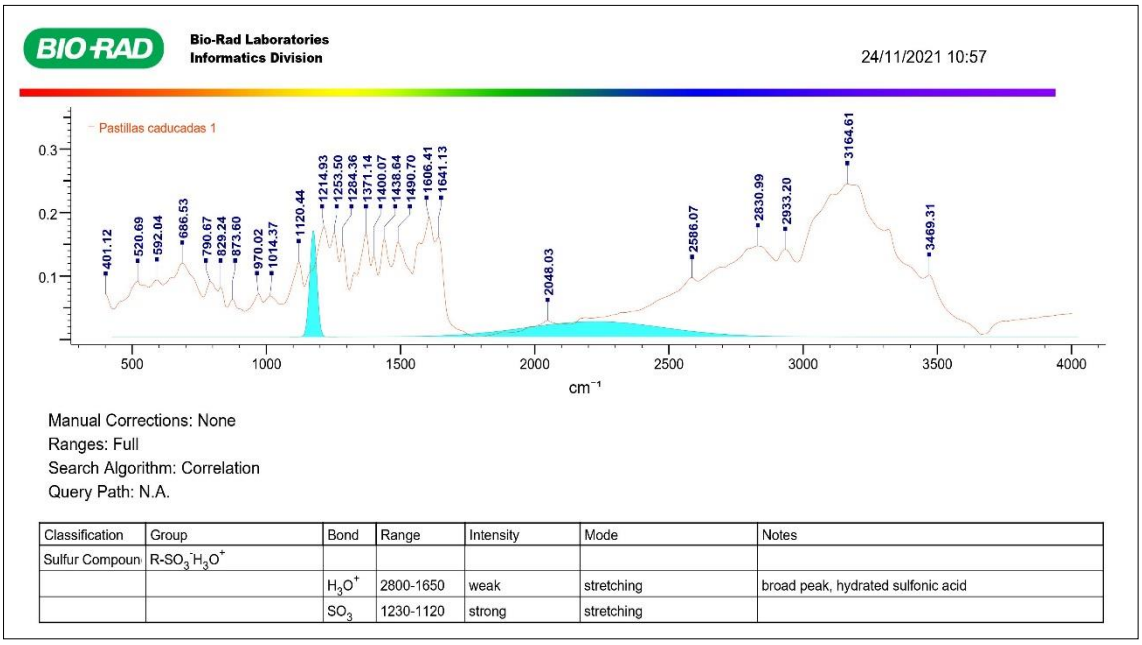
Classification	Group	Bond	Range	Intensity	Mode	Notes
Nitrates	$R\text{-}O\text{-}NO_2$					
		NO_2	1660-1625	strong	antisymmetric stretching	
		NO_2	1285-1270	strong	symmetric stretching	
		N-O	870-840	medium	stretching	
		N-O	760-745	weak	deformation	
		NO_2	710-690	weak	deformation	

Figura 52. Clasificación del grupo funcional Nitratos



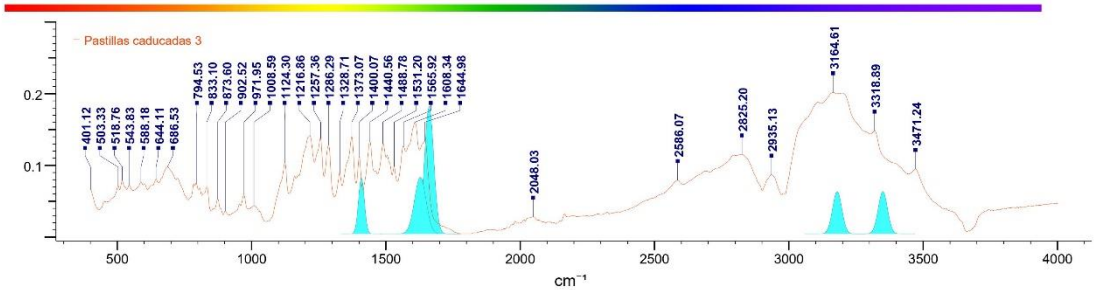
Classification	Group	Bond	Range	Intensity	Mode	Notes
Polyethers-Polyr	Poly (oxy methylene)					
		CH_2	2990-2970	medium-weak	antisymmetric stretching	
		CH_2	2940-2910	medium	symmetric stretching	
		CH_2	1480-1440	weak	deformation	
		CH_2	1420-1380	weak	deformation	
		CH_2	1250-1220	strong	combination	deformationrocking; Poly (oxy methylene) may also be re
		CO	1250-1230	strong	stretching	Poly (oxy methylene) may also be referred to as poly (me
		CO	1150-1050	strong	stretching	Poly (oxy methylene) may also be referred to as poly (me
		COC	1000-900	strong	stretching	Poly (oxy methylene) may also be referred to as poly (me
		OCO	700-600	medium-strong	deformation	Poly (oxy methylene) may also be referred to as poly (me

Figura 53. Clasificación del grupo funcional Poliéteres



Classification	Group	Bond	Range	Intensity	Mode	Notes
Sulfur Compoun	$R\text{-}SO_3^-H_3O^+$					
		H_3O^+	2800-1650	weak	stretching	broad peak, hydrated sulfonic acid
		SO_3	1230-1120	strong	stretching	

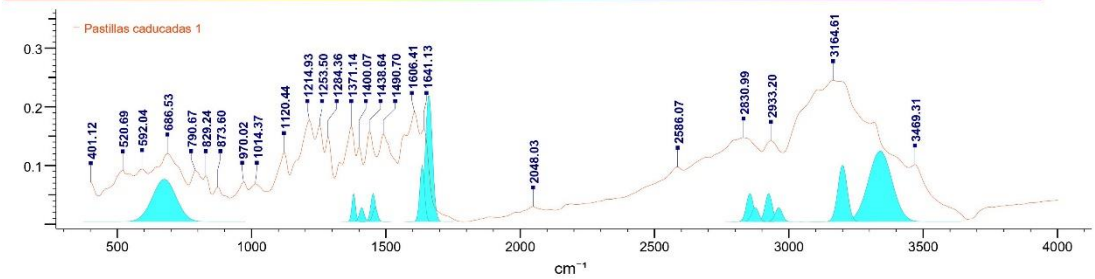
Figura 54. Clasificación del grupo funcional Compuestos de Azufre



Manual Corrections: None
Ranges: Full
Search Algorithm: Correlation
Query Path: N.A.

Classification	Group	Bond	Range	Intensity	Mode	Notes
Amides	R-CO-NH_2					
		NH	3375-3325	medium	antisymmetric stretching	primary amide
		NH	3205-3155	medium	symmetric stretching	
		C=O	1680-1642	strong	stretching	amide I
		NH_2	1638-1618	strong	deformation	amide II
		C-N	1420-1400	medium	stretching	

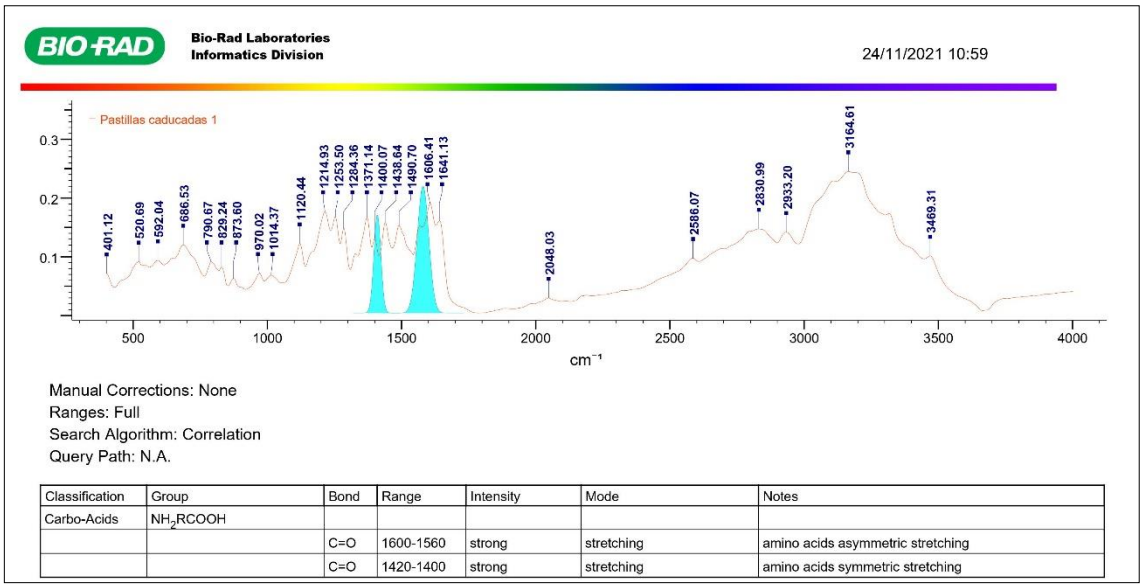
Figura 55. Clasificación del grupo funcional Amidas



Manual Corrections: None
Ranges: Full
Search Algorithm: Correlation
Query Path: N.A.

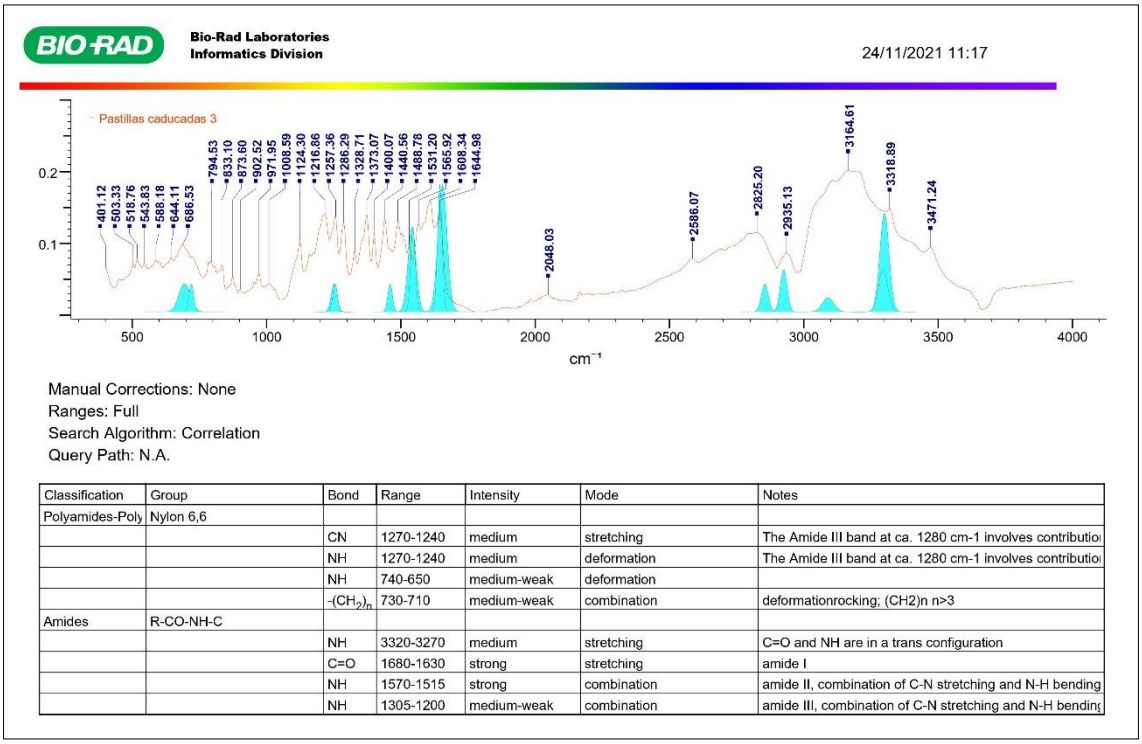
Classification	Group	Bond	Range	Intensity	Mode	Notes
Polyamides-Poly	Polymethacrylamide					
		CH_2	2870-2840	weak	symmetric stretching	
		C=O	1670-1650	strong	stretching	
		NH_2	1650-1620	strong	deformation	
		CH_2	1480-1440	medium	deformation	
		CH_3	1465-1440	medium	deformation	
		CN	1430-1390	medium	stretching	
		CH_3	1390-1370	medium	deformation	
		NH_2	750-600	medium	deformation	

Figura 56. Clasificación del grupo funcional Poliamidas



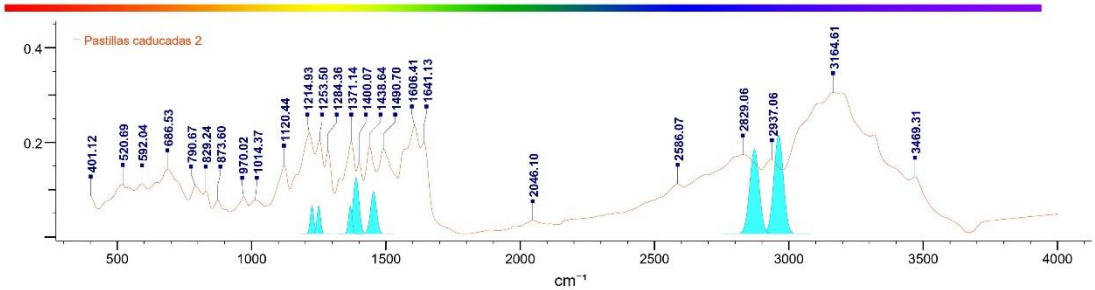
Classification	Group	Bond	Range	Intensity	Mode	Notes
Carbo-Acids	NH_2RCOOH					
		C=O	1600-1560	strong	stretching	amino acids asymmetric stretching
		C=O	1420-1400	strong	stretching	amino acids symmetric stretching

Figura 57. Clasificación del grupo funcional Carbo-Ácidos



Classification	Group	Bond	Range	Intensity	Mode	Notes
Polyamides-Poly	Nylon 6,6					
		CN	1270-1240	medium	stretching	The Amide III band at ca. 1280 cm-1 involves contributio
		NH	1270-1240	medium	deformation	The Amide III band at ca. 1280 cm-1 involves contributio
		NH	740-650	medium-weak	deformation	
		$-(CH_2)_n$	730-710	medium-weak	combination	deformationrocking; (CH2)n n>3
Amides	R-CO-NH-C					
		NH	3320-3270	medium	stretching	C=O and NH are in a trans configuration
		C=O	1680-1630	strong	stretching	amide I
		NH	1570-1515	strong	combination	amide II, combination of C-N stretching and N-H bending
		NH	1305-1200	medium-weak	combination	amide III, combination of C-N stretching and N-H bending

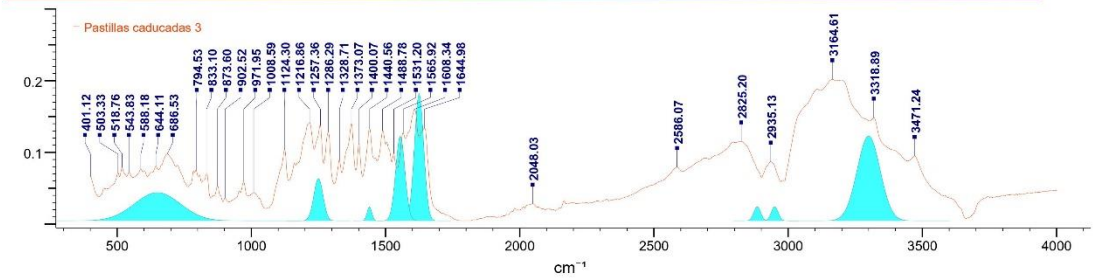
Figura 58. Clasificación del grupo funcional Amidas y Poliamidas



Manual Corrections: None
Ranges: Full
Search Algorithm: Correlation
Query Path: N.A.

Classification	Group	Bond	Range	Intensity	Mode	Notes
Alkanes	$C\text{-}(CH_3)_3$					
		CH	2972-2952	strong	antisymmetric stretching	
		CH	2882-2862	strong	symmetric stretching	
		CH	1475-1435	medium	antisymmetric deformation	
		CH	1395-1385	medium	deformation	
		CH	1370-1365	medium	deformation	
		CC	1255-1245	medium	skeletal vibration	
		CC	1250-1200	medium	skeletal vibration	

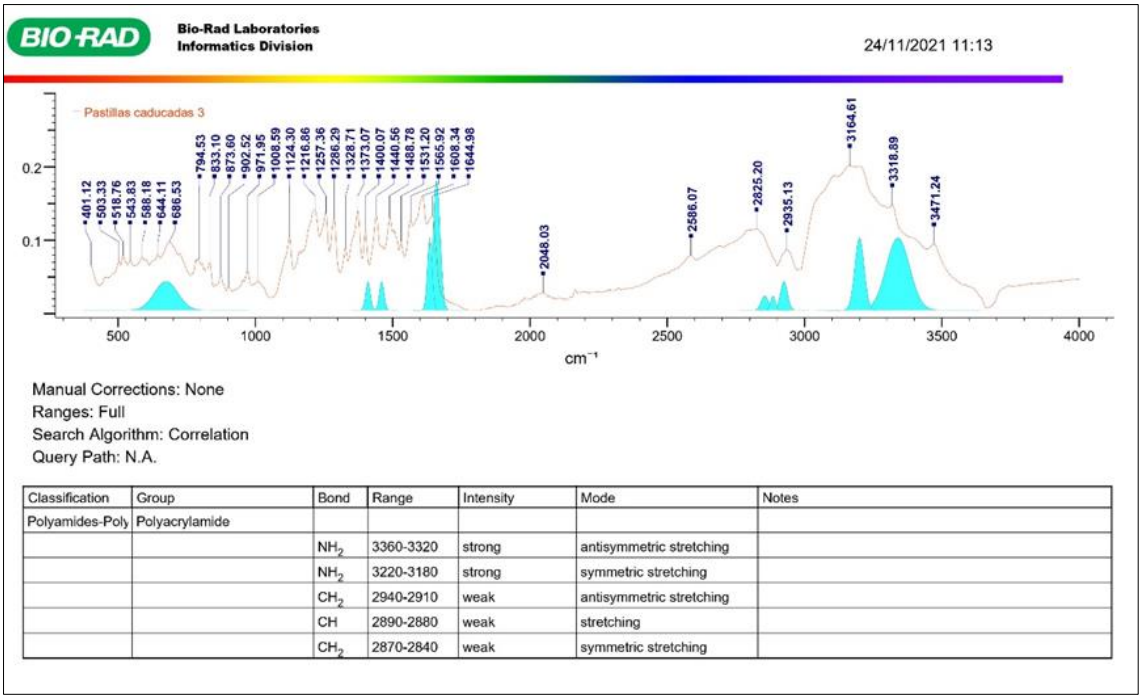
Figura 59. Clasificación del grupo funcional Alcanos



Manual Corrections: None
Ranges: Full
Search Algorithm: Correlation
Query Path: N.A.

Classification	Group	Bond	Range	Intensity	Mode	Notes
Polyureas-Polym	Poly (methylene urea)					
		CH_2	2920-2850	weak	symmetric stretching	
		C=O	1640-1610	strong	stretching	The "Amide I" band (-C=O) in linear aliphatic polyureas h
		NH	1580-1530	strong	deformation	The "Amide I" band (-C=O) in linear aliphatic polyureas h
		CH_2	1460-1420	weak	deformation	
		CN	1300-1200	medium	stretching	
		NH	750-550	medium-weak	deformation	

Figura 60. Clasificación del grupo funcional Poliureas

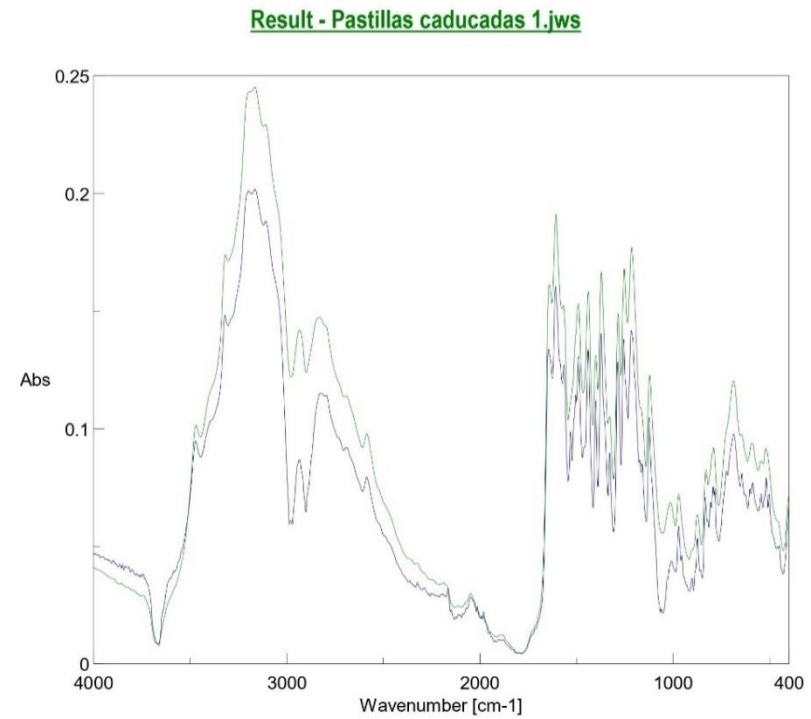


Manual Corrections: None
Ranges: Full
Search Algorithm: Correlation
Query Path: N.A.

Classification	Group	Bond	Range	Intensity	Mode	Notes
Polyamides-Poly	Polyacrylamide					
		NH_2	3360-3320	strong	antisymmetric stretching	
		NH_2	3220-3180	strong	symmetric stretching	
		CH_2	2940-2910	weak	antisymmetric stretching	
		CH	2890-2880	weak	stretching	
		CH_2	2870-2840	weak	symmetric stretching	

Figura 61. Clasificación del grupo funcional Poliamidas

ANEXO 3.2. GRÁFICAS DE CORRELACIÓN DE LAS TRES CORRIDAS DEL ANÁLISIS FTIR.



[Comparison of data]

Algorithm	Correlation Coefficient
Range	3999.640 - 399.193cm-1
Sample	Pastillas caducadas 3
Score	0.97972

Pastillas caducadas 1.jws
Pastillas caducadas 3.jws

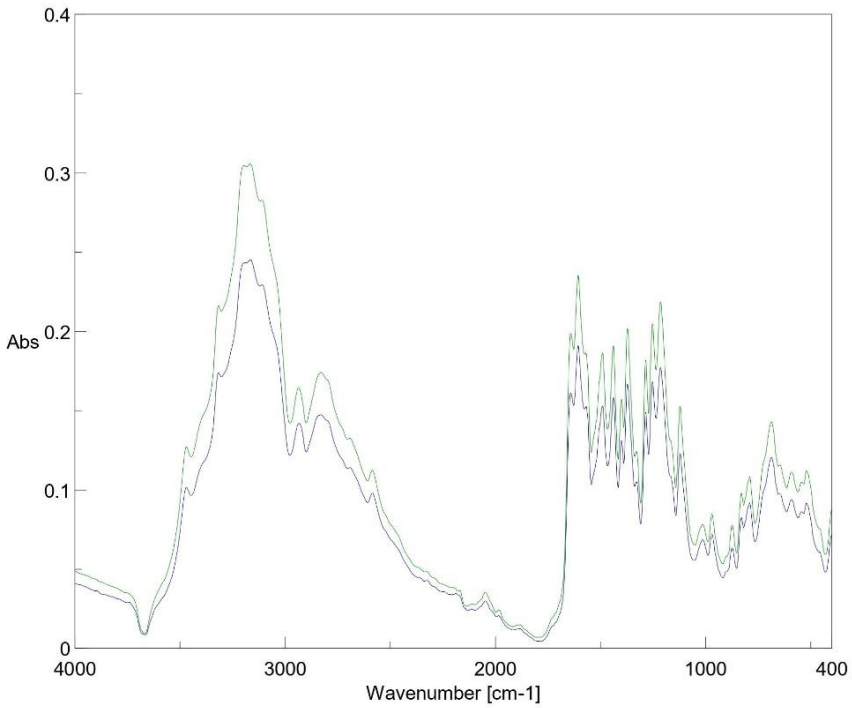
[Measurement Information]

Model Name	FT/IR-4600typeA
Serial Number	E137961786
Accessory	ATR PRO ONE
Accessory S/N	C158461809
Incident angle	45 deg
Measurement Date	24/11/2021 10:25
Light Source	Standard
Detector	TGS
Accumulation	16
Resolution	4 cm-1
Zero Filling	Off
Apodization	Triangle
Gain	Auto (4)
Aperture	Auto (7.1 mm)
Scanning Speed	Auto (2 mm/sec)
Filter	Auto (30000 Hz)

[Detailed Information]

Creation date	24/11/2021 10:27
Data array type	Linear data array
Horizontal axis	Wavenumber [cm-1]
Vertical axis	Abs
Start	399.193 cm-1
End	4001.57 cm-1
Data interval	1.92847 cm-1
Data points	1869

Figura 62. Correlación del análisis de la muestra Pastillas caducadas_1 vs. Pastillas caducadas_3.



[Comparison of data]

Algorithm	Correlation Coefficient
Range	3999.640 - 399.193cm-1
Sample	Pastillas caducadas 1
Score	0.99884

Pastillas caducadas 2.jws
Pastillas caducadas 1.jws

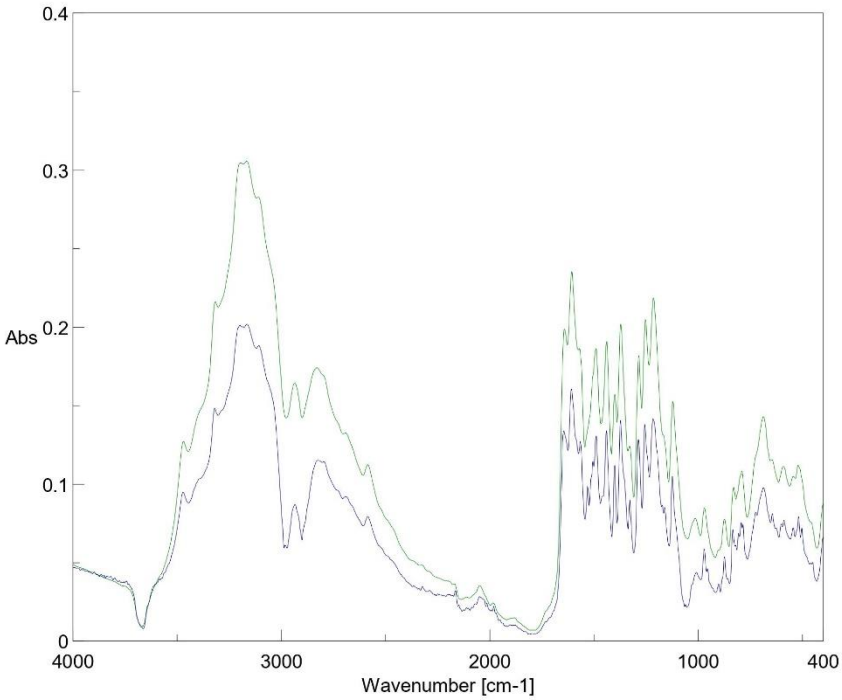
[Measurement Information]

Model Name	FT/IR-4600typeA
Serial Number	E137961786
Accessory	ATR PRO ONE
Accessory S/N	C158461809
Incident angle	45 deg
Measurement Date	24/11/2021 10:28
Light Source	Standard
Detector	TGS
Accumulation	16
Resolution	4 cm-1
Zero Filling	Off
Apodization	Triangle
Gain	Auto (4)
Aperture	Auto (7.1 mm)
Scanning Speed	Auto (2 mm/sec)
Filter	Auto (30000 Hz)

[Detailed Information]

Creation date	24/11/2021 10:30
Data array type	Linear data array
Horizontal axis	Wavenumber [cm-1]
Vertical axis	Abs
Start	399.193 cm-1
End	4001.57 cm-1
Data interval	1.92847 cm-1
Data points	1869

Figura 63. Correlación del análisis de la muestra Pastillas caducadas_2 vs. Pastillas caducadas_1.



[Comparison of data]

Algorithm	Correlation Coefficient
Range	3999.640 - 399.193cm-1
Sample	Pastillas caducadas 3
Score	0.98420

Pastillas caducadas 2.jws
Pastillas caducadas 3.jws

[Measurement Information]

Model Name	FT/IR-4600typeA
Serial Number	E137961786
Accessory	ATR PRO ONE
Accessory S/N	C158461809
Incident angle	45 deg
Measurement Date	24/11/2021 10:28
Light Source	Standard
Detector	TGS
Accumulation	16
Resolution	4 cm-1
Zero Filling	Off
Apodization	Triangle
Gain	Auto (4)
Aperture	Auto (7.1 mm)
Scanning Speed	Auto (2 mm/sec)
Filter	Auto (30000 Hz)

[Detailed Information]

Creation date	24/11/2021 10:30
Data array type	Linear data array
Horizontal axis	Wavenumber [cm-1]
Vertical axis	Abs
Start	399.193 cm-1
End	4001.57 cm-1
Data interval	1.92847 cm-1
Data points	1869

Figura 64. Correlación del análisis de la muestra Pastillas caducadas_2 vs. Pastillas caducadas_3.

ANEXO 4

Datos obtenidos del diseño experimental

ANEXO 4.1. DATOS ESTABLECIDOS MEDIANTE EL DISEÑO EXPERIMENTAL DE LOS PORCENTAJES DE LAS DIFERENTES CATEGORÍAS DE DESECHO EN LOS 10 MENÚS.

Tabla A4.1
Menús propuestos para el diseño experimental.

	M1		M2		M3		M4		M5	
Categorías	**%**	**g**	**%**	**g**	**%**	**g**	**%**	**g**	**%**	**g**
EPP contaminado	0,80	0,20	0,70	0,18	0,70	0,18	0,70	0,18	0,75	0,19
Envases plásticos triturados	2,40	0,60	2,0	0,50	2,30	0,58	2,50	0,63	2,00	0,50
Aserrín	4,00	1,00	10,0	2,50	10,00	2,50	5,00	1,25	12,00	3,00
Aceite contaminado	65,00	16,25	60,0	15,00	65,00	16,25	68,00	17,00	58,00	14,50
Pastillas trituradas	7,00	1,75	7,5	1,88	7,20	1,80	6,50	1,63	5,75	1,44
Biopeligrosos esterilizados	9,00	2,25	8,5	2,13	8,00	2,00	7,50	1,88	7,00	1,75
Resina epóxica	9,40	2,35	9,3	2,33	5,00	1,25	8,00	2,00	12,00	3,00
Ropa	2,4	0,60	2,0	0,50	1,80	0,45	1,80	0,45	2,50	0,63

Continuación de Tabla A4.1, menús propuestos para el diseño experimental.

	M6		M7		M8		M9		M10	
Categorías	**%**	**g**	**%**	**g**	**%**	**g**	**%**	**g**	**%**	**g**
EPP contaminado	0,80	0,20	0,70	0,18	0,70	0,18	0,70	0,18	0,75	0,19
Envases plásticos triturados	2,50	0,63	2,1	0,53	2,20	0,55	2,50	0,63	2,00	0,50
Aserrín	9,00	2,25	8,6	2,15	6,00	1,50	6,00	1,50	4,00	1,00
Aceite contaminado	69,00	17,25	71,0	17,75	69,00	17,25	67,00	16,75	61,00	15,25
Pastillas trituradas	5,20	1,30	5,6	1,40	7,20	1,80	6,50	1,63	5,75	1,44
Biopeligrosos esterilizados	8,00	2,00	5,0	1,25	8,00	2,00	7,50	1,88	7,00	1,75
Resina epóxica	4,00	1,00	5,0	1,25	5,00	1,25	8,00	2,00	17,00	4,25
Ropa	1,5	0,38	2,0	0,50	1,90	0,48	1,80	0,45	2,50	0,63

ANEXO 4.2. TRATAMIENTO DE DATOS ANOVA OBTENIDO EN MINITAB

HOJA DE TRABAJO 1

ANOVA de un solo factor: % ceniza vs. Menús

Método

Hipótesis nula	Todas las medias son iguales
Hipótesis alterna	No todas las medias son iguales
Nivel de significancia	α = 0,05

Se presupuso igualdad de varianzas para el análisis.

Información del factor

Factor	Niveles	Valores
Menús	10	Menú 1; Menú 2; Menú 3; Menú 4; Menú 5; Menú 6; Menú 7; Menú 8; Menú 9; Menú_10

Análisis de Varianza

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Menús	9	109,39	12,155	8,50	0,000
Error	20	28,61	1,431		
Total	29	138,01			

Resumen del modelo

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
1,19610	79,27%	69,94%	53,35%

Medias

Menús	N	Media	Desv.Est.	IC de 95%
Menú 1	3	6,570	0,771	(5,130; 8,010)
Menú 2	3	9,133	1,495	(7,693; 10,574)
Menú 3	3	6,507	1,401	(5,066; 7,947)
Menú 4	3	5,787	0,756	(4,346; 7,227)
Menú 5	3	10,89	2,34	(9,45; 12,33)
Menú 6	3	5,190	0,966	(3,750; 6,630)
Menú 7	3	6,413	0,977	(4,973; 7,854)
Menú 8	3	6,173	0,531	(4,733; 7,614)
Menú 9	3	6,833	0,769	(5,393; 8,274)
Menú_10	3	10,483	0,852	(9,043; 11,924)

Desv.Est. agrupada = 1,19610

ANEXO 5

Toma de muestras de cloro

Año: 1984

MINISTERIO DE TRABAJO Y ASUNTOS SOCIALES ESPAÑA

INSTITUTO NACIONAL DE SEGURIDAD E HIGIENE EN EL TRABAJO

NTP 115: Toma de muestras de cloro

Standard sampling method for Chlorine
Norme d'échantillonnage pour le chlore

Las NTP son guías de buenas prácticas. Sus indicaciones no son obligatorias salvo que estén recogidas en una disposición normativa vigente. A efectos de valorar la pertinencia de las recomendaciones contenidas en una NTP concreta es conveniente tener en cuenta su fecha de edición.

Redactor:

Antonio Martí Veciana
Ldo. en Ciencias Químicas

CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y ASISTENCIA TÉCNICA - BARCELONA

Esta norma para la toma de muestras de cloro -en donde se utiliza como soporte de captación a una solución absorbente- se completa con la norma general para la toma de muestras de contaminantes con impingers (NTP nº 22.82).

Objetivo

Establecer la metodología correspondiente a la toma, transporte y conservación de muestras de cloro.

Indicar el fundamento del método analítico, su campo de aplicación y sus limitaciones.

Fundamento método analítico

Un volumen de aire conocido se borbotea a través de una solución ácida de ioduro potásico.

El cloro presente, oxida al ioduro potásico y libera una cantidad estequiométrica de iodo.

La coloración del iodo liberado en la solución absorbente, se mide con un espectrofotómetro UV-Visible o Colorimetro a 352 mm.

Campo de aplicación

Abarca el área de la higiene industrial en lo que respecta a la captación y posterior determinación de cloro.

Permite determinar concentraciones de cloro entre 0,25 y 3,5 mg/m^3 (0,1 - 1,1 ppm), para una miestra de 15 litros de aire.

El límite de detección estimado es de 0,09 mg/m^3 de cloro, para el volumen de muestreo indicado.

Inconvenientes y limitaciones

Otros oxidantes, tales como: ozono, dióxido de cloro, óxido de nitrógeno, etc., también liberan iodo de la solución absorbente (interferencia positiva).

Sin embargo, no es frecuente que estos fases oxidantes se presenten en los ambientes de trabajo simultáneamente con el cloro, a excepción del dióxido de cloro. Estas interferencias pueden soslayarse, determinando conjuntamente el cloro y dióxido de cloro, e individualmente el dióxido de cloro.

Gases reductores, tales como: dióxido de azufre, mercaptanos, sulfuro de hidrógeno, etc., pueden reducir el iodo liberado (interferencia negativa).

Estas interferencias pueden eliminarse, borboteando el aire a través de una solución de permanganato potásico, previamente a la toma de muestra (Solución de permanganato potásico al 0,3 %(p/v) en ác. H_2S0_4 1N).

Figura 65. Guía de tomas de muestra de HCl

La solución absorbente ácida es conveniente prepararla con la mínima antelación posible a la toma de muestras. El análisis de las muestras no debe demorarse más de lo imprescindible.

Trampa

Se utiliza un impinger vacío, colocado en serie con los dos impingers de captación e intercalado entre estos y la bomba, para protección de la misma.

Solución absorbente A (pH 6.8)

Se prepara disolviendo 13,6 g de fosfato monopotásico; 14,2 g de fosfato disódico anh. (ó 35,8 g de fosfato disódico dodecahidratado); y 10 g de ioduro potásico, en agua destilada, completándose hasta 1 litro.

Esta solución es estable durante varios meses, conservada en frasco de color ámbar y en nevera.

Solución absorbente B (pH 3.5)

Se prepara diluyendo 10 ml de ácido acético gracial p.a. 96%, hasta 100 ml con solución absorbente A (pH 6,8) Esta solución debe prepararse con la mínima antelación posible a la toma de muestra y guardarse en frasco ámbar, al abrigo de la luz y preferentemente en nevera, en tanto no sea utilizada.

Siempre que se le aprecie una ligera tonalidad amarilla (fácilmente detectable con un espectrofotómetro UV- Visible a 352 nm) deberá desecharse.

Solución de permanganato potásico

Se disuelven 3,2 g de permanganato potásico en ácido sulfúrico 1 N. completándose hasta 1 litro.

Condiciones de muestreo

La muestra de aire se toma a un caudal de 1 lpm.

El volumen de aire recomendado es de 15 litros (volumen máximo 30 litros).

El tiempo de muestreo no deberá sobrepasar los 30 minutos, en ningún caso.

Cuando se sospeche que la concentración de cloro es elevada; o bien se aprecie que en el transcurso de la captación la solución absorbente se colorea sustancialmente de amarillo, deberá reducirse él volumen de muestreo.

Equipo y material de muestreo

Bomba de aspiración

Bomba para muestreo personal y ambiental, cuyo caudal se mantenga dentro del valor determinado, con una exactitud de ±5%.

La calibración de la bomba debe realizarse con el mismo tipo de soporte o unidad de captación con el fin de que la pérdida de carga sea similar a la que se tendrá en el muestreo.

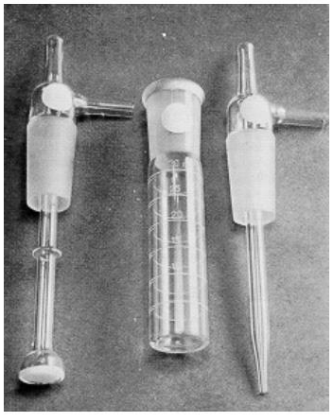
Unidad de captación

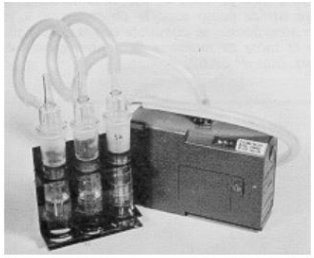
Se conectan dos impingers en serie, el primero de los cuales provisto de borboteador fritado.

En cada uno de ellos se colocan 15 ml de la solución absorbente.

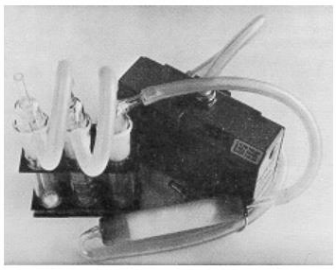
En los casos en que se prevea la presencia de reductores, se colocará un borboteador previo al sistema de muestreo conteniendo 15 ml de solución de permanganato potásico.

Figura 65. Continuación de guía de tomas de muestra de HCl





Equipo de muestras



Toma de muestras personal

Procedimiento de muestreo

Colocar 15 ml de solución absorbente en cada uno de los dos impingers destinados al muestreo.

En los casos en que se prevea la presencia de reductores, se colocará un borboteador previo al sistema de muestreo conteniendo 15 ml de solución de permanganato potásico.

Situar los impingers y la trampa en soportes adecuados, y conectar adecuadamente sus salidas y entradas entre sí, mediante tubo flexible de silicona.

Colocar el tren de captación en la parte anterior de la cintura el operario a muestrear; fijándolo a un cinturón mediante un sistema de sujección adecuado (pinza, funda o soporte, etc.)

Colocar la bomba de aspiración convenientemente calibrada, en la parte posterior de la cintura del operario a muestrear, fijándola al cinturón.

Conectar la bomba con la salida del tren de impingers, mediante un tubo de plástico de longitud adecuada.

Poner la bomba en funcionamiento e iniciar la captación de la muestra. El aire a muestrear no debe pasar por ningún tubo antes de su entrada al impinger.

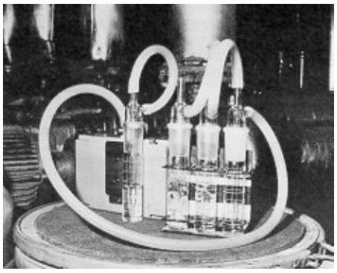
Figura 65. Continuación de guía de tomas de muestra de HCl

Vigilar, periódicamente durante la captación, que la bomba funcione correctamente. En el caso de que se aprecien anomalías o variaciones sobre el caudal inicial, volver a recalibrar la bomba o proceder a anular la muestra.

Transcurrido el tiempo de muestreo predeterminado, parar el funcionamiento de la bomba y anotar los datos siguientes: tiempo de muestreo, caudal, temperatura ambiente y presión (si no se puede averiguar la presión, se estimará la altitud de la zona).

Preparar para cada lote de muestras un "impinger blanco". Este impinger, sellado perfectamente, contendrá la misma solución absorbente y el mismo volumen que las muestras, y habrá seguido sus mismas manipulaciones, exceptuando el paso de aire a su través.

Etiquetarlo con la palabra Blanco.



Transporte y conservación

Los impingers conteniendo las muestras, así como el correspondiente blanco, se trasladarán en posición vertical con sus aberturas de entrada y salida perfectamente tapadas para evitar pérdidas y contaminaciones. Es muy importante preservarlos de la acción de la luz.

Siempre que se opte por transferir las soluciones muestra a frascos de vidrio ámbar con tapón roscado, se lavará cada impinger dos veces con 1 ó 2 ml de solución absorbente, agrupándose los lavados en sus frascos respectivos. Con el impinger Blanco se operará de idéntica forma.

Identificar cada muestra de forma clara, especificando si se trata del 1er o 2° impinger, cuando la captación haya sido en serie.

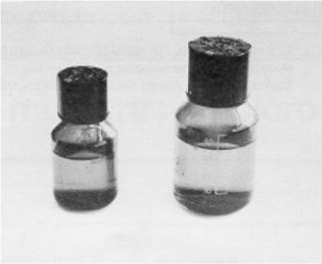
Las muestras contenidas bien en frascos o impingers, deben enviarse o transportarse en recipientes adecuados para prevenir la rotura de sus envases, así como la acción de la luz solar.

Las muestras deben remitirse al laboratorio, con la máxima rapidez posible.

Debido a la facilidad con que puede verse afectada la concentración del iodo liberado, no conviene demorar su análisis más de lo imprescindible; almacenándose en nevera en tanto no sean analizadas.

Es aconsejable que muestras y blanco se protejan de la luz (por ejemplo, con papael de aluminio o similar).

Tanto la acción de la luz como la elevación de temperatura, favorecen las pérdidas del iodo liberado en la captación del cloro (error negativo); así como la liberación espontánea de iodo en la solución absorbente (error positivo).



Bibliografía

(1) SERVICIO SOCIAL DE HIGIENE Y SEGURIDAD DEL TRABAJO
Método para la determinación de cloro en aire
Madrid. SSHISET. Norma HA-222, Diciembre, 1976.

Figura 65. Continuación de guía de tomas de muestra de HCl

Fuente: NTP, 115

ANEXO 6

Informes de monitoreo de la emisión de gases en el incinerador de la prueba piloto

ANEXO 6.1. INFORME DE MONITOREO REALIZADO DESPUÉS DEL LAVADOR DE GASES

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y CONTROL AMBIENTAL
Campus Politécnico "José Rubén Orellana Ricaurte" • Calle Ladrón de Guevara E 11-253
RUC: 1760005620001 Tel.: (00593-2) 2976300 / 3938780 Ext.: 2151 • Línea directa: (00593-2) 3938864
Apartado 17-01-2759 • E-mail: cicam@epn.edu.ec • Quito – Ecuador

CICAM

INFORME DE RESULTADOS DE EMISIONES A LA ATMÓSFERA

No. INFORME:	IRG-22002

INFORMACIÓN GENERAL	
EMPRESA:	HAZWAT CIA. LTDA.
ACTIVIDAD:	OPERACIÓN DE INSTALACIONES PARA EL TRATAMIENTO DE DESECHOS PELIGROSOS
ATENCIÓN:	ING. LUCÍA MONTENEGRO
PROYECTO:	MONITOREO DE EMISIONES A LA ATMÓSFERA
DIRECCIÓN:	KILÓMETRO 37 ½. VÍA QUITO - CAYAMBE
TELÉFONO	(02) 361 0262
TÉCNICO:	ING. CRISTIAN FREIRE / ING. LUIS MONTENEGRO
FECHA MUESTREO:	2022-05-26
FECHA EMISIÓN:	2022-05-30
METODOLOGÍA:	***Interna:*** PE-V-08 "Procedimiento de ensayo para la medición de gases de combustión"; PE-V-10 "Procedimiento de ensayo para la medición de material particulado" | ***Referencia:*** Gases EPA CTM 30 y EPA CTM 34; Material Particulado EPA 1-5

IDENTIFICACIÓN DE LOS INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN			
EQUIPO / CÓDIGO	MARCA	MODELO	SERIE
Analizador portátil de gases (EI/101-00)	Testo	350 XL	1810805
Consola de muestreo isocinético (EI/100-00)	Apex	XC-572	1004024
Anemómetro (EI/133-00)	Control Company	3651	140316986
GPS (EI/153-00)	Garmin	Oregon 750	4SQ015487

CARACTERÍSTICAS DE LA FUENTE FIJA DE COMBUSTIÓN			
EQUIPO / TIPO	INCINERADOR|FUENTE CERRADA	TIPO COMBUSTIBLE	DIESEL|DESECHOS
IDENTIFICACIÓN	INCINERADOR	POTENCIA	ND
MARCA	PENNRAM	CONSUMO ANUAL	ND
MODELO	PHCA-1100	TIEMPO DE OPERACIÓN (h/día)	24
SERIE	214115	COORDENADAS UTM (WGS84)	17 M 807991 E / 9998966 N
AÑO	2014	INICIO DE OPERACIONES	2014

CARACTERÍSTICAS DE LA CHIMENEA			
TIPO	CIRCULAR	DISTANCIA A (cm)	903
DIÁMETRO (cm)	70	DISTANCIA B (cm)	303
ALTURA (cm)	1330	PUERTOS DE MONITOREO	2
GAP (cm)	7,5	PUNTOS MONITOREADOS	24

CONDICIONES AMBIENTALES			
TEMPERATURA (°C)	HUMEDAD RELATIVA (%)	ALTITUD (m)	PRESIÓN BAROMÉTRICA (mm Hg)
21,0	56,0	2700	546,2

REFERENCIAS:
Distancia A: Distancia entre el puerto de monitoreo y la cúspide de la chimenea
Distancia B: Distancia entre la última perturbación al flujo de gas y el puerto de monitoreo
GAP: Longitud del puerto de monitoreo

F-V-PE-08-03 | V00 | Vigencia: 2021-06-03 Página 1 de 3

Figura 66. Informe del monitoreo realizado después del lavador de gases

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y CONTROL AMBIENTAL
Campus Politécnico "José Rubén Orellana Ricaurte" • Calle Ladrón de Guevara E 11-253
RUC: 1760005620001 Tel.: (00593-2) 2976300 / 3938780 Ext.: 2151 • Línea directa: (00593-2) 3938864
Apartado 17-01-2759 • E-mail: cicam@epn.edu.ec • Quito – Ecuador

PARÁMETROS DE LA EMISIÓN DE GASES

PARÁMETRO	UNIDAD	VALOR
(a) Oxígeno (O_2)	%	14,73
(*) Dióxido de carbono (CO_2)	%	4,63
(a) Dióxido de azufre (SO_2)	ppm	14**
(a) Monóxido de carbono (CO)	ppm	43**
(a) Monóxido de nitrógeno (NO)	ppm	57
(a) Dióxido de nitrógeno (NO_2)	ppm	0**
(a) Óxidos de nitrógeno (NO_x)	ppm	57
(*) Temperatura	°C	61,4
(*) Opacidad	#	2
(*) Velocidad del gas	m/s	12,64

PARÁMETROS DE LA EMISIÓN DE MATERIAL PARTICULADO

PARÁMETRO	UNIDAD	VALOR
Temperatura de chimenea	°C	62
Temperatura del medidor de gas seco	°C	23
Volumen de agua recolectada en los impigners y sílica gel	mL	12
Presión barométrica	mmHg	546
Presión diferencial del manómetro (ΔH)	mmH_2O	33
Presión estática en el interior de la chimenea	mmH_2O	8,8
Volumen de gas muestreado	m³	1,4
Tiempo de muestreo	min	72
Velocidad promedio del gas en la chimenea	m/s	12,8
Diámetro interno de la boquilla	mm	6,3
Flujo de gas seco	m^3/h	4,3
Fracción seca	-	0,98
(a) Material particulado	mg/m^3	1
Porcentaje de isocinetismo	%	91

RESULTADOS FINALES Y COMPARACIÓN CON NORMATIVA

PARÁMETRO	(1) CONCENTRACIÓN (mg/Nm3 y 4 % O2)	(2) LÍMITE PERMITIDO (mg/Nm3 y 4 % O2)	(3) CRITERIO
(a) Monóxido de carbono (CO)	146	-	-
(a) Dióxido de azufre (SO_2)	109	2004	CUMPLE
(a) Óxidos de nitrógeno (NO_x)	317	670	CUMPLE
(a) Material particulado	3	180	CUMPLE

DECLARACIÓN DE LA INCERTIDUMBRE DEL MÉTODO

PARÁMETRO	CONCENTRACIÓN (ppm)	INCERTIDUMBRE (%)
Monóxido de carbono (CO)	488,0	0,76
Dióxido de azufre (SO_2)	511,0	1,04
Óxidos de nitrógeno (NO)	497,0	1,20
Dióxido de nitrógeno (NO_2)	50,90	2,58
Oxígeno (O_2)	10,360	0,12
Material particulado	1-1667	4,22 ppm

Servicio de Acreditación Ecuatoriano
Acreditación N° OAE LE 2C 06-012
LABORATORIO DE ENSAYOS

REFERENCIAS Y OBSERVACIONES:

(a) *El CICAM se encuentra acreditado con la Norma NTE INEN ISO/IEC 17025:2018 en estos parámetros.*
Los parámetros e información marcada con (*), (2) y (3) están FUERA del alcance de acreditación del Servicio de Acreditación Ecuatoriano (SAE)
(**) El valor está por fuera del rango de acreditación.
(1) *mg/Nm^3: miligramos por metro cúbico de gas de combustión en condiciones normales, 760 mmHg y 0 °C, en base seca y corregidos al 4 % de oxígeno (O_2)*
(2) *ANEXO 3 DEL LIBRO VI DEL TULSMA, NORMA DE EMISIONES AL AIRE DESDE FUENTES FIJAS. TABLA 2 LIMITES MÁXIMOS PERMISIBLES DE CONCENTRACIÓN DE EMISIÓN DE CONTAMINANTES AL AIRE PARA CALDERAS (mg/Nm^3)*
(3) *Criterio de resultados "Cumple" o "No cumple"*

Figura 66. Continuación del informe del monitoreo realizado después del lavador de gases

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y CONTROL AMBIENTAL
Campus Politécnico "José Rubén Orellana Ricaurte" • Calle Ladrón de Guevara E 11-253
RUC: 1760005620001 Tel.: (00593-2) 2976300 / 3938780 Ext.: 2151 • Línea directa: (00593-2) 3938864
Apartado 17-01-2759 • E-mail: cicam@epn.edu.ec • Quito – Ecuador

REGISTRO FOTOGRÁFICO DEL MONITOREO

FIGURA 1. Monitoreo de emisiones a la atmósfera - Incinerador - Después del lavador

Los resultados solo se refieren al monitoreo realizado. El CICAM declina toda responsabilidad por el uso de los resultados aquí presentados.
Este informe de resultados no podrá ser reproducido de forma parcial o total, sin la autorización escrita del CICAM
Sin la firma de los Responsables y el sello del CICAM, este informe no tendrá validez

Firmado electrónicamente por:
CRISTIAN PATRICIO FREIRE BONILLA

Revisado por: Ing. Cristian Freire
RESPONSABLE TÉCNICO (E)

Firmado electrónicamente por:
MARIA AUGUSTA URQUIZO FERNANDEZ

Aprobado por: Ing. María Augusta Urquizo
COORDINADOR DE LABORATORIO (E)

F-V-PE-08-03 | V00 | Vigencia: 2021-06-03

Página 3 de 3

Figura 66. Continuación del informe del monitoreo realizado después del lavador de gases

Fuente: CICAM

ANEXO 6.2. INFORME DE MONITOREO REALIZADO A LA SALIDA DE LA CHIMENEA DIRECTAMENTE DEL INCINERADOR

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y CONTROL AMBIENTAL
Campus Politécnico "José Rubén Orellana Ricaurte" • Calle Ladrón de Guevara E 11-253
RUC: 1760005620001 Tel.: (00593-2) 2976300 / 3938780 Ext.: 2151 • Línea directa: (00593-2) 3938864
Apartado 17-01-2759 • E-mail: cicam@epn.edu.ec • Quito – Ecuador

CICAM

INFORME DE RESULTADOS DE EMISIONES A LA ATMÓSFERA

No. INFORME:	IRG-22003

INFORMACIÓN GENERAL	
EMPRESA:	HAZWAT CIA. LTDA.
ACTIVIDAD:	OPERACIÓN DE INSTALACIONES PARA EL TRATAMIENTO DE DESECHOS PELIGROSOS
ATENCIÓN:	ING. LUCÍA MONTENEGRO
PROYECTO:	MONITOREO DE EMISIONES A LA ATMÓSFERA
DIRECCIÓN:	37 ½. VÍA QUITO - CAYAMBE
TELÉFONO	(02) 361 0262
TÉCNICO:	ING. CRISTIAN FREIRE / ING. LUIS MONTENEGRO
FECHA MUESTREO:	2022-05-26
FECHA EMISIÓN:	2022-05-30
METODOLOGÍA:	***Interna:*** PE-V-08 "Procedimiento de ensayo para la medición de gases de combustión"; PE-V-10 "Procedimiento de ensayo para la medición de material particulado" | ***Referencia:*** Gases EPA CTM 30 y EPA CTM 34; Material Particulado EPA 1-5

IDENTIFICACIÓN DE LOS INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN			
EQUIPO / CÓDIGO	MARCA	MODELO	SERIE
Analizador portátil de gases (EI/101-00)	Testo	350 XL	1810805
Anemómetro (EI/133-00)	Control Company	3651	140316986
GPS (EI/153-00)	Garmin	Oregon 750	4SQ015487

CARACTERÍSTICAS DE LA FUENTE FIJA DE COMBUSTIÓN			
EQUIPO / TIPO	INCINERADOR|FUENTE CERRADA	TIPO COMBUSTIBLE	DIESEL|DESECHOS
IDENTIFICACIÓN	INCINERADOR	POTENCIA	ND
MARCA	PENNRAM	CONSUMO ANUAL	ND
MODELO	PHCA-1100	TIEMPO DE OPERACIÓN (h/día)	24
SERIE	214115	COORDENADAS UTM (WGS84)	17 M 807991 E / 9998966 N
AÑO	2014	INICIO DE OPERACIONES	2014

CARACTERÍSTICAS DE LA CHIMENEA			
TIPO	CIRCULAR	DISTANCIA A (cm)	140
DIÁMETRO (cm)	70	DISTANCIA B (cm)	380
ALTURA (cm)	1330	PUERTOS DE MONITOREO	2
GAP (cm)	7,5	PUNTOS MONITOREADOS	20

CONDICIONES AMBIENTALES			
TEMPERATURA (°C)	HUMEDAD RELATIVA (%)	ALTITUD (m)	PRESIÓN BAROMÉTRICA (mm Hg)
21,0	56,0	2700	546,2

REFERENCIAS:
Distancia A: Distancia entre el puerto de monitoreo y la cúspide de la chimenea
Distancia B: Distancia entre la última perturbación al flujo de gas y el puerto de monitoreo
GAP: Longitud del puerto de monitoreo

F-V-PE-08-03 | V00 | Vigencia: 2021-06-03 Página 1 de 3

Figura 67. Informe del monitoreo realizado de la chimenea con salida directa del incinerador.

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y CONTROL AMBIENTAL
Campus Politécnico "José Rubén Orellana Ricaurte" • Calle Ladrón de Guevara E 11-253
RUC: 1760005620001 Tel.: (00593-2) 2976300 / 3938780 Ext.: 2151 • Línea directa: (00593-2) 3938864
Apartado 17-01-2759 • E-mail: cicam@epn.edu.ec • Quito – Ecuador

PARÁMETROS DE LA EMISIÓN DE GASES

PARÁMETRO	UNIDAD	VALOR
(a) Oxígeno (O_2)	%	9,35
(*) Dióxido de carbono (CO_2)	%	8,63
(a) Dióxido de azufre (SO_2)	ppm	0**
(a) Monóxido de carbono (CO)	ppm	2224**
(a) Monóxido de nitrógeno (NO)	ppm	91
(a) Dióxido de nitrógeno (NO_2)	ppm	0**
(a) Óxidos de nitrógeno (NO_x)	ppm	91
(*) Temperatura	°C	820
(*) Opacidad	#	-
(*) Velocidad del gas	m/s	4,97

-

RESULTADOS FINALES Y COMPARACIÓN CON NORMATIVA

PARÁMETRO	(1) CONCENTRACIÓN (mg/Nm3 y 4 % O2)	(2) LÍMITE PERMITIDO (mg/Nm3 y 4 % O2)	(3) CRITERIO
(a) Monóxido de carbono (CO)	4056	-	-
(a) Dióxido de azufre (SO_2)	0	2004	CUMPLE
(a) Óxidos de nitrógeno (NO_x)	271	670	CUMPLE

DECLARACIÓN DE LA INCERTIDUMBRE DEL MÉTODO

PARÁMETRO	CONCENTRACIÓN (ppm)	INCERTIDUMBRE (%)
Monóxido de carbono (CO)	488,0	0,76
Dióxido de azufre (SO_2)	511,0	1,04
Óxidos de nitrógeno (NO)	497,0	1,20
Dióxido de nitrógeno (NO_2)	50,90	2,58
Oxígeno (O_2)	10,360	0,12

Servicio de Acreditación Ecuatoriano
Acreditación N° OAE LE 2C 06-012
LABORATORIO DE ENSAYOS

REFERENCIAS Y OBSERVACIONES:

(a) El CICAM se encuentra acreditado con la Norma NTE INEN ISO/IEC 17025:2018 en estos parámetros.
Los parámetros e información marcada con (*), (2) y (3) están FUERA del alcance de acreditación del Servicio de Acreditación Ecuatoriano (SAE)
(**) El valor está por fuera del rango de acreditación.
(1) mg/Nm^3: miligramos por metro cúbico de gas de combustión en condiciones normales, 760 mmHg y 0 °C, en base seca y corregidos al 4 % de oxígeno (O_2)
(2) ANEXO 3 DEL LIBRO VI DEL TULSMA, NORMA DE EMISIONES AL AIRE DESDE FUENTES FIJAS. TABLA 2 LIMITES MÁXIMOS PERMISIBLES DE CONCENTRACIÓN DE EMISIÓN DE CONTAMINANTES AL AIRE PARA CALDERAS (mg/Nm^3)
(3) Criterio de resultados "Cumple" ó "No cumple"

F-V-PE-08-03 | V00 | Vigencia: 2021-06-03 Página 2 de 3

Figura 67. Continuación del Informe del monitoreo realizado de la chimenea con salida directa del incinerador.

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y CONTROL AMBIENTAL
Campus Politécnico "José Rubén Orellana Ricaurte" • Calle Ladrón de Guevara E 11-253
RUC: 1760005620001 Tel.: (00593-2) 2976300 / 3938780 Ext.: 2151 • Línea directa: (00593-2) 3938864
Apartado 17-01-2759 • E-mail: cicam@epn.edu.ec • Quito – Ecuador

CICAM

REGISTRO FOTOGRÁFICO DEL MONITOREO

FIGURA 1. Monitoreo de emisiones a la atmósfera - Incinerador - Antes del lavador

Los resultados solo se refieren al monitoreo realizado. El CICAM declina toda responsabilidad por el uso de los resultados aquí presentados.
Este informe de resultados no podrá ser reproducido de forma parcial o total, sin la autorización escrita del CICAM
Sin la firma de los Responsables y el sello del CICAM, este informe no tendrá validez

Firmado electrónicamente por:
CRISTIAN PATRICIO FREIRE BONILLA

Revisado por: Ing. Cristian Freire
RESPONSABLE TÉCNICO (E)

Firmado electrónicamente por:
MARIA AUGUSTA URQUIZO FERNANDEZ

Aprobado por: Ing. María Augusta Urquizo
COORDINADOR DE LABORATORIO (E)

F-V-PE-08-03 | V00 | Vigencia: 2021-06-03

Página 3 de 3

Figura 67. Continuación del Informe del monitoreo realizado de la chimenea con salida directa del incinerador.

Fuente: CICAM

ANEXO 7

Informe de resultados del contenido de metales en cenizas

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y CONTROL AMBIENTAL
Campus Politécnico "José Rubén Orellana Ricaurte" • Calle Ladrón de Guevara E 11-253, Edificio Nro. 11
RUC: 1760005620001 Tel.: (+593-2) 2976300 Ext.: 2151 • Línea directa: (+593-2) 3938864
Apartado 17-01-2759 • E-mail: cicam@epn.edu.ec • Quito – Ecuador

INFORME DE RESULTADOS

Fecha: 07 de julio de 2022 **No.IRI-22-231**

DATOS DEL CLIENTE:

Director proyecto-investigación:	Ing. Lucía Montenegro
Nombre del Representante Legal:	-
RUC:	-
Dirección:	-
Teléfono convencional:	-
Teléfono celular:	-
Correo electrónico:	-

DATOS DEL LABORATORIO:

Fecha de recepción:	2022-06-06
No. Oferta de Servicio:	OF22-143
No. Solicitud de trabajo:	ST-22-065
Tipo de servicio:	Servicio de ensayo aplicado a la investigación
Código de la muestra:	MI-22- 231
Lugar de análisis:	CICAM - Quito - Ladrón de Guevara E11-253
Fecha de análisis:	04 al 07 de julio de 2022
Temperatura de ingreso al laboratorio:	-

DATOS DE LA MUESTRA: SUMINISTRADOS POR EL CLIENTE

Nombre del Proyecto:	-
Fecha de muestreo:	-
Rotulación de la muestra:	-
Tipo de muestreo:	Puntual
Tipo de muestra:	Ceniza
Lugar de muestreo:	-
Origen de la muestra:	-
Responsable de muestreo:	Cliente

Tipo de envase:	Nº de envases:	Preservante:
Plástico	1	No

PARÁMETRO	MÉTODO DE REFERENCIA/ MÉTODO INTERNO	UNIDAD	RESULTADO
(c) Arsénico	PE-V-62 | EPA7010 /Absorción atómica	*mg/kg*	< 0,125
(c) Bario	PE-V-60 | EPA 7000 B / Absorción atómica	*mg/kg*	586,1
(c) Cobalto	PE-V-59 | EPA 7000 B /Absorción atómica	*mg/kg*	27
(c) Cobre	PE-V-59 | EPA 7000 B / Absorción atómica	*mg/kg*	503,6
(c) Cromo total	PE-V-62 | EPA 7010 / Absorción atómica	*mg/kg*	101,5
(c) Estaño	PE-V-62 | EPA 7010 / Absorción atómica	*mg/kg*	< 0,1
(c) Manganeso	PE-V-59 | EPA 7000 B / Absorción atómica	*mg/kg*	251,6
(c) Mercurio	PE-V-61 | EPA 7074 A / Absorción atómica	*mg/kg*	0,26
(c) Níquel	PE-V-62 | EPA 7010/ Absorción atómica	*mg/kg*	39,84
(c) Plata	PE-V-59 | EPA 7000 B / Absorción atómica	*mg/kg*	3,5
(c) Plomo	PE-V-62 | EPA 7010/ Absorción atómica	*mg/kg*	58,74
(c) Selenio	PE-V-62 | EPA 7010 / Absorción atómica	*mg/kg*	< 0,1
(c) Zinc	PE-V-59 | EPA 7000 B / Absorción atómica	*mg/kg*	3713

SM: Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. Ed: Edición. PE: Procedimiento de Ensayo interno. N/A: No aplica.

Acreditaciones:

(c) Parámetro no acreditado

Nota:

Este informe sólo afecta a la muestra sometida a ensayo bajo las condiciones recibidas
La información completa de la medición de este ensayo se encuentra disponible para el cliente, cuando lo requiera
La incertidumbre de la medición de este ensayo se encuentra disponible para el cliente, cuando lo requiera
El laboratorio no se responsabiliza por la información proporcionada por el cliente que puedan afectar la validez de los resultados
En caso de que esta información sea solicitada por ley o disposiciones contractuales se notificará al cliente en forma previa
Prohibida la reproducción parcial de este informe

Firmado electrónicamente por: MARIA AUGUSTA URQUIZO FERNANDEZ

Revisado por: Ing. María Augusta Urquizo
RESPONSABLE TÉCNICO

Firmado electrónicamente por: GRETA CAROLA FIERRO NARANJO

Aprobado por: MSc. Carola Fierro
COORDINADORA DE LABORATORIO

F-PG-G-07-06 Página 1 de 1 Versión 00 Vigencia: 2021-07-23

Figura 68. *Informe de contenido de metales en las cenizas*

ANEXO 8

Cálculo de balance de masa y energía

ANEXO 8.1 COMPOSICIÓN QUÍMICA DE CARBONO E HIDRÓGENO DE CADA UNO DE LOS DESECHOS SELECCIONADOS PARA EL MENÚ DE INCINERACIÓN

Para el cálculo del contenido de carbono e hidrógeno se utilizó la composición química de cada uno de los componentes de los desechos para multiplicar su valor por el peso molecular y a partir de ello obtener

Tabla A8.1 36
*Contenido de carbono e hidrógeno presentes en los desechos de pastillas trituradas***.**

PASTILLAS TRITURADAS					
ÁCIDO ACETÍL SALICÍLICO $C_9H_8O_4$					
	#	PM	PM total	%	g/mol
C	9,0	12,0	108,0	60,0	15,0
H	8,0	1,0	8,0	4,4	1,1
O	4,0	16,0	64,0	35,6	8,9
TOTAL			180	100	25
VITAMINA C $C_6H_8O_6$					
C	6,0	12,0	72,0	40,9	10,2
H	8,0	1,0	8,0	4,6	1,1
O	6,0	16,0	96,0	54,6	13,6
TOTAL			176	100	25
IBUPROFENO $C_{13}H_{18}O_2$					
C	13,0	12,0	156,0	75,7	18,9
H	18,0	1,0	18,0	8,7	2,2
O	2,0	16,0	32,0	15,5	3,9
TOTAL			206	100	25
PARACETAMOL $C_8H_9NO_2$					
C	8	12,0	96,0	63,6	15,9
H	9	1,0	9,0	5,9	1,5
N	1	14,0	14,0	9,3	2,3
O	2	16,0	32,0	21,2	5,3
TOTAL			151	100	25
Flujo total de C (g/mol)					60,1
Flujo total de H (g/mol)					5,9

Tabla A8.2 37

Contenido de carbono e hidrógeno presentes en el desecho de EPP contaminado con hidrocarburos.

EPP CONTAMINADO					
ALGODÓN $C_6H_{10}O_5$					
	#	PM	PM total	%	g/mol
C	6,0	12,0	72,0	44,4	14,7
H	10,0	1,0	10,0	6,2	2,0
O	5,0	16,0	80,0	49,4	16,2
TOTAL			162	100	33
POLIESTER $C_{10}H_8O_4$					
C	10,0	12,0	120,0	62,5	20,6
H	8,0	1,0	8,0	4,2	1,4
O	4,0	16,0	64,0	33,3	
TOTAL			192	100	33
PVC POLIVINILO C_2H_3Cl					
C	2,0	12,0	24,0	38,4	12,7
H	3,0	1,0	3,0	4,8	1,6
CL	1,0	35,5	35,5	56,8	
TOTAL			63	100	33
Flujo total de C (g/mol)					47,9
Flujo total de H (g/mol)					5,0

Tabla A8.3 38

Contenido de carbono e hidrógeno presentes en desechos biopeligrosos.

BIOPELIGROSOS					
POLIPROPILENO C_3H_6					
	#	PM	PM total	%	g/mol
C	3,0	12,0	36,0	85,7	26,6
H	6,0	1,0	6,0	14,3	4,4
			42	100	31
POLIETILENO C_2H_4					
C	2,0	12,0	24,0	85,7	27,4
H	4,0	1,0	4	14,3	4,6
			28	100	32
ALGODÓN $C_{10}H_8O_4$					
C	10,0	12,0	120,0	62,5	23,8
H	8,0	1,0	8,0	4,2	1,6
O	4,0	16,0	64,0	33,3	12,7
			192	100	38
Flujo total de C (g/mol)					77,8
Flujo total de H (g/mol)					10,6

Tabla A8.4 39

*Contenido de carbono e hidrógeno presentes enla ropa***.**

ROPA					
ALGODÓN $C_6H_{10}O_5$					
	#	PM	PM total	%	g/mol
C	6,0	12,0	72,0	44,4	14,7
H	10,0	1,0	10,0	6,2	2,0
O	5,0	16,0	80,0	49,4	16,3
TOTAL			162	100	33
POLIÉSTER $C_{10}H_8O_4$					
C	10,0	12,0	120,0	62,5	20,6
H	8,0	1,0	8,0	4,2	1,4
O	4,0	16,0	64,0	33,3	11,0
TOTAL			192	100	33
POLIAMIDA $C_{12}H_{22}N_2O_2$					
C	12,0	12,0	144,0	63,7	21,0
H	22,0	1,0	22,0	9,7	3,2
O	2,0	16,0	32,0	14,2	4,7
N	2,0	14,0	28,0	12,4	4,1
			226	100	33
Flujo total de C (g/mol)					56,32
Flujo total de H (g/mol)					6,62

Tabla A8.5 40

Contenido de carbono e hidrogeno presentes en el aceite contaminado, resina epóxica, aserrín y plástico.

ACEITE CONTAMINADO				
$C_{20}H_{32}O_2$				
	#	PM	PM total	(g/mol)
C	20	12	240	78,95
H	32	1	32	10,53
O	2	16	32	10,53
RESINA EPÓXICA				
$C_{15}H_{14}O$				
C	15	12	180	85,71
H	14	1	14	6,67
O	1	16	16	7,62
TOTAL			210	100,00
ASERRÍN				
C				50,65
H				6,03
PLÁSTICO				
C				85,70
H				14,30

ANEXO 8.2 EJEMPLO DE CÁLCULO DE BALANCE Y ENERGÍA EN EL INCINERADOR

- **BALANCE DE MASA INCINERADOR**

Los desechos por incinerar tienen un flujo de 12 ton/d equivalente a 500 kg/h y está compuesto por:

- Flujo de carbono: $\dot{m}_{carbono}$
- Flujo de hidrógeno: $\dot{m}_{hidrógeno}$
- Flujo de metales: $\dot{m}_{metales}$
- Flujo de cenizas: $\dot{m}_{cenizas}$
- Flujo de agua: $\dot{m}_{agua}$

La composición en peso del material a incinerar es de:

- Carbono: 71,57%
- Hidrógeno: 9,25%
- Metales: 0,00%
- Cenizas: 14,28%
- Humedad: 4,89%

Por lo cual los flujos de entrada corresponden a los siguientes valores:

- Flujo de carbono: $\dot{m}_{carbono}$ = 357,86 kg/h
- Flujo de hidrógeno: $\dot{m}_{hidrógeno}$= 46,27 kg/h
- Flujo de metales: $\dot{m}_{metales}$ = 0,00 kg/h
- Flujo de cenizas: $\dot{m}_{cenizas}$ = 71,16 kg/h
- Flujo de agua: $\dot{m}_{agua}$ = 24,47 kg/h
- Flujo materia seca: $\dot{m}_{masa\ seca}$= (500 – 24,47) kg/h =475,53 kg/h

Se realizó en cálculo de aire necesario para llevar a cabo tanto la combustión de los desechos y el diésel necesario en la cámara de postcombustión. Para los desechos se utilizaron las siguientes reacciones de combustión:

$$C + O_2 \rightarrow CO_2 \qquad (Rx1)$$

$$2H + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow H_2O \qquad (\mathrm{Rx2})$$

Primero se calculó el oxígeno necesario para la combustión de la masa de carbono.

$$\dot{m}_{oxígeno\ Rx1} = \frac{\dot{m}_{carbono}}{PM_{carbono}} * RE * PM_{oxígeno}$$

Donde:

$\dot{m}_{oxígeno\ Rx1}$: flujo del O_2 necesario para Rx1 (kg/h) m

$\dot{m}_{carbono}$: flujo del C (kg/h)

$PM_{carbono}$: peso molecular del C (12 kg/kmol)

$PM_{oxígeno}$: peso molecular del O_2 (32 kg/kmol)

RE: relación estequiométrica (1)

Por lo tanto

$$\dot{m}_{oxígeno\ Rx1} = \frac{357{,}86}{12} * 1 * 32$$

$$\boldsymbol{\dot{m}_{oxígeno\ Rx1} = 954{,}30\,\frac{kg}{h}}$$

Se calcula el oxígeno necesario para la combustión de la masa de hidrógeno de la Rx2.

$$\dot{m}_{oxígeno\ Rx2} = \frac{\dot{m}_{hidrógeno}}{PM_{hidrógeno}} * RE * PM_{oxígeno}$$

Donde:

$\dot{m}_{oxígeno\ Rx1}$: flujo O_2 necesario para Rx2 (kg/h)

$\dot{m}_{\mathrm{hidrógeno}}$: flujo H (kg/h)

$PM_{\mathrm{hidrógeno}}$: peso molecular del H(1 kg/kmol)

$PM_{oxígeno}$: peso molecular del O_2 (32 kg/kmol)

RE: relación estequiométrica (0,25)

$$\dot{m}_{oxígeno\ Rx2} = \frac{46{,}27}{1} * 0{,}25 * 32$$

$$\boldsymbol{\dot{m}_{oxígeno\ Rx2} = 370{,}14\,\frac{kg}{h}}$$

Por lo tanto, el flujo de oxígeno estequiométrico necesario para la combustión corresponde a:

$$\dot{m}_{oxígeno\ esteq} = \dot{m}_{oxígeno\ Rx1} + \dot{m}_{oxígeno\ Rx2}$$

$$\boldsymbol{\dot{m}_{oxígeno\ esteq} = 1\,324{,}45\ kg/h}$$

El aire tiene una concentración de 23 % w/w de oxígeno, por ende, el aire seco estequiométrico resultante es de **5 758,47 kg/h.**

El aire en exceso es de 30%, por lo cual:

$$\dot{m}_{aire\ seco\ de\ alimentación} = 1{,}3 * 5\,758{,}47\ \mathrm{kg}/h$$

$$\boldsymbol{\dot{m}_{aire\ seco\ de\ alimentación} = 7\,486{,}01\ kg/h}$$

Para el cálculo de la humedad contenida en el aire, se tienen en cuenta que el incinerador operará en Cayambe, ciudad ubicada a 2 830 m.s.n.m. con una presión atmosférica de 1,01 atm (101,8 kPa), temperatura promedio aproximada de 14 °C se determina que la humedad del aire seco es igual a 0,00425 kg agua/kg aire seco. Se calcula el flujo de aire de entrada a la cámara:

$$\dot{m}_{agua\ en\ el\ aire} = \dot{m}_{aire\ seco} * humedad$$

$$\dot{m}_{agua\ en\ el\ aire} = 7\,486{,}01\ kg/h * 0{,}00425$$

$$\dot{m}_{agua\ en\ el\ aire} = 31{,}81\ kg/h$$

$$\dot{m}_{aire} = \dot{m}_{aire\ seco} + \dot{m}_{agua\ en\ el\ aire}$$

$$\boldsymbol{\dot{m}_{aire} = 7\,517{,}82\ kg/h}$$

Para el aire en exceso requerido por el combustible (diésel) se utilizó la siguiente reacción de combustión:

$$4C_{12}H_{23} + 71O_2 \rightarrow 48CO_2 + 46H_2O \quad (Rx3)$$

Se calcula el oxígeno necesario para la combustión de la masa de diésel

$$\dot{m}_{oxígeno\ Rx3} = \frac{\dot{m}_{diésel}}{PM_{diésel}} * RE * PM_{oxígeno}$$

Donde:

$\dot{m}_{oxígeno\ Rx3}$: flujo de oxígeno necesario para la reacción tres (kg/h)
$\dot{m}_{diésel}$: flujo de combustible diésel (kg/h)
$PM_{diésel}$: peso molecular del diésel (163 kg/kmol)
$PM_{oxígeno}$: peso molecular del oxígeno (32 kg/kmol)
RE: relación estequiométrica (71/4)

$$\dot{m}_{oxígeno\ Rx3} = \frac{9{,}86}{163} * 71/4 * 32$$

$$\dot{m}_{oxígeno\ Rx3} = 34{,}36\ \frac{kg}{h}$$

Se determinó que el oxígeno estequiométrico para reaccionar con la materia diésel, es de 34,36 kg/h, considerando que el aire tiene una concentración de 23 % w/w de oxígeno, dando como resultado el aire seco estequiométrico de 149,39 kg/h.
El aire seco de alimentación debe ser 30% en exceso del aire seco estequiométrico necesario, por lo cual se debe alimentar a la cámara de combustión uno un flujo correspondiente a 194,20 kg/h de aire seco.

Se calcula el flujo de aire de entrada a la cámara:

$$\dot{m}_{agua\ en\ el\ aire} = \dot{m}_{aire\ seco} * humedad$$

$$\dot{m}_{agua\ en\ el\ aire\ Rx3} = 194{,}2\ kg/h * 0{,}084$$
$$\dot{m}_{agua\ en\ el\ aire\ Rx3} = 16{,}28\ kg/h$$

$$\dot{m}_{aire\ d} = \dot{m}_{aire\ secoRx3} + \dot{m}_{agua\ en\ el\ aireRx3}$$

$$\dot{m}_{aire\ d} = 194{,}20\ kg/h + 16{,}28\ kg/h$$
$$\boldsymbol{\dot{m}_{aire\ d} = 210{,}48\ kg/h}$$

Se calcula el agua necesaria resultante de la combustión de la masa de diésel

$$\dot{m}_{agua\ Rx3} = \frac{\dot{m}_{diésel}}{PM_{diésel}} * RE * PM_{agua}$$

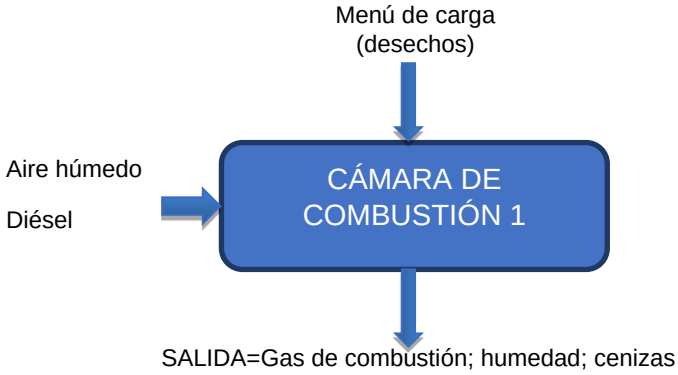
Donde:

$\dot{m}_{agua\ Rx3}$: flujo de agua resultante de Rx3(kg/h)
$\dot{m}_{diésel}$: flujo de combustible diésel (kg/h)
$PM_{diésel}$: peso molecular del diésel (163 kg/kmol)
PM_{agua}: peso molecular del H_2O (18 kg/kmol)
RE: relación estequiométrica (23/2)

$$\dot{m}_{agua\ Rx3} = \frac{9{,}86}{163} * \frac{23}{2} * 18$$
$$\dot{m}_{agua\ Rx3} = 12{,}52\ \frac{kg}{h}$$

$$\dot{m}_{agua\ d} = \dot{m}_{agua\ en\ el\ aire\ Rx3} + \dot{m}_{agua\ Rx3}$$
$$\dot{m}_{agua\ d} = 16{,}28\frac{kg}{h} + 12{,}52\frac{kg}{h}$$
$$\boldsymbol{\dot{m}_{agua\ d} = 28{,}80\ kg/h}$$

Se realiza el balance de masa de la cámara de combustión correspondiente al siguiente diagrama:



El gas de combustión corresponde al aire seco no combustionado de la incineración de los desechos y el diésel y al producto de la reacción de combustión uno y tres. El aire seco no combustionado se compone del oxígeno no reaccionado y del nitrógeno contenido en el aire alimentado de la combustión de los desechos.

$$\dot{m}_{aire\ seco\ no\ combustionado} = \left(\dot{m}_{oxígeno\ alimentado} - \dot{m}_{oxígeno\ esteq}\right) + \dot{m}_{nitrógeno\ alimentado}$$

$$\dot{m}_{aire\ seco\ no\ combustionado} = \left(7\ 486{,}01\,\frac{kg}{h} * 0{,}23 - 1\ 324{,}45\ kg/h\right) + 7\ 486{,}01\ kg/h * 0{,}77$$

$$\boldsymbol{\dot{m}_{aire\ seco\ no\ combustionado} = 6\ 161{,}56\ kg/h}$$

Se calcula el flujo del dióxido de carbono que es el producto de la reacción de combustión uno.

$C + O_2 \rightarrow CO_2\ (Rx1)$

$$\dot{m}_{CO_2} = \frac{\dot{m}_{carbono}}{PM_{carbono}} * RE * PM_{CO_2}$$

Donde:

$\dot{m}_{oxígeno\ Rx1}$: flujo de O_2 necesario para Rx1(kg/h)

$\dot{m}_{carbono}$: flujo de C (kg/h)

$PM_{carbono}$: peso molecular del C (12 kg/kmol)

PM_{CO_2}: peso molecular del CO_2 (44 kg/kmol)

RE: relación estequiométrica (1)

$$\dot{m}_{CO_2} = \frac{357{,}86}{12} * 1 * 44$$

$$\boldsymbol{\dot{m}_{CO_2} = 1\,312{,}17\ \frac{kg}{h}}$$

El aire seco no combustionado se compone del oxígeno no reaccionado y del nitrógeno contenido en el aire alimentado de la combustión del diésel

$$\dot{m}_{aire\ seco\ no\ combustionado} = \left(\dot{m}_{oxígeno\ alimentado} - \dot{m}_{oxígeno\ esteq}\right) + \dot{m}_{nitrógeno\ alimentado}$$

$$\dot{m}_{aire\ seco\ no\ combustionado} = \left(194{,}20\frac{kg}{h} * 0{,}23 - 34{,}36\ kg/h\right) + 194{,}20\ kg/h * 0{,}77$$

$$\boldsymbol{\dot{m}_{aire\ seco\ no\ combustionado} = 159{,}84\ kg/h}$$

Se calcula el flujo del dióxido de carbono que es el producto de la reacción de combustión tres

$$4C_{12}H_{23} + 71O_2 \rightarrow 48CO_2 + 46H_2O \quad (Rx3)$$

$$\dot{m}_{CO_2} = \frac{\dot{m}_{diésel}}{PM_{diésel}} * RE * PM_{CO_2}$$

Donde:

$\dot{m}_{oxígeno\ Rx1}$: flujo de oxígeno necesario para la reacción uno (kg/h)

$\dot{m}_{diésel}$: flujo de combustible diésel (kg/h)

$PM_{diésel}$: peso molecular del diésel (163 kg/kmol)

PM_{CO_2}: peso molecular del CO_2 (44 kg/kmol)

RE: relación estequiométrica (12)

$$\dot{m}_{CO_2} = \frac{9{,}86}{163} * 12 * 44$$

$$\boldsymbol{\dot{m}_{CO_2} = 31{,}94\ \frac{kg}{h}}$$

Por lo cual el flujo de gas de combustión total es de **7 665,51 kg/h.**

El flujo de agua (humedad) en los gases de salida corresponden a:

Flujo de agua de la materia de alimentación: $\dot{m}_{agua}$ = 24,47 kg/h
Flujo de agua producto de la reacción de combustión dos: $\dot{m}_{agua\ Rx2}$
Flujo de agua del aire de alimentación: $\dot{m}_{agua\ en\ el\ aire} = 31{,}81\ kg/h$
Flujo de agua de la combustión del diésel: $\dot{m}_{agua\ diésel} = 28{,}80\ kg/h$

Se calcula el flujo del agua que es el producto de la reacción de combustión dos.

$$2H + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow H_2O\ (Rx2)$$

$$\dot{m}_{agua\ Rx2} = \frac{\dot{m}_{hidrógeno}}{PM_{hidrógeno}} * RE * PM_{agua}$$

Donde:
$\dot{m}_{oxígeno\ Rx1}$: flujo de oxígeno necesario para la reacción dos (kg/h)
$\dot{m}_{\text{hidrógeno}}$: flujo de hidrógeno (kg/h)
$PM_{\text{hidrógeno}}$: peso molecular del H (1 kg/kmol)
PM_{agua}: peso molecular del agua (18 kg/kmol)
RE: relación estequiométrica (0,50)

$$\dot{m}_{agua\ Rx2} = \frac{46{,}27}{1} * 0{,}50 * 18$$

$$\dot{m}_{agua\ Rx2} = 416{,}41\frac{kg}{h}$$

En total el flujo de agua de salida es de **501,49 kg/h.**

El flujo de cenizas y metales en la salida se mantiene constante de la cantidad original a la entrada de la cámara y son:

- Flujo de metales: $\dot{m}_{metales}$ = 0 kg/h
- Flujo de cenizas: $\dot{m}_{cenizas}$ = 71,40 kg/h

La masa de salida de la cámara corresponde a:

$\dot{m}_{salida} = \dot{m}_{gas\ de\ combustión\ T} + \dot{m}_{agua\ total} + \dot{m}_{metales} + \dot{m}_{cenizas}$

$\dot{m}_{salida} = 7\ 665{,}51\frac{kg}{h} + 501{,}49\frac{kg}{h} + 0\frac{\text{kg}}{\text{h}} + 71{,}16\ \text{kg/h}$

$\boldsymbol{\dot{m}_{salida} = 8\ 238{,}16\ kg/h}$

El oxígeno estequiométrico para la combustión del menú de carga y el diésel se obtiene a partir de:

$\dot{m}_{O2\ \ esq\ total} = \dot{m}_{O2\ \ esq\ desechos} + \dot{m}_{O2\ \ esq\ diésel}$

$\dot{m}_{O2\ \ esq\ total} = (1\ 324{,}45 + 34{,}36)\frac{\text{kg}}{\text{h}}$

$\boldsymbol{\dot{m}_{O2\ \ esq\ total} = 1\ 358{,}81\ \frac{\text{kg}}{\text{h}}}$

Aire seco estequiométrico total

$\dot{m}_{aire\ seco\ esq} = 1\ 358{,}81\frac{\text{kg}}{\text{h}} * (\frac{100}{23})$

$\boldsymbol{\dot{m}_{aire\ seco\ esq} = 5\ 907{,}85\frac{\text{kg}}{\text{h}}}$

Aire seco de alimentación total con 30% exceso

$\dot{m}_{aire\ seco\ alim} = 5\ 907{,}85 * 1{,}3$

$\boldsymbol{\dot{m}_{aire\ seco\ alim} = 7\ 680{,}21\frac{\text{kg}}{\text{h}}}$

Se realiza el balance de masa general de la cámara de combustión uno:

Entrada – Salida = 0

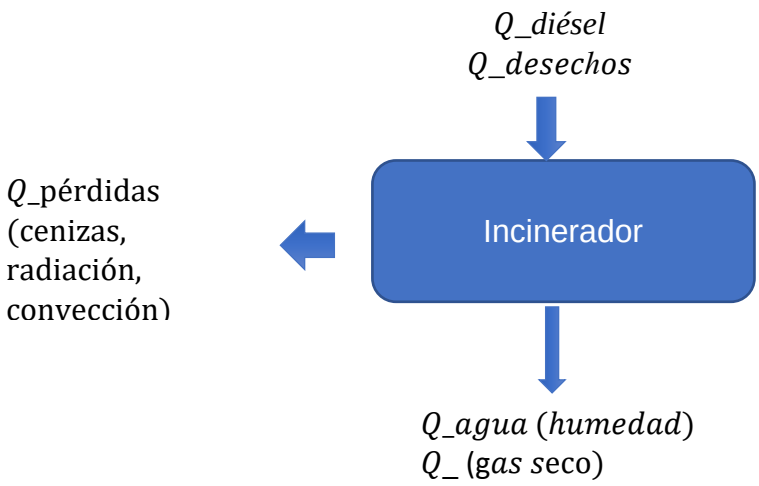
$\dot{m}_{aire} + \dot{m}_{desecho} - \dot{m}_{salida} = 0$

$7\ 728{,}30\frac{kg}{h} + 500\frac{kg}{h} + 9{,}86\frac{kg}{h} - 8\ 238{,}16\ \frac{kg}{h} = 0$

Por lo tanto, se comprueba el balance de masa en la incineradora

- **EJEMPLO DE CÁLCULO DE BALANCE DE ENERGÍA**

Se realizó el balance de energía de la incineración, para determinar las pérdidas de energía y el calor transferido al aire desde 14°C a 1 200°C. Para mejor entendimiento, mediante la siguiente figura, se detallan los flujos de calor presentes en el sistema.



Se calcula los flujos de entrada que corresponden al menú de carga y al diésel suministrado.

$$Q_{desechos} = PC_{desechos} * \dot{m}_{desechos}$$

Dónde:

$$PC_{desechos}: 8\,611{,}33\ \frac{kcal}{kg}$$

$$Q_{desechos} = 8\,611{,}33 \frac{kcal}{kg} * 500 \frac{kg}{h}$$

$$\boldsymbol{Q_{desechos} = 4\,305\,665{,}00\ kcal/h}$$

$$Q_{diésel} = PC_{diésel} * \dot{m}_{diésel}$$

$$PC_{diésel} = 10\,294{,}26\ \frac{kcal}{kg}$$

$$Q_{diésel} = 10\,294{,}26\ \frac{kcal}{kg} * 9{,}86 \frac{kg}{h}$$

$$\boldsymbol{Q_{diésel} = 101\,501{,}40\ \frac{kcal}{kg}}$$

El flujo de calor de salida para el diésel es la suma de los consumos de energía para elevar la temperatura del agua (humedad), del gas seco. desde 14°C a 1 200°C La capacidad calorífica se calculó al utilizar tablas de Cp a presión constante. Para el diésel se tomó el flujo de gas de combustión

- $\dot{m}_{gas\ seco} = 191{,}78\ \frac{kg}{h}$
- $\dot{m}_{agua} = 28{,}80\ \frac{kg}{h}$
- $T_i = 14\ °C$
- $T_f = 1\ 200\ °C$
- $T_m = 607\ °C$
- $C_{P\ gas\ seco} = 0{,}26\ \frac{kcal}{kg\ °C}$ obtenido a partir de la gráfica presente en el ANEXO 9
- $C_{P\ agua} = 0{,}53\ \frac{kcal}{kg\ °C}$
- $\lambda_{agua} = 540{,}31\ \frac{kcal}{kg}$

$$Q_{agua} = \dot{m}_{agua} * Cp_{agua} * (T_2 - T_1) + \lambda * \dot{m}_{agua}$$

$$Q_{agua} = 28{,}80\ \frac{kg}{h} * 0{,}53\ \frac{kcal}{kg\ °C} * (1\ 200\ - 14)°C + 28{,}80\ \frac{kg}{h} * 540{,}31\ \frac{kcal}{kg}$$

$$\boldsymbol{Q_{agua} = 33\ 615{,}99\ \frac{kcal}{h}}$$

Se calculó el consumo de energía para elevar la temperatura del gas seco.

$$Q_{gas\ seco} = \dot{m}_{gas\ seco} * Cp_{gas\ seco} * (T_2 - T_1)$$

$$Q_{gas\ seco} = 191{,}78\ \frac{kg}{h} * 0{,}26\ \frac{kcal}{kg\ °C} * (1\ 200\ - 14)°C$$

$$Q_{gas\ seco} = 59\ 365{,}39\ \frac{kcal}{h}$$

$$Q_{aire\ diésel} = Q_{gas\ seco} + Q_{agua}$$

$$Q_{aire\ diésel} = 59\ 365{,}39\ \frac{kcal}{h} + 33\ 615{,}99\ \frac{kcal}{h}$$

$$\boldsymbol{Q_{aire\ diésel} = 92\ 981{,}38\ \frac{kcal}{h}}$$

$$Q_{diésel} - Q_{pérdidas\ diésel} = Q_{gas\ seco} + Q_{agua}$$

$$Q_{pérdidas\ diésel} = 101\,501,40\ \frac{kcal}{kg} - (59\,365,39 + 33\,615,99\ )\frac{kcal}{h}$$

$$\boldsymbol{Q_{pérdidas\ diésel} = 8\,520,03\ \frac{kcal}{h}}$$

El flujo de calor de salida para los desechos peligrosos es la suma de los consumos de energía para elevar la temperatura del agua (humedad), del gas seco. desde 14°C a 1 200°C La capacidad calorífica se calculó al utilizar tablas de Cp a presión constante.

- $\dot{m}_{gas\ seco} = 7\,473,73\ \frac{kg}{h}$
- $\dot{m}_{agua} = 472,69\ \frac{kg}{h}$
- $T_i = 14\ °C$
- $T_f = 1\,200\ °C$
- $T_m = 607\ °C$
- $C_{P\ gas\ seco} = 0,26\ \frac{kcal}{kg\ °C}$ obtenido a partir del ANEXO 9
- $C_{P\ agua} = 0,53\ \frac{kcal}{kg\ °C}$
- $\lambda_{agua} = 540,31\ \frac{kcal}{kg}$

$$Q_{agua} = \dot{m}_{agua} * Cp_{agua} * (T_2 - T_1) + \lambda * \dot{m}_{agua}$$

$$Q_{agua} = 472,69\ \frac{kg}{h} * 0,53\ \frac{kcal}{kg\ °C} * (1\,200\ - 14)°C + 472,69\ \frac{kg}{h} * 540,31\ \frac{kcal}{kg}$$

$$Q_{agua} = 551\,736,43\ \frac{kcal}{h}$$

Se calcula el consumo de energía para elevar la temperatura del gas seco

$$Q_{gas\ seco} = \dot{m}_{gas\ seco} * Cp_{gas\ seco} * (T_2 - T_1)$$

$$Q_{gas\ seco} = 7\,473,73\ \frac{kg}{h} * 0,26\ \frac{kcal}{kg\ °C} * (1\,200\ - 14)°C$$

$$Q_{gas\ seco} = 2\,313\,462,74\ \frac{kcal}{h}$$

$$Q_{aire\ desechos} = Q_{gas\ seco} + Q_{agua}$$

$$Q_{aire\ desechos} = 2\,313\,462,74\ \frac{kcal}{h} + 551\,736,43\ \frac{kcal}{h}$$

$$\boldsymbol{Q_{aire\ desechos} = 2\,865\,199,17\ \frac{kcal}{h}}$$

$$Q_{desechos} - Q_{pérdidas\ desechos} = Q_{gas\ seco} + Q_{agua}$$

$$Q_{pérdidas\ desechos} = 4\,305\,665{,}0\ \frac{kcal}{kg} - (2\,313\,462{,}74 + 551\,736{,}43\ )\frac{kcal}{h}$$

$$\boldsymbol{Q_{pérdidas\ desechos} = 551\,736{,}43\ \frac{kcal}{h}}$$

Balance general en el incinerador

$$Q_{entrada} = Q_{desechos} + Q_{diésel}$$

$$Q_{entrada} = 4\,305\,665{,}0\ \frac{kcal}{kg} + 101\,501{,}40\ \frac{kcal}{kg}$$

$$Q_{entrada} = 4\,407\,166{,}50\ \frac{kcal}{kg}$$

$$Q_{aire\ total} = Q_{aire\ diesel} + Q_{aire\ desechos}$$

$$Q_{aire\ total} = 2\,865\,199{,}17\ \frac{kcal}{h} + 92\,981{,}38\ \frac{kcal}{h}$$

$$Q_{aire\ total} = 2\,958\,180{,}55\frac{kcal}{h}$$

$$Q_{pérdidas\ total} = Q_{entrada} - Q_{aire\ total} =$$

$$Q_{pérdidas\ total} = 4\,407\,166{,}50\ \frac{kcal}{kg} - 2\,958\,180{,}55\frac{kcal}{h}$$

$$\boldsymbol{Q_{pérdidas\ total} = 1\,448\,985{,}86\ \frac{kcal}{h}}$$

El calor por pérdidas se debe a la radiación, convección y cenizas que existió en el proceso

Se estima que las pérdidas de calor por radiación son del 10% del calor total disponible, por lo que se pierden 430 566,50 kcal/h (Vatavuk, 2002). Se multiplica por dos debido a que son dos cámaras, la primera de combustión y la segunda de postcombustión.

$$Q_{rad} = 0{,}1 * 2 * Q_{desechos}$$

$$Q_{rad} = 0{,}1 * 2 * 4\,407\,166{,}50\ \frac{kcal}{kg}$$

$$\boldsymbol{Q_{rad} = 881\,433,28\ \frac{kcal}{kg}}$$

Se calcula el consumo de energía para elevar la temperatura de las cenizas.

$Q_{cenizas} = \dot{m}_{cenizas} * Cp_{cenizas} * (T_2 - T_1)$

Donde:

$Cp_{cenizas} = 0{,}199\ \frac{kcal}{kg\ °C}$

$Q_{cenizas} = 71{,}16\ \frac{kg}{h} * 0{,}199 \frac{kcal}{kg\ °C} * (870 - 14)°C$

$Q_{cenizas} = 12\ 121{,}68\ \frac{kcal}{h}$

Finalmente, el resultante es el calor por convección

$Q_{convección} = (1\ 448\ 985{,}86 - \ 881\ 433{,}28\ - \ 12\ 121{,}68\ ) \frac{kcal}{h}$

$$\boldsymbol{Q_{convección} = 555\,430,90\ \frac{kcal}{h}}$$

CÁLCULO DEL TIEMPO DE RESIDENCIA EN LA CÁMARA DE POST COMBUSTIÓN

El tiempo de residencia, debe ser de mínimo 3 segundos, para calcular el tiempo se requiere de los caudales (PENNRAM, 2015). Para ello, se dividirá el flujo que sale de la cámara de post combustión en gas seco y vapor y se tomará el peso molecular del gas seco igual al del aire.

1. **Cálculo del caudal de gas seco**

Se requiere primero de la densidad, a condiciones de presión atmosférica y temperatura de salida de la segunda cámara de combustión; 1,018 atm y 1 200 °C respectivamente.

$$\delta_{gas\ seco} = \frac{P_{atm} \times PM_{gas\ seco}}{R \times T_2}$$

Donde:

$P_{atm} = 1{,}018\ atm$

$PM_{gas\ seco} = 22{,}18 \frac{g}{mol}$

$R = 0{,}082\ \frac{atm\ L}{mol\ K}$

$T_2 = 1\ 473\ K$

$\delta_{gas\ seco} = 0{,}18\ kg/m^3$

Entonces el caudal será:

$\dot{Q}_{gas\ seco} = \frac{\dot{m}_{gas\ seco\ total}}{\delta_{gas\ seco}}$

$\dot{m}_{gas\ seco\ total} = 7\ 665{,}51\ \frac{kg}{h}$

$\dot{Q}_{gas\ seco\ total} = 41\ 003{,}13\ \frac{m^3}{h}$

2. **Cálculo del caudal de vapor**

Procediendo de forma similar para el agua, se tiene que:

$\dot{Q}_{vapor\ total} = \frac{\dot{m}_{vapor\ total}}{\delta_{vapor}}$

$\dot{m}_{vapor\ total} = 501{,}49\ \frac{kg}{h}$

$\dot{Q}_{vapor\ total} = 3\ 305{,}64\ \frac{m^3}{h}$

Sumando los dos caudales, se obtiene el caudal total que saldrá de la cámara de post combstión:

$\dot{Q}_{total\ cám_2} = \dot{Q}_{gas\ seco\ total} + \dot{Q}_{vapor\ total}$

Donde:

$\dot{Q}_{total\ cám_2} = 44\ 308\ m^3/h$

Para obtener el tiempo, se aplica la siguiente ecuación:

$\dot{Q}_{total\ cám_2} = \frac{V_{cám2}}{t_{res}}$

Donde:

$V_{cám2} = \pi \times \left(\frac{\phi}{2}\right)^2 \times L = 24{,}81\ m^3$

Por lo tanto:

$t_{res} = 2{,}02\ s$

ANEXO 8.3 CÁLCULO DE BALANCE DE MASA EN LA CÁMARA DE INCINERACIÓN Y DEL LAVADOR DE GASES

BALANCE DE MASA DE DESECHOS

Flujo total (Kg/h)	500
Flujo de materia seca	475,53

Composición en peso del material a incinerar		
C	0,72	71,57
H	0,09	9,25
Metales	0,00	0,00
Ceniza	0,14	14,28
Humedad	0,05	4,89
	1,00	100,00

Flujos de entrada (kg/h)	
mC	357,86
mH	46,27
mM	0,00
mCe	71,40
mHumedad	24,47

Entrada	Salida
8017,82	8017,82
0,00	

Reacción 1

$$C + O_2 \rightarrow CO_2 \text{ (Rx1)}$$

Oxígeno necesario para la combustión de masa carbono

Rx1	mO2(kg/h)	954,30

Oxígeno necesario para la combustión de masa hidrógeno

Rx1	mO2(kg/h)	370,14	

Flujo del oxígeno estequiométrico

mOEs (kg/h)	1324,45

Aire seco estequeométrico (kg/h)	5758,47
Aire seco de alimentación (kg/h)	7486,01
Humedad de aire seco(kg agua/kg de aire seco)	0,00425

m Agua en el aire(kg/h)	31,81
Flujo de aire de entrada en la cámara (kg/h)	7517,82
Aire seco no combustionado (kg/h)	6161,56
Flujo de CO2 Rx1 (kg/h)	1312,17
Flujo de gas de combustión	7473,73

Reacción 2

$$2H + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow H_2O \text{ (Rx2)}$$

Flumo másico de agua en la RX2 (kg/h)	416,41
Flujo total de salida agua (kg/h)	472,69

Flujo de masa de salida de la cámara	8017,82

0,000

Ceniza producida	Eficiencia del incinerador (cenizas) (%)
22%	78
14%	86
5,19%	94,81

Continuación de los cálculos sobre balance de masa en la cámara de incineración y del lavador de gases.

BALANCE DE MASA DIESEL	
m(kg/h)	9,86
PM(kg/h)	163
	0,06

Reacción 3

$$4C_{12}H_{23} + 71O_2 \rightarrow 48CO_2 + 46H_2O$$

mCO2(kg/h)	31,94
mH2O(kg/h)	12,52
mO2(kg/h)	34,36
Aire seco esteq(kg/h)	149,39
Aire seco de alimentación (kg/h)	194,20
humedad de aire seco(agua/aire seco)	0,084

mH2O en el aire (kg/h)	16,28
Agua total sale (kg/h)	28,80
Aire total (kg/h) entra	210,48
Aire seco no combustionado (kg/h)	159,84
Flujo de gas de combustión (kg/h)	191,78

Sumatoria de RX1+RX2+RX3

Aire en exceso que entra (kg/h)	7728,30
Aire seco kg/h)	7665,51
Vapor (kg/h)	501,49
Flujo de aire no combustionado	7665,51
	501,49

Datos obtenidos del informe monitoreo lavador	
V aire (m/s)	12,64
Área chim.	0,38
Efic. CO2	0,54

Lavador de gases

Aire seco entra cam2 (kg/h)	7665,51
Vapor entra cam 2 (kg/h)	501,49
Aire entra cam 2 (kg/h)	8167,00
m agua entra (kg/h)	47773,63
m cal agregada (kg/h)	38,4

PM gas (g/mol)	22,18		
T(K)	335,00	d gas (kg/m3)	0,82
P(atm)	1,018	d vapor (kg/m3)	0,67
R	0,082		

Aire perdido cam 2 (kcal/h)	4381,60
Pérdida gas seco (kg/h)	4162,52
Pérdida de vapor (kg/h)	219,08

Salida aire (kg/h)	3785,40	Salida total (kg/h)	51597,43
		Lodo(10%)total (kg/h)	5159,74
		Agua (kg/h)	46437,69

ANEXO 8.3 BALANCE DE ENERGÍA EN LA CÁMARA DE INCINERACIÓN Y EN EL INTERCAMBIADOR DE CALOR

BALANCE DE ENERGIA

m Diesel (kg/h)	9,86	
Pc(Kcal/kg)	10294,26	
Q diesel	101501,404	
DIESEL		
Flujo de gas combustión (kg/h)	191,78	
Vapor (kg/h)	28,80	
Ti (°C)	14	
Tf (°C)	1200	
Tm (°C)	607	880 K
Cp gas seco (kcal/kg*°C)	0,261	
Cp vapor (kcal/kg*°C)	0,53	
Q aire seco (kcal/h)	59365,3908	
Q vapor (kcal/h)	33615,9867	
Q aire (kcal/h)	92981,3775	
Q(p)	8520,02613	
92981,377	92981,3775	

Flujo de desecho (kg/h)	500		
Pc Desechos(kcal/kg)	8611,33		
Q desechos	4305665		
DESECHOS			
Flujo de gas combustión (kg/h)	7473,73		
Vapor (kg/h)	472,69		
Ti (°C)	14		
Tf (°C)	870		
Tm (°C)	442	715 K	
Cp gas seco (kcal/kg*°C)	0,2475		
Cp vapor (kcal/kg*°C)	0,50	C latente (kcal/kg)	540,31
Q aire seco (kcal/h)	1583384,11		
Q vapor (kcal/h)	458896,449		
Q aire (kcal/h)	2042280,56		
Q(p)	2263384,44		
2042280,555	2042280,56		

DESECHOS			
Flujo de gas combustión (kg/h)	7473,73		
Vapor (kg/h)	472,69		
Ti (°C)	14		
Tf (°C)	1200		
Tm (°C)	607	880 K	
Cp gas seco (kcal/kg*°C)	0,261		
Cp vapor (kcal/kg*°C)	0,53	C latente (kcal/kg)	540,31
Q aire seco (kcal/h)	2313462,74		
Q vapor (kcal/h)	551736,427		
Q aire (kcal/h)	2865199,17		
Q aire cam 2 (kcal/h)	822918,614		

Q gas seco incineración (kcal/h)	2372828,133	
Q vapor incineración (kcal/h)	585352,4137	
Q aire (kcal/h)	2958180,546	
INTERCAMBIADOR DE CALOR		
m gas	7665,51	
mvapor	501,49	
T1	1200	
t2	250	
Tm	725	998 K
Cp gas seco (kcal/kg*°C)	0,288	
Cp vapor (kcal/kg*°C)	0,55	
Q aire seco (kcal/h)	-2097283,69	
Q vapor (kcal/h)	-260813,9741	
Q aire(kcal/h)	-2358097,664	
Q gas seco sale (kcal/h)	275544,4427	
Q vapor sale (kcal/h)	324538,4395	
Q aire sale (kcal/h)	600082,8822	

Balance General		
Q entrada (kcal/h)	Q pérdidas (kcal/h)	Qaire (kcal/h)
4407166,404	1448985,857	2958180,55

ANEXO 8.4 CÁLCULO DE CONCENTRACIONES DE HCL, CO_2 Y SO_2 PRESENTES EN EL FLUJO MÁSICO DEL INCINERADOR

Flujo de gas seco (kg/h)	7486,01
Opera (h)	24
Densidad del gas seco (kg/m3)	0,18

Condiciones normales	
P (atm)	1
T (K)	273
R (atm l/mol K)	0,08205

HCl	
HCl (mg/m3 gs.)	2,94
d HCl(g/l)	1,63
kg de HCl	2,93

CO_2	
CO_2 (ml/m3 gs.)	4,63
d CO_2 (mg/ml)	1,96
kg de CO_2	9,08

SO_2	
SO_2 (ml/m3 gs.)	14,00
d SO_2 (mg/ml)	2,86
kg de SO_2	39,93

Aire (O_2, N_2, H_2O)	
Aire (kg/h)	8167
kg aire	196008

Sumatoria (kg) por turno	196059,94
% Aire	99,974
% HCl	0,001
% CO_2	0,005
% SO_2	0,020

ANEXO 9

Gráfica para la determinación del Cp para gases de combustión

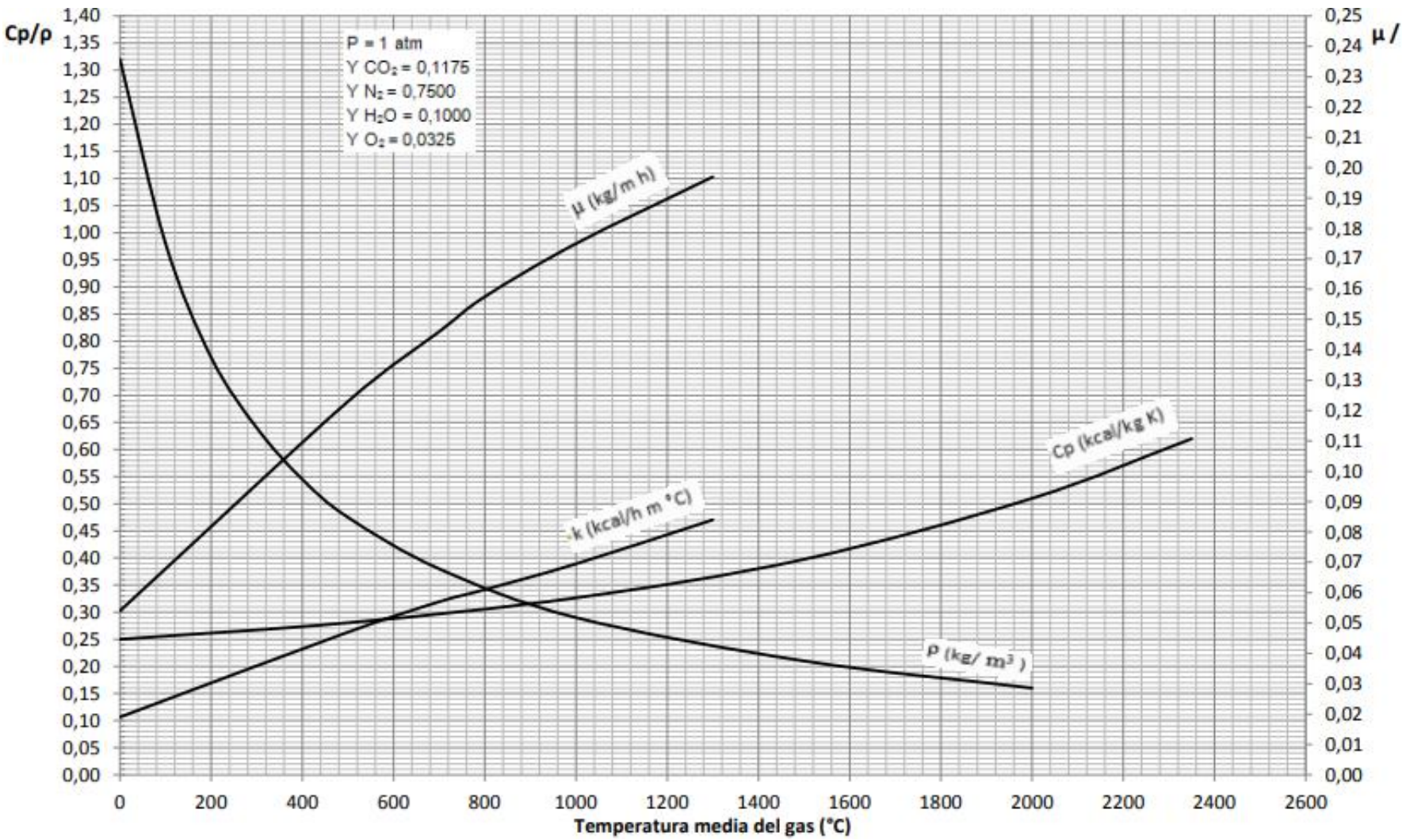


Figura 69. Propiedades de gases de combustión a P=1atm

Fuente: (Montenegro, 2016)