UNIVERSIDAD MAYOR, REAL Y PONTIFICIA DE SAN FRANCISCO XAVIER DE CHUQUISACA

VICERRECTORADO

CENTRO DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACION

“ANÁLISIS DE LA VIABILIDAD TÉCNICA Y ECONÓMICA DE LA VALORIZACIÓN ENERGÉTICA DE RESIDUOS COMO COMBUSTIBLES ALTERNATIVOS EN LOS HORNOS DE LA FÁBRICA NACIONAL DE CEMENTO S.A. FANCESA”

TRABAJO EN OPCIÓN AL GRADO DE MAGISTER EN ENERGÍAS RENOVABLES Y EFICIENCIA ENERGÉTICA

LUIS MIGUEL REJAS SAAVEDRA

SUCRE –ABRIL DE 2025

UNIVERSIDAD MAYOR, REAL Y PONTIFICIA DE SAN FRANCISCO XAVIER DE CHUQUISACA

VICERRECTORADO

CENTRO DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACION

“ANÁLISIS DE LA VIABILIDAD TÉCNICA Y ECONÓMICA DE LA VALORIZACIÓN ENERGÉTICA DE RESIDUOS COMO COMBUSTIBLES ALTERNATIVOS EN LOS HORNOS DE LA FÁBRICA NACIONAL DE CEMENTO S.A. FANCESA”

TRABAJO EN OPCIÓN AL GRADO DE MAGISTER EN ENERGÍAS RENOVABLES Y EFICIENCIA ENERGÉTICA

LUIS MIGUEL REJAS SAAVEDRA

M.Sc. NICÓMEDES SAAVEDRA ARANCIBIA

SUCRE – ABRIL DE 2025

AGRADECIMIENTO

A *Dios por las oportunidades que puso en mi camino y por la fortaleza que me brindo para transitarlo.*

A mis Abuelos H. Saavedra (+) y F. Salazar (+), a mi madre Vilodia Saavedra Salazar, que me cuidaron y proporcionaron las primeras herramientas del conocimiento para transitar esta vida.

Al "Centro de Estudios de Posgrado e Investigación CEPI", y a sus catedráticos por compartir sus conocimientos y la oportunidad de desarrollar la presente maestría.

A mis colegas y compañeros, por apoyarme en el camino de nuestra formación profesional, con quienes compartimos una amistad además de los conocimientos.

A mi tutor, M.Sc. Nicómedes Saavedra Arancibia, por el apoyo en la elaboración del presente trabajo.

Gracias

DEDICATORIA

El presente trabajo está dedicado a mi madre Vilodia Saavedra Salazar, por su Amor, apoyo incondicional y motivación constante, que me permite continuar con mi desarrollo y superación personal.

CESIÓN DE DERECHOS

Al presentar este trabajo como requisito para la obtención del Título de Magister en Energías Renovables y Eficiencia Energética de la Universidad Mayor, Real y Pontificia de San Francisco Xavier de Chuquisaca, autorizo al Centro de Estudios de Posgrado e Investigación o a la Biblioteca de la Universidad, para que se haga de este trabajo un documento disponible para su lectura, según normas de la Universidad.

También cedo a la Universidad Mayor, Real y Pontificia de San Francisco Xavier de Chuquisaca, los derechos de publicación de este trabajo o parte de él, manteniendo mis derechos de autor hasta un periodo de 30 meses posterior a su aprobación.

Luis Miguel Rejas Saavedra

Sucre, abril del 2025

INDICE DE CONTANIDO

1 CAPÍTULO I INTRODUCCIÓN 1

1.1 INTRODUCCIÓN 1
1.2 ANTECEDENTES Y MARCO CONTEXTUAL 2
1.3 SITUACIÓN PROBLÉMICA 3
1.3.1 Formulación del problema 3
1.4 JUSTIFICACIÓN 4
1.4.1 Justificación técnica 4
1.4.2 Justificación económica 5
1.4.3 Justificación socioambiental 5
1.5 CAMPO DE ACCIÓN Y ALCANCE TEMÁTICO 6
1.6 METODOLOGÍA 6
1.7 OBJETIVOS 7
1.7.1 Objetivo general 7
1.7.2 Objetivos específicos 7

2 CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO Y CONTEXTUAL 8

2.1 MARCO TEÓRICO 8
2.1.1 Características principales del proceso de producción de cemento 8
2.1.2 Descripción de aspectos generales del clínker y sus componentes 9
2.1.3 Importancia y demanda energética del piroproceso en la industria del cemento 12
2.1.4 Combustibles tradicionales usados los hornos de la industria cementera 14
2.1.5 Características físico químicas de los combustibles convencionales usados en la industria 15
2.1.6 Aplicación de los combustibles alternativos en la industria del cemento 17
2.1.7 Características de los residuos aptos para combustibles alternativos 18
2.1.8 Criterios técnicos para el uso de combustibles alternativos en hornos de la industria cementera 20

2.1.9 Límites recomendados de compuestos no deseados 21
2.2 MARCO CONTEXTUAL 22
2.2.1 Contexto internacional de aplicación de combustibles alternativos en industrias cementeras 22
2.2.2 Legislación para la disposición de residuos 25
2.2.3 Residuos prohibidos para su coprocesamiento y recuperación energética 26
2.2.4 Normativas nacionales para la incineración de residuos 27
2.2.5 Normativa para emisiones de combustión de sólidos, líquidos y gases 29
2.2.6 Sistemas de control de operación en el proceso de producción de cemento 32
2.2.7 Puntos recomendados para la adición de combustibles alternativos en plantas de cemento 33

3 CAPÍTULO III METODOLOGíA 35

3.1 ENFOQUE DE LA INVESTIGACIÓN 35
3.1.1 Enfoque cualitativo 35
3.1.2 Enfoque cuantitativo 36
3.2 MÉTODOS DE INVESTIGACIÓN 36
3.2.1 Métodos teóricos 36
3.2.2 Método deductivo 37
3.2.3 Métodos empíricos 37
3.3 TÉCNICAS E INSTRUMENTOS 39

4 CAPÍTULO IV DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN 40

4.1 UBICACIÓN GEOGRÁFICA DE APLICACIÓN DEL ESTUDIO 40
4.2 LÍNEA DE CALCINACIÓN POLYSIUS 41
4.3 PRODUCCIÓN Y CONSUMO ENERGÉTICO DEL HORNO POLYSIUS 42
4.4 CONSUMO CALÓRICO REQUERIDO EN EL PRE CALCINADOR 43
4.5 DIAGNÓSTICO DEL TIPOS Y CANTIDAD DE RESIDUOS GENERADOS EN EL MUNICIPIO DE SUCRE 44

4.5.1 Clasificación y cantidad de residuos generados en el municipio de Sucre 44
4.6 POTENCIAL DE RECUPERACIÓN DE LOS RESIDUOS URBANOS APTOS PARA EL USO COMO COMBUSTIBLES ALTERNATIVOS 46
4.7 POTENCIAL ENERGÉTICO DE LOS CDR POR MES Y POR AÑO 47
4.8 PORCENTAJE DE SUSTITUCIÓN ENERGÉTICO EN EL CALCINADOR SLC POR CDR 48
4.9 AHORRO ECONÓMICO POTENCIAL 49
4.10 ESTIMACIÓN DEL CARBONO NEUTRAL 51
4.11 EQUIPAMIENTO REQUERIDO PARA LA ADICIÓN DE COMBUSTIBLES ALTERNATIVOS 51
4.11.1 Balanza camionera 52
4.11.2 Hangar 52
4.11.3 Tolva y cinta de alimentación 52
4.11.4 Separación 52
4.11.5 Trituración y acondicionamiento 52
4.11.6 Transporte y secado 53
4.11.7 Sistema de inyección 53
4.12 PROPUESTA DE INSTALACIÓN DEL SISTEMA DE ALIMENTACIÓN DE COMBUSTIBLES ALTERNATIVOS 53
4.12.1 Plano frontal de la torre SLC y DOPOL de la línea Polysius 54
4.12.2 Plano posterior de la torre SLC y DOPOL de la línea Polysius 56
4.12.3 Plano de vista vertical y horizontal 57
4.13 PROCEDIMIENTO PARA EL ACOPIO DE CDR EN LA FÁBRICA FANCESA 59
4.13.1 Socialización. 59
4.13.2 Recolección de la materia prima (Residuos Urbanos) 59
4.13.3 Acopio y pre acondicionamiento de los residuos urbanos 59
4.13.4 Adquisición de los CDR pre acondicionados por FANCESA 60
4.14 COTIZACIÓN PRESUPUESTARIA DEL SISTEMA DE VALORIZACIÓN DE COMBUSTIBLES ALTERNATIVOS 61

5 CAPÍTULO V CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 62

5.1 CONCLUSIONES 62
5.2 RECOMENDACIONES 63

6 BIBLIOGRAFÍA 64

INDICE DE FIGURAS

Figura 2-1 Torre de ciclones, calcinador y horno..... 13
Figura 2-2 Horno De Clinker**.** 14
Figura 2-3 Mezcla de residuos para la adición como combustibles alternativos 25
Figura 2-4 Lineamientos recomendados para la gestión de residuos. 26
Figura 2-5 Sistema de control SCADA ECS/Processexpert® De Lfsmidth. 33
Figura 2-6 Puntos de alimentación de combustibles alternativos en una planta de cemento.. 34
Figura 4-1 Ubicación de los predios de la fábrica de cemento FANCESA. 40
Figura 4-2 Sistema de calcinación línea Polysius. 41
Figura 4-3 Propuesta de distribución de los equipos..... 54
Figura 4-4 Plano frontal torre DOPOl y SLC..... 55
Figura 4-5 Vista posterior de la torre Dopol y SLC 56
Figura 4-6 Plano de vista vertical de la línea Polysius..... 57
Figura 4-7 Vista del plano de planta linea Plolysius. 58
Figura 4-8 Flujograma de la logística del proceso propuesto..... 60

INDICE DE TABLAS

Tabla 2-1 Componentes requeridos en la materia prima para la producción de clínker. 10
Tabla 2-2 Compuestos del clínker y sus características. 11
Tabla 2-3 Detalle de las etapas y temperaturas en el proceso de clinkerización. 12
Tabla 2-4 Características de los combustibles convencionales. 15
Tabla 2-5 Características y tipos de residuos comunes. 19
Tabla 2-6 Poder calorífico de combustibles alternativos. 20
Tabla 2-7 Normativa y temática que abarca. 27
Tabla 2-8 Límite máximo de emisión por industria 29
Tabla 2-9 Límite de emisión de combustión externa a partir de combustibles sólidos y líquidos. 30
Tabla 2-10 Norma de emisión de combustión externa a partir de combustibles gaseosos. 31
Tabla 2-11 Concentración de emisiones para los diferentes grupos de sustancias 31
Tabla 4-1 Producción y consumo de gas del horno Polysius gestión 2020. 42
Tabla 4-2 Consumo energético del horno Polysius. 43
Tabla 4-3 Recolección de residuos sólidos en la ciudad de sucre, 2020 – 2024 (en toneladas) 45
Tabla 4-4 Residuos sólidos recolectados en Sucre Bolivia, según tipo de procedencia, 2023. 45
Tabla 4-5 Potencial de recuperación de CDR. 46
Tabla 4-6 Estimación del potencial energético de los CDR en millones de Kcal 47
Tabla 4-7 Potencial de sustitución energética en el calcinador SLC Polysius. 49
Tabla 4-8 Cálculo del costo del gas natural consumido en la línea Polysius en la gestión 2020 49
Tabla 4-9 Costo de acondicionamiento de los CDR 50
Tabla 4-10 Cálculo de carbono neutral 51
Tabla 4-11 Detalle de los ítems de la cotización 61

RESUMEN.

Los hornos en la industria cementera son grandes consumidores de energía térmica, la cual, en la Fábrica Nacional de Cemento S.A. (FANCESA), se obtiene únicamente de la combustión de gas natural. Sin embargo, a nivel global, esta industria avanza hacia el uso de combustibles alternativos, con el fin de reducir la dependencia de fuentes fósiles convencionales.

En este contexto, se realizó un estudio en la planta de FANCESA, ubicada en el municipio de Sucre, con el objetivo de evaluar la viabilidad del uso de Combustibles Derivados de Residuos (CDR). Se inspeccionaron las tres líneas de producción de clínker, identificando la línea Polysius como la más adecuada para este análisis. La investigación incluyó una revisión bibliográfica, recopilación de datos estadísticos, un estudio cualitativo y cuantitativo del funcionamiento del horno Polysius, así como del potencial energético de los residuos sólidos urbanos generados en Sucre.

Los resultados indican que es posible recuperar aproximadamente 24.644 toneladas de CDR al año, equivalentes al 33% de los residuos urbanos del municipio. Este volumen representa un potencial energético estimado de 88.719 millones de kilocalorías anuales, lo que permitiría sustituir hasta el 62% del gas natural utilizado en la torre con Sistema Lineal de Calcinación (SLC) del horno Polysius. Esto se traduciría en un ahorro económico de alrededor de 5,95 millones de bolivianos por año.

Además, se identificó el calcinador como el punto óptimo para la inyección de CDR, tanto por sus condiciones técnicas como por su impacto positivo en la operación del horno. También se verificó la disponibilidad de espacio al oeste del horno Polysius para la instalación de los equipos necesarios. Según una cotización de la empresa AUMUND, la implementación del proyecto tendría un costo estimado de 1,9 millones de euros.

En conclusión, la valorización energética de residuos mediante su uso como CDR en la línea Polysius de FANCESA es técnica y económicamente viable, aportando beneficios significativos en términos operativos, económicos y ambientales, tanto para la empresa como para la comunidad de Sucre.

Palabras clave: Piroproceso, Clinker, Coprocesamiento, Poder Calorífico, combustibles alternativos.

ABSTRACT

Kilns in the cement industry are large consumers of thermal energy, which at Fábrica Nacional de Cemento S.A. (FANCESA) is obtained solely from the combustion of natural gas. However, globally, this industry is moving towards the use of alternative fuels in order to reduce dependence on conventional fossil fuels. In this context, a study was carried out at the FANCESA plant, located in the municipality of Sucre, to evaluate the feasibility of using Refuse Derived Fuels (RDF). The three clinker production lines were inspected, identifying the Polysius line as the most suitable for this analysis. The research included a literature review, statistical data collection, a qualitative and quantitative study of the operation of the Polysius kiln, as well as the energy potential of the urban solid waste generated in Sucre.

The results indicate that it is possible to recover approximately 24,644 tons of RDF per year, equivalent to 33% of the municipality's municipal waste. This volume represents an estimated energy potential of 88,719 million kilocalories per year, which would make it possible to replace up to 62% of the natural gas used in the SLC tower of the Polysius kiln. This would translate into economic savings of around 5.95 million Bs per year.

In addition, the calciner was identified as the optimum point for RDF injection, both for its technical conditions and its positive impact on kiln operation. The availability of space to the west of the Polysius kiln for the installation of the necessary equipment was also verified. According to a quote from AUMUND, the implementation of the project would have an estimated cost of 1.9 million euros.

In conclusion, the energy recovery of waste through its use as RDF in FANCESA's Polysius line is technically and economically feasible, providing significant benefits in operational, economic and environmental terms, both for the company and for the community of Sucre.

Keywords: Pyroprocessing, Clinker, Co-processing, Calorific value, alternative fuels.

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1 INTRODUCCIÓN

El cemento juega un papel clave en el desarrollo de la sociedad y de los países, es un material básico e indispensable para la construcción de viviendas, carreteras, escuelas, hospitales, presas, puertos, etc. Por tanto, es indispensable para el desarrollo de la sociedad (CEMBUREAU et al., 2009).

No obstante, la industria del cemento es una de los más grandes consumidores de combustibles fósiles en la actualidad, tanto para la explotación, el transporte de materias primas y productos, principalmente para generar energía eléctrica para el funcionamiento de los equipos y energía térmica para la producción de clínker, principal componente del cemento.

En el departamento de Chuquisaca, específicamente en la ciudad de Sucre, se cuenta con al La Fábrica Nacional de Cemento S.A. (FANCESA) que se enfrenta a estos desafíos, por tanto, desde este punto de vista del contexto actual, como profesionales, se ve la necesidad de buscar soluciones sostenibles, por la responsabilidad ambiental individual y empresarial.

Por otra parte, en el continuo desarrollo y crecimiento de las ciudades e industrias, generan diferentes tipos de residuos aptos para la combustión, como ser: plásticos, telas, madera, aceites, grasas, cartones, caucho o gomas de llantas que cumplieron su ciclo de uso, entre otros residuos, mismos que en la actualidad son llevados a vertederos generando contaminación al medio ambiente en general.

La mayoría de los residuos son combustibles potenciales, para el uso en los hornos una vez sean acondicionados, ya que contienen un poder calorífico significativo, por lo que la incorporación de la mayoría si no es la totalidad de estos residuos como combustibles alternativos en los hornos de clínker de FANCESA es una opción atractiva de estudiar.

La valorización energética de los residuos es una alternativa interesante que permitiría reducir el uso de combustibles fósiles, en la generación de energía térmica, la incorporación de residuos como combustibles alternativos en hornos de cemento, no solo abarca el desafío de la gestión

responsable de los residuos y desechos, sino también presenta una solución estratégica para la reducción del consumo de gas natural, en el caso de la fábrica de cemento FANCESA, y el inconveniente de los botaderos para la ciudad de Sucre.

Tomando en cuenta el contexto descrito, en el presente proyecto se realizó un estudio primero de la cantidad de residuos que se genera en la ciudad de Sucre, la clasificación de los mismos, el potencial energético que contienen cada tipo de residuos, además se plantea una alternativa desde un enfoque analítico de la viabilidad tanto técnica como económica para la inclusión de estos residuos como combustibles alternos en el piroproceso, para la producción de Clinker, aplicando metodologías y enfoques ingenieriles del proceso cementero, agrupando la teoría con la práctica con el fin de llegar a una solución sostenible técnica y económicamente tanto de la acumulación de la basura en los vertederos así como la optimización del proceso en la fábrica de cemento FANCESA.

1.2 ANTECEDENTES Y MARCO CONTEXTUAL

“La FABRICA NACIONAL DE CEMENTO S.A. nació como consecuencia de un sismo en marzo de 1948, dicho fenómeno produjo daños de mucha consideración en las edificaciones de la ciudad. Los estudios de los yacimientos calcáreos establecen la factibilidad de ubicar la planta en las afueras de la ciudad de Sucre, la misma que inicialmente tendría una capacidad de producción de 100 toneladas por día tanto de clínker como de cemento. El 21 de enero de 1959, el Gobierno autoriza la creación de una sociedad anónima entre la Universidad Mayor de San Francisco Xavier, la Municipalidad de Sucre y la Corporación Boliviana de Fomento “CBF”, bajo la denominación de "FÁBRICA NACIONAL DE CEMENTO S.A., FANCESA", con domicilio legal es la ciudad de Sucre. Actualmente la sociedad está constituida como sigue: GOBIERNO DEPARTAMENTAL AUTÓNOMO DE CHUQUISACA 33,34% GOBIERNO MUNICIPAL DE SUCRE 33,33% UNIVERSIDAD DE SAN FRANCISCO XAVIER 33,33%”.(FANCESA, 2021).

La Fábrica de cemento FANCESA, actualmente cuenta con tres líneas de producción, de las cuales la línea Polysius cuenta con una capacidad de 2000 t/día de clínker, la cual se encuentra detenida desde el año 2021; actualmente están operativas la línea KAWASAKI con una

capacidad de 850 t/día de clínker y la Nueva Línea de Producción “NLP” FLSMIDTH con una capacidad de 2100 t/día de clínker, que arranco el año 2021.

En el caso de la línea Polysius que será el objeto de nuestro estudio, tiene un consumo de gas natural “G N” en metros cúbicos de 155 000 Nm3/día aproximadamente, para una producción de 2000 ton/día de clínker, los datos mencionados son en operación estándar, con un consumo específico aproximado de 800 kcal/ Kg; en el caso del horno Kawasaki tiene un consumo aproximado de 75 000 Nm3/día de gas natural, con un consumo específico de 820 Kcal/kg de clínker en promedio, la NLP FLSMIDTH, con un consumo de 176 000 Nm3/día en el horno, y un consumo específico promedio de 760 Kcal/kg de clínker.

De acuerdo a la experiencia de otras plantas cementeras a nivel mundial, es posible el funcionamiento del calcinador con prácticamente el 100 % de combustibles de sustitución o alternativos con composiciones diferentes. De hecho, pueden utilizarse eficazmente la celulosa en fibras, harina animal, tela asfáltica triturada, restos de destilación e incluso pellets de combustible sustitutivo. La adición de los combustibles de sustitución en el calcinador se realiza neumáticamente para que puedan ser impulsados por aire, y mecánicamente mediante un sistema de dosificación, para el resto de los materiales citados (Lechtenberg & Hansjörg, 2017).

1.3 SITUACIÓN PROBLÉMICA

La disminución de las reservas nacionales y los límites de volumen que actualmente tiene YPFB para el consumo de gas natural en las grandes industrias, afecta su capacidad de producción de clínker de la fábrica de cemento FANCESA, por otra parte, se observa las dificultades que se tiene en la ciudad de Sucre con la acumulación y la disposición final de los diferentes residuos urbanos generados en la ciudad, así como en la misma fábrica de cemento FANCESA.

1.3.1 Formulación del problema

La problemática que se identificó se formula como sigue:

¿Cuál es el potencial y la factibilidad técnica, económica para la sustitución del gas natural usado en el calcinador del horno Polysius de la fábrica de cemento FANCESA, por combustibles alternativos generados a partir de residuos urbanos de la ciudad de Sucre?

1.4 JUSTIFICACIÓN

1.4.1 Justificación técnica

Actualmente la fábrica de cemento FANCESA, en pro de la actualización y la mejora continua se encuentra preparando alternativas para la incorporación y aprovechamiento energéticos de los residuos, a manera de sustitutos de los combustibles tradicionales en el proceso de producción de clínker, este proyecto está enfocado en la sostenibilidad y la necesidad de incorporar la económica circular por el prestigio empresarial que actualmente es una tendencia mundial en la industria.

Por otra parte, se observa que la acumulación de los desechos urbanos en la ciudad de Sucre, llegó a sobrepasar la capacidad de los espacios designados, actualmente se llegó a un punto donde el 100% de los residuos llegan al botadero municipal, lo que conlleva un promedio de 208 ton/día, según estadísticas del Instituto Nacional de Estadística "INE", por lo cual se precisa formular métodos más eficientes que permitan encarar la problemática de la contaminación causado por los residuos urbanos en la ciudad de Sucre y alrededores.

Paralelamente, a nivel nacional se vive una coyuntura de reducción de las reservas de Gas Natural, por la disminución de la capacidad de producción de los diferentes pozos gasíferos operativos, a raíz de esto la estatal YPFB, optó por destinar volúmenes de consumo limitados a las grandes industrias en especial a las cementeras, lo que en el caso de FANCESA significa en reducir su capacidad de producción de clínker, por esta razón el buscar nuevas alternativas energéticas y de gestión de los residuos, se convirtió en interés de la gerencia técnica.

Una de las opciones de interés es justamente, incluir los residuos generados en el municipio, como combustibles alternativos para la recuperación de energía térmica en los hornos de piroproceso, puesto que en otros países con mayor desarrollo tecnológico ya se lleva realizando este procedimiento desde hace décadas atrás, este procedimiento diversifica la matriz energética y reduce el uso del gas natural, impulsando a la eficiencia energética del proceso.

Las altas temperaturas, la atmosfera de combustión aislada, monitoreada y controlada por instrumentos y personal, son ideales para el aprovechamiento energético de cualquier residuo, ya que, por las condiciones mencionadas, los materiales se degradan hasta alcanzar compuestos

estables e inertes, que en el caso de ser solidos se incorporan al clínker y en caso de gases solo se desprende como dióxido de carbono, que es el mismo resultado de la combustión del gas natural.

1.4.2 Justificación económica

Desde el punto de vista económico, implementar la práctica de aprovechar energéticamente los residuos en la fábrica de FANCESA, ofrece oportunidad de optimizar costos, al reducir el consumo de gas natural, por la sustitución por combustibles alternativos, al mismo tiempo, incrementar la capacidad de producción, por tanto sus utilidades de la empresa, asimismo se traduce en la reducción de gastos operativos destinados para la disposición final de los residuos para el municipio, además de aprovechar los espacios ocupados por los residuos de manera más productiva, Esta iniciativa también puede generar empleo en el ámbito de la gestión, preparación y acondicionamiento de los combustibles alternativos, para ser incorporados y aprovechados energéticamente contribuyendo al desarrollo económico de la región en general.

En vistas al futuro, la fábrica de cemento FANCESA, tiene la necesidad de ingresar a la economía circular y adicionar prácticas sostenibles en el proceso de producción de cemento, adicionalmente, el crear un mercado para los combustibles derivados de residuos "CDR", insta a instituciones públicas, privadas y particulares a desarrollar emprendimientos que permitan realizar la gestión y acondicionamiento de los residuos, para su posterior venta a la fábrica de cemento FANCESA.

A pesar de posibles costos de implementación de la propuesta, el impacto positivo que conlleva el aprovechamiento energético de los residuos se traduce en rentabilidad a mediano y largo plazo para la planta de cemento FANCESA y la región en su conjunto.

1.4.3 Justificación socioambiental

Tomando en cuenta la perspectiva socioambiental, incluir residuos como combustibles, generaría varios beneficios para la región, como reducir la contaminación por estos materiales, consolidar la reputación de Sucre como ciudad blanca, limpia, eco amigable por lidiar de manera eficiente con los residuos, se eliminaría el problema de las acumulaciones de desechos, recuperando los espacios para diversos fines.

La disposición final del 100% de los diferentes residuos (basura) generados en la ciudad de Sucre y alrededores, termina en botaderos precarios como el de Lechuguillas, ocasionando contaminación ambiental, proliferación de vectores infecciosos y riesgo sanitario para la comunidad.

Para la Fábrica de Cemento FANCESA, el uso de los combustibles alternativos en un futuro próximo, se traduce en mejorar la imagen corporativa, el prestigio y reputación empresarial, demostrando el compromiso con la sostenibilidad ambiental y la responsabilidad social empresarial, haciendo eco de la mejora continua como parte de sus políticas institucionales.

La Comisión Europea ha destacado entre las mejores prácticas de eficiencia, el uso de residuos como combustible en las cementeras, pues reduce las emisiones de CO2, los costes energéticos y da una solución ambientalmente correcta a los residuos. Muchos de estos son biomasa, residuos no reciclables que en otras circunstancias se destinan a vertederos o incineradoras, y producen mayores emisiones de gases de efecto invernadero (en vertederos, la fermentación de la materia orgánica produce metano, un gas con un potencial de calentamiento 25 veces mayor que el del CO2) (Fundación Laboral del Cemento y el Medio Ambiente, 2022).

1.5 CAMPO DE ACCIÓN Y ALCANCE TEMÁTICO

El estudio se enfoca en la Fábrica de Cemento FANCESA, específicamente el horno Polysius, consiste en determinar el potencial de los residuos urbanos de la ciudad de Sucre para convertirlos en combustibles derivados de residuos “CDR”, su capacidad energética, el porcentaje de sustitución del G N por los CDR en el calcinador del horno Polysius, la factibilidad técnica para la modificación e instalación de los equipos necesarios, el impacto económico y ambiental de la implementación del proyecto.

1.6 METODOLOGÍA

El enfoque metodológico se basa en un proceso sistemático y riguroso para la recolección y análisis de datos bibliográficos, sustentados técnicamente, aplicando herramientas y técnicas propias de la ingeniería.

También contempla la inspección en sitio, para evaluar el posible emplazamiento del sistema de valorización energética de residuos en el horno Polysius de la fábrica de cemento FANCESA.

1.7 OBJETIVOS

1.7.1 Objetivo general

El objetivo principal del presente trabajo es: evaluar la viabilidad técnica y económica de la valorización energética de los residuos generados en el municipio de Sucre, para su posterior inclusión como combustibles alternativos en el calcinador del horno Polysius de la fábrica de cemento FANCESA.

Para cumplir este fin se plantea los siguientes objetivos específicos.

1.7.2 Objetivos específicos

1. Cuantificar el potencial de recuperación de CDR a partir de los residuos sólidos urbanos de la ciudad de Sucre de acuerdo a datos estadísticos.

2. Determinar la capacidad y porcentaje de sustitución térmica del Gas Natural por CDR en el calcinador del horno Polysius de la fábrica de cemento FANCESA.

3. Cuantificar el impacto económico y ambiental "carbono neutral" producto de la sustitución de del Gas Natural por CDR en el calcinador del horno Polysius.

4. Identificar el emplazamiento adecuado para la implementación del sistema de adición de combustibles alternativos y los equipos necesarios que garantice su integración efectiva de los CDR en el proceso de producción de clínker.

5. Analizar los beneficios, limitaciones técnicas y operativas del uso de combustibles derivados de residuos sólidos urbanos como fuente de energía alternativa en los hornos de clinkerización de la planta de cemento FANCESA.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO Y CONTEXTUAL

2.1 MARCO TEÓRICO

2.1.1 Características principales del proceso de producción de cemento

La industria del cemento es una de las de mayor crecimiento a nivel mundial. En los últimos años las empresas han mejorado su línea de producción mediante la implementación de nuevos sistemas tecnológicos, con el propósito de disminuir sus costos de producción, especialmente los energéticos y obtener un producto de óptima calidad. El clínker de cemento Portland se fabrica cociendo una mezcla de piedra caliza, cuarzo, arcilla y hierro a una temperatura de aproximadamente 1450 °C en un horno rotatorio de proporciones apropiadas y homogeneizada, proceso que consume grandes cantidades de combustibles para generar la energía térmica requerida (Ana Gabriela Flores Huilcapi et al., 2020).

El clínker de cemento portland se obtiene por sinterización de una mezcla homogénea de materias primas: caliza, arcilla, arena, compuestos de hierro y otros componentes en proporciones definidas (crudo, pasta o harina) conteniendo elementos, normalmente expresados en forma de óxidos, CaO, SiO2, Al2O3, Fe2O3 y pequeñas cantidades de otras materias. Esta mezcla se calienta hasta llegar a los rangos de la temperatura de sinterización y se forman nuevos compuestos. El clínker de cemento portland es un material hidráulico que debe estar constituido al menos en dos tercios de su masa por silicatos de calcio [3CaO.SiO2] y [2CaO.SiO2], estando constituido el resto por fases del clínker conteniendo aluminio, hierro y por otros compuestos. La relación en masa (CaO)/(SiO2) no será menor de 2,0 y el contenido de óxido de magnesio (MgO) no excederá del 5,0 % en masa (Miguel Ángel Sanjuán Barbudo & Servando Chinchón Yepes, 2014).

Aproximadamente a los 900°C el carbonato de calcio se disocia en óxido de calcio y en dióxido de carbono, luego ingresa al horno donde el óxido de calcio, procede a reaccionar con los otros componentes para formar la fase liquida y formación de silicato bicálcico (2CaO.SiO2) denominada Belita, su fórmula simplificada (C2S) y posteriormente la formación de (3CaO·SiO2) silicato tricálcico, denominado también alita con su fórmula abreviada (C3S), a

temperaturas de hasta 1450°C; a estas reacciones se denominan sinterización. Los productos de la reacción salen del horno como un material nodular negro, denominado clínker (Plilip A Alsop, 2019).

Las principales fases en el clínker son: alita (C3S), belita (C2S), celita (C3A) y ferrita (C4AF), además, pueden estar presentes cristales de cal libre, periclasa y sulfatos alcalinos, entre otros. Las proporciones, la cristalinidad y la textura de estas fases minerales en el clínker, controlan propiedades tan importantes en el cemento como: fraguado, calor de hidratación, reactividad y desarrollo de resistencias. De ahí la importancia de cuantificarlas con precisión para así evitar que el producto tenga que ser producido reiteradamente y con ello impedir la extracción de recursos no renovables, elevando el consumo de energía y emisiones de gases contaminantes (Carlos Alberto Alvarez Bravo et al., 2017).

El clínker finalmente se muele con un porcentaje de yeso (para controlar la tasa de hidratación y tiempos de fraguado) produciendo un producto fino denominado cemento, que al mezclar con arena, grava, piedra más agua, e hidratarse forma un material plástico que fragua y se endurece hasta convertirse en un material similar a una roca (Philip A Alsop, 2019) .

Como etapa final se tiene el proceso de envasado y despacho, donde se embolsa en sus diferentes presentaciones para la venta en el mercado, en cada una de estas etapas se realiza un control exhaustivo de las propiedades químicas y físicas de los materiales para obtener un producto con estándares de calidad que exige la normativa vigente para su comercialización.

2.1.2 Descripción de aspectos generales del clínker y sus componentes

La composición del clínker obtenido, por tanto, del cemento, varía de una planta a otra debido a la composición y a la mineralogía de las materias primas disponibles, además por las condiciones y características del proceso de clinkerización en general de cada planta. Los cuatro óxidos principales que reaccionan para la obtención del Clinker son: el óxido de calcio de carácter básico y los otros como dióxido de silicio “sílice”, trióxido de aluminio “alúmina”, trióxido de hierro, sulfato de calcio “yeso” de carácter ácido; de ellos, la sílice y la cal son los componentes activos, la alúmina y el hierro actúan como fundentes, los compuestos

mayoritarios son los silicatos, que suman del 60% al 80% del total, siendo los responsables de las resistencias mecánicas del cemento (Universidad de Coruña & Cementos, 2001).

Tabla 2-1

Componentes requeridos en la materia prima para la producción de clínker.

Descripción	Formula	Abreviación	Rango (%)
Óxido de Calcio “Cal”,	(CaO)	C	60 - 69%
Óxido de Silicio “Sílice”	(SiO2)	S	18 - 24%
Óxido de Aluminio “Alúmina”,	(Al2O3)	A	4 -8%
Óxido de Hierro	(Fe2O3)	F	1 -8%

Nota. Adaptado del trabajo de grado *Modelamiento Termodinámico del Proceso de Clinkerización* (Yuri Esther Estrella Condezo, 2017).

Para simplificar la descripción de la composición química, en la industria cementera adoptó un tipo de taquigrafía para los cuatro óxidos que son: (C, S, A y F) como se ve en la Tabla 2-1.

Los aspectos fundamentales que influyen en la obtención de un buen Clinker son: la composición química, la finura de la harina cruda, la homogeneidad de la harina, y en la parte operática, la velocidad del horno, la temperatura y velocidad de los gases, la velocidad de alimentación del material, la velocidad de enfriamiento, estos parámetros son los que definen las características mineralógicas y la composición química del Clinker (FLSmidth & HGP, 2015).

En la Tabla 2-2 se describen las características y propiedades generales de los componentes presentes en el clínker, como: su fórmula del compuesto, el porcentaje presente en el clínker, la velocidad y calor de hidratación, resistencia, y estabilidad química.

Tabla 2-2

Compuestos del clínker y sus características.

Descripción	Formula	Porcentaje (%)	Velocidad de Hidratación	Calor de hidratación	Resistencia	Estabilidad Química
C3S (Alita)	$3CaOSiO_2$	35 - 70	Rápido	Alto (120 cal/gr)	inicial: muy alta final: alta	buena
C2S (Belita)	$2CaOSiO_2$	10 - 35	Lento	Bajo (60 cal/gr)	Inicial: media final: alta	Muy buena
C3A	$3CaOAl_2O_3$	0 – 15	Muy Rápido	Muy alto (207 cal/gr)	Inicial: alta Final: baja	mala
C4AF (Celita)	$4CaOAl_2O_3 Fe_2O_3$	5 – 20	Lento	medio (100cal/gr)	Inicial: baja Final: Baja	buena
C (Cal libre)	CaO	<2		muy alto		
M (Magnesio)	MgO	<5	Lento	Medio		
N y K (Álcalis)	$4CaOAl_2O_3 Fe_2O_3$	<0,6	Muy Rápido	Muy alto		
CA (Aluminato de calcio)	$CaAl_2O_4$	-	Rápido	alto		

Nota. Adaptado de presentación de *Cementos* (Universidad de Coruña & Cementos, 2001).

2.1.3 Importancia y demanda energética del piroproceso en la industria del cemento

Los hornos son equipos que poseen cuatro funciones, la de reactor químico, de generador e intercambiador de calor, de transportador de gases y sólidos, por tanto, son los principales consumidores de energía térmica. La combustión en los hornos de cemento es de mayor importancia, por cuanto influye directa e indirectamente en aspectos técnicos y económicos, tales como el costo del combustible, la duración del refractario, la calidad de clínker, entre otros. (Jenny Maritza Rincón Taboada, 2009).

El piroproceso es el que tiene un consumo intensivo de energía, al ser el Clinker el componente principal y mayoritario para la elaboración de cemento, la necesidad de energía térmica para la producción del clínker es el 90% de la energía total (Fernández & Oficemen, 2021).

Tabla 2-3

Detalle de las etapas y temperaturas en el proceso de clinkerización.

Etapa	Descripción	Rango de Temperatura	Velocidad
1	Evaporación de H2O libre	20 - 100 °C	Rápido
2	Se expele agua físicamente absorbida	100 - 300 °C	Rápido
3	Cambios de estructura en los minerales silíceos	> 500°C	Rápido
4	Remueve agua ligada químicamente (H2O y grupos OH) de los minerales de la arcilla	400 - 900 °C	Rápido
5	Disociación de carbonatos (Descarbonatación)	600 - 900°C	Rápido
6	Formación de belita, productos intermedios, aluminatos y ferritos	>800°C	Lento
7	Formación de la fase líquida (aluminatos y ferritos se funden)	1250 °C	Rápido
8	Formación de alita	1250 °C	Lento
9	Se completan las reacciones y se recristalizan alita y belita	~1450°C	Moderado

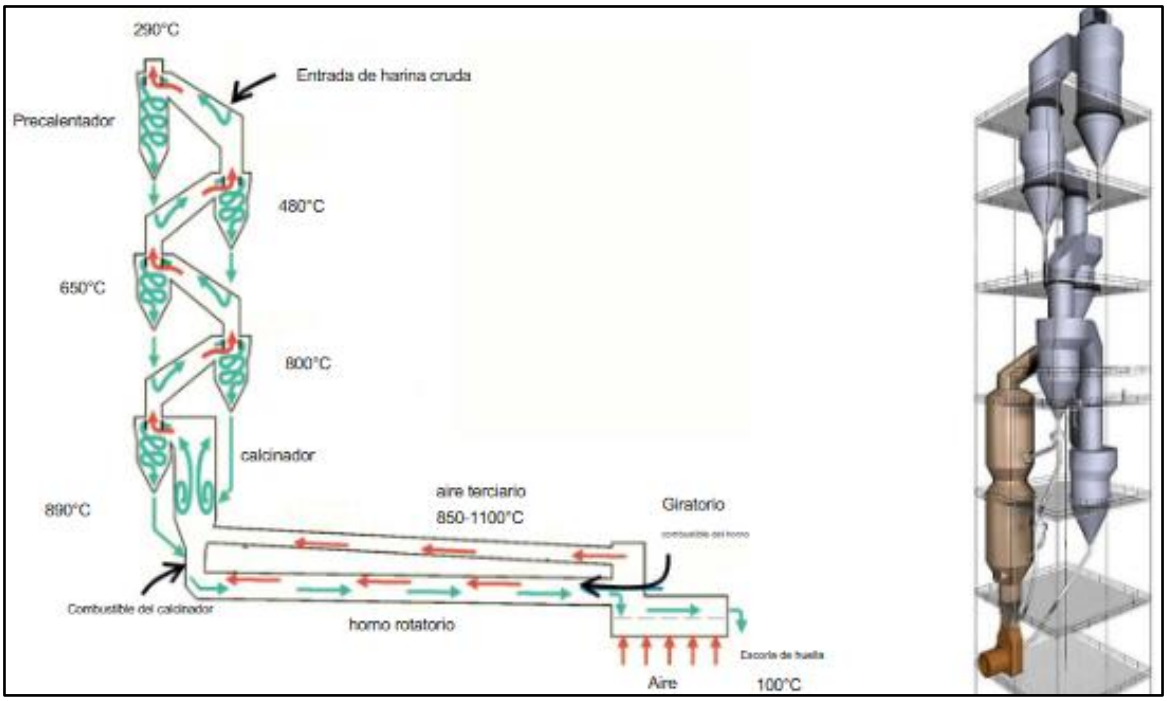
Etapa	Descripción	Rango de Temperatura	Velocidad
10	Cristalización de la fase líquida	1300 - 1240 °C	Rápido
11	Enfriamiento de los nódulos de clínker	1200 a 80°C	Moderado

Nota. Obtenido de articulo de *Cocción de Cemento* (Holcim, 2001).

Actualmente para llevar a cabo el piroproceso, se cuenta con una torre de ciclones, donde se lleva a cabo las 5 primeras etapas mencionadas en la tabla 2-3, a continuación, en la figura 2-1, se presenta una ilustración donde se detalla la torre de ciclones o de precalentamiento.

Figura 2-1

Torre de ciclones, calcinador y horno.

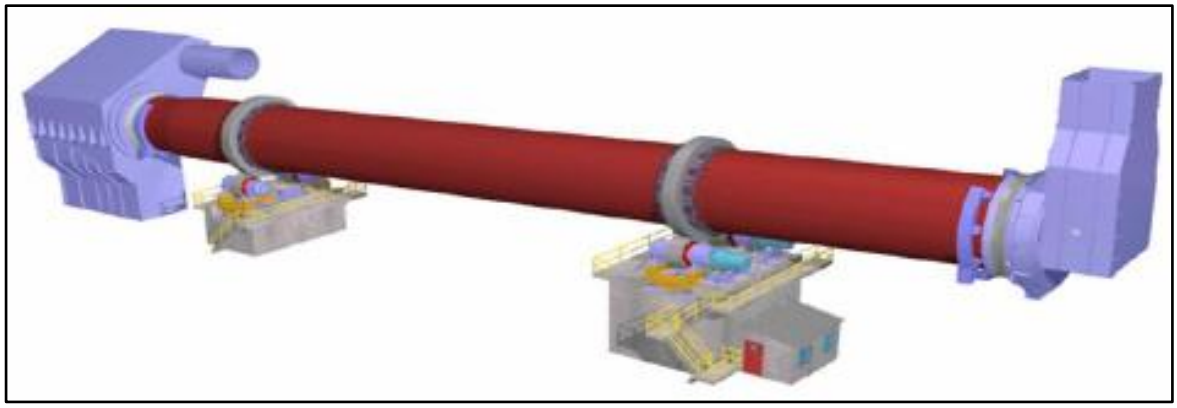


Nota. Obtenido de tesis PhD C*ombustion of Large Solid Fuels in Cement Rotary Kilns* (Anders Rooma Nielsen & FLSmidth, 2012).

En la Figura 2-2 se muestra el horno rotatorio, donde ocurre las reacciones de sinterización para la formación del clínker.

Figura 2-2

Horno De Clinker.



Nota. Obtenido de tesis PhD *Combustion of Large Solid Fuels in Cement Rotary Kilns* (Anders Rooma Nielsen & FLSmidth, 2012).

En la actualidad, el contar con un calcinador en línea y un sistema de Bypass, lo vuelve más eficiente el proceso, llegando a un consumo energético de hasta 750 Kcal/kg de clínker, en hornos mayores a 2000 ton/día en funcionamiento normal, la distribución del consumo de combustible en hornos con calcinador aproximadamente es de 60% en el precalentador calcinador y 40% en el quemador principal del horno rotatorio, que es el caso, en dos de las tres líneas de producción de FANCESA.

Los costos energéticos del combustible y energía eléctrica representan entre 30 y un 40 % de los costes de fabricación del cemento, por lo que la reducción del consumo de energía y la diversificación de las fuentes energéticas se convierte en un asunto de máxima importancia para la competitividad de las empresas cementeras (Diana Carolina Cedano de León, 2012).

2.1.4 Combustibles tradicionales usados los hornos de la industria cementera

Para generar la energía térmica requerida para el proceso de producción de clínker, se emplean diversos combustibles, la elección depende de la disponibilidad local, en orden de importancia en Europa son: Coque de petróleo o carbón pulverizado (carbones bituminosos y lignitos), Fuelóleo pesado, valorización de residuos, Gas natural. (Miguel Ángel Sanjuán Barbudo & Servando Chinchón Yepes, 2014).

Para tener una combustión apropiada en los quemadores, tanto del calcinador como del quemador principal, se debe contar con una mezcla correcta aire y combustible, para esto el diseño del quemador deberá proporcionar las condiciones más adecuadas, el objetivo principal de la mezcla es lograr el máximo contacto superficial entre oxígeno y combustible. El estado físico del combustible determina las condiciones operativas que permitan preparar el combustible (pulverización, atomización, vaporización) en el caso de sólidos y líquidos (Percy Castillo Niera, 2000).

En el caso de Bolivia, en diferentes industrias y específicamente en la fábrica de cemento FANCESA, se usa el gas natural como único combustible para generar energía térmica en el piroproceso en los tres hornos, por la accesibilidad y el costo.

2.1.5 Características físico químicas de los combustibles convencionales usados en la industria

En la reacción de combustión para la liberación de energía térmica, los combustibles se disocian en sus componentes como: el hidrógeno, en estado gaseoso, y en partículas de carbón antes de quemarse, la combustión es la liberación de energía en forma de luz y calor, producido por oxidación del Hidrógeno y el Carbono (Percy Castillo Niera, 2000).

Uno de los factores primordiales para la operación y el control del proceso de producción de clínker, es atribuible al combustible y tipo de llama, tanto en el quemador principal del horno como en los quemadores del calcinador.

Tabla 2-4

Características de los combustibles convencionales.

Combustible	Estado	Poder Calorífico	Unidad
Alcohol 96%	Liquido	7170	
Antracita	Solido	7768-8126	
Carbón bituminoso	Solido	4063-5557	Kcal/Kg
Butano	Gaseoso	11833	
Carbón	Solido	8145	

Combustible	Estado	Poder Calorífico	Unidad
Diesel	Liquido	10708	
Gasolina	Liquido	11305	
Hidrogeno	Gaseoso	33889	
Aceites vegetales	Liquido	9321-11472	
Petróleo	Liquido	10277	
Madera seca	Solido	3442-4159	
Gas natural	Gaseoso	9200-10277	
Gasóleo	Liquido	9082	
Queroseno	Liquido	8365	Kcal/L
Combustibles de aceite pesado	Liquido	9847	

Nota. Datos obtenidos del libro *Manual on Thermal Energy Efficiency in Cement Industry* (G. Jayaraman, 2012).

2.1.5.1 Estado físico de los combustibles

El estado en el que se encuentran los combustibles en condiciones normales de temperatura y presión, como ser, sólido, líquido o gaseoso, influye significativamente en el transporte, almacenamiento, manipulación y sobre todo en la eficiencia de recuperación energética al momento de la combustión.

Combustibles gaseosos: ingresan en esta clasificación el metano, etano, propano, acetileno, hidrogeno, etc. Por nombrar los más comunes, estos combustibles son más simples de usar por la facilidad para el transporte, la instrumentación y equipamiento requerido, para su manipulación, además por la propiedad para mezclarse con el comburente al encontrarse en el mismo estado.

Combustibles líquidos: como ejemplo se puede nombrar al petróleo y sus derivados, los aceites, estos son usados con mayor frecuencia que los combustibles gaseosos en la industria cementera a nivel mundial, para su combustión se requiere la presencia de partículas finas que quemen a mayor velocidad, para lo cual son atomizados o dispersados.

Combustibles sólidos: para el uso en la industria por lo general deben ser sometidos a un acondicionamiento previo para obtener el tamaño, finura y la homogeneidad adecuada, para la combustión son pulverizados como en el caso de los líquidos, pero antes de combustionar, ocurren reacciones previas de pirólisis, donde los polímeros se fraccionan en moléculas que pasan al estado gaseoso y posteriormente ocurre la reacción de combustión.

Los carbones minerales representan los combustibles más utilizados en los hornos cementeros, por la disponibilidad en el mercado internacional. La mejor y la forma más práctica de clasificar los carbones minerales es en función de su contenido de volátiles como ser: **Antracitas,** son carbones que tienen de 0 - 10% de volátiles muy desgasificados, al tener menos volátiles se dificulta su velocidad de combustión, debiendo molerse muy fino (menos de 10 micras), el Pet Coque puede ser considerado una antracita artificial. **Hullas o Bituminosos**, carbones que cuentan con 10 – 30% de volátiles, utilizados por excelencia en los hornos cementeros debido a que sus volátiles que facilitan su combustión, no requiriendo una molienda muy fina. **Lignitos,** carbones que contienen más de 30% de volátiles, lo que les proporciona menores valores de poder calorífico. En el caso de los carbones, el tamaño de partícula para la combustión óptima, se determina de acuerdo a la operación de molienda, almacenamiento, transporte e inyección al quemador (Percy Castillo Niera, 2000).

2.1.6 Aplicación de los combustibles alternativos en la industria del cemento

El uso de alternativas a los combustibles fósiles ha aumentado rápidamente en la producción de cemento en las últimas décadas, debido a la necesidad de encontrar formas responsables de deshacerse de estos materiales y debido a su ventaja económica. La selección de los combustibles alternativos requiere una consideración cuidadosa por el potencial impacto en las emisiones ambientales, los procedimientos operativos, el aporte energético, también en cuestiones relacionadas a salud y seguridad de los operadores y la sociedad, así como el cumplimiento de las regulaciones pertinentes (GCP Applied Technologies, 2021).

Las alternativas comunes al carbón, el petróleo o el gas incluyen: Aceites lubricantes usados, Hidrocarburos clorados, Disolventes, Plásticos, Neumáticos usados, Combustibles derivados de residuos, Lodos de depuradoras, Harina de huesos de animales, Cáscaras de arroz, Residuos de madera por mencionar los más comunes. El combustible usado en el piroproceso representa

aproximadamente el 25% de los costos de producción del clínker, y los combustibles fósiles cuestan alrededor de 100 $us/t. Los combustibles alternativos a menudo cuestan mucho menos e incluso pueden existir a una tarifa de entrada de costo cero (GCP Applied Technologies, 2021).

El consumo de combustible representa una fracción significativa de los costos totales de producción de clínker, lo que hace atractivo para los productores de cemento considerar combustibles sustitutos más baratos, sin embargo, la industria cementera tiene ciertos requisitos con respecto a los combustibles alternativos, siendo los más importantes, el costo, la disponibilidad, la legislación, la factibilidad técnica para el transporte, manipulación y combustión, el contenido de agua, las emisiones, el contenido de componentes menores no deseados, y lo principal la capacidad energética del combustible alternativo (Anders Rooma Nielsen & FLSmidth, 2012).

La valorización energética de residuos, que consiste en el empleo de combustibles alternativos en la industria del cemento, es una práctica rutinaria en la mayoría de los países desarrollados desde hace más de treinta años, entre los que se destacan por el nivel de sustitución con residuos son: Japón, Suiza, Estados Unidos, Bélgica, Alemania y Francia. Las fábricas de cemento ofrecen una alternativa óptima para la gestión de residuos, ya que el proceso productivo permite reciclar y valorizar energéticamente distintos tipos de residuos, en condiciones técnicas adecuadas que no suponen un riesgo para la salud de los trabajadores. En la mayoría de los casos los residuos son sometidos a un tratamiento previo antes de ser utilizados como combustibles alternativos en las fábricas de cemento. La valorización de residuos supuso un 22,4% de sustitución en energía respecto al consumo total de combustibles en cementeras españolas en 2011, todavía lejos del 30% alcanzado en Europa en el año 2010, pero por encima del valor medio europeo del 13% del año 2000 (Miguel Ángel Sanjuán Barbudo & Servando Chinchón Yepes, 2014).

2.1.7 Características de los residuos aptos para combustibles alternativos

Para la selección de residuos aptos como combustibles alternativos para su uso en hornos de producción de clínker, se sigue varios criterios como ser: la composición química, poder calorífico, contenido de humedad, factores técnicos y aspectos ambientales, costo de adquisición, entre otros, para denominarse combustibles alternativos los residuos deben pasar

por un proceso de acondicionamiento, lo cual garantiza una integración óptima en el proceso, maximizando así los beneficios operativos, económicos y medioambientales de esta práctica sostenible. Los combustibles de sustitución deben estar libres de sustancias contaminantes (por ejemplo, metales, piedras o vidrio), que puedan causar problemas durante la alimentación, en la estabilidad de la operación o en la calidad del clínker (Lechtenberg & Hansjörg, 2017).

Tabla 2-5

Características y tipos de residuos comunes.

Origen	Ejemplo De Materiales
Residuos no peligrosos de alto poder calorífico (> 18 MJ/kg) >4300Kcal/kg.	Neumáticos viejos, residuos plásticos, textiles viejos, Harina de huesos, grasa animal, fracciones de residuos municipales y comerciales, aceites usados, disolventes.
Residuos sólidos no peligrosos Con poder calorífico medio (1118 MJ/kg): 2630 a 4300 Kcal/kg.	Residuos de pulpa, papel usado, cartón usado, biomasa, Madera residual, fracciones de residuos municipales y comerciales, lodos de depuradora municipales secos, lodos de aceite.
Residuos sólidos no peligrosos De bajo poder calorífico (<11 MJ/kg) <2630Kcal/kg.	Lodos de depuradora deshidratados (pre secos), lodos de aceite con alto contenido de agua, residuos orgánicos.
Residuos sólidos, peligrosos.	Lodos y restos de pintura, barnices, material filtrante contaminado o adsorbentes con sustancias peligrosas, restos contaminados, tierras para blanquear, fieltro para tejados, alquitrán ácido, filtros de aceite halogenados, residuos de polvo de revestimiento, disolventes halogenados, lodos de depuradora industriales y residuos que contengas elementos cancerígenos o tóxicos, entre otras cosas.

Nota. Adaptado del libro *Coincineración de Residuos en Plantas de Cemento* (Barbara Zeschman Lahi, 2020).

2.1.8 Criterios técnicos para el uso de combustibles alternativos en hornos de la industria cementera

Se tiene antecedentes de la valorización energética de diferentes tipos de residuos en hornos de la industria cementera, convirtiéndose en una práctica cotidiana desempeñada en los países desarrollados.

Actualmente existen varias empresas a nivel mundial que son especialistas en calculo, diseño, construcción, modificación e instalación de sistemas para el uso de CDR, para el proceso de producción de cemento. El desempeño adecuado de los CDR, depende de la eficiencia y calidad de los sistemas de pre acondicionamiento y manejo de residuos, que incluyen las técnicas de clasificación, trituración, secado, premezcla, trasporte e inyección para la combustión. También es un factor crucial para el éxito de la operación de adición de combustibles alternativos, la capacidad del operador del horno, para adaptarse a la variabilidad en la composición de los residuos, además, es indispensable evaluar y optimizar el proceso de combustión, así como los sistemas de control de emisiones para garantizar la seguridad y la sostenibilidad ambiental, la selección y aplicación de estos criterios técnicos son esenciales para el éxito de la valorización de residuos en los hornos en la industria cementera.

Se tiene varias ubicaciones factibles técnicamente para la adición de los combustibles de desecho, como ser: la combustión primaria en el quemador principal del horno, la combustión secundaria en el calcinador, en la entrada al horno, en la entrada del calcinador, en el ducto de aire terciario. El punto de adición adecuado para cada residuo depende de su inflamabilidad, su composición, su tamaño y otros aspectos. En las plantas de cemento alemanas, por ejemplo, los neumáticos viejos que no han sido triturados solo se introducen en la entrada del horno (Barbara Zeschman Lahi, 2020).

Tabla 2-6

Poder calorífico de combustibles alternativos.

Combustibles Alternativos	PCI (Kcal/Kg)
Biomasa en general	3382-4500
Pallets de madera humedad <15%	4319

Combustibles Alternativos	PCI (Kcal/Kg)
Neumáticos llantas viejas	7423-10080
Plásticos	7834
Papel y cartón	4550
Aceites vegetales usados	9321-11472
Pulpa, papel, cartulinas	2000
Residuos de la industria textil	7170
Harina y grasas animales	4302
Madera	3350
Aceite mineral usado	3218
CDR	4786
Residuos textiles	4355

Nota. Adaptado del libro *Coincineración de Residuos en Plantas de Cemento* (Barbara Zeschman Lahi, 2020),(Jesica Bañuelos Garcìa, 2016).

2.1.9 Límites recomendados de compuestos no deseados

Con la experiencia de las diferentes plantas cementeras a nivel mundial, se maneja los siguientes limites, tanto para optimizar la operación, así también para cumplir normativas.

Los límites máximos de compuestos organohalogenados está entre el 1% y 2%, se limita el cloro entre un 0,1% a 2%, según condiciones de operación, porque genera problemas de adhesión en conductos, se limita el flúor a 0,2% a 1%, los límites del azufre oscila entre 1 a 6% por que en exceso genera taponamiento de ciclones, el límite del mercurio se encuentra en 10 ppm por temas de salud, se limita los policlorobifenilos y policloroterfenilos de 10 a 50 ppm, en algunos casos se tiene limitaciones para los metales pesados (Jesica Bañuelos García, 2016).

2.2 MARCO CONTEXTUAL

2.2.1 Contexto internacional de aplicación de combustibles alternativos en industrias cementeras

Varias plantas a nivel mundial implementaron un programa para el uso de combustibles alternativos, el cual consiste en la recepción, el almacenamiento temporal, la trituración, la mezcla de residuos para formular un combustible alternativo homogéneo, y la dosificación del mismo para su reciclaje energético en las unidades de piroproceso principalmente en la calcinación de las plantas de cemento.

Los países de la Unión Europea que se destacan por el uso de combustibles alternativos son; Holanda, Suiza, Australia, Alemania, con porcentajes de sustitución superiores al 50%, Francia en torno al 40 %, España con un 55% (Alfonso López Días et al., 2012).

Los beneficios de dicha práctica están enfocados en tres principales lineamientos, el aprovechamiento de residuos a través de su reciclaje energético, sustitución de combustibles fósiles con combustibles alternos formulados a partir de residuos, contribuyendo a la preservación de los recursos no renovables y a la reducción de costos, y lo principal reducir la contaminación de suelos, aire y agua; ocasionados por exposición y manejo inadecuado de residuos (Arturo, 2020).

2.2.1.1 Planta de Cemento Cruz Azul

La planta Cruz Azul ubicada en Hidalgo en México, implementó el desarrollo y gestión de nuevas tecnologías y procesos en materia ambiental, como una de las principales misiones para preservar los recursos no renovables. Durante 2018, Cruz Azul procesó 3339 toneladas de llantas de desecho, 17 997 toneladas de residuos de manejo especial, 6927 toneladas de residuos peligrosos y 1558 toneladas de combustible alterno líquido, lo que representa una sustitución del 9,44% de combustibles fósiles por combustibles alternos. Asimismo, ingresaron al proceso 3738 toneladas de tierras contaminadas y/o lodos con hidrocarburos, en total, durante 16 años en la Planta de Cruz Azul, Hidalgo, la cantidad de Combustibles Alternos Coprocesados ha sido de 456 350 toneladas dentro de los hornos cementeros, generando ahorros y reduciendo el consumo de combustibles fósiles (Arturo, 2020).

2.2.1.2 Fábrica de Cemento de Sant Vicenç Dels Horts, de Ciments Molins Industrial en Barcelona

Adopto buenas prácticas para el manejo seguro de combustibles alternativos en sus fábricas de cemento, proyecto pilotado implementado por la Fundación Laboral del Cemento y el Medio Ambiente "CEMA", financiado por la Fundación Estatal para la Prevención de Riesgos Laborales. El gerente de la fundación CEMA, Dimas Vallina, expreso que en los próximos años se tendrá un incremento muy significativo en la utilización de combustibles derivados de residuos en la industria cementera, por tal motivo la decisión de realizar una campaña informativa, para todos los trabajadores del sector, sobre los riesgos laborales asociados al almacenamiento y manipulación de estos combustibles alternativos, con especial atención a riesgos biológicos. (*Una guía para la gestión segura de combustibles derivados de residuos en cementeras,* 2018).

2.2.1.3 Grupo CEMEX

CEMEX se convirtió en el líder en el uso de combustibles alternos en la industria del cemento, sustituyendo combustibles tradicionales, como el coque de petróleo y el carbón, con otros que tienen un factor de emisión CO_2 más bajo, o algunos que son incluso considerados neutros, como los residuos de biomasa. Al cierre del 2014, el 94 % de sus plantas de cemento utilizaban combustibles alternos, con lo que se evitó el uso de 2,2 millones de toneladas de carbón. Estos esfuerzos han llevado a CEMEX a ser reconocida como la empresa del año con el premio Global Cemfuels Award for Alternative Fuels-Using por cuatro años consecutivos. En 2013, CEMEX inicio una colaboración con Earth Engineering Center de Columbia University y con The City College de Nueva York, para llevar a cabo un estudio sobre los efectos del uso de los combustibles alternos en la fabricación de cemento. El estudio se enfocó en sus tecnologías de combustión de residuos. Finalizado en 2014, el estudio concluyó que el uso de combustibles derivados de residuos sólidos municipales "CDR" en la producción de cemento no tiene un impacto adverso en el proceso de producción de cemento ni en la calidad del producto. De hecho, reduce las emisiones de gases efecto invernadero en hasta tres toneladas de CO_2 por tonelada de CDR utilizados en lugar de carbón de alta calidad. CEMEX lleva realizando avances

en la eficiencia, así aliviar los problemas sociales, económicos y ambientales asociados con la gestión de residuos por parte de los municipios (CEMEX & Jorge Luis Pérez, 2023).

2.2.1.4 Grupo HOLCIM

Durante 2017 y 2018, la tasa de sustitución térmica (TSR), es decir, el porcentaje de la energía térmica procedente de combustibles alternativos como disolventes, aceites, CDR, harinas animales, lodos secos de depuradora, neumáticos, fue de un 38% y 31%, respectivamente en sus plantas de España, en total se co-procesaron 112.602 toneladas de Combustible Derivado de Residuos (CDR) (58.126 y 54.476 toneladas respectivamente), que de otra manera hubieran terminado en vertederos, en ríos o el mar. Desde LafargeHolcim actualmente sigue trabajando en intentar incrementar esta tasa de sustitución de CDR y contribuir así positivamente a la obtención de los objetivos en materia de economía circular y cambio climático, paralelamente también contribuye a paliar el problema de la presencia de plásticos en nuestros mares mediante el co-procesamiento de CDR, combustible constituido por un alto porcentaje de plásticos no reutilizables ni reciclables (HOLCIM España, 2019).

2.2.1.5 Grupo VOTORANTIM

El objetivo de Votorantim Cimentos es alcanzar un 53% de sustitución térmica, porcentaje de energía procedente de combustibles alternativos a los fósiles, y reducir el factor de clínker al 68% en 2030. A largo plazo, la empresa se planteó desarrollar y aplicar tecnologías que le permitan ofrecer a la sociedad un hormigón neutro en carbono para 2050. En 2022, la empresa utilizó 1,3 millones de toneladas de residuos y biomasa en sus operaciones.

Figura 2-3

Mezcla de residuos para la adición como combustibles alternativos

Nota. Obtenida de la página web (CADECOCRUZ, 2023).

En la figura 2-3, se muestra una pila de combustibles derivados de residuos, triturados y homogenizados, listos para su uso como combustible.

2.2.2 Legislación para la disposición de residuos

Actualmente en Bolivia se cuenta con la Ley N° 755, del 28 de octubre de 2015 De Gestión Integral de Residuos, donde en el Artículo 26. (GESTIÓN OPERATIVA DE LOS RESIDUOS), indica los lineamientos a seguir para la gestión de los residuos, como ser: Separación, Recolección, Transporte, Almacenamiento, Tratamiento y Disposición final. se apoya en normativas y procedimientos ya establecidos y aprobado, aspectos que se muestran gráficamente en la figura 2-4.

De acuerdo a lo estipulado en la Ley N° 755 DE GESTION INTEGRAL DE RESIDUOS que actualmente se encuentran vigente, en su Artículo 30. Tratamiento, IV. “El tratamiento de los residuos podrá incluir procesos biológicos, mecánicos físico-químicos o térmicos, orientados a maximizar su aprovechamiento para fines de su valorización”.(Normativa de Residuos Sólidos, 2015).

Figura 2-4

Lineamientos recomendados para la gestión de residuos.

Nota. Obtenido del *Reglamento para el Coprocesamiento de Residuos* Dirección General de Gestión Integral de Residuos MMAA.

2.2.3 Residuos prohibidos para su coprocesamiento y recuperación energética

Por los riesgos asociados y sus características físico-químicas, no se aprueba el coprocesamiento de:

a) **Residuos radioactivos o nucleares.**
b) **Residuos eléctricos y electrónicos.**
c) **Baterías enteras.**
d) **Explosivos.**
e) **Residuos que contengan cianuro.**
f) **Residuos que contengan amianto (asbesto).**
g) **Armas químicas y biológicas destinadas a su destrucción.**
h) **Residuos que contengan mercurio o estén contaminados con él.**
i) **Residuos de composición desconocida.**

j) **Residuos corrosivos (pH <2 o pH > 12,5), incluidos los ácidos minerales sin neutralizar.**

k) **Residuos que contengan PCBs.**

2.2.4 Normativas nacionales para la incineración de residuos

Para la medición y análisis se cuenta también con las Norma Boliviana NB 742-760 DE RESIDUOS SÓLIDOS de noviembre de 1996, dicha normativa abarca los puntos descritos en la tabla siguiente.

Tabla 2-7

Normativa y temática que abarca.

Normativa	Descripción
NB 742 Residuos Sólidos	Terminología sobre residuos sólidos y peligrosos.
NB 743 Residuos Sólidos	Determinación de parámetros de diseño sobre residuos sólidos municipales.
NB 744 Residuos Sólidos	Preparación de muestras para su análisis en laboratorio.
NB 745 Residuos Sólidos	Determinación de humedad.
NB 746 Residuos Sólidos	Determinación de cenizas.
NB 747 Residuos Sólidos	Determinación del pH - Método del potenciómetro.
NB 748 Residuos Sólidos	Determinación del nitrógeno total.
NB 749 Residuos Sólidos	Determinación de azufre.
NB 750 Residuos Sólidos	Determinación del poder calorífico superior.
NB 751 Residuos Sólidos	Determinación de materia orgánica.
NB 752 Residuos Sólidos	Determinación de relación carbono-nitrógeno.
NB 753 Residuos Sólidos	Prueba de extracción para determinar los constituyentes que hacen un residuo peligroso por su toxicidad al ambiente.
NB 754 Residuos Sólidos	Procedimiento para determinar la incompatibilidad entre dos o más residuos sólidos considerados peligrosos.
NB 755 Residuos Sólidos	Requisitos que deben cumplir los papeleros para su diseño y ubicación.

Normativa	Descripción
NB 756 Residuos Sólidos	Requisitos que deben cumplir los recipientes para el almacenamiento.
NB 757 Medio Ambiente	Características que deben reunir los sitios para ubicar Sistemas de disposición final de residuos sólidos municipales.
NB 758 Medio Ambiente	Características, listados y definición de los residuos peligrosos y de bajo riesgo.
NB 759 Medio Ambiente	Características que deben reunir los sitios destinados al Confinamiento de residuos peligrosos (excepto para residuos radiactivos).
NB 760 Medio Ambiente	Requisitos para el diseño, construcción, operación y monitoreo de un relleno sanitario.

Nota. Obtenido de la Norma Boliviana NB 742-760 (Normativa De Residuos Sólidos, 2015).

En el decreto supremo No. 26736 Reglamento Ambiental Para El Sector Industrial Manufacturero -RASIM-, en la pg. 60-61en el artículo 66 y 67 describe textual.

"ARTÍCULO 66. (Esfuerzos).- La industria es responsable de la prevención y control de la contaminación que generen sus emisiones, debiendo realizar esfuerzos en: a) La sustitución de combustibles, por otros que minimicen la generación de emisiones de material particulado y Dióxido de azufre (SO2); b) La optimización de sus operaciones y procesos además del adecuado mantenimiento de sus equipos; c) La captura y conducción adecuada de sus emisiones fugitivas; d) El aislamiento de fuentes de ruidos y radiaciones, y tratamiento de olores; e) Agotar medidas de producción más limpia antes de incorporar sistemas correctivos de contaminación" (RASIM, 2002).

ARTÍCULO 67. (Control priorizado). - La industria priorizará en el control de sus emisiones de las siguientes sustancias: Monóxido de carbono (CO), Dióxido de azufre (SO2), Óxidos de nitrógeno (NOX), Partículas menores a 10 micras (PM10), Partículas Suspendidas Totales (PST), Compuestos Orgánicos Volátiles (COV), Sustancias Agotadoras del Ozono (SAO), Dióxido de carbono (CO2). El control de estas emisiones deberá reflejarse en los Planes de

Manejo Ambiental, en los Informes Ambientales Anuales y en la renovación del formulario RAI.

ARTÍCULO 68. (Límites permisibles). - La industria debe cumplir con los límites permisibles de emisión de contaminantes establecidos en el Anexo 12-A, lo que no implica que deberá auto monitorear todos los parámetros contemplados en este Anexo (RASIM, 2002).

De acuerdo a la normativa de los artículos descritos, en el anexo 12-A del RASIM, provee parámetros de emisión de gases de combustión que se adecuan al proceso de recuperación energética de los residuos en los hornos de clínker de una industria cementera.

2.2.5 Normativa para emisiones de combustión de sólidos, líquidos y gases

Según el anexo 12-A del RASIM, los límites establecidos para todas las emisiones del material particulado originados por combustión deberán ser cuantificados en cuanto a su cantidad y composición, conforme a lo establecido en la norma ISO 9096/92. El límite máximo de emisión de Unidad Industrial, será la suma de las emisiones puntuales generadas por una industria dadas en flujo másico (kg/hr) de acuerdo con el área bruta del predio (m2), las cuales no podrán superar los valores establecidos en la siguiente tabla 2-8 (RASIM ANEXO 12-A LÍMITES PERMISIBLES PARA EMISIONES ATMOSFÉRICAS, 2002).

Tabla 2-8

Límite máximo de emisión por industria

Contaminante	**Máxima Emisión Por Industria (Kg/H/M2)**
Partículas suspendidas totales - PST	2,34x10-3
Óxidos de nitrógeno - NOx	4.60 x10-4
Óxidos de azufre – Sox	2.50 x10-3

Nota. Obtenido de (RASIM ANEXO 12-A LÍMITES PERMISIBLES PARA EMISIONES ATMOSFÉRICAS, 2002).

2.2.5.1 Límites permisibles de emisión de contaminantes de la combustión

Como Norma de emisión para fuentes de combustión externa a partir de combustibles sólidos como leña, turbas, lignitos, hullas, antracita, carbón mineral, coque, carbón vegetal, asfalto y brea, al interior del perímetro, así mismo de emisión para fuentes de combustión externa a partir de combustibles líquidos, no se podrán utilizar combustibles con contenidos de azufre mayor al 1,7 % en peso, dentro del perímetro urbano de la ciudad, como combustibles en calderas u hornos de establecimientos de carácter industrial. Para los muestreos en chimenea el valor de referencia para el oxígeno cuando se utilizan combustibles líquidos es de 3 % en volumen. Los metales pesados, el Cloro y Ácido fluorhídrico deben ser auto monitoreados por las industrias que utilicen como combustibles aceites usados o residuales en cualquier proporción son las siguientes (RASIM ANEXO 12-A LÍMITES PERMISIBLES PARA EMISIONES ATMOSFÉRICAS, 2002).

Tabla 2-9

Límite de emisión de combustión externa a partir de combustibles sólidos y líquidos.

Contaminante	Concentración mg/m3 en CN	
	Combustibles Solidos	Combustibles Líquidos
Material particulado - PST	300	300
Monóxido de carbono – CO	300	200
Óxidos de nitrógeno - NO2	400	400
Óxidos de azufre - SO2	600	600
Metales pesados	0,8	4
Ácido clorhídrico – HCl	300	5
Ácido fluorhídrico – HF	30	8

Nota. Obtenido de (RASIM ANEXO 12-A LÍMITES PERMISIBLES PARA EMISIONES ATMOSFÉRICAS, 2002).

Así mismo en el anexo 12-A del RASIM, especifica como norma de emisión para fuentes de combustión externa a partir de combustibles gaseosos que involucra al metano, etano, propano, butano, gas natural, biogás o mezclas de éstos, se muestra en la tabla 2-10.

Tabla 2-10

Norma de emisión de combustión externa a partir de combustibles gaseosos.

Contaminante	**Concentración (mg/m3) en CN**
Material particulado - PST	100
Monóxido de carbono - CO	100
Óxidos de nitrógeno - NO2	350
Óxidos de azufre - SO2	35

Nota. Obtenido de (RASIM ANEXO 12-A LÍMITES PERMISIBLES PARA EMISIONES ATMOSFÉRICAS, 2002).

También se especifica los límites para contaminantes peligrosos a ser considerados en la elaboración de inventarios de emisiones a la atmósfera, dichas sustancias se muestran en la siguiente tabla 2-11 agrupada por clases, el detalle de elementos de cada clase se encuentra en Anexos.

Tabla 2-11

Concentración de emisiones para los diferentes grupos de sustancias

Contaminante	**Flujo Másico**	**Concentración Mg/M3 En CN**
Material particulado - PST	cualquiera	300
Sustancias inorgánicas contenidas en material particulado		
Clase I	1 g/h	0,5
Clase II	5 g/h	4
Clase III	25 g/h	10
Sustancias inorgánicas contenidas en gases ó vapores		
Clase I	10 g/h	5
Clase II	50 g/h	10
Clase III	300 g/h	50
NO2	5 kg/h	400
SO2	5Kg/h	600

Contaminante	Flujo Másico	Concentración Mg/M3 En CN
	Sustancias orgánicas	
Clase I	0,1 kg/h	50
Clase II	2 kg/h	150
Clase III	3 kg/h	200
	Sustancias cancerígenas	
Clase I	0,5 g/h	0,4
Clase II	5 g/h	1,5
Clase III	25 g/h	8

Nota. Obtenido de (RASIM ANEXO 12-A LÍMITES PERMISIBLES PARA EMISIONES ATMOSFÉRICAS, 2002).

Para la etapa de diseño de una planta de cemento las empresas como ThyssenKrupp, Polysius, FLSmidth adoptan como normativa los límites de emisiones reglamentadas en cada región o país, en el caso de Bolivia se adopta los límites de emisiones mostrados en las tablas anteriores.

2.2.6 Sistemas de control de operación en el proceso de producción de cemento

La operación de una planta de cemento actualmente se realiza mediante sistemas de control automatizadas denominado, sistemas SCADA, como ser: ECS/ProcessExpert® en el caso de FLSmidth y sistemas Polcid de Thyssenkrupp Polysius, estos sistemas de control, desempeñan un papel fundamental en la optimización de todo el proceso de producción en la industria del cemento.

Desde una sala de control, un operador monitorea y supervisa los sistemas de interfaz Hombre maquina (SCADA), a través de los cuales regulan de manera precisa y automatizada los parámetros críticos del proceso, como potencias de los motores, presiones de los sistemas, alineamiento de las cintas, temperaturas y vibración de los diferentes equipos, dosificación de materias primas, entre muchos otros parámetros que involucra la planta.

Los sistemas SCADA utilizan algoritmos avanzados y sensores para mantener condiciones óptimas de operación, las variables y los límites de los parámetros de control son programados para garantizar la calidad del producto final, además, proporcionan alertas con anticipación y

permiten una respuesta inmediata ante cualquier posible contingencia, para que el operador tome acciones y controle los parámetros, y en último caso la programación de seguridad ejecuta acciones más óptimas para salvaguardar la seguridad del personal, las máquinas y equipos, minimizando así los riesgos operativos y optimizando la eficiencia energética. En resumen, los sistemas de control de operación son esenciales para asegurar una producción eficiente, segura y de alta calidad en la industria cementera, monitoreando en tiempo real las emisiones al medio ambiente y los parámetros adecuados de los productos en cada etapa de los procesos.

Figura 2-5

Sistema de control SCADA ECS/Processexpert® De Lfsmidth.

Nota. Obtenido de página web (Flsmidth [@Flsmidth], 2021).

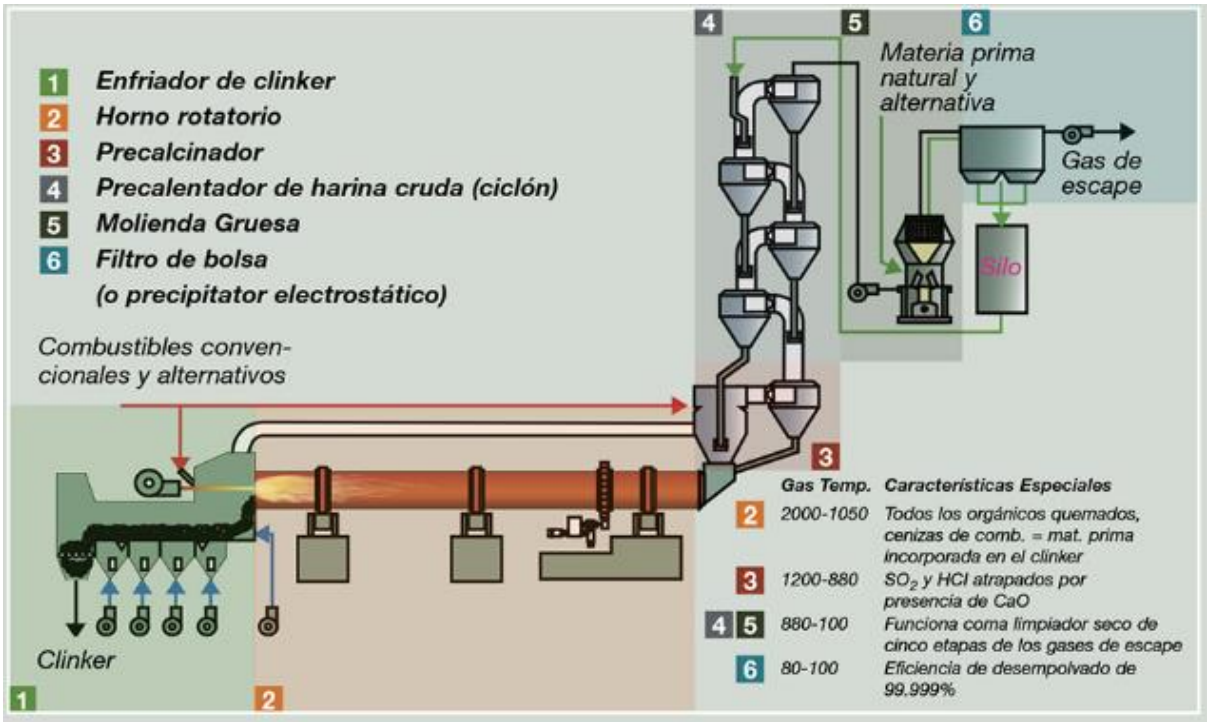
2.2.7 Puntos recomendados para la adición de combustibles alternativos en plantas de cemento

Tomando como sistema el piro-proceso, se cuentan con 3 puntos de ingreso de masa, el primero es el cabezal de la torre de precalentamiento, por donde se alimenta la harina cruda, el punto de los quemadores del calcinador, por donde se inyecta combustible y aire, y el tercer punto es la descarga del horno donde está ubicado el quemador principal, por donde se inyecta combustible, aire primario de combustión y aire secundario de la recuperación de gases del enfriador, de los lugares mencionados, los más factibles para la inyección de residuos para la recuperación de

energía son: el quemador principal y el calcinador, porque estos dos puntos cuentan con una combustión y temperaturas elevadas para la gasificación y recuperación energética de los residuos.

Figura 2-6

Puntos de alimentación de combustibles alternativos en una planta de cemento.



Nota. Obtenido de revista (*¿Qué Es El Combustible Derivado De Residuos (CDR)?*, 2021).

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA

3.1 ENFOQUE DE LA INVESTIGACIÓN

El enfoque de este trabajo se centra en realizar un análisis cualitativo y cuantitativo, mediante el cual se defina la viabilidad técnica y económica de la valorización energética de residuos como combustibles alternativos en el horno Polysius de la Fábrica Nacional de Cemento S.A. (FANCESA). Específicamente se busca estudiar meticulosamente los aspectos técnicos del proceso y evaluar su impacto socioeconómico, con el objetivo de proponer una solución factible, eficiente y sostenible a la problemática identificada y en pro del desarrollo la industria del cemento FANCESA y de la ciudad de Sucre.

3.1.1 Enfoque cualitativo

El enfoque cualitativo de la valorización energética de residuos en la Fábrica Nacional de Cemento S.A. (FANCESA) se basa en un análisis y evaluación detallada de la idoneidad de los residuos seleccionados como potenciales combustibles alternativos, considerando aspectos como composición química, poder calorífico y contenido de humedad. Además, de su compatibilidad con el proceso de producción de cemento, garantizando que no influyan negativamente la calidad del producto final ni la operación del horno, lo que permite una implementación segura y eficiente de la estrategia de valorización energética.

Este enfoque cualitativo también implica la identificación de criterios de acondicionamiento de los residuos, considerando factores técnicos y ambientales, prestando especial atención a la preparación de los residuos, incluyendo procesos de trituración, homogenización y secado, para facilitar su integración efectiva en el proceso de producción de clínker.

Con todos estos fundamentos se propuso el método más factible de adición de residuos como combustible alternativo, el lugar adecuado del emplazamiento de los equipos para dicho proceso y los equipos requeridos, maximizando los beneficios económicos y medioambientales para FANCESA y la región.

3.1.2 Enfoque cuantitativo

El enfoque cuantitativo de la valorización energética de residuos en la Fábrica Nacional de Cemento S.A. (FANCESA) se centra en la cuantificación de variables clave, para lo cual se partió de una revisión bibliográfica para adquirir datos estadísticos de los residuos, poder calorífico, contenido de humedad, y otros parámetros relevantes, que son el punto de inicio para calcular los volúmenes CDR, el potencial energético, el volumen de sustitución, y costo veneficio involucrado.

Dicho enfoque cuantitativo proporciono datos precisos y verificables, para evaluar la viabilidad y el impacto directo de una posible implementación de un sistema de inyección de combustibles alternativos en la operación del horno, coadyuvando en la eficiencia energética global del proceso de producción de Clinker, datos que son fundamentales para la toma de decisiones informadas, que garantizan el éxito de la implementación de la valorización energética de residuos en la línea Polysius de FANCESA.

3.2 MÉTODOS DE INVESTIGACIÓN

Para abordar el tema de la valorización energética de residuos en la fábrica de cemento FANCESA, se utilizaron una combinación de diferentes métodos de investigación para obtener una comprensión más completa de los fenómenos estudiados.

3.2.1 Métodos teóricos

Este enfoque implica un análisis y la formulación de ecuaciones de balances de materia y energía que describan la entrada y salida de materiales en el proceso, a través de modelos matemáticos, que permiten calcular cantidades y costos, y simular diferentes escenarios de valorización de residuos, permitiendo evaluar el impacto en la eficiencia del proceso y los costos asociados, además, este método proporciona una base sólida de información para la toma de decisiones futuras al respecto.

3.2.1.1 Método bibliográfico

La aplicación de un método bibliográfico implica la revisión detallada de fuentes documentales relacionadas con la valorización energética de residuos en la industria en general, se examinaron investigaciones previas, informes técnicos, normativas y literatura científica relevante, así como antecedentes y experiencia de otras industrias en el tema.

Este enfoque permitió establecer un sólido fundamento teórico, identificar las mejores prácticas ya ejecutadas en otras industrias y comprender los desafíos asociados, proporcionando una perspectiva integral sobre la viabilidad técnica y económica de la valorización de residuos en la fábrica de cemento FANCESA.

3.2.2 Método deductivo

La aplicación del método deductivo en el estudio de la valorización energética de residuos en la fábrica de cemento FANCESA implica la formulación de hipótesis y la aplicación de principios teóricos para llegar a conclusiones específicas, partiendo de teorías establecidas sobre la combustión de residuos y procesos de producción de cemento, se desarrollaron suposiciones sobre cómo la integración de esta práctica influirá en la operación de la planta. Luego, a través de la recopilación de datos y análisis, se contrastan estas suposiciones con la realidad observada en FANCESA. Este enfoque permite una evaluación lógica y fundamentada de la viabilidad técnica y económica de la valorización de residuos en el contexto de la ciudad de Sucre y de la fábrica de cemento FANCESA.

3.2.3 Métodos empíricos

La aplicación de métodos empíricos en el estudio presente, implica la recopilación y análisis de datos reales obtenidos a través de observaciones directas y datos estadísticos de operación de mediciones in situ, a partir de los que se propuso el diseño y dimensión de equipos, capacidades, Estos datos empíricos proporcionarán una base concreta para evaluar el impacto real y la capacidad de la valorización de residuos en el proceso de producción de Clinker, además permiten validar y ajustar los modelos teóricos, garantizando resultados precisos y confiables

en la investigación, que será cruciales para la ejecución futura y garantizar el éxito de la implementación de esta práctica sostenible en FANCESA.

3.2.3.1 Observación

Se aplica el método experimental de observación directa in situ, para cerciorarse de las condiciones técnicas, ubicación y estado de los equipos involucrados en el estudio, así mismo registrar de manera sistemática los fenómenos de interés, de esta manera se identificó la problemática, también permitió identificar las mejores posibilidades para los asentamientos de los equipos y emplazamiento del proyecto, la observación detallada proporciona información concreta y verificable, sobre el impacto real y la opción adecuada de los diferentes métodos de la valorización de residuos, en el proceso de producción de clínker.

3.2.3.2 Análisis de datos

Consistió en analizar un conjunto de datos existentes, de la operación del horno en condiciones normales, con el propósito de contar con datos operativos reales, capacidades requeridas de combustibles, cantidad de producción, potencial de optimización, entre otros, datos que validan o rechazan la factibilidad de la aplicación del proceso de valorización energética de los residuos.

3.2.3.3 Método descriptivo

La aplicación del método descriptivo en el estudio de la valorización energética de residuos en la fábrica de cemento FANCESA, implica una detallada descripción de los elementos clave del proceso. Se documentó la composición de los residuos aptos para el proceso, sus propiedades físicas y químicas requeridas, así como su aporte energético durante la combustión; además, se analizaron los parámetros operativos del horno y las emisiones resultantes permitidas de acuerdo a las normativas vigentes. Esta aproximación proporciona una visión tangible y comprensiva de cómo la valorización de residuos contribuye o afecta en el proceso de producción de cemento, sirviendo como base para evaluar su viabilidad técnica y económica en el contexto específico de FANCESA.

3.3 TÉCNICAS E INSTRUMENTOS

En el proceso de operación, se cuenta con un sistema de control automatizado, “SCADA”, mediante el cual se realiza la medición de las diferentes variables operativas del proceso, como: Temperaturas, presiones, caudales, potencias, flujos, entre otros, dichas mediciones son almacenadas en una base de datos, de donde se extrajo las parámetros requeridos de la operación del horno Polysius de la gestión 2020, que junto a los datos estadísticos de la recolección de residuos de la ciudad de Sucre, con el soporte de una laptop y el Software Excel, posteriormente fueron esenciales para realizar los cálculos necesarios, llegando a los resultados que permitan responder las interrogantes planteadas. La combinación de estas técnicas e instrumentos proporcionará una base integral y precisa para la investigación sobre la valorización de residuos en la línea Polysius de la fábrica de cemento FANCESA.

CAPÍTULO IV

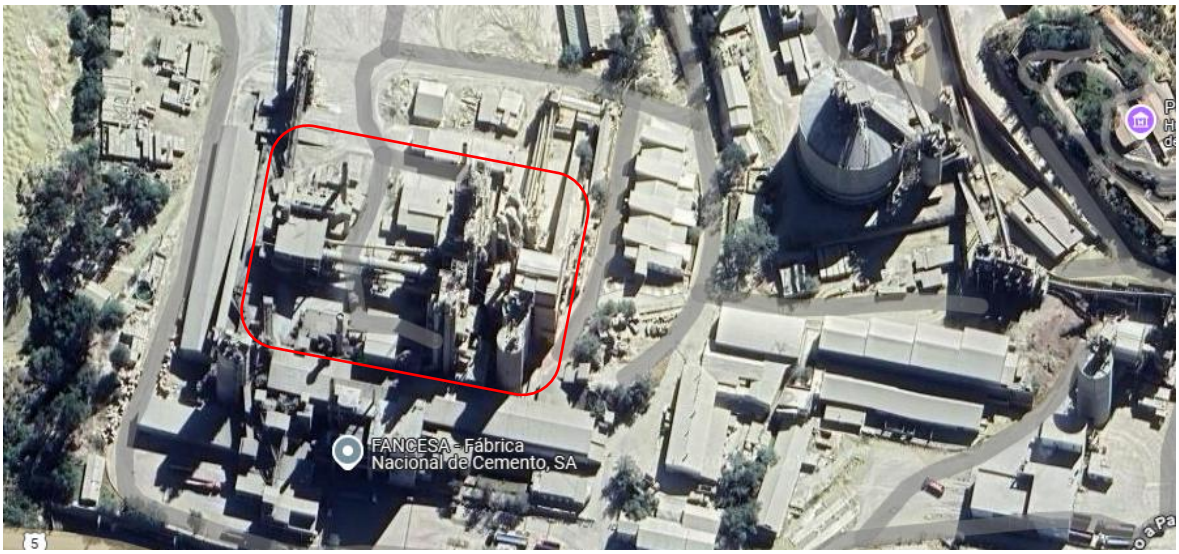
DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN

4.1 UBICACIÓN GEOGRÁFICA DE APLICACIÓN DEL ESTUDIO

El presente estudio se enfoca a la realidad de la fábrica nacional de cemento Sucre (FANCESA), ubicada al Noreste de la ciudad de Sucre-Bolivia, en la zona de Cal Orck´o sobre la avenida Marcelo Quiroga Santa Cruz, el objeto de estudio se realizó estrictamente dentó de los límites geográficos del municipio de Sucre y de los predios de la fábrica de cemento FANCESA, específicamente en la línea Polysius de producción de Clinker, emplazada en la ubicación: latitud -19.007250, Longitud -65.237990.

Figura 4-1

Ubicación de los predios de la fábrica de cemento FANCESA.



Nota. Obtenido de (Google Maps, 2024).

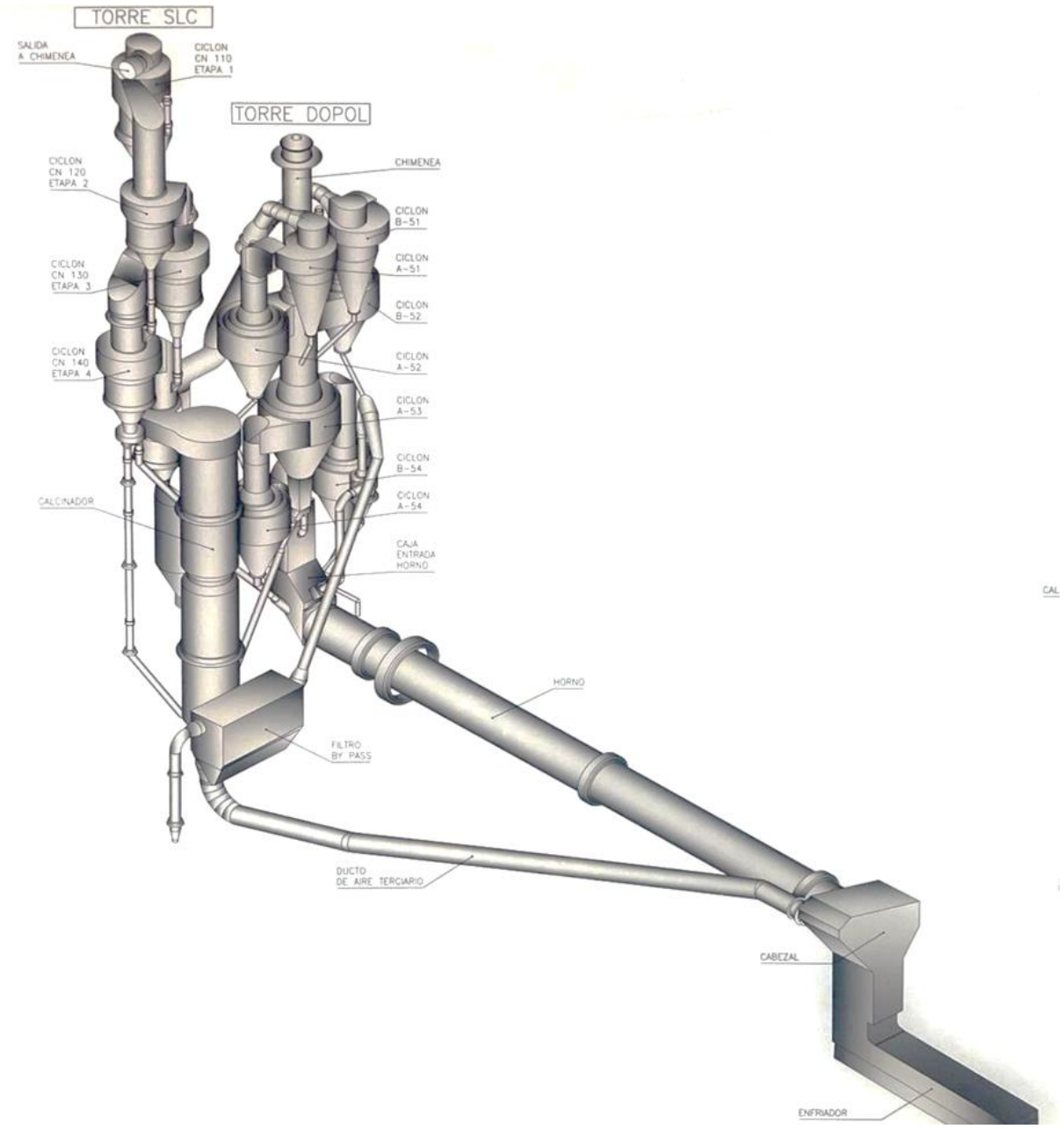
En la figura 4.1, se muestra el emplazamiento de la fábrica de cemento FANCESA, y en un recuadro con rojo, se muestra la línea Polysius, espacio donde se enfoca el presente estudio, específicamente en el piroproceso, que involucra la torre del pre calcinador SLC, torre DOPOL, Horno, enfriador y transporte de clínker al almacenamiento.

4.2 LÍNEA DE CALCINACIÓN POLYSIUS

La línea de producción Polysius, cuenta con dos torres de ciclones para la descarbonatación del crudo, torre DOPOL y SLC que cuenta con quemadores en línea.

Figura 4-2

Sistema de calcinación línea Polysius.



Nota. Obtenido de planos de la fábrica de cemento FANCESA, 2024.

4.3 PRODUCCIÓN Y CONSUMO ENERGÉTICO DEL HORNO POLYSIUS

Su capacidad nominal del horno Polysius es de 2000 t/día de clínker, cuenta con tres puntos de consumo de Gas Natural que son: el quemador principal del horno con un promedio de 4500 Nm3/h, los quemadores del calcinador de la torre SLC, con un consumo promedio de 2550 Nm3/h, el quemador piloto del calcinador SLC con 75 Nm3/h de consumo promedio, logrando un consumo específico de 850 Kcal/Kg de clínker, con un Factor crudo clínker de 1,767.

La línea de producción Polysius, se detuvo el 7 de marzo del año 2021 por la puesta en marcha de la nueva línea de producción NLP y por necesidad de mantenimiento de su torre DOPOL, no volviendo a funcionar hasta la fecha.

Tabla 4-1

Producción y consumo de gas del horno Polysius gestión 2020.

Detalle	Alimentación Horno	Consumo Gas Horno	Consumo Gas SLC	Consumo Gas Piloto	Total, Gas Consumido	Clinker Producido	Consum. Especifico
Mes	**(ton)**	**(Nm3)**	**(Nm3)**	**(Nm3)**	**(MNm3)**	**(ton)**	**(Kcal/kg)**
Abr - Jul-20							
Ago-20	2035	33 252	5472	161	38 885	1195	299
Sep-20	74 658	2 525 579	1 358 992	40 085	3 924 656	42 251	855
Oct-20	79 706	2 808 928	1 482 651	43 732	4 335 311	45 108	884
Nov-20	94 674	3 097 749	1 791 161	52 832	4 941 742	53 579	849
Dic-20	97 753	3 242 813	1 809 256	53 366	5 105 435	55 322	849
Ene-21	69 647	2 490 495	1 308 796	38 604	3 837 895	39 415	896
Feb-21	75 834	2 834 967	1 303 430	38 446	4 176 843	42 917	895
Mar-21	8 455	3 67 775			367 775	4785	707
Pmd.	82 045	2 833 422	1 509 048	44 511	4 386 980	46 432	871
Total	**502 762**	**17 401 558**	**9 059 758**	**267 227**	**26 728 543**	**284 572**	**864**

Nota. Obtenido de base de datos FANCESA gestión (2020).

A partir de los datos se calculó que el porcentaje de consumo de gas del calcinador, que corresponde al 38% del total aproximadamente.

Aclarar que en los meses de abril a julio no trabajo la sección del horno, por restricciones efecto de la pandemia del COVID 19, por lo que la operación de la gestión 2020 se redondea solo a 6 meses, cuando lo planificado usualmente solía ser de 10 meses por gestión, más dos de mantenimiento.

4.4 CONSUMO CALÓRICO REQUERIDO EN EL PRE CALCINADOR

En la tabla 4-2 se muestra los consumos de gas tanto del calcinador como del quemador principal, así mismo se calculó el consumo energético de cada uno de los meses que se encontraba operativo el horno en la gestión fabril 2020, el valor de interés es el del pre calcinador SLC, que en promedio usa 14.293 MM Kcal/mes, incluyendo el usado en el quemador piloto SLC.

Tabla 4-2

Consumo energético del horno Polysius.

Detalle	Consumo Gas Horno	Consumo Gas SLC	Total, Gas Consumido	Consumo energético horno	Consumo energético SLC	Gas N SLC
Mes	**(Nm3)**	**(Nm3)**	**(Nm3)**	**(MMKcal)**	**(MMKcal)**	**(%)**
Abr-Jul-20						
Ago-20	33 252	5633	38 885	306	52	14,5
Sep-20	2 525 579	1 399 077	3 924 656	23 235	12 872	35,6
Oct-20	2 808 928	1 526 383	4 335 311	25 842	14 043	35,2
Nov-20	3 097 749	1 843 993	4 941 742	28 499	16 965	37,3
Dic-20	3 242 813	1 862 622	5 105 435	29 834	17 136	36,5
Ene-21	2 490 495	1 347 400	3 837 895	22 913	12 396	35,1
Feb-21	2 834 967	1 341 876	4 176 843	26 082	12 345	32,1
Mar-21	367 775	0	367 775	3384		

Detalle	Consumo Gas Horno	Consumo Gas SLC	Total, Gas Consumido	Consumo energético horno	Consumo energético SLC	Gas N SLC
Promedio	**2 833 422**	**1 553 559**	**4 386 980**	**26 067**	**14 293**	**35,4**

Nota. Obtenido de base de datos FANCESA gestión (2020).

4.5 DIAGNÓSTICO DEL TIPOS Y CANTIDAD DE RESIDUOS GENERADOS EN EL MUNICIPIO DE SUCRE

Los residuos recogidos en el municipio no son procesados, en la actualidad el 100% va a parar el botadero municipal, con excepción de botellas PET, botellas de vidrio y metales, que en su mayor proporción son recolectadas y recicladas por personas y empresas independientes.

De la misma manera en la planta de cemento FANCESA, los residuos generados como pallets de madera, desechos de aceites y lubricantes, son vendidos a precios muy bajos, o intercambiados con ladrillos u otros materiales de necesidad de la fábrica, mientras que las bolsas big bag en desuso, papel Kraft, gomas, etc. Van a parar a depósitos por tiempo indefinido.

4.5.1 Clasificación y cantidad de residuos generados en el municipio de Sucre

Actualmente en la ciudad existe la Entidad Municipal de Aseo Urbano Sucre “EMAS” que es encargada del aseo urbano y la recolección de la basura en general, de acuerdo a sus informes actualmente el 100% de sus residuos recolectados se depositan en el botadero municipal.

Rioja manifestó que, de acuerdo con el último estudio que hizo EMAS hace unos años respecto a las características de la basura que generan los vecinos de la ciudad, el 18,5% corresponde a material reciclable y el 62,35% a materia orgánica. El resto debe ser depositado en el vertedero de Lechuguillas (Correo Del Sur, 2023).

Sin embargo, de acuerdo a datos del Instituto Nacional de Estadística (INE) del año 2024, desde marzo de 2019, en promedio 208 toneladas día de residuos se acumula en el botadero municipal para su disposición final (Instituto Nacional De Estadística, 2024).

Tabla 4-3

Recolección de residuos sólidos en la ciudad de sucre, 2020 – 2024 (en toneladas)

Periodo	**2020**	**2021**	**2022**	**2023**	**2024**
Enero	3180	4899	5851	5522	6921
Febrero	2509	5583	5380	5748	6052
Marzo	2850	5946	5939	7091	6688
Abril	3103	5417	5637	7518	5810
Mayo	3022	4535	5439	6456	
Junio	3531	4707	5884	6299	
Julio	4340	4713	5729	5742	
Agosto	3700	4546	4317	6151	
Septiembre	4370	4724	4110	5707	
Octubre	3270	4903	5442	5664	
Noviembre	4007	4912	5188	6022	
Diciembre	1624	5149	5722	6986	
TOTAL	**39 505**	**60 035**	**64 639**	**74 905**	**25 472**

Nota. Obtenido del Instituto Nacional De Estadística (INE) (2024).

De acuerdo a estadísticas sobre el volumen del recojo de residuos por tipo de procedencia, definido básicamente como material que ha dejado de tener un propósito útil y se descarta, a continuación, se presenta datos estadísticos correspondiente al volumen de residuos sólidos según tipo de procedencia (domiciliario, áreas públicas, industrias, hospitales y otros) con base a registros administrativos de los Gobierno Municipal de la ciudad de Sucre.

Tabla 4-4

Residuos sólidos recolectados en Sucre Bolivia, según tipo de procedencia, 2023.

Tipo de Procedencia	**(Ton)**	**(%)**
Domiciliarios y Áreas Públicas	60 044	80,16%
Mercados	12 187	16,27%
Establecimientos de salud	562	0,75%

Tipo de Procedencia	(Ton)	(%)
Otros	2 112	2,82%
Total, Gestión 2023	**74 905**	**100,00%**

Nota. Obtenido del *Instituto Nacional De Estadística* (INE) (2024).

4.6 POTENCIAL DE RECUPERACIÓN DE LOS RESIDUOS URBANOS APTOS PARA EL USO COMO COMBUSTIBLES ALTERNATIVOS

Tomando en cuenta la estadística de la última gestión de los residuos generados en el municipio de Sucre, descontando la humedad descrita en bibliografía entre 40 a 48,51%, para cuestiones de cálculo se tomó 48,51% con el fin de ser conservador con el error, además restando el 18,5% % correspondiente al porcentaje de material que es posible reciclar de acuerdo a lo descrito en el último estudio realizado por EMAS, se calculó el porcentaje de residuos con potencialidad de ser CDR, datos que se muestra en la tabla 4-5.

Tabla 4-5

Potencial de recuperación de CDR.

Detalle	Gestión 2023	Materia Orgánica	Humedad	Reciclable	CDR	CDR
Mes	**Ton**	**Ton**	**Ton**	**Ton**	**Ton**	**%**
Enero	6222	3879	3018	1151	2052	33
Febrero	5900	3679	2862	1092	1946	
Marzo	6890	4296	3342	1275	2273	
Abril	6664	4155	3233	1233	2198	
Mayo	6456	4025	3132	1194	2130	
Junio	6299	3927	3056	1165	2078	
Julio	5742	3580	2785	1062	1894	
Agosto	6151	3835	2984	1138	2029	
Septiembre	5707	3558	2768	1056	1883	
Octubre	5664	3532	2748	1048	1869	

Detalle	Gestión 2023	Materia Orgánica	Humedad	Reciclable	CDR	CDR
Noviembre	6022	3755	2921	1114	1987	
Diciembre	6986	4356	3389	1292	2305	
TOTAL	**74 702**	**46 577**	**36 238**	**13 820**	**24 644**	

Nota. Calculo en base a datos obtenidos del *Instituto Nacional de Estadística* (INE) (2024).

De acuerdo a cálculos se tiene un aproximado de 24.644 toneladas por año, de residuos en base seca, que equivale al 33% del total de los residuos recolectados, con la potencialidad de convertirlos en combustibles alternativos, esta cantidad no contempla los neumáticos en desuso, ya que por lo general no lo recoge la empresa EMAS.

4.7 POTENCIAL ENERGÉTICO DE LOS CDR POR MES Y POR AÑO

Asumiendo un margen del 90% de recuperación de los residuos aptos para él uso como combustibles alternativos, en el calcinador en el horno Polysius, es posible calcular el potencial energético de los mismos.

Según bibliografía el PCI base seca de los CDR se encuentre entre 4200Kcal/Kg y en el caso de los neumáticos es de 6500 Kcal/kg según Miguel Santana Fernández (2011) y 19.460 KJ/kg equivalente a 4651,1 Kcal/kg según Néstor D. Montiel-Bohórquez y Juan F. Pérez (2019). Con fines de cálculo se trabajó con un PCI de 4000 Kcal/kg para tener una estimación conservadora del potencial energético.

Tabla 4-6

Estimación del potencial energético de los CDR en millones de Kcal

Periodo	Residuo No Aprovechable Seco (Ton)	CDR 90% (Ton)	PCI (MMKcal)
Enero	2052,5	1847,2	7389
Febrero	1946,4	1751,8	7007
Marzo	2272,8	2045,6	8182

Periodo	Residuo No Aprovechable Seco (Ton)	CDR 90% (Ton)	PCI (MMKcal)
Abril	2198,5	1978,6	7914
Mayo	2129,8	1916,9	7667
Junio	2078,0	1870,2	7481
Julio	1894,3	1704,9	6819
Agosto	2029,2	1826,3	7305
Septiembre	1882,7	1694,5	6778
Octubre	1868,6	1681,7	6727
Noviembre	1986,7	1788,0	7152
Diciembre	2304,7	2074,2	8297
TOTAL	**24 644,2**	**22 179,8**	**88 719,1**

Nota. Calculado a partir de datos estadísticos obtenidos del INE.

Como se observa en la tabla 4-6, se tiene una estimación aproximada mensual de 7.393 MM kcal/mes lo que equivale a 88.719 MM kcal/año, dichos valores son muy atractivos ya que representan un significativo potencial energético presente en los combustibles derivados de residuos, que en la actualidad no está siendo aprovechado de ninguna manera.

4.8 PORCENTAJE DE SUSTITUCIÓN ENERGÉTICO EN EL CALCINADOR SLC POR CDR

Partiendo de los seis meses de operación del horno Polysius en la gestión 2020, a un promedio de 14.292,7 MM Kcal de consumo por mes, es posible contar con CDR acumulados anualmente para sustituir el 100% de la demanda energética del calcinador, sin embargo la operación del horno Polysius en la gestión 2020, fue irregular por el tema de la pandemia, por lo general se requiere una operación del horno de 10 meses por año, para tal caso el consumo energético estimado seria de 143.014 MM Kcal en la torre de pre calcinación SLC.

Tabla 4-7

Potencial de sustitución energética en el calcinador SLC Polysius.

Descripción	Operación	Consumo Energético	Sustitución
	Meses	MM Kcal/año	%
Potencial Energético de CDR	12	88 719,1	90
G. N. SLC.	6	85 808,4	103,4
G. N. SLC.	10	143 014,0	62,0

Nota. Calculado a partir de datos obtenidos de consumo FANCESA 2020.

Como se mostró, en la gestión 2023 el potencial energético de los CDR de la ciudad de Sucre es de 88.719,1 MM kcal/año, teniendo un promedio mensual equivalente a 7393,3 MM Kcal/mes, lo que significaría que es posible sustituir un 62% de la energía térmica requerida por combustibles alternativos derivados de los residuos urbanos, en el calcinador del horno Polysius.

4.9 AHORRO ECONÓMICO POTENCIAL

Actualmente el costo del Gas Natural consumido a nivel industrial es de 2,516 $us /MPC, datos de conocimiento del público en general, teniendo el costo por volumen de consumo de la gestión 2020 del horno Polysius, se calculó los costos por consumo de gas en Bs de dicha gestión.

Tabla 4-8

Cálculo del costo del gas natural consumido en la línea Polysius en la gestión 2020

Detalle (mes)	Gas Consumido (Nm3)	Costo Total G N (Bs)	Costo G.N Horno (Bs)	Costo G.N Calcinador SLC (Bs)	Sustitución (%)	Ahorro Por Sustitución De GN (Bs)
6	26 728 542	16 529 140	10 761 260	5 767 880	100	3 578 423
10	33 410 678	27 129 430	17 522 103	9 607 328	62	5 959 929
1	3 341 068	2 712 943	1 752 210	960 733	62	595 993

Nota. Calculado a partir de datos obtenidos de consumo FANCESA 2020.

En la gestión 2020 por consumo de gas natural en el horno Polysius por seis meses de operación, tuvo un costo aproximado según cálculos, de 16.529.140 Bs, si se realiza el cálculo para una operación deseada de 10 meses se tendría que cancelar un aproximado de 27.129.430 Bs.

Teniendo conocimiento que el precio referencial internacional de los CDR, que ronda los 20 $us/ton, se realizó una estimación del costo de procesamiento y acondicionamiento de los residuos urbanos de acuerdo a los volúmenes mostrados en las estadísticas de la ciudad de Sucre.

Tabla 4-9

Costo de acondicionamiento de los CDR

Detalle	**CDR 90%**	**PCI**	**Costo de CDR**	**CDR**	**GN**
Mes	**(Ton/mes)**	**(MM Kcal)**	**(Bs)**	**(Bs/MM Kcal)**	
Enero	1847,2	7389	257 503		
Febrero	1751,8	7007	244 197		
Marzo	2045,6	8182	285 151		
Abril	1978,6	7914	275 818		
Mayo	1916,9	7667	267 209		
Junio	1870,2	7481	260 711		
Julio	1704,9	6819	237 657	34,85	67,27
Agosto	1826,3	7305	254 585		
Septiembre	1694,5	6778	236 208		
Octubre	1681,7	6727	234 429		
Noviembre	1788,0	7152	249 246		
Diciembre	2074,2	8297	289 145		
TOTAL	**22 179,8**	**88 719,1**	**3 091 860**		

Nota. Calculado A Partir De Datos Obtenidos Del INE Y Consumo FANCESA 2020.

De acuerdo a los datos calculados, generar 22.179,8 toneladas de CDR con un PCI promedio de 4000 Kcal/kg costaría 3.091.860 Bs aproximadamente, en el caso de alcanzar 10 meses de operación en el horno Polysius, se lograría tener sustitución promedio de G.N. equivalente a 2.868.069,0 Bs/año, dicho monto, al principio tendría que cubrir los costos de modificación e instalación de los equipos necesarios.

Comparando el costo de acuerdo a su poder calorífico en Bs/MM Kcal, los CDR son un 48,2% menores respecto al G.N, además del veneficio de reducir la huella de carbono e ingresar a la aplicación de la economía circular en la fábrica de cemento FANCESA.

4.10 ESTIMACIÓN DEL CARBONO NEUTRAL

La estimación de la producción de la huella de carbono, se realizó con un porcentaje de sustitución del 62% para un promedio de operación de 6 y 10 meses de operación de la línea Polysius.

Tabla 4-10

Cálculo de carbono neutral

Detalle	Consumo Gas SLC (Nm3)	C02 Generado (ton)	Sustitución de GN (%)	Carbono Neutral (ton)
6	9 326 984	20 053,0	100	20 053,0
10	15 535 590	33 401,5	62,0	20 720,7
1	1 553 559	3340,2	62,0	2072,07

Nota. Calculado a partir de datos obtenidos de consumo FANCESA 2020.

Tomando en cuenta la capacidad de sustitución del G.N en el calcinador de la torre SLC por CDR, es posible reducir un aproximado de 20.720,7 ton/año de CO2, equivalente a 2072,1 ton/ mes, lo que representa un aporte sustancial al medio ambiente.

4.11 EQUIPAMIENTO REQUERIDO PARA LA ADICIÓN DE COMBUSTIBLES ALTERNATIVOS

Para la implementación del sistema de adición de los combustibles alternativos, de acuerdo a la recomendación de AUMUND empresa especialista en el rubro, se requiere contar con las siguientes condiciones: balanza de camiones, hangar de almacenamiento, tolva de alimentación 120 m3, alimentador con retroceso de protección, brazo automático de muestreo, estación de muestreo, secador, sistema de dosificación, fuelbelt (transportador de correa de larga distancia), doble tornillo “fueljector”, puerta deslizante para alta temperatura, entre otros equipos e

instrumentos menores, a continuación se describe la función de cada uno, desde el punto de vista de la experiencia profesional y personal.

4.11.1 Balanza camionera

Tiene el objetivo de llevar el registro de recepción y cuantificar los CDR que ingresa a las instalaciones, actualmente ya se cuenta con balanzas camioneras en planta, por lo que ya no se requiere su implementación.

4.11.2 Hangar

Su finalidad es almacenar y acopiar los combustibles alternativos, además de resguardar de las condiciones climáticas como la lluvia, y el viento evitando que el material sea esparcido, idealmente se sugiere con una capacidad de 10 a 15 mil toneladas, para contar con una autonomía de carga de al menos 5 a 8 meses.

4.11.3 Tolva y cinta de alimentación

Preferentemente cerca o alado del sitio de acopio, “hangar” es necesario una tolva y una cinta de alimentación, de tal manera que, mediante una pala cargadora, se alimenta el CDR del hangar a la tolva y posteriormente a la trituradora.

4.11.4 Separación

Es una etapa indispensable del proceso, en este punto son seleccionados los materiales no adecuados como: metales, vidrios, rocas, etc. Es recomendable realizarlo mediante un sistema automatizado, para evitar exponer al personal de los riesgos involucrados.

4.11.5 Trituración y acondicionamiento

Los combustibles alternativos CDR, antes de ser inyectado para la combustión o gasificación, deben ser acondicionados, principalmente en cuanto al tamaño, la homogeneidad, porcentaje de humedad, para obtener su máximo rendimiento, los dos primeros aspectos se logran en el proceso de trituración.

4.11.6 Transporte y secado

Posterior a la etapa de trituración, se procede al transporte mediante cintas hasta un secador, donde se retira la mayor cantidad de humedad con la finalidad de incrementar su rendimiento energético, para esta etapa, es posible aprovechar los gases recuperados del enfriador, posterior al secado se transportan a una tolva de pre alimentación, se recomienda contar con una estación de muestreo automática para llevar el control de los parámetros requeridos del combustible alternativo (CDR) a ser utilizado.

4.11.7 Sistema de inyección

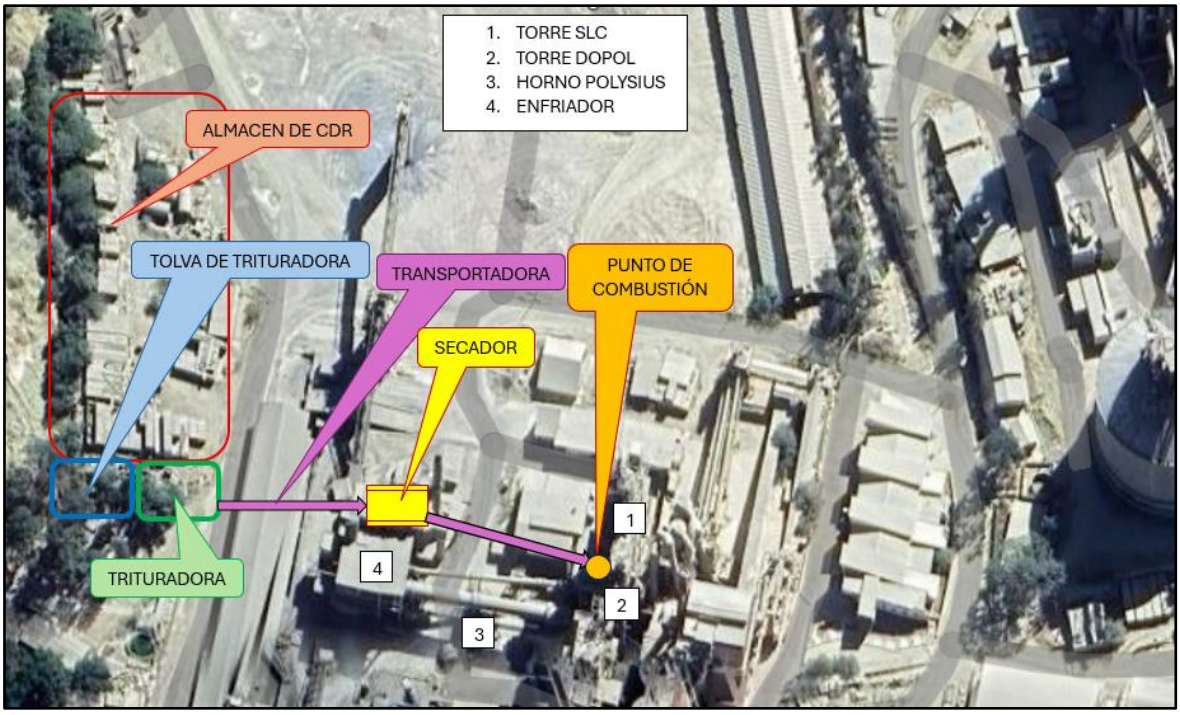
Esta etapa cuenta con una tolva de pre alimentación, una dosificadora, un tornillo sin fin para la extracción del material, y el sistema de inyección mediante insuflado con aire comprimido, que sería el recomendado por su versatilidad para la instalación el espacio con el que se cuenta y su simplicidad en la operación, al contrario de un sistema de gasificación que requiere más espacio y complejidad en su instalación, como protección mecánica es necesario una compuerta corrediza en casos de retroceso de la flama, y un sistema anti incendios por seguridad.

4.12 PROPUESTA DE INSTALACIÓN DEL SISTEMA DE ALIMENTACIÓN DE COMBUSTIBLES ALTERNATIVOS

A partir de una inspección en el sitio, viendo la factibilidad y la mejor distribución, aprovechando los espacios con los que se cuenta en planta en la actualidad, se presenta una sugerencia de la ubicación tanto de la instalación como de los diferentes equipos, detalle que se muestra en la figura 4-3.

Figura 4-3

Propuesta de distribución de los equipos



Nota. Obtenido de Google Maps (2025).

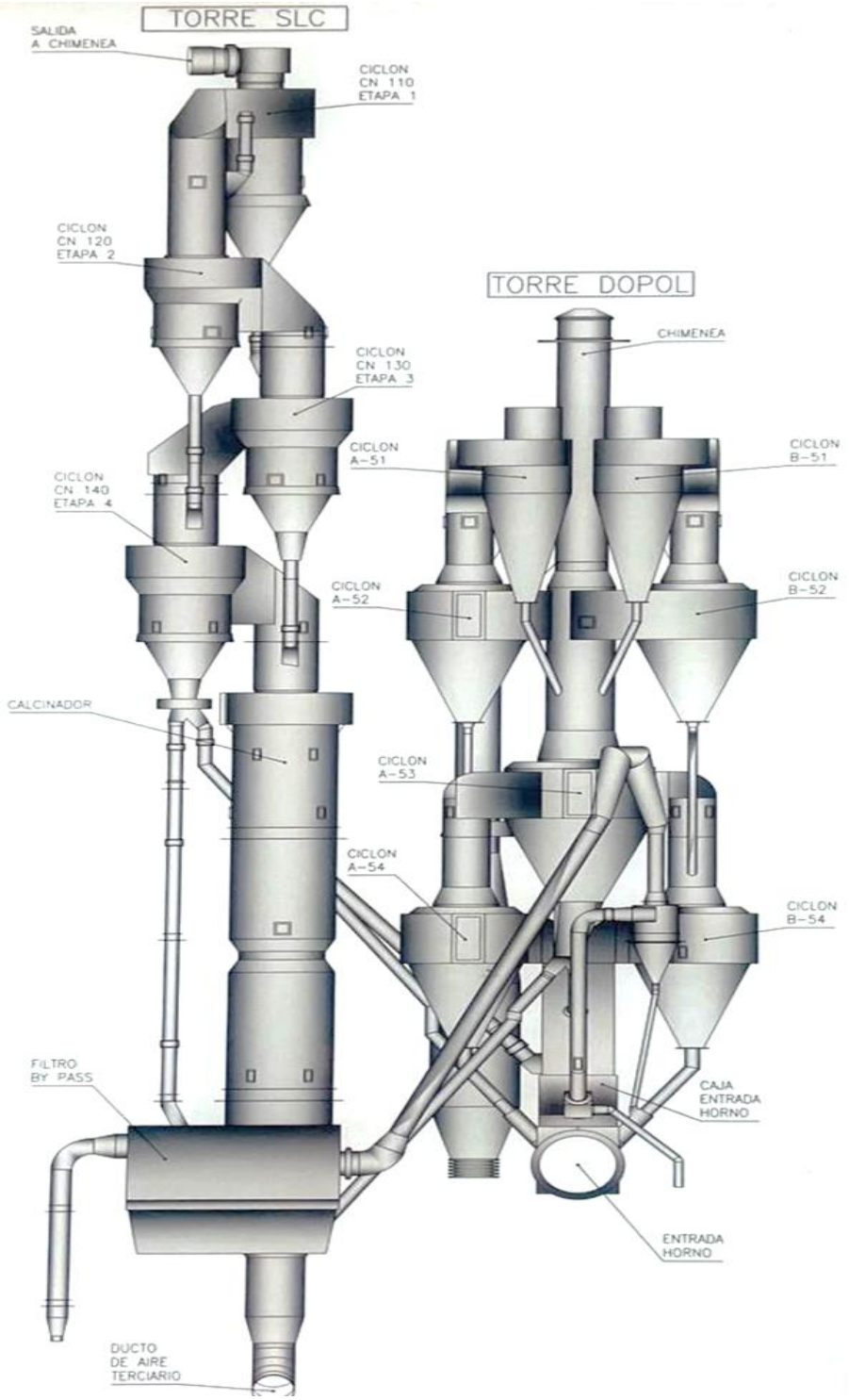
Se propone realizar la inyección de los CDR en la torre SLC a la altura de los quemadores, pero, no se descarta implementar el sistema en la torre Dopol, ya que a futuro se realizará las modificaciones requeridas para su operación, y se puede aprovechar esos trabajos, para incluir las modificaciones necesarias para dicho sistema, como última posibilidad se puede tomar la opción de inyectar los CDR por el quemador principal, o en el ducto de aire terciario, en caso del quemador principal, conllevaría modificar o cambiar ya que su diseño es exclusivamente para gas natural, en el caso de optar por un gasificador se recomienda adaptar el ducto de aire terciario, cerca del ingreso a la torre SLC, así aprovechar la temperatura del aire terciario.

4.12.1 Plano frontal de la torre SLC y DOPOL de la línea Polysius

En la siguiente ilustración, se muestra la línea Polysius, que cuenta con dos torres de ciclones, el ingreso del horno y el ingreso del ducto terciario al calcinador.

Figura 4-4

Plano frontal torre DOPOl y SLC



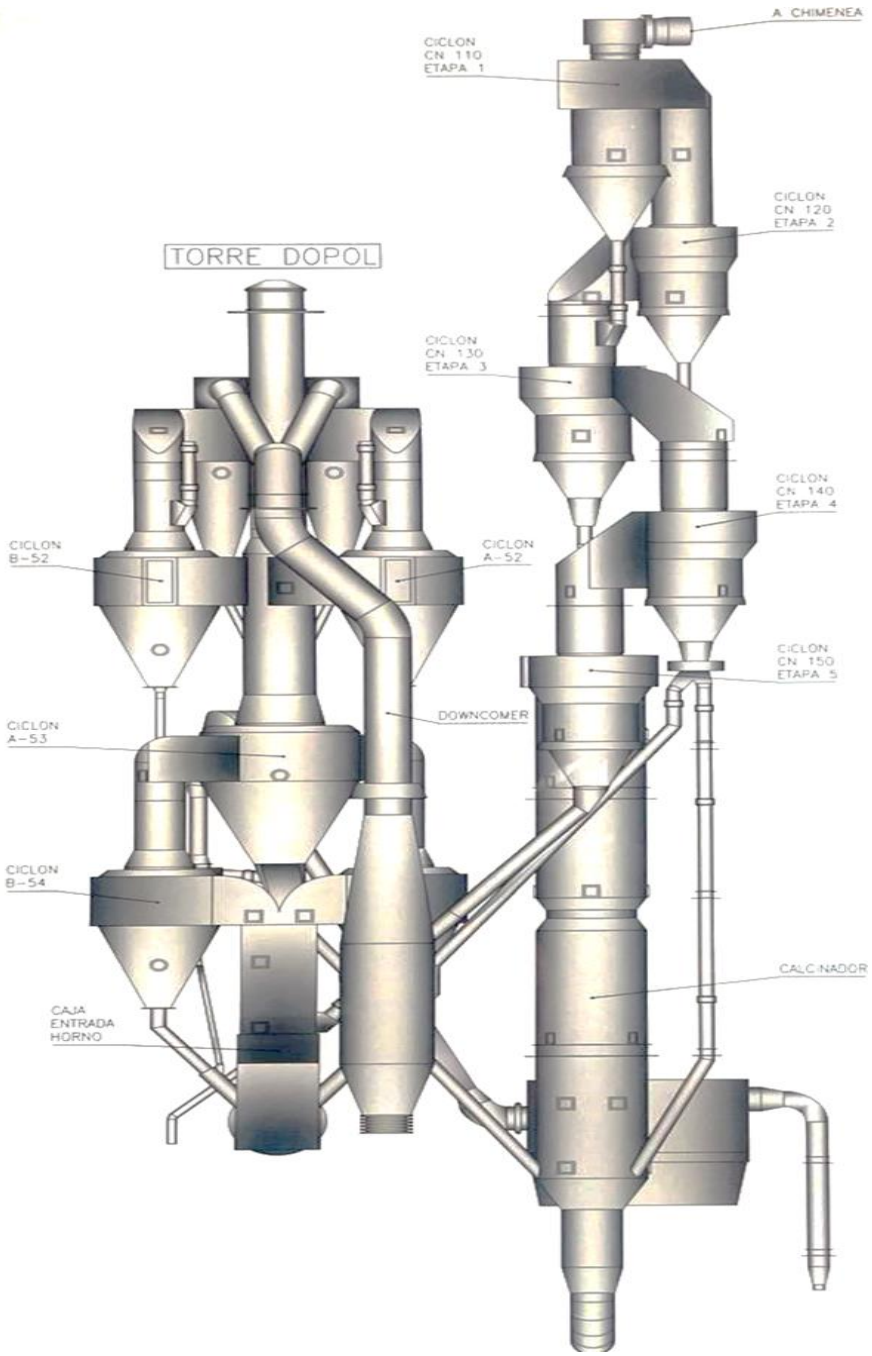
Nota. Obtenido de los planos de la fábrica de cemento FANCESA 2024.

4.12.2 Plano posterior de la torre SLC y DOPOL de la línea Polysius

En la ilustración 4-5, se aprecia a detalle la vista posterior de la torre Dopol y SLC.

Figura 4-5

Vista posterior de la torre Dopol y SLC

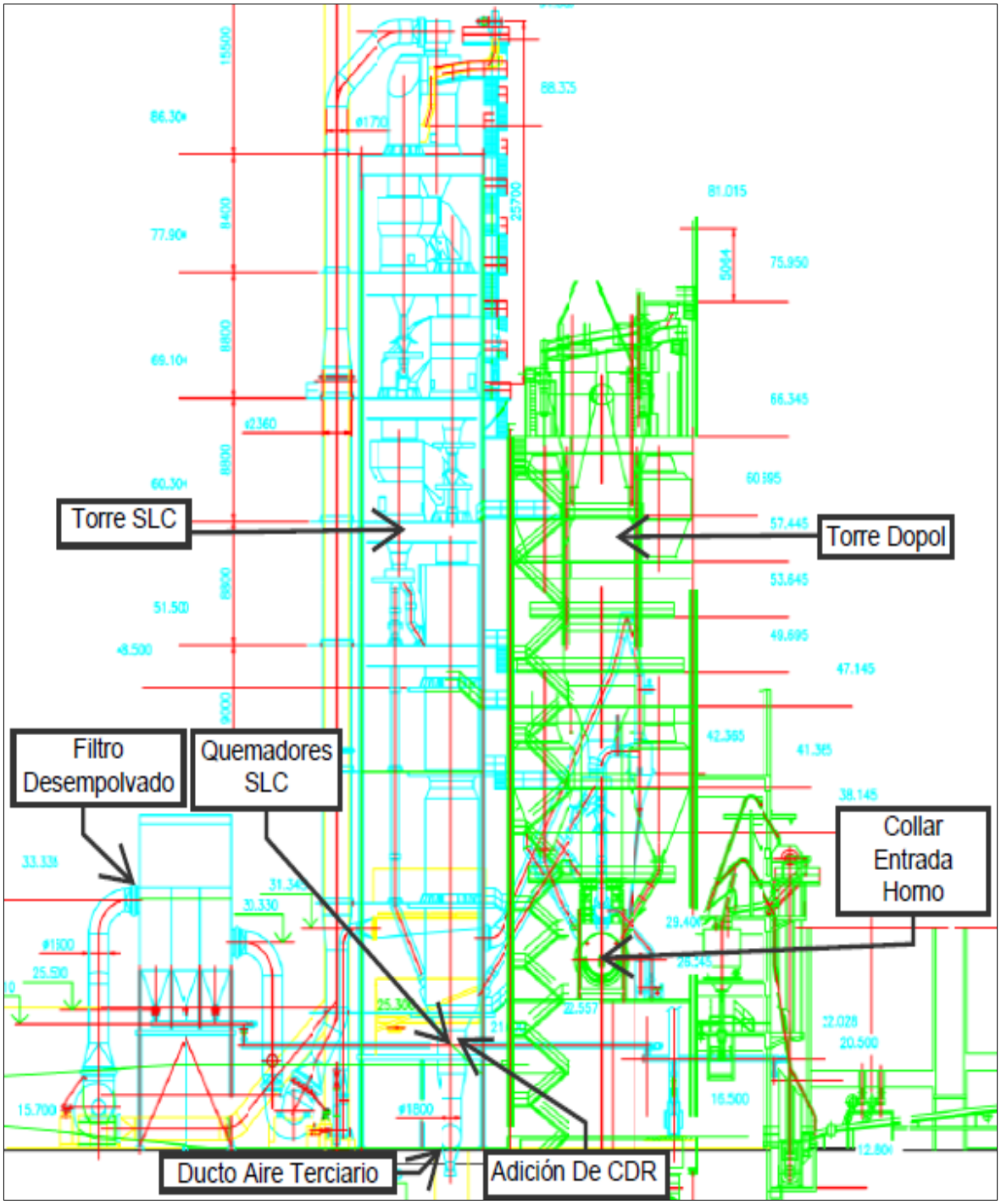


Nota. Obtenido de los planos de la fábrica de cemento FANCESA 2024.

4.12.3 Plano de vista vertical y horizontal

Figura 4-6

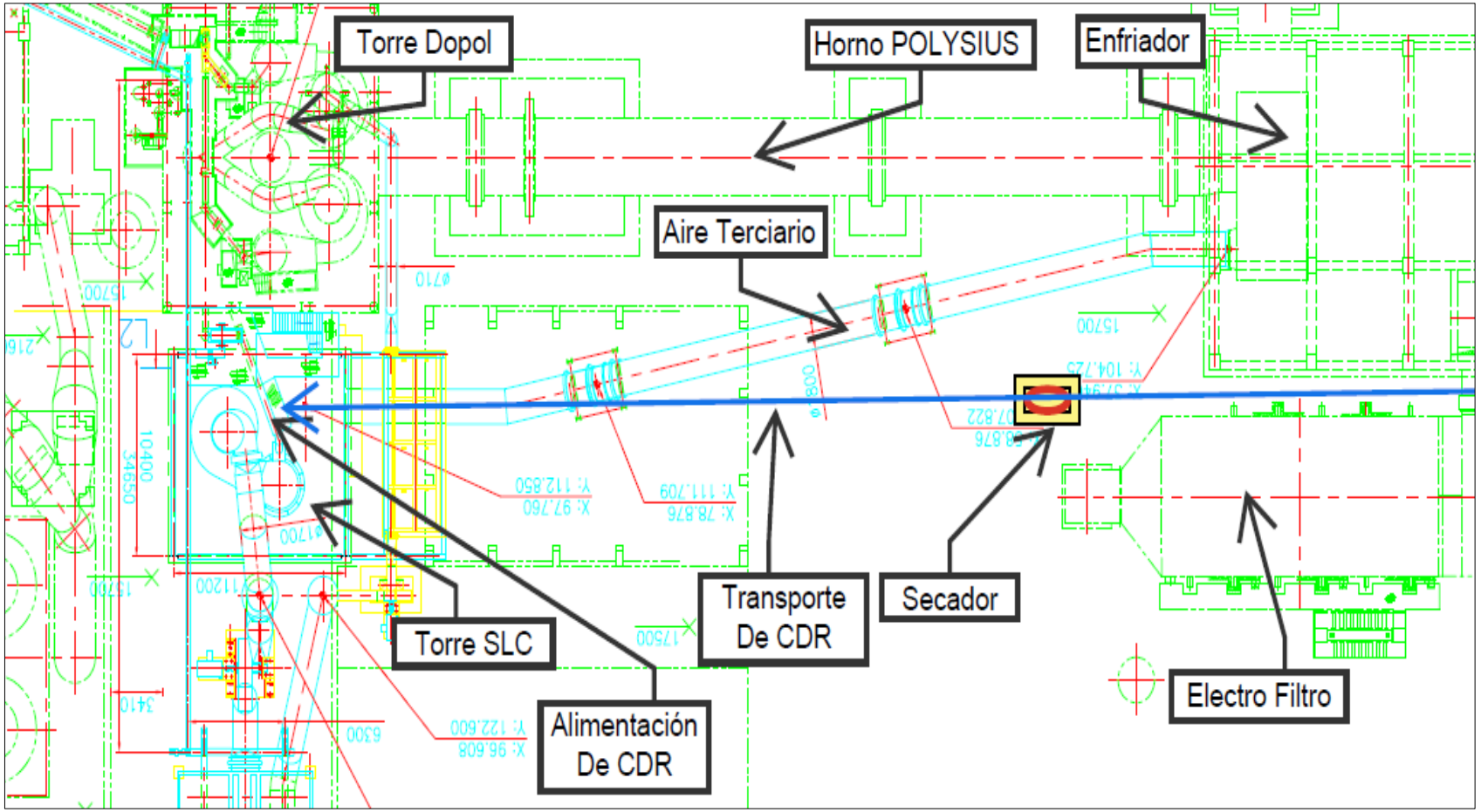
Plano de vista vertical de la línea Polysius



Nota. Obtenido de los planos de la fábrica de cemento FANCESA 2024.

Figura 4-7

Vista del plano de planta linea Plolysius.



Nota. Obtenido de los planos de la fábrica de cemento FANCESA (2024).

4.13 PROCEDIMIENTO PARA EL ACOPIO DE CDR EN LA FÁBRICA FANCESA

4.13.1 Socialización.

Como primera etapa se debería llevar a cabo la socialización con la población en general, para el recojo ordenado de los residuos generados, por días y zonas, además es posible realizarlo de manera diferenciada por tipo de residuo, también es una opción dejar en puntos autorizados para su acopio.

4.13.2 Recolección de la materia prima (Residuos Urbanos)

En la ciudad de Sucre, actualmente opera la Entidad Municipal de Aseo Urbano Sucre "EMAS", que ya cuenta con la logística y el equipamiento necesario para la recolección de residuos urbanos, y su posterior traslado a un centro de acopio, por lo que se puede continuar con el mismo procedimiento mejorando el tema de equipamiento, por otro lado, es posible incentivar la creación de emprendimientos privados que realicen, tanto la recolección como el acondicionamiento de los residuos urbanos, aceites, grasas, llantas, etc.

4.13.3 Acopio y pre acondicionamiento de los residuos urbanos

Esta etapa, requiere la construcción de una planta de tratamiento, que cuente con infraestructura, equipamiento y un organigrama operacional, que se encargue tanto del acopio, la selección de residuos urbanos, el pre acondicionamiento, para su posterior embalaje, paletizado y traslado a la fábrica de cemento FANCESA. El directo responsable para la gestión de los residuos urbanos, es la alcaldía del municipio de Sucre, por tanto, la administración estaría bajo la responsabilidad de la misma, sin descartar la adjudicación de empresas privadas, junto al brazo operativo que es la empresa de aseo urbano EMAS.

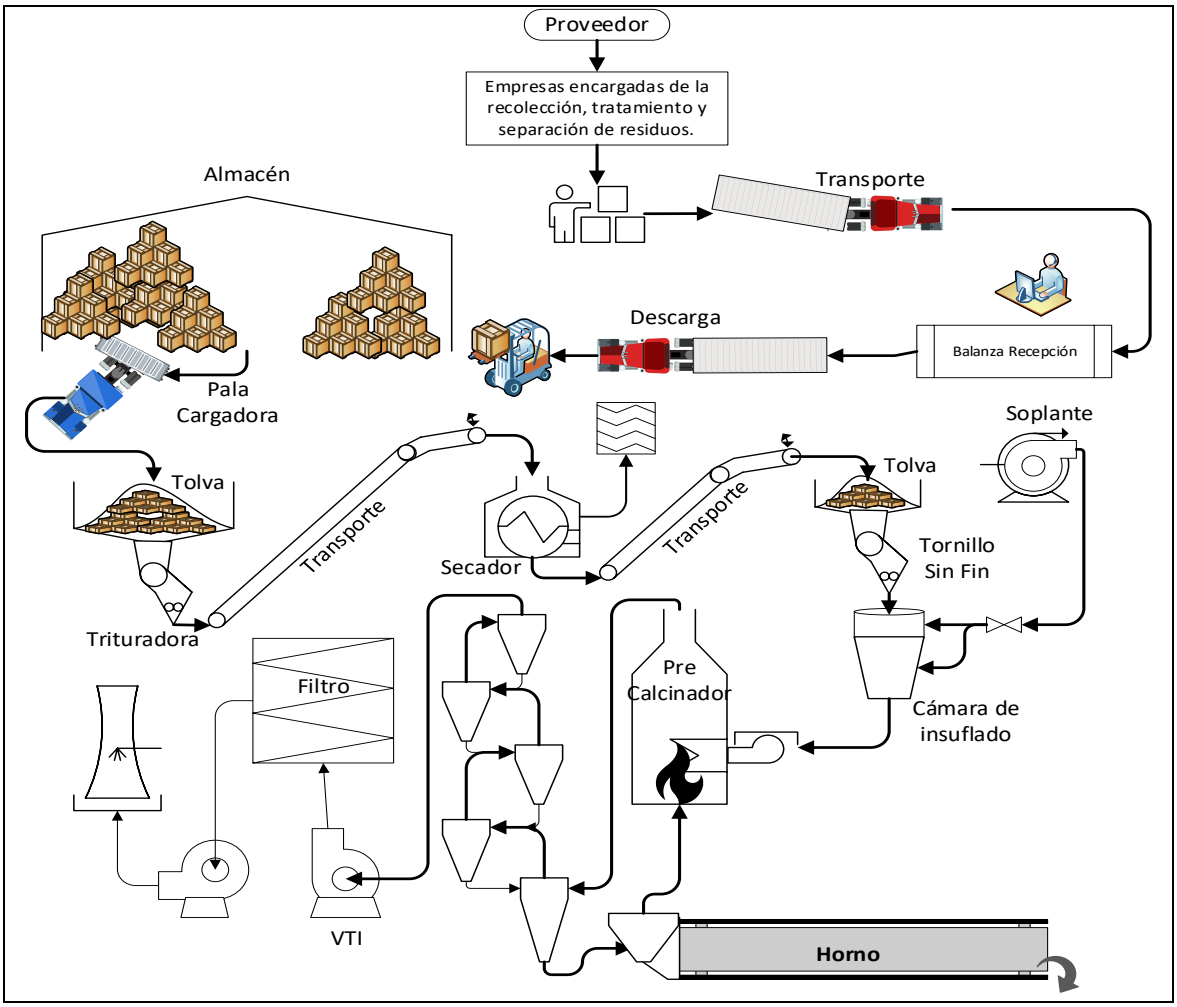
De la misma forma, los emprendimientos públicos o privados podrían realizar el acopio, acondicionamiento y la entrega de los CDR generados directo a la fábrica de cemento FANCESA de manera independiente.

4.13.4 Adquisición de los CDR pre acondicionados por FANCESA

La fábrica de cemento FANCESA con la implementación de un sistema para el uso de combustibles alternativos, se encargaría de crear la demanda y el mercado para incentivar a micro empresarios independientes y a instituciones públicas o privadas para firmar convenios para la recepción de los combustibles alternativos pre seleccionados y acondicionados, encargándose de su preparación final para su uso como combustibles derivados de residuos (CDR) en el calcinador del horno Polysius, con los controles de calidad requeridos por el proceso.

Figura 4-8

Flujograma de la logística del proceso propuesto



Nota. Obtenido de análisis de experiencias de coprocesamiento de combustibles alternativos.

4.14 COTIZACIÓN PRESUPUESTARIA DEL SISTEMA DE VALORIZACIÓN DE COMBUSTIBLES ALTERNATIVOS

En fecha del 24 de marzo del 2023 se obtuvo una cotización presupuestaria aproximada de los equipos de la empresa alemana AUMUND, por un monto de 1.910.000 euros, el detalle que involucra se describe en la tabla 4-11.

Tabla 4-11

Detalle de los ítems de la cotización

Numero	Detalle
1	Servicios de Ingeniería
2	Tolva de Alimentación
3	Alimentador con Retroceso de Protección
4	Brazo Automático de Muestreo
5	Estación de Muestreo Automático
6	Correa de Dosificación
7	Correa para Transporte de Larga Distancia
8	Transportadora de Tornillo Doble
9	Inyector de Combustible
10	Compuesta Deslizante de Alta Temperatura
11	Gabinete de Control
12	Censor de Temperatura de Flama
13	Montaje y Puesta en Marcha

Nota. Obtenido de cotización AUMUND (2023).

La cotización incluye cálculos, ingeniería para el dimensionamiento de los equipos, diseño del proyecto, construcción de los equipos necesarios, implementación y puesta en marcha del proyecto, las condiciones comerciales se muestran en el **Anexo 3**.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES

- Según datos estadísticos de la gestión 2023, la ciudad de Sucre generó 74.905 toneladas de residuos, los cuales fueron depositados en el botadero municipal. De esta cantidad, aproximadamente el 33 % posee el potencial para convertirse en combustibles alternativos debido a sus propiedades físico-químicas, lo que representa una capacidad de recuperación de alrededor de 24.644,2 toneladas por año (en base seca) de Combustibles Derivados de Residuos (CDR). Esta cantidad resulta significativa y representa un valor energético importante para su aprovechamiento.
- Los combustibles alternativos recuperados a partir de los residuos urbanos de la ciudad de Sucre tienen el potencial de sustituir hasta un 62 % del consumo energético requerido por el calcinador del horno Polysius durante una gestión fabril. Esta sustitución del gas natural permitiría un ahorro económico aproximado de 595.993 Bs mensuales, lo que representa cerca de 5.959.929 Bs al año.
- Desde el punto de vista ambiental, se estima una reducción de aproximadamente 2.072 toneladas de CO_2 emitidas a la atmósfera por mes, equivalentes a 20.721 toneladas anuales, lo que representa un impacto positivo significativo en términos de mitigación del cambio climático.
- Se cuenta con las condiciones de espacio suficiente, para la implementación de un sistema de inyección de CDR en el calcinador del horno Polysius.
- Actualmente, existen múltiples empresas con amplia experiencia en el diseño, suministro e implementación de sistemas para el aprovechamiento de combustibles alternativos, tales como Aumund, FLSmidth, Polysius, GTA Ambiental, entre otras. Por lo tanto, no se prevén inconvenientes significativos en las etapas de diseño, instalación, operación ni en la calidad del producto final, lo que garantiza la viabilidad técnica del proyecto.

- La implementación de esta práctica en la fábrica de cemento FANCESA generaría beneficios económicos y ambientales de forma directa, al reducir el requerimiento y consumo de gas natural, y contribuir al manejo eficiente de los residuos. Asimismo, permitiría incrementar su capacidad de producción y mejorar su reputación como una empresa comprometida con la sostenibilidad ambiental.

5.2 RECOMENDACIONES

- Se recomienda tercerizar parte del proceso de acondicionamiento de los residuos urbanos, como el acopio y la selección, de tal manera que FANCESA compre ya los CDR pre acondicionados en grandes volúmenes para facilitar el tema logístico.
- Se recomienda que el sistema de implementación de CDR cuente con un secador, aprovechando los gases calientes recuperados del enfriador por el electro filtro, dicho equipo no contempla la recomendación de AUMUND.
- En la reparación y modificación de la torre Dopol del horno Polysius, se recomienda contemplar la implementación el sistema para la combustión de CDR.
- Es necesario realizar acercamiento, con las empresas especializadas en el diseño e implementación de los sistemas para la combustión de CDR, para analizar las diferentes propuestas.
- Como etapas de control del proceso de valorización de residuos se debe realizar muestreos en línea en periodos determinados del material que se está inyectando a la combustión, así mismo es necesarios realizar un control constante de los gases de la chimenea, mediante analizadores de gases en línea, que muestren lecturas en tiempo real de CO, NOX, SO3, de esta manera tener una constancia que se está cumplimento con las normativas vigentes de emisión de gases.
- Es recomendable pensar en usar CDR en los 3 hornos de FANCESA a futuro, para reducir la dependencia al Gas Natural, e incrementar su capacidad de producción de clínker, para no estar restringidos por los volúmenes suministrados por YPFB.

BIBLIOGRAFÍA

Alfonso Lòpez Dìas, Fernando Blanco Silva, & Miguel A. Gutièrrez Garcìa. (2012). Mejora del Rendimiento en una Cementera Mediante el Empleo de Combustibles Alternativos. *Revista Electrónica de Medio Ambiente*, 15. http://dx.doi.org/10.5209/rev_MARE.2012.n12.396□□

Ana Gabriela Flores Huilcapi, Luis Santiago Carrera Almendáriz, & Adrián Alejandro Rodríguez Pinos. (2020, marzo). Análisis Microscópico de Clinker para Optimizar el Proceso de Clinkerización en una Fábrica Cementera. *Ciencia Digital*, *4*, 165-181.

Anders Rooma Nielsen & FLSmidth. (2012). *Quema de grandes combustibles sólidos en hornos rotativos de cemento.* DTU Library.

Arturo. (2020, enero 1). Combustibles alternos, necesarios para preservar el medio ambiente. *Revista Contacto*. https://revistacontacto.com.mx/combustibles-alternos-necesarios-para-preservar-el-medio-ambiente/

Barbara Zeschman Lahi. (2020). *Coincineración de Residuos en Plantas de Cemento* (Agencia Federal de Medio Ambiente, Vol. 202). https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/5750/publikationen/2020_11_05_texte_202_2020_abfallverbrennung_zementwerke_1.pdf

CADECOCRUZ. (2023). *Votorantim Cimentos utiliza 1,3 millones de toneladas/año de residuos y biomasa en la producción ind*. Cadecocruz. https://cadecocruz.org.bo/index.php?op=200&gr=1&nw=9154

Carlos Alberto Alvarez Bravo, Manuel E. Cortés Cortés, & Mario Moreira Quiñones. (2017, diciembre). Método Para Determinar las Fases Minerales del Clínker y su Influencia

en Reducir los Daños al Medio Ambiente. *Revista Científica de la Universidad de Cienfuegos, 9 (5)*, 293-300.

CEMBUREAU, Oficemen, Fundación CEMA, & Sustainable Energy Europe. (2009). *Producción Sostenible de Cemento* (p. 16).

CEMEX & Jorge Luis Pérez. (2023). *De residuos a combustible*. Corporate Website. https://www.cemex.com/es/w/de-residuos-a-combustible

Correo Del Sur. (2023, junio 25). *EMAS no Recicla Basura Desde 2019 y 100% de Desechos va al Vertedero*. CORREO DEL SUR. https://correodelsur.com/local/20230625/emas-no-recicla-basura-desde-2019-y-100-de-desechos-va-al-vertedero.html

DECRETO SUPREMO No. 26736 REGLAMENTO AMBIENTAL PARA ELSECTOR INDUSTRIAL MANUFACTURERO -RASIM-, 82 (2002).

Diana Carolina Cedano de León. (2012). *VALORIZACIÓN ENERGÉTICA DE RESIDUOS COMO COMBUSTIBLES ALTERNATIVOS EN PLANTAS CEMENTERAS*.

FANCESA. (2021). *Empresa | Fancesa*. https://www.fancesa.com/empresa/

Fernández & Oficemen. (2021, noviembre). *Valorización Energética En Hornos De Cemento*.

FLSmidth [@FLSmidth]. (2021, marzo 31). *#AI is becoming more commonplace in everyday life. With the launch of ECS/ProcessExpert® V8.5, we are bringing AI technologies to advanced process control. But what exactly does this mean for our customers? Read more: Https://flsmidth.eco/2QObk6l #HillheadDigital #digitalisation https://t.co/GFq9LSWRBA* [Tweet]. Twitter. https://twitter.com/FLSmidth/status/1377198173035376640

FLSmidth & HGP. (2015). *Conceptos Básicos del Piroproceso*.

Fundación Laboral Del Cemento Y El Medio Ambiente. (2022). *Recuperación de Residuos en Fábricas de Cemento y Protección del Clima*. www.recuperaresiduosencementeras.or

G. Jayaraman. (2012). *Manual On Thermal Energy Efficiency In Cement Industry*.

GCP Applied Technologies. (2021, julio 8). *Uso de Combustibles Alternativos en la Producción de Cemento GCP Applied Technologies*. https://gcpat.mx/es-la/about/news/blog/using-alternative-fuels-cement-production

Google Maps. (2023). *Google Maps*. Google Maps. https://www.google.com/maps/place/FANCESA+-+F%C3%A1brica+Nacional+de+Cemento,+S.A./@-19.0076184,-65.2420309,17z/data=!3m1!4b1!4m6!3m5!1s0x93fbc8e28c2fbf8f:0xc26238d30a7a597f!8m2!3d-19.0076235!4d-65.239456!16s%2Fg%2F11b77637b5?entry=ttu

Holcim. (2001). *Cocción de Clínker Aspectos Tecnológicos de los Materiales*.

HOLCIM España. (2019). *Consumo de combustibles alternativos*. https://www.holcim.es/consumo-de-combustibles-alternativos

Instituto Nacional De Estadística. (2024). *Residuos Sólidos—INE*. Residuos Sólidos. https://www.ine.gob.bo/index.php/medio-ambiente/residuos-solidos-cuadros-estadisticos/

Jenny Maritza Rincón Taboada. (2009). *EVALUACIÓN DEL CONSUMO CALÓRICO EN LA PRODUCCIÓN DE CLINKER EN UN HORNO ROTATORIO VÍA SECA A PARTIR DE UN ANÁLISIS BASADO EN BALANCES DE MASA Y ENERGÍA* (p. 76).

Jesica Bañuelos Garcìa. (2016). *"Implementación Del Uso De Combustibles Derivados De Residuos Sólidos En Sustitución De Combustibles Fósiles, En La Industria Cementera"*. Instituto Politécnico Nacional.

Lechtenberg, D., & Hansjörg, D. (2017). *Combustibles alternativos para hornos rotatorios en la producción de clínker*. https://www.retema.es/noticia/combustibles-alternativos-para-hornos-rotatorios-en-la-produccion-de-clinker-WiK6u

Ley N° 755, del 28 de octubre de 2015. LEY DE GESTIÓN INTEGRAL DE RESIDUOS (2015).

Miguel Ángel Sanjuán Barbudo & Servando Chinchón Yepes. (2014). *INTRODUCCIÓN A LA FABRICACIÓN Y NORMALIZACIÓN DEL CEMENTO PORTLAND*. PUBLICACIONES DE LA UNIVERSIDAD DE ALICANTE. http://hdl.handle.net/10045/45347

Percy Castillo Niera. (2000). *MANUAL PRÁCTICO DE COMBUSTION Y CLINKERIZACIÓN*.

Philip A Alsop. (2019). *The Cement Plant Operations Handbook* (Seventh Edition). Tradeship Publications Ltd.

Plilip A Alsop. (2019). *The Cement Plant Operations Handbook* (Seventh Edition). Tradeship Publications Ltd.

¿Qué es el Combustible Derivado de Residuos (CDR)? » Proyectos llave en mano para el tratamiento y reciclado de residuos. - GTA Ambiental. (2021, septiembre 28). https://gtaambiental.com/combustible-derivado-residuos-cdr/

RASIM ANEXO 12-A LÍMITES PERMISIBLES PARA EMISIONES ATMOSFÉRICAS (2002).

Una guía para la gestión segura de combustibles derivados de residuos en cementeras. (2018, noviembre 20). Residuos Profesional. https://www.residuosprofesional.com/guia-combustibles-residuos-cementeras/

Unicersidad de Coruña & Cementos. (2001). *Ligantes. Cementos—Materiales de construccion—Apuntes, Apuntes de Materiales y Sistemas Constructivos*.

Universidad de Coruña & Cementos. (2001). *Ligantes. Cementos—Materiales de Construccion—Apuntes, Apuntes de Materiales y Sistemas Constructivos*.

Yuri Esther Estrella Condezo. (2017). *Modelamiento Termodinámico Del Proceso De Clinkerización En Una Planta De Producción De Cemento A Partir De Un Análisis Basado En Balances De Masa Y Energía*.

ANEXOS

ANEXO 1: Límites De Emisiones En La Industria Cementera Normas Internacionales**.**

Parámetros	Detalle	Zementwerke BVT (2013) Valores de Emisiones (BATAEL)	Requisitos para los gases de escape	TA luft (2002) limites
Polvo	emisiones de polvo en operaciones	<10 mg/mN3	–	20 mg/mN3 promedio diario, no superar 30mg/mN3 con mediciones puntuales
Gases de escape	emisiones de polvo de los gases de escape horno	< 10 -20 mg/mN3 promedio día	<10 mg/mN3	10 mg/mN3 promedio diario, no superar 30mg/mN3 con mediciones puntuales
Polvo	emisiones de polvo de los gases de escape proceso de refrigeración y molienda	< 10 -20 mg/mN3 promedio día	–	10 mg/mN3 promedio diario, no superar 30mg/mN3 con mediciones puntuales
Óxidos de Nitrógeno (Nox)	Gases de escape horno / Pre calcinador	<200 - 450 mg /mN3 promedio	200 mg/mN3	500 mg/mN3 Promedio día
Amoniaco (NH3)	Cuando se utiliza Reducción No Catalítica Selectiva	<30 - 50 mg/mN3 valor medio diario	30 mg/mN3 valor medio diario, cuando se usa SCR o SNCR	30 mg/mN3 promedio diario, cuando se usa SCR o SNCR
Óxidos de Azufre (Sox) reportado como SO2	Gases de escape de hornos	<50-40mg/mN3 promedio diario	50mg/mN3 promedio diario	350mg/mN3 promedio diario
Cloruro de Hidrogeno (HCl)	Gases de escape del horno	<10 mg/mN3 promedio día	<10 mg/mN3	<30 mg/mN3 promedio día
Fluoruro de Hidrogeno (HF)	Gases de escape del horno	<1mg/mN3 promedio día	<1mg/mN3	3mg/Mn3 promedio día

Mercurio	Gases de escape horno	<0,05 mg/mN3	0,03 mg/mN3 promedio día	0,05 mg/mN3 promedio día
Oligoelementos totales	Cocción del horno	<0,5 mg/mN3	0,5 mg/mN3	0,5 mg/mN3 promedio día
Cadmio total+ talio	Gases de escape horno	<0,5 mg/mN3	0,5 mg/mN3	0,5 mg/mN3 promedio día

Fuente: (Barbara Zeschman Lahi, 2020)

ANEXO 2: RASIM 12ª Sustancias Inorgánicas Contenidas En Material Particulado.

CLASE	N°	SUSTANCIA
I	1	Cadmio y sus componentes, dado como Cd
	2	Mercurio y sus componentes, dado como Hg
	3	Talio y sus componentes, dado como Tl
II	4	Arsénico y sus componentes, dado como As
	5	Cobalto y sus componentes, dado como Co
	6	Níquel y sus componentes dado como Ni
	7	Selenio y sus componentes, dado como Se
	8	Telurio y sus componentes, dado como Te
III	9	Antimonio y sus componentes, dado como Sb
	10	Cianuro y sus componentes, dado como CN^-
	11	Cobre y sus componentes, dado como Cu
	12	Cromo y sus componentes, dado como Cr
	13	Flúor y sus componentes, dado como F
	14	Manganeso y sus componentes, dado como Mn
	15	Paladio y sus componentes, dado como Pd
	16	Platino y sus componentes, dado como Pt
	17	Plomo y sus componentes, dado como Pb
	18	Rodio y sus componentes, dado como Rh
	19	Vanadio y sus componentes, dado como V
	20	Zinc y sus componentes, dado como Zn

RASIM 12ª Sustancias Inorgánicas Contenidas En Gases o Vapores

CLASE	N°	SUSTANCIA
I	1	Arsenita - H_3As
	2	Cianocloruro - ClCN
	3	Fosgeno - Cl_2CO
	4	Fosfina - H_3P
II	5	Bromo y sus compuestos dado como ácido bromhídrico - HBr
	6	Cianuro de hidrógeno - HCN
	7	Disulfuro de carbono - CS_2
	8	Flúor y sus vapores, dados como ácido fluorhídrico - HF
III	9	Cloro y sus compuestos, dado como ácido clorhídrico - HCl

RASIM 12ª Sustancias Orgánicas

CLASE	Nº	COMPUESTO	FORMULA	Nº	COMPUESTO	FORMULA
I	1	Acetaldehído	C_2H_4O	22	Formaldehido	CH_2O
	2	Ácido acrilico	$C_3H_4O_2$	23	2-Furaldehido	$C_5H_4O_2$
	3	Ácido cloro acético	$C_2H_3ClO_2$	24	Metilacrilato	$C_4H_6O_2$
	4	Acido fórmico	CH_2O_2	25	Metilamina	CH_5N
	5	Acido maléico anhídrido	$C_4H_2O_3$	26	4-Metil-m–fenileno disocianato	$C_9CHN_2O_2$
	6	Anilina	C_6H_7N	27	Nitrocresoles	$C_7H_7NO_2$
	7	Bifenil	$C_{12}H_{10}$	28	Nitrofenol	$C_6H_5NO_2$
	8	Cloracetaldehido	C_2H_3ClO	29	Nitrofenoles	$C_6H_5NO_3$
	9	Clorometano	CH_3Cl	30	Nitrotoluenos	C_7HNONO_2
	10	α–Clorotolueno	C_7H_7Cl	31	o-Toluidina	C_7H_9N
	11	Cresoles	C_7H_8O	32	Piridina	C_5H_5N
	12	1,2-Diclorobenceno	$C_6H_4Cl_2$	33	2-Propenal	C_3H_4O
	13	1,2-Dicloroetano	$C_2H_4Cl_2$	34	1,1,2,2-Tetracloroetano	$C_2H_2Cl_4$
	14	Diclorofenoles	$C_6H_4Cl_2O$	35	Tetraclorometano	CCl_4
	15	1,1-Dicloroetileno	$C_2H_2Cl_2$	36	Tioalcohol	
	16	Dietilamina	$C_4H_{11}N$	37	Tioeter	
	17	Dimetilamina	C_2H_7N	38	1,1,2-Tricloroetano	$C_2H_3Cl_3$
	18	1,4-Dioxano	$C_4H_8O_2$	39	Triclorofenoles	$C_6H_3OCl_3$
	19	Etilacrilato	$C_5H_8O_2$	40	Triclorometano	$CHCl_3$
	20	Etilamina	C_2H_7N	41	Trietilamina	$C_6H_{15}N$
	21	Fenol	C_6H_6O	42	Xilenol	$C_8H_{10}O$

II	1	Ácido acético	$C_2H_4O_2$	21	2,2-Iminodietanol	$C_4H_{11}NO_2$
	2	Ácido propionico	$C_3H_6O_2$	22	Metil formiato	$C_2H_4O_2$
	3	2-Butoxietanol	$C_6H_{14}O_2$	23	Metilacetato	$C_3H_6O_2$
	4	Butiraldehido	C_4H_8O	24	Metilbenzoato	$C_8H_8O_2$
	5	Ciclohexanona	$C_6H_{10}O$	25	Metilciclohexanona	$C_2H_{12}O$
	6	Clorobenceno	C_6H_5Cl	26	Metilmetacrilato	$C_5H_8O_2$
	7	2-Cloro 1,3-butadieno	C_4H_5Cl	27	2-Metoxietanol	$C_3H_8O_2$
	8	2-Cloropropano	C_3H_7Cl	28	n,n-dimetil formamida	C_3H_7NO
	9	Di (2-etilhexil) ftalato	$C_{24}H_{38}O_4$	29	Naftalina	$C_{10}H_8$
	10	2,6-Dimetil heptanona	$C_7H_{14}O$	30	Propionaldehido	C_3H_6O
	11	1,4-Diclorobenzol	$C_6H_4Cl_2$	31	Tetracloroetileno	C_2Cl_4
	12	1,1-Dicloroetano	$C_2H_4Cl_2$	32	Tetrahidrofurano	C_4H_8O
	13	Disulfuro de carbono	CS_2	33	Tolueno	C_7H_8
	14	Estireno	C_8H_8	34	Tricloro etileno	C_2HCl_3
	15	Etilbenceno	C_8H_{10}	35	1,1,1-Tricloroetano	$C_2H_3Cl_3$
	16	2-Etoxietanol	$C_4H_{10}O_2$	36	Trimetil benceno	C_9H_{12}
	17	Furfuril alcohol	$C_5H_6O_6$	37	Vinilacetato	$C_4H_6O_2$
	18	Isopropenil benceno	C_9H_{10}	38	Xilenoles (excepto 2,4 xilenol)	$C_8H_{10}O$
	19	Isopropil benceno	C_9H_{12}	39	Xilol	C_8H_{10}
III	1	Acetato de butilo	$C_6H_{12}O_2$	13	Diclorometano	CH_2Cl_2
	2	Acetona	C_3H_6O	14	Etanol	C_2H_6O
	3	Alquilalcoholes		15	Etilacetato	$C_4H_8O_2$
	4	2-Butanona	C_4H_8O	16	Etilen glicol	$C_2H_6O_2$
	5	Cloroetano	C_2H_5Cl	17	Hidrocarburos parafinosos (excepto	

					etano)	
	6	Dibutileter	$C_8H_{18}O$	18	Hidrocarburos olefinosos (Excepto 1,3-butadieno)	
	7	1,2-Dicloroetileno	$C_2H_2Cl_2$	19	4-Hidroxi-4-metil-2-pentanona	$C_6H_{12}O_2$
	8	Diclorodifluorometano	CCl_2F_2	20	Metanol	CH_4O
	9	Diclorofenol	$C_6H_4Cl_2O$	21	4-Metil 2-pentanona	$C_6H_{12}O$
	10	Dietil eter	C_4H_{10}	22	n – Metilpirrolidona	C_5H_9NO
	11	Diisopropil eter	$C_6H_{14}O$	23	Pireno	$C_{10}H_{16}$
	12	Dimetil eter	C_2H_6O	24	Triclorofluorometano	CCl_3F

RASIM 12ª Sustancias Cancerígenas

CLASE	Nº	SUSTANCIA
I	1	Asbesto (Crisolita, crosidolita, amosita, antofilita, actinolita y tremolita) como polvo fino (< 2.5 μm)
	2	Benzo(a)pireno.
	3	Berilio y sus enlaces en forma gaseosa, conocidas como Be –Dibenzoantraceno
	4	2-Naftil-amina.
II	5	Cobalto (en forma polvo respirable, / aerosoles de cobalto metálico y sal de cobalto (difícilmente soluble) declarados como Co
	6	3,3-diclorobenceno
	7	Dimetil sulfato
	8	Enlaces de Cromo en forma respirable, así como cromato de calcio, cromo III cromato, cromato de estroncio, cromato de zinc, declarados como Cr
	9	Etilenamina
	10	Níquel en forma de polvo respirable/ aerosoles de níquel metálico, níquel sulfhidrico y minerales sulfúricos, óxido de níquel y carbonato de níquel, níquel tetracarbónico, declarados como Ni
	11	Trióxido de arsénico y pentóxido de arsénico, ácidos arsénicos y sus sales, en forma respirable declarados como As
III	12	Acrilonitrilo
	13	Benceno
	14	Benzol
	15	1,3-butadieno
	16	1-cloro- 2,3- epoxipropano (epicloridrina)
	17	Cloruro de vinilo
	18	1,2-Dibrometano
	19	1,2- epoxipropano
	20	Hidracina
	21	Oxido de etíleno

ANEXO 3 Cotización AUMUND.

AUMUND FÖRDERTECHNIK

AUMUND Fördertechnik GmbH
P.O. Box 10 12 61 • 47477 Rheinberg • Germany

Fabrica Nacional de Cemento SA (Fancesa)
Planta Industrial Cal Orcko
Sucre
BOLÍVIA

Conveying Technology
Storage and Silo Technology
Discharge Systems
Bulk Handling

Name: Boris Sassenrath
Phone: +49 1743436490
E-Mail: sassenrath@AUMUND.de

your msg. dtd	your ref.	our ref.	date
			24/Mar/2023

Our budgetary quotation no.: P-23.259670-00
Your enquiry:
Project: FANCESA

We thank you very much for the above-mentioned inquiry and your interest in our products. Because of the limited time during the site visit in the plant a detailed measurement of the existing footprint was not possible. For this reason, we have prepared based on existing data's a first Layout 001 in order to allow the appr. Technical and commercial estimation of the required RDF handling system.

The complete "General Terms and Conditions for Deliveries and Services" of AUMUND Fördertechnik GmbH are available on the website www.aumund.de.

We would appreciate a confirmation that the technical and commercial solution is suitable in order to prepare (short term) another site visit to investigate the existing site and to turn the Budget into a reliable quote.

3 PRICE:

The proposed prices are net, exclusive of any local taxes or fees.

Because of the current price fluctuation of the steel price and electric Components, this non-binding budgetary proposal is only indication for the time being.

For any commercial discussion we will provide the Price with validity of 5 days.

Project Fancesa
Layout 001

	Partname	AUMUND	Option	FANCESA
Pos. 10	Infeed Hopper 120m³	X		
Pos. 20	Tumble back feeder	X		
Pos. 30	Motor slide for sampling station	X		
Pos. 40	Sample station	X		
Pos. 50	Dosing Belt	X		
Pos. 60	FuelBelt long distance conveyor	X		
Pos. 70	Double screw	X		
Pos. 80	FuelJector	X		
Pos. 90	High temp.slide gate	X		
Pos. 900	El. control	X		
Pos. 910	Level control	X		
Pos. 920	Hot Spot	X		
Pos. 930	Sheeting			X
Pos. 940	Steelwork			X
Pos. 950	Supervisor		Daily rate	
Pos. 960	Cold commissioning		Daily rate	
Pos. 970	Warm commissioning		Daily rate	
Pos. 980	Transport EXW /DAP/FOB/CIF		X	
Pos. 990	Engineering	X		
Total		**1.910.000 €**		