



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

Diseño de un sistema de adición de cenizas volantes en el proceso de molienda del cemento de uso general en la planta Chimborazo de la Unión Cementera Nacional

JOSÉ PATRICIO PILCO PILCO

Trabajo de Titulación modalidad: Proyectos de Investigación y Desarrollo, presentado ante el Instituto de Posgrado y Educación Continua de la ESPOCH, como requisito parcial para la obtención del grado de:

MAGÍSTER EN MEJORAMIENTO DE PROCESOS, MENCIÓN EN OPTIMIZACIÓN Y PRODUCTIVIDAD INDUSTRIAL

Riobamba – Ecuador

OCTUBRE 2023

© 2023, José Patricio Pilco Pilco

Se autoriza la reproducción total o parcial con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento, siempre y cuando se reconozca el Derecho de autor.

DECLARACIÓN DE AUTENTICIDAD

Yo, José Patricio Pilco Pilco, declaro que el presente **Trabajo de Titulación modalidad Proyectos de Investigación y Desarrollo** es de mi autoría y los resultados del mismo son auténticos y originales. Los textos constantes en el documento que provienen de otra fuente están debidamente citados y referenciados.

Como autor, asumo la responsabilidad legal y académica de los contenidos de este proyecto de investigación de maestría, el patrimonio intelectual pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Riobamba, 01 de septiembre del 2023

A handwritten signature in blue ink, enclosed in a large, hand-drawn oval. The signature is stylized and appears to read 'José Patricio Pilco Pilco'.

Ing. José Patricio Pilco Pilco

CI: 0604279182



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
EL TRIBUNAL DEL TRABAJO DE TITULACIÓN CERTIFICA QUE:

El Trabajo de Titulación modalidad **Proyectos de Investigación y desarrollo**, titulado **Diseño de un sistema de adición de cenizas volantes en el proceso de molienda del cemento de uso general en la planta Chimborazo de la Unión Cementera Nacional**, de responsabilidad del señor **José Patricio Pilco Pilco**, ha sido minuciosamente revisado por los Miembros del Tribunal del Trabajo de Titulación, el mismo que cumple con los requisitos científicos, técnicos, legales, en tal virtud el Tribunal autoriza su presentación.

Ing. Juan Carlos Cayán Martínez, Mgtr.
PRESIDENTE

Ing. Jaime Iván Acosta Velarde, Mgtr.
DIRECTOR

Ing. Julio Cesar Moyano Alulema, Mgtr.
MIEMBRO

Ing. Sayuri Monserrath Bonilla Novillo, Mgtr.
MIEMBRO

Riobamba, octubre 2023

DEDICATORIA

Este trabajo está dedicado para mi esposa Tania Jiménez, por su paciencia y su apoyo para alcanzar este objetivo. También para mis dos angelitos Manuelito y mi bebito que iluminan mi camino desde el cielo.

José

AGRADECIMIENTO

Agradecer a Dios por brindarme de salud para alcanzar esta meta y darme fortaleza en los momentos más difíciles. También a la familia de mi esposa y mi familia en especial a mí querida madre Natividad.

Mi agradecimiento a todos los docentes de esta noble institución que me compartieron sus conocimientos para formarme profesional y personalmente, a mi grupo de tutores que me compartieron sus conocimientos para que esta investigación sea una información útil para futuras investigaciones.

También a la Unión Cementera Nacional Planta Chimborazo, que me permitieron realizar este proyecto de investigación, siempre cuidando la integridad de la información facilitada,

José

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN.....	xviii
ABSTRACT	xix

CAPÍTULO I

1.	INTRODUCCIÓN.....	1
1.1.	Contexto	1
1.2.	Planteamiento del problema	2
1.3.	Situación problemática	3
1.4.	Formulación del problema.....	3
1.5.	Preguntas directrices.....	3
1.6.	Justificación.....	4
1.7.	Objetivos.....	4
1.7.1.	<i>Objetivo general</i>	4
1.7.2.	<i>Objetivos específicos</i>	4
1.8.	Hipótesis	5

CAPÍTULO II

2.	MARCO TEÓRICO	6
2.1.	Antecedentes.....	6
2.2.	Bases teóricas	8
2.2.1.	<i>Diseño de experimentos</i>	8
2.2.2.	<i>Experimento</i>	8
2.2.3.	<i>Unidad experimental</i>	8
2.2.4.	<i>Variables y niveles</i>	9
2.2.5.	<i>Niveles y tratamientos</i>	9
2.2.6.	<i>Fases de un diseño de experimentos</i>	9
2.2.7.	<i>Productividad</i>	11
2.2.8.	<i>Distribución de planta</i>	11
2.2.9.	<i>Método de Güerchet</i>	11
2.2.10.	<i>Simulación</i>	12
2.2.11.	<i>FlexSim</i>	14

2.3.	Marco conceptual.....	14
2.3.1.	<i>Terminologías de la investigación</i>	14
2.4.	Marco legal.....	15
2.4.1.	<i>Constitución 2008</i>	15
2.4.2.	<i>Plan Nacional de Desarrollo (PND)</i>	16
2.4.3.	<i>Ley del Sistema Ecuatoriano de la Calidad</i>	16
2.4.4.	<i>Ministerio de Industria y Productividad, MIPRO</i>	16
2.4.5.	<i>Instituto Ecuatoriano de Normalización, INEN</i>	17
2.4.6.	<i>Ley Orgánica del Consumidor</i>	18
2.4.7.	<i>Ley de Gestión Ambiental en el Ecuador</i>	19
2.5.	Hipótesis	19
2.6.	Identificación de variables	20
2.7.	Operacionalización de variables	21
2.8.	Matriz de consistencia.....	23

CAPÍTULO III

3.	METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN	24
3.1.	Tipo y diseño de estudio	24
3.2.	Área de estudio	24
3.3.	Población de estudio del diseño experimental	24
3.4.	Selección de muestra del diseño experimental.....	25
3.5.	Procedimiento y técnica de recolección de datos	25
3.6.	Localización de la planta y proceso de molienda de cemento	26
3.10.1.	<i>Localización de la planta de producción Cemento Chimborazo</i>	26
3.10.2.	<i>Localización del proceso de molienda</i>	27
3.11.	Descripción del proceso de producción de cemento.	28
3.11.1.	<i>Clinkerización</i>	29
3.11.2.	<i>Molienda de Cemento</i>	34
3.12.	Diagrama de recorrido inicial del proceso de producción	39
3.13.	Cálculos de métricas del proceso de molienda de cemento de uso general en el molino CM4	41
3.14.	Capacidad de producción inicial de molino CM4	42
3.15.	Composición inicial de cemento de uso general (GU)	44
3.16.	Productividad y costo de producción del cemento de uso general (Según el porcentaje de adición de clinker).....	46
3.16.1.	<i>Productividad actual de clinker</i>	46

3.16.2.	<i>Costo de producción actual</i>	46
3.17.	Layout actual planta de producción de cemento de uso general en molino CM4	47
3.18.	Procedimiento experimental aplicado	48
3.18.1.	<i>Determinación de variables de estudio.</i>	48
3.18.2.	<i>Planeación y ejecución del diseño de experimento de adición de cenizas volantes al proceso de molienda de cemento de uso genera.</i>	48
3.18.3.	<i>Análisis de datos</i>	50
3.18.4.	<i>Interpretación de resultados del diseño experimental del sistema de adición de cenizas volantes</i>	50
3.18.5.	<i>Validación de la hipótesis del diseño experimental del sistema de adición de cenizas volantes</i>	51

CAPÍTULO IV

4.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	52
4.1.	Declaración de hipótesis	52
4.2.	Diseño de experimentos	52
4.2.1.	<i>Procedimiento de ensayos para adición de ceniza en la molienda de cemento GU</i> ..	52
4.2.2.	<i>Definición del problema</i>	53
4.2.3.	<i>Selección de factores y variables</i>	54
4.2.3.1.	<i>Clinker</i>	54
4.2.3.2.	<i>Caliza</i>	54
4.2.3.3.	<i>Puzolana</i>	54
4.2.3.4.	<i>Yeso</i>	55
4.2.3.5.	<i>Cenizas Volante</i>	55
4.2.4.	<i>Selección de la variable de respuesta</i>	56
4.2.5.	<i>Elección de diseño de experimento</i>	57
4.2.6.	<i>Realización de experimento</i>	58
4.2.7.	<i>Análisis de Datos</i>	59
4.3.	Verificación de hipótesis	61
4.4.	Diseño de experimento con dos factores (clinker y cenizas volantes)	61
4.5.	Productividad de clinker con el sistema de adición de cenizas volantes	65
4.5.1.	<i>Declaración de hipótesis de productividad</i>	65
4.5.2.	<i>Productividad del clinker con la adición de cenizas volantes</i>	66
4.5.3.	<i>Costo del clinker con la adición de cenizas volantes</i>	67
4.5.4.	<i>Declaración de hipótesis de costo de clinker en la producción de cemento GU con la adición de ceniza.</i>	68

4.5.5.	<i>Costo del clinker en la producción de cemento de uso general con la adición de cenizas volantes</i>	68
4.5.6.	<i>Prueba de Hipótesis</i>	69
4.6.	Porcentaje de adición de cenizas volantes	70
4.7.	Capacidad de adición de cenizas volantes	70
4.8.	Capacidad de producción teórica de cemento uso general con cenizas volantes ..	72
4.9.	Discusión de resultados	73

CAPÍTULO V

5.	PROPUESTA	75
5.1.	Diagramas de proceso de molienda de cemento de uso general con adición de cenizas volantes	75
5.1.1.	<i>Descripción del proceso del sistema de adición de las cenizas volantes en el molino de cemento CM4</i>	76
5.1.1.1.	<i>Recepción de cenizas volantes</i>	76
5.1.1.2.	<i>Almacenamiento de cenizas volantes</i>	76
5.1.1.3.	<i>Dosificación de cenizas volantes</i>	77
5.1.1.4.	<i>Compuertas de descarga o válvula divisor</i>	77
5.1.1.5.	<i>Selección de maquinaria y equipo</i>	77
5.1.1.6.	<i>Silo de almacenamiento</i>	77
5.1.1.7.	<i>Ventilador</i>	78
5.1.1.8.	<i>Compuertas Guillotina</i>	79
5.1.1.9.	<i>Válvula rotativa</i>	80
5.1.1.10.	<i>Dosificadora</i>	80
5.1.1.11.	<i>Compuerta divergente de almacenamiento</i>	81
5.2.	Distribución de planta del sistema de adición de cenizas volantes en el molino de cemento	82
5.2.1.	<i>Método de distribución Güerchet</i>	82
5.2.2.	<i>Descripción del proceso de producción de cemento de uso general con la adición de cenizas volantes</i>	82
5.2.3.	<i>Definición de dimensiones de los equipos</i>	82
5.2.4.	<i>Cálculo de áreas requeridas para el sistema de adición de cenizas volantes</i>	83
5.2.5.	<i>Definición de superficies para establecer el layout</i>	84
5.2.6.	<i>Propuestas de las instalaciones industriales</i>	86
5.2.7.	<i>Layout de la propuesta del sistema de adición de cenizas volantes</i>	87
5.2.8.	<i>Diagrama de recorrido</i>	89

5.3.	Evaluación económica de instalación del sistema de adición de cenizas volantes	91
5.4.	Simulación	93
5.4.1.	<i>Simulación del proceso de producción actual de cemento de uso general, sin el sistema de adición de cenizas volantes</i>	93
5.4.2.	<i>Productividad de cemento de uso general sin la adición de cenizas volantes</i>	95
5.4.3.	<i>Simulación del proceso de producción propuesto de cemento de uso general, con el sistema de adición de cenizas volantes</i>	95
	CONCLUSIONES	102
	RECOMENDACIONES	103
	GLOSARIO	
	BIBLIOGRAFÍA	
	ANEXOS	

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1-2:	Punto de diseño y operación.	9
Tabla 2-2:	Operacionalización de la variable independiente.....	21
Tabla 3-2:	Operacionalización de la variable dependiente.....	22
Tabla 4-2:	Matriz de consistencia	23
Tabla 1-3:	Eficiencia operativa del molino CM4.....	41
Tabla 2-3:	Eficiencia operacional del molino CM4.....	42
Tabla 3-3:	Capacidad de producción inicial del molino CM4.....	42
Tabla 4-3:	Dosificación inicial de materia prima para la producción de cemento de uso general	44
Tabla 5-3:	Matriz de control de calidad del cemento de uso general GU	45
Tabla 6-3:	Matriz de control de calidad del cemento de uso general. Dosificación	46
Tabla 1-4:	Parámetros químicos y mineralógicos del cemento de uso general	55
Tabla 2-4:	Análisis químico y mineralógico del cemento de uso general con adición de cenizas volantes	55
Tabla 3-4:	Resistencia a la compresión del cemento GU- Norma INEN 488	56
Tabla 4-4:	Parámetros de resistencia del cemento de uso general	56
Tabla 5-4:	Niveles de adición de materiales para el diseño de experimento	57
Tabla 6-4:	Resumen del diseño de experimentos.....	57
Tabla 7-4:	Estructura de alias del diseño de experimento	57
Tabla 8-4:	Diseño exponencial fraccionado $2k - 2$	58
Tabla 9-4:	Resultado de experimentos – Primera Fase	58
Tabla 10-4:	Análisis de varianza	61
Tabla 11-4:	Resumen del diseño factorial de múltiples niveles.....	61
Tabla 12-4:	Diseño experimental mixto, 3 x 2	62
Tabla 13-4:	Resultado de resistencia de ensayos de laboratorio.....	63
Tabla 14-4:	Resumen del modelo	64
Tabla 15-4:	Análisis de varianza del diseño del experimento	64
Tabla 16-4:	Productividad del Clinker con la adición de cenizas volantes	66
Tabla 17-4:	Estadísticas descriptivas de la productividad.....	66
Tabla 18-4:	Prueba de hipótesis de productividad del clinker con la adición de cenizas volantes.....	67
Tabla 19-4:	Costo del clinker por tonelada de cemento GU adición de cenizas volantes	68
Tabla 20-4:	Estadísticas descriptivas del costo de clinker en la producción de cemento con la adición de cenizas volantes.....	68

Tabla 21-4:	Prueba de hipótesis del costo del clinker por cada tonelada de cemento de uso general con la adición de cenizas volantes	69
Tabla 22-4:	Dosificación de materias primas y ceniza volante	70
Tabla 23-4:	Indicadores claves de rendimiento del molino CM4	70
Tabla 24-4:	Capacidad de producción de cenizas volantes	71
Tabla 25-4:	Producción de cenizas volantes.....	71
Tabla 26-4:	Capacidad de operación y sistema de adición de cenizas volantes en el molino CM4.....	72
Tabla 1-5:	Lista de equipos de sistema de adición de cenizas volantes al molino CM4	81
Tabla 2-5:	Dimensiones de los equipos de sistema de adición de cenizas volantes al molino CM4.....	83
Tabla 3-5:	Superficie requerida por para el sistema de adición de cenizas volantes al molino CM4.....	84
Tabla 4-5:	Superficie requerida por el sistema para la adición de cenizas volantes al molino CM4.....	85
Tabla 5-5:	Dimensiones y áreas de equipos	85
Tabla 6-5:	Evaluación económica de instalación del sistema adición de cenizas volantes .	91
Tabla 7-5:	Análisis financiero sin ceniza	92
Tabla 8-5:	Análisis financiero con ceniza	92
Tabla 9-5:	Análisis financiero de inversión.....	92
Tabla 10-5:	Costo de producción de cemento de uso general sin cenizas volantes	94
Tabla 11-5:	Costo total de producción por tonelada de cemento de uso general si cenizas volantes de fondos.....	95
Tabla 12-5:	Costo de producción de cemento de uso general con cenizas volantes	100
Tabla 13-5:	Costo total de producción por tonelada de cemento de uso general con cenizas volantes.....	101

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-2:	Variables de un proceso y preguntas a responder al diseñar un experimento.....	9
Figura 2-2:	Factores que afectan la productividad.	11
Figura 3-2:	Guía de las etapas para alcanzar conocimientos válidos en un proyecto de simulación.....	13
Figura 4-2:	Gestión del MIPRO.....	17
Figura 5-2:	Gestión del INEN.....	17
Figura 6-2:	Derechos del consumidor	18
Figura 7-2:	Evaluación del impacto ambiental	19
Figura 1-3:	Ubicación Planta Chimborazo de la Unión Cementera Nacional UCEM S.A...	26
Figura 2-3:	Ubicación de la Planta 1 en la Unión Cementera Nacional UCEM S.A	28
Figura 3-3:	Proceso de producción de cemento.	29
Figura 4-3:	Explotación minera de piedra caliza.....	29
Figura 5-3:	Trituración de piedra caliza	30
Figura 6-3:	Parque de pre-homogenización	30
Figura 7-3:	Parque de materiales correctoras.....	31
Figura 8-3:	Molino de crudo	31
Figura 9-3:	Filtro de recuperación de crudo.....	32
Figura 10-3:	Silo de homogenización y almacenamiento.....	32
Figura 11-3:	Torre precalentador	33
Figura 12-3:	Horno de calcinación.....	34
Figura 13-3:	Enfriamiento de clinker	34
Figura 14-3:	Parque de recepción, almacenamiento de materias primas.....	35
Figura 15-3:	Transporte y almacenamiento de materia prima en tolvas.....	35
Figura 16-3:	Secador de puzolana.....	36
Figura 17-3:	Dosificadores de materias primas	36
Figura 18-3:	Molino de Cemento CM4	37
Figura 19-3:	Filtro de mangas.....	38
Figura 20-3:	Paletizado y despacho de cemento	38
Figura 21-3:	Proceso de producción de cemento de uso general	39
Figura 22-3:	Proceso actual de molienda de cemento de uso general – Molino CM4	40
Figura 23-3:	Eficiencia operativa, período enero 2022-septiembre 2022.....	41
Figura 24-3:	Eficiencia operacional del molino CM4, período enero 2021-septiembre 2022.....	42

Figura 25-3:	Producción por tipo de cemento, período enero 2021-julio 2022 en el molino CM4.....	43
Figura 26-3:	Producción de cemento de tipo GU, período enero 2020-julio 2022 en el molino CM4.....	44
Figura 27-3:	Dosificación de materia prima	45
Figura 28-3:	Layout del molino CM4	47
Figura 1-4:	Efectos principales para la resistencia 3	59
Figura 2-4:	Efectos principales para la resistencia 7	59
Figura 3-4:	Efectos principales para la resistencia 28	60
Figura 4-4:	Gráfica de interrelación de resistencia de cemento de uso general	60
Figura 5-4:	Efectos principales para resistencia con medias ajustadas.....	63
Figura 6-4:	Interacción para resistencia de medias ajustadas	64
Figura 7-4:	Histograma de productividad del clinker	67
Figura 8-4:	Histograma del costo del Clinker/ tonelada de cemento con adición de ceniza.....	69
Figura 9-4:	Producción de cenizas volantes.....	72
Figura 1-5:	Diagrama de proceso de molienda de cemento de uso general con la adición de cenizas volantes– Molino CM4.....	75
Figura 2-5:	Camión Cisterna para transporte de cenizas volantes.....	76
Figura 3-5:	Silo de recepción de cenizas volantes.....	78
Figura 4-5:	Ventilador de filtro de desempolvado	78
Figura 5-5:	Filtro de desempolvado	79
Figura 6-5:	Compuerta tipo guillotina	79
Figura 7-5:	Válvula rotativa.....	80
Figura 8-5:	Mesas Dosificadoras.....	80
Figura 9-5:	Válvula Diversor	81
Figura 10-5:	Diagrama de proceso del sistema de adición de cenizas volantes	86
Figura 11-5:	Ubicación del sistema de adición de cenizas volantes (Ver Anexo A)	87
Figura 12-5:	Layout del silo y filtro del sistema de desempolvado	88
Figura 13-5:	Layout del silo y sistema de dosificación	88
Figura 14-5:	Layout del sistema de adición de cenizas volantes en molino CM4	89
Figura 15-5:	Layout del sistema de adición de cenizas volantes en molino CM4 (Ver Anexo B).....	90
Figura 16-5:	Proceso productivo de cemento de uso general sin el sistema de adición de cenizas volantes.....	93
Figura 17-5:	Simulación del proceso de producción actual del cemento de uso general	94

Figura 18-5:	Esquema de proceso de producción de cemento de uso general con el sistema de adición de cenizas volantes	96
Figura 19-5:	Identificación de elementos asignados en FlexSim	97
Figura 20-5:	Unión de elementos en base al diagrama de flujo propuesto Connect Object ...	97
Figura 21-5:	Dosificación de materiales – Fluid Mixer.....	98
Figura 22-5:	Definición capacidad de molino – Fluid Splitter	98
Figura 23-5:	Definición de flujos de materiales en proceso– Fluid Processor-Maximum Output Rate	99
Figura 24-5:	Utilización del molino de cemento CM4 con el sistema de adición de las cenizas volantes.....	99
Figura 25-5:	Producción de cemento de uso general (Ton/h), con el sistema de adición de cenizas volantes.	100

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO A: UBICACIÓN DEL SISTEMA DE ADICIÓN DE CENIZAS VOLANTES

ANEXO B: LAYOUT DEL SISTEMA DE ADICIÓN DE CENIZAS VOLANTES EN
MOLINO CM4

RESUMEN

El presente trabajo de titulación tuvo como objetivo diseñar el sistema de adición de cenizas volantes en el proceso de molienda del cemento de uso general, en la Planta Chimborazo de la Unión Cementera Nacional. Utilizando la metodología donde se determinó que las cenizas volantes poseen características químicas y mineralógicas favorables para la producción de cemento de uso general; mediante el diseño de experimentos se definieron y ejecutaron pruebas de laboratorio bajo parámetros de la empresa y normas INEN 490, consiguiendo las residencias esperadas con la adición del 42.16% de clinker y 10% de cenizas volantes, alcanzando una productividad de 2.08 kg de cemento por cada kg de clinker y reduciendo el costo del clinker en cada tonelada de cemento a \$45.81. Considerando porcentaje de adición, capacidad de extracción de cenizas volantes y capacidad nominal del molino, se requiere de 9.4 ton/día de cenizas volantes en su máxima capacidad de producción, pero por proyecciones de la empresa se diseña con una capacidad del 15 ton/h. El sistema de adición es un proceso lineal, la definición de las áreas requeridas para operación y siguieron el método Guerchet, según la operatividad, los equipos deben ser instalados verticalmente, el área requerida es de $428m^2$, inferior al área disponible. Mediante la simulación en FlexSim se valida operatividad del sistema actual del molino y con sistema de adición de cenizas, mediante un análisis económico se ratifica que el costo de inversión retorna en menos de 1 año. Concluyendo que el diseño se realizó en base a la capacidad de producción del molino de cemento, la capacidad de extracción de cenizas volantes desde la línea de clinkerización y la proyección que tiene la empresa. Recomendando la conformación de un grupo de trabajo de las áreas involucradas; como producción, seguridad industrial, mantenimiento, etc., de la Planta Chimborazo.

Palabras claves: <SISTEMA DE ADICIÓN>, <CENIZAS VOLANTES>, <MOLIENDA DEL CEMENTO>, <REUTILIZACIÓN DE RESIDUOS>, <CEMENTO>, <OPTIMIZACIÓN DE RECURSOS>.



Firmado electrónicamente por:
LUIS ALBERTO
CAMINOS VARGAS



0128-DBRA-UPT-IPEC-2023

10-10-2023

ABSTRACT

This titration work aimed to design the system for adding fly ash in the grinding process of general-purpose cement at the Chimborazo Plant of the National Cement Union. Applying the correct methodology determined that fly ash has favorable chemical and mineralogical characteristics for cement production for general use. Through the design of experiments, laboratory tests were defined and executed under company parameters and INEN 490 standards, achieving the expected residences with the addition of 42.16% of clinker and 10% of fly ash, reaching a productivity of 2.08 kg of cement per each kg of clinker and reducing the cost of clinker in each ton of cement to \$45.81. Considering the additional percentage, fly ash extraction capacity, and nominal capacity of the mill, 9.4 tons/day of fly ash is required at its maximum production capacity. Still, according to company projections, it is designed with a total of 15 tons/h. The addition system is a linear process; defining the areas required for operation follows the Guerchet method. Depending on the operability, the equipment must be installed vertically, and the needed space is 428m², less than the available area. Through the simulation in FlexSim, the operability of the current mill system is validated, and with the ash addition system, through an economic analysis, it is confirmed that the investment cost returns in less than one year. The design was made based on the production capacity of the cement mill, the ability to extract fly ash from the linearization line, and the company's projection. Forming a working group of the areas involved, such as production, industrial safety, maintenance, etc., of the Chimborazo Plant is recommended.

Keywords: <ADDITION SYSTEM>, <FLY ASH>, <CEMENT GRINDING>, <WASTE REUSE >, <CEMENT>, <RESOURCE OPTIMIZATION>.

CAPÍTULO I

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Contexto

Las diversas actividades empresariales que son parte de la economía que se despliega en el Ecuador se relacionan con el ámbito de la producción y son parte de una demanda de consumidores del mercado nacional y regional, por lo mismo, es indispensable la existencia de mecanismos de mantenimiento que sustenten el normal desarrollo del ciclo de producción de la industria y que son la respuesta efectiva a las expectativas de un medio cada vez más competitivo. En el criterio de Yanal et al (2017) a nivel de materiales de naturaleza inorgánica, se identifica al cemento como parte de la producción a gran escala y que nace en la mitad del siglo XIX y que en el tiempo presente se ha convertido en uno de los más relevantes materiales de construcción. El mencionado material se encuentra dentro de los denominados conglomerados de naturaleza hidráulica, es decir, es un producto que mezclado con agua es capaz de la producción de pastas que se adhieren a materiales rocosos, se endurecen de manera progresiva a pesar de la ausencia de aire y que estructuran bloques compactos resistentes al efecto del agua y que, incluso disponen de un elevado nivel de resistencias mecánicas.

En el caso de la competitividad de las industrias cementeras que operan en el Ecuador, se establece un factor que motiva a la Empresa Unión Cementera Nacional (UCEM) (2020) en estudio para la búsqueda permanente de alternativas que permitan la efectiva optimización de sus procesos operativos y administrativos. En este sentido, se considera como sujeto de control y mejora al proceso denominado de clinkerización que utiliza petcoke como combustible sólido y cuya combustión en el horno es fuente de un considerable volumen de cenizas volantes. Es notoria, la falta de estudios que permitan conocer la aplicación de las cenizas en el proceso de molienda de cemento de uso general, lo cual, provoca que compuestos químicos como las cenizas ricas en azufre, óxido de calcio (CaO) y silicato tricálcico (C₃S) recirculen en el proceso productivo de clinkerización o incluso, se requiera de la evacuación manual a la tolva de rechazo. Adicionalmente, se conoce que el consumo de clinker y la piedra caliza triturada representan un alto costo en la producción, lo cual, limita la competitividad con otras cementeras.

Es indispensable tener en cuenta la necesidad de las empresas de actuar de manera respetuosa con el medio ambiente y en este aspecto, las cementeras siendo que se determinan como fuentes de contaminación pasan a ser actores dinámicos en el control y reducción de las fuentes de

contaminación, por lo que, es indispensable el aprovechamiento de sus residuos de producción como es el caso de las cenizas.

1.2. Planteamiento del problema

Las cenizas livianas que son nativas del proceso de molienda se identifican como la denominada puzolana, la cual, es parte de actividades de construcción desde tiempos remotos. En el caso del ciclo de producción del cemento de uso general que efectúa la Planta Chimborazo, es de conocimiento que el proceso de clinkerización utiliza petcoke como un combustible sólido producto de lo cual, como resultado de la combustión en el horno se genera un considerable volumen diario de cenizas volantes que no son sujetas de aprovechamiento alguno por parte del ciclo de producción (UCEM, 2020).

De manera general, se establece que la cantidad de clinker utilizada es factible que sea sustituida por materiales cementicios suplementarios (MCS), estos compuestos históricamente son considerados como desechos de los procesos industriales y se denominan ceniza volante. Así mismo, se reduce el costo de producción por medio del uso de clinker, adición de puzolana y escoria. En relación a investigaciones desarrolladas sobre el tema de interés, se conoce que a nivel del ciclo de la producción del cemento es factible la modificación de composiciones a partir de la adición de ceniza, las cuales, inciden en la resistencia al ataque por químicos agresivos. En este sentido, las adiciones más relevantes requieren el uso de puzolanas naturales, las cenizas volantes, piedra caliza molida, entre otros.

Es válido tener presente que la Planta Chimborazo, no dispone de un mecanismo de control y mejora de procesos que responda a su actualidad operativa y administrativa, más bien, su accionar se enfoca exclusivamente en el desarrollo de su ciclo de producción. Es decir, la organización cuenta con una planificación de producción sin llegar a disponer de un efectivo análisis y de toma de decisiones que permitan el aprovechamiento de compuestos que se generan en las diversas etapas de procesamiento de los productos (UCEM, 2020).

Es evidente entonces la falta de un mecanismo que se oriente al uso del volumen de cenizas volantes que son parte del ciclo de producción actual, lo que se traduce en un incremento del costo de producción y el consecuente efecto en la respuesta económica que requiere el mercado, por lo tanto, la investigación busca la determinación de una efectiva gestión sobre el mencionado ámbito.

1.3. Situación problemática

En la actualidad, la creciente competitividad de las industrias cementeras que operan en el Ecuador motiva a la empresa Planta Chimborazo a orientar su gestión sobre el control y mejora continua de sus procesos operativos y administrativos, con lo cual, se sustenta la búsqueda de alternativas de optimización en sus operaciones. Es de conocimiento que el proceso de clinkerización utiliza petcoke como un combustible sólido producto de lo cual, como resultado de la combustión en el horno se genera un considerable volumen diario de cenizas volantes que no son sujetas de aprovechamiento alguno por parte del ciclo de producción.

Es válido indicar que, la falta de estudios sobre la aplicación de las cenizas volantes en el proceso de molienda de cemento de uso general provoca que las mismas recirculen en el proceso productivo de clinkerización o se evacue manualmente a la tolva de rechazo, sin embargo, estas partículas inicialmente desechadas se caracterizan por ser ricas en el contenido de azufre, óxido de calcio (CaO) como compuestos químicos y silicato tricálcico (C3S) como puesto mineralógico. Adicionalmente, se establece que el consumo de clinker y la piedra caliza triturada representan un alto costo en la producción y la consecuente limitación del nivel de competitividad con las otras cementeras.

1.4. Formulación del problema

A partir del planteamiento descrito, es factible la formulación del problema de la siguiente manera:

¿Cómo influye el diseño de un sistema de adición de cenizas volantes en la reducción de consumo de clinker en la producción del cemento de uso general, en la Planta Chimborazo de la Unión Cementera Nacional?

1.5. Preguntas directrices

A partir de la formulación del problema, se plantean las siguientes preguntas específicas asociadas al cuestionamiento principal:

- ¿Cuál es el estado actual de la producción de cemento tipo de uso general que se encuentra documentada?
- ¿Cuál es la efectiva distribución de la planta que requiere el sistema de adición de cenizas volantes?
- ¿Qué tipo de evaluación se requiere en el sistema de adición de cenizas volantes en el proceso de molienda de cemento?

1.6. Justificación

La Unión Cementera Nacional constituye una empresa multinacional perteneciente al Grupo Gloria de Perú, cuenta con 2 plantas de producción de cemento, 8 plantas de hormigón y 10 bodegas de distribución de cemento a nivel del país. Su actividad económica se ha desarrollado hace 71 años atrás, con una capacidad de producción actual de 912.500 Ton/año. Con este antecedente, se proyecta el duplicar el volumen de producción con la incorporación del nuevo molino vertical.

En función que la empresa Unión Cementera Nacional, supere a la competencia, se requiere diseñar alternativas orientadas a la optimización de los procesos y en especial en la molienda de cemento de uso general. Una de las alternativas de optimización en el proceso de molienda de cemento es incluir dentro de las dosificaciones las cenizas volantes que se obtiene del proceso de clinkerización (UCEM, 2020).

En el criterio del proceso de calidad, las cenizas volantes disponen de una composición rica en C_3S , CaO y azufre, lo cual, aporta resistencia en el cemento de uso general. Sin embargo, en la actualidad las mencionadas cenizas son desechadas y según estimaciones, se desechan 8 toneladas de cenizas volantes por día. En este sentido, se pretende que las cenizas volantes sean utilizadas como adición en el proceso de molienda del cemento de uso general con le finalidad de disminuir el consumo de clinker y caliza, los cuales, se identifican como un alto costo de producción (UCEM, 2020).

1.7. Objetivos

1.7.1. Objetivo general

Diseñar el sistema de adición de cenizas volantes en el proceso de molienda del cemento de uso general, en la Planta Chimborazo de la Unión Cementera Nacional.

1.7.2. Objetivos específicos

- Diagnosticar el estado actual de producción de cemento tipo de uso general
- Caracterizar la nueva dosificación de materias primas para la producción de cemento de uso general con la adición de cenizas volantes.
- Diseñar la distribución de planta del nuevo sistema de adición de ceniza volantes.

- Evaluar los resultados del sistema propuesto de la adición de cenizas volantes en la molienda de cemento de uso general, utilizando modelos de simulación de procesos.

1.8. Hipótesis

Con el sistema de adición de cenizas volantes en la molienda de cemento se reducirá la cantidad de adición de clinker en la producción del cemento de uso general, en la Planta Chimborazo de la Unión Cementera Nacional.

CAPÍTULO II

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes

En el trabajo de Yanay et al (2017) se realizó la evaluación de índole ambiental asociada al procesamiento de cemento en la Fábrica Siguaney y se complementó con el cálculo de los indicadores de ecoeficiencia nativos de la ISO 14045, por otro lado, se usó, la metodología Recipe y el uso de la aplicación SimaPro 8.1. El análisis de los indicadores se asoció al impacto económico que es parte del diagnóstico inicial y de la potencial incidencia de la propuesta. A nivel de resultados, se obtuvieron los perfiles del cemento P-35 y del producto de bajo carbono (LC3-35 y LC3-50), los cuales, se obtuvieron del reemplazo de clinker por la presencia de arcilla caolinítica. El análisis del cemento P-35 en función de un mínimo contenido de carbono determinó resultados positivos en 8 categorías, se identificó que la toxicidad aumenta por el incremento de electricidad nativa de la molienda de materiales, es decir, se induce un elevado porcentaje de emisiones compuestas de orgánicos volátiles. Finalmente, se observó una mejora de la ecoeficiencia por la reducción del costo de producción e impacto ambiental.

En la publicación de Pedrini et al (2016) se considera a la ecoeficiencia como una filosofía que estructura el desarrollo sostenible para reducir el impacto ambiental de un sistema de producción y sin que disminuya la competitividad. Un sector industrial que mayormente aplica este criterio es la industria cementera, la cual, determina una actividad intensa en función del recurso natural y la consecuente emisión de residuos. En este sentido, se analizó la ecoeficiencia de una industria brasileña de cemento en base a la existencia de indicadores vigentes en un periodo de 3 años. Se utilizó una evaluación ambiental en base al desempeño del consumo de energía, materia prima y agua, emisiones de gases y material particulado en el ambiente. Al final, se identificó a 4 de 7 indicadores como variables positivas en la ecoeficiencia del establecimiento.

En el caso de Alvarenga (2016) se estudiaron los beneficios de la aplicación de la ecoeficiencia en la perforación de pozos geotérmicos, en este sentido, se buscó atenuar el uso de recursos naturales e impacto ambiental. Se describieron los aspectos generales de la geotermia, extracción y exploración, tipos de pozos. Se caracterizó la plataforma de perforación y se determinó el impacto ambiental que provoca la perforación de los pozos y las consecuentes acciones de control, mitigación que son parte de un plan de monitoreo ambiental. Mediante la evaluación de la ecoeficiencia por el método ABC, se establecieron herramientas de producción limpias con los

consecuentes plazos estimados para su implementación, lo cual, incluso depende de una decisión de carácter estratégica.

En el criterio de Cely (2017) la productividad es la variable de afectación en el ciclo de producción debido a que motiva resultados financieros y económicos que sustentan una toma de decisiones en la organización. En este sentido, se desarrolló una termodinámica de equilibrio en base a términos de exergía, energía, entropía y análisis exergo económico como medios para la cuantificación de irreversibilidades, medición de la eficiencia y la productividad de un proceso termodinámico. Se determinó que el proceso térmico es una cadena de acciones de pre-enfriamiento, refrigeración, congelación y transporte de gran utilidad en la bio-preservación en cadenas alimenticias en base al control de variables como la temperatura y la humedad. La medida de la productividad se basó en la cuantificación de costos y en la disminución de las ineficiencias. Se obtuvo la eficiencia en la cadena de frío por compresión de vapor y ultracongelación. Se determinaron indicadores de eficiencia y ecoeficiencia y se identificaron puntos sensibles de exergía y maquinaria que afectaba el enfoque de los costos y consecuente productividad.

En la visión de la CEPAL (2015) se revisaron iniciativas a nivel mundial sobre la aplicación de la ecoeficiencia como una estrategia de desarrollo de naturaleza sostenible en el sector productivo. Para los países desarrollados se determinó que la ecoeficiencia es parte de corporaciones grandes que orientado sus acciones a la protección ambiental. Sin embargo, la gran mayoría de organizaciones han optado por la denominada producción más limpia y en su conjunto, se han generado una variedad de indicadores orientados a la medición de ecoeficiencia y sostenibilidad. Se desarrollaron indicadores de ecoeficiencia con un contenido que permita la gestión al mecanismo de la producción y ser parte de la creciente competitividad en los mercados. A nivel de América Latina se determinó que la estrategia de ecoeficiencia es limitada y más bien, es motivada por las corporaciones de naturaleza trasnacional y de enorme utilidad para la gestión ambiental. Es relevante la aplicación de la ecoeficiencia en el desarrollo de parques industriales y en la contabilidad ambiental del establecimiento, lo cual, se traduce en la generación de políticas y en niveles de compromiso.

Para Crispin (2022) la crisis ambiental evolucionó en el tiempo a medida que se establecieron datos y se evidenciaron efectos relevantes en la comunidad científica mundial. En este ámbito, apareció un registro histórico denominado como la bibliotecología, la cual, se soporta en bibliotecas verdes que motivan el desarrollo sostenible en base a servicios y prácticas sostenibles e incluso con el diseño de procesos y edificaciones de menor impacto ambiental y uso eficiente de recursos. Es así que la Biblioteca Nacional del Perú publicó su plan de ecoeficiencia 2019, en este sentido, se realizó una revisión documental que contextualizó la crisis climática y la necesidad de estándares

de evaluación. Se determinó que las diversas sedes no pueden ser certificadas como bibliotecas verdes, por lo que, es necesario la elaboración de planes de ecoeficiencia con la participación del personal.

Para Díaz et al (2016) es relevante la ecoeficiencia de establecimientos de minería en base al análisis de los materiales. Se determinó una muestra conformada por diversas empresas polimetálicas mientras la herramienta de investigación se soportó en un protocolo de ecoeficiencia adaptada al sector minero. Se analizó la gestión de los insumos mediante indicadores de ecoeficiencia de agua y energía. Se identificó que el indicador de agua almacenada alcanzó un valor de 54 m³ por unidad de producción, de todas maneras, la reutilización de agua es de hasta 4 veces el agua retenida. Los indicadores de energía y combustible reflejaron una variación del 2% al 14% con un consumo promedio de 2, 2 Kwh y 55 galones por unidad de producción. Se concluyó que la práctica efectiva de ecoeficiencia se producía en el uso del agua con una reutilización entre el 60% a 100%. Por otro lado, se encontró una caída de los vertimientos, a pesar de esto, la emisión de gas del efecto invernadero creció. Al final, el ciclo en análisis de las empresas estableció principalmente prácticas de ecoeficiencia vinculadas al uso del agua y a la gestión de energía y combustible.

2.2. Bases teóricas

2.2.1. Diseño de experimentos

Constituye la implementación del denominado método científico para la generación del conocimiento nativo de un proceso, este particular se motiva en basa a pruebas planificadas. Se tiene presente que es una metodología consolidada por medio de la estadística y la ingeniería en función de responder a situaciones de causa-efecto (Chacón, 2021).

2.2.2. Experimento

Se define como el cambio inherente a la condición operativa de un proceso, esto se hace para conocer el efecto que se provoca sobre las propiedades del producto. De esa manera, el experimento impulsa el conocimiento del sistema (Rodríguez, 2021).

2.2.3. Unidad experimental

Es la muestra que sirve para la generación de un valor representativo que obtiene del experimento. Por lo tanto, es valioso definir la unidad experimental en función de ser la muestra representativa de una sustancia y que es parte de un proceso en estudio (Yanchaguano, 2021).

2.2.4. Variables y niveles

Dentro de un proceso se nota la intervención de las variables que se notan en la Figura 1-2, a la vez, es factible la identificación de interrogantes que son parte de la planificación de un experimento (Ramos, 2021).

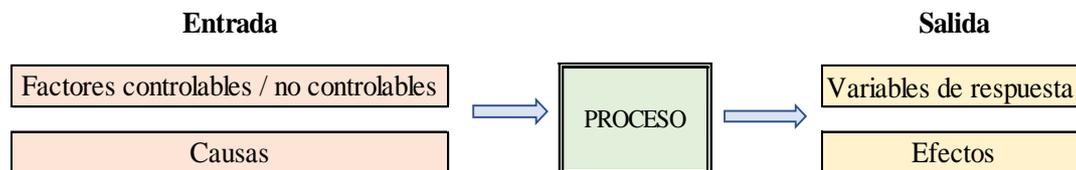


Figura 1-2: Variables de un proceso y preguntas a responder al diseñar un experimento

Fuente: (Ramos, 2021).

2.2.5. Niveles y tratamientos

En el criterio de Rojas et al (2020) los diversos valores que son parte de los factores de un diseño de experimentación se denomina niveles. Por otra parte, la combinación de los niveles de los factores analizados toma el nombre de tratamiento. Como referencia, se tiene que un experimento que estudia el impacto de la velocidad y la temperatura, requiere de dos niveles combinados que compone el tratamiento. En este sentido, existirían 4 tratamientos que son parte de la Tabla 1-2. Además, se debe probar cada tratamiento para la obtención del valor de “y”

Tabla 1-2: Punto de diseño y operación.

Nivel de velocidad	Nivel de temperatura	Tratamiento	y
1	1	1	?
2	1	2	
1	2	3	
2	2	4	

Fuente: Rojas et al (2020)

Realizado por: Pilco, José, 2023.

2.2.6. Fases de un diseño de experimentos

En el criterio de Gutierrez y De la Vara un estudio experimental exitoso requiere de etapas y actividades. Así mismo, la etapa importante constituye la planificación. Con este antecedente, se describe las etapas de un diseño experimental:

Planeación y realización

La planeación y realización se estructura de los siguientes puntos (Ramos, 2021)

- **Entendimiento y delimitación**, en este punto, se debe realizar investigaciones preliminares que guíen la delimitación del problema, de esa manera, queda claro el ámbito de estudio, la importancia y la magnitud del problema.
- **Elección de la variable de respuesta a medir en el diseño y su consecuente verificación.** La elección correcta de la variable se refleja en el resultado de las pruebas. Es decir, se debe elegir como variable lo que refleje el problema. Se tiene presente que los instrumentos y métodos sean capaces de la repetición y reproducción de una medición en base a una precisión y exactitud.
- **Determinar los factores a investigarse con relación a la incidencia sobre la respuesta**, es necesario conocer y utilizar la información disponible en función de su potencial efecto.
- **Identificar el nivel de cada factor y el diseño del experimento con relación al fin del experimento**, esto implica conocer las repeticiones necesarias para cada tratamiento, el tiempo, el costo y la precisión.
- **Planeación y organización del trabajo experimental**, en respuesta al diseño se debe disponer de una organización y planificación del trabajo experimental.
- **Desarrollo del experimento**, se requiere seguir el lineamiento del plan, sin embargo, en el caso de un imprevisto, se debe conocer la persona que supervisa el experimento

Análisis

En este punto, se considera que el resultado experimental contiene observaciones muestrales y no poblacionales. Es decir, se debe recurrir a la estadística inferencial para conocer los efectos muestrales y el consecuente sustento de la investigación desarrollada. La estadística relevante en el análisis de experimentos es el análisis de varianza Anova.

Interpretación

Mediante el respaldo de la estadística se analiza en detalle lo ocurrido en el experimento, luego se contrasta las conjeturas de arranque con los resultados del experimento, posteriormente se observa los aprendizajes del proceso, se verifica los supuestos y se elige el tratamiento ganador en base a la estadística (Alvarez, 2017)

Control y conclusiones

El estudio experimental recomienda escoger las medidas que permitan la generalización del resultado de la investigación. Por otra parte, es valioso la organización de una presentación que permita la difusión de los logros (Rodríguez, 2021)

2.2.7. Productividad

Es un término inherente al control y mejor de la producción. La mejora se vale de una comparación entre el recurso usado y los bienes y servicios producidos. Es decir, es un índice que vincula lo producido con los recursos utilizados para su generación (Bernal, 2019).

$$Productividad = \frac{Producto\ o\ servicio}{Recursos\ utilizados}$$

En la productividad participan diversos factores internos que son controlables y que son parte de la empresa, además, existes valores difíciles de controlar y son los factores externos, Figura 2-2 (Chacón, 2021)



Figura 2-2: Factores que afectan la productividad.

Fuente: (Chacón, 2021).

2.2.8. Distribución de planta

Constituye la organización de factores y elementos que son parte del ciclo de producción del ente, además, interviene sobre la distribución de espacios y en la determinación de los procesos que estructuran la planta (Crispin, 2022)

2.2.9. Método de Güerchet

Es un método que determina las áreas necesarias para un puesto de trabajo, por lo tanto, es necesario determinar el número, tamaño de máquinas y los equipos requeridos en la producción. Además, se considera los requerimientos del personal y las consideraciones sobre el inventario (Rodríguez, 2021).

El cálculo de las superficies determina el siguiente enfoque:

- **Superficie Estática (Ss).**

Es la superficie a usar para la instalación de los equipos estáticos. Su cálculo requiere de:

$$Ss = L * A$$

$L =$ largo

$A =$ ancho

- **Superficie Gravitacional (Sg)**

Es el número de lados necesarios en la operación del equipo. Se calcula por medio de:

$$Sg = Ss * N$$

N = # de lados donde se trabajaran en la máquina

- **Superficie de evolución (Se)**

Espacios necesarios en el desplazamiento del personal y de los equipos.

$$Se = (Ss + Sg) * K$$

K = coeficiente de evolución

$$K = \frac{H}{2h}$$

H = Altura promedio de los elemento móviles.

h = Altura promedio de los elementos fijos.

- **Superficie total (ST)**

Constituye la suma de las superficies calculadas, de las áreas requeridas en la instalación y en la operación de los equipos.

$$S_T = Ss + Sg + Se$$

2.2.10. Simulación

El diseño se basa en el software denominado CAD (Computer-Aided Design). El mencionado diseño determina el uso de los programas mediante un ordenador con el fin de la creación, modificación, análisis, optimización y documentación de las representaciones bidimensionales y tridimensionales de los objetos, Figura 3-2 (Yanchaguano, 2021).

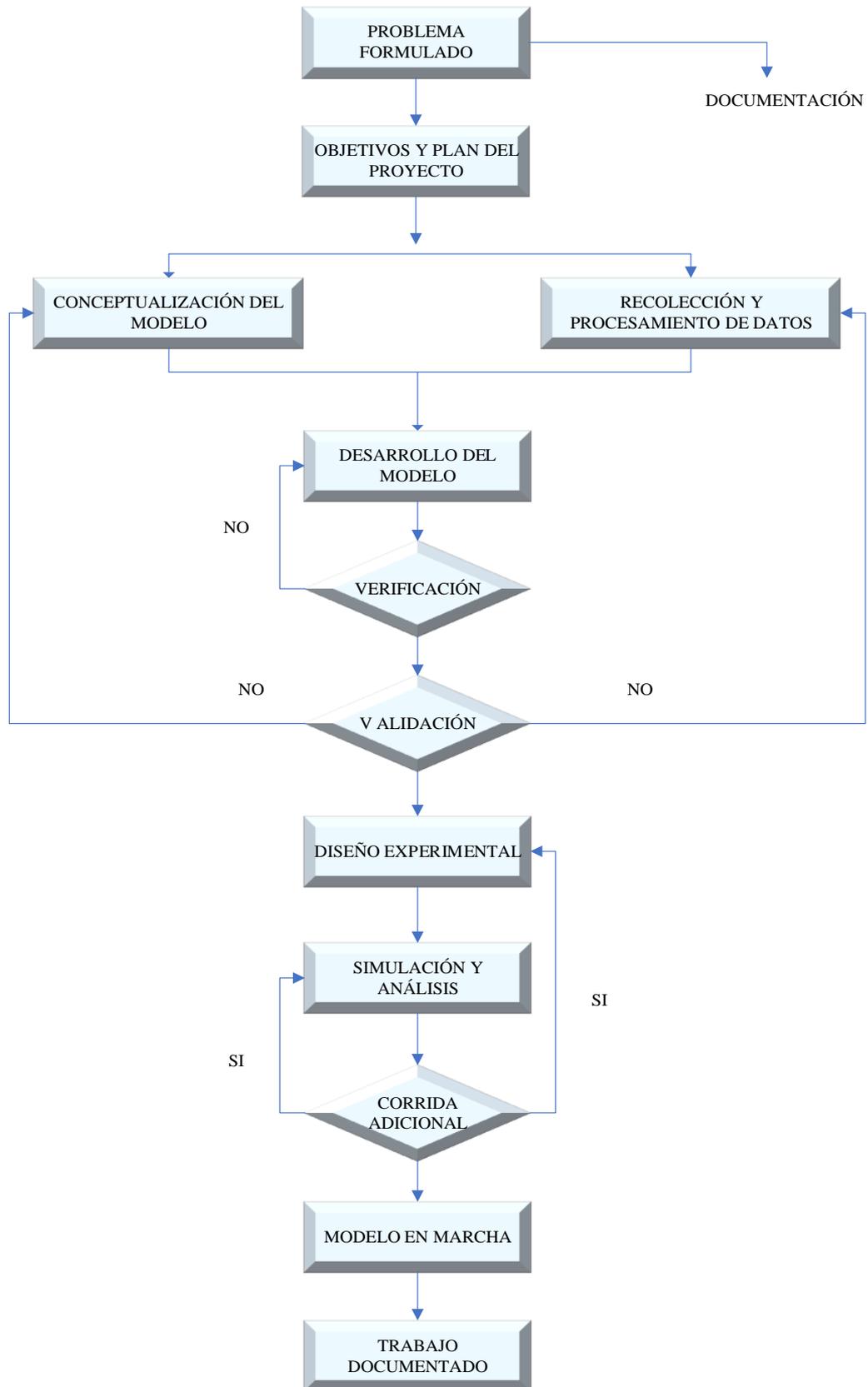


Figura 3-2: Guía de las etapas para alcanzar conocimientos válidos en un proyecto de simulación.

Fuente: (Yanchaguano, 2021).

2.2.11. FlexSim.

Es un software desarrollado por Bill Nordgren, Cliff King, Roger Hullinger, Eamonn Lavery y Anthony Johnson. Esta aplicación modela y facilita el entendimiento de los problemas de un sistema sin que se programen aplicaciones específicas. Esta aplicación permite los simulacros de distribuciones asociadas a las operaciones de equipos y maquinas que sustenten la operatividad de una planta industrial (Díaz et al., 2018).

En el criterio de Marmolejo et al., (2014), el FlexSim es una alternativa que modela y entiende los problemas de un sistema sin que participe una programación complicada. Los puntos a considerar al FlexSim como una herramienta para la simulación son:

- Extensa sección de preconstruídos que aborda situaciones complejas sin escribir un código de software.
- El software se aplica a objetos para visualizar el flujo de producción.
- El proyecto se aplica en el medio 3D; además, permite la importación de una infinidad de objetos de paquetes nativos en el AutoCAD, ProE, Solid Works, entre otros.
- Es factible la simulación de los sistemas discretos, además, se permite la simulación de modelos combinados como es el caso del flujo de líquidos o de la alta velocidad en el procesamiento del azúcar.
- La generación de los diversos escenarios con condiciones variadas es susceptible de la programación que se requiera.
- La distribución de probabilidad se representa con precisión y no se usan valores promedio que permitan representar la realidad. Por lo mismo, las gráficas y reportes se revisan con detalle.

2.3. Marco conceptual

El control y mejora de un proceso de producción es una parte relevante para un enfoque económico semejante a lo que desarrolla la Empresa Unión Cementera Nacional, por lo mismo, las personas que son parte de los procesos requieren de una interacción permanente en el medio interno y externo al sector de estudio.

2.3.1. Terminologías de la investigación

En el caso presente, es importante establecer un lineamiento de carácter teórico asociado a los términos que son parte del alcance de la investigación y que se resumen en lo siguiente (ISO, 2015):

- **Árbol de problemas:** Se orienta a identificar las causas y efectos de un problema en estudio.

- **Causa – efecto:** Es el medio que se enfoca en conocer la raíz de un problema y busca a la vez las acciones para su solución.
- **Datos:** Es la información que se origina en las labores de una empresa de productos o servicios.
- **Demanda:** Es el volumen de bienes que un consumidor está dispuesto a adquirir, lo cual, es función de sus necesidades.
- **Encuesta:** Constituye un medio de levantamiento de información que responde a un cuestionario previamente elaborado.
- **Fichas de caracterización:** Es una herramienta analítica aplicada sobre un proceso y que se basa en una transformación de información o de materiales.
- **Formulación de un problema:** Es el lineamiento de las características que estructuran un sujeto de estudio.
- **Gestión:** Es el camino que se sigue para el desarrollo de los procesos operativos o administrativos.
- **Financiamiento:** Es el medio que usa una empresa para el levantamiento de proyectos que son nativos de los objetivos empresariales.
- **Investigación cualitativa:** Constituye la interpretación de un conjunto de datos nativos de un objeto de estudio.
- **Investigación descriptiva:** Define las características de un objeto que es parte de una industria.
- **Investigación exploratoria:** Facilita al investigador una visión amplia sobre el fenómeno que se investiga
- **Recopilación de datos:** Son instrumentos usados para la generación y el almacenamiento de valores.
- **Procedimiento:** Es el conjunto de acciones que se orienta a la ejecución de un proceso.
- **Observación:** Es una técnica que usa el investigador para el análisis de hechos que son parte del estudio.
- **Variable:** Es un valor que cambia de un momento a otro.

2.4. Marco legal

2.4.1. Constitución 2008

En el Ecuador, la Constitución del 2008, en su Art. 235, determina que, a nivel de la infraestructura productiva existente en el país, se debe facilitar el Buen Vivir, en base a fortalecer el empleo, estabilidad y desarrollo de la Población Económicamente Activa (PEA). Además, el

Art. 276, establece la finalidad del régimen vigente; determina y estructura un sistema productivo y sostenible en el transcurso del tiempo; así mismo, es de importancia conocer que la entidad gubernamental se orienta a lograr la satisfacción de las necesidades de la comunidad (Registro Oficial, 2008).

2.4.2. Plan Nacional de Desarrollo (PND)

El PND está considerado como una herramienta estructurada en base a la determinación de políticas, programas y proyectos de aplicación en el medio público, por lo mismo, se requiere de un financiamiento de índole estatal y que necesariamente es parte de un mecanismo de seguimiento que permita conocer su desempeño de las empresas en pro del desarrollo de los intereses institucionales del Estado. En este sentido, se requiere de la presencia de una interrelación continua entre la sociedad y el propio Estado, lo cual, es un aspecto que se constituye en un pilar de soporte en beneficio del servicio que recibe la población ecuatoriana (SENPLADES, 2020).

2.4.3. Ley del Sistema Ecuatoriano de la Calidad

La visión de la Ley del Sistema Ecuatoriano de la Calidad (2010), determina que la Constitución vigente del Ecuador, ha determinado una obligación necesaria sobre el reconocimiento y garantía que requiere la población para el acceso al uso de bienes y servicios, de índole pública y privada, por lo mismo, los servicios independientemente de su género deben disponer de calidad. De manera complementaria, la mencionada ley determina incluso la existencia del denominado Sistema Ecuatoriano de Calidad, el cual, se encarga de la regulación de la normativa y reglamentación que son parte de la evaluación del cumplimiento de requisitos adquiridos por las diferentes organizaciones que son parte de las actividades económicas del Ecuador; en consecuencia, se busca el aseguramiento de la calidad en beneficio de las diferentes partes interesadas.

2.4.4. Ministerio de Industria y Productividad, MIPRO

El MIPRO (2020) es el soporte de la calidad en busca del incremento de la competitividad del sector industrial en sus diferentes ámbitos y a su vez, se orienta a innovar la matriz productiva, este aspecto aplica a los consumidores internos y externos de un establecimiento. Por otra parte, se considera a la infraestructura de la calidad como un recurso propio que es parte de las empresas que brindan productos o servicios a la población ecuatoriana, Figura 4-2.

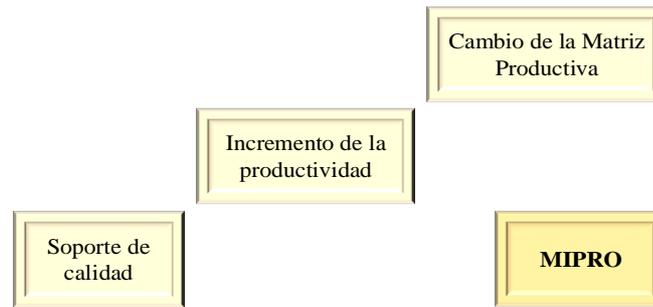


Figura 4-2: Gestión del MIPRO

Realizado por: Pilco, Jose, 2023.

Un aspecto a tomar en cuenta es que la calidad del servicio que se recibe un cliente se determina en respuesta a las expectativas que tienen los consumidores, este aspecto afecta directamente el normal desempeño de una actividad económica, por lo tanto, es de suma importancia disponer de una organización de naturaleza proactiva en sus labores y en este sentido, es significativo la competencia y compromiso de los trabajadores (Alvarez, 2017).

2.4.5. Instituto Ecuatoriano de Normalización, INEN

El INEN se origina en agosto de 1970, mediante Decreto No. 357, y gestionado en el gobierno del Dr. Velasco Ibarra, que se orienta a la formulación de normas técnicas inherentes a las características de bienes y servicios que son parte del proceso de comercialización en el Ecuador. Con la gestión del INEN, el Ecuador dispone de un organismo técnico y competente que fundamentalmente se encarga de la generación, adopción y adaptación de documentos asociados a la normativa y reglamentos de procesos que requieren de criterios de calidad y de confiabilidad (INEN, 2022).

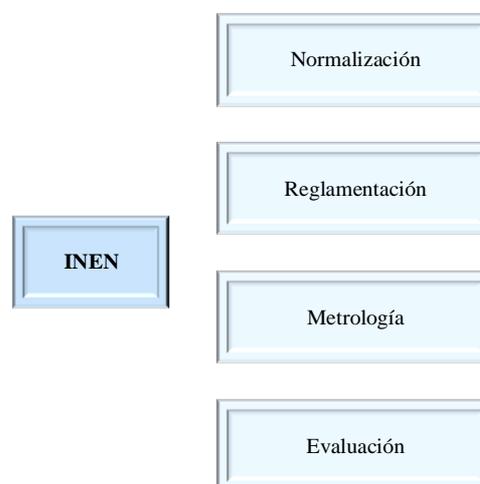


Figura 5-2: Gestión del INEN

Realizado por: Pilco, José, 2023.

Es importante citar el apoyo que desarrolla el INEN en el campo empresarial y que se visualiza la generación de herramientas que motivan aspectos de productividad, competitividad y diversificación en el medio competitivo. Complementariamente, a partir del 2016, el INEN pasó a conformar el Consejo Directivo de la ISO, de esa manera, el Ecuador cuenta con un reconocimiento en lo que a calidad se refiere, Figura 2-5. Adicionalmente, se determina que el INEN es un organismo que disfruta de reconocimiento por parte de la comunidad empresarial que requiere de procesos establecidos en el Sistema Ecuatoriano de la Calidad, por lo tanto, su medio de acción se distribuye en temas de Normalización, Reglamentación, Metrología y Evaluación de temas que contribuyen al control y mejora de la competitividad de productos o servicios que son parte del mercado (INEN, 2022).

2.4.6. Ley Orgánica del Consumidor

Esta ley identifica la presencia del potencial consumidor en el mercado, en este sentido, es relevante tener presente que la gran mayoría de las personas que consumen bienes o servicios no son informados de sus derechos y más bien, su conocimiento se restringe a temas específicos como el derecho a la vida, salud, alimentación, estudio y derecho. De todas maneras, se determina el contenido del Art. 4, como el relevante a conocer los Derechos del Consumidor, el cual, se resume en la Figura 6-2 (Registro Oficial, 2017):

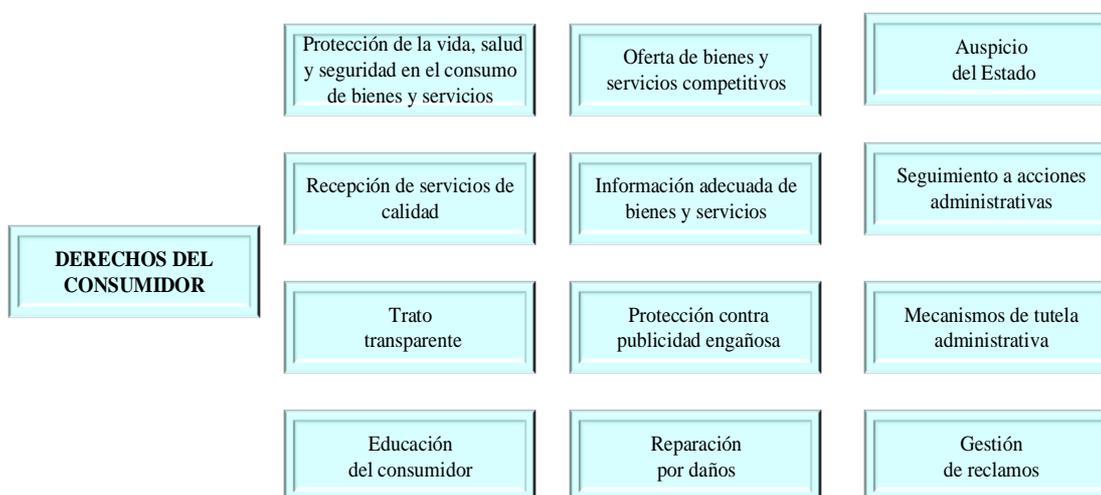


Figura 6-2: Derechos del consumidor

Realizado por: Pilco, J. 2022.

Las disposiciones que son parte de la mencionada Ley son de naturaleza pública y de interés social de la comunidad, por lo tanto, sus normas de carácter orgánico prevalecen sobre el ámbito de las disposiciones que son parte de leyes consideradas como ordinarias. De manera global, la

interpretación de la mencionada Ley dispone de una aplicación favorable a los intereses del consumidor de bienes o productos (Registro Oficial, 2017).

2.4.7. Ley de Gestión Ambiental en el Ecuador

La Ley de Gestión Ambiental del Ecuador (2022) determina el contenido de políticas requeridas para el desarrollo que incide en la conservación del patrimonio que es parte de la naturaleza y el consecuente aprovechamiento de los recursos que son parte del Estado ecuatoriano, en este sentido, las políticas y el consecuente plan son parte del desarrollo de los objetivos nacionales. En el caso del Plan Ambiental Ecuatoriano se conoce de la existencia de estrategias, planes y proyectos que se enfocan en la gestión ambiental del país. De manera complementaria, se dispone de un Consejo Nacional de Desarrollo, del cual, es parte la sociedad civil y los sectores industriales.



Figura 7-2: Evaluación del impacto ambiental

Realizado por: Pilco, José, 2023.

En el caso de las industrias, la Ley de Gestión Ambiental (2022) determina el contenido del Art. 19, el cual, se asocia a obras privadas o mixtas que son capaces de la generación de aspectos e impactos ambientales, por lo cual, es indispensable un monitoreo por medio del Sistema Único de Manejo Ambiental, cuyo principio base es la precaución. En lo que tiene que ver con el Art. 23, es relevante conocer la evaluación del impacto ambiental de una actividad económica, la cual, básicamente se desarrolla en la Figura 7-2.

2.5. Hipótesis

Con el sistema de adición de cenizas volantes en la molienda de cemento, se reducirá la cantidad de adición de clinker en la producción del cemento de uso general, en la Planta Chimborazo de la Unión Cementera Nacional.

2.6. Identificación de variables

- **Variable independiente:**

Volumen de cenizas producidas

- **Variable dependiente:**

Las variables consideradas dentro de la presente investigación son:

Calidad asociada a la resistencia del producto a procesar.

Productividad determina el consumo de clinker por unidad de producción del cemento de uso general.

Costo del clinker por unidad de producción de cemento de uso general

2.7. Operacionalización de variables

Tabla 2-2: Operacionalización de la variable independiente

VARIABLE INDEPENDIENTE	CONCEPTUALIZACIÓN	DIMENSIONES	INDICADORES	DEFINICIÓN DE LOS INDICADORES	CRITERIO DE MEDICIÓN	TÉCNICA	INSTRUMENTO	ESCALA
Volumen de cenizas producidas	Cantidad de cenizas volantes producidas de la combustión del petcoke que es recuperado del filtro de clinkerización.	Volumen de cenizas volantes	Toneladas de cenizas volantes recuperado	Cantidad de cenizas volantes asignado para el proceso de molienda de cemento	Cantidad	Observación	Bases de datos de producción	Numeración real desde el cero.
Porcentaje de materia prima reemplazada por cenizas volantes	Valor porcentual de clinker y caliza triturada por cenizas volantes	Porcentaje de reemplazo	% de Clinker y caliza triturada reemplazada por tonelada de cemento	Porcentaje de cenizas a adicionar en reemplazo de clinker y caliza triturada, sin afectar las características del cemento de uso general	Cantidad	Observación	Datos existentes en laboratorio	Numeración real desde el cero.
Cantidad de equipos a instalar	Cantidad y características de la maquinaria nueva a instalar en la línea de producción de cemento de uso general	Distribución de planta	Número de equipo distribuidos en el sistema de producción	Numero óptimo de máquinas necesarias para aprovechar las cenizas volantes	Cantidad	Observación	Herramientas de simulación FlexSim	Numeración real desde el cero.

Realizado por: Pilco, José, 2023.

Tabla 3-2: Operacionalización de la variable dependiente

VARIABLE DEPENDIENTE	CONCEPTUALIZACIÓN	DIMENSIÓN	INDICADOR	DEFINICIÓN DEL INDICADOR	CRITERIO DE MEDICIÓN	TÉCNICA	INSTRUMENTO	ESCALA
Resistencia (Calidad- INEN 490:2018)	Medición de resistencia a la compresión de probetas de cemento de uso general con la adición de cenizas volantes	MPa / % de adición de cenizas volantes	Resistencia / % de adición de cenizas	Resistencia del hormigón según el porcentaje de adición de cenizas volantes	Cantidad	Observación	Equipos de laboratorio	Numeración real desde cero.
Productividad	Factor o recurso utilizado para la producción de cemento de uso general con la adición de cenizas volantes	kg de cemento GU con la adición de cenizas volantes / kg de clinker utilizado	Cemento producido/clinker utilizado	Cantidad de cemento de uso general producido según la cantidad de clinker añadido	Cantidad	Observación	Bases de datos de la empresa y los ensayos Programas de simulación (FlexSim)	Numeración real desde cero.
Costo de producción	Evaluación económica del clinker para la producción de 1 tonelada de cemento tipo GU	Costo del clinker en la producción por tonelada de cemento de uso general con la adición de cenizas volante	El valor en dólares del clinker por cada tonelada de cemento de uso general con la adición de cenizas volantes (\$/kg)	Costo del clinker en la producción de cemento de uso general con la adición de cenizas volantes	Cantidad	Observación (\$/kg)	Bases de datos de la empresa y ensayos Programas de simulación (FlexSim)	Numeración real desde cero.

Realizado por: Pilco, José, 2023.

2.8. Matriz de consistencia

Tabla 4-2: Matriz de consistencia

FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	OBJETIVO GENERAL	HIPÓTESIS	VARIABLE	INDICADOR	TÉCNICA	INSTRUMENTO
¿Cómo se puede reducir el costo de producción del cemento de uso general con el sistema de adición de cenizas volantes que se recuperara de la línea de clinker y que actualmente se desecha como material inaprovechable?	Diseñar el sistema de adición de cenizas volantes en el proceso de molienda del cemento de uso general, en la Planta Chimborazo.	Con el sistema de adición de cenizas volantes en el proceso de molienda de cemento se reducirá la cantidad de adición de clinker en la producción del cemento de uso general, en la Planta Chimborazo de la Unión Cementara.	Independiente: Volumen de cenizas producidas	Toneladas de cenizas volantes recuperado	Observación	Bases de datos de producción
			Porcentaje de materia prima remplazada por cenizas volantes.	% de Clinker y caliza triturada remplazada por tonelada de cemento	Observación	Datos existentes en laboratorio
			Cantidad de equipos a instalar	Número de equipo distribuidos en el sistema de producción	Observación	Programa de simulación FlexSim
			Dependiente: Resistencia	Resistencia / % de adición de cenizas	Observación	Equipos de laboratorio
			Productividad	Cemento producido/clinker utilizado	Observación	Bases de datos de la empresa Programa de simulación (FlexSim)
			Costo de producción	Valor en dólares del clinker por cada tonelada de cemento de uso general con la adición de cenizas volantes (\$/kg)	Observación	Bases de datos de la empresa y ensayos Programa de simulación (FlexSim)

Realizado por: Pilco, José, 2023.

CAPÍTULO III

3. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

3.1. Tipo y diseño de estudio

En función de las variables que han sido establecidas y los consecuentes cambios nativos de las alteraciones en las composiciones, se tiene presente que el diseño de un enfoque experimental constituye una estrategia dentro del diseño de prácticas que se orientan al desarrollo de conclusiones inherentes a la obtención de un determinado producto. Por otra parte, la selección del contenido experimental es función del tipo de interrogantes a responder, del nivel de extrapolación, de las conclusiones que han sido generadas y de los recursos disponibles en la organización. De manera complementaria, un experimento diseñado y ejecutado de manera efectiva es el sustento para el desarrollo de un análisis estadístico y de la consecuente interpretación de datos. En sentido, el responsable de la investigación sustenta las decisiones en relación a la variable de estudio (Gata Molina & Mas Diego, 2016).

En el criterio de Collado et al (2014), se establece un enfoque de índole cuantitativo, secuencial y probatorio, es decir, es un conjunto ordenado de pasos. Por lo tanto, se inicia de una idea que se delimita en función de los objetivos y de los cuestionamientos de la investigación, adicionalmente, se analiza la teoría y se estructura un lineamiento de interés. A partir de las preguntas, se originan las hipótesis y se identifican las variables, a continuación, se determina un plan para su verificación, dentro del análisis, se efectúan mediciones de las variables mediante métodos estadísticos, y se obtienen conclusiones nativas de las hipótesis

3.2. Área de estudio

La investigación identifica como área de estudio el proceso de molienda del cemento de uso general, en la Planta Chimborazo de la Unión Cementera Nacional.

3.3. Población de estudio del diseño experimental

Un proceso de investigación determina la existencia de población y muestra como fuentes que generan la información dentro del sector de interés. Bajo este lineamiento, se determina que la población es al agrupamiento de partes que integran el fenómeno en estudio; de manera complementaria, la muestra pasa a ser una fracción de la población en análisis. La población de estudio está enfocada en base a las materias primas considerados como factores y sus límites de

adición como niveles. Bajo el criterio de diseño factorial (2^5), se determina como población a las 32 combinaciones de ensayo que se debe ejecutar, para identificar la óptima adición de cenizas volantes en el proceso de molienda de cemento de uso general (Gómez, 2016).

3.4. Selección de muestra del diseño experimental

El incremento del número de factores motiva el crecimiento del número de tratamientos en el diseño factorial completo 2^k . En el caso presente, $k = 5$ factores, de una sola replica que establece un resultado de 32 corridas. Por otra parte, existe dos limitaciones relevantes para la ejecución de los 32 tratamiento, la primera es el tiempo (28 días por experimento) y el segundo, es el costo que representa la ejecución de las pruebas. En consideración de disponer de datos confiables se utilizará el criterio de diseño experimental fraccionado a la cuarta 2^{K-2} .

En el caso presente, el diseño factorial fraccionado a la cuarta se represente por 2^{5-2} , donde $K = 5$, se obtienen los 5 factores (materias primas: clinker, yeso, puzolana, cal y cenizas volantes), cada factor dispone de dos niveles (dosificación máxima y mínima). Debido a las limitaciones mencionadas, el diseño factorial fraccionado a la cuarta es 2^3 , es decir, los tratamientos son 8 y son considerados en la muestra del diseño de experimentos.

3.5. Procedimiento y técnica de recolección de datos

La empresa Unión Cementera Nacional, Planta Chimborazo ha identificado la necesidad de disponer de alternativas que motiven optimizar la molienda de cemento de uso general, en consecuencia, es factible incluir dentro de las dosificaciones las cenizas volantes que se obtienen del proceso de clinkerización.

Por esta razón, es relevante la aplicación de un análisis documental que se origina en los volúmenes de producción de la molienda de cemento que efectúa la empresa. Es decir, se requiere de una retroalimentación con los responsables de los procesos de producción que manejan datos pertinentes, sin embargo, un aporte valedero es también incluir la información de sectores que soportan la carga de producción como es el caso de la comercialización, planificación, calidad, entre otros. El procedimiento de la investigación es el siguiente:

- a. Revisión de la planificación de producción del cemento de uso general del 2021-2022.
- b. Determinación de la composición del producto que requiere el mercado en función del cemento procesado en el 2021-2022.

- c. Aplicación de estadística de los procesos asociados a los ciclos de producción del cemento en el 2021-2022.
- d. Causa-efecto de la producción.
- e. Caracterización del proceso de producción de cemento.
- f. Desarrollo de pruebas dentro de un plan piloto de producción.
- g. Desarrollo de conclusiones y recomendaciones.

3.6. Localización de la planta y proceso de molienda de cemento

3.10.1. Localización de la planta de producción Cemento Chimborazo

La planta de producción de la cementera está ubicada en la provincia de Chimborazo, cantón Riobamba, parroquia Calpi, junto a la panamericana Km 14 vía a la costa, en la comunidad San Juan Chico, Figura 1-3.



Figura 1-3: Ubicación de la Planta Chimborazo de la Unión Cementera Nacional UCEM S.A

Fuente: Información de Google Maps.

Cemento Chimborazo, inicia sus operaciones en el año 1956 con sistema de producción húmeda, en 1974 concluyen la instalación de la planta 2, incrementando su producción de 150 Ton/día a

500 Ton/día de clinker, su última inversión y ampliación como empresa pública fue en el año 2010 con la instalación del nuevo proceso de molienda de cemento con una capacidad de 100 Ton/h.

En el año 2013, existe la fusión entre la empresa Cemento Chimborazo y Cementos Guapan de la ciudad de Azogues, creando la Empresa Unión Cementera Nacional UCEM, con sede en la ciudad de Riobamba. En 2015 el Grupo Gloria de Perú ingresa como inversor privado, llegando a adquirir una parte de las acciones de la empresa, iniciando con el proyecto de expansión de la línea de producción.

En 2016 inician con la construcción de la nueva línea de clinkerización e iniciando sus operaciones a finales del año 2018 con una capacidad de 2600 ton/día de clinker, en el mismo año adquieren la totalidad de las acciones. Como empresa privada en 2022, concluye la construcción de una innovada línea de molienda de cemento y línea de paletizado, con una capacidad de 100 ton/h.

3.10.2. Localización del proceso de molienda

La molienda de cemento se encuentra en la planta 1, donde inicia con la recepción de las materias primas y concluye con almacenamiento del cemento en un silo multicámaras, para un posterior proceso de envasado y despacho, Figura 2-3.

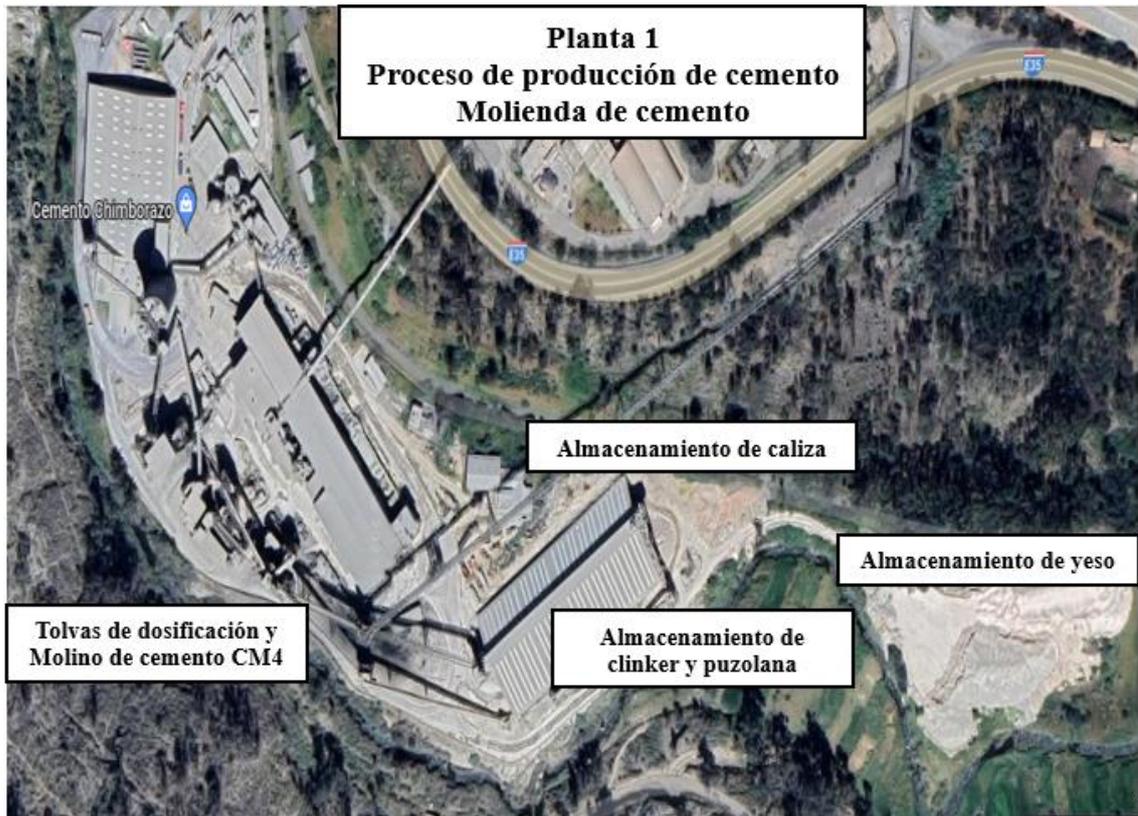


Figura 2-3: Ubicación de la Planta 1 en la Unión Cementera Nacional UCEM S.A
Fuente: Información de Google Maps.

3.11. Descripción del proceso de producción de cemento.

Como se puede ver en la Figura 3-3, la producción de cemento dispone de dos fases, la primera es la producción de clinker y la segunda fase constituye el proceso de molienda de cemento. Se produce clinker en Planta 3 y su proceso de molienda de cemento en Planta 1, de igual manera los procesos de envasado y paletizado.

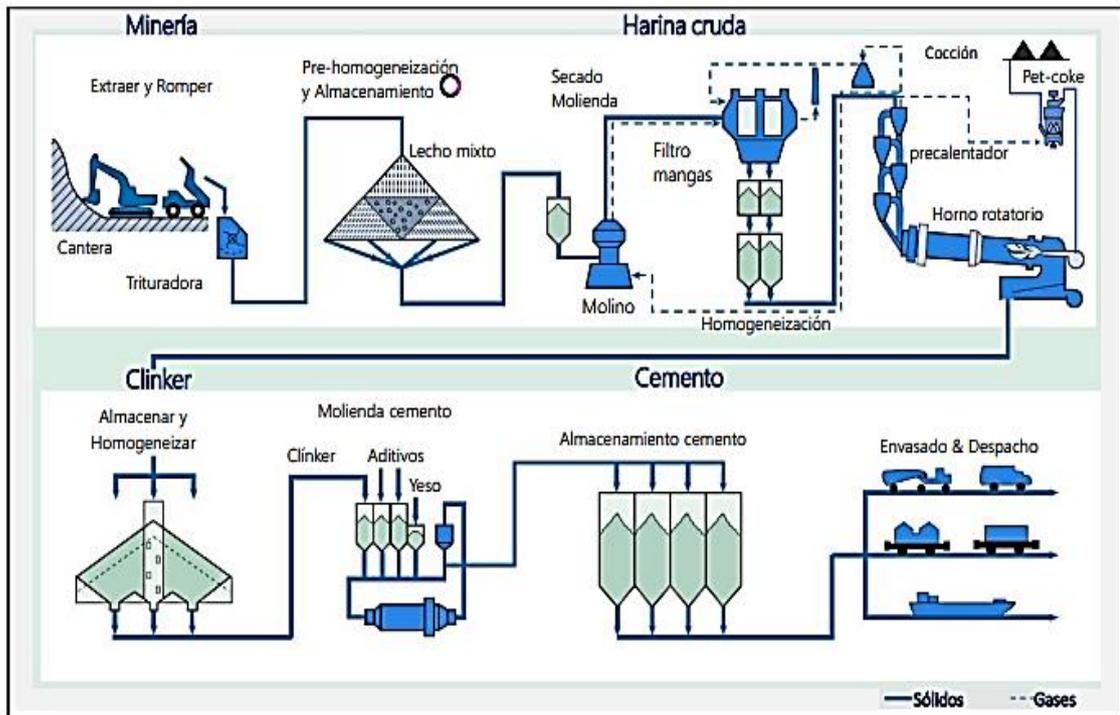


Figura 3-3: Proceso de producción de cemento.
Fuente: Información de UCEM.

3.11.1. Clinkerización

- **Explotación Minera de materias Primas.**

La materia prima es la caliza que es explotada desde la mina Shobol Norte 1, ubicado en la parroquia San Juan, a este material se le evalúa por el contenido de carbonato de calcio (CaCO_3) que contiene un 85% o 95% de pureza, Figura 4-3.



Figura 4-3: Explotación minera de piedra caliza
Fuente: Información de UCEM.

- **Trituración**

Mediante el uso de la trituradora de impacto, se reduce el tamaño de la piedra caliza <70 mm, lo que posteriormente es almacenado en el parque de pre homogenización, Figura 5-3.



Figura 5-3: Trituración de piedra caliza

Fuente: Información de UCEM.

- **Pre-homogenización**

Consiste en almacenar la caliza triturada de forma homogénea en el parque circular, buscando uniformidad de tamaño y composición química, el método de apilamiento utilizado es el chevcon, Figura 6-3.



Figura 6-3: Parque de pre-homogenización

Fuente: Información de UCEM.

- **Materiales correctores**

Es factible la adición de arcillas, escoria de hierro y calizas correctoras para corregir las composiciones químicas de las materias primas. La piedra caliza correctora y la arcilla atraviesan la trituradora antes de ser almacenados en el parque de materia prima correctoras, Figura 7-3.



Figura 7-3: Parque de materiales correctoras

Fuente: Información de UCEM.

- **Molino de crudo**

Las materias primas son almacenadas en tolvas independientes y son dosificados en base a la receta o composición que es establecida por el área de calidad, también utilizan un medidor nuclear para una correcta dosificación de las materias primas. El molino vertical tiene una capacidad de 360TPH, consiguiendo como producto harina o crudo con retenido $\leq 12\%$ malla de 90 micras, Figura 8-3.



Figura 8-3: Molino de crudo

Fuente: Información de UCEM.

- **Recolección de harina.**

La harina producida en el molino vertical es transportada mediante el flujo de aire caliente a los filtros de bolsas, donde es recuperado y transportado mediante aerodeslizadores hacia el silo de crudo o al precalentador, Figura 9-3.



Figura 9-3: Filtro de recuperación de crudo
Fuente: Información de UCEM.

- **Homogenización**

La harina recuperada del filtro es transportada al silo, donde se procede con la homogenización para minimizar la variación química y física que pueda existir durante el proceso, Figura 10-3.



Figura 10-3: Silo de homogenización y almacenamiento
Fuente: Información de UCEM.

- **Precalentamiento**

Es un proceso fundamental de la producción del clinker y usa harina homogenizada en el silo de almacenamiento o en el silo de pre mezcla, es transportada por elevadores de cangilones hacia el pre calentador, que calienta el material mediante los gases que se recuperan del horno. Por lo

general, la materia prima ingresa al pre calentador con una temperatura promedio de 50°C y sale a aproximadamente 1000°C, Figura 11-3.

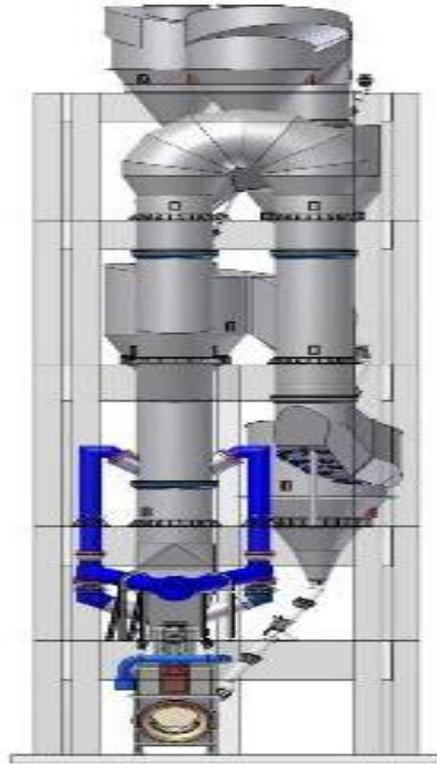


Figura 11-3: Torre precalentador
Fuente: Información de UCEM.

- **Calcinación**

La harina calentada en el precalentador ingresa al horno rotatorio que está a una temperatura promedio de 1450°C, por las altas temperaturas se produce reacciones químicas, dando como producto final el clinker. Para el horno se utiliza combustibles sólidos como el petcoke y el carbón mineral, que producto de su combustión producen cenizas volantes, Figura 12-3.



Figura 12-3: Horno de calcinación
Fuente: Información de UCEM}

- **Enfriado**

El clinker sale del horno a una temperatura promedio de 1200 °C, mediante ventiladores se logra a reducir su temperatura entre 80 y 100 °C. Posteriormente, este es transportado hacia los silos de almacenamiento, Figura 13-3.

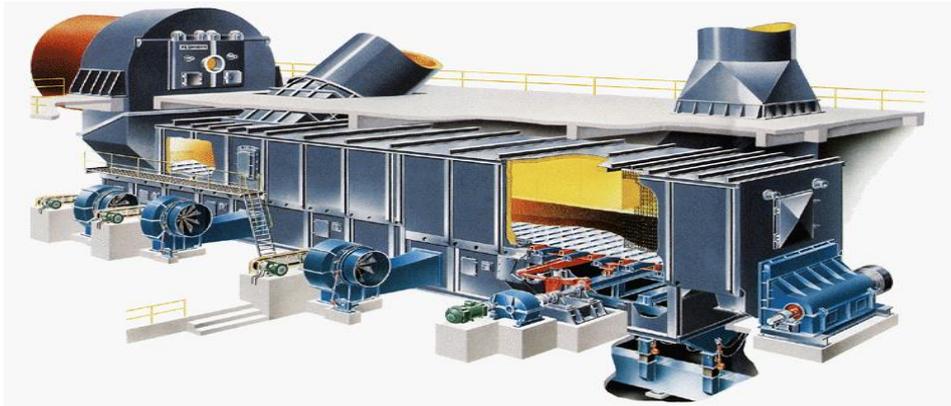


Figura 13-3: Enfriamiento de clinker
Fuente: Información de UCEM.

3.11.2. Molienda de Cemento

- **Transporte y almacenamiento de materia primas.**

El clinker producido en la planta 3, es transportado a la línea de producción de cemento, mediante bandas transportadoras o volquetas. Para la producción de cemento, también se utiliza como materias primas el yeso, caliza triturada y puzolana, Figura 14-3.



Figura 14-3: Parque de recepción, almacenamiento de materias primas
Fuente: Información de UCEM

Operador de equipo pesado, es el encargado de recibir y almacenar la materia prima. En coordinación con el operador del molino, carga las materias primas a la banda transportadora.

- **Transporte a tolvas de dosificación.**

El clinker es directamente transportado a las tolvas de dosificación mientras la caliza triturada, puzolana y yeso deben ser cargadas con una cargadora frontal a una banda transportadora, para transportarlas hacia las tolvas almacenamiento y de dosificación, Figura 15-3.



Figura 15-3: Transporte y almacenamiento de materia prima en tolvas
Fuente: Información de UCEM.

- **Secado de puzolana**

La puzolana por tener cierta humedad primero debe ingresar a un secador, mediante un filtro se recupera este material y se direcciona a la tolva de almacenamiento y dosificación, Figura 16-3.



Figura 16-3: Secador de puzolana
Fuente: Información de UCEM.

- **Dosificación**

Una vez transportado todas las materias primas hacia las tolvas, mediante balanzas calibradas se procede a dosificar todas las materias primas dependiendo del tipo de cemento que se quiera producir. Esta dosificación es controlada constantemente por el área de calidad. Ellos son los que determinan qué composición o qué cantidad debe añadirse de cada materia, Figura 17-3.



Figura 17-3: Dosificadores de materias primas
Fuente: Información de UCEM.

- **Molienda**

La molienda utiliza un molino vertical de bolas de dos compartimentos. Mediante la rotación de los cuerpos moledores se procede con la molienda de las materias primas que ingresan al molino, obteniendo el cemento con las características deseadas. La primera cámara o compartimento cuenta con cuerpos moledores más grandes para transportar un producto óptimo a la segunda cámara donde se concluirá con el proceso de molienda, utilizando cuerpos moledores más pequeños. El cemento que no tenga la finura deseada o no cumple las características, se debe reprocesar, Figura 18-3.



Figura 18-3: Molino de Cemento CM4

Fuente: Información de UCEM.

La línea de producción es automatizada, el operador del molino de cemento monitorea las operaciones desde el cuarto de control. Las principales funciones son:

- Coordinar con el ayudante del área las inspecciones de los equipos.
- Revisar con el operador de la cargadora los abastecimientos de las materias primas.
- Comunicar a control de calidad las variaciones de operación, para control la calidad del producto.
- Monitoreo de los planes de manteamiento y recepción de equipos para operación.
- Seguimiento de apago y puesta en marcha de equipos en etapas de mantenimientos planificados.

Todas las actividades de corrección en las áreas de operación son ejecutadas por el ayudante del área del molino CM4.

- **Filtro**

El cemento de uso general es recuperado mediante filtros de desempolvado, para posteriormente ser transportado mediante aerodeslizadores hacia los silos de almacenamiento, Figura 19-3.



Figura 19-3: Filtro de mangas

Fuente: Información de UCEM.

- **Paletizado**

El cemento de uso general que es recuperado es transportado y almacenado en los silos. Se procede con el envasado en presentaciones de 50 kg y de 25 kg, que posteriormente son paletizado y almacenados, para enviarlos en los camiones a las bodegas de distribución. También existe la distribución del cemento en granel, que son transportados en camiones cisterna, Figura 20-3.



Figura 20-3: Paletizado y despacho de cemento

Fuente: Información de UCEM.

- **Equipo de mantenimiento:** La Unión Cementera Nacional cuenta con un departamento de mantenimiento, quienes se encargan de dar soporte oportuno para una correcta operación de los equipos y maquinarias. En este sentido, se desarrolla:
- **Mantenimiento eléctrico,** encargados de una correcta funcionalidad del sistema eléctrico y electrónico.

- **Mantenimiento mecánico**, proceden con mantenimiento oportunos al sistema mecánico, hidráulico del molino.
- **Mantenimiento programado**, trabajan en base a manuales de operación, historial de mantenimiento, para gestionar la adquisición de los repuestos y la programación de los mantenimientos preventivos.
- **Equipo móvil**, se encarga de la correcta funcionalidad de los equipos pesados, como la cargadora frontal, volquetas y montacargas, que son utilizados para el proceso de molienda de cemento y uso general.

3.12. Diagrama de recorrido inicial del proceso de producción

En la Figura 21-3 y Figura 22-3, se describe de manera general el recorrido de la materia prima necesaria para producir clinker y el proceso de molienda de cemento.

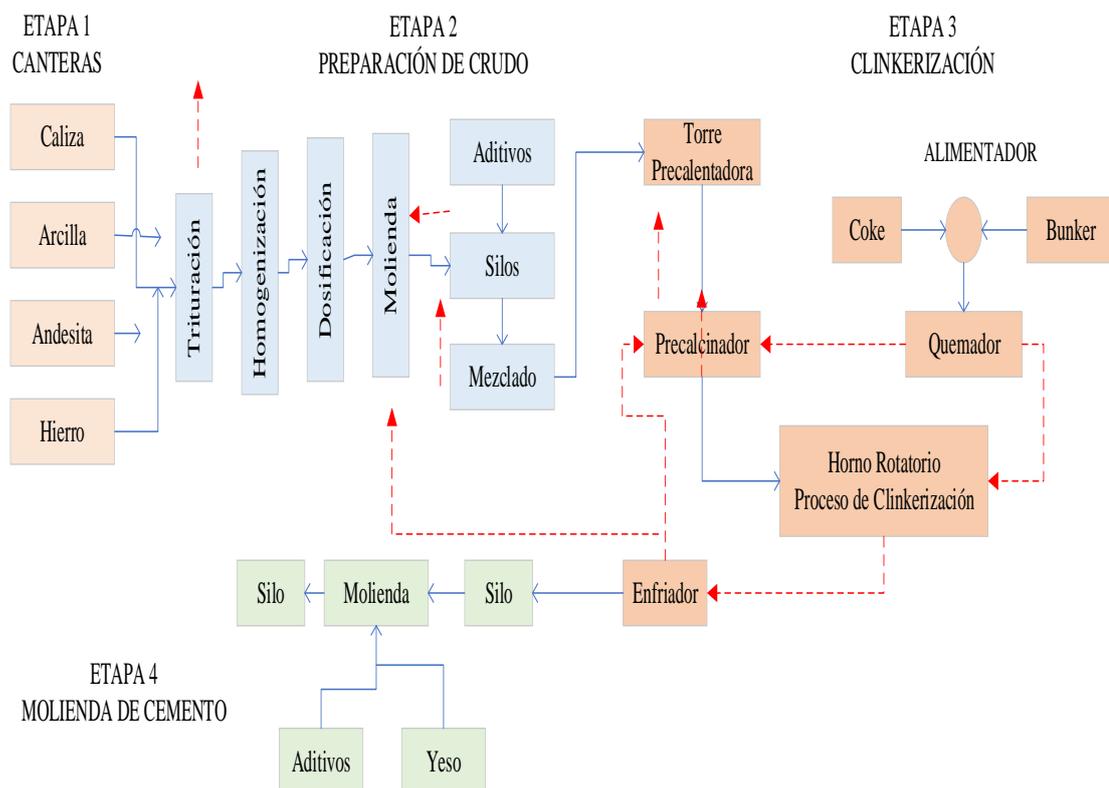


Figura 21-3: Proceso de producción de cemento de uso general
Fuente: Información de UCEM

Proceso actual de molienda de cemento de uso general

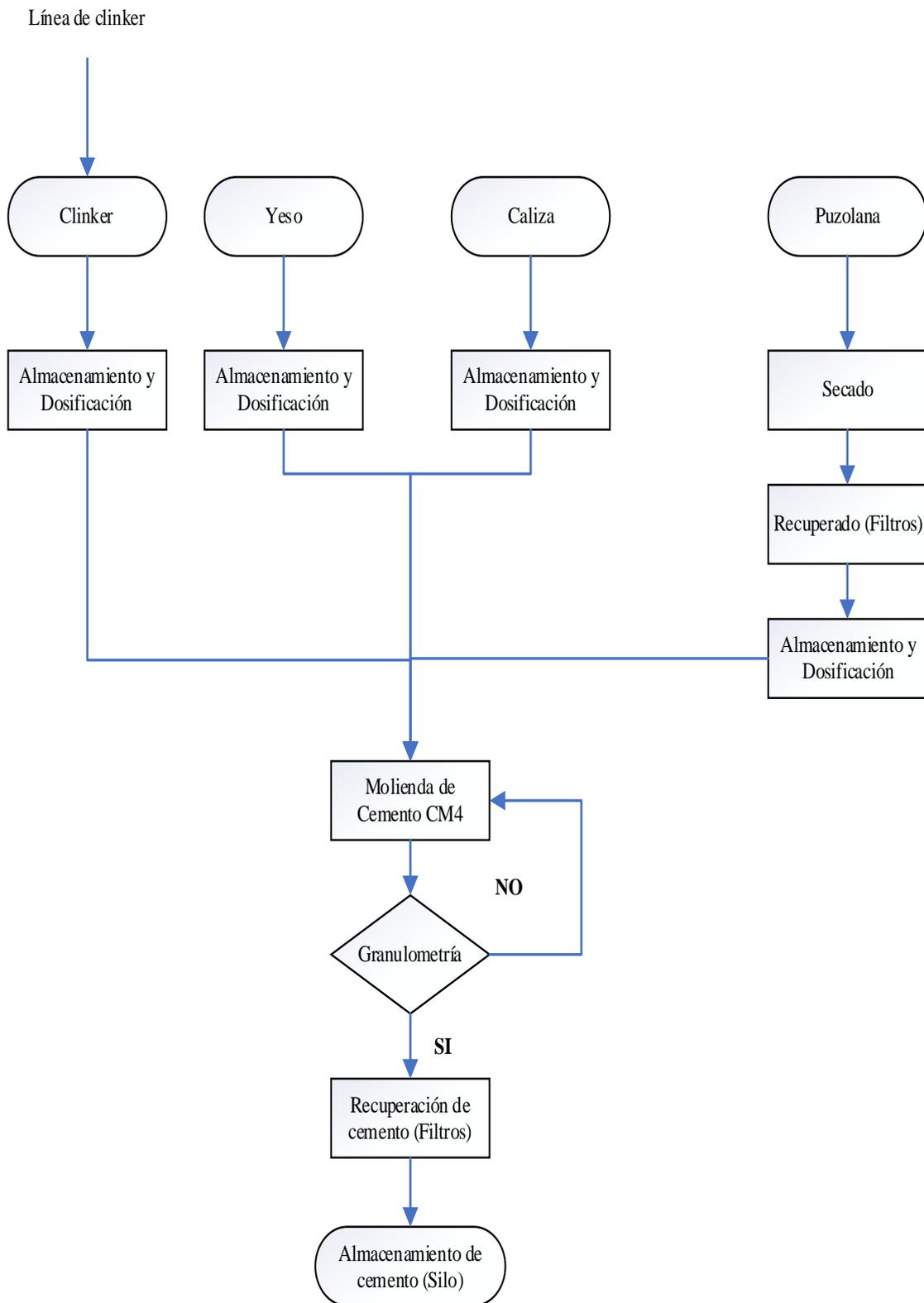


Figura 22-3: Proceso actual de molienda de cemento de uso general – Molino CM4

Fuente: Información de UCEM.

3.13. Cálculos de métricas del proceso de molienda de cemento de uso general en el molino CM4

La Unión Cementera Nacional, en la planta Chimborazo cuenta con un molino horizontal que dispone de cuerpos moledores, donde se evalúa mensualmente su funcionalidad; uno de los indicadores que se evalúa es la denominada eficiencia operativa. En este sentido, se determina la Tabla 4-3 y Figura 23-3.

Tabla 1-3: Eficiencia operativa del molino CM4

AÑO	MES	EFICIENCIA OPERACIONAL
2022	Enero	93.3%
	Febrero	90.3%
	Marzo	95.1%
	Abril	94.8%
	Mayo	90.6%
	Junio	93.7%
	Julio	87.5%
	Agosto	90.4%
	Septiembre	92.6%

Fuente: Información de UCEM

Realizado por: Pilco, José, 2023.

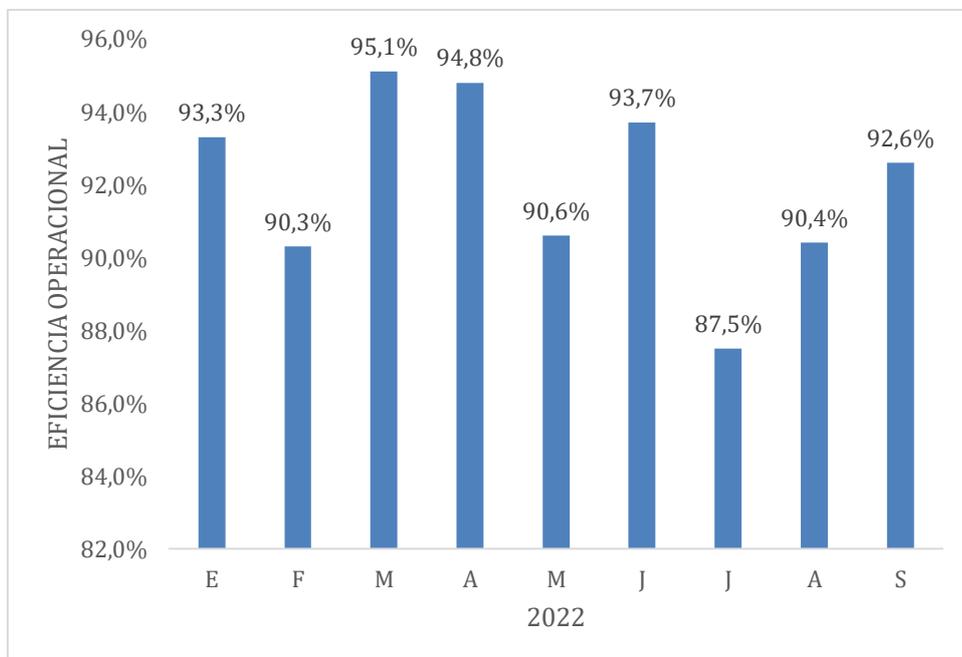


Figura 23-3: Eficiencia operativa, período enero 2022-septiembre 2022

Fuente: Información de UCEM.

La eficiencia operacional del molino CM4, del enero a setiembre del 2022 fue del 92%, detallado en la Tabla 5-3 y en Figura 23-3 y Figura 24-3.

Tabla 2-3: Eficiencia operacional del molino CM4

Eficiencia operacional del año hasta la fecha (YDT)	
2021	2022
91%	92%

Fuente: Información de UCEM

Realizado por: Pilco, J. 2022.

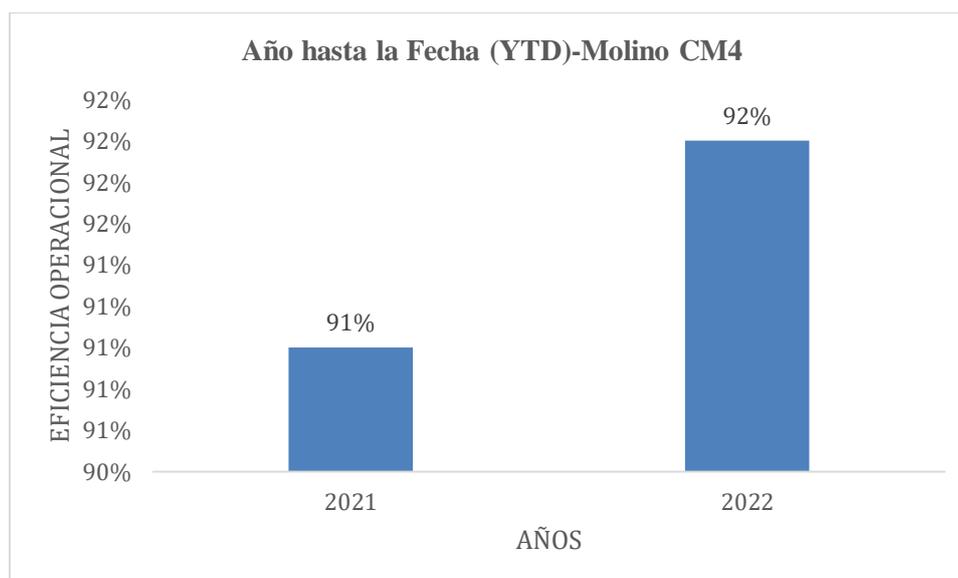


Figura 24-3: Eficiencia operacional del molino CM4, período enero 2021-septiembre 2022

Fuente: Información de UCEM.

Se puede observar que la eficiencia operacional del molino CM4 del periodo 2022 hasta la fecha es similar al periodo 2021, existe una variación mínima del 1%.

3.14. Capacidad de producción inicial de molino CM4

El molino CM4, tiene la capacidad de producir cemento de uso general (GU) y Cemento de alta resistencia temprana (HE).

Tabla 3-3: Capacidad de producción inicial del molino CM4

AÑO	MES	GU	HE
2021	Enero	73%	27%
	Febrero	73%	26%
	Marzo	76%	23%
	Abril	74%	26%
	Mayo	76%	24%

	Junio	72%	27%
	Julio	73%	26%
	Agosto	76%	24%
	Septiembre	78%	21%
	Octubre	75%	24%
	Noviembre	74%	26%
	Diciembre	71%	29%
2022	Enero	74%	25%
	Febrero	74%	26%
	Marzo	75%	25%
	Abril	73%	27%
	Mayo	76%	24%
	Junio	73%	27%
	Julio	72%	27%

Fuente: Información de UCEM

Realizado por: Pilco, José, 2023.

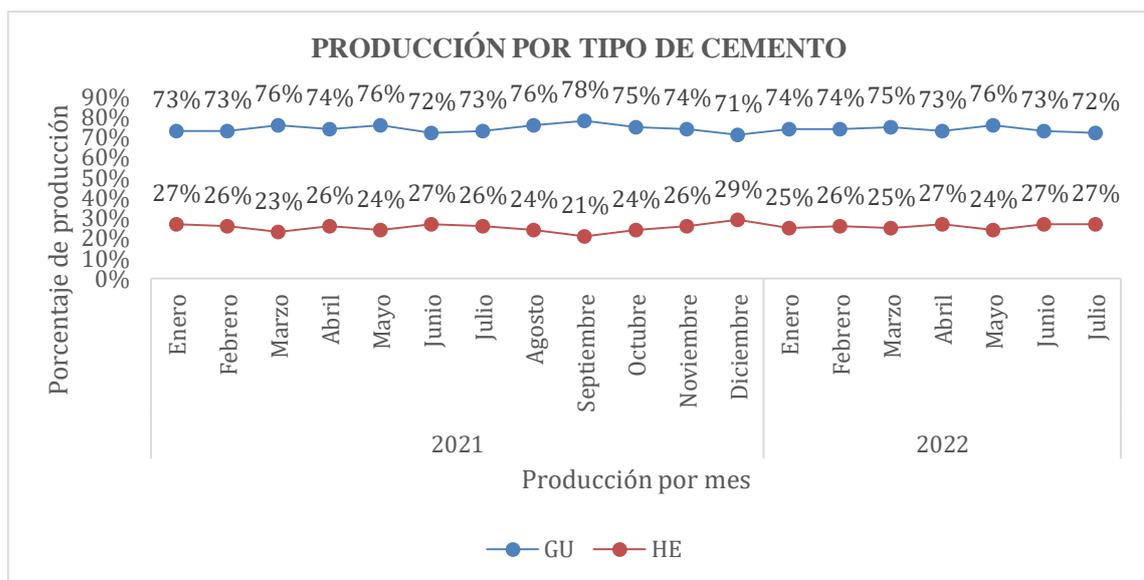


Figura 25-3: Producción por tipo de cemento, período enero 2021-julio 2022 en el molino CM4

Fuente: Información de UCEM.

Del 100% de producción de cemento de la empresa, se produce un promedio del 74% el cemento de uso general (GU), Figura 25-3.

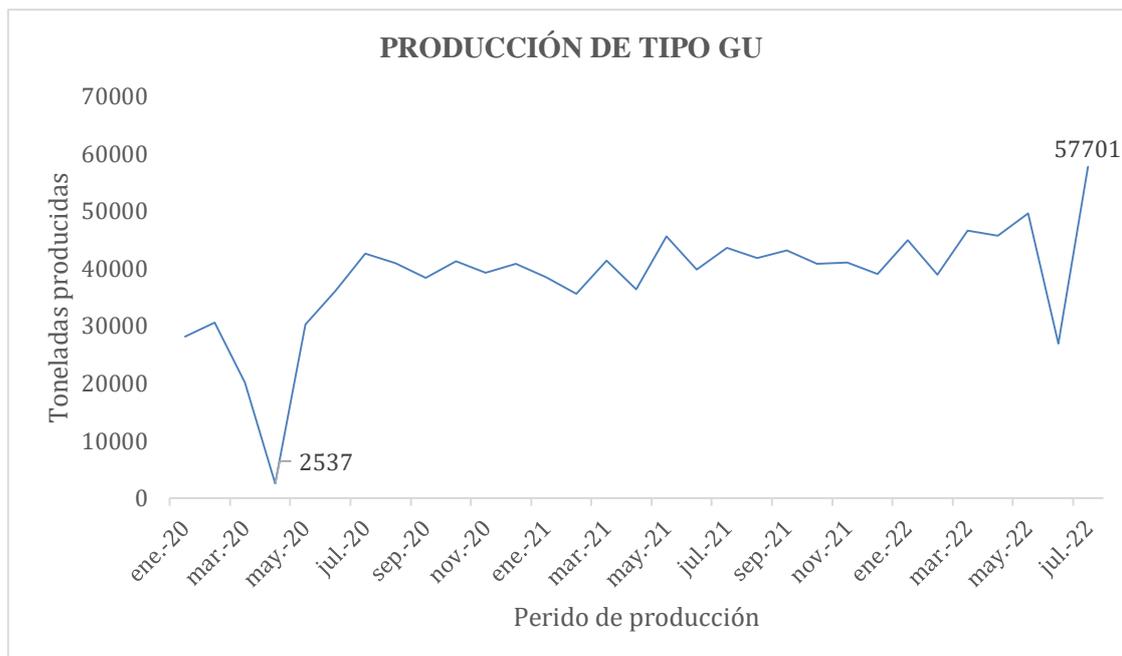


Figura 26-3: Producción de cemento de tipo GU, período enero 2020-julio 2022 en el molino CM4

Fuente: Información de UCEM

Según la Figura 26-3, desde enero del 2020 a julio 2022, se puede observar que existe un incremento en la producción de cemento de uso general, llegando en el mes de julio producir hasta 57.701 toneladas.

3.15. Composición inicial de cemento de uso general (GU)

Los datos receptados para determinar la composición o dosificación inicial de materias primas fueron desde enero del 2020 al julio del 2022, Tabla 7-3.

Tabla 4-3: Dosificación inicial de materia prima para la producción de cemento de uso general

	Dosificación de Materias Primas			
	Clinker	Puzolana	Caliza	Yeso
Promedio	56.5%	31%	9%	3%
Desviación Estándar	1.08%	0.68%	1.07%	0.47%

Fuente: Información de UCEM

Realizado por: Pilco, José, 2023.

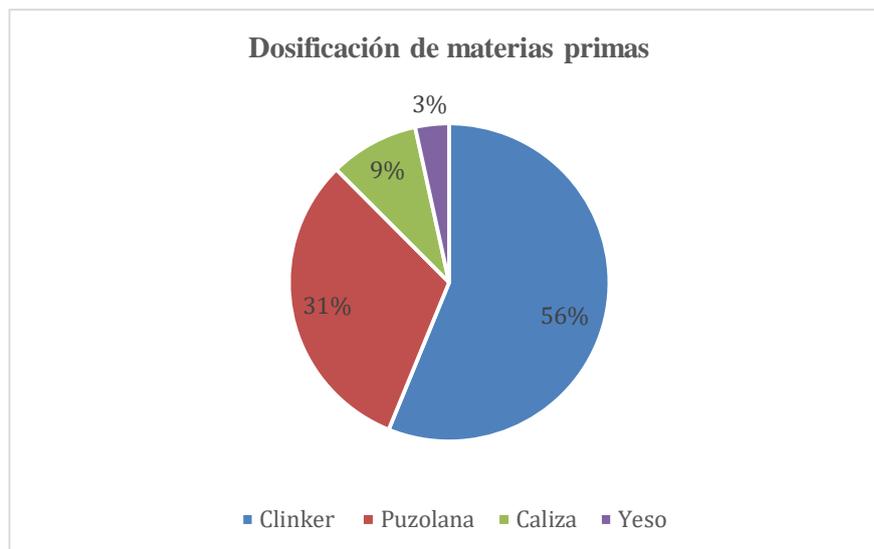


Figura 27-3: Dosificación de materia prima
Fuente: Información de UCEM

Según la Tabla 7-3 y la Figura 27-3, la materia prima más utilizada para la producción del cemento de uso general es el clinker con un promedio de 56%, la desviación estándar se ubica en el 1.03%, siendo la materia prima más costosa.

Tabla 5-3: Matriz de control de calidad del cemento de uso general GU

		MATRIZ DE CONTROL DE CALIDAD								
AREA	VARIABLES DE CONTROL	LIMITES DE CONTROL (%)		FRECUENCIA	FUNCION DE CONTROL	RESPONSABLE DEL AREA	PROCEDIMIENTOS / INSTRUCTIVOS			
		Maximo	Minimo							
MOLIENDA DE CEMENTO	CEMENTO TIPO GU	Perdida al fuego	NA	-	COMPOSITO FORMADO DE LA PRODUCCION DIARIA	SEGUN REQUISITOS DE LA NORMA DE REFERENCIA	Control de Calidad	Análisis Químico: Gravimétrico		
		Trióxido de Azufre (SO ₃)	4,0	-				Análisis Químico: Equipo de Fluorescencia RX		
		Óxido de Magnesio (MgO)	6,0	-				Análisis Químico: Equipo de Fluorescencia RX		
		Contenido de Aire en Mortero	12,0	-				Ensayos físicos		
		Resistencias a la compresión 3 d (Mpa)	-	13,0				Ensayos físicos		
		Resistencias a la compresión 7 d (Mpa)	-	20,0				Ensayos físicos		
		Resistencias a la compresión 28 d (MPa)	-	28,0				Ensayos físicos		
		Tiempo de Fraguado Inicial (minuto)	-	45				Ensayos físicos		
		Tiempo de Fraguado Final (minuto)	420					Ensayos físicos		
		Expansión en Autoclave	0,80					Ensayos físicos		
		Retenido en Malla de 45 micras	4,00	2,80				UNA MUESTRA TOMADA CADA 2 HORAS	ESPECIFICACIONES DE CONTROL DE CALIDAD	Ensayos físicos
		Blaine	5500	4500						Ensayos físicos

Fuente: Cementos Chimborazo

Realizado por: Pilco, José, 2023.

Parámetros definidos en base a normativas y datos históricos de la misma empresa.

Tabla 6-3: Matriz de control de calidad del cemento de uso general. Dosificación

TIPO DE CEMENTO	PARÁMETRO	MIN	OBJETIVO	MAX
Cemento de uso general	Clinker	56.5	50	47.8
	Caliza	10	14	15
	% Puzolana	30	32	33
	% Yeso	3.5	4	4.2

Fuente: Cementos Chimborazo

Realizado por: Pilco, José, 2023.

Información de referencia utilizada por los operadores del molino CM4, los mencionados datos son corroborados por control de calidad, Tabla 9-3.

3.16. Productividad y costo de producción del cemento de uso general (Según el porcentaje de adición de clinker)

La determinación de la productividad y el costo de producción del cemento de uso general se soportan en base al porcentaje de adición de Clinker que se encuentra detallado en la Tabla 9-3.

3.16.1. Productividad actual de clinker

En la Tabla 9-3, se detalla que cada tonelada de cemento de uso general, requiere de la adición de un promedio de 56.5% de Clinker y con una desviación estándar del 1.08%. Mientras tanto, la productividad actual, dispone del siguiente cálculo:

$$Productividad (Actual) = \frac{1kg \text{ de cemento } GU}{0.565 \text{ kg de clinker}} = 1.78$$

Lo anterior, determina que 1 Kg de clinker produce un promedio de 1.78 Kg de cemento de uso general.

3.16.2. Costo de producción actual

La definición del costo del clinker por cada tonelada de cemento de uso general, se trabaja con el porcentaje de adición del clinker de la Tabla 9-3, el costo promedio actual de producción por tonelada de cemento de uso general es de 67.94 dólares americanos con el 56.5% de adición de Clinker. Se estima que el clinker aporta con el 79.11% al costo de producción en cada tonelada de cemento GU.

$$\text{Costo clinker (Actual)} = 67.94 \frac{\$}{\text{Ton. de cemento}} * 0.7911$$

$$\text{Costo de clinker (Actual)} = 53.74 \frac{\$}{\text{Ton. de cemento}}$$

De los \$ 67.94 que cuesta producir una tonelada de cemento de uso general, los \$ 53.74 representa el costo del clinker.

3.17. Layout actual de la planta de producción de cemento de uso general en molino CM4

En el layout actual el proceso de molienda en el molino CM4, inicia desde la recepción de la materia prima hasta el almacenamiento de cemento el silo, Figura 28-3.

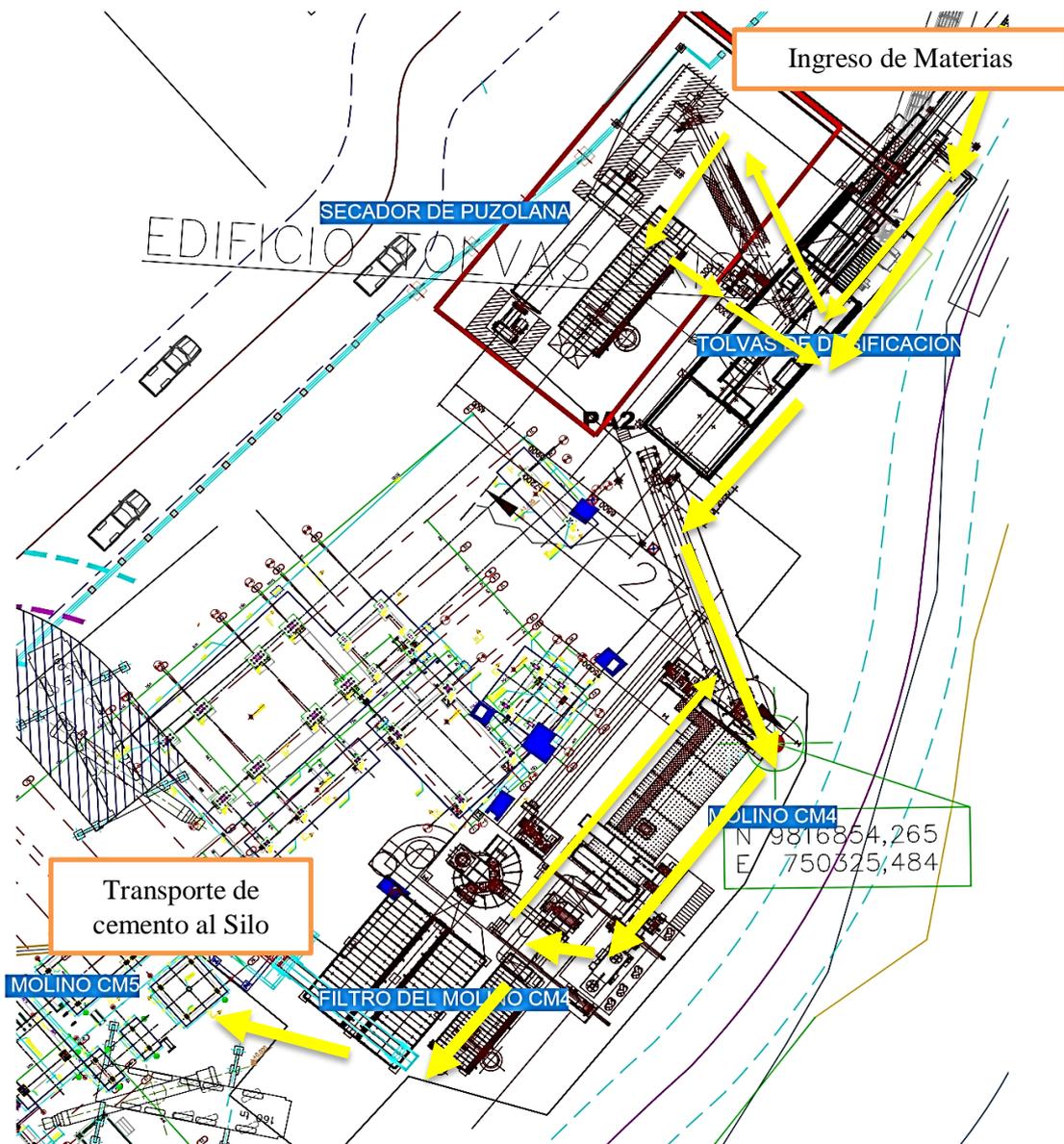


Figura 28-3: Layout del molino CM4

Fuente: Información de UCEM.

3.18. Procedimiento experimental aplicado

La presente investigación se orienta al diseño de un sistema de adición de cenizas volantes en la molienda de cemento de uso general, de manera complementaria, se verifica el uso de la ceniza volante extraída del proceso de clinkerización de la Planta Chimborazo de la Unión Cementera Nacional.

En lo relacionado a la aplicación de una norma, se respalda su desarrollo en la Norma NTE INEN 490:2011, Cemento Hidráulicos compuestos. Requisitos; en este ámbito, se define los requisitos que deben cumplir los cementos hidráulicos compuestos y que utilizan adiciones.

3.18.1. Determinación de variables de estudio.

Las variables que se definen para la investigación son las siguientes:

- **Variable de calidad (Resistencia):** Determina si la adición promedio de cenizas volantes afecta la resistencia del cemento de uso general, este particular en base a la Norma NTE INEN 488:2009; este particular se enfoca a 3 días (13MPa), a 7 días (20 MPa) y a los 28 días (28 Mpa).
- **Variable de productividad:** En este caso, el promedio de la productividad del clinker varía en función del porcentaje de adición al cemento de uso general.
- **Variable de costos de producción:** El costo promedio del clinker varía de acuerdo con el porcentaje de adición al cemento de uso general.

3.18.2. Planeación y ejecución del diseño de experimento de adición de cenizas volantes al proceso de molienda de cemento de uso genera.

Definición del procedimiento de ensayo: Determina las responsabilidades de los procesos involucrados y el orden de las actividades que se deben realizar en la planeación, en la toma de muestras, ejecución de ensayos e interpretación de resultados; las mencionadas actividades son ejecutadas en base a la normativa y uso de equipo de laboratorio.

Selección de factores y niveles: La investigación considera como factores a la materia prima y la ceniza volante, mientras que los niveles son los porcentajes máximos y mínimos de adición de cada actor. En el caso de los factores de clinker, yeso, caliza y puzolana, el diseño de experimento maneja dos niveles (máximos y mínimos).

Para el caso de la ceniza volante, se debe establecer parámetros químicos y mineralógicos en el Laboratorio de Control de Calidad de la empresa Unión Cementera Nacional Planta Chimborazo mediante el uso de un difractómetro de rayos X; se mide los parámetros como el silicato tricálcico o alita (C3S), silicato dicálcico o belita (C2S), aluminato tricálcico o aluminato (C3A), aluminoferrito tetracálcico o ferrita (C4AF), mismos que son controlados como valores máximos y mínimos. Según los ensayos, se define los porcentajes óptimos dentro de la adición de ceniza en los ensayos.

Elección de diseño experimental: Debido a la estructura de la investigación, se trabaja con el diseño de experimentos factorial 2^k , donde se considera a “ k ” como los factores (clinker, caliza, yeso, puzolana y ceniza volantes) y 2, los niveles (máximos y mínimos). Debido a la limitación de tiempo y recurso, se trabaja con un diseño experimental 2^{k-2} , reduciendo de 32 a 8 tratamientos. La definición de los tratamientos se desarrolla mediante el uso del software Minitab. En el caso de presentarse problemas para la consecución de resultados favorables, se considera trabajar con datos históricos de dosificación de la empresa.

Realización del experimento: Mediante las combinaciones de factores y niveles en el Minitab, se debe proceder a la ejecución de los ensayos, en este caso, las actividades a ejecutar son:

- **Toma de muestras de cenizas volantes**

Las muestras de cenizas volantes se toman desde los muestreadores del filtro principal del proceso de clinkerización; cada muestra determina un peso de 1 kg y es necesario la recolección de 10 muestras mediante el uso de recipientes independientes (fundas plásticas). Cada muestra es pesada en balanzas digitales y todas las muestras son mezcladas para los ensayos de laboratorio.

- **Ensayos químicos y mineralógicos**

Es la actividad que requiere el uso de un espectrómetro de fluorescencia de rayos X, donde se ejecuta el análisis de los compuestos o de elementos de la ceniza volantes; el equipo mediante un tiempo promedio de 3 minutos es capaz de completar el análisis y generar los datos cuantitativos a validarse con los niveles definidos. La mencionada actividad se desarrolla en el Laboratorio de Calidad de la empresa.

- **Mezcla de materias primas y ceniza volante**

La mezcla de las materias primas y las cenizas volantes que ingresan a un molino de laboratorio hasta conseguir la finura deseada, requiere del uso de una malla de 45 micras. El segundo método constituye la mezcla de la ceniza volante con el cemento estándar, mientras tanto, la adición de ceniza es función del porcentaje de adición de clinker que se tiene en el lote de producción de cemento de uso general.

- **Preparación de mortero**

El cemento con la adición de cenizas volantes ingresa a un mezclador de mortero de cemento con una capacidad de 5 litros, a una velocidad controlada de 62 rpm a 285 rpm, en esa condición se desarrolla una pasta.

La mezcla de los morteros de prueba se desarrolla según la norma NTE INEN 155, se utiliza un molde de 6 cubos de 50 mm de arista, según el detalle de la norma NTE INEN 488:2009; adicionalmente, se detalla la relación agua cemento ($a/c=0.485$). En este caso, se adiciona 1375 gramos de arena por cada 500 gramos de cemento.

- **Almacenamiento de especímenes (cubos)**

Según la norma NTE INEN 488:2009, existe un proceso de colado en la cámara de curado o cuartos cubiertos con tanques de agua; por cada tratamiento o ensayo, se obtiene 6 cubos que posteriormente son utilizados en las pruebas de compresión.

- **Pruebas de compresión.**

Las pruebas realizadas en el Laboratorio de Calidad de la Planta Chimborazo de UCEM, utiliza un equipo de ensayo de compresión, el cual, dispone de un diseño bajo la norma ASTM C109. Las pruebas de compresión de los especímenes deben ser ejecutados en los tiempos definidos, según la norma NTE INEN 488:2009.

En el caso de los ensayos, los especímenes deben ser retirados de la cámara de curado, secado y se debe eliminar los granos/polvo que cubren los cubos. Además, las pruebas son ejecutadas en equipos de compresión con certificación INEN. Estos ensayos son ejecutados a 3 días (13Mpa), 7 días (20MPa) y a los 28 días (30MPa), residencias que son catalogadas como mínimas para la empresa, en cada ensayo se trabaja con dos especímenes.

3.18.3. Análisis de datos

Se debe considerar que el diseño de experimentos fue ejecutado en Minitab, y los ensayos se ejecutaron bajo los criterios de la normativa INEN. Los resultados de los ensayos de laboratorio (resistencia) son ingresados para el análisis y la elaboración de tablas y gráficos.

3.18.4. Interpretación de resultados del diseño experimental del sistema de adición de cenizas volantes

La correcta interpretación requiere de la elaboración de gráfica de medias ajustadas en el Minitab; la validación de la dosificación apropiada de materias primas y la producción de cemento de uso general requieren del porcentaje óptimo de adición de cenizas volantes. Es importante la

verificación de las gráficas de correlación que facilitan la interpretación de la potencial correlación entre la materia prima y la ceniza volante.

3.18.5. Validación de la hipótesis del diseño experimental del sistema de adición de cenizas volantes

La validación de la hipótesis de la variable de resistencia requiere del Análisis de Varianza (ANOVA) obtenida en el Minitab, el resultado es función de los valores de $P < 0.05$, mientras el nivel de significancia es del 5%. Por otra parte, la validación de la hipótesis de la variable de productividad y el costo del Clinker, se ejecuta en el Minitab mediante una prueba t-student de una variable, en este caso, la interpretación se vincula a $P < 0.05$, con un nivel de significancia del 5%. Los mencionados resultados permiten concluir la aceptación o el rechazo de las hipótesis planteadas en cada variable.

CAPÍTULO IV

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para el diseño del sistema de adición de cenizas volantes en la producción de cemento de uso general, se debe conocer el porcentaje de material que se puede adicionar sin afectar la calidad de cemento y la cantidad de cenizas volantes que puede extraer de la línea de clinkerización.

4.1. Declaración de hipótesis

En esta investigación es importante probar la adición de cenizas volantes en el proceso de molienda de cemento de uso general no afectara a la calidad del producto final, principalmente las resistencias mínimas detallados en la Norma INEN 488. Las variables independientes definidas para estas pruebas son los porcentajes de las materias primas incluido las cenizas volantes, y la variable dependiente es la resistencia obtenida en los ensayos de laboratorio (Ver Tabla 2-1)

Se declara las siguientes hipótesis:

$$H_0: \mu_{5\%} = \mu_{10\%}$$

H_0 = La adición promedio de ceniza no afecta la resistencia del cemento de uso general.

$$H_1: \mu_{5\%} \neq \mu_{10\%}$$

H_1 = La adición promedio de ceniza afecta la resistencia del cemento de uso general.

La normativa INEN 488 detallada las mínimas resistencia que debe cumplir a los 3 días, 7 días y 28 días.

4.2. Diseño de experimentos

4.2.1. Procedimiento de ensayos para la adición de ceniza en la molienda de cemento GU

Objetivo

Determinar la secuencia de las actividades que permitan la adición de ceniza en el procesamiento de cemento de uso general.

Alcance

Procesamiento de cemento de uso general mediante la adición de ceniza en la empresa.

Responsabilidades

- El jefe de producción a través del responsable de la molienda de cemento de uso general facilita la ejecución del proceso tomando en cuenta las variaciones solicitadas por el área de Calidad.
- El analista de Control de Calidad es el encargado del levantamiento de los datos inherentes al análisis químico, mineralógico y a los ensayos físicos necesarios para la valoración de las variables de control en las probetas que son sujetas del correspondiente análisis.
- El jefe de calidad y analista de calidad deben determinar la prueba que cumpla los requisitos de la NTE 2380:2011.

Procedimiento

- El jefe de control de calidad establece el plan de muestreo en campo de la ceniza volantes como del cemento de uso general sin la adición de cenizas volantes.
- El jefe de control de calidad entrega al jefe de producción el plan de muestreo para que coordine con el supervisor y los operadores de área la recolección de muestras en campo.
- El jefe de producción entrega las muestras de cemento y cenizas al jefe de calidad, en base las especificaciones recibidas.
- El análisis mineralógico y químico requieren de la intervención del equipo de fluorescencia RX debidamente calibrado.
- En el caso de los ensayos de físicos se establece una frecuencia de pruebas para la medida de la compresión. La frecuencia de pruebas para la medida de la compresión es cada 3 días, 7 días y 28 días. Los valores de resistencia a la compresión son mínimos y son medidos en unidades de MPa debiendo alcanzar: 13 MPa (a los 3 días), 20 Mpa (a los 7 días) y 28 Mpa (a los 28 días).
- Los valores obtenidos en las pruebas con la adición de la ceniza constituyen pruebas experimentales que requieren el registro de datos y la posterior comprobación de los valores obtenidos.

4.2.2. Definición del problema

En esta investigación se busca inferir en las variables que nos permitan conseguir la reducción de consumo de clinker y caliza en la producción de cemento de uso general, adicionando las cenizas volantes que se produce en la línea de clinkerización. El objetivo es diseñar un sistema de adición de cenizas volantes, en función de resultados de los ensayos y las capacidades de producción, sin afectar las especificaciones del producto y que sea rentable su instalación y operación.

4.2.3. Selección de factores y variables

Para el diseño de experimentos es importante definir los factores y sus niveles.

4.2.3.1. Clinker

Considerado como material sintético que es producido en la línea de clinkerización, para determinar los porcentajes de adición, depende del contenido silicato tricálcico o alita (C3S) que aporta en las residencias tempranas, silicato dicálcico o belita (C2S) aporta para resistencias tardías, aluminato tricálcico o aluminato (C3A) aporta en fraguado inicial y en la evolución del calor, aluminoferrito tetracálcico o Ferrita (C4AF) da la contextura y el color gris.

- Porcentaje máximo de clinker: 52.2%
- Porcentaje mínimo de clinker: 39.8%

4.2.3.2. Caliza

Adicionador piedra caliza triturada al proceso de molienda de cemento de uso general, tiene un carácter significativo para el rendimiento del cemento, agregado al proceso de molienda para conseguir la finura deseada.

Mediante datos históricos de producción, se han establecido los porcentajes de adición.

- Porcentaje máximo de caliza: 13%
- Porcentaje mínimo de caliza: 9 %

4.2.3.3. Puzolana

Unión Cementera Nacional, no cuenta con canteras de extracción de puzolana, actualmente se adquiere a proveedores del sector y de la provincia de Cotopaxi, esta materia prima es analizada por control de calidad para definir el porcentaje de adición, la puzolana aporta en la resistencia final del cemento de uso general y evita expansiones.

El porcentaje de adición es definido en base a datos históricos de la empresa:

- Porcentaje máximo de puzolana: 33%
- Porcentaje mínimo de puzolana: 30%

4.2.3.4. Yeso

En su mayoría el yeso es importado desde México, Perú, Alemania, España, etc., este material regula la reacción de hidratación y retarda el tiempo de fraguado del cemento de uso general, su porcentaje de adición es definida por control de calidad. El porcentaje de adición es definido en base a los datos históricos de la empresa.

- Porcentaje máximo de yeso: 4,2%
- Porcentaje mínimo de yeso: 3.5%

4.2.3.5. Cenizas Volante

Producto de la combustión del combustible sólido utilizado en el horno (carbón, petcoke), este material es arrastrada y recuperado en los filtros y recirculada en el proceso de clinkerización hasta en un 10% de la capacidad operativa. Para definir los niveles de este factor, se trabajó en base a los parámetros de análisis químicos y mineralógicos del cemento de uso general.

Tabla 1-4: Parámetros químicos y mineralógicos del cemento de uso general

	Min	Objetivo	Max
C₃S	55	62	68
C₂S	20	15.5	12
C₃A	10	9	8
C₄AF	9	8	6
CaO	0.75	1.5	2
Otros Óxidos	N/A	4	4
SO₃	N/A	N/A	4
MgO	N/A	N/A	6

Fuente: Información de UCEM

Realizado por: Pilco, José, 2023.

Para definir los niveles, se realizaron análisis del cemento de uso general con adiciones de cenizas volantes desde el 1 % al 15 %, en base a los parámetros definidos en la Tabla 1-4.

Tabla 2-4: Análisis químico y mineralógico del cemento de uso general con adición de cenizas volantes

Adición (%)	C₃S	C₂S	C₃A	C₄AF	CaO	Otros óxidos	SO₃	MgO
1	70	8.8	6.5	4.51	5	5.19	5.03	7.23
2	70	9.3	6	4.95	4.76	4.99	5.03	6.65
3	68	9.65	7.8	5.35	8.89	0.31	4.44	6.89
4	68	10.1	8.14	6.12	2.1	5.54	4.02	6.32
5	66.5	12.9	8.65	6.78	1.95	3.22	3.9	5.87
6	66.2	13.1	8.34	7.37	1.52	3.47	3.56	4.6
7	64.7	13.65	9.12	8.14	1.3	3.09	2.86	3.98

8	59.1	14.45	9.6	8.78	1.2	6.87	3.03	4.18
9	60	15.2	10	8.78	1.23	4.79	2.98	4.45
10	59.5	15.9	10.34	9.09	1	4.17	3.89	5.01
11	56.8	17.2	11.2	9.44	1	4.36	4.03	5.9
12	55.2	18.93	12	10.45	0.87	2.55	4.46	6.04
13	52.9	19.35	13.4	10.89	0.76	2.73	5	7.98
14	50.7	20.1	14.2	11.04	0.65	3.29	4.02	6.67
15	48.6	20.67	15	11.89	0.5	3.37	5.53	6.8

Fuente: Información de UCEM

Realizado por: Pilco, José, 2023.

Se puede evidenciar que los mejores resultados químicos y mineralógicos están con la adición del 5% y del 10%, que serán considerados como los niveles para el diseño de experimentos.

- Porcentaje máximo de cenizas volantes: 10%
- Porcentaje mínimo de cenizas volantes: 5 %

4.2.4. Selección de la variable de respuesta

La variable de respuesta o salida será la resistencia, detallado en la NTE INEN 490:2011, ensayos destructivos que son ejecutados a las edades definidas en la norma INEN 488.

Tabla 3-4: Resistencia a la compresión del cemento GU- Norma INEN 488

Resistencia a la compresión, Mpa, mínimo	INEN 488
1 día	N/A
3 días	13
7 días	20
28 días	28

Fuente: INEN 488

Realizado por: Pilco, José, 2023.

La norma INEN 488 define los parámetros mínimos de resistencia que debe cumplir en los ensayos de compresión desde los 3 días, Tabla 3-4.

Tabla 4-4: Parámetros de resistencia del cemento de uso general

	Mín	Objetivo	Max
Resistencias 1 día Mpa	9.5	10	11
Resistencias 3 día Mpa	13	14	16
Resistencias 7 día Mpa	20	22	24
Resistencias 28 día Mpa	28	30	34

Fuente: Información de UCEM

Realizado por: Pilco, José, 2023.

En la Tabla 4-4, se detalla los parámetros definidos por la empresa en base a los datos históricos de los ensayos ejecutados en laboratorio y planteados como objetivos a cumplir.

4.2.5. Elección de diseño de experimento

Para esta investigación, se cuenta con 5 factores, cada uno con 2 niveles, por tal razón, se trabajará con el diseño factorial fraccionado 2^{K-2} , esto se debe a las limitaciones de tiempo y costos de la ejecución de experimentos, Tabla 5-4.

Tabla 5-4: Niveles de adición de materiales para el diseño de experimento

Factores	Min	Max
Clinker	39.8%	52.5%
Caliza	9.0%	13.0%
Puzolana	30.0%	33.0%
Yeso	3.5%	4.2%
cenizas volantes	5.0%	10.0%

Fuente: Información de UCEM

Realizado por: Pilco, José, 2023.

Información recopilada desde el ítem 4.1.2, donde se establecen los factores y sus niveles.

Tabla 6-4: Resumen del diseño de experimentos

Factores:	5	Diseño de la base:	5, 8	Resolución:	III
Corridas:	8	Réplicas:	1	Fracción:	1/4
Bloques:	1	Puntos centrales (total):	0		

Fuente: Información de MINITAB

Realizado por: Pilco, José, 2023.

Se ejecutará solo 8 experimentos, por limitaciones de costos y tiempo, Tabla 6-4 y Tabla 7-4.

* NOTA * Algunos efectos principales se confunden con interacciones de dos factores.

Generadores del diseño: D = AB, E = AC

Generadores de bloques: réplicas

Tabla 7-4: Estructura de alias del diseño de experimento

I + ABD + ACE + BCDE
A + BD + CE + ABCDE
B + AD + CDE + ABCE
C + AE + BDE + ABCD
D + AB + BCE + ACDE
E + AC + BCD + ABDE
BC + DE + ABE + ACD
BE + CD + ABC + ADE

Fuente: Información de MINITAB

Realizado por: Pilco, José, 2023.

El minitab define los 8 experimentos que se debe ejecutar, considerando que las respuestas que se obtengan tiene relación con los experimentos que no van ha realizar por las limitaciones antes detalladas.

Tabla 8-4: Diseño exponencial fraccionado 2^{k-2}

→	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9
	OrdenEst	OrdenCorrida	PtCentral	Bloques	CLINKER	CALIZA	PUZOLANA	YESO	CENIZA V
1	1	1	1	1	39.8	9	30	4.2	10
2	2	2	1	1	52.5	9	30	3.5	5
3	3	3	1	1	39.8	13	30	3.5	10
4	4	4	1	1	52.5	13	30	4.2	5
5	5	5	1	1	39.8	9	33	4.2	5
6	6	6	1	1	52.5	9	33	3.5	10
7	7	7	1	1	39.8	13	33	3.5	5
8	8	8	1	1	52.5	13	33	4.2	10

Realizado por: Pilco, José, 2023.

Según las limitaciones, Minitab define 8 experimentos con los factores y niveles definidos en la Tabla 8-4.

4.2.6. Realización de experimento

Se procedió con la realización de 8 experimentos en base los 5 factores y los niveles, obteniendo los siguientes resultados, Tabla 9-4.

Tabla 9-4: Resultado de experimentos – Primera Fase

Materias Primas					Resistencias MPa		
Clinker (%)	Caliza (%)	Puzolana (%)	Yeso (%)	Cenizas Volantes (%)	Día 3	Día 7	Día 28
39.8	9	30	4.2	10	12.2	23	30.1
52.5	9	30	3.5	5	13.5	23.3	29.4
39.8	13	30	3.5	10	14.6	18.5	28.3
52.5	13	30	4.2	5	13.8	21.3	33.2
39.8	9	33	4.2	5	13.8	20.6	29.2
52.5	9	33	3.5	10	15.1	24	32.3
39.8	13	33	3.5	5	13.6	19.6	26
52.5	13	33	4.2	10	14.9	23.1	32.2

Fuente: Información de UCEM

Realizado por: Pilco, José, 2023.

Se puede observar que como resultado hay valores que están fuera de los rangos establecidos, principalmente cuando la adición del clinker fue del 39.8%; por los resultados obtenidos se decide realizar 4 ensayos adicionales con los datos históricos de dosificación que dispone la empresa.

4.2.7. Análisis de Datos

La aplicación Minitab por medio de los resultados de ensayos, proyecta las mejores dosificaciones para alcanzar las resistencias esperadas.

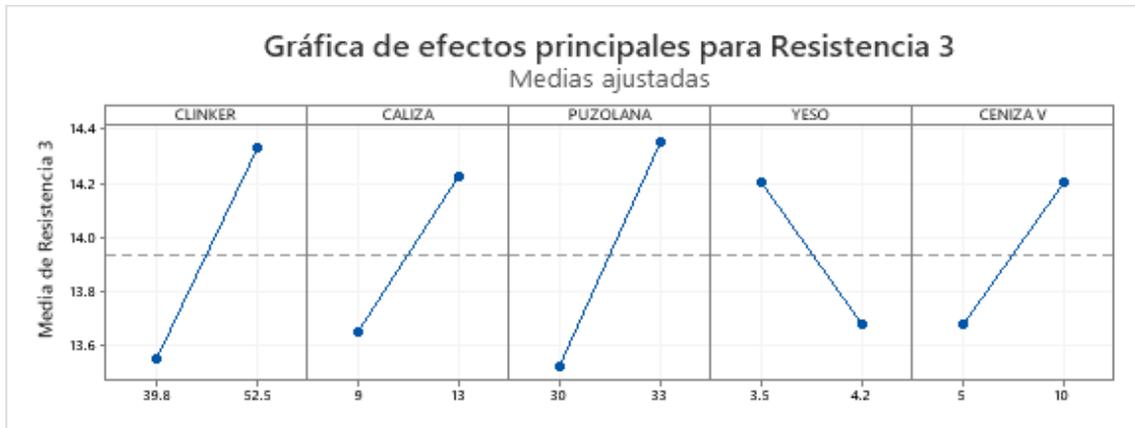


Figura 1-4: Efectos principales para la resistencia 3

Realizado por: Pilco, José, 2023.

Se observa que la mejor dosificación para conseguir la resistencia esperada 13 MPa a los 3 días es de: 52.5% de clinker, 13% de caliza, 33% de puzolana, 3.5% de yeso y 10% de cenizas volantes, Figura 1-4.

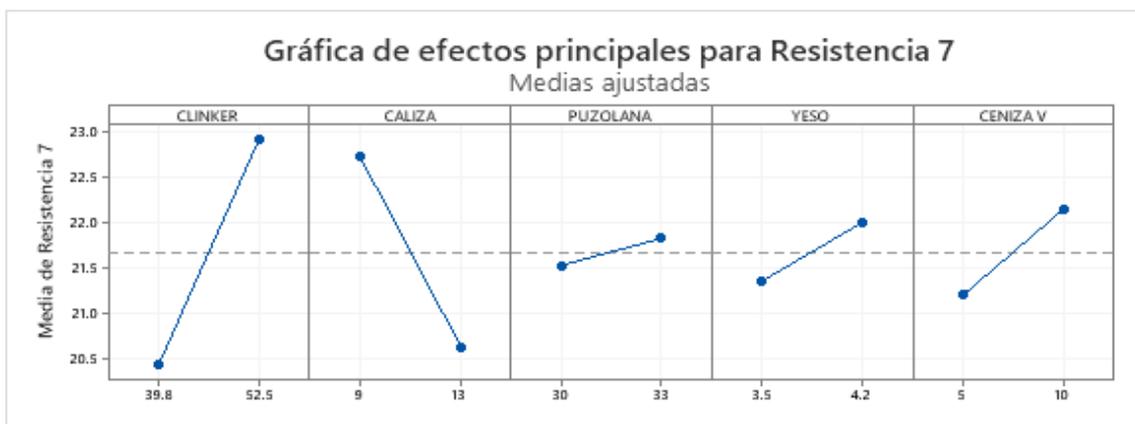


Figura 2-4: Efectos principales para la resistencia 7.

Realizado por: Pilco, José, 2023.

Se observa que la mejor dosificación para conseguir la resistencia esperada de 20 MPa a los 7 días es de: 52.5% de clinker, 9% de caliza, 33% de puzolana, 4.2% de yeso y 10% de cenizas volantes, Figura 2-4.

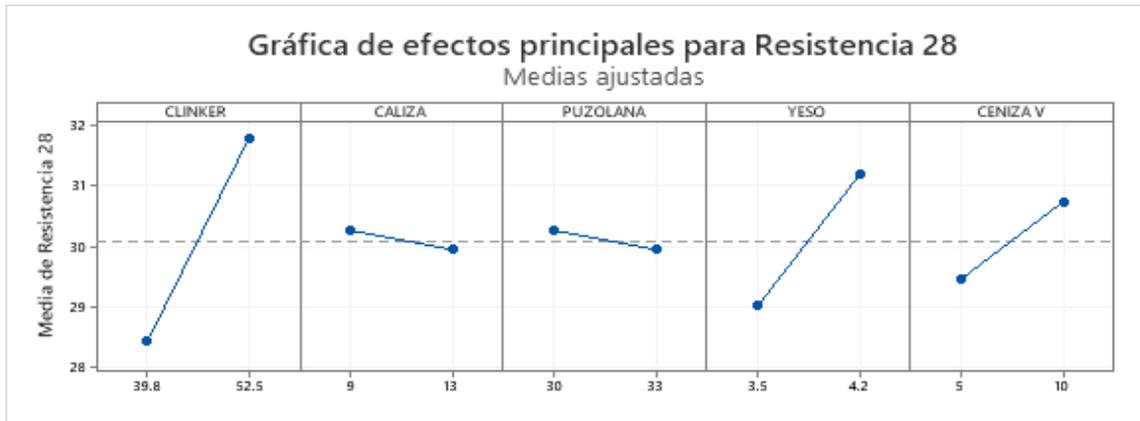


Figura 3-4: Efectos principales para la resistencia 28
Realizado por: Pilco, José, 2023.

Se observa que la mejor dosificación para conseguir la resistencia esperada 28 Mpa a los 28 días es de: 52.5% de clinker, 9% de caliza, 30% de puzolana, 4.2% de yeso y 10% de cenizas volantes, Figura 3-4.

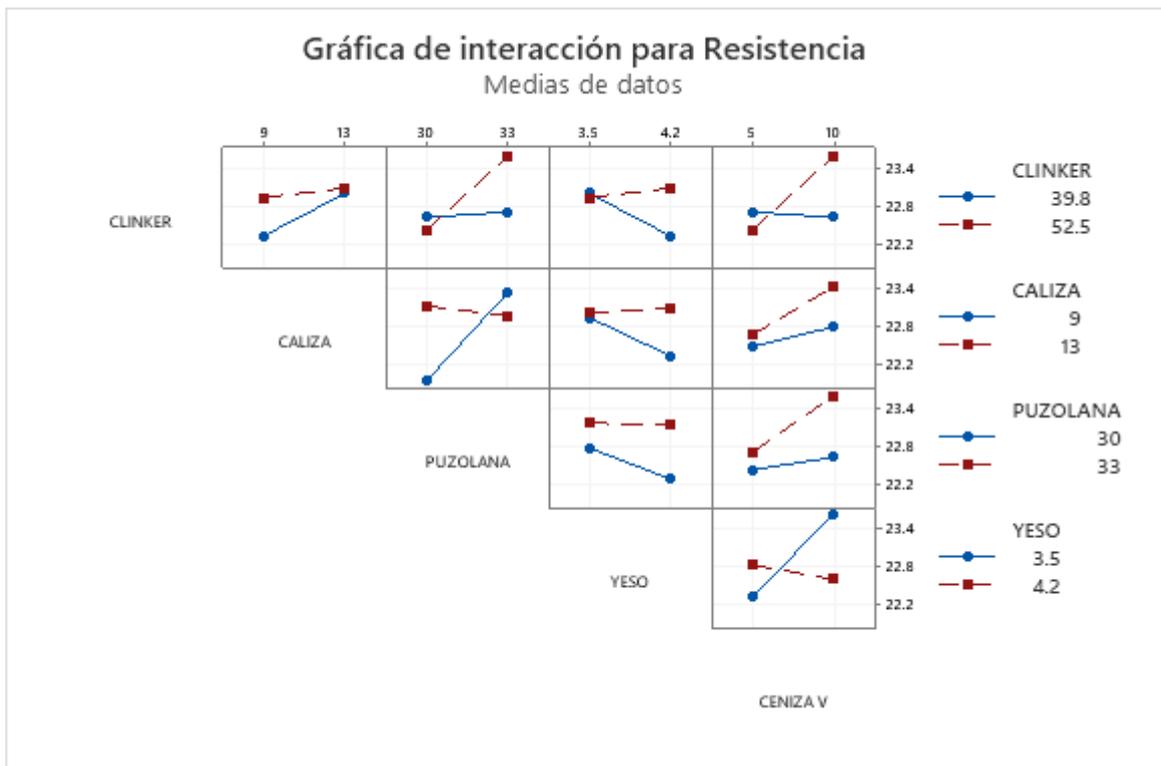


Figura 4-4: Gráfica de interrelación de resistencia de cemento de uso general
Realizado por: Pilco, José, 2023.

A partir de la Figura 4-4, se conoce que no existe diferencia significativa de la resistencia con la adición de cenizas volantes, además, se observa que se incrementa la resistencia al aumentarse la dosificación del clinker.

4.3. Verificación de hipótesis

Tabla 10-4: Análisis de varianza

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	6	1296.38	216.064	145.47	0.000
Bloques	2	1289.11	644.555	433.97	0.000
Lineal	3	3.59	1.197	0.81	0.508
Clinker	1	0.74	0.735	0.49	0.491
Caliza	1	1.04	1.042	0.70	0.414
Ceniza V	1	1.81	1.815	1.22	0.284
Interacciones de 2 términos	1	3.68	3.682	2.48	0.134
Caliza*Puzolana	1	3.68	3.682	2.48	0.134
Error	17	25.25	1.485		
Total	23	1321.63			

Realizado por: Pilco, José, 2023.

La prueba de hipótesis se realiza en base al ANOVA y mediante los datos de la tabla de Minitab, se observa que $P > 0.05$, por tal razón, se acepta la hipótesis nula, Tabla 10-4. Por otra parte, se conoce que las cantidades de clinker añadidas no determinan diferencias significativas en la resistencia del cemento de uso general con la adición de cenizas volante. Con los resultados obtenidos, se plantea la ejecución de un nuevo diseño experimental, considerando los datos históricos de dosificación de la empresa de los años 2021 y 2022.

4.4. Diseño de experimento con dos factores (clinker y cenizas volantes)

Por la falta de evidencias suficientes, se estable un diseño experimental mixto 3x2, se considera los dos factores de mayor interés (clinker y las cenizas volantes), el diseño de experimento, se orienta al porcentaje de dosificación de yeso, caliza y puzolana en base al historial de dosificación del periodo 2021 y 2022. Mientras tanto, el planteamiento de factores clinker con tres niveles (porcentajes de dosificación: máximos, mínimos e historial de adición) y el factor cenizas volantes con dos niveles (porcentajes de dosificación: máximos y mínimos). Se diseña el experimento y se elabora el número de corridas en Minitab, Tabla 11-4.

Tabla 11-4: Resumen del diseño factorial de múltiples niveles

Factores	2	Réplicas	6
Corridas base	6	Total de corridas	36
Bloques base	1	Total, de bloques	6

Realizado por: Pilco, José, 2023.

Según el resumen de la Tabla 11-4, el diseño requiere de la ejecución de 6 corridas, en cada corrida o diseño, se genera 6 cubos para las pruebas de compresión, en cada corrida se realizan 3

pruebas, cada uno con dos especímenes, la primera prueba a los 3 días, la segunda pruebas a los 13 días y la tercera prueba a los 28 días

Los niveles del factor clinker son 39.8 %, 48.16 %, 52.50 % y los niveles del factor de cenizas volantes es el 5 % y el 10 %, Tabla 12-4.

Tabla 12-4: Diseño experimental mixto, 3 x 2

Orden Est	Orden Corrida	Tipo Pt	Bloques	Clinker	Cenizas Volantes
1	1	1	1	39.8	5
2	2	1	1	39.8	10
3	3	1	1	48.16	5
4	4	1	1	48.16	10
5	5	1	1	52.5	5
6	6	1	1	52.5	10
7	7	1	2	39.8	5
8	8	1	2	39.8	10
9	9	1	2	48.16	5
10	10	1	2	48.16	10
11	11	1	2	52.5	5
12	12	1	2	52.5	10
13	13	1	3	39.8	5
14	14	1	3	39.8	10
15	15	1	3	48.16	5
16	16	1	3	48.16	10
17	17	1	3	52.5	5
18	18	1	3	52.5	10
19	19	1	4	39.8	5
20	20	1	4	39.8	10
21	21	1	4	48.16	5
22	22	1	4	48.16	10
23	23	1	4	52.5	5
24	24	1	4	52.5	10
25	25	1	5	39.8	5
26	26	1	5	39.8	10
27	27	1	5	48.16	5
28	28	1	5	48.16	10
29	29	1	5	52.5	5
30	30	1	5	52.5	10
31	31	1	6	39.8	5
32	32	1	6	39.8	10
33	33	1	6	48.16	5
34	34	1	6	48.16	10
35	35	1	6	52.5	5
36	36	1	6	52.5	10

Realizado por: Pilco, José, 2023.

En la Tabla 13-4, se indica que se realizan 36 corridas o pruebas de compresión de los especímenes de los morteros de 50 mm, cada prueba de compresión requiere de dos especímenes.

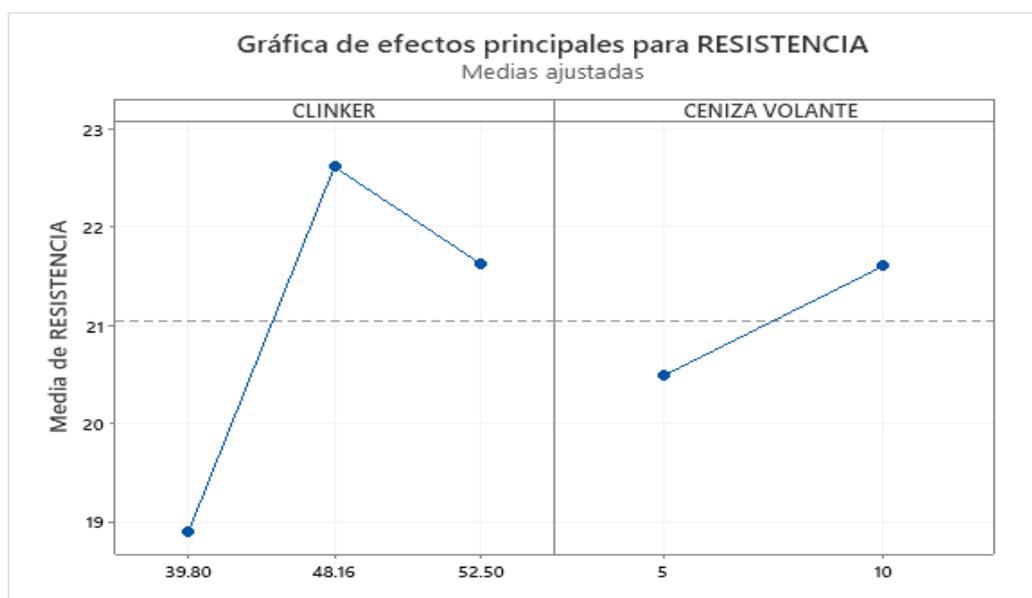
Tabla 13-4: Resultado de resistencia de ensayos de laboratorio

RESISTENCIA								
Ensayo	Clinker	ceniza	DÍA 3 (13 MPa)		DÍA 7 (20 MPa)		DÍA 28 (28 MPa)	
			Muestra	Muestra	Muestra	Muestra	Muestra	Muestra
			1	2	3	4	5	6
1	39.8	5	12.1	11.5	16.2	15.8	24.2	24.8
2	39.8	10	13.5	13.1	20.8	20.2	27.5	27
3	48.16	5	14	13.8	22.6	22	31	30
4	48.16	10	14.6	15.1	22.8	22.9	31.1	31.4
5	52.5	5	13.8	13.2	21.9	21.5	30.2	30.1
6	52.5	10	13	13.5	21.8	21	30.2	29.3

Realizado por: Pilco, José, 2023.

Según el diseño experimental mixto 3x2 de Minitab, con el factor clinker de 3 niveles y el factor de cenizas volantes con dos niveles, se ejecutaron 6 ensayos, en cada corrida o ensayo se generaron 6 cubos, los cuales, fueron puestas a pruebas de compresión para medir las resistencias en MPa, según la Norma NTE INEN 488.2009, Tabla 13-4 se observa que la resistencia con la adición del 39.80 % de clinker y el 5 % de cenizas, es inferior a los parámetros de la Norma INEN 488; mediante la adición de clinker de 39.80 % y 10 % de cenizas; no se cumple la Norma INEN 488, en los dos especímenes a los 28 días de edad de los dos morteros.

Mediante la adición del 48.16 % de clinker y 5 % - 10% de clinker, los resultados de las resistencias de las edades mínimas cumplen la Normativa INEN 488 y los parámetros de la empresa. Sin embargo, la adición de clinker del 52.5 % y 5 % - 10 % de cenizas volantes, cumple la normativa, pero existe la tendencia de bajar su resistencia. Para una mejor interpretación de los resultados, se elaboran gráficos de efectos y regresión en Minitab, según el diseño detallado en la Tabla 12-4:

**Figura 5-4:** Efectos principales para resistencia con medias ajustadas

Realizado por: Pilco, José, 2023.

Es factible observar que la variable resistencia tiene un efecto cuadrático, es decir, la mejor resistencia media ajustada se produce con la adición de 48.18 % de clinker y el 10 % de cenizas volantes, Figura 5-4.

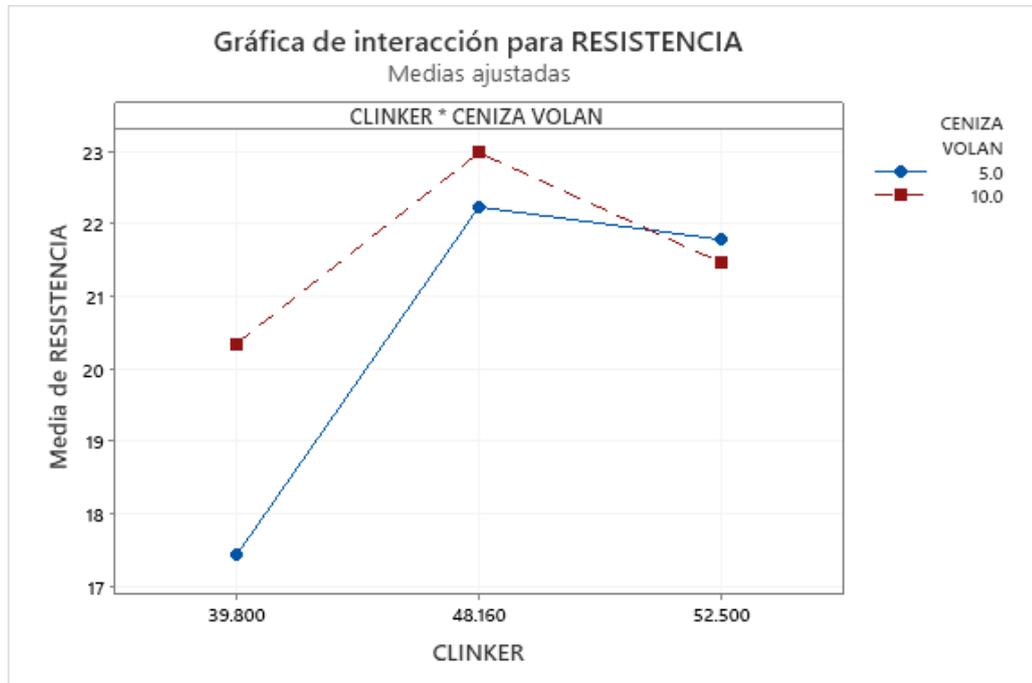


Figura 6-4: Interacción para resistencia de medias ajustadas
Realizado por: Pilco, José, 2023.

Es factible concluir que existe una interacción entre la dosificación de ceniza volantes y el clinker, esto se consigue mediante las mejores residencias medias ajustadas con la adición del 42.16 % de clinker y el 10 % de cenizas volantes, Figura 6-4.

Tabla 14-4: Resumen del modelo

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
0.932220	98.62%	98.07%	97.14%

Realizado por: Pilco, José, 2023.

La Tabla 14-4, determina que el 98.62 % de la variabilidad de los datos se ubican entorno al valor de la media

Tabla 15-4: Análisis de varianza del diseño del experimento

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	10	1553.82	155.382	178.80	0.000
Bloques	5	1437.31	287.461	330.78	0.000
Lineal	3	100.23	33.410	38.44	0.000
Clinker	2	89.01	44.503	51.21	0.000

Ceniza volante	1	11.22	11.223	12.91	0.001
Interacciones de 2 términos	2	16.29	8.143	9.37	0.001
Clinker * Ceniza volante	2	16.29	8.143	9.37	0.001
Error	25	21.73	0.869		
Total	35	1575.55			

Realizado por: Pilco, José, 2023.

La validación de la hipótesis diseño de experimento mixto 3x2, se realizó con el Anova, se determinó que el valor P del clinker, de la ceniza volante y de la interacción clinker*cenizas volantes, son inferiores a 0.05, por lo mismo, se determinó la existencia de diferencias significativas con la variación del porcentaje de clinker y de las cenizas volantes, Tabla 15-4. Con los mencionados resultados, se aceptó la Hipótesis Alternativa (H1) y se concluyó, que el porcentaje de adición de las cenizas volantes y del clinker son significativos, por lo tanto, se influye en la calidad del producto y es factible mantener la calidad del cemento de uso general (GU) mediante la reducción del consumo del clinker hasta el 48.16 % y la adición del 10 % de cenizas volantes.

4.5. Productividad de clinker con el sistema de adición de cenizas volantes

Al determinar el porcentaje óptimo de dosificación del clinker del 48.1 %, con la adición del 10% de cenizas volantes, sin que se afecte la resistencia del cemento de uso general, se procedió a la evaluación de la productividad del clinker en la producción de cemento de uso general. La productividad actual con la adición del 56.5 % de clinker, es la siguiente:

$$Productividad\ actual\ de\ clinker = \frac{1\ kg\ de\ cemento}{0.565\ kg\ de\ clinker} = 1.77\ kg\ de\ cemento/kg$$

Por lo indicado, con 1 kg de clinker es factible la producción de un promedio de 1.77 kg de cemento de uso general y sin la adición de cenizas volantes.

4.5.1. Declaración de hipótesis de productividad

En este punto, se definió como variable independiente al porcentaje de adición de Clinker mientras que la variable dependiente es la productividad. Por lo indicado, se declara la siguiente hipótesis:

$$H_0: \mu = 1.77$$

$$H_1: \mu > 1.77$$

H_0 : La productividad promedio de cemento GU por 1 kg de clinker es igual a 1.77 kg

H_1 : La productividad promedio de cemento GU por 1 kg de clinker es mayor a 1.77 kg

4.5.2. Productividad del clinker con la adición de cenizas volantes

Para la determinación de la productividad del Clinker, se trabaja con los datos de las muestras recolectados para los ensayos de laboratorio, en este caso, cada ensayo o corrida tomó a 10 muestras. Por otra parte, la productividad del clinker con la dosificación del 48.16 % de clinker y 10 % de adición de ceniza volantes, es la siguiente:

$$\begin{aligned} \text{Productividad de Clinker (Propuesto)} &= \frac{1 \text{ kg de cemento}}{0.4816 \text{ kg de clinker}} \\ &= 2.08 \text{ kg de cemento/kg} \end{aligned}$$

Por cada kg de Clinker, es factible la producción promedio de 2.08 kg de cemento de uso general con la adición de cenizas volantes.

Tabla 16-4: Productividad del Clinker con la adición de cenizas volantes

kg de Cemento	kg de Clinker	Productividad
1	0.4716	2.1204
1	0.4821	2.0743
1	0.4793	2.0864
1	0.4831	2.0700
1	0.4802	2.0825
1	0.4753	2.1039
1	0.4768	2.0973
1	0.4881	2.0488
1	0.4909	2.0371
1	0.489	2.0450

Realizado por: Pilco, José, 2023.

Tabla 17-4: Estadísticas descriptivas de la productividad

N	Media	Desviación Estándar	Error estándar de la media	Límite inferior de 95% para μ
10	2.07656	0.02711	0.00857	2.06084

μ : media de población de Productividad

Realizado por: Pilco, José, 2023.

Se determina que el peso promedio es de 2.08 Kg de cemento producido por cada Kg de clinker y con la adición del 10 % de cenizas volantes, Tabla 16-4 y Tabla 17-4.

La prueba de hipótesis se trabajó con la prueba t de student, de un solo factor que es la productividad y se desarrolló con la aplicación Minitab, Tabla 18-4.

Tabla 18-4: Prueba de hipótesis de productividad del clinker con la adición de cenizas volantes

Hipótesis nula	$H_0: \mu = 1.77$
Hipótesis alterna	$H_1: \mu > 1.77$
Valor T	Valor p
35.76	0.000

Realizado por: Pilco, José, 2023.

El valor de P es menor al nivel de significancia de 0.05, con lo cual, se concluye que se rechaza la hipótesis nula (H_0) y se acepta la hipótesis alternativa (H_1). Adicionalmente, se concluye que la reducción de la dosificación del clinker a 48.16 % con el 10% de adición de cenizas volantes, produce una mejora en la productividad del clinker.

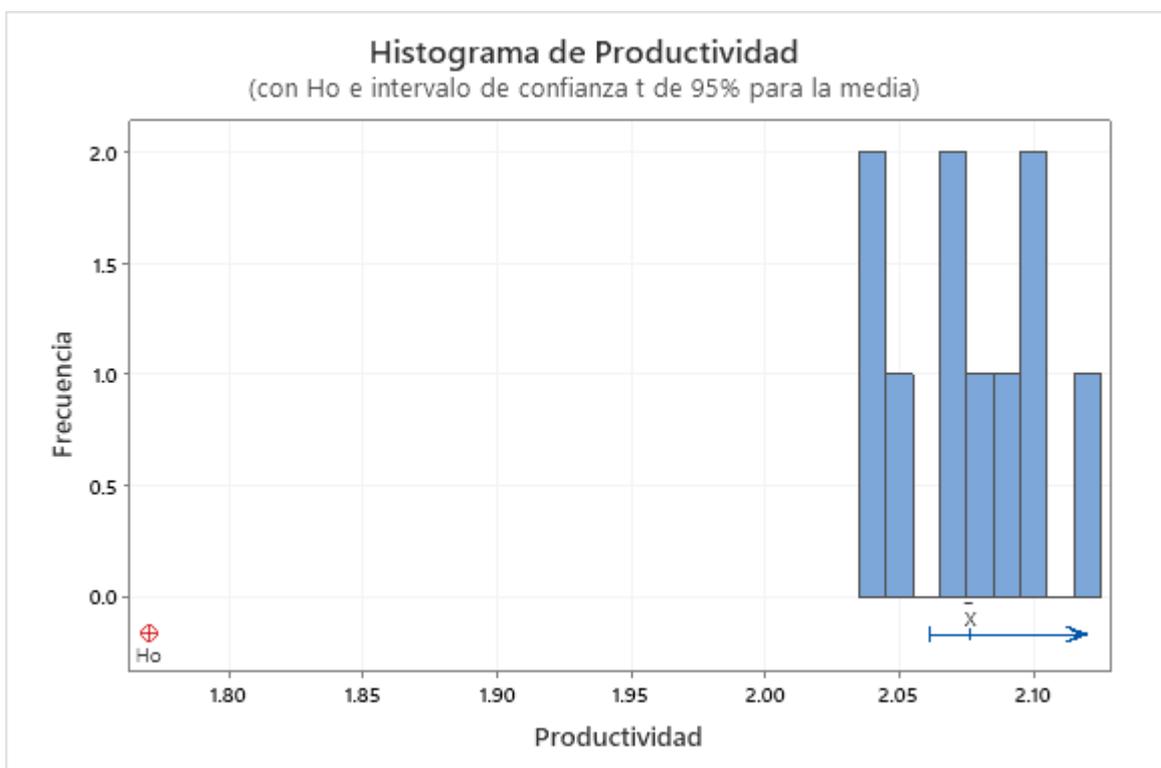


Figura 7-4: Histograma de productividad del clinker

Realizado por: Pilco, José, 2023.

En el histograma de la Figura 7-4, se observa que los valores de productividad se ubican en la zona de rechazo, de esta manera, se ratifica que se logran mejoras en la productividad al reducir el consumo de clinker con la adición del 10% de cenizas volantes y sin que se afecte la calidad del cemento de uso general.

4.5.3. Costo del clinker con la adición de cenizas volantes

La evaluación del costo de clinker en la producción del cemento de uso general con la adición de cenizas volantes, se trabajó con la participación de datos de la productividad que se encuentran

detallados en el ítem de productividad. Por otra parte, se consideró que el costo de clinker por cada tonelada de producción de cemento de uso general actualmente es de 53.74 \$/ Ton.

4.5.4. Declaración de hipótesis de costo de clinker en la producción de cemento GU con la adición de ceniza.

En lo relacionado a la declaración de la hipótesis, se definió como variable de entrada el porcentaje de adición del clinker mientras que la variable de salida es el costo del clinker en cada tonelada de cemento de uso general con adición del 10% de cenizas volantes, con lo cual, se tiene:

$$H_0: \mu = 53,14$$

$$H_1: \mu < 53,14$$

H_0 : El costo promedio del clinker por tonela de cemento producido es igual a \$ 53.14

H_1 : El costo promedio del clinker por tonela de cemento producido es menor a \$ 53.14

4.5.5. Costo del clinker en la producción de cemento de uso general con la adición de cenizas volantes

La definición del costo de clinker por cada tonelada de cemento de uso general producido, se trabajó en base al porcentaje de adición definido en el ítem de productividad, Tabla 19-4.

Tabla 19-4: Costo del clinker por tonelada de cemento GU con la adición de cenizas volantes

COSTO DE CLINKER POR TONELADA	
Adición (%)	\$ clinker/ Tonelada de cemento
47.16%	44.856
48.21%	45.855
47.93%	45.589
48.31%	45.950
48.02%	45.674
47.53%	45.208
47.68%	45.351
48.81%	46.426
49.09%	46.692
48.90%	46.511

Realizado por: Pilco, José, 2023.

Tabla 20-4: Estadísticas descriptivas del costo de clinker en la producción de cemento con la adición de cenizas volantes

No.	Media	Desviación estándar	Error estándar de la media	Límite superior de 95% para μ
10	45.811	0.598	0.189	46.158

μ : media de población de \$ clinker/Ton. De cemento

Realizado por: Pilco, José, 2023.

Con lo indicado en la Tabla 20-4, el costo promedio del clinker en la producción de una tonelada de cemento con la adición del 10% de cenizas volantes es de 45.81 \$/Ton.

4.5.6. Prueba de Hipótesis

La prueba de hipótesis se desarrolló mediante la prueba T de Student de un solo factor que en este caso, es el costo del Clinker y se trabajó con la aplicación de Minitab, Tabla 31-4.

Tabla 21-4: Prueba de hipótesis del costo del clinker por cada tonelada de cemento de uso general con la adición de cenizas volantes

Hipótesis nula	$H_0: \mu = 53.74$
Hipótesis alterna	$H_1: \mu < 53.74$
Valor T	-41.92
Valor P	0.000

Realizado por: Pilco, José, 2023.

El valor P de la prueba de hipótesis es menor al nivel de significancia de 0.05, de esta manera, se rechazó la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alternativa. Se concluyó que la reducción del porcentaje de adición del clinker a 48.16 en la producción de cemento con la adición de cenizas volantes provoca la reducción del costo del clinker de \$ 53.74 /Ton a \$ 45.81/ Ton.

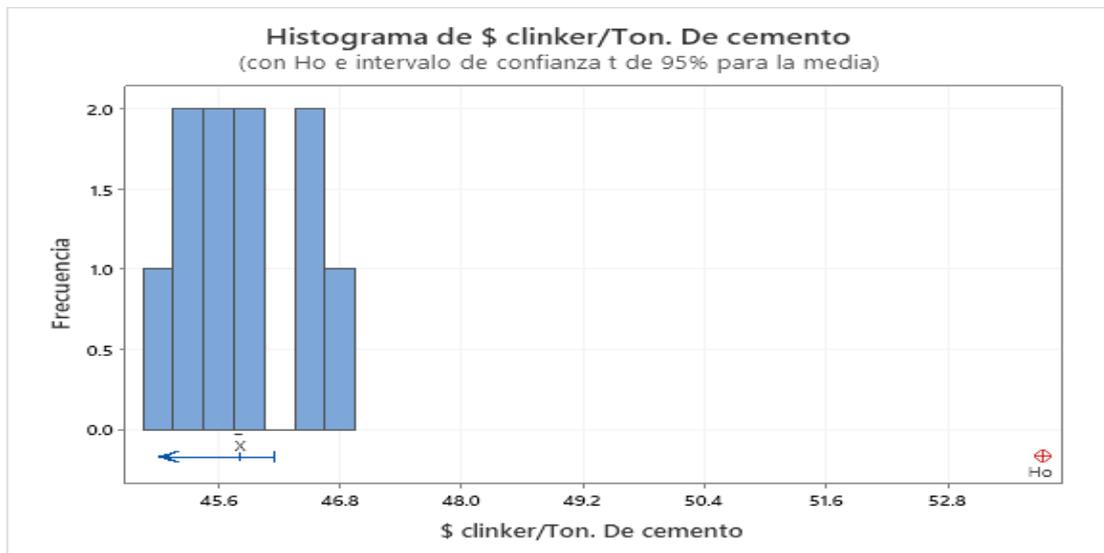


Figura 8-4: Histograma del costo del Clinker/ tonelada de cemento con la adición de ceniza

Realizado por: Pilco, José, 2023.

En el histograma de la Figura 8-4, se observa que los datos disponen de una tendencia a la izquierda, es decir, se ratifica que el reducir la adición del Clinker provoca una reducción del costo del clinker en la producción de cemento de uso general con adición del 10% de cenizas volantes.

4.6. Porcentaje de adición de cenizas volantes

Para definir el porcentaje de adición de cenizas volantes en la producción de cemento de uso general, se ha realizado ensayos en laboratorio en base al diseño de experimentos, parámetros e historial de producción de la empresa detallados en el ítem 4.1; se concluye que, es factible la adición hasta un 10%, esto sin afectar la calidad del producto como se observa en la Tabla 22-4.

Tabla 22-4: Dosificación de materias primas y ceniza volante

PUZ (%)	YESO (%)	CALIZA (%)	CLINKER (%)	CENIZAS VOLANTES (%)
31.41	3.41	7.02	48.16	10

Fuente: Información de UCEM

Realizado por: Pilco, José, 2023.

La dosificación de las materias primas para esta investigación será de 31.44% de puzolana, 3.41% de yeso, 7.02% de caliza, 48.16% de clinker, con una adición de hasta el 10% de ceniza volantes.

4.7. Capacidad de adición de cenizas volantes

Para definir si la planta tiene la capacidad de abastecer cenizas volantes para la producción de cemento de uso general, se debe conocer su capacidad de producción y las proyecciones corporativas. La capacidad nominal del molino de cemento CM4 es de 100 Ton / h, según los indicadores operacionales de los últimos 12 meses se detalla lo siguiente:

Tabla 23-4: Indicadores claves de rendimiento del molino CM4

Capacidad nominal	100 ton/h
Rendimiento	98%
Eficiencia operacional	96%
Utilización actual	78%
Utilización proyectada	94.08%

Fuente: Información de UCEM

Realizado por: Pilco, José, 2023.

En los últimos 12 meses, el molino CM4, ha llegado a conseguir un rendimiento del 98% y una eficiencia operativa del 96%, llegando a una utilización del 78%. Con estos indicadores y proyecciones del mercado, se busca que la maquinaria llegue a una utilización del 94.08 % de su capacidad instalada, considerando el 10% de adición de cenizas volantes, se estima que la capacidad de alimentación debe ser mínimo de 9.4 Ton/h, Tabla 23-4.

Es importante definir si se tiene la capacidad de abastecer la adición de cenizas que se necesita, para esto se debe considerar la capacidad operativa del sistema de piropcesos ya que su

capacidad nominal es de 190 Ton/h, con una eficiencia operacional del 95% (180 Ton/h), la cantidad de ceniza que es factible producir, se detalla en la Tabla 24-4:

Tabla 24-4: Capacidad de producción de cenizas volantes

Capacidad de alimentación	Ton/h	Cenizas recirculantes (Ton/h)					
		10%	9%	8%	7%	6%	5%
100%	190	19	17.1	15.2	13.3	11.4	9.5
95%	180.5	18.05	16.245	14.44	12.635	10.83	9.025
90%	171	17.1	15.39	13.68	11.97	10.26	8.55
80%	152	15.2	13.68	12.16	10.64	9.12	7.6
70%	133	13.3	11.97	10.64	9.31	7.98	6.65
60%	114	11.4	10.26	9.12	7.98	6.84	5.7
50%	95	9.5	8.55	7.6	6.65	5.7	4.75

Fuente: Información de UCEM

Realizado por: Pilco, José, 2023.

La producción de la ceniza volante dependerá del porcentaje de alimentación de material al proceso de piroproceso, mínimo se puede alimentar hasta el 50% de su capacidad nominal, la producción mínima de ceniza volante llegará a 9.5 ton/h, Tabla 25-4.

Tabla 25-4: Producción de cenizas volantes

Producción	Ton/H
Promedio	12.90
Max	16.4
Min	9.5

Fuente: Información de UCEM

Realizado por: Pilco, José, 2023.

Según el historial de producción de cenizas volantes, puede llegar a producir hasta 16.4 Ton/h y la producción mínima que se reporta es de 9.5 ton/h, su promedio de producción es de 12.9 ton/h, datos favorables que garantizan la alimentación de cenizas volantes al proceso de molienda de cemento de uso general.

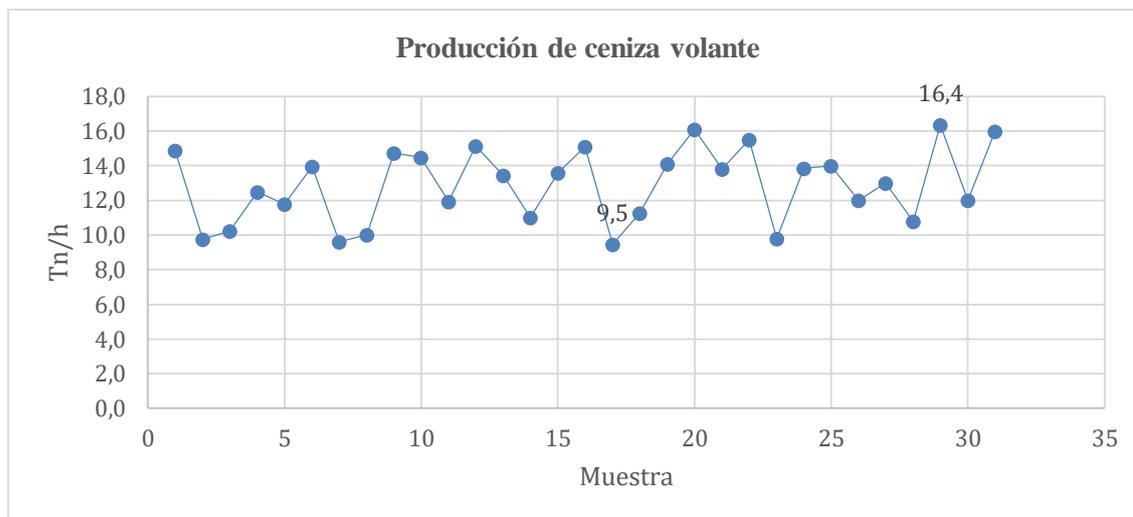


Figura 9-4: Producción de cenizas volantes

Realizado por: Pilco, José, 2023.

Se puede evidenciar que la capacidad de producción de cenizas volantes esta siempre superiores a la requerida, se puede cumplir con la cantidad requerida que es de 9.4 Ton/h, Figura 9-4.

4.8. Capacidad de producción teórica de cemento de uso general con cenizas volantes

La capacidad nominal del molino de cemento CM4 es de 100 Ton/h, para este análisis se debe considerar los indicadores operacionales de los últimos 12 meses.

Tabla 26-4: Capacidad de operación y sistema de adición de cenizas volantes en el molino CM4

Capacidad Nominal (Ton/h)	100
Capacidad Proyectada (%)	94
Producción esperada de cemento GU (Ton/h)	94.08
Adición de cenizas volantes (%)	10
Capacidad del sistema de adición de CV (Ton/h)	9.408

Fuente: Información de UCEM

Realizado por: Pilco, José, 2023.

Con estos indicadores y proyecciones del mercado se busca que el molino CM4 llegue a una utilización del 94.08 % de su capacidad instalada, proyectando una producción aproximada de 67.000 Ton / mes de cemento de uso general.

En base al porcentaje de adición de ceniza volante definido en la Tabla 22-4, y la capacidad proyectada en la Tabla 26-4, se conoce que el sistema de adición de ceniza volante necesario en la producción de cemento de uso general en el molino CM4 debe tener una capacidad de alimentación de 9.40 ton/h, Tabla 26-4.

4.9. Discusión de resultados

En el diagnóstico se identifica que el cemento de uso general (GU) es el producto de mayor producción de la empresa con el 74%, la dosificación promedio actual del clinker en cada tonelada de cemento es del 56.5%, porcentaje de adición que mantiene la calidad y su costo elevado de producción. La determinación del porcentaje de adición de cenizas volantes fue en base a los parámetros químicos y mineralógicos que tiene establecido la empresa para mantener la calidad del cemento, los porcentajes con las mejores características fueron al 5% y al 10 % de adición. El diseño de los experimentos se ejecutó en MINITAB.

Por las limitaciones de tiempo y costos de uso del laboratorio de la empresa, inicialmente se trabajó con el diseño de experimentos fraccionado a la cuarta 2^{k-2} , ejecutando 8 corridas o ensayos con los factores y niveles definidos en la Tabla 5-4; los resultados de los ensayos no fueron favorables según los parámetros de la Tabla 3-4, concluyendo que no existe diferencia significativa de la resistencia con la adición de cenizas volantes, observando que aumenta la resistencia cuando se aumenta la dosificación del clinker.

Con este antecedente y no contar con evidencia suficiente se trabaja con los datos históricos de dosificación y se realiza un diseño de experimental mixto 3×2 , ejecutando 6 corridas o ensayos solo con los factores de mayor interés que es el clinker y cenizas volantes; se considera la adición del yeso, caliza y puzolana según el historial de dosificación de la empresa, obteniendo los mejores resultados de resistencia con la adición del 48.16% de clinker y 10% de cenizas volantes como se detalla en la Tabla 13-4. Validando la hipótesis planteada en MINITAB (ANOVA), aceptando la hipótesis alternativa y que el porcentaje de adición de las cenizas volantes y del clinker son significativos y que si influye en la calidad del producto.

Con la reducción de dosificación del clinker por adición de cenizas volantes, se valida que la productividad que se incrementa de 1.77 kg a 2.08 kg de cemento por cada kg de clinker utilizado. También se ratifica que el costo de clinker en cada tonelada de cemento de uso general producido, reduce de 53.14 \$/ton a 45.81\$. Se define la capacidad de alimentación del sistema de adición de cenizas volantes al molino de cemento, en base a la capacidad nominal del molino que es de 100 ton/h, su utilización actual del 78%, con un rendimiento del 98% y una eficiencia operacional del 96%, con toda esta información se define que la capacidad máxima de alimentación de cenizas volantes es de 9.4 ton/h.

La cantidad mínima de producción de cenizas volantes en la línea de clinkerización es de 9.5 ton/h, con esto se garantiza el abastecimiento al proceso de molienda. Según el historial de la

extracción de las cenizas volantes del filtro de la línea de clinkerización, se puede llegar a descargar hasta 16.4 ton/h, indicador que también determina que la capacidad de producción es superior a la cantidad requerida.

Las proyecciones de la empresa es utilizar toda la cantidad de ceniza que se genera en la línea de clinkerización, por esta razón el diseño del sistema de adición debe ser de una capacidad de alimentación del 15 ton/h, para tener la capacidad de dosificación de cenizas volantes a los dos molinos de cemento que cuenta la empresa, el estudio deberá ser ejecutado de forma independiente por su característica propia de operación.

CAPÍTULO V

5. PROPUESTA

5.1. Diagramas de proceso de molienda de cemento de uso general con adición de cenizas volantes

La integración del sistema de adición de cenizas volantes será en el molino de cemento CM4, su funcionamiento será en paralelo con las tolvas de almacenamiento y dosificación de clinker, caliza, yeso y puzolana, Fig. 1-5.

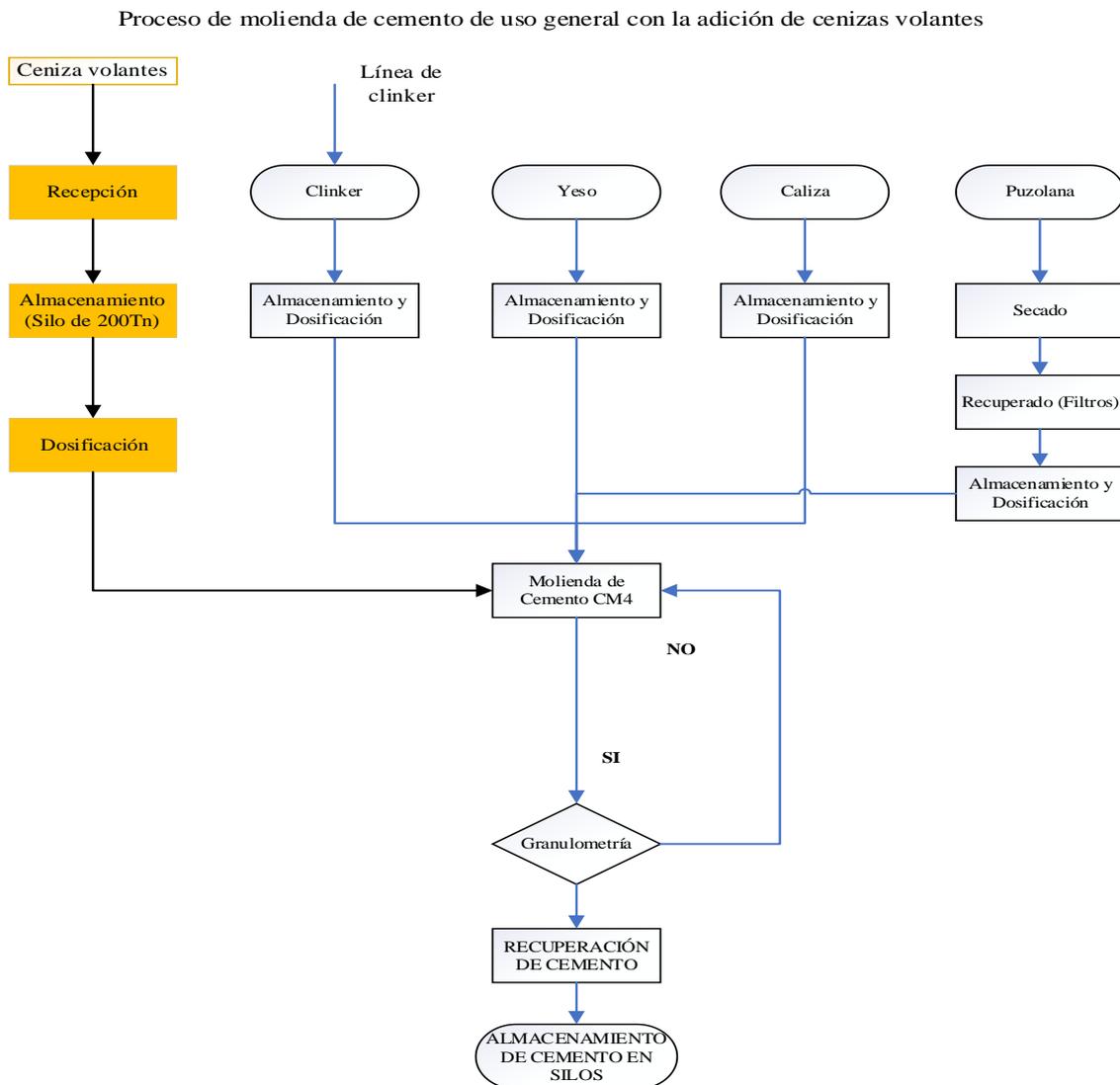


Figura 1-5: Diagrama de proceso de molienda de cemento de uso general con la adición de cenizas volantes– Molino CM4

Realizado por: Pilco, José, 2023.

5.1.1. Descripción del proceso del sistema de adición de las cenizas volantes en el molino de cemento CM4

5.1.1.1. Recepción de cenizas volantes

Las cenizas volantes recuperadas del filtro principal de la línea de clinkerización, deberá ser transportados en camiones cisterna con una capacidad de 30 Ton hasta el silo de almacenamiento de cenizas en el molino CM4. El tiempo de carga aproximada es de 15 a 20 min por camión cisterna, Figura 2-5.



Figura 2-5: Camión Cisterna para transporte de cenizas volantes
Fuente: Grupo Noroccidental. 2022.

Los camiones cisterna cargados de cenizas volantes deben ser pesados en bascula de la planta 1 y posteriormente se movilizarán a descargar en el silo de 200 Ton utilizando los compresores instalados en los mismos camiones. La recepción debe ser realizada a dos camiones en paralelo y se estima transportar 7 camiones cisterna por día con una capacidad de 30 toneladas.

Por el propio proceso operativo y la finura del material, en el proceso de recepción se trabajar con un filtro de desempolvado (CV002), que estará instalado en la parte superior del filtro, su función es retener las partículas finas y posteriormente descargarlo al silo de almacenamiento con el apoyo de una válvula rotativa (CV003-VR) con una capacidad de 15 ton/h.

5.1.1.2. Almacenamiento de cenizas volantes

La ceniza volante debe ser descargada directamente desde los camiones cisterna hacia el silo de almacenamiento de 200 toneladas (CV004); el nivel de material existente debe ser controlado por dos celdas de carga o basculas. La funcionalidad del silo será al mismo tiempo con la recepción, almacenamiento y alimentación al molino de cemento CM4.

Para evitar el asentamiento del material por su finura, el silo debe contar con sistemas de sopladores con aire comprimido (CV001), permitiendo que la ceniza mantenga su fluidez en el punto de descarga al dosificador.

5.1.1.3. Dosificación de cenizas volantes

- Mediante la compuerta de cuchilla o válvula de cuchillas (CV005), se controla el caudal de salida de material desde el silo de almacenamiento hacia la válvula rotativa, su capacidad máxima es de 15 Ton/h.
- El equipo que controla la correcta descarga del material hacia la dosificadora es la válvula rotativa (CV006), quien cumple la función de alimentar la cantidad requerida de cenizas volantes hacia el dosificador.
- El equipo de dosificación (CV007) es una cinta transportadora con sensores de pesaje, que permite transportar y descarga la cantidad de cenizas volantes al molino de cemento.

5.1.1.4. Compuertas de descarga o válvula diversor

La dosificadora debe descargar las cenizas hacia un ducto, donde estará instalada una compuerta de dos vías (CV008), cumplirá la función de direccionar la ceniza pesa hacia el proceso de molienda de cemento, y la segunda compuerta será utilizada para descarga el material que se recolecta en los trabajos de limpieza del sistema de adición.

5.1.1.5. Selección de maquinaria y equipo

El sistema de adición de cenizas volantes debe contar con equipos específicos de transporte y almacenamiento, también debe tener autonomía de operación y su funcionalidad debe ser en paralelo con los sistemas de adición del clinker, caliza, yeso y caliza triturada.

5.1.1.6. Silo de almacenamiento

Silo designado para la recepción de las cenizas volantes, con una capacidad de almacenamiento de 200 Ton, estimado para una autonomía operacional de 21 horas, sus dimensiones proyectadas son de 4.4 m de radio y 14 m de alto. Construido con planchas resistentes a la abrasión y con bases de hormigón, Figura 3-5.

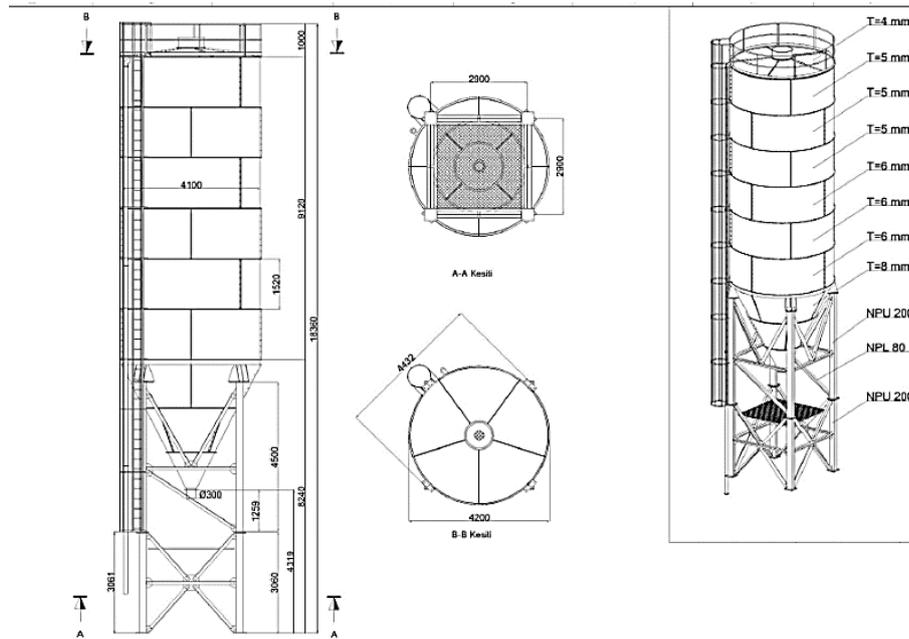


Figura 3-5: Silo de recepción de cenizas volantes
Fuente: CONSTMACH.

5.1.1.7. Ventilador

Ventilador acoplado al filtro de desempolvado, función principal de alimentar aire fresco para recuperación de finos, Figura 4-5.



Figura 4-5: Ventilador de filtro de desempolvado
Fuente: Catalogo Casals

Filtro de desempolvado

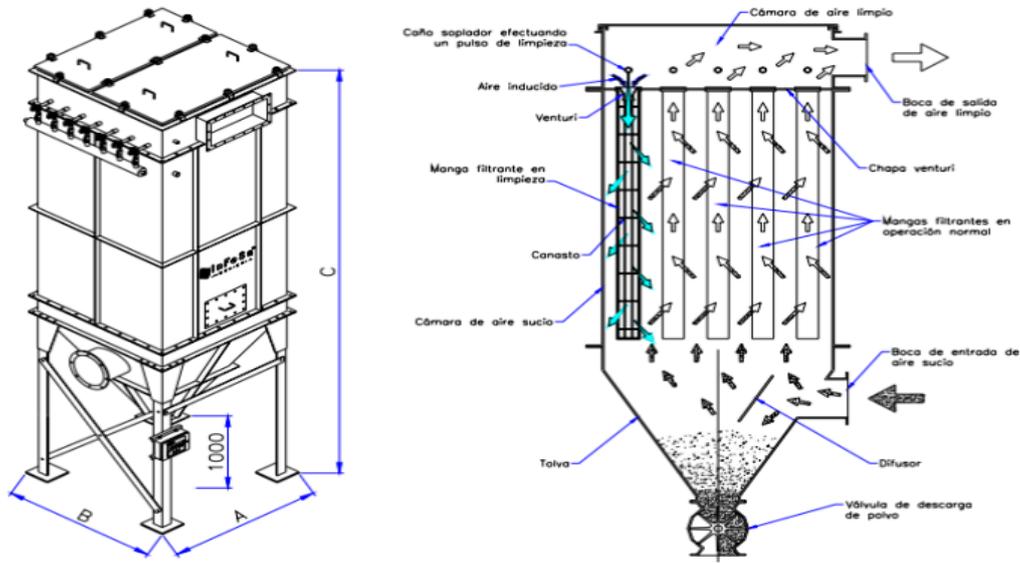


Figura 5-5: Filtro de desempolvado

Fuente: Información de UCEM.

Utilizado para la recuperación del material particulado que se genera en el proceso de descargado de la ceniza volante en la tolva, si no existiera este sistema todo el polvo se liberaría al ambiente. Las dimensiones del filtro, ventilador y la válvula rotativa disponen de una altura de 5m, ancho 2.5 m y largo 2.4m, Figura 5-5.

5.1.1.8. Compuertas Guillotina

Utilizado para controla el paso de la ceniza volante desde la tolva de almacenamiento hacia la válvula rotativa, Figura 6-5



Figura 6-5: Compuerta tipo guillotina

Fuente: EPSA-México

5.1.1.9. Válvula rotativa

El mencionado dispositivo cumple la función de dosificar el paso de la ceniza volante hacia la dosificadora, Figura 7-5.



Figura 7-5: Válvula rotativa
Fuente: Información de UCEM.

5.1.1.10. Dosificadora

Transportador de banda que está integrado con módulos de pesaje, para verificar la cantidad de ceniza que se está adicionando, está instalada en la parte baja de la válvula rotativa. Las dimensiones de la compuerta guillotina, válvula rotativa y la dosificadora es: alto 2.60 m, largo 7.43 m y ancho 1.86m, Figura 8-5.

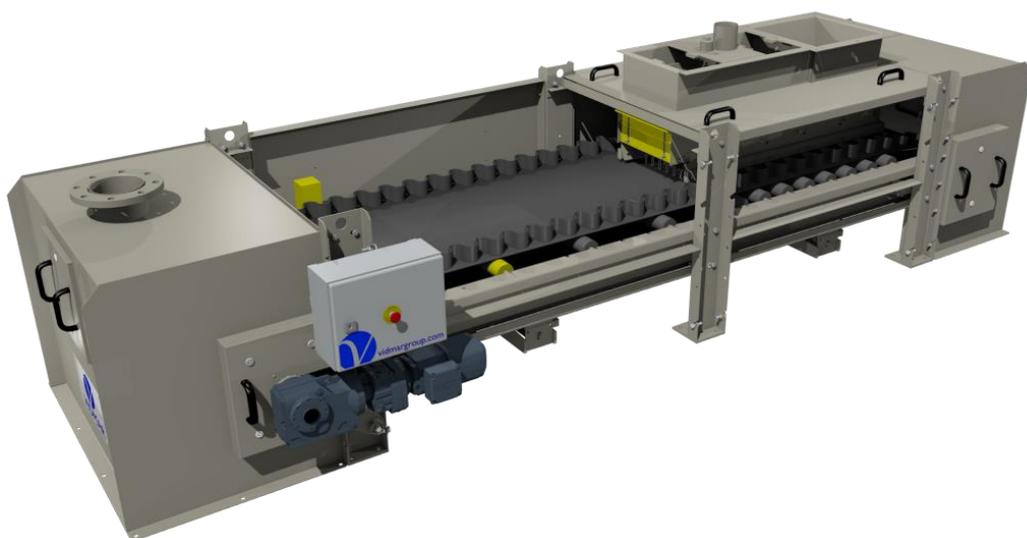


Figura 8-5: Mesas Dosificadoras
Fuente: VIDMAR.

5.1.1.11. Compuerta divergente de almacenamiento

La válvula cuenta con dos compuertas, la primera descarga las cenizas volantes hacia el molino de cemento CM4 y la segunda abertura debe estar instalada hacia los ductos de rechazo, sus dimensiones son: la altura 36.2 cm, ancho 50.2 y largo 67cm, Figura 9-5.



Figura 9-5: Válvula Diversor

Fuente: Vortex.

Tabla 1-5: Lista de equipos de sistema de adición de cenizas volantes al molino CM4

Código	Nombre del equipo	Especificaciones	Cantidad
CV001	Soplador de aire	Tipo: HBCSR80 Q=3.66m ³ /min P=39.2KPa Potencia:7.5kW	1
CV002	Filtro de Mangas	Tipo: PDM-60 Q=4000m ³ /h Concentración de polvo de salida <50mg/Nm ³ Consumo aire comprimido: 0.50 m ³ /min Presión de aire comprimido: 0.40~0.6 MPa	1.00
CV002-V	Ventilador	Tipo: 8-30 No5A Ángulo de rotación de salida: derecha 0°	1
CV003-VR	Válvula rotativa	Tipo: 300×300 Capacidad:15t/h	1
CV004	Tova de recepción y almacenamiento	Q=200 Ton	1
CV005	Compuerta manual o tipo cuchilla	300×300	1
CV006	Válvula rotativa	300×300 Capacidad:15t/h	1
CV007	Caudalímetro de masa-dosificador	Capacidad: 0~15t Precisión:0.5%	1
CV008	Compuerta desviadora	300x300	1
CV009	Válvula Diversor - Ingreso a la Tolva	300×300	1
CV010	Bomba by Pass	Q=20m ³ /min P=0.5MPa	1

Fuente: SCHENCKPROCESS, VORTEX, VITNAR, EPSA, CASALS

Realizado por: Pilco, José, 2023.

Para el sistema de adición de cenizas volantes en el proceso de molienda de cemento, se requerida 10 equipos, considerando que el ensamblaje de los equipos será de forma vertical, para que el polvo fino se descargue por gravedad, esto permitirá optimizar las áreas de inflación disponibles, Tabla 1-5.

5.2. Distribución de planta del sistema de adición de cenizas volantes en el molino de cemento

5.2.1. Método de distribución Güerchet

El método Güerchet es utilizado para definir las áreas que se necesitan para los puestos de trabajo entre maquinarias y personal de operación; la aplicación de esta metodología requiere de conocer el detalle de las dimensiones y cantidades de los equipos que se van a instalar, es importante también considerar si existirá stock en los procesos. Los equipos seleccionados para el sistema de adición de cenizas volantes en el molino de cemento son de operación secuencial, existen varios equipos y motores que están integrados en un solo sistema, por tal razón, se consideran las dimensiones asumiendo su ensamblaje. La aplicación de la metodología Güerchet, debe seguir la siguiente secuencia:

5.2.2. Descripción del proceso de producción de cemento de uso general con la adición de cenizas volantes

En el ítem 5.1.1., se describe el sistema de adición de cenizas volantes en el proceso de molienda de cemento de uso general, que inicia con la recepción de las cenizas desde los camiones cisterna para almacenarlo en el silo de 200 toneladas, de donde se dosificará a la línea de producción, su funcionamiento será en paralelo con los sistemas de dosificación de clinker, caliza, yeso y puzolana, como se detalla en el diagrama de procesos de la Figura 1-5.

5.2.3. Definición de dimensiones de los equipos

Una vez definido el proceso productivo y la capacidad de alimentación según las proyecciones de la empresa que en este caso serán de 15 ton/h, se procede con la selección de equipos que cumplan con las características requeridas, como se detalla en la Tabla 1-5; los 10 equipos deben ser ensamblados en sumaria de forma vertical por su propia naturaleza de operación (descarga de material por gravedad). En esta parte es importante considerar cuantos equipos se utilizarán en el proceso, como serán sus operaciones y las dimensiones de cada una como se describe en el ítem 5.1.1. Con estas consideraciones, se resume la información en la Tabla 2-5, para la aplicación del método Güerchet.

Tabla 2-5: Dimensiones de los equipos de sistema de adición de cenizas volantes al molino CM4

EQUIPOS	CANTIDAD (n)	# DE LADOS (N)	LARGO (m)	ANCHO (m)	ALTO (m)
Camión cisterna	2	1.00	20.12	2.6	4.3
Bomba By Pass	1	2.00	1.76	1.2	0.6
Sistema de desempolvado (Filtro, ventilador, válvula rotativa)	1	1.00	2	1.8	3.5
Silo	1	1.00	4.4	4.4	14
Sistema de dosificación (Compuerta de guillotina, válvula rotativa y dosificador)	1	2.00	7.43	1.86	2.6
Válvula Diversor	1	1.00	0.6767	0.502	0.362

Realizado por: Pilco, José, 2023.

Como se mencionó anteriormente existe unificación de áreas, como es el caso del sistema de desempolvado que está ensamblado por su operatividad sobre el silo, y que está conformado por el ventilador y la válvula rotativa en la descarga del filtro como se describe en la Figura 5-5. En el caso del sistema de dosificación está compuesto por la compuerta de guillotina, válvula rotativa y el dosificador, que están instalados en la parte inferior del silo de cenizas volantes.

5.2.4. Cálculo de áreas requeridas para el sistema de adición de cenizas volantes

El método Güerchet usado en el cálculo de las áreas define los siguientes criterios:

- **Superficie Estática (Ss).**

Considerado como la superficie donde se instalarán los equipos estáticos.

$$Ss = L * A$$

$L =$ largo

$A =$ ancho

- **Superficie Gravitacional (Sg)**

Define la cantidad de lados que se necesita para la operación del equipo.

$$Sg = Ss * N$$

$N =$ Número de lados donde se trabajaran en la máquina

- **Superficie de evolución (Se)**

Espacios requeridos para el desplazamiento de personal y equipos.

$$Se = (Ss + Sg) * K$$

$K =$ coeficiente de evolución

$$K = \frac{H}{2h}$$

H = altura promedio de elemento móviles

h = altura promedio de elementos fijos

- **Superficie total (ST)**

Es la sumatoria de todas las superficies calculadas, áreas requeridas para la instalación y operación de equipos.

$$S_T = S_s + S_g + S_e$$

Según la metodología Güerchet y los datos detallados en la Tabla 3-5, se calcula las superficies requeridas.

Tabla 3-5: Superficie requerida por para el sistema de adición de cenizas volantes al molino CM4

EQUIPOS	n	N	LARGO (m)	ANCHO (m)	SS	SG	ALTO (m)	SE	S UNITARIO	S TOTAL
Camión cisterna	2	1	20.12	2.60	52.31	52.31	4.30	46.81	151.43	302.86
Bomba by pass	1	2	1.76	1.20	2.11	4.22	0.60	2.83	9.17	9.17
Sistema de desempolvado (Filtro, ventilador, válvula rotativa)	1	1	2.00	1.80	3.60	3.60	3.50	3.22	10.42	10.42
Silo	1	1	4.40	4.40	19	19	14.00	17.32	56.04	56.04
Sistema de dosificación (Compuerta de gillotina, valvula rotativa y dosificador)	1	2	7.43	1.86	13.82	27.64	2.60	18.55	60.01	60.01
Válvula Diversor	1	1	0.67	0.50	0.34	0.34	0.36	0.30	0.97	0.97
										439.4

Realizado por: Pilco, José, 2023.

Con el método Güerchet, se necesitan 440 m^2 de área para la instalación del sistema de adición de cenizas volantes en el molino de cemento CM4.

5.2.5. Definición de superficies para establecer el layout

Para definir las dimensiones de las áreas y establecer el layout propuesto, se procede con la unificación de ciertas superficies, como es el caso del sistema de filtro de desempolvado que va instalado en la parte superior del silo y el sistema de dosificación de la parte baja del silo, se mantiene la altura de los equipos, esto permite establecer las dimensiones reales para graficarlos en el layout actual de la empresa.

Tabla 4-5: Superficie requerida por el sistema para la adición de cenizas volantes al molino CM4

Equipos	Área requerida m^2	Altura requerida (m)
Camión cisterna	302.86	4.30
Bomba By Pass	9.17	0.60
Sistema de desempolvado + Silo	56.04	20.46
Sistema de dosificación +Válvula diversor	60.01	
Total de área requerido	428 m^2	

Realizado por: Pilco, José, 2023.

Se mantiene las superficies de los camiones debido a que se requiere los dos puntos de descarga, se procede a suplir el área definida para el filtro porque estará instalado en la parte superior del silo ya que su área es inferior a $56.04 m^2$. Se tiene el mismo caso con la válvula diverso porque su área es inferior al sistema de dosificación que es de $60.01 m^2$, Tabla 4-5.

Por su propia operatividad los equipos deben ser ensamblados verticalmente y el área total requerido es de $428m^2$, que es inferior a los $450 m^2$ de área disponible junto al filtro del molino CM4, el estacionamiento y descarga de las unidades cisterna se requiere $302.86 m^2$ y 4.3 de altura, para la bomba Bypass, se necesita $9.17 m^2$ y una altura de $0.60 m^2$, para el silo, sistema de desempolvado y dosificación se requiere $116 m^2$ de área y 20.46 m de altura.

Tabla 5-5: Dimensiones y áreas de equipos

	Ancho (m)	Largo (m)	Área (m^2)
Camiones 1	5	30	150
Camiones 2	5	30	150
Bomba Bypass	3	3	9
Sistema de desempolvado + Silo	7	8	56
Sistema de dosificación +Válvula diversor	7	9	63

Realizado por: Pilco, José, 2023.

Con el método Güerchet, se define el área total requerida para el sistema de adición de cenizas volantes en el proceso de molienda de cemento de uno general, por su ensamblaje en la Tabla 4-5, se detalla la unificación de áreas de algunos equipos, con relación a las dimensiones de cada equipo detalladas en la Tabla 2-5, con todos los criterios de ensamblaje y operación se cuenta con las dimensiones para elaborar el layout propuesto del sistema de adiciones de cenizas volantes en el molino CM4.

5.2.6. Propuestas de las instalaciones industriales

Para una correcta interpretación del Flow Sheet del sistema de adición de cenizas volantes, lo equipos propuestos a instalar se ha codificado como se detalla en la Tabla 1-5. En el sistema de adición de cenizas volantes, se debe descargar dos camiones cisternas al mismo tiempo con una capacidad de descarga 1.2 Ton/min, la polución que se genera por la descarga será recuperada en el filtro de despolvado (CV002), para nuevamente ser descargado al silo (CV004) por la primera válvula rotativa (CV003).

Las cenizas almacenadas en el silo de 200 ton, se debe controlar por el caudal de salida con la compuerta tipo guillotina (CV005) de una capacidad de 15ton/h, quien debe alimentar a la válvula rotativa (CV006) para controlar la descarga hacia el dosificador (CV007), que posteriormente la válvula Diversor (CV008) direcciona las cenizas volantes al proceso de molienda de cemento de uso general.

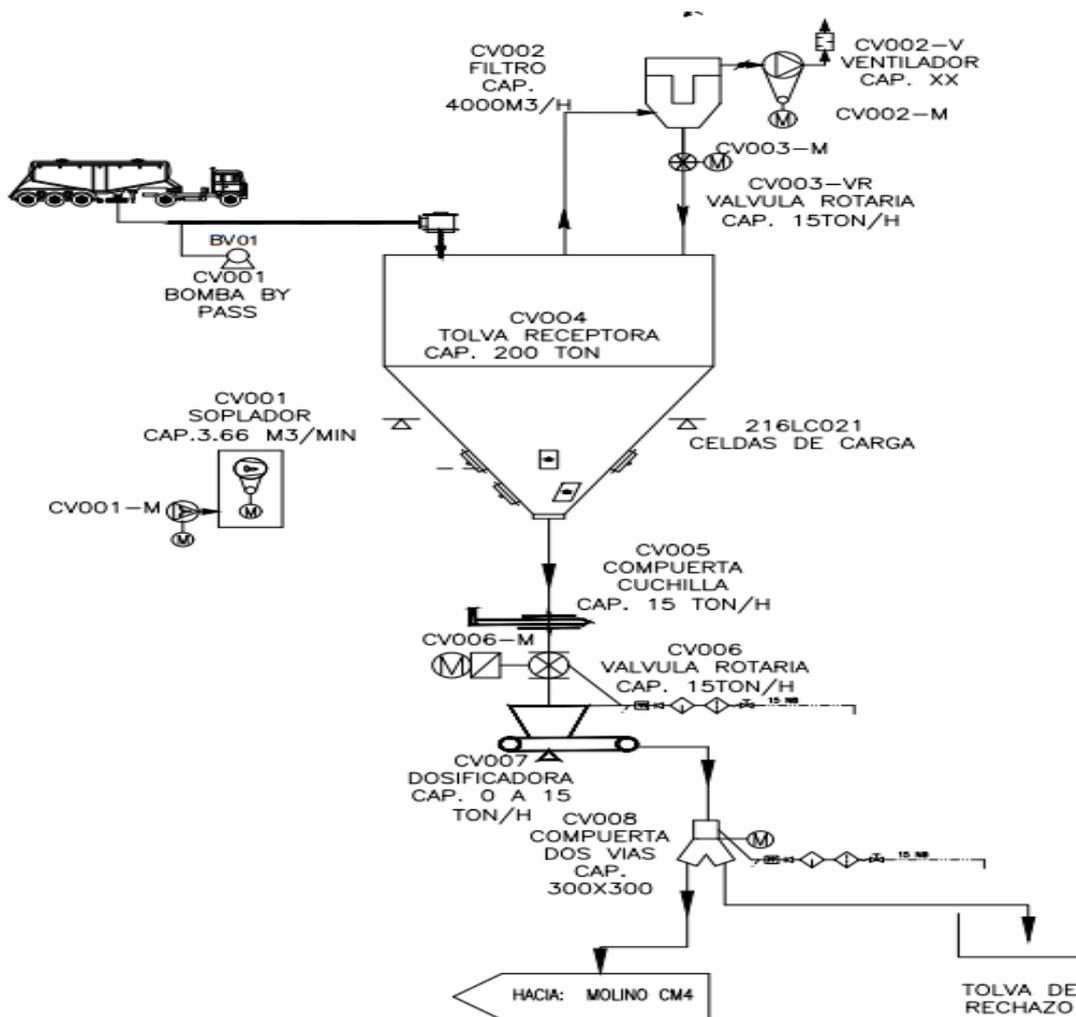


Figura 10-5: Diagrama de proceso del sistema de adición de cenizas volantes

Fuente: Información de UCEM. 2022.

Desde el proceso de almacenamiento hasta el proceso de descarga en la válvula divisor las operaciones son totalmente verticales, porque la descarga de la ceniza es por la gravedad, Figura 10-5.

5.2.7. *Layout de la propuesta del sistema de adición de cenizas volantes*

Se define como una distribución lineal porque la instalación de los equipos es de forma vertical, y el estacionamiento de los camiones para la descarga será en la vía internas de la planta sin afectar la movilización de los vehículos y equipos de operación, por tal razón, no se ha aplicado ninguna metodología para definir la proximidad de los equipos, ya que la empresa tiene definido este sitio para el proyecto del sistema de adición de cenizas volantes en el proceso de molienda de uso general.

Para definir la propuesta del layout se ha trabajado con el método Güerchet, donde se ha definido las áreas necesarias para cada equipo considerando sus ensamblajes y sus operaciones como se detalla en la Tabla 4-5.

- Sitio asignado para el sistema de adición de cenizas volantes



Figura 11-5: Ubicación del sistema de adición de cenizas volantes (Ver Anexo A)
Realizado por: Pilco, José, 2023.

El sistema de adición de ceniza volantes estará ubicado junto al filtro del molino CM4, sitio seleccionado considerando temas operativos y mantenimientos de los equipos del proceso de molienda de uso general, Figura 11-5.

- Layout del sistema de desempolvado y silo.

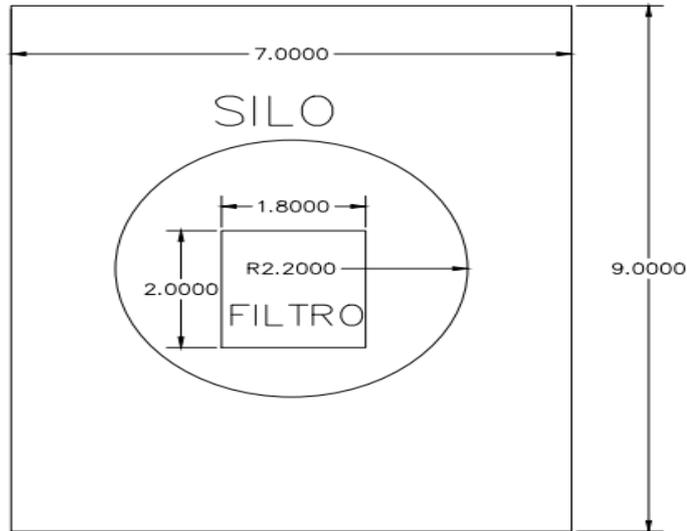


Figura 12-5: Layout del silo y filtro del sistema de desempolvado
Realizado por: Pilco, José, 2023.

Con el método Güerchet se define que la plataforma disponible para la instalación (Figura 12-5) del silo y el filtro será de 7 m de ancho y 9 m de largo como se detalla en la Tabla 5-5, en la parte superior del silo se cuenta con las dimensiones requeridas para las operaciones mantenimiento.

- Layout del dosificador y válvula

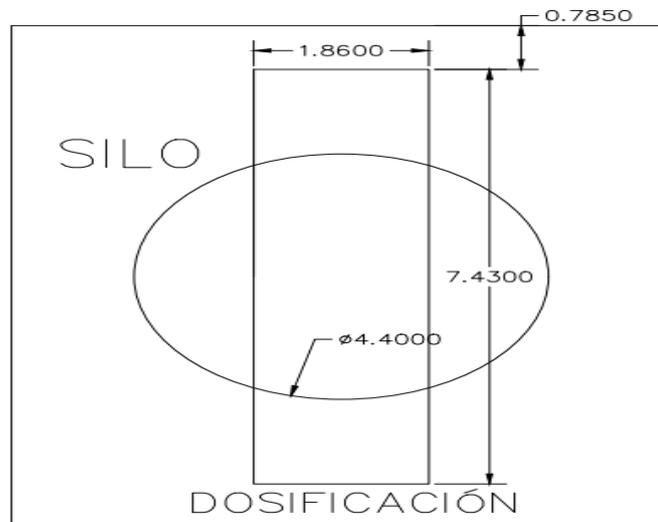


Figura 13-5: Layout del silo y sistema de dosificación
Realizado por: Pilco, José, 2023.

El largo de la plataforma (Figura 13-5) fue calculado en base al largo de la dosificadora que es de 7.43m según lo detallado en la Tabla 5-5, considerando 0.79 m a los dos lados para el personal de operaciones y de mantenimiento



Figura 14-5: Layout del sistema de adición de cenizas volantes en molino CM4
Realizado por: Pilco, José, 2023.

El sistema de adiciones de cenizas volantes en el proceso de molienda de cemento de uso general en el molino CM4, será ubicado fuera del área de operación y mantenimiento del molino CM4 y dentro del área definido para el sistema de adición. El área de descarga será junto a la bomba bypass, el camión dos debe descargar cuando exista la disponibilidad de dos camiones cisterna en la planta o bajo stock, Figura 14-5.

5.2.8. Diagrama de recorrido

El proceso de molienda de alimentación de ceniza volantes requiere el transportador de reproceso del molino CM4, ya que su capacidad asciende a las 30 Ton/h y su reproceso se mantiene entre de 2 % al 3 % de su capacidad nominal que es de 100 Ton/h, permitiendo utilizar el mismo transportador existente.

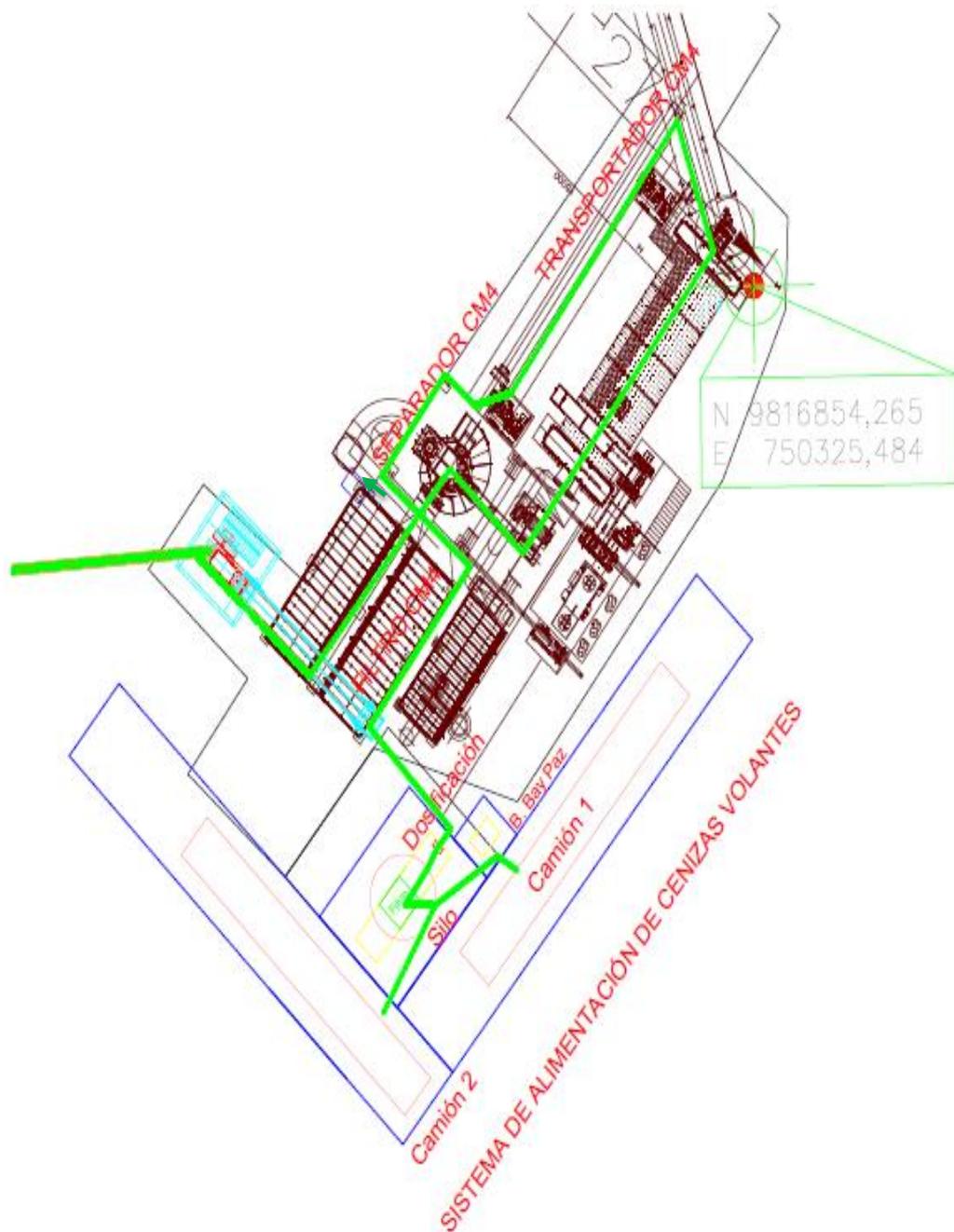


Figura 15-5: Layout del sistema de adición de cenizas volantes en molino CM4 (Ver Anexo B)
Realizado por: Pilco, José, 2023.

Se espera que la descarga se realice solo con un camión de existir la disponibilidad de camiones cister se podrá utilizar el área asignado para el camión 2, su alimentación se ejecutara mediante dosificadores descargando a la válvula divisor que direccionara el material hacia el transportador de reproceso, Figura 15-5. La ceniza volante iniciará su mezclado desde la banda que alimenta al molino CM4, donde estará ya dosificado el clinker, yeso, caliza triturada y puzolana, iniciando su proceso de molienda en el molino CM4, para pasar al separador y el filtro para posteriormente direccionarlo mediante aerodeslizadores al silo de almacenamiento del cemento de uso general.

5.3. Evaluación económica de instalación del sistema de adición de cenizas volantes

En la actualidad, las industrias cementeras deben buscar el control y mejora de las operaciones y de esa manera, contribuir con el cuidado del medio ambiente mediante el uso de materiales alternos o producidos en sus propias plantas. En el diseño, se estima utilizar 10 equipos, que están detallados en la Tabla 5-5, cada elemento cumple una función específica para una correcta dosificación de las cenizas volantes en la producción del cemento de uso general. En la Tabla 6-5, se determina los valores estimados para el proyecto de uso de la ceniza en la producción de cemento.

Tabla 6-5: Evaluación económica de instalación del sistema de adición de cenizas volantes

Items	Equipos del Sistema de adición	Provisión de ingeniería y equipos	Construcción/Instalación	Costos administrativos	Imprevistos	Subtotal
1	Tolva de Recepción	\$ 65.051,77	\$ 41.653,95	\$ 2.754,53	\$ 200,00	\$ 109.660,25
2	Soplador de fluidificación	\$ 25.464,54	\$ 2.202,66	\$ 2.916,98	\$ 175,11	\$ 30.759,29
3	Filtro de desempolvado	\$ 36.887,63	\$ 9.308,65	\$ 3.080,13	\$ 343,13	\$ 49.619,54
4	Compuerta Guillotina	\$ 13.343,81	\$ 2.652,66	\$ 2.974,45	\$ 139,25	\$ 19.110,16
5	Válvula rotativa	\$ 20.643,67	\$ 2.551,66	\$ 3.105,10	\$ 217,34	\$ 26.517,77
6	Dosificadora	\$ 81.463,78	\$ 20.160,66	\$ 3.734,83	\$ 593,71	\$ 105.952,99
7	Compuerta divergente	\$ 22.749,99	\$ 2.765,55	\$ 2.862,77	\$ 119,28	\$ 28.497,58
8	Sistema eléctrico	\$ 5.821,35	\$ 788,14	\$ 2.754,53	\$ 50,00	\$ 9.414,02
		\$ 271.426,55	\$ 82.083,92	\$ 24.183,32	\$ 1.837,81	
				Costo Total		\$ 379.531,61

Realizado por: Pilco, José, 2023.

Por lo general las industrias buscan que las empresas constructoras, se encarguen de la ingeniería, construcción y puesta en marcha de los equipos, esto permite abaratar costos y mayor control de las garantías de los equipos. Los costos detallados en Tabla 6-5, son referenciados con la información de proyectos ejecutados y cotizaciones de proveedores. Se proyecta que el costo de la implementación del sistema de adición de cenizas volantes para la producción del cemento de uso general en el molino CM4 de la Unión Cementera Nacional es de \$ 379.531,61 dólares americanos, este costo variará según la inflación económica y los impuestos que se puedan implementar. Según el historial de construcción de la empresa el costo de construcción puede variar hasta un 5%. En base a los datos históricos asociados a las variables que son parte del ciclo de producción, se hace referencia al contenido de la Tabla 6-5.

Tabla 7-5: Análisis financiero sin ceniza

SIN CENIZA									
				Costo de producción actual (\$/día)	Venta total actuales (\$/día)	Utilidad Bruta	Impuestos/mes (3%)	Utilidad Neta/mes	Utilidad neta anual
Utilización actual	78%								
Producción actual	1872	Ton/día		\$ 223.060,50	\$ 247.104,00	\$ 24.043,50	\$ 6.691,82	\$ 17.351,69	\$ 6.246.606,60
Utiliz. Actual simulada	79,19%								
Producción actual simulada	1899,34	Ton/día		\$ 226.318,23	\$ 250.712,88	\$ 24.394,65	\$ 6.789,55	\$ 17.605,10	\$ 6.337.836,42

Realizado por: Pilco, José, 2023.

Tabla 8-5: Análisis financiero con ceniza

CON CENIZA									
				Costo de producción actual (\$/día)	Venta total actuales (\$/día)	Utilidad Bruta	Impuestos/mes (3%)	Utilidad Neta/mes	Utilidad neta anual
AÑO 2023									
Utilización actual	78%								
Producción actual	1872	Ton/día		\$ 221.526,32	\$ 247.104,00	\$ 25.577,68	\$ 6.645,79	\$ 18.931,89	\$ 6.815.480,13
AÑO 2024									
Utiliz. Proyectada	86%								
Producción proyectada	2064	Ton/día		\$ 244.246,97	\$ 272.448,00	\$ 28.201,03	\$ 7.327,41	\$ 20.873,62	\$ 7.514.503,73
AÑO 2025									
Utiliz. Proyectada	94%								
Producción proyectada	2257,92	Ton/día		\$ 267.194,82	\$ 298.045,44	\$ 30.850,62	\$ 8.015,84	\$ 22.834,77	\$ 8.220.517,57

Realizado por: Pilco, José, 2023.

Tabla 9-5: Análisis financiero de inversión

	INVERSION	2023	2024	2025
UTILIDAD	\$ -379.531,61	\$ 6.815.480,13	\$ 7.514.503,73	\$ 8.220.517,57

Valor Presente	VALOR FUTURO		
Tasa de Descuento	12%		
Valor Presente	VAN/ (1+td)^n		
VAN en valor presente	\$ -379.531,61	\$ 6.085.250,11	\$ 5.990.516,37

Suma de Flujos en Valor Presente	\$ 12.075.766,48	
Valor Actual Neto VAN	\$ 11.696.234,87	Rentabilidad
Tasa Interna de Retorno, TIR	1596%	El proyecto es rentable

Realizado por: Pilco, José, 2023.

En la Tabla 7-5, Tabla 8-5, Tabla 9-5, se determina el Flujo de Fondos de la empresa, con lo cual, se tiene los cálculos del VAN y del TIR, que determina un proyecto rentable.

5.4. Simulación

La simulación nos permite verificar si las proyecciones de producción de cemento de uso general con la adición de cenizas volantes es factible o no para la organización, para este proceso se trabajan con la información generada el diseño de experimentos, pruebas de laboratorio y distribución de plantas.

Para la simulación del proceso de producción de esta investigación se ha utilizado FexSim, considerando que tiene ciertas limitaciones como es el caso de que simula siempre como si los equipos operan al 100% de su rendimiento o como equipos nuevos.

5.4.1. Simulación del proceso de producción actual de cemento de uso general, sin el sistema de adición de cenizas volantes

También es importante elaborar la simulación de la producción actual, para verificar si la información existente tiene relación como la producción de cemento de uso general sin la adición de cenizas volantes, información que nos permitirá verificar si existen mejoras con el sistema propuesto, Figura 16-5.

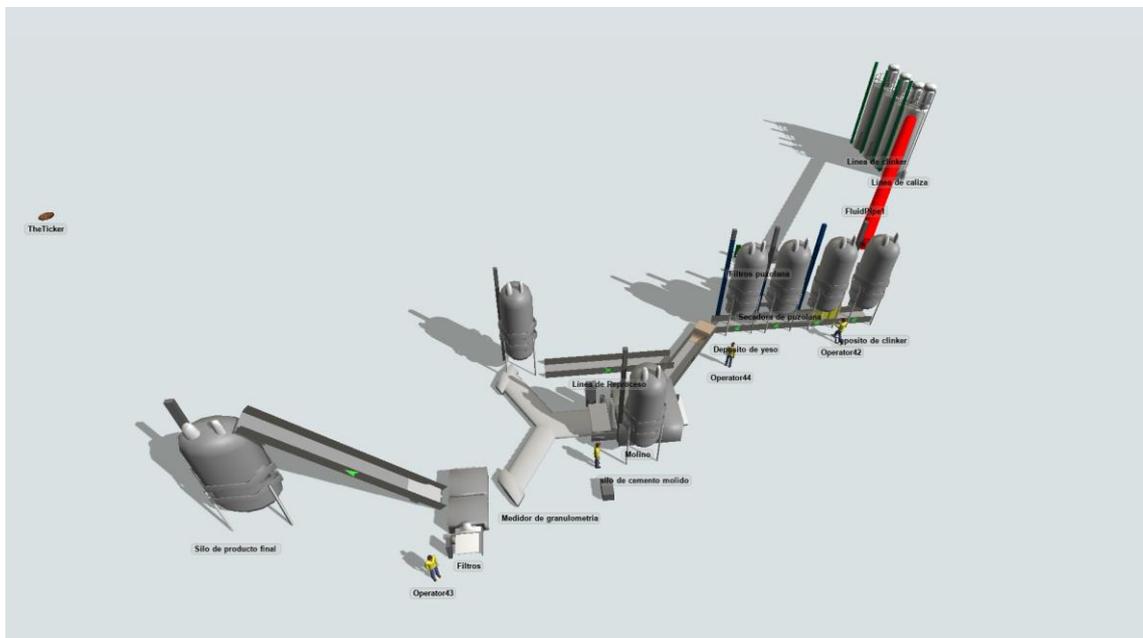


Figura 16-5: Proceso productivo de cemento de uso general sin el sistema de adición de cenizas volantes

Realizado por: Pilco, José, 2023.

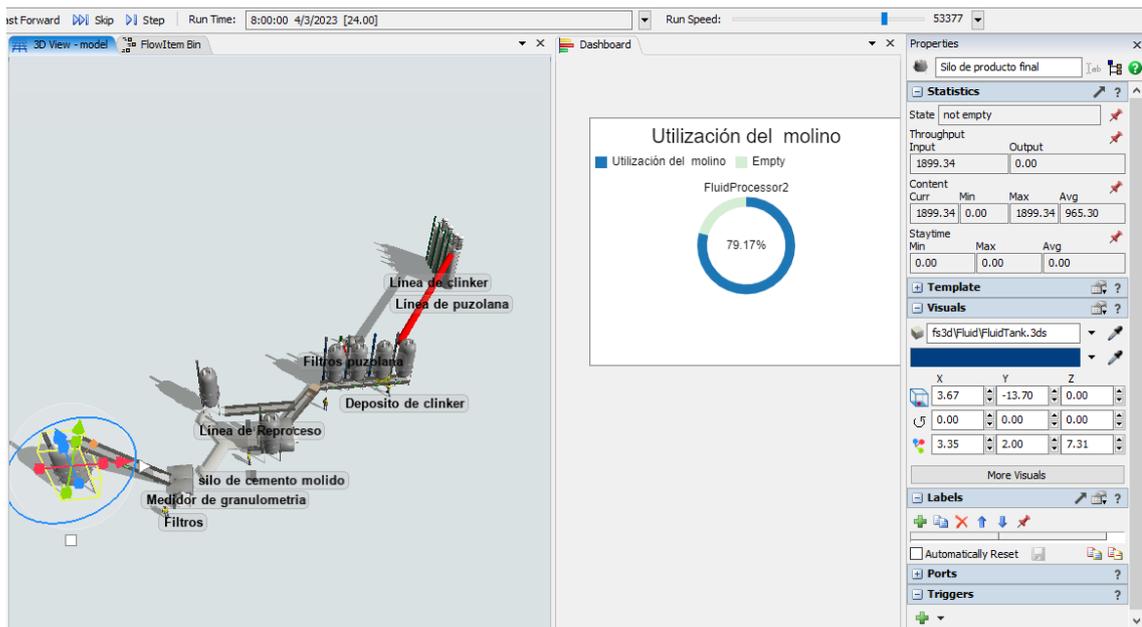


Figura 17-5: Simulación del proceso de producción actual del cemento de uso general

Realizado por: Pilco, José, 2023.

Como resultado de la simulación en la Figura 17-5, se puede observar que el molino tiene una utilización promedio del 79.17 %, llegando a una producción de 1.819,34 Ton/día de producción de cemento de uso general, considerando que la utilización promedio actual del molino de cemento CM es del 78 %. Se valida que la simulación es acorde a los datos de producción del periodo 2022.

Tabla 10-5: Costo de producción de cemento de uso general sin cenizas volantes

Costo de producción (\$ / Ton)	
Clinker	79%
Yeso	3%
Caliza triturada	2%
Puzolana	16%

Realizado por: Pilco, José, 2023.

Del costo de producción de cemento de uso general, se evidencia que el clinker es la materia prima sintético de mayor costo aportando con el 79% al costo de producción por cada tonelada, seguido por la puzolana con el 16%, el yeso con el 3% y la caliza triturada con el 2%, según la dosificación detallado en la Tabla 10-5.

Tabla 11-5: Costo total de producción por tonelada de cemento de uso general si cenizas volantes de fondos

Costo total de producción (\$/Ton)	
Costo de producción	57%
Costos Variables	25%
Costos Fijos	11%
Otros	7%

Realizado por: Pilco, José, 2023.

Del 100% del costo total de producción de cemento de uso general sin la adición de cenizas volantes, el costo de producción aporta con el 57%, costo variable con el 25%, costos fijos con el 11% y otros costos con 7%, Tabla 11-5.

5.4.2. Productividad de cemento de uso general sin la adición de cenizas volantes

Productividad promedio actual.

$$Productividad\ promedio\ actual = \frac{Producción\ (\frac{Ton}{día})}{Tiempo\ (h)}$$

$$Productividad\ promedio\ actual = \frac{1872\ (\frac{Ton}{día})}{24\ (h)}$$

$$Productividad\ promedio\ actual = 78\ \frac{ton}{h}$$

Productividad actual simulada.

$$Productividad\ promedio\ actual = \frac{1899.34\ (\frac{Ton}{día})}{24\ (h)}$$

$$Productividad\ promedio\ actual = 79.139\ \frac{ton}{h}$$

5.4.3. Simulación del proceso de producción propuesto de cemento de uso general, con el sistema de adición de cenizas volantes

Los pasos seguidos para la elaboración de la simulación son las siguientes:

Paso 1: Para la creación de la línea de producción propuesta utilizando el software FlexSim, se aplicó un modelo con variables discretas debido a las características del proceso, introduciendo: 5 Fluid Generator, 1 Fluid Ticker, 8 Fluid Tanks, 8 Fluid Conveyor, 1 Fluid Splitter, 5 Fluid Pipes, 5 Fluid Processor y 3 Operator, mismos que ayudan a simular las entradas de material, los tiempos de dosificación, el transporte, los distintos procesos existentes, la utilización, del molino, el

reproceso del cemento de uso general y la salida del producto final como se muestra en la Figura 18-5.

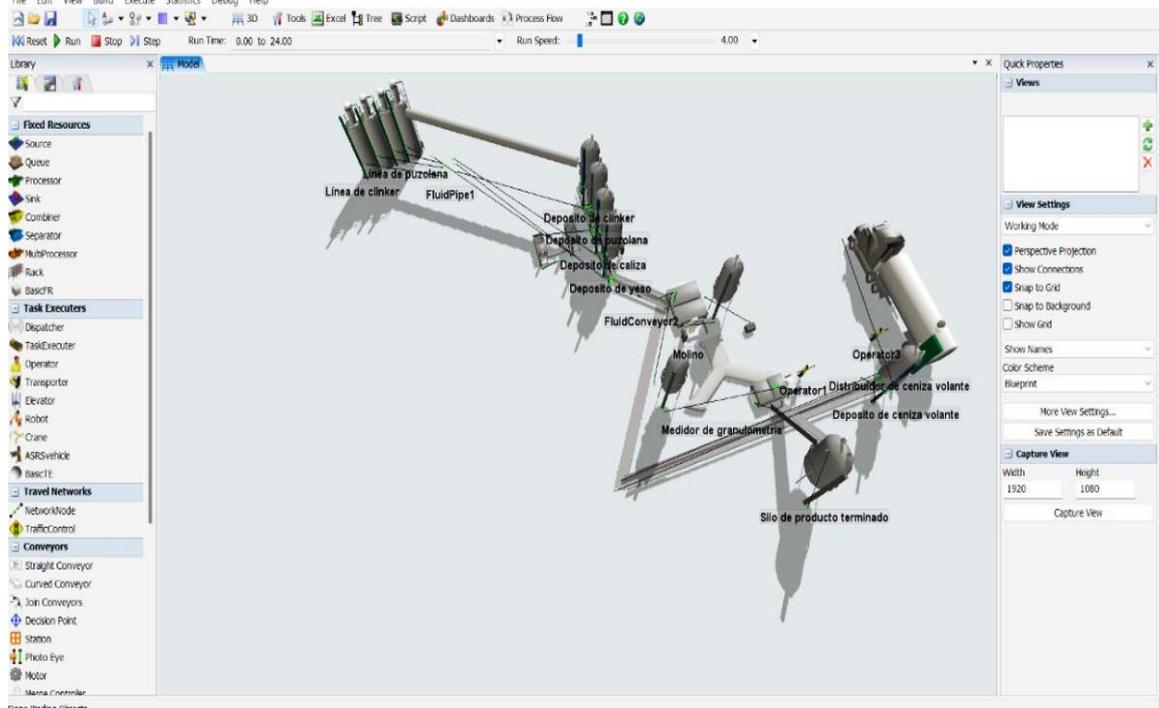


Figura 18-5: Esquema de proceso de producción de cemento de uso general con el sistema de adición de cenizas volantes

Realizado por: Pilco, José, 2023.

Paso 2: Se asignó los nombres de lo que representaran cada elemento dentro del proceso con la finalidad de poder reconocerlos de mejor manera y seguir la secuencia establecida dentro de la línea de producción como se muestra en la Figura 19-5.

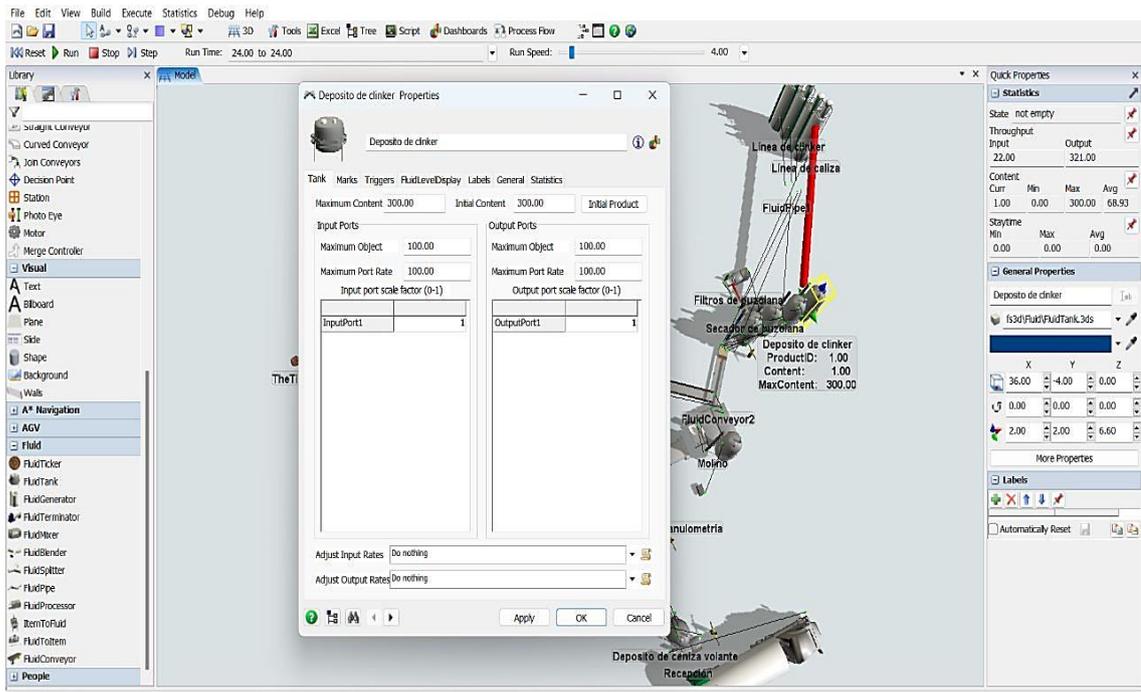


Figura 19-5: Identificación de elementos asignados en FlexSim

Realizado por: Pilco, José, 2023.

Paso3: Se unió los distintos elementos de la simulación con la función Connect Objects (A) en el orden adecuado en el cual está distribuido para que se cumplan los pasos establecidos en el flujograma de procesos como se muestra en la Figura 20-5.

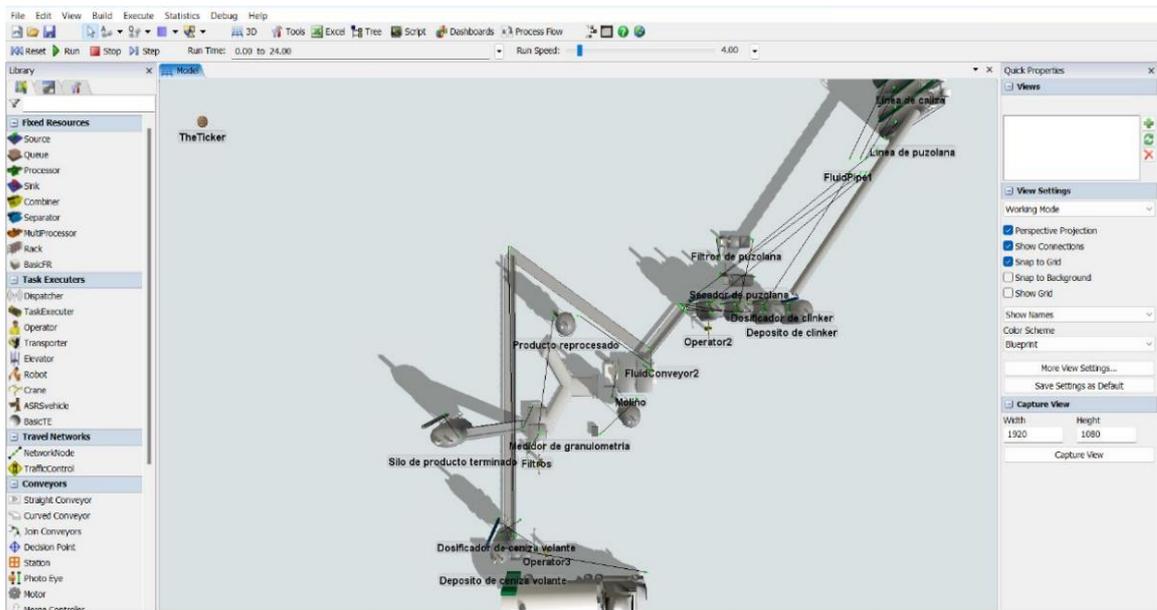


Figura 20-5: Unión de elementos en base al diagrama de flujo propuesto Connect Object

Realizado por: Pilco, José, 2023.

Paso 4: Se configuro la dosificación de cada material utilizando la herramienta Fluid Mixer la cual representa a las pesas de dosificación, controlando de esta forma que la cantidad enviada al molino sea la correcta la interfaz de los distintos fluid mixer se pueden observar en la Figura 21-5.

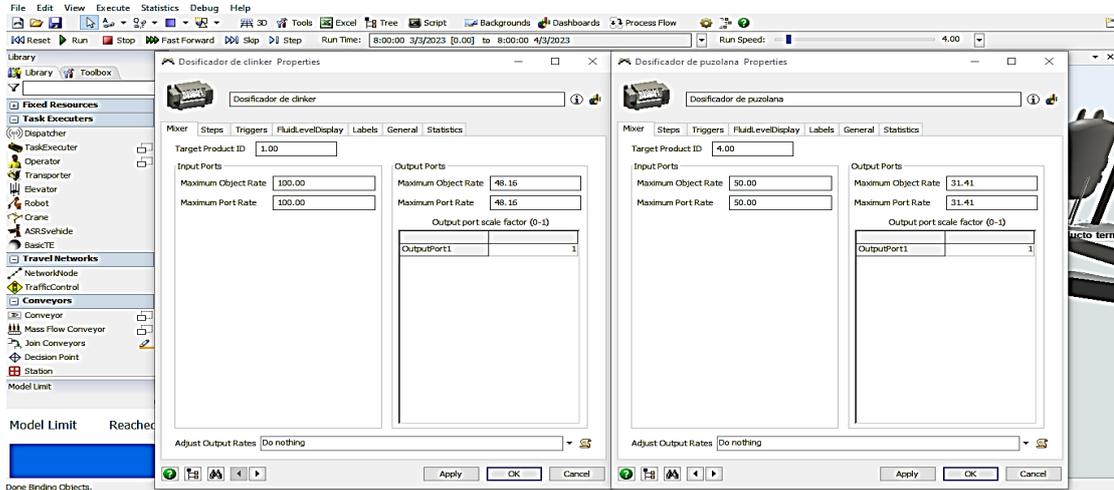


Figura 21-5: Dosificación de materiales – Fluid Mixer
Realizado por: Pilco, José, 2023.

Paso 5: Se estableció la capacidad del molino en toneladas hora, para lo cual se utilizó la capacidad de diseño del mismo la cual es 100 ton/h esto con la finalidad de poder conocer su utilización en un ambiente ideal y controlado, además se configuro el Fluid Splitter con la finalidad de asignar un porcentaje de material que será reprocesado como se puede ver en la Figura 22-5.

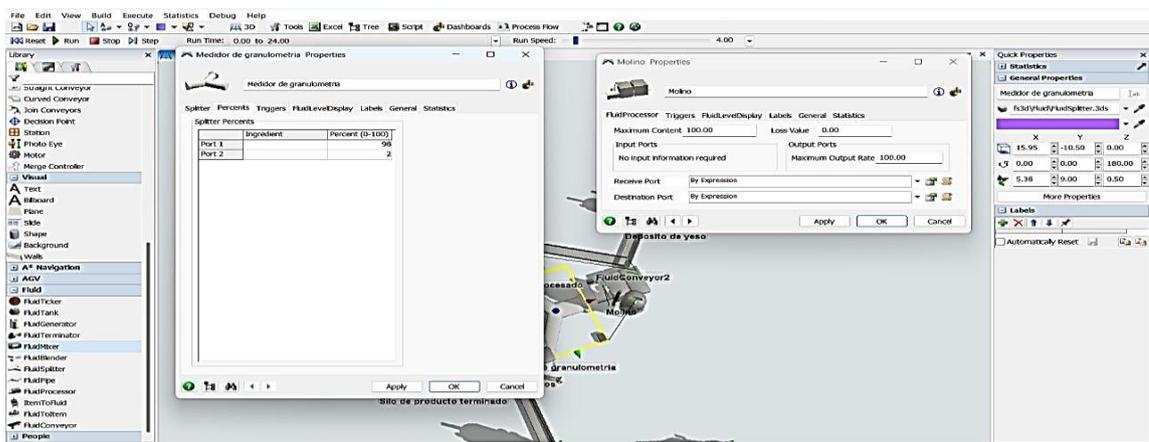


Figura 22-5: Definición capacidad de molino – Fluid Splitter
Realizado por: Pilco, José, 2023.

Paso 6: Se configuro los Fluid Processor tanto del proceso principal como es el filtro final del cemento y también de los subprocessos específicamente los que se realizan para el secado y

filtración de la puzolana, y por otra parte la recepción de la ceniza volante, la capacidad de estos procesos se debe incluirla en el apartado de Maximum Output Rate, ya que este controla el flujo de salida de cada proceso como se muestra en la Figura 23-5.

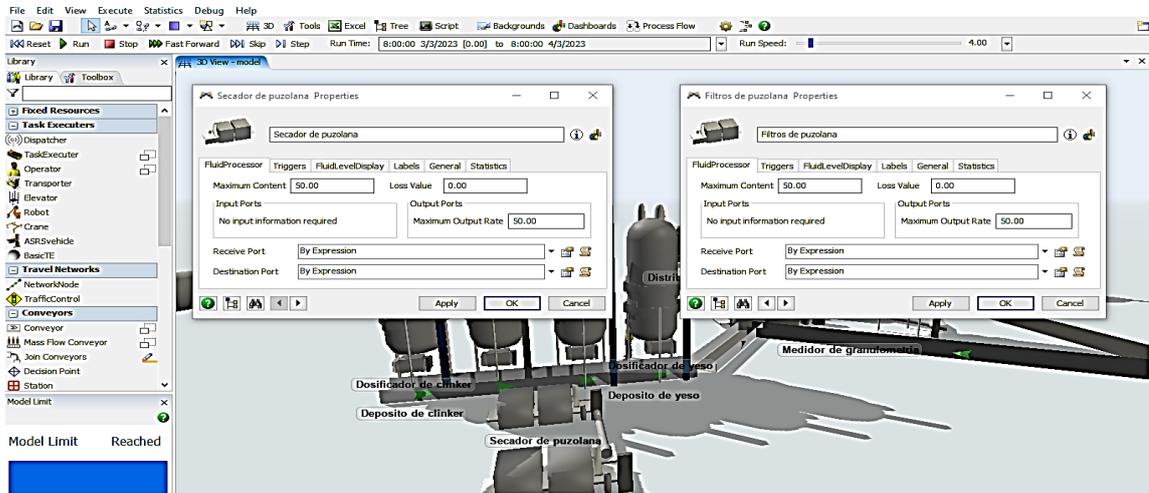


Figura 23-5: Definición de flujos de materiales en proceso– Fluid Processor–Maximum Output Rate

Realizado por: Pilco, José, 2023.

Paso 7: Una vez que se comprobó que toda la configuración era correcta y estaba acorde a las especificaciones requeridas del proceso se procedió a aplicar indicadores o también denominados Dashboards, uno para medir el porcentaje de utilización del molino y un segundo que reflejara la relación existente entre las toneladas producidas y las horas trabajadas, mismos que se muestran en las Figura 24-5 y Figura 25-5.

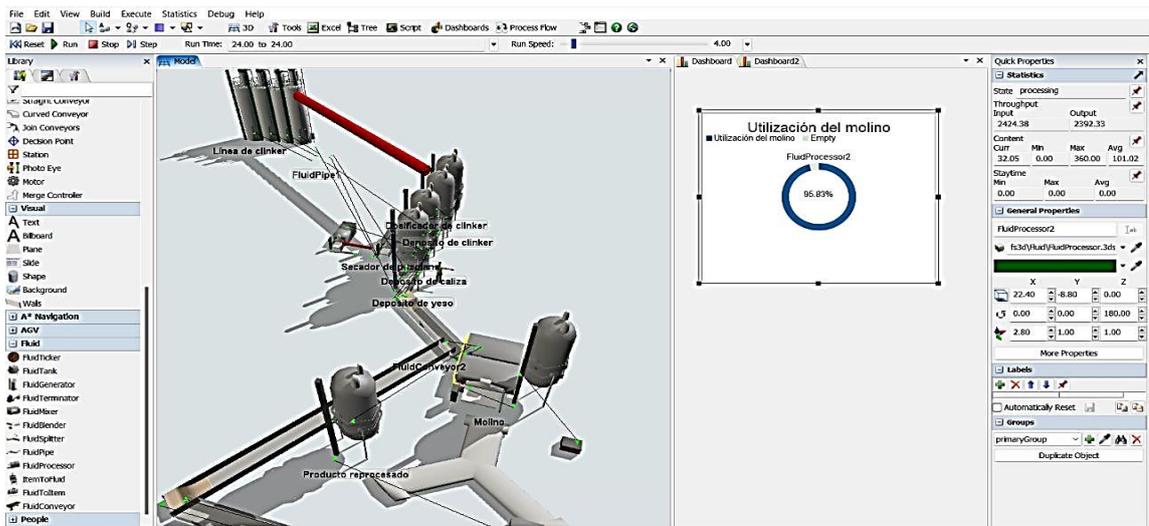


Figura 24-5: Utilización del molino de cemento CM4 con el sistema de adición de las cenizas volantes

Realizado por: Pilco, José, 2023.

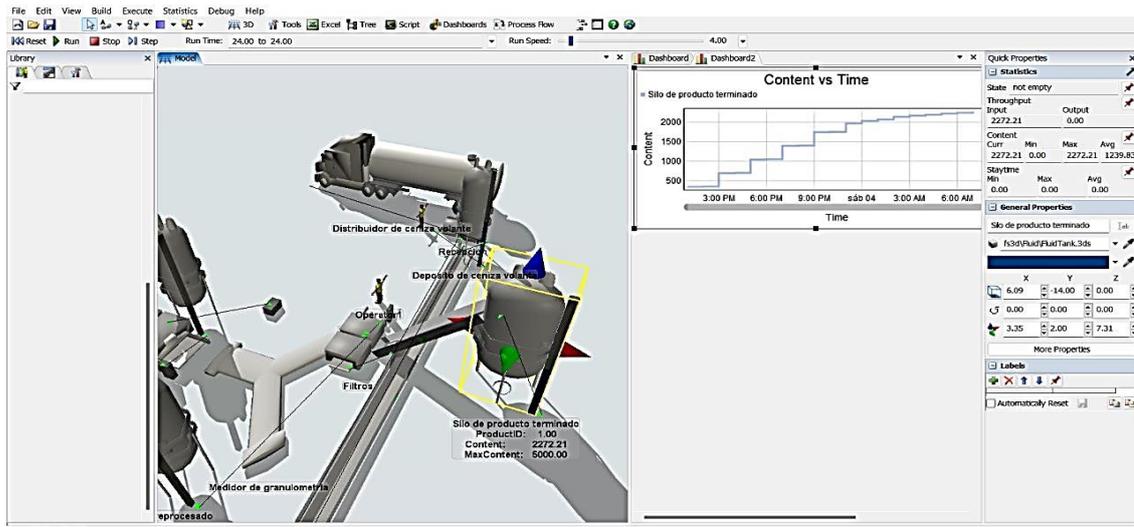


Figura 25-5: Producción de cemento de uso general (Ton/h), con el sistema de adición de cenizas volantes.

Realizado por: Pilco, José, 2023.

Según el rendimiento y la eficiencia operativa del molino detallado en la Tabla 26-4, es factible proyectar que el molino de cemento CM4 es capaz de llegar a una utilización del 94.08 % con una producción de 94.08 Ton / hora, ya que su capacidad nominal es de 100 ton/día. Como resultado la simulación en FlexSim como se detalla en la Figura 15-5, se evidencia que se puede llegar a 95.83% de utilización del molino con el sistema de adición de cenizas volantes, con una producción de 2299.92 ton/día. Se considera que el FlexSim estima que los equipos están al 100% operativo. Se valida que existe relación entre la utilización calculada con la utilización simulada en FlexSim.

Tabla 12-5: Costo de producción de cemento de uso general con cenizas volantes

Costo de producción (\$ / Ton)	
Clinker	72%
Yeso	4%
Caliza triturada	1%
Puzolana	17%
Ceniza Volante	6%

Realizado por: Pilco, José, 2023.

Del 100% del costo de producción de cemento de uso general, se evidencia que el clinkler es la materia prima sintético de mayor costo aportando con el 72% al costo de producción por cada tonelada, seguido por la puzolana con el 17%, el yeso con el 4%, la caliza triturada con el 1% y las cenizas volantes con el 6%, Tabla 12-5.

Tabla 13-5: Costo total de producción por tonelada de cemento de uso general con cenizas volantes

Costo total de producción (\$/Ton)	
Costo de producción	54%
Costos Variables	28%
Costos Fijos	11%
Otros	7%

Realizado por: Pilco, José, 2023.

Del 100% del costo total de producción de cemento de uso general sin la adición de cenizas volantes, el costo de producción aporta con el 54%, costos variables con el 28%, costos fijos con el 11% y otros costos con 7%, Tabla 13-5.

Productividad de cemento de uso general sin la adición de cenizas volantes

Productividad promedio proyectada.

$$Productividad\ promedio\ proyectada = \frac{Producción\ (\frac{Ton}{día})}{Tiempo\ (h)}$$

$$Productividad\ promedio\ proyectada = \frac{2257.92\ (\frac{Ton}{día})}{24\ (h)}$$

$$Productividad\ promedio\ proyectada = 94.08\ \frac{ton}{h}$$

Productividad actual simulada.

$$Productividad\ promedio\ proyectada = \frac{1899.34\ (\frac{Ton}{día})}{24\ (h)}$$

$$Productividad\ promedio\ proyectada = 95.83\ \frac{ton}{h}$$

CONCLUSIONES

Como resultado del diagnóstico, se determina que el cemento de uso general es el de mayor producción en la planta Chimborazo de la Unión Cementera Nacional, en la dosificación de las materias primas el clinker es el de mayor porcentaje de adición, por su costo elevado de producción arrastra a incrementar el costo de producción del cemento de uso general.

Mediante análisis de laboratorio se determina que las cenizas volantes que se generan en la línea de clinkerización tienen las características químicas y mineralógicas; y se puede utilizar como adición en la producción de cemento uso general, mediante diseños experimentales se define que se puede adicionar cenizas volantes hasta en 10% sin afectar la calidad del producto, resultado que valida disminución de consumo del clinker incrementado su productividad y reduciendo el costo de producción.

El diseño de distribución del sistema de adición de cenizas volantes, se realizó en base a la capacidad de producción del molino de cemento, la capacidad de extracción de cenizas volantes desde la línea de clinkerización y las proyección que tiene la empresa, definiendo que el sitio más adecuado y por la proyección de alimentar la ceniza volantes a los dos molinos se debe instalar junto a los filtros del molino CM4; por la instalación de los equipos en forma vertical el área disponibles es inferior a la requerida, donde brindara facilidad de operación y mantenimiento si afectar a las estructuras y a los equipos existentes.

Las simulaciones de la producción actual y con el sistema de adición de cenizas volantes, se realizaron utilizando el Software FlexSim, evidenciando que la productividad y utilización actual se mantiene y en lo proyectado se incrementa. Mediante el análisis económica se valida que existe un incremento en costos variables, principalmente por el transporte de la ceniza volante desde línea de clinkerización, pero su costo total de producción sigue siendo inferior al costo total actual y su tasa de retorno a la inversión es a corto plazo.

RECOMENDACIONES

El desarrollo del fundamento teórico sobre el proceso de adición de cenizas en el proceso de molienda del cemento de uso general de la Planta Chimborazo es una parte del denominado enfoque de procesos que sustenta la calidad del producto que se ofrece al mercado. Por lo tanto, es recomendable una revisión periódica de documentos de empresas que han desarrollado con éxito un proyecto de producción que facilita la reutilización de residuos nativos de producción como es el caso de las cenizas volantes.

La aplicación de estrategias orientadas al control y mejora de procesos productivos requiere de un fortalecimiento de la competencia del personal, en este sentido, es importante tomar en cuenta la existencia de personas que incrementan sus conocimientos, por lo que se recomienda, se identifique a este personal como fuente de retroalimentación con los responsables de procesos con el fin de integrar intereses personales con los empresariales.

El seguimiento apropiado del desempeño de la producción de cemento de uso general no se debe limitar a la carga de valores requeridos por los responsables, por lo que es recomendable se determine una revisión periódica del estado operativo y administrativo de la Planta de Chimborazo con el objeto de conocer el estado real de la empresa en función de los productos que se ofrecen al mercado y de las necesidades de los clientes.

Esta investigación deber ser analizada y validada por el área de proyectos y operaciones, como un proyecto de mejora para el ciclo de producción del cemento de uso general, por lo tanto, es recomendable la conformación de un grupo de trabajo de las áreas involucradas; como producción, seguridad industrial, mantenimiento, etc., de la Planta Chimborazo.

En función del control y mejora del proceso de molienda de cemento se sugiere como medida útil para la evaluación del desempeño del personal, la identificación de proyectos impulsados por trabajadores; este punto se sustenta en que trabajadores de planta conocen de primera mano la presencia de inconvenientes en sus labores e incluso son capaces de saber potenciales soluciones. Es importante tener presente que la inversión efectiva de capacitaciones es una fuente para incrementar el conocimiento del personal que cree proyectos de interés para la Planta Chimborazo.

GLOSARIO

Anova: Se considera un análisis de varianza dentro de un método estadístico que facilita el descubrimiento de resultados significativos de una prueba, es decir, determinar si es necesario rechazar una hipótesis nula o aceptar la hipótesis alternativa.

Check list: Permite identificar los riesgos en base a un monitoreo periódico del sector en estudio.

Costo: Constituye un gasto que permite la construcción de un producto que busca el mercado.

Cliente: Es la persona que compra un bien de consumo para la satisfacción de una necesidad.

Calidad: Es un nivel del cumplimiento de una expectativa generada por el cliente.

Documento: Soporte de información que es generado de manera interna por una organización.

Flexim: Es un modelo de simulación aplicable para el procesamiento de un producto requerido por el mercado.

Hipótesis nula: Es una suposición que se orienta a una negación o afirmación de una conclusión que es parte de una investigación.

Hipótesis alternativa: Es una de las hipótesis propuestas. Su uso radica en que es la hipótesis de investigación que se desea demostrar.

Proceso: Constituye la transformación de una materia prima en un bien de interés y que dispone de características apropiadas para su uso.

Registro: Es el formato que dispone de datos nativos de un experimento controlado y que son sujetos de un seguimiento y análisis.

BIBLIOGRAFÍA

- Alvarenga, K., Amaya, B., & Sibrián, M. (2016). *repositorioslatinoamericanos.uchile.cl*. (U. E. Salvador, Editor) Obtenido de Evaluación y análisis de los beneficios de la ecoeficiencia en el proceso de la perforación de pozos geotérmicos: <https://repositorioslatinoamericanos.uchile.cl/handle/2250/158612>
- Alvarez, P. (2017). *Procesos*. Bogota: Aguilar.
- Alvear, C. (2016). *Calidad Total II*. Bogota: Alfa.
- ANT. (11 de 06 de 2021). https://www.ant.gob.ec/?page_id=2670. Obtenido de https://www.ant.gob.ec/?page_id=2670
- Antón, F. R. (2016). *Logística de transporte*. Barcelona: ESIC.
- Bautista Ruiz, W., Lagos, M., & Martínez Ovalle, S. (2017). *Caracterización de las cenizas volantes de una planta termoeléctrica para su posible uso como aditivo en la fabricación de cemento* (Vol. 8). v. Investig. Desarro. Innov.
- Bernal, C. (2019). *Metodología de la Investigación: administración, economía, humanidades y ciencias sociales*. Bogotá: Prentice Hall.
- Bringas, A. (Enero de 2016). *Elementos de la cadena de la suministros*. Obtenido de <https://es.slideshare.net/aabringas/elementos-de-la-cadena-de-la-suministros>
- CAF. (05 de 02 de 2019). <https://www.caf.com/es/actualidad/noticias/2019/02/ecuador-impulsa-hoja-de-ruta-del-sector-logistico/>. Obtenido de <https://www.caf.com>
- Camison, C. C. (2015). *Gestión de la Calidad: Conceptos, enfoques, modelos y sistemas*. Madrid: Pearson.
- Carriel, R. (2018). Sistema de gestión y control de la calidad: Norma ISO 9001:2015. *Recimundo*, 1-20.
- Cely, V. (2017). *repositorio.unal.edu.co*. (U. N. Colombia, Editor) Obtenido de Medición de la productividad en procesos industriales que integren cadena de frío, basada en evaluaciones de exergoeconomía y ecoeficiencia: https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/62964/Tesis%20DOCTORAL%20V%C3%ADctor%20Hugo%20Cely%20Ni%C3%B1o_Feb.%2009%202018_Repositorio%20UN.pdf?sequence=1
- CEPAL. (2015). *cepal.org/es/publicaciones/*. (Cepal, Editor) Obtenido de Ecoeficiencia. Análisis de indicadores: <https://www.cepal.org/es/publicaciones/5644-ecoeficiencia-marco-analisis-indicadores-experiencias>
- Chacón, V. (2021). *repositorio.uta.edu.ec*. (UTA, Editor) Obtenido de Análisis teórico experimental de la resistencia a la compresión del hormigón y su influencia en el módulo de elasticidad estático en el Cantos Sto. Domingo de los Colorados:

<https://repositorio.uta.edu.ec/jspui/bitstream/123456789/33537/1/Tesis%20I.%20C.%201519%20-%20Chac%C3%B3n%20Santos%20V%C3%ADctor%20Steve.pdf>

- Cid, D. (2016). *Fundamentos de investigación*. Mexico: Diamante.
- Cortés Cortés , M., & Iglesias León, M. (2017). *Generalidades sobre Metodología de la Investigación* (Vol. 1). Ciudad del Carmen, Campeche, México: Universidad Autónoma del Carmen.
- Crispin, R. (2022). <https://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/handle/20.500.12404/22885>. (PUCP, Editor) Obtenido de Análisis del Plan de Ecoeficiencia 2019 de la Biblioteca Nacional del Perú según criterios de evaluación de bibliotecas verdes: <https://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/handle/20.500.12404/22885>
- Cruz, F. (2017). Técnicas y Herramientas de Calidad. *Ingeniería y Desarrollo*, 59-69.
- Dávila, G. (2018). *El razonamiento inductivo y deductivo dentro del proceso investigativo en ciencias experimentales* y. Bogotá: Laurus.
- De Domingo, J. (2016). *Calidad y Mejora Continua*. Mexico: Alpha.
- Delgado, D. L. (2016). *Análisis de procesos en la logística de salida de la empresa CDE y el diseño del modelo de gestión*. Guayaquil: Universidad de Guayaquil.
- Díaz, M., Merlgar, D., Tapia, B., & Vallejo, P. (2016). <https://tesis.pucp.edu.pe/>. (PUCP, Editor) Obtenido de Ecoeficiencia minera: https://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/bitstream/handle/20.500.12404/7535/DIAZ_MELGAR_ECOEFICIENCIA_MINERA.pdf
- EAE Business School. (Noviembre de 2017). *Los 6 objetivos de los indicadores de gestión logística*. Obtenido de Retos en Supply Chain: <https://retos-operaciones-logistica.eae.es/los-6-objetivos-de-los-indicadores-de-gestion-logistica/>
- Enriquez, C. (2016). Análisis del servicio de transporte público. *Comercio y negocios*, 1-14.
- ESAN. (10 de 10 de 2018). *ESAN*. Obtenido de <https://www.esan.edu.pe/apuntes-empresariales/2018/10/que-es-el-cross-docking-y-para-que-sirve/>
- Escudero, J. (2019). *Logística de almacenamiento*. España: Paraninfa S.A.
- Fernández Collado , C., & Babtista Lucio, P. (2014). *Metodología de la investigación*. Mexico: Interamericana Editores, S.A. DE C.V.
- Fernandez, M. (2016). *Evaluación de riesgos en el sector de transporte*. Barcelona: Alfa.
- Folgar, F. (2017). *Sistemas Consolidados de Gestión*. Buenos Aires: Macchi S.A.
- Gata Molina, A., & Mas Diego, S. (2016). *Diseño de experimentos aplicado a investigaciones agrícolas relacionadas con el campo electromagnético* (Vol. 19). EDICT.
- Gómez, M. (2016). *Introducción a la Metodología de la Investigación Científica*. Brujas. Obtenido de <https://books.google.com.pe/books?id=9UDXP4U7aMC&printsec=frontcover&hl=es#v=onepage&q&f=false>

- González, L. (2020). Impacto de la investigación cuantitativa en la actualidad. <https://revista.sudamericano.edu.ec/index.php/convergence/article/view/35/33>.
- GPR. (2022). *gpr.administracionpublica.gob.ec/gpr_ecuador/n4*. (Senplades, Editor) Obtenido de Gobierno por Resultados: https://gpr.administracionpublica.gob.ec/gpr_ecuador/n4
- Granada, J. (2016). *Gestión Logística Integral*. Bogota: Starbook Editorial.
- Hernández Monterroza, A. C. (Julio de 2012). *Desarrollo de un plan estratégico de logística para la empresa ACONQUISTAR S.A.S.* . Obtenido de Universidad del Rosario: <http://repository.urosario.edu.co/bitstream/handle/10336/3658/1018424143-2012.pdf>
- Hernandez, H. (2016). Enfoque basado en procesos. *Saber - Ciencia*, V-11.
- Hernández, R. (2016). *Metodología de la Investigación* (Quinta Edición ed.). Bogotá: McGraw Hill.
- INEC. (Octubre de 2016). <https://www.esan.edu.pe/apuntes-empresariales>. Obtenido de <https://www.esan.edu.pe/apuntes-empresariales>
- INEN (Ed.). (2022). <https://www.normalizacion.gob.ec/>. Obtenido de <https://www.normalizacion.gob.ec/>
- Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el trabajo. (2016). *Guía para la acción preventiva*. Madrid: INSHT.
- ISO. (2015). *ISO. Norma ISO 9000, 2015. Sistemas de Gestión de la Calidad – Fundamentos y vocabulario*. Suiza: ISO.
- Ley del Sistema Ecuatoriano de la Calidad. (2010). *Ley del Sistema Ecuatoriano de la Calidad*. Obtenido de Ley del Sistema Ecuatoriano de la Calidad: http://www.oas.org/juridico/pdfs/mesicic4_ecu_sistema.pdf
- Ley Orgánica de Defensa del Consumidor*. (Junio de 2017). Obtenido de <http://www.industrias.gob.ec/wp-content/uploads/2015/04/A2-LEY-ORGANICA-DE-DEFENSA-DEL-CONSUMIDOR.pdf>
- LGC. (2021). <https://www.logycom.mx/blog/que-es-la-gestion-de-almacenes>. Obtenido de <https://www.logycom.mx/blog/que-es-la-gestion-de-almacenes>
- López, A. (2016). *Propuesta para elaborar un manual de procedimientos para el manejo y control de inventarios en la empresa TRACTEC SAS*. Boyacá: Universidad Pedagógica de Colombia.
- Martínez Guillen, M. (2003). *La Gestión Empresarial: equilibrando objetivos y valores*. Madrid, Madrid, España: Díaz de Santos S.A. Recuperado el 16 de Mayo de 2017, de https://books.google.com.ec/books?id=JEGXggAcH-UC&printsec=copyright&hl=es&source=gbs_pub_info_r#v=onepage&q&f=false
- Martínez, J. (2010). *Desarrollo de Estrategias para la gestión de la relación con los clientes*. Valencia: Universidad José Antonio Páez.

- Medina, C. R. (2017). *Identificación y análisis de riesgos en la gestión empresarial. Caso de estudio en una empresa de transportes de pasajeros en Quito*. Quito: ISSN.
- Mendez Loja, L. (2018). *Formulación de un conglomerante alternativo con cementos que poseen alto contenido de ceniza volante*. Cuenca.
- MIPRO. (2020). <https://www.gob.ec/mipro>. (Mipro, Editor) Obtenido de <https://www.gob.ec/mipro>
- Molina, J. (2015). *Planificación e implementación de un modelo logístico para optimizar la distribución de productos publicitarios en la empresa Letreros Universales S.A.* Guayaquil: UPS.
- Morales, E. (2016). *La Logística Empresarial y la Rentabilidad de la Distribuidora DIMAR*. Ambato: UTA.
- Niño, S., Rojas, A., & Niño, I. (2020). *Co procesamiento de la industrial del cemento*. *Ecorfan*, 10.
- OMS. (2020). <https://www.who.int/es>. Obtenido de <https://www.who.int/es>
- Pedrini, D., Frank, A., & Schwengber, C. (2016). *researchgate.net/publication*. (Alpha, Editor) Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/289479417_Analisis_de_los_indicadores_de_ecoeficiencia_de_una_industria_de_cementos
- Ramos, F. (2021). *repositorio.uta.edu.ec*. (UTA, Editor) Obtenido de *Análisis físico de comparativo de las propiedades físicas de aluminosilicato en reñación con el cemento puzolánbico* Tipo IP: <https://repositorio.uta.edu.ec/jspui/bitstream/123456789/32166/1/Tesis%20I.%20C.%201442%20-%20Ramos%20Pe%20C3%B1afiel%20Ramiro%20Fabian.pdf>
- Registro de Actividades Económicas*. (2016). Obtenido de <https://www.ibarra.gob.ec/web/index.php/gobierno/gestion-tributaria/824-registro-de-actividades-economicas-2016>
- Registro Oficial. (2008). *Constitución de la República del Ecuador*. Recuperado el 2017, de http://www.asambleanacional.gov.ec/documentos/constitucion_de_bolsillo.pdf
- Registro Oficial. (2008). <https://www.gob.ec/sites/default/files/regulations/2020-06/CONSTITUCION%202008.pdf>. Obtenido de <https://www.gob.ec/sites/default/files/regulations/2020-06/CONSTITUCION%202008.pdf>
- Registro Oficial. (2017). *revistajuridicaonline.com*. Obtenido de *Ley Orgánica de Defensa del Consumidor*: <https://www.revistajuridicaonline.com/2002/02/vacos-legales-en-la-ley-orgnica-de-defensa-del-consumidor/#:~:text=La%20Ley%20Org%C3%A1nica%20de%20Defensa%20del%20>

Consumidor%20tiene,usuario%20en%20el%20quehacer%20diario%20de%20sus%20a
ctividades.

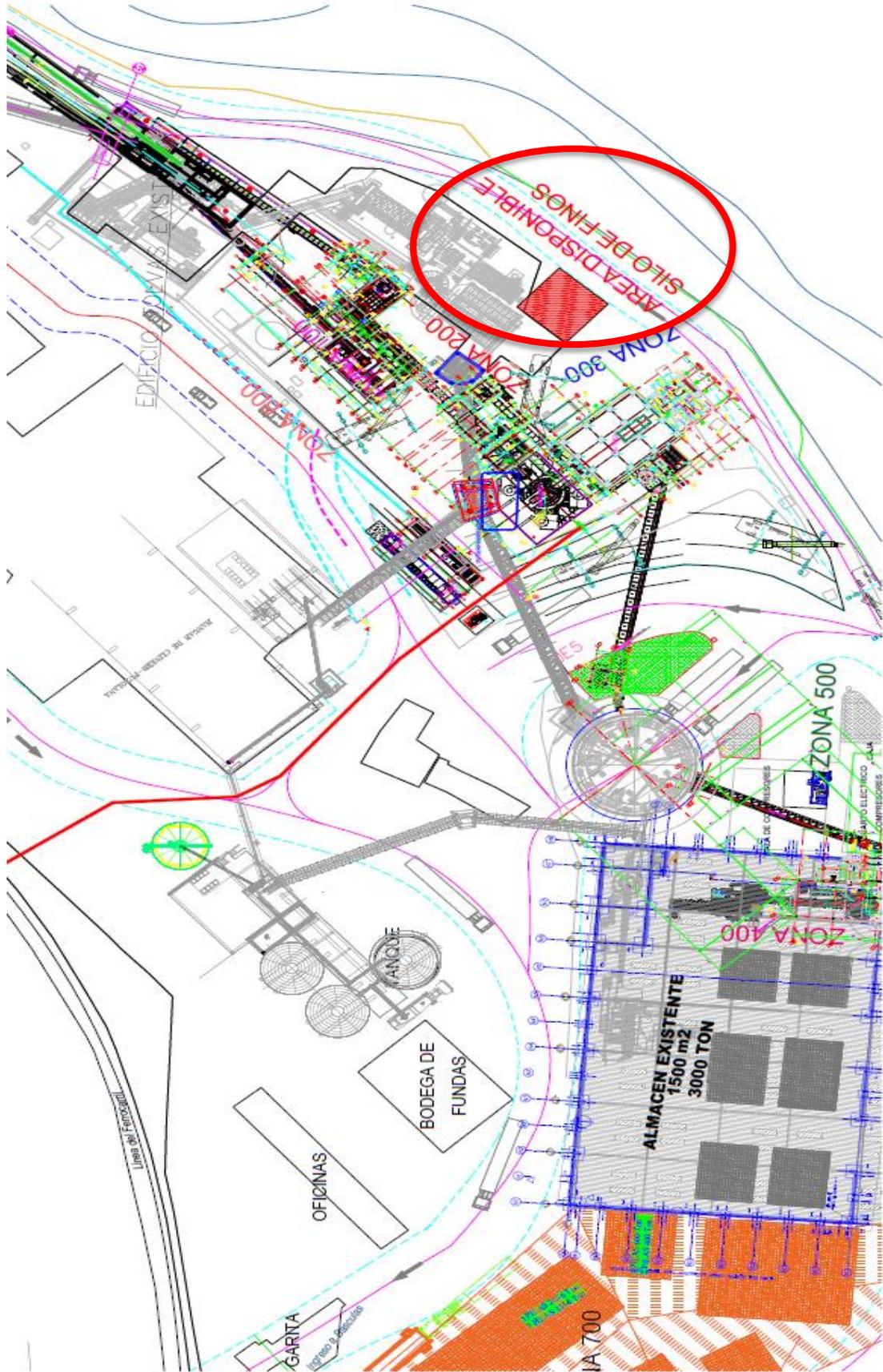
- Registro Oficial. (2022). *competencias.gob.ec*. (2. Registro Oficial 418, Editor) Obtenido de Ley de Gestión Ambiental del Ecuador: <http://www2.competencias.gob.ec/wp-content/uploads/2021/03/02-05NOR2004-LEY-1.pdf>
- Rivera , J., & Arellano , R. (2000). *Conducta del consumidor: Estrategias y Prácticas aplicadas al marketing*. México: ESIC.
- Rivera, B. (2018). *Cultura organizacional y desempeño laboral en la Municipalidad Distrital de Santa María del Valle - 2018*. [Tesis de Pregrado, Universidad César Vallejo]. Repositorio Institucional UCV. Obtenido de https://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12692/29390/benacio_re.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Rodríguez, G. (2021). *repositorio.uta.edu.ec*. (UTA, Editor) Obtenido de Efectos de la zeolita como material suplementario del cemento Portland en la resistencia a la compresión del concreto estructural: <https://repositorio.uta.edu.ec/bitstream/123456789/33535/1/Tesis%20I.%20C.%201517%20-%20Rodriguez%20Villavicencio%20Gonzalo%20David.pdf>
- SENPLADES. (2020). <https://www.gob.ec/regulaciones/plan-nacional-desarrollo>. Obtenido de <https://www.gob.ec/regulaciones/plan-nacional-desarrollo>
- Tomala, A. V. (2016). *Diseño de modelo de gestión por procesos para el control*. Guayaquil: Universidad de Guayaquil.
- UCEM. (2020). *emis.com*. (UCEM, Editor) Obtenido de Union Cementera Nacional Ucem: https://www.emis.com/php/company-profile/EC/Union_Cementera_Nacional_Ucem_SA_es_4133780.html
- Vidal, G. (s.f.). *GESTION Integral de las cenizas generadas por la utilización del coque de petróleo*. Chile: EULA-CHILE.
- Webinar. (2021). <https://www.rdstation.com>. Recuperado el 2021, de <https://www.rdstation.com>
- Yanay, R., & Sánchez, S. (2017). *Análisis de ecoeficiencia de la producción de cementos de bajo carbono mediante la sustitución de clinker* (Vol. 44). Villa Clara: Yaiet Albornos Carvajal.
- Yanay, R., Dominguez, E., Sánchez, S., & Castillo, L. (06 de 2017). *researchgate.net/publication*. Obtenido de Análisis de ecoeficiencia de la producción de cementos de bajo carbono mediante la sustitución de clinker: [https://www.researchgate.net/publication/321833759_Análisis de ecoeficiencia de la producción de cementos de bajo carbono mediante la sustitución de clinker](https://www.researchgate.net/publication/321833759_Análisis_de_ecoeficiencia_de_la_producción_de_cementos_de_bajo_carbono_mediante_la_sustitución_de_clinker)
- Yanay, R., Sánchez, S., Castillo, L., Martirena, J., Suppen, N., Rosa, & Elena. (2017). *scielo.sld.cu*. (Scielo, Editor) Obtenido de Análisis de ecoeficiencia de la producción de

cementos de bajo carbono mediante la sustitución de clinker:
http://www.scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2223-48612017000200009

- Yanchaguano, D. (2021). *repositorio.uta.edu.ec*. (UTA, Editor) Obtenido de Análisis de aluminio silicatos como material de sustitución parcial del cemento tipo GU en la construcción:
<https://repositorio.uta.edu.ec/bitstream/123456789/32167/1/Tesis%20I.%20C.%201443%20-%20Yanchaguano%20Toapanta%20Doris%20Ver%C3%B3nica.pdf>
- Yanez Valdes, L. (2019). *Tecnologías de mejoramiento de la ceniza volante con altos contenidos de carbón y sus beneficios*. Santiago.

ANEXOS

ANEXO A: UBICACIÓN DEL SISTEMA DE ADICIÓN DE CENIZAS VOLANTES



ANEXO B: LAYOUT DEL SISTEMA DE ADICIÓN DE CENIZAS VOLANTES EN MOLINO CM4

