



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE ESTUDIO SUPERIORES CUAUTITLÁN**

Propuesta de diseño de una industria cementera

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERA QUÍMICA

PRESENTA:

ITZEL BONILLA OROZCO

ASESOR: I.Q. María Elena Quiroz Macías

CUAUTITLÁN IZCALLI, ESTADO DE MÉXICO, 2019



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLÁN
SECRETARÍA GENERAL
DEPARTAMENTO DE EXÁMENES PROFESIONALES

UNAM
FACULTAD DE ESTUDIOS
SUPERIORES CUAUTITLÁN
ASUNTO: VOTO APROBATORIO

M. en C. JORGE ALFREDO CUÉLLAR ORDAZ
DIRECTOR DE LA FES CUAUTITLÁN
PRESENTE

ATN: I.A. LAURA MARGARITA CORTAZAR FIGUEROA
Jefa del Departamento de Exámenes Profesionales
de la FES Cuautitlán.

Con base en el Reglamento General de Exámenes, y la Dirección de la Facultad, nos permitimos comunicar a usted que revisamos el: Trabajo de Tesis

Propuesta de diseño de una industria cementera.

Que presenta la pasante: Itzel Bonilla Orozco

Con número de cuenta: 413085674 para obtener el Título de la carrera: Ingeniería Química

Considerando que dicho trabajo reúne los requisitos necesarios para ser discutido en el EXAMEN PROFESIONAL correspondiente, otorgamos nuestro VOTO APROBATORIO.

ATENTAMENTE

"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"

Cuautitlán Izcalli, Méx. a 27 de Septiembre de 2018.

PROFESORES QUE INTEGRAN EL JURADO

	NOMBRE	FIRMA
PRESIDENTE	Dr. Ricardo Paramont Hernández García	
VOCAL	I.Q. Carlos Orozco Hernández	
SECRETARIO	I.Q. María Elena Quiroz Macías	
1er. SUPLENTE	Dra. Abigail Martínez Estrada	
2do. SUPLENTE	Dra. Francisca Alicia Rodríguez Pérez	

NOTA: los sinodales suplentes están obligados a presentarse el día y hora del Examen Profesional (art. 127).

LMCF/cga*

Agradecimientos

A mis padres

No existen palabras suficientes para plasmar lo importante que fueron en este camino, porque gracias a su apoyo incondicional he alcanzado una de mis más grandes metas, meta la cual ustedes me inculcaron toda la vida, culminar mi etapa educativa lo logre por todos los sacrificios que realizaron por mí y por toda la fuerza que siempre recibí de ustedes. Gracias por la educación que me dieron ya que debido a eso me he convertido en la persona que soy, gracias porque siempre han estado a mi lado para superar todas las adversidades. No me queda más que estar eternamente agradecida ya que no hay manera de pagarles su tiempo, amor y atenciones que tienen conmigo. Los amo y los amaré toda mi vida. Gracias, lo logramos.

A mi hermana

Gracias porque en ti siempre encuentro una amiga, una cómplice y un apoyo, porque siempre me motivas a hacer las cosas bien. Cuando todo se pintaba de color gris y quería darme por vencida aparecías tú en mis pensamientos para así tener fuerzas y seguir adelante para poder ser un buen ejemplo para ti. Doy gracias a la vida por darme una hermana como tú, te amo con todo mi corazón.

A mi mejor amiga

Mich, pasaron cuatro semestres para poder conocernos pero es de lo mejor que me paso, vivimos momentos muy buenos y algunos no tanto pero jamás dejamos de sonreír, gracias por hacer el camino más divertido en el transcurso de la carrera. Desde esconder “atrapamoscas”, de romper vasos de precipitado a romper el termómetro que nos dijeron que era intocable. Gorda gracias por estar ahí, te quiero mucho.

A mis profesores

A todos y cada uno de ellos les doy las gracias porque fueron una parte importante en mi formación académica porque cada uno me transmitió amor a la carrera. Agradecer en especial a mi asesora de tesis la ingeniera María Elena por guiarme en la realización de este trabajo y apoyarme siempre que lo necesite.

Índice

Introducción

Objetivos

 General

 Particular

Capítulo 1

Página

1.1 Historia del cemento	4
1.2 Bases de diseño	5
1.2.1 Tipo de operación unitaria	5
1.2.2 Capacidad de la planta	5
1.2.3 Materias primas para la fabricación de cemento.....	6
1.2.4 Propiedades físicas y químicas de la materia prima.....	7
1.2.5 Clasificación del cemento	9
1.2.6 Propiedades del producto	11
1.2.7 Servicios Auxiliares	17
1.2.7.1 Agua	17
1.2.7.2 Aire.....	18
1.2.7.3 Energía eléctrica.....	19
1.2.7.4 Combustible	19
1.2.8 Basura y Efluentes. Normas para tratamiento.....	20
1.2.9 Proceso de elaboración del cemento	25
1.3 Química del cemento	30
1.3.1 Transformaciones del crudo en el horno rotatorio	30
1.3.2 Fórmulas de Bogue	32
1.3.3 Características de los componentes del clínker.....	33
1.3.4 Módulos del cemento	34

1.3.5 Cálculo de la composición del crudo	37
1.4 Balance de materia y energía en el horno rotatorio	46
1.4.1 Balance de materia	47
1.4.2 Balance de energía	54
1.5 Balance general de materia	60
1.6 Diagrama de flujo de proceso	61
Capítulo 2	
2.1 Ubicación de la planta.....	62
2.2 Listado de áreas.....	64
2.3 Justificación de áreas	65
2.4 Superficie de áreas	70
2.5 Diagrama de distribución de áreas	72
Capítulo 3	
3.1 Listado de equipo.....	74
3.2 Hojas de especificación de equipos propuestos	75
3.3 Diagrama de distribución de equipo	87
Capítulo 4	
4.1 Potencia necesaria para iluminar cada zona de la planta	88
4.2 Potencia de motores	98
4.3 Elección de transformador	99
4.4 Cálculo de diámetro de tubería conduit	102
4.5 Elección se subestación.....	108
4.6 Diagrama Unifilar	112
Conclusiones.....	113
Bibliografía.....	115

Introducción

El cemento es un material inorgánico finamente pulverizado, que al agregarle agua, ya sea sólo o mezclado con arena, grava u otros materiales similares, tiene la propiedad de fraguar y endurecer, incluso bajo el agua, en virtud de reacciones químicas durante la hidratación y que, una vez endurecido, conserva su resistencia y estabilidad. Cuando el cemento es mezclado con agua y arena forma mortero. (NOM-040-ECOL-2002, 2002)

México es uno de los 15 productores más importantes de cemento en el mundo, gracias a las continuas inversiones de tecnología y equipamiento, la constante capacitación de personal y la permanente incorporación de medidas de seguridad en los procesos, equipos y operaciones que llevan a cabo las empresas del ramo; el medio ambiente también ha sido punto de interés de la industria cementera, en 1996 se formaliza el compromiso ante la Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) de realizar una disminución y reciclaje energético de residuos, además se han aplicado tecnologías para reducir emisiones apegándose a las recomendaciones establecidas en el protocolo de Kioto. La industria del cemento está certificada como “Industria Limpia” por la Procuraduría Federal de Protección al Ambiente (PROFEPA). La importancia de la industria cementera en el sector de la construcción radica en que el cemento, junto con el concreto representan insumos indispensables en la construcción de obras privadas y públicas, por lo que el papel de la industria cementera es esencial para la actividad económica, por su función como materia prima de la construcción y por la derrama económica que ejerce sobre otras industrias.” (Garza y Arteaga, 2011, p. 76)

La industria en México la conforman 6 empresas que cuentan con 37 plantas en el territorio nacional, las cuales se muestran en la tabla 1:

Tabla 1
Distribución de plantas por empresas cementeras

Empresa	Número de plantas
CEMEX	17
Holcim México	7
CYCNA	4
Cementos Moctezuma	3
GCC Cemento	3
Cementos Fortaleza	3

Nota: Fuente: Cámara Nacional del Cemento (CANACEM). (2017). *Estadísticas*, México: Recuperado de: <http://www.canacem.org.mx/>

Según diversos estudios, Cemex controla casi el 50% de la producción nacional, Lafarge-Holcim un 20%, Cruz Azul un 17% y las demás se disputan el resto del mercado interno.

El cemento se puede comercializar en saco o a granel, en México el 73% del producto es comercializado en sacos, el motivo es que la mayor parte de los consumidores de cemento son los consumidores de vivienda, las grandes y algunas desarrolladoras medianas compran a granel; el menudeo obliga a tener una infraestructura de empaquetado, pero también implica su distribución desde las 35 plantas de cemento que hay en México hasta los más de 30000 puntos de venta en toda la República, el costo de distribución es casi igual al de producción. (Cámara Nacional del Cemento [CANACEM], 2017)

Objetivos

General

Proponer el diseño de una planta cementera para la producción de 500000 toneladas anuales de cemento tipo CPO (Cemento Portland Ordinario).

Particular

- Realizar el diseño de la industria cementera en base a lo estipulado en las normas mexicanas.
- Mediante el cálculo de las cantidades de materia prima, elaborar los balances de materia y energía en el proceso de calcinación.
- Definir las áreas que son necesarias en esta industria, además de la ubicación que tendrá la planta cementera.
- Proponer los equipos y la subestación que se adecue a las necesidades de la producción.

Capítulo 1

1.1 Historia del Cemento

El uso de materiales de cementación es muy antiguo, los egipcios utilizaban yeso calcinado impuro, los griegos y los romanos empleaban al principio caliza calcinada que es un tipo de roca sedimentaria constituida principalmente por carbonato de calcio. Posteriormente, se hicieron mezclas de cal con agua, arena y piedra triturada o ladrillo y tejas quebradas; este fue el primer concreto de la historia. Los griegos empleaban la cal mezclándola con arena lo que los llevó a descubrir que ciertas arenas de origen volcánico, molidas y mezcladas con la cal producían morteros, para esto empleaban una piedra volcánica que llamaban la Tierra de Santorín en recuerdo a la isla en la cual fue descubierta. Cuando los romanos conquistaron a los griegos, estos últimos les transmitieron el conocimiento que tenían sobre los morteros. Los romanos descubrieron una arena volcánica de color rojo en un lugar llamado Puzzoli, dicha arena la llamaron puzolana, la cual contiene sílice y alúmina que se combinan con la cal para formar un cementante que endurece bajo el agua, es decir, una cal hidratada. A principios del siglo XIX las investigaciones del ingeniero francés J.L. Vicant y el constructor inglés J. Aspdin conducen al descubrimiento de un cemento mejorado al que se llamó “Cemento Portland” porque se asemeja a una piedra gris oscura que se encuentra en la isla de Portland, Inglaterra. La elaboración de este cemento consistía en calcinar una mezcla de arcilla finamente triturada y caliza dura hasta eliminar el dióxido de carbono; la temperatura de calcinación era mucho más baja de la necesaria para la formación de clínker, material principal con el que actualmente se elabora el cemento. El prototipo del cemento moderno fue obtenido en 1845 por Isaac Johnson quien calcinó una mezcla de arcilla y caliza hasta lograr la formación del clínker. En el siglo XX situamos el auge

de la industria del cemento, debido a los experimentos de los químicos franceses Vicat y Le'Chatelier y el alemán Michaélis, que logran cemento de calidad homogénea. (Vidaud, 2013)

1.2 Bases de diseño

1.2.1 Tipo de operación unitaria

La operación unitaria base del proceso de producción de cemento es la calcinación ya que es la parte del proceso en la cual además de existir una transformación física existe una transformación química, la cual es crucial para las características del producto terminado.

1.2.2 Capacidad de la planta

Considerando el número de plantas en México, las cuales son 35 y los datos estadísticos de la tabla 2, se puede observar que en promedio las plantas de cemento producen alrededor de un millón de toneladas anualmente.

Tabla 2
Producción y consumo de cemento

Año	Producción (Millones de ton)	Consumo Nacional (Millones de ton)	Habitantes	Kg/Habitante
2009	35.1	34.7	107,550,697	323
2010	34.5	33.1	114,255,555	298
2011	35.4	34.9	115,682,868	302
2012	36.2	35.5	117,053,750	303
2013	34.6	33.7	118,395,054	284
2014	36.6	35.9	119,713,203	301
2015	39.6	39.1	121,005,815	323
2016	40.6	40.1	122,273,473	327

Nota: Fuente: Cámara Nacional del Cemento (CANACEM). (2017). *Producción y consumo*, México: Recuperado de: <http://www.canacem.org.mx/cemento-3/produccion-y-consumo/>

Las bases de diseño que se mostrarán a continuación, son en referencia a una producción de 500000 toneladas anuales.

Por lo tanto al día será:

$$500000 \frac{\text{ton cemento}}{1 \text{ año}} \times \frac{1 \text{ año}}{365 \text{ días}} = 1369.86 \frac{\text{ton cemento}}{\text{día}}$$

Haciendo el cálculo de las toneladas de cemento que se tienen que obtener por hora:

$$1369.86 \frac{\text{ton cemento}}{\text{día}} \times \frac{1 \text{ día}}{24 \text{ h}} = 57.08 \frac{\text{ton cemento}}{\text{h}}$$

1.2.3 Materias primas para la fabricación del cemento

Las materias primas que se utilizan en el procesamiento del cemento según Duda (1977), son:

- Un componente calcáreo (caliza), el cual contiene en su mayor parte carbonato de calcio (CaCO_3), cuyo contenido es preferible que se encuentre en un valor entre 80 y 85% debido a que de ese modo se facilita el molido y la homogenización.
- Un componente arcilloso (arcilla), el cual debe contener materiales como óxido de silicio, aluminio y hierro.
- Correctivos, que son compuestos de alta concentración, los cuales se colocan debido a que las materias principales (arcillas y calizas) no lo contienen en una cantidad suficiente.
- Aditivos, que son añadidos para dar al producto final ciertas características deseables en estos.
 - Regulador de fraguado: Yeso natural o químico

- Adiciones puzolánicas o cementantes: Puzolanas naturales, escoria de alto horno, cenizas volantes, humo de sílice.

Se le nombra clínker al material resultante de la calcinación de la caliza y de la arcilla, el cual suele tener una composición con respecto a óxido como se muestra en la tabla 3:

Tabla 3
Composición de óxidos en el clínker

Óxidos	% en peso
Óxido de calcio	58-67
Óxido de silicio	16-26
Óxido de aluminio	4-8
Óxido de hierro	2-5

Nota: Fuente: Duda, W.H. (1977). *Manual Tecnológico del Cemento* (p.5). Barcelona, España: Editores Técnicos Asociados.

Esta proporción se obtiene al mezclar en las proporciones adecuadas las materias primas antes mencionadas.

1.2.4 Propiedades físicas y químicas de la materia prima

Caliza

El carbonato de calcio (CaCO_3) abunda en la naturaleza, para fabricar cemento portland es adecuado el procedente de todas las formaciones geológicas. Las formas más puras de la caliza son el espato de calcio (calcita) y el aragonito. El espato de calcio cristaliza en el sistema

hexagonal y el aragonito, en el rómbico. El peso específico del espato de calcio es 2.70 y el del aragonito 2.95. Las formas más comunes del carbonato cálcico están constituidas por la caliza y la Creta, la caliza posee, por lo general, estructura cristalina de grano fino. La dureza de la caliza viene determinada por su edad geológica, cuanto más antigua es la formación tanto más dura suele ser la caliza. La dureza de la caliza está comprendida entre 1.8 y 3.0 de la escala de Mohs; su peso específico varía de 2.6 a 2.8, además solamente los yacimiento de caliza muy pura son de color blanco. (Duda, 1977, p.1)

Arcilla

La segunda materia prima importante para la fabricación de cemento es la arcilla. La arcilla, en esencia, es un producto de meteorización de silicatos de los metales alcalinos y alcalinotérreos. La parte principal de las arcillas está formada por hidrosilicatos de alúmina. Las arcillas se clasifican en los siguientes grupos de minerales:

- Grupo del caolín
- Grupo de la montmorillonita
- Grupo de las arcillas que contienen metales alcalinos o alcalinotérreos.

El punto de fusión de las arcillas se halla entre los límites de 1150°C hasta 1785°C. La composición química de las arcillas varía desde aquellas que se aproximan a los minerales puros de la arcilla hasta las que contienen agregados de hidróxido de hierro, sulfuro de hierro, arena, carbonato de calcio, etc. El hidróxido de hierro es el componente colorante más frecuente de las arcillas. También pueden prestarle distintas coloraciones a las sustancias orgánicas. La arcilla sin

impurezas es blanca; la principal fuente de álcalis en los cementos es el componente arcilloso del crudo. (Duda, 1977, p.2)

1.2.5 Clasificación del cemento

Los cementos Portland se clasifican de acuerdo a la Norma Oficial Mexicana NMX-C-414-ONNCCE-2010 “Industria de la construcción. Cementos hidráulicos. Especificaciones y métodos de prueba”

Por su composición

Tipo CPO (cemento Portland ordinario). Producido mediante la molienda del clínker Portland y sulfato de calcio.

Tipo CPP (cemento Portland puzolánico). El que resulta de la molienda conjunta del clínker Portland, puzolanas y sulfato de calcio.

Tipo CPEG (cemento Portland con escoria granulada de alto horno). Producido mediante la molienda conjunta del clínker Portland, escoria granulada de alto horno y sulfato de calcio.

Tipo CPC (cemento Portland compuesto). El que se obtiene de la molienda conjunta del clínker Portland, puzolanas, escoria de alto horno, caliza y sulfato de calcio. En este tipo de cemento la caliza puede ser el único componente adicional al clínker Portland con el sulfato de calcio.

Tipo CPS (cemento Portland con humo de sílice). EL que resulta de la molienda conjunta del clinker Portland, humo de sílice y sulfato de calcio.

Tipo CEG (cemento con escoria granulada de alto horno). EL producido mediante la molienda conjunta de clinker Portland sulfato de calcio y mayoritariamente escoria granulada de alto horno.

Por su resistencia a la compresión

Las resistencias mecánicas a la compresión, inicial y normal de cualquier tipo de cemento Portland, serán las indicadas en la tabla 4:

Tabla 4
Resistencia a la compresión

Clase resistente	Resistencia a la compresión (MPa)		
	A 3 días ^[1]	A 28 días ^[2]	
	Mínimo	Mínimo	Máximo
20	--	20	40
30	--	30	50
30R	20	30	50
40	--	40	--
40R	30	40	--

Nota: [1] Corresponde a la resistencia inicial del cemento. [2] Corresponde a la resistencia normal del cemento.
Tomada de NMX-C-ONNCE-2010

Según sus características especiales

Los cementos Portland pueden presentar una o más de las características especiales que se indican en la tabla 5.

Tabla 5
Características especiales de los cementos Portland

Característica especial	Nomenclatura
Resistencia a los sulfatos	RS
Baja reactividad álcali-agregado	BRA
Bajo calor de hidratación	BCH
Blanco	B

Nota: Tomada de NMX-C-ONNCE-2010

Si se indica CPO 30 RS, se trata de un cemento Portland ordinario con una resistencia normal mínima de 30 MPa y que sea resistente a los sulfatos.

1.2.6 Propiedades del producto.

Los cementos Portland cumplirán con los requerimientos de calidad que se mencionan de acuerdo a la Norma Oficial Mexicana NMX-C-414-ONNCCCE-2010 “Industria de la construcción. Cementos hidráulicos. Especificaciones y métodos de prueba”.

- **Composición del cemento**

La composición de los diferentes tipos de cemento Portland estará comprendida dentro de los límites que se establecen en la tabla 6:

Tabla 6
Composición del cemento

Cemento Portland		Clinker Portland + Sulfato de calcio	Componentes principales				Compo nentes minorit ario
Tipo	Denominación		Puzo- lanas	Escoria granula do de alto horno	Humo de sílice	Caliza	
CPO	Cemento portland ordinario	95-100	---	--	--	--	0-5
CPP	Cemento portland puzolánico	50-94	6-50	--	--	--	0-5
CPEG	Cemento portland con escoria granulada de alto horno	40-95	--	6-60	--	--	0-5
CPC	Cemento portland compuesto	50-94	6-35	6-35	6-35	6-35	0-5
CPS	Cemento portland con humo de sílice	90-99	--	--	--	--	0-5
CEG	Cemento portland con escoria granulada de alto horno	20-39	--	61-80	--	--	0-5

Nota: El contenido de carbonato de calcio (CaCO_3) en la caliza que se utilice como componente principal del cemento Portland compuesto (CPC), determinado mediante cualquier método de análisis convencional, será como mínimo de setenta y cinco (75) por ciento en masa. Tomada de NMX-C-ONNCCE-2010

- **Requisitos físicos**

Tiempo de fraguado: Para cualquier tipo de cemento Portland y todas las clases resistentes, los tiempos de fraguado inicial y final serán como mínimo 45 y 600 minutos respectivamente.

Estabilidad de volumen: Para cualquier tipo de cemento Portland y todas las clases resistentes, la expansión y la contracción serán como máximo de cero punto ocho (0.8) por ciento y cero punto dos (0.2) por ciento, respectivamente.

Actividad puzolánica: Para los componentes principales, el índice de actividad determinado de cemento Portland ordinario CPO 30, a veintiocho (28) días, será como mínimo de setenta y cinco (75) por ciento con las adiciones de puzolanas o de escoria granulada de alto horno y de cien (100) por ciento con las adicionales de humo de sílice.

Expansión por ataque de sulfatos: La expansión por ataque de sulfatos en los cementos Portland de cualquier tipo y clase resistente, con la característica especial RS (resistente a los sulfatos) será como máximo de cero punto cero cinco (0.05) por ciento a seis (6) meses y de cero punto uno (0.1) por ciento a un (1) año.

Expansión por reacción álcali-agregado: La expansión por reacción álcali-agregado en los cementos Portland de cualquier tipo y clase resistente, con la característica especial BRA (baja reactividad álcali-agregado) será como máximo de cero punto cero dos (0.02) por ciento a catorce (14) días y de cero punto cero seis (0.06) por ciento a veintiocho (28) días.

Calor de hidratación: El calor de hidratación de los cementos Portland de cualquier tipo y clase resistente, con la característica especial BCH (bajo calor de hidratación) será como máximo de doscientos cincuenta (250) y de doscientos noventa (290) kilojoules por kilogramo, a siete (7) y veintiocho (28) días.

Blancura: La blancura de los cementos Portland de cualquier tipo y clase resistente, con la característica especial B (blanco) será como mínimo de setenta (70) por ciento.

- **Envase y etiquetado**

Si el cemento se provee en sacos, estos mostrarán, clara e indeleblemente:

- ✓ El nombre o denominación genérica del producto.
- ✓ La marca registrada.
- ✓ La razón social y el domicilio fiscal del fabricante.
- ✓ El nombre y la ubicación de la planta productora.
- ✓ La designación normalizada.
- ✓ El contenido en kilogramos.
- ✓ La tolerancia del contenido neto.
- ✓ La leyenda “HECHO EN MÉXICO”.

Si el cemento Portland se provee a granel o en envases de cualquier naturaleza cuyos contenidos pueden variar, en la factura o remisión correspondiente se asentará la información anterior, indicando la cantidad suministrada en kilogramos o toneladas, según convenga.

- **Transporte y almacenamiento de cementos Portland**

Con el propósito de evitar la alteración de las propiedades de los cementos Portland antes de su utilización en la obra, ha de tenerse cuidado en su transporte y almacenamiento, atendiendo los siguientes aspectos:

Transporte

- ✓ Los cementos Portland envasados en sacos se transportarán, desde el lugar de adquisición hasta el de almacenamiento, por lotes separados, en vehículos con cajas cerradas o protegidos con lonas u otras cubiertas impermeables que los protejan de la humedad ambiente o la lluvia. Los sacos se estibarán de manera que no se muevan o dañen durante su transporte.
- ✓ Cuando el cemento Portland se suministre a granel, se transportará en camiones-tolvas, carros-tolvas de ferrocarril o de buques-tolvas, que sean herméticos y tengan tapas adecuadas para evitar fugas y contaminaciones. La carga del cemento en un mismo lote se hará en un solo día y de forma continua.
- ✓ Antes de cargar cemento Portland suministrado a granel, los vehículos deben de ser limpiados cuidadosamente, eliminando residuos de productos transportados anteriormente, grasas, polvo o cualquier otra sustancia que lo pueda contaminar. Una vez cargado el cemento, las tapas y válvulas de la tolva se sellarán de forma inviolable. Los sellos se retirarán en el momento de la descarga del cemento en el almacenamiento. No se aceptará el material en el caso de que los sellos hayan sido violados.

Almacenamiento

- ✓ Los cementos Portland de cualquier tipo, que sean de la clase resistente 20, no permanecerán almacenado por más de tres (3) meses.
- ✓ Los cementos Portland de cualquier tipo, que sean de las clases resistente 30. 30R, 40 y 40R, no permanecerán almacenados por más de dos (2) meses, salvo que se trate de

cemento tipo CPO de las clases resistentes 40 y 40R, que no permanecerá almacenado por más de (1) mes.

- ✓ Cuando un cemento Portland, de cualquier tipo y de clase resistente, permanezca almacenado por más tiempo que el señalado anteriormente, se comprobará dentro de los (30) días anteriores a su empleo, que sus características sigan siendo las adecuadas.
- ✓ Ningún tipo de cemento llegará excesivamente caliente a la obra. Si su manipulación se realiza por medio mecánicos, su temperatura no debe de ser mayor de setenta (70) grados Celsius, y si se realiza a mano, no debe de exceder del mayor de los dos límites siguientes: cuarenta (40) grados Celsius o de la temperatura ambiente más cinco (5) grados Celsius.

Cuándo el suministro de cemento es en sacos, para su almacenamiento se considerará lo siguiente:

- ✓ El cemento se entregará y almacenará hasta su utilización en la obra, en los mismos envases cerrados en los que fue expedido.
- ✓ El lugar de almacenamiento será un sitio ventilado y bajo cubierta, que reúna las condiciones necesarias para evitar que se alteren las propiedades del cemento.
- ✓ El almacenamiento se hará en lotes por separado, acomodado de forma que se permita el fácil acceso para la inspección, identificación y muestreo de cada uno.
- ✓ Si el suministro del cemento se realiza a granel, el almacenamiento se llevará a cabo en tolvas, silos o recipientes que lo aíslen de la humedad.

1.2.7 Servicios Auxiliares

1.2.7.1 Agua

- **Estimación de las cantidades necesarias.**

Las necesidades de agua en una fábrica de cemento dependen en gran medida del método de producción y de la maquinaria usada. También dependen, pero menos, de las dimensiones de la fábrica. Las disposiciones para el suministro suelen someterse, cuantitativamente y cualitativamente, a las necesidades. Para la planificación de un suministro de agua el primer paso debe consistir, normalmente, en la estimación de la cantidad de agua necesaria. (Labahn, 1985, p. 922)

Comprende:

- a) Agua de servicio, por ejemplo, agua no potable para usos industriales, usada muy particularmente para enfriamiento.
- b) Agua potable, para beber.
- c) Agua de reposición, para compensar las pérdidas por fugas y evaporación.

La cantidad de agua necesaria es variable en función de las condiciones locales y del método de producción. En el caso de fabricación de cemento por vía seca, puede servir de guía los valores de la tabla 7:

Tabla 7

Valores aproximando de las necesidades de agua

Capacidad de producción	ton de clínker/día	800	1000	2000	3000
Agua de servicios	aprox. m ³ /h	14	18	30	40
Agua para beber	aprox. m ³ /h	5	5	5	5
Total agua	aprox. m ³ /h	19	23	35	45
Consumo diario	aprox. m ³ /día	456	552	840	1080

Nota: Labahn, O. (1985). *Prontuario del Cemento*. Barcelona, España: Editores Técnicos Asociados.

1.2.7.2 Aire

Aire de proceso

Se utiliza en el proceso de calcinación para llevar a cabo los flujos dentro del horno. El aire primario es usado para la combustión y entra al sistema a una temperatura de 26 °C, y el aire de enfriamiento es utilizado para enfriar el clínker para su almacenamiento entrando a una temperatura de 15 °C.

Aire comprimido

El aire comprimido se utiliza para una amplia gama de propósitos en la industria cementeras: por ejemplo, se utiliza para la conducción de taladros neumáticos y otras herramientas para trabajos de reparación y mantenimiento, para el enfriamiento de ciertos instrumentos de medición. Es conveniente proporcionar una instalación central del compresor conectada a las diversas secciones del consumidor. Se recomienda que los compresores deban estar situados en cerca de los talleres. En Labahn (1985) se recomienda una instalación de compresor central para una producción de 3000 t/día.

- 2 compresores, cada uno con una capacidad efectiva de entrega de aproximadamente 16 m³/minuto a una presión de funcionamiento normal de 7.0 bar.
- 1 receptor de aire comprimido, 8000 litros de capacidad, a una presión de trabajo de 10 bar y una presión de diseño de 13 bar, temperatura de operación de 120°C.

Se lleva a cabo la elección de un sistema igual al mencionado anteriormente.

1.2.7.3 Energía eléctrica

La energía es uno de los servicios auxiliares principales para el funcionamiento de la planta, es necesaria para el funcionamiento de los equipos así como para la iluminación de la planta y funcionamiento de aparatos eléctricos. El voltaje que usarán todos los equipos es de 220 V y el de las instalaciones así como iluminación será de 120 V. En el capítulo 4 se muestran los cálculos necesarios de la subestación que va a instalar.

1.2.7.4 Combustible

En cuanto a su estado de agregación los combustibles se clasifican en sólidos, líquidos y gaseosos. En estos tres estados tienen aplicación en la industria del cemento. Entre los combustibles sólidos se halla el carbón de hulla, coque. De los combustibles líquidos se emplean, ante todo, los distintos tipos de fuel. De los combustibles gaseosos, en la industria del cemento la mayoría de veces se usa el gas natural. (Duda, 1977, p.173)

De acuerdo a la Norma Oficial Mexicana NOM-040-SEMARNAT-2002 “Protección Ambiental- Fabricación de Cemento- Niveles Máximos de Emisión a la atmósfera”, los combustibles usados en la industria cementera se clasifican en:

Combustible convencional. Son los combustibles fósiles como el gas natural y el carbón mineral, los derivados del petróleo como gas licuado de petróleo (gas LP), gasóleo, diesel, combustóleo y coque de petróleo.

Combustible formulado. Combustible derivado de una mezcla controlada de varias corrientes y residuos, líquidos o sólidos, incluyendo residuos peligrosos, con poder calorífico susceptible de ser recuperado y que es elaborado por una planta formuladora autorizada.

Combustible de recuperación. Aquellos materiales o residuos con poder calorífico superior a los 15 (MJ/kg), clasificados por la normatividad ambiental vigente como no peligrosos.

En el horno rotatorio se utilizará combustible convencional específicamente gas natural, debido a que generalmente representa una gran ventaja para cualquier proceso industrial debido a su facilidad de manejo, limpieza y facilidad de combustión. (Percy, 20, p.106). EL gas entrará al sistema en condiciones normales.

1.2.8 Basura y Efluentes. Normas para tratamiento

La producción de cemento genera una serie de impactos ambientales, como lo son: la explotación de canteras, consumos de recursos naturales, impacto debido al transporte de los materiales, generación de residuos sólidos y principalmente la generación de gases en la combustión que van hacia la atmósfera.

Las emisiones de CO₂ en la manufactura del cemento se presentan directamente por la quema de combustibles fósiles y por la calcinación del crudo. Durante el proceso de calcinación la formación de CO₂ se presenta mediante la reacción de descomposición del carbonato de calcio siguiente:



Las emisiones de CO₂ a partir de la producción de clínker son aproximadamente 0.5 kg por kg de clínker producido. La emisión específica de CO₂ por la producción de cemento dependerá de la relación clínker-cemento, la cual varía entre 0.5 y 0.95. La cantidad de dióxido de carbono que es emitido durante el proceso de calcinación es influenciada por el tipo de combustible utilizado. Así entonces, en México se cuenta con organismos relacionados con la protección del medio

ambiente; actualmente se tiene la Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección del Ambiente (LGEEPA), la Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (López, 2013)

En base a la Norma Oficial Mexicana NOM-040-SEMARNAT-2002 “Protección Ambiental- Fabricación de Cemento- Niveles Máximos de Emisión a la atmósfera”, se considera:

- Zonas Críticas (ZC): Se consideran zonas críticas, la Zona Fronteriza Norte, las zonas metropolitanas de Monterrey y Guadalajara; los centros de población de: Coatzacoalcos-Minatitlán, en el Estado de Veracruz; Irapuato-Celaya-Salamanca, en el Estado de Guanajuato; Tula, Vito, Apaxco, en los estados de Hidalgo y de México.
- Zona Fronteriza Norte: Es la franja de cien kilómetros a lo largo de la frontera norte.
- Zona Metropolitana de la Ciudad de Guadalajara (ZMCG): El área integrada por los siguientes municipios del Estado de Jalisco: Guadalajara, Ixtlahuacán del Río, Tlaquepaque, Tonalá, Zapopan y Zapotlanejo.
- Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM): El área integrada por las 16 delegaciones políticas del Distrito Federal y 19 estados del Estado de México.
- Zona Metropolitana de la Ciudad de Monterrey (ZMM).

Los niveles máximos permisibles de emisión de partículas a la atmósfera provenientes de las fuentes fijas dedicadas a la fabricación de cemento que utilicen combustibles convencionales, así como los métodos de medición y la frecuencia de medición son los establecidos en la tabla 9:

Tabla 9*Niveles máximos permisibles de emisiones de partículas*

OPERACIÓN	NIVEL MAXIMO	FRECUENCIA DE MEDICION	METODO DE MEDICIÓN
Trituración ⁽¹⁾	80 mg/m ³	Anual	NMX-AA-010-
Molienda de materia prima ⁽¹⁾	80 mg/m ³		SCFI-2001
Molienda de cemento ⁽¹⁾	80 mg/m ³		
Enfriamiento de clinker ⁽¹⁾	100 mg/m ³		
Calcinación de clinker ⁽²⁾	0.15*C kg de partículas/ton de materia prima alimentada		

Nota: [1] Condiciones normales, base seca, corregido al 7% de oxígeno en volumen.

[2] Si C es la cantidad de material alimentado al horno de calcinación, en toneladas por hora base seca, el nivel máximo o permisible de emisión será 0.15*C (kg/h). Tomada de NOM-040-SEMARNAT-2002

Los niveles máximos permisibles de emisión a la atmósfera de gases provenientes de los hornos de calcinación de clinker que utilicen combustibles convencionales, están establecido en la tabla 10.

Tabla 10*Niveles máximos permisibles de emisiones de gases a la atmósfera*

PARÁMETRO	CEMENTO BLANCO mg/m ³			CEMENTO GRIS mg/m ³			FRECUENCIA DE MEDICIÓN Anual
	ZMCM	ZC	RP	ZMCM	ZC	RP	
Bióxido de azufre	400	2200	2500	400	800	1200	
Óxidos de nitrógeno ⁽²⁾	800	1400	1600	800	1000	1200	
Monóxido de carbono	3000	3500	4000	3000	3500	4000	

Nota: [1] Condiciones normales, base seca, corregido al 7% de oxígeno en volumen. [2] Medido y determinado como óxido de nitrógeno (NO₂). Tomada de NOM-040-SEMARNAT-2002

Todos los equipos de control de partículas no comprendidos en las operaciones industriales de la tabla 9 de la presente Norma Oficial Mexicana están exentos de mediciones, sin embargo, éstos no deben presentar emisiones visibles a la atmósfera.

En caso de falla del equipo de control de emisiones de partículas se deben tomar las siguientes medidas:

- Si se presentan fallas en el equipo de control del proceso de calcinación se debe reducir la alimentación de material hasta su total suspensión en las siguientes cuatro horas posteriores a la falla y, en caso de estar utilizando combustibles no convencionales se debe suspender su alimentación hasta la normalización de la operación.

Para otras operaciones se debe reducir la alimentación de material hasta su total suspensión en la siguiente hora posterior a la falla y reiniciar la alimentación de material hasta que el equipo de control de emisiones este totalmente reparado.

Cuando existan tres o más ductos para la descarga de partículas generadas durante una operación o proceso de fabricación de cemento, se deberá medir el flujo de gases de la totalidad de los ductos y, posteriormente, realizar la medición isocinética de partículas en una tercera parte de los ductos que sea representativa del promedio de flujos medidos. La emisión total del equipo será la que resulte multiplicar la emisión medida promedio por el número total de ductos y no debe rebasar los niveles permisibles establecidos en la tabla 9.

Los responsables técnicos de los procesos de fabricación de cemento referidos a la Norma Oficial Mexicana deben registrar en la bitácora a que se refiere el artículo 17 del Reglamento de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente en materia de Prevención y Control de la Contaminación de la Atmósfera, la siguiente información:

- Para los hornos de calcinación de clínker
 - ✓ La alimentación en promedio horario y totales por día, mes y año.
 - ✓ Paros y reinicio de operaciones con fecha, hora, duración y motivo de los mismos.
 - ✓ Tipo de combustible su consumo por hora, indicando en su caso, el porcentaje de sustitución energética de combustible formulado y/o de recuperación, respecto al combustible convencional.

- Para equipos de control de emisiones a la atmósfera:

- ✓ Fallas y sus causas con tiempo de reparación y puesta en marcha.
- ✓ Registro de mantenimiento preventivo y correctivo efectuado a horno, quemadores y equipos de control de emisiones.
- ✓ Registro de eventos extraordinarios, tales como explosiones, fallas de suministro de corriente eléctrica y todos aquellos que tengan como resultado emisiones imprevistas de contaminantes a la atmósfera.

Los niveles máximos permisibles de emisiones a la atmósfera establecidos en las tablas 9 y 10 de la presente Norma Oficial Mexicana, sólo podrán rebasarse temporalmente en el caso de encendido inicial del equipo de combustión desde condición fría o de recalentamiento del horno por motivos de operación, debiendo registrarse en bitácora la duración y condiciones de la operación.

1.2.9 Proceso de elaboración del cemento

. Para llevar a cabo la elaboración del cemento, las materias primas deben de pasar por los siguientes procesos (Grupo Lafarge-Holcim):

Extracción

Es la primera etapa que se lleva a cabo para la producción del cemento, la cual se realiza a partir de la explotación de canteras. Los periodos de planificación de trabajo en este punto se clasifican de la siguiente manera:

- Largo plazo: 5 años o más

- Mediano plazo: 1 a 5 años

Toma la información del diseño a plan a largo plazo, en la cual se debe de considerar las desviaciones de los planes a corto plazo y anualmente se debe de revisar en función a los movimientos que se tengan.

- Corto plazo: Menor a 1 año

Provee a las plantas de material todos los días considerando al mismo tiempo: cumplir y optimizar las especificaciones de calidad manteniendo está ultima lo más estable posible, sigue los planes estratégicos y de diseño a largo y mediano plazo, también define los sitios de voladuras más apropiados y planea los movimientos de materiales más óptimos, propone la forma de aprovechar al máximo el uso de los equipos móviles y por último la reducción de costos.

Existen diferentes métodos de explotación, los más usados son:

- Tradicional: Perforación, voladuras, carga y acarreo.
- Mecánico: Ripeado y apilado con tractor, excavadora. En este tipo de explotación cuando se tienen depósitos homogéneos y con dureza relativamente baja se pueden usar sistemas de minado continuo.

Trituración

La roca es triturada cuando una fuerza es aplicada con suficiente energía para romper los lazos internos o planos de debilidad que existen en las mismas; los mecanismos utilizados en la reducción de tamaños, son: fricción/roce, impacto/golpe, compresión, cizalla o corte. Un sistema de trituración tiene por objetivo producir mecánicamente las rocas a un tamaño que sea adecuado a las necesidades de los procesos o de los clientes. Los camiones deposita las grandes rocas en la

tritadora, equipo de grandes dimensiones que por compresión reduce el tamaño del material hasta un diámetro aproximado de 1 pulgada.

Prehomogenización

Desde la trituradora, la mezcla de materiales es conducido por medio de bandas transportadoras hasta el patio de prehomogenización es donde se reducen las variaciones de composición química de las materias primas, para que al reaccionar con las etapas posteriores nuestro producto final tenga las características requeridas.

Molienda de crudo

El siguiente paso es llevar los materiales, previamente mezclados, a los molinos en donde se transforman en un polvo finísimo llamado crudo; el objetivo de esta molienda es que el material adquiera un tamaño lo suficientemente pequeño, de manera que las reacciones químicas de cocción que se den en el horno puedan realizarse de la mejor manera. Este material se deposita en grandes cilindros de concretos llamados silos de homogenización y almacenamiento en lo que permanece hasta que va a ser calcinado.

Homogenización

Este paso tiene como finalidad, reducir las variaciones físicas y químicas del material crudo, esto se realiza soplando aire a alta presión en la parte inferior de los silos, a través de lonas especiales, causando un movimiento continuo de la harina en el silo, lo que permite igualar la composición en todo el material almacenado.

Calcinación

. En cuanto a la forma como ingresa el material crudo a un horno rotativo se debe especificar que existen 4 tipos de proceso de fabricación de cemento: por vía húmeda, por vía seca, vía semi-seca y semi-húmeda dependiendo del contenido de humedad que tenga la pasta de crudo.

- Vía húmeda

En el proceso de la molienda ya no solo se alimenta con el crudo, sino que también se lo hará con agua, de manera que esta mezcla (pasta o lechada) tenga una concentración de agua entre 30-40% y esto es lo que es alimentado al horno. Suele ser usado para materias primas de contenido de agua alto.

Algunas veces, debido a la naturaleza de las arcillas que se deslizan con el agua, se debe recurrir a mezcladores.

- Vía seca

En este tipo de proceso se introduce el crudo en forma seca y pulverulenta, pero antes de llegar al horno, este crudo llega a un pre-calentador, donde el material gana calor por un intercambio de calor entre éste y los gases provenientes del horno.

- Vías semi-húmeda y semi-seca

En estos procesos, a la alimentación al horno se añade (en el de vía semi-húmeda) o elimina (en el de vía semi-seca) agua.

El material de alimentación tendrá una humedad cercana a un 15-20% y pasará por un precalentador y antes de que llegue al horno, el agua se habrá evaporado.

Las bases de diseño de esta planta cementera serán en vía seca; por lo tanto el proceso de calcinación se da de la siguiente manera: “la harina cruda es extraída del silo y enviada a la parte superior del precalentador, estructura vertical de gran altura en cuyo interior circulan gases, provenientes de la combustión del horno los cuales, además de secar por completo los materiales, incrementan su temperatura hasta los 850°C justo antes de entrar al horno. El horno es un cilindro de acero forrado en su interior con ladrillo refractario que utiliza como combustible principal el combustóleo, sin embargo también se pueden utilizar combustibles tales como llantas y aditivos derivados de desechos industriales que además de reducir costos de producción nos permite mantener niveles de emisión de gases a la atmósfera muy por debajo de los límites que exigen las autoridades y colaborar activamente en la conservación del medio ambiente. En el interior del horno, el crudo se calienta hasta 1450°C y gracias a este calentamiento, el material se vuelve líquido, reacciona y se forman los compuestos químicos con propiedades constantes. El clínker que sale de este proceso tiene temperaturas altas, razón por la cual luego de salir del horno debe ser rápidamente enfriado.” (López, 2013, p.18)

Molienda de cemento

La molienda de cemento es muy similar a la del crudo. El molino es alimentado con el clínker y otros aditivos minerales como yeso, escoria, ceniza, caliza, puzolanas, etc. Estos aditivos brindan características específicas al producto final, como alargar el tiempo de fraguado. Su proporción dependerá del tipo de cemento que se desee producir.

Despacho

Una vez que el producto sale como producto final del molino, es almacenado en silo para ser despachado en dos formas: a granel o sacos.

- A granel: El cemento se coloca en tolvas de ferrocarril o en pipas para ser transportados a los centros de distribución, plantas concreteras, etc.
- Sacos: Se utilizan envasadoras rotatorias que los llenan con 50 Kg de cemento y se estiban de forma manual o automatizada para entregarla a los clientes.

1.3 Química del Cemento

En la química del cemento, con frecuencia se utilizan las siguientes abreviaciones:

CaO	C
SiO ₂	S
Al ₂ O ₃	F
Fe ₂ O ₃	A
SO ₃	\bar{S}
H ₂ O	H

La nomenclatura con la que se conoce convencionalmente a los constituyentes del clínker es la siguiente:

Alita	Silicato tricálcico	$3CaO.SiO_2$	C_3S
Belita	Silicato bicálcico	$2CaO.SiO_2$	C_2S
Aluminato	Aluminato tricálcico	$3CaO.Al_2O_3$	C_3A
Ferrita	Ferroaluminato tetracálcico	$4CaO.Al_2O_3.Fe_2O_3$	C_4AF

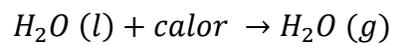
1.3.1 Transformaciones del crudo en el horno rotatorio

Las transformaciones a las que se ve sometido el crudo dentro del horno, según Labahn (1985) son:

- Calentamiento

→ Temperatura hasta 200 °C

Eliminación de agua libre

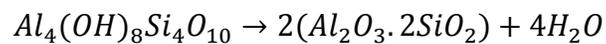


→De 100 a 400°C

Eliminación de agua absorbida

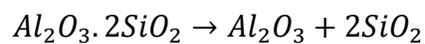
→De 400 a 750 °C

Remoción de H₂O estructura (H₂O y grupos OH) de minerales arcillosos, con formación de meta-caolinita



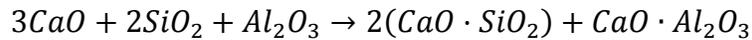
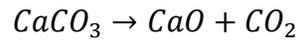
→De 600 a 900°C

Descomposición de la meta-caolinita y otros compuestos con formación de una mezcla de óxidos reactivos.



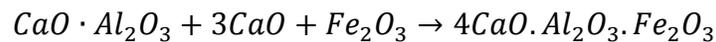
→De 600 a 1000°C

Se descompone el CaCO_3 que se encuentra en el material calcáreo, además de esto el CaO que se forma por este proceso de descomposición sufre otras reacciones químicas, por las cuales se forma el CA y el CS.



→De 800 a 1300°C

La última reacción se da entre los compuestos en estado sólido obtenidos en la fase anterior. Los sólidos reaccionan formándose belita, aluminato y ferrita.



→De 1250 a 1450 °C

A la temperatura de 1250°C se da la formación de fase líquida (fusión de aluminato y ferrita). A 1450°C conclusión de la reacción y recristalización de alita y belita.

- Enfriamiento

De 1300 a 1240°C. Cristalización de la fase líquida, principalmente en aluminato y ferrita.

1.3.2 Fórmulas de Bogué

Bogué ha desarrollado un proceso de cálculo según el cual, a partir del análisis químico, se puede calcular el contenido en minerales, ante todo el C_3S , C_2S , C_3A y C_4AF . (Duda, 1977).

La ventaja de estas fórmulas radica en que evitan desarrollar la estequiometría de los compuestos del cemento, con estas sencillas relaciones:

$$C_4AF = 3.043Fe_2O_3$$

$$C_3A = 2.65Al_2O_3 - 1.692Fe_2O_3$$

$$C_2S = 8.602SiO_2 + 1.078Fe_2O_3 + 5.068Al_2O_3 - 3.071CaO$$

$$C_3S = 4.071CaO - 7.6SiO_2 - 1.43Fe_2O_3 - 6.718Al_2O_3$$

En estas fórmulas se dan ciertas suposiciones; las cuales se describen a continuación:

- Todo el Fe_2O_3 está combinado en el C_4AF
- Toda la alúmina restante está en el C_3A

El intervalo en el cual deben de caer los componentes del clinker se muestran en la tabla 11:

Tabla 11
Composición potencial del clinker

Componente	Intervalo
C_2S	20-30
C_3S	40-60
C_3A	de 7 a 14
C_4AF	de 5 a 12

Nota: Fuente: Duda, W.H. (1977). *Manual Tecnológico del Cemento*. Barcelona, España: Editores Técnicos Asociados.

1.3.3 Características de los componentes del clinker

C_2S : Este compuesto denominado belita, determina las características del comportamiento de las resistencias a la compresión, su fraguado se realiza lentamente y su

desarrollo de resistencias es lento en un inicio, pero aumenta con el tiempo, por lo que su calor de hidratación es bajo. (Labahn, 1985, p.180)

C₃S: Comercialmente es llamado alita y es la parte más importante del clínker y confiere ciertas propiedades al cemento como determinar la rapidez de fraguado y resistencia mecánica del cemento portland, a este compuesto se le atribuye el rápido desarrollo de resistencias iniciales. (Labahn, 1985, p.181)

C₃A: El aluminato proporciona una estabilidad química escasa, hidratación casi instantánea, razón por la cual presenta un fraguado en pocos minutos y por ende proporciona resistencias tempranas, además de reaccionar con los sulfatos para proporcionar un aumento de volumen. (Labahn, 1985, p.181)

C₄AF: Este compuesto proporciona una estabilidad química aceptable en presencia de sales, hidratación lenta y regular, pero en cuanto a resistencias contribuye en mayor cantidad a su desarrollo y genera un calor de hidratación moderado. (Labahn, 1985, p.182)

1.3.4 Módulos del cemento

Los módulos son relaciones entre los óxidos mayoritarios (CaO, SiO₂, Al₂O₃ y Fe₂O₃) en el cemento Portland, según Duda (1977).

Módulo hidráulico: Es representado como MH, es la relación entre el porcentaje de CaO y la sumatoria de los porcentajes de SiO₂, Al₂O₃ y Fe₂O₃, así:

$$MH = \frac{\%CaO}{\%SiO_2 + \%Al_2O_3 + \%Fe_2O_3}$$

Dónde:

$\%CaO$: Porcentaje de Óxido de Calcio

$\%SiO_2$: Porcentaje de Óxido de Silicio

$\%Al_2O_3$: Porcentaje de Óxido de Aluminio

$\%Fe_2O_3$: Porcentaje de Óxido Ferroso

Los cementos de buena calidad tiene un módulo hidráulico del orden de 2, Los cementos con $MH < 1.7$ suelen presentar resistencias mecánicas insuficientes; los cementos con $MH = 2.4$ y por encima de este valor, la mayoría de veces no son de volumen estable; por lo tanto el valor obtenido de este módulo este comprendido entre los valores de 1.7 y 2.3

Módulo de silicatos:

$$MdS = \frac{\%SiO_2}{\%Al_2O_3 + \%Fe_2O_3}$$

Dónde:

$\%SiO_2$: Porcentaje de Óxido de Silicio

$\%Al_2O_3$: Porcentaje de Óxido de Aluminio

$\%Fe_2O_3$: Porcentaje de Óxido Ferroso

Este módulo representa la relación entre la fase sólida y líquida en la zona de clinkerización, ya que los compuestos con óxido de silicio son casi en su totalidad sólidos, el óxido de aluminio y férrico son líquidos; si el módulo tiene valores entre 2.0 y 2.6 estos son considerados cementos de buena calidad, pero es aceptable que tenga valores de 1.8 y 3.2, a valores superiores de 3.2 se empeoran las condiciones de cocción del clínker, debido a que

desciende la fase líquida y se dificulta la formación de la costra, lo que provoca que se generen cementos de fraguado lento.

Módulo de Silícico: Es representado como MS, fue introducido por Mussnug y es la relación entre el porcentaje de SiO_2 y el porcentaje de Al_2O_3 , así:

$$MS = \frac{\%SiO_2}{\%Al_2O_3}$$

Dónde:

$\%SiO_2$: Porcentaje de Óxido de Silicio

$\%Al_2O_3$: Porcentaje de Óxido de Aluminio

Ésta relación, debe tener un valor entre 2.5 y 3.5, para que se tenga una buena condición de formación de costra en la zona de cocción.

Módulo de alúmia: Esta representado como MF, fue introducido por Mussnug:

$$MF = \frac{\%Al_2O_3}{\%Fe_2O_3}$$

Dónde:

$\%Al_2O_3$: Porcentaje de Óxido de Aluminio

$\%Fe_2O_3$: Porcentaje de Óxido Ferroso

Ésta relación, debe tener un valor entre 1.5 y 2.5. Si el valor de este módulo tiene valores inferiores a 1.5, tendremos los ferro-cementos, los cuales tienen bajo calor de hidratación y un fraguado lento; pero si este valor es superior a 2.5 y con un módulo silícico bajo, se obtiene por el contrario un cemento de fraguado rápido, debido a que se tendría que aumentar la cantidad de yeso para su regulación y se debilitaría la estabilidad química.

1.3.5 Cálculo de la composición del crudo

El cálculo de la composición del crudo tiene por objeto determinar las relaciones de las cantidades de materias primas que hay que aportar para dar al clínker la composición química y mineralógica deseada. La composición de la caliza y de la arcilla que se utilizará para la mezcla del crudo se presenta en la tabla 12:

Tabla 12
Composición de materia prima

Componente (%)	Caliza	Arcilla
SiO ₂	3.76	53.4
Al ₂ O ₃	1.10	19.2
Fe ₂ O ₃	0.66	8.5
CaO	52.46	4.30
MgO	1.23	2.1
K ₂ O	0.18	0.32
Na ₂ O	0.22	0.9
SO ₃	0.01	0.03
P.F	40.38	11.25
Suma	100.00	100.00

Nota: Fuente: Duda, W.H. (1977). *Manual Tecnológico del Cemento*. Barcelona, España: Editores Técnicos Asociados.

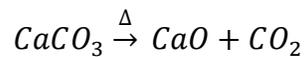
Se establece que el crudo debe tener un porcentaje de 76% de CaCO_3 . De acuerdo a la base de diseño planteada de 500000 toneladas anuales, con el objetivo de facilitar los cálculos se toma una base de cálculo de 100 toneladas de crudo y posteriormente se presentarán los resultados de acuerdo a la base de diseño.

- Cálculo de CaCO_3 que debe tener el crudo

$$100 \text{ ton de crudo} * 0.76 = 76 \text{ ton de CaCO}_3$$

- Cálculo de caliza y de arcilla que se debe añadir para obtener las 76 toneladas de CaCO_3

En la tabla 12 se muestra el contenido de CaO de caliza y de arcilla, en base a la reacción química que se lleva a cabo podemos calcular la cantidad de CaCO_3 que se encuentra en cada componente.



Referido a caliza:

$$52.46 \text{ ton CaO} \times \frac{1 \text{ mol CaO}}{56 \text{ ton CaO}} \times \frac{1 \text{ mol CaCO}_3}{1 \text{ mol CaO}} \times \frac{100 \text{ ton CaCO}_3}{1 \text{ mol CaCO}_3} = 93.68 \text{ ton de CaCO}_3$$

Referido a arcilla:

$$4.30 \text{ ton CaO} \times \frac{1 \text{ mol CaO}}{56 \text{ ton CaO}} \times \frac{1 \text{ mol CaCO}_3}{1 \text{ mol CaO}} \times \frac{100 \text{ ton CaCO}_3}{1 \text{ mol CaCO}_3} = 7.68 \text{ ton de CaCO}_3$$

Para calcular las cantidades en la cuales se debe mezclar la arcilla y la caliza para obtener las 76 toneladas de carbonato de calcio en el crudo, planteamos las siguientes ecuaciones:

$$c = \text{ton de caliza} \quad a = \text{ton de arcilla}$$

$$c + a = 100 \dots \dots (1) \text{ Balance general}$$

$$0.9368c + 0.0768a = 100(0.76) \dots (2) \text{ Balance referido a la composición de CaCO}_3$$

Resolviendo el sistema de ecuaciones, se obtiene:

$$0.9368(100 - a) + 0.0768a = 100(0.76)$$

$$93.68 - 0.9368a + 0.0768a = 76$$

$$17.68 = 0.8600a$$

$$a = 20.56 \frac{\text{ton de arcilla}}{\text{ton de crudo}}$$

$$c = 79.44 \frac{\text{ton de caliza}}{\text{ton de crudo}}$$

Esto nos indica que para tener un crudo con 76% de CaCO₃ se debe hacer una mezcla de 79.44% de caliza y 20.56 % de arcilla, con lo cual se puede calcular las concentraciones de los componentes del crudo:

$$79.44 \text{ ton caliza} \times \frac{3.76 \text{ ton SiO}_2}{100 \text{ ton caliza}} + 20.56 \text{ ton arcilla} \times \frac{53.4 \text{ ton SiO}_2}{100 \text{ ton arcilla}} = 13.96 \text{ ton SiO}_2$$

$$79.44 \text{ ton caliza} \times \frac{1.1 \text{ ton Al}_2\text{O}_3}{100 \text{ ton caliza}} + 20.56 \text{ ton arcilla} \times \frac{19.2 \text{ ton Al}_2\text{O}_3}{100 \text{ ton arcilla}} = 4.82 \text{ ton Al}_2\text{O}_3$$

$$79.44 \text{ ton caliza} \times \frac{0.66 \text{ ton Fe}_2\text{O}_3}{100 \text{ ton caliza}} + 20.56 \text{ ton arcilla} \times \frac{8.5 \text{ ton Fe}_2\text{O}_3}{100 \text{ ton arcilla}} = 2.27 \text{ ton Fe}_2\text{O}_3$$

$$79.44 \text{ ton caliza} \times \frac{52.46 \text{ ton CaO}}{100 \text{ ton caliza}} + 20.56 \text{ ton arcilla} \times \frac{4.3 \text{ ton CaO}}{100 \text{ ton arcilla}} = 42.56 \text{ ton CaO}$$

$$79.44 \text{ ton caliza} \times \frac{1.23 \text{ ton MgO}}{100 \text{ ton caliza}} + 20.56 \text{ ton arcilla} \times \frac{2.1 \text{ ton MgO}}{100 \text{ ton arcilla}} = 1.41 \text{ ton MgO}$$

$$79.44 \text{ ton caliza} \times \frac{0.18 \text{ ton K}_2\text{O}}{100 \text{ ton caliza}} + 20.56 \text{ ton arcilla} \times \frac{0.32 \text{ ton K}_2\text{O}}{100 \text{ ton arcilla}} = 0.21 \text{ ton K}_2\text{O}$$

$$79.44 \text{ ton caliza} \times \frac{0.22 \text{ ton Na}_2\text{O}}{100 \text{ ton caliza}} + 20.56 \text{ ton arcilla} \times \frac{0.9 \text{ ton Na}_2\text{O}}{100 \text{ ton arcilla}} = 0.36 \text{ ton Na}_2\text{O}$$

$$79.44 \text{ ton caliza} \times \frac{0.01 \text{ ton SO}_3}{100 \text{ ton caliza}} + 20.56 \text{ ton arcilla} \times \frac{0.03 \text{ ton SO}_3}{100 \text{ ton arcilla}} = 0.01 \text{ ton SO}_3$$

P.F Pérdidas por calcinación

El cálculo de pérdidas por calcinación se realiza de acuerdo a los porcentajes de P.F que se muestran en la tabla 12.

$$79.44 \text{ ton caliza} \times \frac{40.38 \text{ ton P.F}}{100 \text{ ton caliza}} + 20.56 \text{ ton arcilla} \times \frac{11.25 \text{ ton P.F}}{100 \text{ ton arcilla}} = 34.39 \text{ ton P.F}$$

El clínker tendrá la siguiente composición, tabla 13:

Tabla 13
Composición del clínker % en peso

Componente	Clínker (ton)	% en peso
SiO ₂	13.96	21.28
Al ₂ O ₃	4.82	7.35
Fe ₂ O ₃	2.27	3.46
CaO	42.56	64.87
MgO	1.41	2.15
K ₂ O	0.21	0.32
Na ₂ O	0.36	0.55
SO ₃	0.01	0.02
Suma	65.61	100.00

Nota: Referida a una base de 100 toneladas de crudo.

El cemento tipo CPO que se va a producir contendrá 97% clínker y 3% yeso. La composición del yeso se muestra en la tabla 14:

Tabla 14
Composición del Yeso

Componente	Yeso % en peso
SiO ₂	8.86
Al ₂ O ₃	5.63
Fe ₂ O ₃	4.36
CaO	32.8
MgO	3.36
K ₂ O	0.51
Na ₂ O	1.26
SO ₃	43.22

Nota: Fuente: Duda, W.H. (1977). *Manual Tecnológico del Cemento*. Barcelona, España: Editores Técnicos Asociados.

De acuerdo a la composición del yeso, la composición que se debe añadir es:

$$\frac{65.61 \text{ ton de clínker}}{97 \% \text{ de cemento}} \times 3\% \text{ del cemento} = 2.03 \text{ ton de yeso}$$

Planteando los balances de materia con el clínker y el yeso que se utilizan para la producción del cemento, podemos conocer la composición química del cemento CPO.

$$13.96 \text{ ton SiO}_2 + 2.03 \text{ ton yeso} \times \frac{8.86 \text{ ton SiO}_2}{100 \text{ ton yeso}} = 14.14 \text{ ton SiO}_2$$

$$4.82 \text{ ton Al}_2\text{O}_3 + 2.03 \text{ ton yeso} \times \frac{5.63 \text{ ton Al}_2\text{O}_3}{100 \text{ ton arcilla}} = 4.93 \text{ ton Al}_2\text{O}_3$$

$$2.27 \text{ ton Fe}_2\text{O}_3 + 2.03 \text{ ton yeso} \times \frac{4.36 \text{ ton Fe}_2\text{O}_3}{100 \text{ ton arcilla}} = 2.36 \text{ ton Fe}_2\text{O}_3$$

$$42.56 \text{ ton CaO} + 2.03 \text{ ton yeso} \times \frac{32.8 \text{ ton CaO}}{100 \text{ ton arcilla}} = 43.23 \text{ ton CaO}$$

$$1.41 \text{ ton MgO} + 2.03 \text{ ton yeso} \times \frac{3.36 \text{ ton MgO}}{100 \text{ ton arcilla}} = 1.48 \text{ ton MgO}$$

$$0.21 \text{ ton K}_2\text{O} + 2.03 \text{ ton yeso} \times \frac{0.51 \text{ ton K}_2\text{O}}{100 \text{ ton arcilla}} = 0.22 \text{ ton K}_2\text{O}$$

$$0.36 \text{ ton Na}_2\text{O} + 2.03 \text{ ton yeso} \times \frac{1.26 \text{ ton Na}_2\text{O}}{100 \text{ ton arcilla}} = 0.39 \text{ ton Na}_2\text{O}$$

$$0.01 \text{ ton SO}_3 + 2.03 \text{ ton yeso} \times \frac{43.22 \text{ ton SO}_3}{100 \text{ ton arcilla}} = 0.89 \text{ ton SO}_3$$

La composición del cemento CPO se muestra en la tabla 15:

Tabla 15
Composición del cemento

Componente	Cemento (ton)	Cemento %
SiO ₂	14.14	20.91
Al ₂ O ₃	4.93	7.30
Fe ₂ O ₃	2.36	3.49
CaO	43.23	63.91
MgO	1.48	2.18
K ₂ O	0.22	0.32
Na ₂ O	0.39	0.57
SO ₃	0.89	1.32
Total	67.64	100

Nota: Referido a una base de 100 toneladas de crudo.

Con los resultados obtenidos se observa que se tiene una producción de 65.61 toneladas de clínker al introducir 100 toneladas de crudo, esto debido a las pérdidas por calcinación y una producción final de cemento de 67.64 toneladas de cemento por hora. Adecuando los resultados a la base de diseño de 500000 toneladas de cemento anuales es necesario tener una producción de 57.08 toneladas de cemento por hora, por lo tanto la cantidad de clínker y de yeso son las siguientes:

Clínker:

$$57.08 \frac{\text{ton de cemento}}{h} \times 0.97 = 55.37 \frac{\text{ton clínker}}{h}$$

Yeso:

$$57.08 \frac{\text{ton de cemento}}{h} \times 0.03 = 1.71 \frac{\text{ton yeso}}{h}$$

Para conocer la cantidad de crudo que se debe agregar al proceso de molienda se obtiene el factor crudo/clínker

$$F = \frac{100}{\text{Crudo} - P.F}$$

$$F = \frac{100}{100 - 34.39} = 1.5242$$

Por cada 1.5242 toneladas de crudo que se procese, se obtendrá 1 tonelada de clínker.

$$55.37 \frac{\text{ton clínker}}{h} \times 1.5242 = 84.39 \frac{\text{ton crudo}}{h}$$

El crudo tendrá la composición mostrada en la tabla 16.

Tabla 16

Composición del crudo en la producción real de cemento CPO

Componente	Crudo %	Crudo ton/h
SiO ₂	13.96	11.78
Al ₂ O ₃	4.82	4.07
Fe ₂ O ₃	2.27	1.92
CaO	42.56	35.92
MgO	1.41	1.19
K ₂ O	0.21	0.18
Na ₂ O	0.36	0.30
SO ₃	0.01	0.01
P.F	34.39	29.02
Suma	100	84.39

Al llevar a cabo la calcinación y en base a los porcentajes de la tabla 13, podemos conocer la masa de cada componente del clínker, los resultados están en la tabla 17.

Tabla 17

Composición del clínker en la producción real de cemento CPO

Componente	Clínker %	Clínker ton/h
SiO ₂	21.28	11.78
Al ₂ O ₃	7.35	4.07
Fe ₂ O ₃	3.46	1.92
CaO	64.87	35.92
MgO	2.15	1.19
K ₂ O	0.32	0.18
Na ₂ O	0.55	0.30
SO ₃	0.02	0.01
Suma	100.00	55.37

En el proceso de molienda de cemento, se le adiciona el 3% de yeso que se mencionó, por lo tanto, el cemento CPO tiene la composición que se detalla en la tabla 18:

Tabla 18
Composición final del cemento tipo CPO

Componente	Cemento %	Cemento ton/h
SiO ₂	20.91	11.93
Al ₂ O ₃	7.30	4.16
Fe ₂ O ₃	3.49	1.99
CaO	63.91	36.48
MgO	2.18	1.25
K ₂ O	0.32	0.18
Na ₂ O	0.57	0.33
SO ₃	1.32	0.75
Suma	100	57.08

De acuerdo a las fórmulas de Bogué la composición potencial del clínker es la de la tabla 19:

Tabla 19
Óxidos en el clínker usados para producción de cemento

Componente	Valor
C ₂ S	24.84
C ₃ S	48.07
C ₃ A	13.61
C ₄ AF	10.53

El cemento producido tendrá módulos con los siguientes valores, tabla 20:

Tabla 20

Valores de los módulos en el cemento tipo CPO producido

Módulo	Valor
MH	2.02
MdS	1.94
MS	2.87
MF	2.09

1.4 Balance de Materia y Energía en el horno rotatorio

El balance de materia y energía realizado se centra en el proceso de calcinación, por lo tanto se consideran los flujos que entran en el precalentador, horno rotatorio y enfriador para así asegurar una buena combustión y por lo tanto una buena calcinación. En la Figura 1 se marca la frontera en la cual se va a realizar el balance de materia y energía.

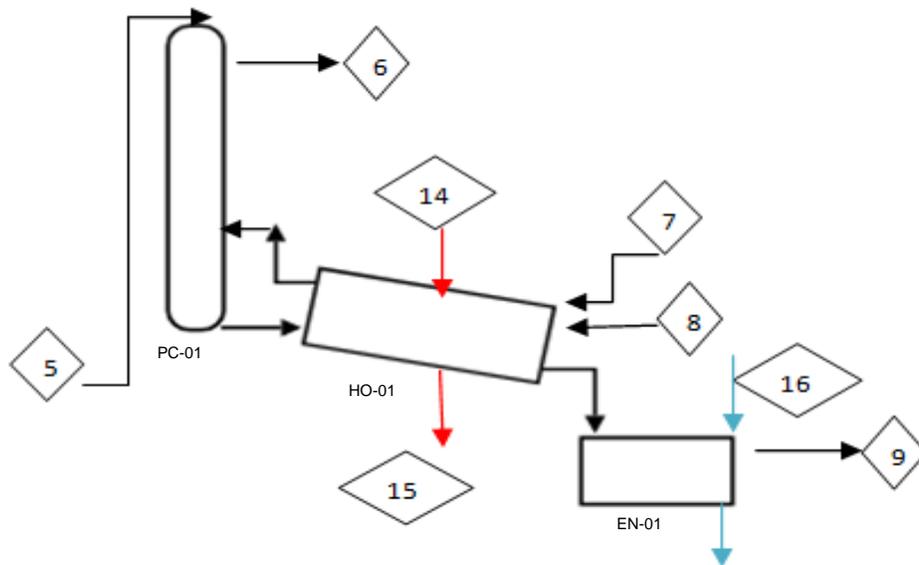


Figura 1. Frontera en la cual se realiza el balance de materia y energía.

Nota: Los flujos en azul y rojo no se ven involucrados en el balance de masa

Dónde:

PC-01: Pre-calentador de ciclones

HO-01: Horno rotatorio

EN-01: Enfriador de parrillas

5: Entrada de crudo

7: Entrada de combustible

8: Entrada de aire primario

9: Salida de clínker

6: Salida de gases de escape

14: Calor de combustión

15: Calor formación de clínker

16: Calor aire de enfriamiento

1.4.1 Balance de materia

En la tabla 21 se muestra los flujos másicos que se ven involucrados en el horno rotatorio:

Tabla 21

Flujos involucrados en el balance de materia

Flujos de entrada		Flujos de salida	
Crudo	\dot{m}_5	Clínker	\dot{m}_9
Combustible	\dot{m}_7	Gases de escape	\dot{m}_6
Aire primario	\dot{m}_8		

Para mayor facilidad los resultados de flujo másico se darán en kilogramos y en kg/kg de clínker.

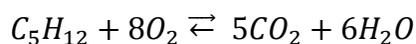
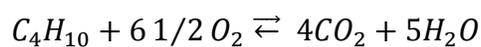
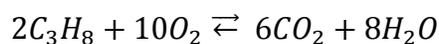
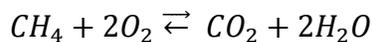
Flujo másico de crudo (\dot{m}_5)

$$\dot{m}_5 = 84.39 \frac{T}{h} = 84390 \frac{kg}{h}$$

$$\dot{m}_5 = 1.5242 \frac{kg}{kg} clínker$$

Flujo másico de combustible (\dot{m}_7)

Los principales componentes del gas natural son el metano y el etano. Los componentes del gas natural arden según las siguientes ecuaciones:



Gracias a estas ecuaciones se pueden calcular los volúmenes de los productos de combustión del gas natural si se conoce su composición, la cual se muestra en la tabla 22.

Tabla 22
Composición del gas natural

Componente	Vol. %
<i>CH₄</i>	94.39
<i>C₂H₆</i>	2.89
<i>C₃H₈</i>	0.79
<i>C₄H₁₀</i>	0.16
<i>C₅H₁₂</i>	0.18
<i>N₂</i>	0.50
<i>CO₂</i>	0.88

Nota: Fuente: Arnal, J. (2010). *Diseño de una instalación para la producción de cemento Portland*. (tesis de pregrado). Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica Industrial de Zaragoza, México.

Considerando una base de 1000 litros=1m³ obtenemos la masa de cada componente con la siguiente ecuación:

$$m = \frac{V * MM}{k}$$

Dónde:

$V = \text{Volumen } L$

$MM = \text{Masa molar } \frac{lg}{kmol}$

$k = 22.4 \frac{L}{kmol}$

Tabla 23

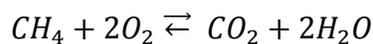
Masa de los componentes del gas natural

Componente	Vol. %	Volumen (L)	Masa (kg)
CH₄	94.39	943.9	674,21
C₂H₆	2.89	28.9	38,71
C₃H₈	0.79	7.9	15,52
C₄H₁₀	0.16	3.4	8,80
C₅H₁₂	0.18	2.1	6,75
N₂	0.50	5	6,25
CO₂	0.88	8.8	17,29
Total	100	1000	767.53

Nota: 1000 litros = 1 m³ = 767k g

Ahora podemos conocer la masa que sale de cada componente al llevarse a cabo la reacción de combustión, así como la cantidad de aire necesario:

Ejemplo de la reacción 1.



- Cálculo de O₂

$$674.21 \text{ kg } CH_4 \times \frac{1 \text{ kmol } CH_4}{16 \text{ kg}} \times \frac{2 \text{ kmol } O_2}{1 \text{ kmol } CH_4} \times \frac{32 \text{ kg}}{1 \text{ kmol } O_2} = 2696.86 \text{ kg } O_2$$

- Cálculo de CO₂

$$674.21 \text{ kg } CH_4 \times \frac{1 \text{ kmol } CH_4}{16 \text{ kg}} \times \frac{1 \text{ kmol } CO_2}{1 \text{ kmol } CH_4} \times \frac{44 \text{ kg}}{1 \text{ kmol } CO_2} = 1854.09 \text{ kg } CO_2$$

- Cálculo de H₂O

$$674.21 \text{ kg } CH_4 \times \frac{1 \text{ kmol } CH_4}{16 \text{ kg}} \times \frac{2 \text{ kmol } H_2O}{1 \text{ kmol } CH_4} \times \frac{18 \text{ kg}}{1 \text{ kmol } H_2O} = 1516.98 \text{ kg } H_2O$$

Ya que conocemos la cantidad de oxígeno para llevarse a cabo la reacción, podemos conocer la cantidad de N₂ que entra debido a la composición del aire, de acuerdo a la composición mostrada en la tabla 24.

Tabla 24

Composición en % mol y % masa del aire

Composición del aire		
Componente	% mol	% masa
O ₂	21	23.30
N ₂	79	76.70

Nota: Tomada de Percy (p.233)

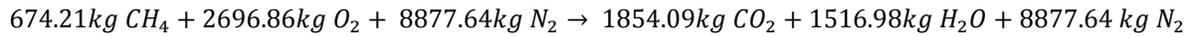
El dato a utilizar es % masa ya que el dato que se conoce es la masa de oxígeno, se aplica una regla de tres:

$$2696.86 \text{ kg } O_2 \leftrightarrow 23.30$$

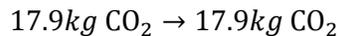
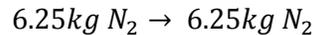
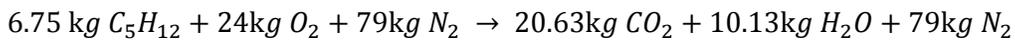
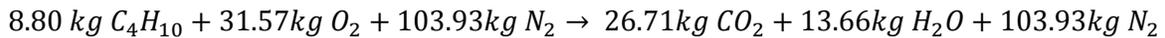
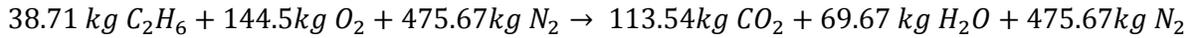
$$\text{kg } N_2 \leftrightarrow 76.70$$

$$N_2 = 8877.64 \text{ kg}$$

El N_2 no reacciona, es decir el N_2 que entra es igual al que sale:



Las demás reacciones que se llevan a cabo, son:



Al hacer la suma de la cantidad de gas natural, de aire y de gases de combustión tenemos:

$$Gas Natural = 767.53 kg$$

$$Aire (O_2 + N_2) = 2953.36 kg + 9722kg = 12675.35 kg$$

$$Gases de combustión (CO_2 + H_2O + N_2) = 2078.80 kg + 1635.83kg + 9728.25kg = 13442.88 kg$$

Balance de materia de la reacción de combustión:

$$Gas Natural + Aire = Gases de combustión$$

$$13442.88kg = 13442.88 kg$$

El poder calorífico del gas natural es de 8365.2 kcal/m^3 (Arnal, 2010), es decir la energía que produce la combustión de 1 kg de gas natural.

$$H = 8365.2 \frac{kcal}{m^3 gas} \times \frac{1000 m^3 gas}{767.53 kg gas} = 10898.86 \frac{kcal}{kg gas}$$

El calor teórico de reacción para producir un kg de clínker es de 420 kcal/kg de clínker (Duda, 1977). Por lo tanto la cantidad de gas natural necesaria para obtener un kg de clínker será de:

$$\frac{420 \frac{\text{kcal}}{\text{kg clínker}}}{10898.86 \frac{\text{kcal}}{\text{kg gas}}} = 0.0385 \frac{\text{kg gas}}{\text{kg clínker}}$$

La cantidad mínima de aire que se necesita para llevar a cabo la reacción de 1kg de gas:

$$\frac{12675.33 \text{ kg aire}}{767.53 \text{ kg gas}} = 16.51 \frac{\text{kg gas}}{\text{kg aire}}$$

En la combustión se utilizará 15% de aire en exceso, por lo tanto

$$16.51 \frac{\text{kg gas}}{\text{kg aire}} \times 1.15 = 18.99 \frac{\text{kg aire}}{\text{kg gas}}$$

La cantidad de aire en exceso es:

$$\text{Aire exceso} = 12675.35 \text{ kg} * 0.15 = 1901.3 \text{ kg}$$

Los gases de escape que se genera con 1kg de gas natural son:

$$\frac{13442.88 \text{ kg gases de combustión} + 1901.3 \text{ kg aire}}{767.53 \text{ kg gas}} = 19.99 \frac{\text{kg gases de combustión}}{\text{kg gas}}$$

Flujo másico de combustible (\dot{m}_7)

Se multiplica la cantidad de gas que se necesita para producir un kilogramo de clínker por los kilogramos de clínker que se van a producir.

$$0.0385 \frac{kg \text{ gas}}{kg \text{ clínker}} \times 55370 \frac{kg \text{ clínker}}{h} = 2131.745 \frac{kg \text{ gas}}{h}$$

Flujo másico de aire primario (\dot{m}_8)

Se obtiene en base a la cantidad de aire que se necesita para llevar a cabo la combustión del gas natural.

$$18.99 \frac{kg \text{ aire}}{kg \text{ gas}} \times 0.0385 \frac{kg \text{ gas}}{kg \text{ clínker}} = \dot{m}_8 = 0.7311 \frac{kg \text{ aire}}{kg \text{ clínker}}$$

$$0.7311 \frac{kg \text{ aire}}{kg \text{ clínker}} \times 55370 \frac{kg \text{ clínker}}{h} = 40481.83 \frac{kg \text{ aire}}{h}$$

Flujo másico de clínker (\dot{m}_9)

$$\dot{m}_9 = 55370 \frac{kg \text{ de clínker}}{h}$$

Flujo másico de gases de escape (\dot{m}_6)

En primer lugar se calcula la cantidad de gases de combustión con la producción de clínker establecida.

$$19.99 \frac{kg \text{ gases de comb.}}{kg \text{ gas}} \times 0.0385 \frac{kg \text{ gas}}{kg \text{ clínker}} \times 55370 \frac{kg \text{ clínker}}{h} = 42613.58 \frac{kg \text{ gases de comb}}{h}$$

El flujo másico de los gases de escape es la suma de los gases de escape, más la cantidad de el valor de P.F que muestra en la Tabla 16.

$$\dot{m}_6 = 29020 \frac{\text{kg P.F}}{h} + 42613.58 \frac{\text{kg gases de combustión}}{h} = 71633.58 \frac{\text{kg gases de escape}}{h}$$

$$\dot{m}_6 = \frac{71633.58 \text{ kg gases de escape}}{55370 \text{ kg clínker}} = 1.2838 \frac{\text{kg gases de escape}}{\text{kg clínker}}$$

Los datos recopilados se muestran en la tabla 25

Tabla 25
Balance de materia en el horno rotatorio

Entrada				Salida			
Flujo	Kg/h	ton/h	Kg/Kg clínker	Flujo	Kg/h	ton/h	Kg/Kg clínker
\dot{m}_5	84390	84.39	1.5242	\dot{m}_9	55370	55.37	1
\dot{m}_7	2131.745	2.1317	0.0385	\dot{m}_6	71633.58	71.6335	1.2938
\dot{m}_8	40481.83	40.4818	0.7311				
Total	127004	127.004	2.2938		127004	127.004	2.2938

1.4.2 Balance de Energía

En tabla 26 se muestra los flujos de energía que se ven involucrados en el horno rotatorio:

Tabla 26
Flujos involucrados en el balance de energía

Flujos de calor de entrada		Flujos de calor de salida	
Calor del crudo	Q_5	Calor de gases de escape	Q_6
Calor del combustible	Q_7	Calor sensible clínker	Q_9
Calor de aire primario	Q_8	Calor formación clínker	Q_{15}
Calor de combustión	Q_{14}		
Calor aire de enfriamiento	Q_{16}		

Las siguientes ecuaciones que se muestran se obtuvieron a partir del “Manual Práctico de Combustión y Clinkerización” del Ing. Percy Castillo.

- Calor sensible de crudo Q_5 en la entrada del precalentador

$$Q_5 = \dot{m} \times C_p \times (T_e - T_r)$$

$$C_p = 0.21 + 0.00007 T$$

Dónde:

\dot{m} = Flujo másico de crudo (*kg crudo/kg clínker*)

C_p = Calor específico (*kcal/kg °C*)

T_e = Temperatura de entrada (*°C*)

T_r = Temperatura de referencia (*25 °C*)

T = Promedio de temperaturas (*°C*)

Q_5 = (*kcal/kg clínker*)

- Calor sensible del combustible Q_7 en la entrada del horno rotatorio

$$Q_7 = C \times C_{pc} \times (T_e - T_r)$$

$$C_{pc} = 0.41 + 0.00043 T$$

Dónde:

C = Consumo unitario (*kg gas/kg clínker*)

- Calor sensible del aire primario Q_8 en el horno roatorio

$$Q_8 = A_1 \times C_{pa} \times (T_e - T_r)$$

$$C_{pa} = 0.247 + 4.4 \times 10^{-5} T$$

Dónde:

A_1 = Flujo másico de aire (*kg aire/kg clínker*)

- Calor de combustión Q_{14}

$$Q_{14} = C \times PCI$$

Dónde:

C = Consumo unitario (*kg gas/kg clínker*)

PCI = Poder calorífico inferior (*kcal/kg*)

- Calor sensible del aire de enfriamiento Q_{16} en la entrada del enfriador

$$Q_{16} = A_2 \times C_{pa} \times (T_s - T_e)$$

$$C_{pa} = 0.247 + 4.4 \times 10^{-5} T$$

Dónde:

A_2 = Flujo másico de aire de enfriamiento (*kg aire/kg clínker*)

T_s = Temperatura de salida (°C)

T_e = Temperatura de entrada (°C)

- Calor sensible de los gases de salida Q_6 en el precalentador

$$Q_6 = G \times C_{pg} \times (T_s - T_r)$$

$$C_{pg} = 0.23 + 0.00005 T$$

Dónde:

G = Flujo másico de gases de salida (*kg gases de salida/kg clínker*)

- Calor sensible del clínker Q_9 a la salida del enfriador

$$Q_9 = 1 \times C_{pck} \times (T_s - T_r)$$

$$C_{pck} = 0.181 + 0.000071 T$$

Dónde:

T_s = Temperatura de salida ($^{\circ}C$)

- Calor de formación del clínker Q_{15}

$$Q_{15} = 420 \frac{kcal}{kg \text{ de clínker}}$$

Calculando los flujos de energía;

Flujos de entrada

- Calor sensible de crudo Q_5

$$C_p = 0.21 + 0.00007 \left(\frac{38^{\circ}C + 25^{\circ}C}{2} \right) = 0.2122 \frac{kcal}{kg^{\circ}C}$$

$$Q_5 = 1.5242 \frac{kg \text{ crudo}}{kg \text{ clínker}} \times 0.2122 \frac{kcal}{kg^{\circ}C} \times (38^{\circ}C - 25^{\circ}C) = 4.2048 \frac{kcal}{kg \text{ clínker}}$$

- Calor sensible del combustible Q_7

$$C_{pc} = 0.41 + 0.00043 \left(\frac{26^{\circ}C + 25^{\circ}C}{2} \right) = 0.4210 \frac{kcal}{kg^{\circ}C}$$

$$Q_2 = 0.0385 \frac{kg \text{ gas}}{kg \text{ clínker}} \times 0.4210 \frac{kcal}{kg^{\circ}C} \times (26^{\circ}C - 25^{\circ}C) = 0.0162 \frac{kcal}{kg \text{ clínker}}$$

- Calor sensible del aire primario Q_8

$$C_{pa} = 0.247 + 4.4 \times 10^{-5} \left(\frac{26^{\circ}C + 25^{\circ}C}{2} \right) = 0.2481 \frac{kcal}{kg^{\circ}C}$$

$$Q_8 = 0.7311 \frac{kg \text{ aire}}{kg \text{ clínker}} \times 0.2481 \frac{kcal}{kg \text{ clínker}} \times (26^\circ C - 25^\circ C) = 0.1814 \frac{kcal}{kg \text{ clínker}}$$

- Calor de combustión Q_{14}

$$Q_{14} = 0.0385 \frac{kg \text{ gas}}{kg \text{ clínker}} \times 10898.86 \frac{kcal}{kg \text{ gas}} = 419.61 \frac{kcal}{kg \text{ clínker}}$$

- Calor sensible de aire de enfriamiento Q_{16}

$$C_{pa} = 0.247 + 4.4 \times 10^{-5} \left(\frac{15^\circ C + 205^\circ C}{2} \right) = 0.2518 \frac{kcal}{kg^\circ C}$$

$$Q_{16} = 0.9432 \frac{kg \text{ aire}}{kg \text{ clínker}} \times 0.2518 \frac{kcal}{kg \text{ clínker}} \times (205^\circ C - 15^\circ C) = 45.1317 \frac{kcal}{kg \text{ clínker}}$$

Flujos de salida

- Calor sensible de los gases de escape Q_6

$$C_{pg} = 0.23 + 0.00005 \left(\frac{168^\circ C + 25^\circ C}{2} \right) = 0.2348 \frac{kcal}{kg^\circ C}$$

$$Q_6 = 1.2838 \frac{kg \text{ gas de escape}}{kg \text{ clínker}} \times 0.2348 \frac{kcal}{kg^\circ C} \times (168^\circ C - 25^\circ C) = 43.4458 \frac{kcal}{kg \text{ clínker}}$$

- Calor sensible del clínker Q_9

$$C_{pck} = 0.181 + 0.000071 \left(\frac{55.8^\circ C + 25^\circ C}{2} \right) = 0.1839 \frac{kcal}{kg^\circ C}$$

$$Q_9 = 1 \times 0.1839 \frac{kcal}{kg^\circ C} \times (55.8^\circ C - 25^\circ C) = 5.6631 \frac{kcal}{kg \text{ clínker}}$$

- Calor de formación del clínker Q_{15}

$$Q_{15} = 420 \frac{\text{kcal}}{\text{kg de clínker}}$$

Los resultados están recopilados en la tabla 27:

Tabla 27
Balace de energía en el horno rotatorio

Entrada				Salida			
Flujo	Kg/Kg clínker	Cp (kcal/kg °C)	Q (kcal/kg clínker)	Flujo	Kg/Kg clínker	Cp (kcal/kg° C)	Q (kcal/kg clínker)
Q_5	1.5242	0.2122	4.2048	Q_6	1.2938	0.2348	43.4458
Q_7	0.0385	0.4210	0.0162	Q_9	1	0.1839	5.6631
Q_8	0.7311	0.2481	0.1814	Q_{15}			420
Q_{14}			419.61				
Q_{16}		0.2518	45.1317				
Total	2.2938		469.14		2.2938		469.10

1.5 Balance general de materia

De acuerdo a las corrientes mostradas en el diagrama de flujo y en base a los cálculos que se realizaron se observa que al hacer un balance general de materia, las corrientes de entrada son; caliza, arcilla, combustible (gas natural), aire primario y yeso; las salidas son; gases de escape, cemento para vender a granel y cemento para ensacar. En la tabla 28 están los datos concentrados:

Tabla 28
Balance general de masa

Entrada				Salida			
Flujo	Descripción	ton/h	Kg/h	Flujo	Descripción	ton/h	Kg/h
\dot{m}_1	Caliza	67.04	67040	\dot{m}_6	Gases de Escape	71.6336	71633.58
\dot{m}_2	Arcilla	17.35	17350	\dot{m}_{12}	Cemento 1	28.54	28540
\dot{m}_7	Combustible	2.1317	2131.745	\dot{m}_{13}	Cemento 2	28.54	28540
\dot{m}_8	Aire primario	40.4818	40481.83				
\dot{m}_{10}	Yeso	1.71	1710				
	Total	128.7136	128713.60			128.7136	128713.60

Nota: Cemento 1 es venta a granel. Cemento 2 es ensacado.

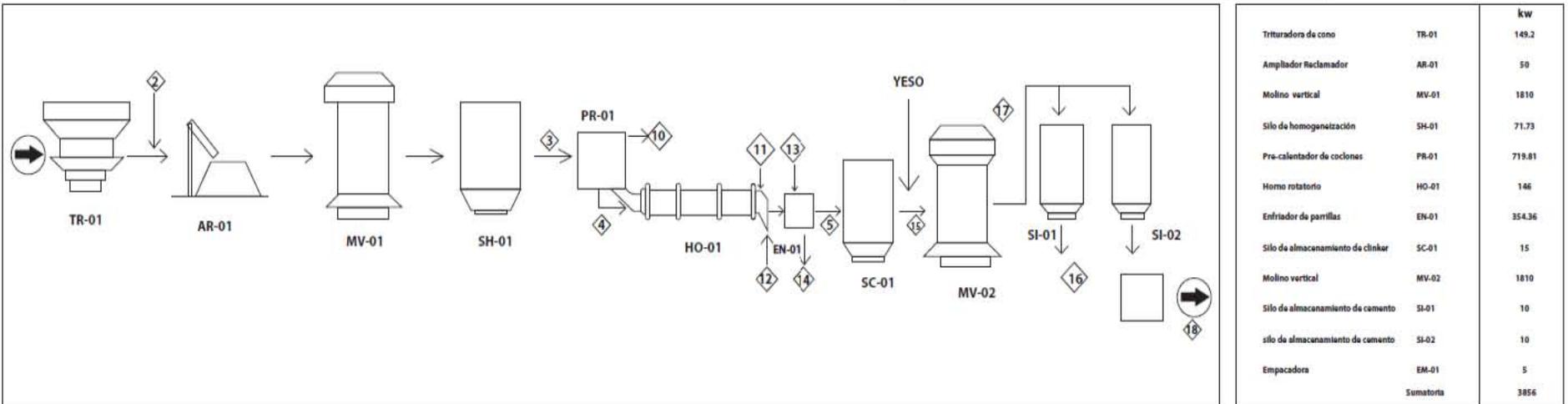
1.6 Diagrama de flujo de proceso

BALANCE DE ENERGÍA EN EL HORINO ROTATORIO

ENTRADA				ENTRASALIDADA			
CORRIENTE	Kg/Kg	Cp	Q	CORRIENTE	Kg/Kg	Cp	Q
	clinker	(kcal/kg °C)	(kcal/kg clinker)		clinker	(kcal/kg °C)	(kcal/kg clinker)
Q5	1.5242	0.2122	4.2048	Q6	1.2938	0.2348	43.4458
Q7	0.0385	0.4210	0.0162	Q9	1	0.1839	5.6631
Q8	0.7311	0.2481	0.1814	Q15			420
Q14			419.61				
Q16		0.2518	45.1317				
TOTAL	2.2938		469.14	2.2938			469.10

BALANCE GENERAL DE MASA

ENTRADA				ENTRASALIDADA			
CORRIENTE	DESCRIPCION	Ton/h	Kg/Kg	CORRIENTE	DESCRIPCION	Ton/h	Kg/Kg
m1	Calza	67.04	67040	m6	Gases de Escape	71.6336	71633.5
m2	Acrilla	17.35	17.50	m12	Cemento 1	28.54	28540
m7	Combustible	2.1317	2.1374	m13	Cemento 2	28.54	28540
m8	Aire primario	40.4818	40.4818				
m10	Yeso	1.71	1.71				
Total		128.713	128713.			128.713	128713.
		6	6			6	6



Capítulo 2

2.1 Ubicación de la planta

La planta se ubicará en Apaxco, el cual se localiza al norte del Estado de México y colinda al sur con el municipio de Tequixquiac, al este con Hueypoxtla, ambos del Estado de México; mientras que hacia el norte y noroeste colinda con los municipios de Ajacuba y Atotonilco de Tula del Estado de Hidalgo.

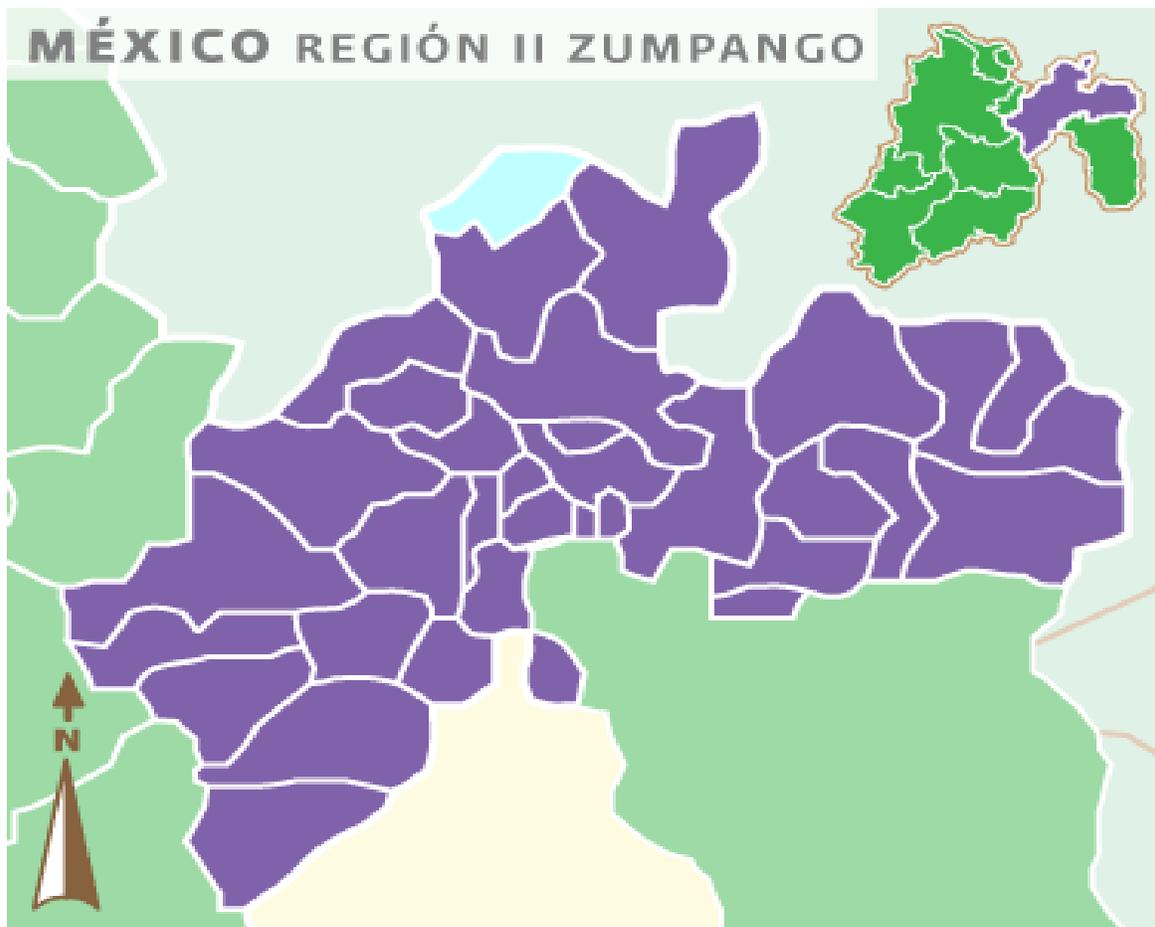


Figura 2. Ubicación de Apaxco

Nota: Tomada de <http://siglo.inafed.gob.mx/enciclopedia/EMM15mexico/municipios/15010a.html>



Figura 3. Imagen satelital de Apaxco

Nota: Tomada de <https://www.google.com.mx/maps>

Apaxco es un región adecuada para la producción de cemento debido a la geología que conforma su suelo el cual está constituido principalmente por rocas ígneas y sedimentarias de tobas y arenisca, especialmente en las áreas de planicie y lomerío bajo, mientras que en las partes montuosas al surponiente predomina la caliza. (Plan de Desarrollo Urbano Municipal Apaxco)

2.3 Listado de áreas

Las áreas que son indispensables para la conformación de la planta cementera son:

- Caseta de vigilancia
- Recepción
- Área de producción
- Almacén de materias primas
- Almacén general
- Almacén de producto envasado
- Taller de Mantenimiento
- Oficinas
- Cuarto de control
- Área de calidad
- Subestación
- Báscula
- Tratamiento de agua
- Área de desechos
- Comedor
- Servicio Médico
- Baños y vestidores
- Baños
- Estacionamiento general
- Estacionamiento
- Áreas verdes

Cada una de estas áreas se ubicó para que el proceso y cada operación de la planta se lleven a cabo con mayor rapidez y eficiencia.

2.3 Justificación de áreas

Área No. 1 Caseta de vigilancia

Se cuenta con dos casetas de vigilancia ubicadas en puntos estratégicos de la planta. Cada una tiene una construcción rectangular de 2.5 m x 2.5 m, el espacio cuenta con una silla, un pequeño escritorio, teléfono, además cuenta con ventanas en tres lados de la construcción.

Área No. 2 Recepción

En recepción se llevará a cabo el registro de trabajadores, proveedores, así como visitantes y en general de toda persona que ingrese a la planta, por medio de una tarjeta electrónica que marcará la hora de entrada y salida. La recepción contará con una pequeña sala de espera.

Área No.3 Área de producción

Esta área representa la mayor parte de la planta, ya que es donde se encuentran los equipos principales para llevar a cabo el proceso, tiene una extensión de 12000 m² debido al tamaño de los equipos, así como el tamaño considerado para los pasillos y distancias entre cada equipo. En esta área se señalarán los pasillos en donde puede transitar los trabajadores, se señalarán con pintura amarilla, quien no respete esos señalamientos se someterá a una penalización. Toda persona que se encuentre en esta área deberá tener equipo de protección personal.

Área No. 4 Almacén de materias primas

Este almacén cuenta con un área de 1800 m², aquí se encuentra la caliza que se va extrayendo, además de la arcilla.

Área No. 5 Almacén General

El almacén será un espacio cerrado con un área de 1200 m², en este lugar se tendrá todo tipo de material, equipo de seguridad, así como refacciones que sean necesarias para hacer mantenimiento o para ayuda en el proceso. El almacenista es quien debe de llevar el control de esta área.

Área No. 6 Almacén de producto envasado

En el almacén se encuentran los bultos 50 kg de cemento listos para su venta, se tendrá producto almacenado para surtir al mercado por lo menos 5 días, además para facilitar el proceso la ensacadora se encuentra dentro de este almacén.

No.7 Taller de Mantenimiento

Área en la cual se puede hacer el mantenimiento de refacciones pequeñas utilizadas en el proceso.

Área No. 8 Oficinas

Construcción de un edificio rectangular de 12 m x 10 m, el primer piso es asignado para personal administrativo, el segundo piso para el personal encargado de producción, en el tercer piso las oficinas de mantenimiento.

Área No.9 Cuarto de control

El cuarto de control es un área donde por medio de pantallas se tiene acceso a la visualización de la operación de cada etapa en la planta cementera. Además de la visualización, en dicho lugar se reciben las alertas de las fallas mecánicas de cada equipo utilizado.

Área No. 10 Área de calidad

Esta área es un laboratorio el cual tiene una gran variedad de servicios a realizar, comprendiendo, por ejemplo, el examen de las materias primas, de clínker y de producto terminado. El objetivo principal de esta área es llevar a cabo el control rutinario de la producción de cemento en todas sus fases a fin de asegurar una calidad constante del producto.

Área No.11 Subestación

Se le asigna un área de 300 m^2 , la cantidad de energía que va a proveer la subestación va en función de la energía requerida por los equipos y por la iluminación que debe de tener la planta.

Área No.12 Báscula

Se instalará una báscula de $3.5 \times 11 \text{ m}$, la cual soportará una carga de 50 toneladas de cemento a granel, sumado a eso también se considera el peso del camión el cual oscila entre 4 y 6 toneladas.

Área No.13 Tratamiento de aguas

Para producir una tonelada de cemento se necesitan 0.2 m^3 de agua aproximadamente, además este servicio es utilizado en todas las áreas de la planta, así como en los baños y en las

áreas verdes; por lo tanto el agua residual del proceso será tratada para recircularla en el mismo proceso y para el servicio de baños y regado de área verdes principalmente.

Área No.14 Área de desechos

Esta área es primordial para la planta, debido a que es el lugar asignado para colocar todos los desechos generados en la producción de cemento, es importante mencionar que tales desechos serán clasificados para facilitar la recolección de estos.

Área No. 15 Comedor

Se están considerando colocar mesas circulares de 1.20 m de diámetro con una capacidad de 7 personas por mesa. Cada trabajador contará con 30 minutos para tomar sus alimentos. En esta área también se cuenta con la cocina, la cual será manejada por una empresa secundaria.

Área No.16 Servicio Médico

Según el “Reglamento para el funcionamiento de los servicios médicos de empresas” para una empresa de 100 a 200 trabajadores el horario médico es de 3 horas, sin embargo la enfermera trabajará de tiempo completo. Deberá contar con los medicamentos y equipos médicos básicos. Además en el servicio médico se deberá de tener el historial de cada trabajador y hacer revisiones generales de cada trabajador.

Área No. 17 Baños y vestidores

Se cuenta con baños para hombres y baños para mujeres, cada uno con un área de 30 m², cada baño tiene a su disposición 4 tazas y 4 lavabos, además de un área de vestidores, los cuales cuentan con el servicio de agua y de energía eléctrica.

Área No. 18 Baños

Se cuenta con baños para hombres y baños para mujeres, cada uno con un área de 25 m², cada baño tiene a su disposición 4 tazas y 4 lavabos, los cuales cuentan con el servicio de agua y de energía eléctrica.

Área No.19 Estacionamiento general

La construcción del estacionamiento de la planta se hará de acuerdo a las “Normas técnicas Complementarias del Reglamento de Construcciones” del D.F. el cual menciona; el estacionamiento debe de estar cerca de las área de acceso a la planta además todos los cajones marcados deben de contar con las medidas correspondientes a un “auto grande”, el ángulo entre cada cajo será de 90° y el espaciamiento que se necesita entre pasillo es de 6 m.

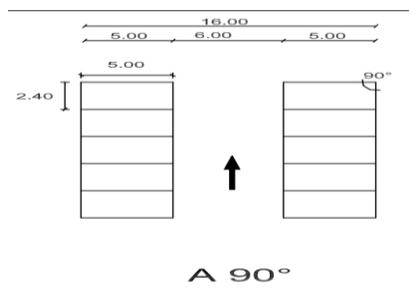


Figura 4. Diseño cajones de estacionamiento

Nota: Tomada de http://sedecodf.gob.mx/Siapem/Archivos/01_CAJONES%20DE%20ESTACIONAMIENTO.pdf

Área No.20 Estacionamiento

Estacionamiento destinado para los carros que se dirigen a cargar a granel o bien por producto ensacado. La permanencia de dichos carros será por tiempo limitado.

Área No.21 Áreas verdes

Se considera una extensión de 450 m² de áreas verdes, estas se distribuirán en diferentes zonas de la planta, principalmente estarán ubicadas en la zona de oficinas y acceso a la planta

2.4 Superficie de áreas

La superficie que se le asigna a cada área se muestra en tabla 29:

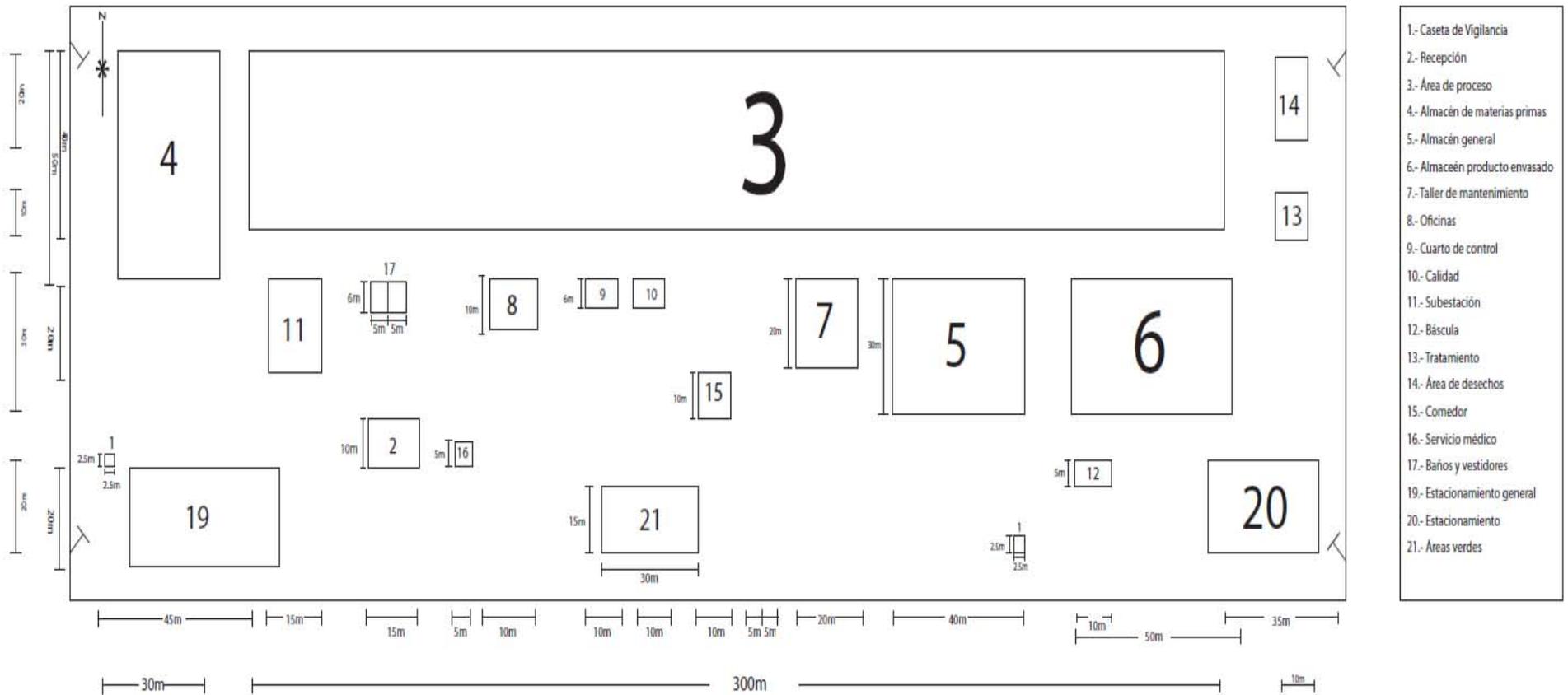
Tabla 29

Superficie de cada área de la planta

# de Área	Nombre de Área	Descripción	Superficie (m ²)
1	Caseta de vigilancia	Se contará con dos casetas de vigilancia de 2.5 m x 2.5 m, en una se registrará la entrada y salida de trabajadores y visitantes y en la segunda el registro de camiones.	6.25
2	Recepción	Área destinada para el registro del personal, así como de visitantes.	150
3	Área de Producción	En dicha área se encontrarán los equipos de proceso, como lo es: trituradora, silos, horno, molino, envasadora.	12000
4	Almacén de materia primas	Área destinada para almacenar todas las materias primas que se necesitan para la elaboración de nuestro producto.	1800
5	Almacén general	En este almacén se encuentran todas las refacciones y equipos que son necesarios para alguna falla mecánica en el proceso. Así como equipo de uso personal que necesiten los trabajadores de campo.	1200
6	Almacén producto envasado	En este almacén se encuentra la ensacadora y los bultos de cemento listos para su despacho.	1500
7	Taller de Mantenimiento	Área destinada a reparaciones pequeñas.	400
8	Oficinas	Edificio de 3 pisos, en el primer piso se encontrará el área administrativa, en el segundo las oficinas de producción y en el tercer piso las oficinas de mantenimiento.	150

9	Cuarto de control	Área en la cual se cuenta con una serie de pantallas en las que se muestra el funcionamiento de la planta.	60
10	Área de calidad	Área en la cual se cuenta con todo el equipo necesario para realizar las pruebas físicas y químicas.	60
11	Subestación	Área designada para el control eléctrico de la planta.	300
12	Báscula	En esta área se pesan los carros que cargan cemento a granel. Se ubica en la entrada y salida de carros.	50
13	Tratamiento de aguas	Aguas de desecho del proceso que son tratadas por diversos métodos para poder reutilizar el agua.	100
14	Área de desechos	En esta área se depositará todos los desechos, lo cuales estará clasificados.	200
15	Comedor	Área destinada para que el personal tome su tiempo de comida. Contará con 7 mesas circulares de 1.20 m de diámetro.	100
16	Servicio médico	Contará con un escritorio, una silla, una mesa de exploración y un baño.	25
17	Baños y vestidores	Se cuenta con dos baños, uno para hombres y otro para mujeres, además esta área también cuenta con vestidores.	60
18	Baños	Esta área está cerca del comedor, son dos baños, uno para hombre y otro para mujeres.	50
19	Estacionamiento general	Estacionamiento con cajones para los carros del personal y de visitantes	450
20	Estacionamiento o	Estacionamiento destinado para los carros de cargas	700
21	Áreas verdes	Se contará con 450 m ² de áreas verdes distribuidas en diferentes lugares de la planta.	450

2.5 Diagrama de distribución de áreas



Capítulo 3

En este capítulo se muestran las características de los equipos propuestos para cada etapa en la producción de cemento, los cuales se eligen principalmente de acuerdo a la producción de toneladas por hora. En la etapa de trituración en el mercado existen diferentes tipos de máquinas trituradoras como lo es: triturador de mandíbulas, triturador de cono y triturador de cilindros; se eligió un triturador de cono debido a la eficiencia que este representa, además el modelo elegido tiene una capacidad de producción superior al que se necesita. En la prehomogenización se va a utilizar un apilador reclamador de 25 m de diámetro el cual será capaz de homogenizar la caliza y arcilla utilizada como materia prima.

En la tercera etapa del proceso, a pesar de que la mayoría de plantas cementeras utilizan los molinos de bolas, se hizo la elección de molino vertical debido a la eficiencia de molienda, además la capacidad de operación del molino elegido es mayor a la necesaria. La etapa siguiente es la homogenización de crudo por lo que se eligió un silo en el cual se almacenará el material y al mismo tiempo por medio de aerodeslizadores se va a homogenizar, el cual tiene una capacidad de 300 toneladas, considerando que se van a producir aproximadamente 85 toneladas por hora de crudo, con este silo se prevé un almacenamiento para un paro de máximo tres horas por alguna falla de equipo. En el proceso de calcinación, se elige el precalentador DOPOL, horno POLRO y un enfriador de parrillas RECUPOL; todos con una capacidad de 2500 toneladas por día. El silo de almacenamiento de clínker tiene una capacidad de 1000 toneladas para así tener clínker almacenado para asegurar una producción de cemento por varios días en caso de un paro en los equipos anteriores a este proceso.

En la etapa de molienda de cemento se utilizará un molino con las mismas condiciones mecánicas y físicas que en la molienda de crudo. El cemento se irá a dos silos, ambos con una capacidad de 500 toneladas, uno destinado para venta a granel y otro para ensacar el cemento; estos silos cuentan con un margen de cinco horas en caso de fallas en la producción. Por último la empacadora llenará sacos de 50 Kg como lo marca la Norma Oficial Mexicana NMX-C-414-ONNCCE-2010 “Industria de la construcción. Cementos hidráulicos. Especificaciones y métodos de prueba”, la empacadora tiene una capacidad de 800 sacos por hora, es decir puede almacenar 40000 kilogramos por hora, siendo que cerca de 30000 kilogramos por hora son los que están destinado a esta etapa.

3.1 Listado de Equipo

Tabla 30

Listado y clave de equipo necesario

Equipo	Clave
Trituradora de cono	TR-01
Apilador Reclamador	AR-01
Molino vertical	MV-01
Silo de homogeneización	SH-01
Pre-calentador de ciclones	PR-01
Horno rotatorio	HO-01
Enfriador de parrillas	EN-01
Silo de almacenamiento de clínker	SC-01
Molino vertical	MV-02
Silo de almacenamiento de cemento	SI-01
Silo de almacenamiento de cemento	SI-02
Empacadora	EM-01

3.2 Hojas de especificación de los equipos propuestos.

Hoja de especificación de equipo																							
Nombre: Tritrador de cono 38 SBS	Clave: TR-01																						
Función: Procesar la caliza a un tamaño menor al inicial.																							
Descripción:																							
<p>El equipo consta de una entrada y una salida, en la cual se procesa únicamente caliza.</p> <p>Consiste principalmente en un marco, eje horizontal, freno del cono, volante compensador, manga excéntrica, pared de trituración superior (cono de soldadura), pared de trituración inferior (cono movable), acoplamiento de fluido, sistema de lubricación, sistema hidráulico y sistema de control.</p>																							
Servicios requeridos: Energía eléctrica y aire comprimido.																							
Especificaciones:																							
Capacidad de operación: 104 tph																							
Temperatura de diseño y operación únicamente ambiente.																							
Presión de diseño y operación únicamente ambiente.																							
Potencia requerida: 150-200 HP																							
Velocidad del volante: 775-805 rpm																							
Peso del equipo: 13,789 kg																							
Material de construcción:																							
Método de fabricación:																							
Número de ejemplares en línea de producción: 1																							
Dimensiones:																							
<table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>mm</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>A</td> <td>3526</td> </tr> <tr> <td>B</td> <td>2689</td> </tr> <tr> <td>C</td> <td>837</td> </tr> <tr> <td>D</td> <td>476</td> </tr> <tr> <td>E</td> <td>1119</td> </tr> <tr> <td>F</td> <td>1319</td> </tr> <tr> <td>G</td> <td>864</td> </tr> <tr> <td>H</td> <td>887</td> </tr> <tr> <td>J</td> <td>2759</td> </tr> <tr> <td>K</td> <td>130</td> </tr> </tbody> </table>		mm	A	3526	B	2689	C	837	D	476	E	1119	F	1319	G	864	H	887	J	2759	K	130	
	mm																						
A	3526																						
B	2689																						
C	837																						
D	476																						
E	1119																						
F	1319																						
G	864																						
H	887																						
J	2759																						
K	130																						

Hoja de especificación de equipo

Nombre: Apilador reclamador PHB

Clave: AR-01

Función: Prehomogenizar la materia prima de manera proporcional.

Descripción:

El equipo está diseñado para un parque de almacenamiento circular con un apilador giratorio y recuperador de puente circular. Actúa de modo chevrón, se forma la pila haciendo que el apilador recorra toda la plataforma mientras descarga el material, cada capa de material se descarga sobre la anterior hasta que se alcanza la altura total de la pila.

Servicios requeridos: Energía eléctrica

Especificaciones

Capacidad: Apilar hasta 350 capas individuales en la pila

Temperatura de diseño y operación únicamente ambiente.

Presión de diseño y operación únicamente ambiente.

Funcionamiento eléctrico.

Unidad de recogida con cadena inclinada

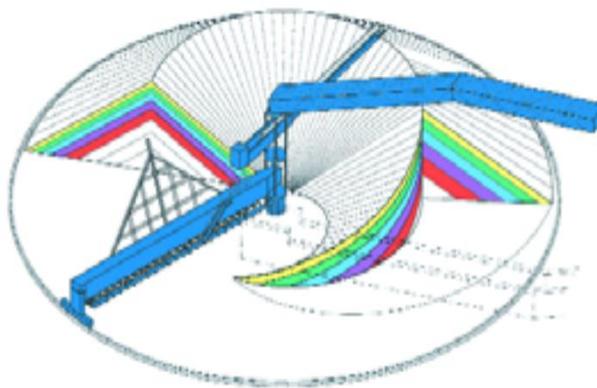
Material de construcción:

Método de fabricación:

Número de ejemplares en línea de producción: 1

Dimensiones del parque de almacenamiento:

Capacidad	Díámetro
5000 m ³	25 m



Datos del proveedor:

Claudius Peters (Americas) Inc.

Dallas, Texas 75244, USA

Teléfono: 972 386 4451

Fax: 972 386 4497

dallas@claudiuspeters.com

Hoja de especificación de equipo

Nombre: Molino Vertical LM 31.3

Clave: MV-01

Función: Moler la materia prima a un tamaño deseado.

Descripción:

El material a moler se tritura entre la pista giratoria de molienda y los rodillos e molienda guiados de forma individual. El equipo consta de rodillos cónicos, cuyos ejes están inclinados 15° con respecto a la pista de molienda horizontal. Los rodillos están conectados por pares a una unidad hidráulica.

Servicios requeridos: Energía eléctrica, aire comprimido y gases calientes.

Especificaciones:

Capacidad de operación: 100-210 tph
 Temperatura de diseño y operación únicamente ambiente.
 Presión de diseño y operación únicamente ambiente.
 Humedad: <25%
 Potencia requerida: 1810 kw

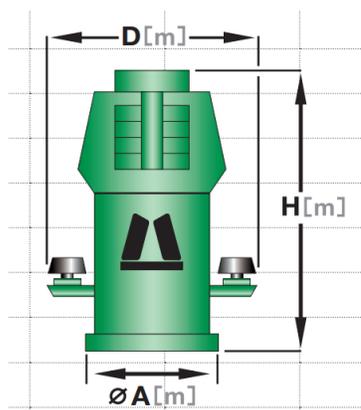
Material de construcción:

Método de fabricación:

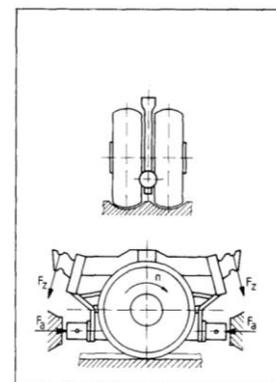
Número de ejemplares en línea de producción: 2

Dimensiones:

	H	A	D
M	11.7	7.0	11.0

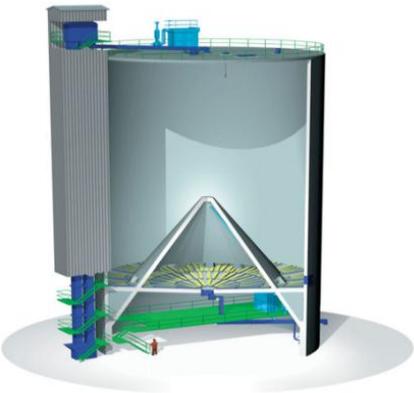


Vista superior



Datos del proveedor:

Loesche America, Inc.
 Florida 33029, USA
 Teléfono: 954-602 14 24
 Fax: 954-602 14 23
www.loescheamerica.com

Hoja de especificación de equipo	
Nombre: Silo de homogeneización EC	Clave: SH-01
Función: Homogeneizar el crudo para disminuir la variación de la alimentación al horno.	
<p>Descripción:</p> <p>Todo el fondo de silo está cubierto de aerodeslizadores de tipo abierto colocados radialmente; además cuenta con una cámara de expansión.</p> <p>Cuenta con un sistema de control de aire que garantiza un funcionamiento económico.</p> <p>El silo tiene la entrada de crudo por la parte superior y en la parte inferior la entrada de aire.</p>	
Servicios requeridos: Energía eléctrica y aire comprimido.	
<p>Especificaciones:</p> <p>Capacidad de almacenamiento: 300 toneladas</p> <p>Temperatura de diseño y operación únicamente ambiente.</p> <p>Presión de diseño y operación únicamente ambiente.</p> <p>Aire necesario: 15 m³ por tonelada de crudo</p> <p>Energía eléctrica consumida: 0.85 kWh por tonelada de crudo.</p> <p>Grado de vaciado: >99%</p>	
Material de construcción:	
Método de fabricación:	
Número de ejemplares en línea de producción: 1	
<p>Dimensiones:</p> <p>Diámetro: 10 m</p> <p>Altura: 25 m</p>	
<p>Datos del proveedor:</p> <p>Claudius Peters (Americas) Inc.</p> <p>Dallas, Texas 75244, USA</p> <p>Teléfono: 972 386 4451</p> <p>Fax: 972 386 4497</p> <p>dallas@claudiuspeters.com</p>	

Hoja de especificación de equipo

Nombre: Pre-calentador DOPOL

Clave: PR-01

Función: Descarbonatación de la materia prima.

Descripción:

El equipo está conformado por cuatro tramos, los cuales están dispuestos en ciclones dobles dispuestos en paralelo; el segundo tramo llamado “recinto turbulento” está incluido como elemento único y trabaja a contracorriente. Las tuberías del tramo inferior tienen sección elíptica las cuales impiden formación de adherencia

Servicios requeridos: Energía eléctrica, aire, gas natural.

Especificaciones:

Capacidad de operación: 2500 tpd

Temperatura de diseño-Temperatura de operación

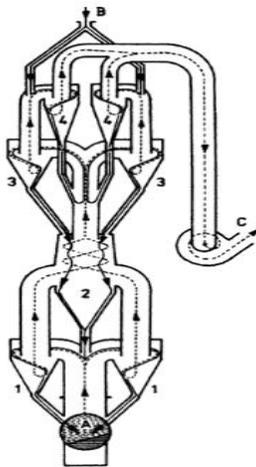
Potencia requerida: 13 kWh/tonelada de clínker

Material de construcción:

Método de fabricación:

Número de ejemplares en línea de producción: 1

Representación del equipo:



Altura:40m

A	Horno rotatorio
B	Entrada de crudo
C	Gas residual
4	Tramo IV
3	Tramo III
2	Tramo II
1	Tramo I

Tramo	No. Ciclones	Dimensiones ϕ (m)
1	2	4.5
2	1	5.8
3	2	4.5
4	2	3.95

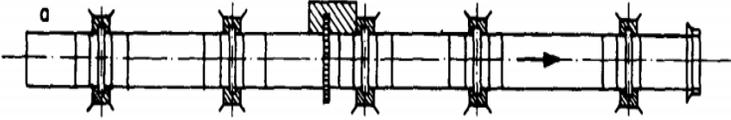
Datos del proveedor:

THYSSENKRUPP INDUSTRIAL SOLUTIONS (MEXICO) S.A. DE C.V.

Col. Lomas de Chapultepec, C.P. 11000 México, D.F.

Teléfono: 555284 0200

Fax: 555284 0102 www.thyssenkrupp-industrial-solutions-mexico.com

Hoja de especificación de equipo	
Nombre: Horno rotatorio	Clave: HO-01
Función: Completar las reacciones de clinkerización.	
Descripción: El cilindro del horno se aloja en aros dentados sobre dos rodillos basculantes, cuenta con obturaciones neumáticas de entrada y salida del horno y una teja de entrada enfriada por aire.	
Servicios requeridos: Energía eléctrica y aire.	
Especificaciones: Capacidad de operación: 2500 tpd Temperatura de diseño: 1800°C Temperatura de operación: 1500 °C Presión de diseño: Presión de operación: Grado de llenado: 12% Inclinación del horno: 3.5% Velocidad de rotación: 2.3 rpm Potencia: 4.6 m ³ /Kw	
Material de construcción:	
Método de fabricación:	
Número de ejemplares en línea de producción: 1	
Dimensiones: Diámetro: 4.10 m Longitud: 57 m Espesor del refractario: 22.8 cm Diámetro de los ejes de los rodillos de rodadura: 4.42 m Diámetro de los rodillos de rodadura: 106.7 cm	
Datos del proveedor: THYSSENKRUPP INDUSTRIAL SOLUTIONS (MEXICO) S.A. DE C.V. Col. Lomas de Chapultepec, C.P. 11000 México, D.F. Teléfono: 555284 0200 Fax: 555284 0102 www.thyssenkrupp-industrial-solutions-mexico.com	

Hoja de especificación de equipo	
Nombre: Enfriador de parrilla RECUPOL	Clave: EN-01
Función: Enfriar el clínker para el proceso de molienda.	
Descripción: Es enfriador de parrilla móvil, ampliamente extendido. La parrilla consiste en una correa o cadena sin fin, formada por elementos sueltos. Durante el proceso de enfriamiento, el clínker permanece sobre las placas de la parrilla móvil, las cuales, estando en constante movimiento, tan sólo se exponen por breve tiempo a temperaturas elevadas. Logra enfriar el clínker hasta 60 °C	
Servicios requeridos: Energía eléctrica y aire.	
Especificaciones: Capacidad de operación: 2500 tpd 12 cámaras con 2 ventiladores cada una Temperatura de diseño: Temperatura de operación: Presión de diseño: 100 mbar Presión de operación: 70 mbar Potencia: 6.5 kWh/tonelada de clínker Inclinación: 5° Velocidad de parrilla: 15 min ⁻¹	
Material de construcción:	
Método de fabricación:	
Número de ejemplares en línea de producción: 1	
Dimensiones: Ancho: 6 m Largo: 15 m	
Corte longitudinal	
Datos del proveedor: THYSSENKRUPP INDUSTRIAL SOLUTIONS (MEXICO) S.A. DE C.V. Col. Lomas de Chapultepec, C.P. 11000 México, D.F. Teléfono: 555284 0200 Fax: 555284 0102 www.thyssenkrupp-industrial-solutions-mexico.com	

Hoja de especificación de equipo	
Nombre: Silo de almacenamiento de clínker	Clave: SC-01
Función: Almacenar el clínker que sale del proceso de calcinación.	
Descripción: El silo de clínker es una estructura circular de concreto reforzado. El silo cuenta con una única entrada y con una salida la cual se dirige al molino de cemento.	
Servicios requeridos: Energía eléctrica.	
Especificaciones: Capacidad de almacenamiento: 1000 toneladas Temperatura de diseño y operación únicamente ambiente. Presión de diseño y operación únicamente ambiente. Grosor de las paredes del silo: 40 cm Potencia: 15 HP	
Material de construcción: Concreto	
Método de fabricación:	
Número de ejemplares en línea de producción: 1	
Dimensiones: <div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <div style="text-align: center;"> <p>Diámetro: 8.5 m</p> <p>Altura: 25 m</p> </div> <div style="text-align: center;">  </div> </div>	
Datos del proveedor: THYSSENKRUPP INDUSTRIAL SOLUTIONS (MEXICO) S.A. DE C.V. Col. Lomas de Chapultepec, C.P. 11000 México, D.F. Teléfono: 555284 0200 Fax: 555284 0102 www.thyssenkrupp-industrial-solutions-mexico.com	

Hoja de especificación de equipo

Nombre: Molino Vertical LM 31.3

Clave: MV-02

Función: Moler el clínker con los aditivos para convertirlo en cemento

Descripción:

El clínker y el yeso se tritura entre la pista giratoria de molienda y los rodillos e molienda guiados de forma individual. El equipo consta de rodillos cónicos, cuyos ejes están inclinados 15° con respecto a la pista de molienda horizontal. Los rodillos están conectados por pares a una unidad hidráulica.

Servicios requeridos: Energía eléctrica, aire comprimido y gases calientes.

Especificaciones:

Capacidad de operación: 100-210 tph

Temperatura de diseño y operación únicamente ambiente.

Presión de diseño y operación únicamente ambiente.

Humedad: <25%

Potencia requerida: 1810 kw

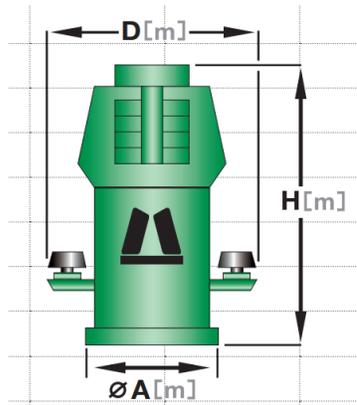
Material de construcción:

Método de fabricación:

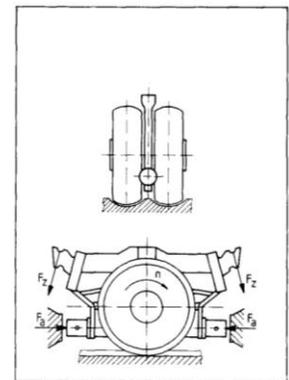
Número de ejemplares en línea de producción: 2

Dimensiones:

	H	A	D
M	11.7	7.0	11.0



Vista superior



Datos del proveedor:

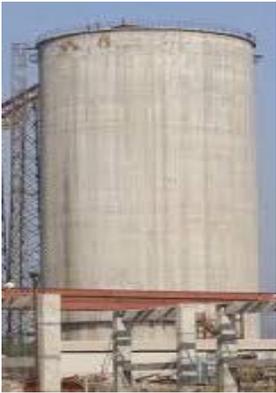
Loesche America, Inc.

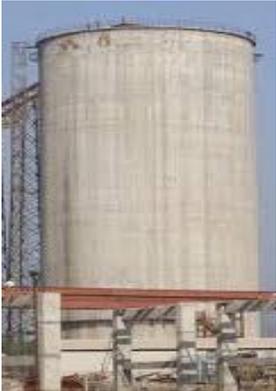
Florida 33029, USA

Teléfono: 954-602 14 24

Fax: 954-602 14 23

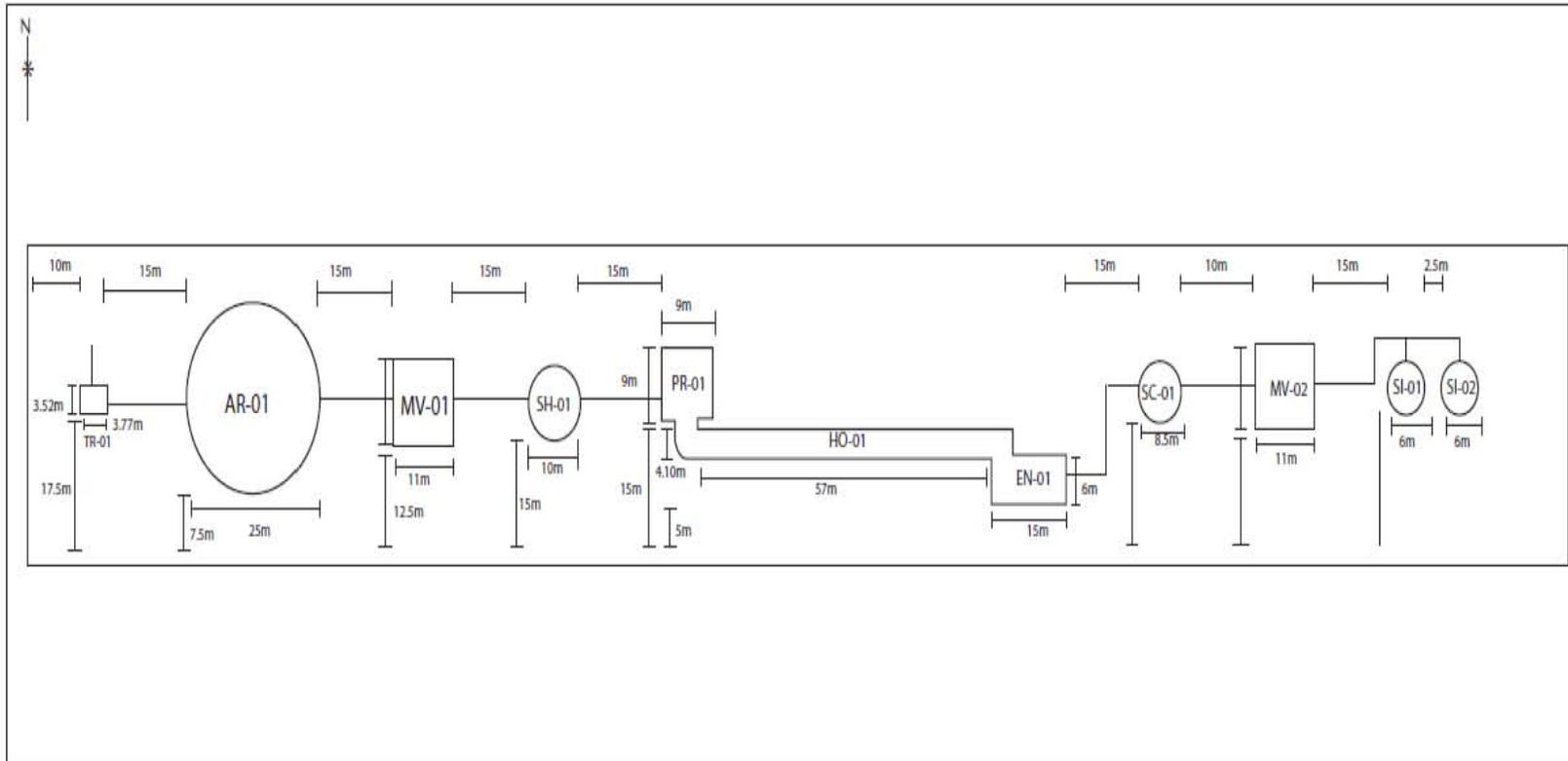
www.loescheamerica.com

Hoja de especificación de equipo	
Nombre: Silo de almacenamiento de cemento.	Clave: SI-01
Función: Almacenar el cemento listo para su venta a granel.	
Descripción: Este silo es el encargado de alimentar a los carros que cargan cemento a granel, tendrá una elevación respecto al suelo de 4.2 metros para que los carros puedan cargar el cemento. La descarga será por la parte inferior del silo.	
Servicios requeridos: Energía eléctrica.	
Especificaciones: Capacidad de almacenamiento: 500 toneladas Temperatura de diseño y operación únicamente ambiente. Presión de diseño y operación únicamente ambiente. Grosor de las paredes del silo: 30 cm Potencia: 10 HP	
Material de construcción: Concreto	
Método de fabricación:	
Número de ejemplares en línea de producción: 2	
Dimensiones: Diámetro: 5.96 m Altura: 17 m	
	
Datos del proveedor: THYSSENKRUPP INDUSTRIAL SOLUTIONS (MEXICO) S.A. DE C.V. Col. Lomas de Chapultepec, C.P. 11000 México, D.F. Teléfono: 555284 0200 Fax: 555284 0102 www.thyssenkrupp-industrial-solutions-mexico.com	

Hoja de especificación de equipo	
Nombre: Silo de almacenamiento de cemento.	Clave: SI-02
Función: Almacenar el cemento que va para la empacadora.	
Descripción: En este silo se encuentra almacenado el cemento que alimenta a la empacadora, se encuentra fijo en el suelo, el transporte de cemento a la empacadora se hará por medio de gusanos helicoidales.	
Servicios requeridos: Energía eléctrica.	
Especificaciones: Capacidad de almacenamiento: 500 toneladas Temperatura de diseño y operación únicamente ambiente. Presión de diseño y operación únicamente ambiente. Grosor de las paredes del silo: 30 cm Potencia: 10 HP	
Material de construcción: Concreto	
Método de fabricación:	
Número de ejemplares en línea de producción: 2	
Dimensiones: Diámetro: 5.96 m Altura: 17 m <div style="text-align: center; margin-top: 10px;">  </div>	
Datos del proveedor: THYSSENKRUPP INDUSTRIAL SOLUTIONS (MEXICO) S.A. DE C.V. Col. Lomas de Chapultepec, C.P. 11000 México, D.F. Teléfono: 555284 0200 Fax: 555284 0102 www.thyssenkrupp-industrial-solutions-mexico.com	

Hoja de especificación de equipo	
Nombre: Empacadora	Clave: EM-01
Función: Llenado de sacos de cemento de 50 Kg.	
Descripción: La empacadora tiene una función rotativa compuesta por 6 boquillas que llevan a cabo el llenado de los sacos de cemento.	
Servicios requeridos: Energía eléctrica y aire.	
Especificaciones: Capacidad de operación: 1100 sacos/h Tiempo de llenado: 14 s Tiempo por vuelta: 19.6 s Velocidad: 3.08 rpm Tiempo entre cada saco: 2.28 s Potencia del motor: 5 kW	
Material de construcción:	
Método de fabricación:	
Número de ejemplares en línea de producción: 1	
Representación esquemática: 	
Datos del proveedor: FLSmidth Ventomatic S.p.A via G. Marconi, 20 24030 Valbrembo (Bergamo) Italy tel. +39 035 468 311 fax +39 035 460 838 vento@flsmidthventomatic.com	

3.3 Diagrama de distribución de equipo



Trituradora de cono	TR-01
Aplificador Reclamador	AR-01
Molino vertical	MV-01
Silo de homogeneización	SH-01
Pre-calentador de ciclones	PR-01
Horno rotatorio	HO-01
Enfriador de parrillas	EN-01
Silo de almacenamiento de clinker	SC-01
Molino vertical	MV-02
Silo de almacenamiento de cemento	SI-01
Silo de almacenamiento de cemento	SI-02
Empacadora	EM-01

Capítulo 4

En este capítulo se hace la elección de la subestación que sea capaz de satisfacer las necesidades de energía eléctrica en la planta. Es necesario calcular la potencia requerida total, en la cual se debe de considerar la potencia de los motores de cada equipo, así como la potencia generada por la iluminación de cada zona de la planta.

4.1 Potencia necesaria para iluminar cada área de la planta

Esta iluminación se va a generar a partir de lámparas y luminarias. Las luminarias son aparatos que distribuyen, filtran o transforman la luz emitida por una o varias lámparas y que contienen todos los elementos necesarios para fijarlas, protegerlas y conectarlas al circuito de alimentación. (Sanz y Toledano, 2009). Existen distintos tipos de lámparas según Enríquez (2007):

- Lámparas incandescentes: Se usan principalmente para alumbrado interior (casas, oficinas, negocios) debido a su bajo costo, la facilidad de su instalación y a que funcionan en cualquier posición. No obstante su rendimiento es bajo debido a que una gran parte de la energía consumida se transforma en calor. Este tipo de lámparas se especifican por la potencia eléctrica que consumen y la cantidad de luz que producen, teniendo una vida útil de alrededor de 1000 horas.
- Lámparas fluorescentes: Las lámparas fluorescentes producen la luz debido a que existe una descarga eléctrica que excita el gas contenido en el tubo generando una radiación sobre todo en el campo de la luz ultravioleta, tales radiaciones se dirigen hacia la substancia fluorescente dispuesta en las paredes internas del tubo y se transforma en energía luminosa. La duración media de una lámpara fluorescente de cátodo caliente es

de alrededor de 7500 horas; el campo de empleo se encuentra principalmente en la iluminación de oficina, negocios e industrias. Estas lámparas tienen una buena eficiencia luminosa por lo que el costo de operación es bajo, sin embargo el costo de adquisición es mayor respecto a la lámpara incandescente.

- Lámparas halógenas: Las lámparas halógenas proporcionan una fuente compacta de luz de alta producción que ha revolucionado el mundo de la iluminación. A diferencia de las lámparas incandescentes estándar, las lámparas halógenas utilizan gas halógeno que les permite tener un encendido más brillante sin sacrificar la duración. Al convertir la electricidad en luz aumenta su eficiencia y permite a las lámparas halógenas típicas ofrecer más luz con menos energía y con un tamaño físico más pequeño. Ofrecen una duración más larga, de hasta seis veces la vida media estimada de una lámpara incandescente.
- Lámparas de sodio de alta presión: Las lámparas de sodio de alta presión a menudo se utilizan cuando a largo plazo es más importante la economía que una reproducción precisa del color. Son altamente eficaces y producen un color amarillo cálido apropiado para la iluminación de:
 - Parques extensos
 - Centros comerciales
 - Calzadas
 - Áreas de entretenimiento

Según la NOM-025-STPS-2008, “Condiciones de iluminación en los centros de trabajo”.

Los niveles mínimos de iluminación que deben incidir en el plano de trabajo, para casa tipo de tarea visual o área de trabajo, son establecidos en la tabla 31.

Tabla 31*Niveles de iluminación en el plan de trabajo*

Tarea Visual del Puesto de Trabajo	Área de Trabajo	Categoría	Niveles Mínimos de Iluminación (luxes)
En exteriores: distinguir el área de tránsito, desplazarse caminando, vigilancia, movimiento de vehículos.	Exteriores generales: patios y estacionamientos.	A	20
En interiores: distinguir el área de tránsito, desplazarse caminando, vigilancia, movimiento de vehículos.	Interiores generales: almacenes de poco movimiento, pasillos, escaleras, estacionamientos cubiertos, labores en minas subterráneas, iluminación de emergencia.	B	50
En interiores.	Áreas de circulación y pasillos; salas de espera; salas de descanso; cuartos de almacén; plataformas; cuartos de calderas.	C	100
Requerimiento visual simple: inspección visual, recuento de piezas, trabajo en banco y máquina.	Servicios al personal: almacenaje rudo, recepción y despacho, casetas de vigilancia, cuartos de compresores y pailería.	D	200
Distinción moderada de detalles: ensamble simple, trabajo medio en banco y máquina, inspección simple, empaque y trabajos de oficina.	Talleres: áreas de empaque y ensamble, aulas y oficinas.	E	300

Distinción clara de detalles: maquinado y acabados delicados, ensamble de inspección moderadamente difícil, captura y procesamiento de información, manejo de instrumentos y equipo de laboratorio.	Talleres de precisión: salas de cómputo, áreas de dibujo, laboratorios.	F	500
Distinción fina de detalles: maquinado de precisión, ensamble e inspección de trabajos delicados, manejo de instrumentos y equipo de precisión, manejo de piezas pequeñas.	Talleres de alta precisión: de pintura y acabado de superficies y laboratorios de control de calidad.	G	750
Alta exactitud en la distinción de detalles: ensamble, proceso e inspección de piezas pequeñas y complejas, acabado con pulidos finos.	Proceso: ensamble e inspección de piezas complejas y acabados con pulidos finos.	H	1,000
Alto grado de especialización en la distinción de detalles.	Proceso de gran exactitud. Ejecución de tareas visuales: de bajo contraste y tamaño muy pequeño por periodos prolongados; exactas y muy prolongadas, y	I	2,000

De acuerdo a la tabla anterior, se va a clasificar el nivel de iluminación que se debe de tener en cada zona de la planta, además del tipo de lámpara que se utilizará, los datos se muestran en la tabla 32:

Tabla 32

Tipo de lámpara en cada zona

# de Área	Nombre de Área	Superficie (m ²)	Categoría de iluminación	Nivel de iluminación (luxes)	Tipo de lámpara
1	Caseta de vigilancia	6.25	D	200	Fluorescente
2	Recepción	150	C	100	Fluorescente
3	Área de Producción	12000	G	750	Halogenuro
4	Almacén de materia primas	1800	C	100	Halogenuro
5	Almacén general	1200	C	100	Halogenuro
6	Almacén producto envasado	1500	D	200	Halogenuro
7	Taller de Mantenimiento	400	E	300	Halogenuro
8	Oficinas	150	E	300	Fluorescente
9	Cuarto de control	60	F	500	Fluorescente
10	Área de calidad	60	G	750	Fluorescente
11	Subestación	300	C	100	Fluorescente
12	Báscula	50	A	20	Fluorescente
13	Tratamiento de aguas	100	C	100	Halogenuro
14	Área de desechos	200	A	20	Alta presión de sodio
15	Comedor	100	D	200	Fluorescente
16	Servicio médico	25	D	200	Fluorescente

17	Baños y vestidores	60	D	200	Fluorescente
18	Baños	50	D	200	Fluorescente
19	Estacionamiento general	450	A	20	Alta presión de sodio
20	Estacionamiento	700	A	20	Alta presión de sodio
21	Áreas verdes	450	A	20	Alta presión de sodio

Como indica Enríquez (2007) para obtener el número de lámparas que se utilizarán en cada zona y así conocer el número de watts necesarios, se realizan los siguientes cálculos:

1. Se debe de conocer la potencia y el flujo luminoso que ofrece la lámpara. En la tabla 33 se encuentran los datos técnicos de las lámparas que se utilizarán:

Tabla 33
Datos técnicos de diversas lámparas

Tipo de lámpara	Potencia (Watt)	Flujo luminoso (lux)
Fluorescente	150	9000
Halogenuro	400	8000
Alta presión de sodio	150	20000

Nota: Obtenido de http://www.lanin.com/Info_tecnica/pres_3.htm

2. Obtener el índice del local:

$$k = \frac{(x)(y)}{h(x + y)}$$

Dónde:

x = largo del área (m)

y = ancho del área (m)

h = altura de la luminaria respecto al suelo (m)

3. Determinar el factor de reflexión de techo y paredes.

El factor de reflexión se muestra en la Tabla 34:

Tabla 34
Factor de reflexión de techo y paredes

	Color	Factor de reflexión
Techo	Blanco o muy claro	0.7
	Claro	0.5
	Medio	0.3
Paredes	Claro	0.5
	Medio	0.3
	Oscuro	0.1

Nota: Obtenido de <http://recursos.citcea.upc.edu/llum/interior/iluint2.html>

4. Determinar el factor de utilización (η), es cual se calcula a partir del índice del local el factor de reflexión.

Se muestra en la tabla 35:

Tabla 35
Luminaria industrial suspendida

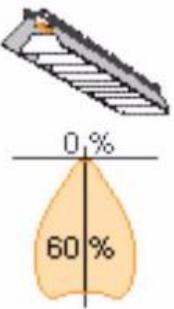
Tipo de aparato de alumbrado	Índice del local k	Factor de utilización (η)																																	
		Factor de reflexión del techo																																	
		0.8				0.7				0.5				0.3				0																	
Factor de reflexión de las paredes																																			
0.5												0.3												0.1											
 0% 85%	0.6	.37	.32	.29	.37	.32	.29	.37	.32	.29	.32	.29	.28																						
	0.8	.47	.42	.38	.46	.42	.38	.46	.41	.38	.41	.38	.37																						
	1.0	.54	.48	.45	.54	.48	.45	.53	.48	.45	.48	.45	.43																						
	1.25	.60	.56	.52	.60	.55	.52	.60	.55	.52	.54	.52	.50																						
	1.5	.66	.61	.57	.65	.60	.57	.64	.60	.57	.59	.56	.55																						
	2.0	.72	.67	.64	.71	.67	.64	.70	.66	.63	.66	.63	.62																						
	2.5	.76	.71	.68	.75	.71	.68	.73	.71	.68	.70	.67	.65																						
	3.0	.79	.75	.72	.78	.75	.71	.77	.73	.71	.72	.71	.69																						
	$D_{max} = 1.1 H_m$	4.0	.82	.79	.77	.81	.79	.76	.80	.77	.75	.76	.75	.73																					
	f_m	.55	.60	.65	5.0	.84	.82	.79	.83	.81	.78	.82	.79	.77	.75																				

H_m : altura luminaria-plano de trabajo

Nota: Tomada de <http://recursos.citcea.upc.edu/llum/interior/iluint3.html>

En la tabla 36 se muestra el factor de utilización de la luminaria en reja:

Tabla 36
Luminaria en reja

Tipo de aparato de alumbrado	Índice del local k	Factor de utilización (η)																					
		Factor de reflexión del techo																					
		0.8			0.7			0.5			0.3			0									
		Factor de reflexión de las paredes																					
												0.5	0.3	0.1	0.5	0.3	0.1	0.5	0.3	0.1	0.3	0.1	0
	0.6	.30	.26	.25	.29	.26	.23	.29	.26	.23	.25	.23	.22										
	0.8	.36	.32	.29	.35	.32	.29	.35	.31	.29	.31	.29	.27										
	1.0	.43	.40	.37	.43	.40	.37	.42	.39	.37	.39	.37	.36										
	1.25	.47	.44	.42	.47	.44	.41	.46	.43	.41	.43	.41	.40										
	1.5	.50	.47	.44	.50	.47	.44	.49	.46	.44	.46	.44	.43										
	2.0	.53	.50	.49	.53	.50	.48	.51	.50	.48	.49	.47	.46										
	2.5	.55	.53	.51	.55	.53	.51	.54	.52	.50	.51	.50	.49										
	3.0	.57	.54	.53	.56	.54	.52	.55	.53	.51	.52	.51	.50										
	$D_{max} = 0.8 H_m$	4.0	.59	.57	.55	.58	.56	.55	.56	.55	.54	.54	.53	.52									
	f_m .65 .70 .75	5.0	.60	.58	.57	.59	.57	.56	.57	.56	.56	.56	.54	.53									

H_m : altura luminaria-plano de trabajo

Nota: Tomada de <http://recursos.citcea.upc.edu/llum/interior/iluint3.html>

5. Determinar el factor de mantenimiento (f_m), el cual dependerá del grado de suciedad ambiental y de la frecuencia de la limpieza del local. Los datos se muestran en la tabla 37:

Tabla 37
Factor de mantenimiento

Ambiente	Factor de mantenimiento (f_m)
Limpio	0.8
Sucio	0.6

Nota: Obtenida de (Enríquez, 2007)

6. Cálculo del flujo luminoso total.

$$\phi_T = \frac{E \times S}{\eta \times f_m}$$

Dónde:

ϕ_T = Flujo luminoso total (lux)

E = Iluminancia media deseada (lux)

η = Factor de utilización

f_m = Factor de mantenimiento

7. Cálculo del número de luminarias

$$N = \frac{\phi_T}{n \times \phi_L}$$

Dónde:

N = Número de luminarias

ϕ_L = Flujo luminoso de una lámpara (lux)

n = Número de lámparas por luminaria

8. Cálculo de la potencia de todas las luminarias

$$P_T = P \times N$$

Dónde:

P_T = Potencia total (Watt)

P = Potencia de la lámpara

N = Número de luminarias

- Ejemplo del área #2

→Se usará una lámpara fluorescente con luminaria en reja, por lo que:

$$k = \frac{(10)(15)}{4(10 + 15)} = 1.5$$

→Se considera:

Factor de reflexión de techo: 0.5

Factor de reflexión de paredes: 0.5

→Con este valor se lee en la tabla de “Luminaria de reja” el factor de utilización, el cual es de 0.49

→ Se considera un factor de mantenimiento de 0.8

$$\phi_T = \frac{100 \times 6.25}{0.49 \times 0.8} = 38265.31 \text{ lux}$$

$$N_L = \frac{38265.31 \text{ lux}}{1 \times 9000 \text{ lux}} = 4.25$$

$$N_{Lreal} = 5 \text{ luminarias}$$

La potencia requerida en esa zona es:

$$P_T = 150 \text{ W} \times 5 = 750 \text{ W} = 0.75 \text{ KW}$$

En la tabla 38 se muestran los resultados de todas las áreas.

Tabla 38

Potencia requerida en cada zona de la planta

# de Área	lux	Tipo de lámpara	X	Y	h	k	Ft	Fp	η	Fm	ϕ_T	N_L	N_L real	(Watts)	KW
1	200	Fluorescente	2.5	2.5	4	0.5	0.5	0.5	0.29	0.8	5387.93	0.60	1	150	0.15
2	100	Fluorescente	10	15	4	1.5	0.5	0.5	0.49	0.8	38265.31	4.25	5	750	0.75
3	750	Halogenuro	40	300	10	3.5			0.69	0.6	21739130.4	2718	2718	1087200	1087.2
4	100	Halogenuro	60	30	10	2	0.3	0.1	0.63	0.6	476190.48	59.52	60	24000	24
5	100	Halogenuro	40	30	10	1.7	0.3	0.1	0.63	0.6	317460.32	39.68	40	16000	16
6	200	Halogenuro	50	30	10	1.8	0.3	0.1	0.63	0.6	793650.79	99.21	100	40000	40
7	300	Halogenuro	20	20	7	1.4	0.3	0.1	0.56	0.6	357142.86	44.64	45	18000	18
8	300	Fluorescente	10	15	4	1.5	0.5	0.5	0.49	0.8	114795.92	12.76	13	5850	5.85
9	500	Fluorescente	6	10	4	0.9	0.5	0.5	0.42	0.8	89285.71	9.92	10	1500	1.5
10	750	Fluorescente	6	10	4	0.9	0.5	0.5	0.42	0.8	133928.57	14.88	15	2250	2.25
11	100	Fluorescente	15	20	4	2.1	0.3	0.3	0.49	0.6	102040.82	11.34	12	1800	1.8
12	20	Fluorescente	5	10	6	0.5			0.28	0.6	5952.38	0.66	1	150	0.15
13	100	Halogenuro	10	10	4	1.2	0.3	0.3	0.54	0.6	30864.20	3.86	4	1600	1.6
14	20	Alta presión	10	20	6	1.1	0.3	0.3	0.48	0.6	13888.89	0.69	1	150	0.15
15	200	Fluorescente	10	10	4	1.2	0.5	0.5	0.46	0.8	54347.83	6.04	7	1050	1.05
16	200	Fluorescente	5	5	4	0.6	0.5	0.5	0.29	0.8	21551.72	2.39	3	450	0.45
17	200	Fluorescente	6	10	4	0.9	0.5	0.5	0.42	0.8	35714.29	3.97	4	600	0.6
18	200	Fluorescente	5	10	4	0.8	0.5	0.5	0.35	0.8	35714.29	3.97	4	600	0.6
19	20	Alta presión	20	45	5	2.7			0.65	0.6	46153.85	2.31	3	450	0.45
20	20	Alta presión	35	20	5	2.5			0.65	0.6	35897.44	1.79	2	300	0.3
21	20	Alta presión	15	30	5	2			0.62	0.6	24193.55	1.21	2	300	0.3
Total														1203150	1203.1

Nota: Las filas sombreadas se realizaron con la tabla de luminaria industrial suspendida.

4.2 Potencia de motores

En la Tabla 39 se muestra la potencia requerida de los motores de cada equipo que se especificó en el capítulo anterior.

Tabla 39*Potencia de cada motor*

Motor	Equipo	Clave	KW
M1	Trituradora de cono	TR-01	149.2
M2	Apilador Reclamador	AR-01	50
M3	Molino vertical	MV-01	1810
M4	Silo de homogeneización	SH-01	71.73
M5	Pre-calentador de ciclones	PR-01	719.81
M6	Horno rotatorio	HO-01	146
M7	Enfriador de parrillas	EN-01	354.36
M8	Silo de almacenamiento de clínker	SC-01	15
M9	Molino vertical	MV-02	1810
M10	Silo de almacenamiento de cemento	SI-01	10
M11	Silo de almacenamiento de cemento	SI-02	10
M12	Empacadora	EM-01	5
	Sumatoria		3856

4.3 Elección de transformador

Al tener la potencia total requerida en la iluminación de cada zona y la potencia total de los motores, se hace la suma de estos dos para poder elegir el transformador conveniente. Las ecuaciones utilizadas son las propuestas por Becerril (2002):

$$1203.1 \text{ KW} + 3856 \text{ KW} = 5059.1 \text{ KW}$$

Considerando el factor de conversión:

$$1 \text{ Hp} = 0.746 \text{ KW}$$

$$\frac{5059.1 \text{ KW}}{0.746 \text{ KW}} = 6781.63 \text{ HP}$$

Se instalará un motor trifásico, por lo tanto las ecuaciones son referidas a este, primeramente se obtiene la carga aparente (KVA)

$$KVA = \sqrt{3} \times I \times V_p$$

Para obtener el valor de I, se aplica la siguiente ecuación

$$I = \frac{746 \times (HP)}{\sqrt{3} \times V_f \times f_p \times \eta}$$

Dónde:

V_f = Tensión entre fases (440V)

f_p = Factor de potencia (0.85)

η = Eficiencia del circuito (0.9)

Sustituyendo valores:

$$I = \frac{746 \times (6781.63 \text{ HP})}{\sqrt{3} \times 440V \times 0.85 \times 0.9} = 9219.91 \text{ KA}$$

$$KVA = \sqrt{3} \times 9219.91 \text{ KA} \times \frac{440}{1000} = 7026.52 \text{ KVA}$$

De acuerdo a los resultados obtenidos se eligen un transformador trifásico de potencia. En el mercado existe 5000/6250 KVA y 7500/9375 KVA por lo tanto se elige la segunda opción. En la tabla 40, se muestran los datos técnicos del transformador.

Tabla 40*Transformador de potencia trifásico*

Característica	Valor
Potencia	7500/9375 kVA
Refrigeración	ONAN/ONAF
Clase de tensión (kV)	145
Tensión Primaria	138.0 kV \pm 2 x 2.5%
Tensión Secundaria	13800/7967 V
No. Fases	3
Conexión primaria	Delta
Conexión secundaria	Estrella con neutro exterior
Frecuencia nominal	60 Hz
Elevación de temperatura	65 °C
Impedancia	8%

Nota: Tomada de http://ecatalog.weg.net/TEC_CAT/tech_transf_ficha.asp

**Figura 5. Transformador trifásico de potencia**

Nota: Tomada de http://ecatalog.weg.net/TEC_CAT/tech_transf_ficha.asp

Dimensiones

Largo = 4700 mm

Ancho = 3200 mm

Alto = 4420 mm

Peso: 19900 Kg

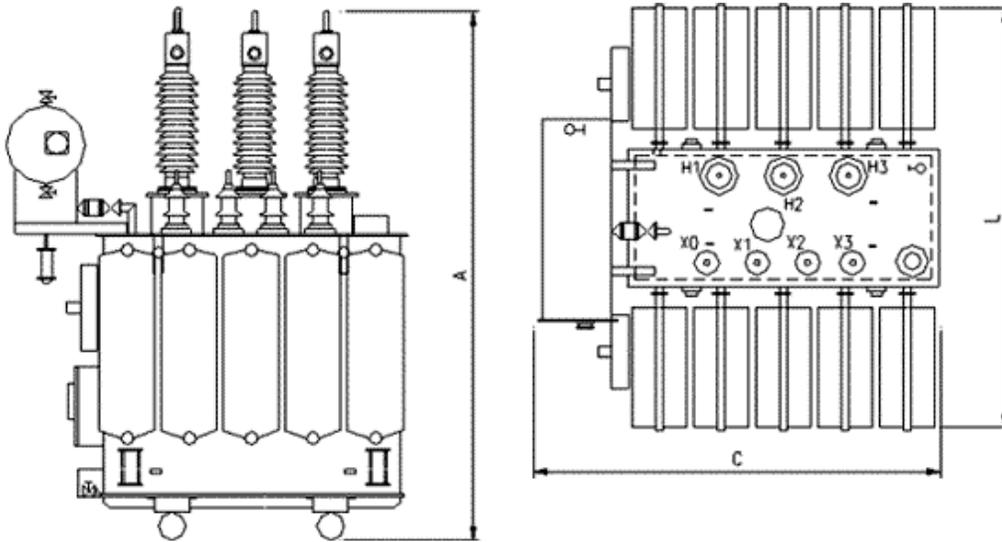


Figura 6. Vista frontal y superior del equipo
 Nota: Tomada de http://ecatalog.weg.net/TEC_CAT/tech_transf_ficha.asp

4.4 Cálculo de diámetro de tubería conduit

*Ejemplo para Motor 2

Considerando que se está trabajando en un sistema trifásico, se calcula la intensidad del motor.

$$I = \frac{W}{\sqrt{3} \times Ef \times \cos \alpha}$$

Dónde:

W = Carga (W)

Ef = Voltaje entre fases

$\cos \alpha$ = Factor de potencia (0.85)

$$I = \frac{50000}{\sqrt{3} \times 220 V \times 0.85} = 154.55 A$$

Se aplica el factor de demanda que va del 60 al 90%, para motores de procesos continuos, corresponde un factor de 70%. (Becerril, 2007).

$$I_c = I \times Fd$$

$$I_c = 154.55A \times 0.70 = 108.19 A$$

Se realiza una segunda corrección por temperatura, a partir de los valores representados en la tabla 41:

Tabla 41

Factores de corrección basados en una temperatura ambiente de 30°C

Para temperaturas ambiente distintas de 30 °C, multiplique las anteriores ampacidades permisibles por el factor correspondiente de los que se indican a continuación:			
Temperatura ambiente (°C)	Rango de temperatura del conductor		
	60 °C	75 °C	90 °C
10 o menos	1.29	1.20	1.15
11-15	1.22	1.15	1.12
16-20	1.15	1.11	1.08
21-25	1.08	1.05	1.04
26-30	1.00	1.00	1.00
31-35	0.91	0.94	0.96
36-40	0.82	0.88	0.91
41-45	0.71	0.82	0.87
46-50	0.58	0.75	0.82
51-55	0.41	0.67	0.76
56-60	-	0.58	0.71
61-65	-	0.47	0.65
66-70	-	0.33	0.58
91-75	-	-	0.50
76-80	-	-	0.41
81-85	-	-	0.29

Nota: Tomado de (NOM-001-SEDE-2012)

Considerando una temperatura ambiente de 23°C y una temperatura del conductor de 75°C

$$I_c = 108.19 A \times 1.05 = 113.60 A$$

A partir de la corriente corregida, en la Tabla 42 se observa que se necesita un conductor del número 1.

*El aislamiento de todas las tuberías será THW, además en cada tubo conduit se tendrán 4 cables.

Tabla 42

Ampacidades de conductores en una canalización al aire libre, con base a una temperatura ambiente de 30°C

Tamaño mm ²	Designación (AWG o kcmil)	Temperatura nominal del conductor [véase la Tabla 310-104(a)]				
		60 °C	75 °C	90 °C	75 °C	90 °C
		Tipo TW, UF	Tipo RHW, THHW, THW, THWN, XHHW, ZW	Tipo THHN, THHW, THW-2, THWN-2, RHH, RWH-2, USE-2, XHHW, XHHW-2, ZW-2	Tipo RHW, XHHW	Tipo RHH, RWH-2, USE-2, XHHW, XHHW-2, ZW-2
COBRE			ALUMINIO O ALUMINIO RECUBIERTO DE COBRE			
2.08	14	16**	18**	21**	—	—
3.31	12	20**	24**	27**	—	—
5.261	10	27**	33**	36**	—	—
8.367	8	36	43	48	—	—
13.3	6	48	58	65	45	51
21.15	4	66	79	89	61	69
26.67	3	76	90	102	70	79
33.62	2	88	105	119	83	93
42.41	1	102	121	137	95	106
53.49	1/0	121	145	163	113	127
67.43	2/0	138	166	186	129	146
85.01	3/0	158	189	214	147	167
107.2	4/0	187	223	253	176	197

Nota: Tomado de (NOM-001-SEDE-2012)

En la tabla 43, con el tamaño y el aislante ya designado, podemos conocer el área aproximada la cual es de 109.5 mm²

Tabla 43*Área y diámetro aproximado de diferentes conductores*

Área	Tamaño	Conductor desnudo	Tipos THW y THHW		Tipo THHN		Tipo XHHW	
		Diámetro	Diámetro aproximado	Área aproximada	Diámetro aproximado	Área aproximada	Diámetro aproximado	Área aproximada
mm ²	AWG o kcmil	mm	mm	mm ²	mm	mm ²	mm	mm ²
8.37	8	3.404	6.477	32.9	—	—	5.69	25.42
13.3	6	4.293	7.366	42.58	6.096	29.16	6.604	34.19
21.2	4	5.41	8.509	56.84	7.747	47.10	7.747	47.1
33.6	2	6.807	9.906	77.03	9.144	65.61	9.144	65.61
42.4	1	7.595	11.81	109.5	10.54	87.23	10.54	87.23
53.5	1/0	8.534	12.7	126.6	11.43	102.6	11.43	102.6
67.4	2/0	9.55	13.84	150.5	12.57	124.1	12.45	121.6
85.0	3/0	10.74	14.99	176.3	13.72	147.7	13.72	147.7
107	4/0	12.07	16.38	210.8	15.11	179.4	14.99	176.3
127	250	13.21	18.42	266.3	17.02	227.4	16.76	220.7
152	300	14.48	19.69	304.3	18.29	262.6	18.16	259
177	350	15.65	20.83	340.7	19.56	300.4	19.3	292.6
203	400	16.74	21.97	379.1	20.7	336.5	20.32	324.3
253	500	18.69	23.88	447.7	22.48	396.8	22.35	392.4
304	600	20.65	26.67	558.6	25.02	491.6	24.89	486.6
355	700	22.28	28.19	624.3	26.67	558.6	26.67	558.6
380	750	23.06	29.21	670.1	27.31	585.5	27.69	602
456	900	25.37	31.09	759.1	30.33	722.5	29.69	692.3
507	1000	26.92	32.64	836.6	31.88	798.1	31.24	766.6

Nota: Tomado de (NOM-001-SEDE-2012)

Debido a que son 4 conductores:

$$109.5\text{mm}^2 \times 4 = 438\text{mm}^2$$

En la tabla 44 se ubica en la columna de más de dos conductores se obtiene el diámetro del tubo conduit, el cual corresponde a 2”

Tabla 44*Tubo conduit metálico pesado (RMC)*

Artículo 344 –Tubo conduit metálico pesado (RMC)							
Designación métrica	Tamaño comercial	Diámetro interno mm	100% del área total mm ²	60% del área total mm ²	Un conductor fr = 53% mm ²	Dos conductores fr = 31% mm ²	Más de 2 conductores fr = 40% mm ²
12	3/8	—	—	—	—	—	—
16	1/2	16.10	204	122	108	63	81
21	3/4	21.20	353	212	187	109	141
27	1	27.00	573	344	303	177	229
35	1 1/4	35.40	984	591	522	305	394
41	1 1/2	41.20	1333	800	707	413	533
53	2	52.90	2198	1319	1165	681	879
63	2 1/2	63.20	3137	1882	1663	972	1255
78	3	78.50	4840	2904	2565	1500	1936
91	3 1/2	90.70	6461	3877	3424	2003	2584
103	4	102.90	8316	4990	4408	2578	3326
129	5	128.90	13050	7830	6916	4045	5220
155	6	154.80	18821	11292	9975	5834	7528

Nota: Tomado de (NOM-001-SEDE-2012)

Cuando se tienen ampacidades mayores de 223, entonces se prosigue a leer en la tabla 45:

Tabla 45*Tamaño mínimo de conductores puesto a tierra*

Capacidad o ajuste del dispositivo automático de protección contra sobrecorriente en el circuito antes de los equipos, canalizaciones, etc., sin exceder de: (amperes)	Tamaño			
	Cobre		Cable de aluminio o aluminio con cobre	
	mm ²	AWG o kcmil	mm ²	AWG o kcmil
15	2.08	14	—	—
20	3.31	12	—	—
60	5.26	10	—	—
100	8.37	8	—	—
200	13.30	6	21.20	4
300	21.20	4	33.60	2
400	33.60	2	42.40	1
500	33.60	2	53.50	1/0
600	42.40	1	67.40	2/0
800	53.50	1/0	85.00	3/0
1000	67.40	2/0	107	4/0
1200	85.00	3/0	127	250
1600	107	4/0	177	350
2000	127	250	203	400
2500	177	350	304	600
3000	203	400	304	600
4000	253	500	380	750
5000	355	700	608	1200
6000	405	800	608	1200

Nota: Tomado de (NOM-001-SEDE-2012, p.151)

*Ejemplo para Motor 1

$$I = \frac{149200}{\sqrt{3} \times 220 \text{ V} \times 0.85} = 461.19 \text{ A}$$

$$I_c = 461.19 \text{ A} \times 0.70 = 322.83 \text{ A}$$

Leyendo en la Tabla 45 se obtiene un tamaño de 2 AWG y se prosigue a hacer las lecturas en las tablas siguientes.

En la tabla 46 se muestran los resultados de tubería conduit correspondientes a cada motor:

Tabla 46
Diámetro nominal de tubo conduit en cada motor

Motor	KW	W	I	Ic	Ic ₂	AWG	Área aprox. mm ²	Área aprox. mm ² (4 cables)	Diámetro nominal
M1	149.2	149200	461.19	322.83	---	2	77.03	308.12	1 1/4"
M2	50	50000	154.55	108.19	113.60	1	109.5	438	1 1/2"
M3	1810	1810000	5594.88	3916.42	---	500	836.6	3346.4	5"
M4	71.73	71730	221.72	155.21	162.97	2/0	150.5	602	2"
M5	719.81	719810	2225.00	1557.50	---	4/0	210.8	843.2	2"
M6	146	146000	451.30	315.91	---	2	77.03	308.12	1 1/4"
M7	354.36	354360	1095.36	766.75	---	1/0	126.6	506.4	1 1/2"
M8	15	15000	46.37	32.46	34.08	8	32.9	131.6	3/4"
M9	1810	1810000	5594.88	3916.42	---	500	836.6	3346.4	5"
M10	10	10000	30.91	21.64	22.72	12	11.68	46.72	1/2"
M11	10	10000	30.91	21.64	22.72	12	11.68	46.72	1/2"
M12	5	5000	15.46	10.82	11.36	14	8.968	35.872	1/2"

4.5 Elección de subestación

De acuerdo al transformador elegido de 7500/9375 KVA se hacen los cálculos de operación correspondientes para elegir la subestación adecuada. (Enríquez, 2005).

- Cálculo de la protección de alta tensión.

En primer lugar es necesario conocer la corriente nominal en alta tensión

$$I_{Nom.A.T} = \frac{KVA \text{ Transformador}}{\sqrt{3} \times KV_{Nom.A.T}}$$

Los valores se encuentran en la tabla 40.

$$I_{Nom.A.T} = \frac{9375 \text{ KVA}}{\sqrt{3} \times 145 \text{ KV}} = 37.32 \text{ A}$$

Para conocer la protección de alta tensión es necesario multiplicar el valor anterior por el 200%.

$$I_{Nom.A.T} = 37.32 \text{ A} \times 2 = 74.64 \text{ A}$$

Como protección para el transformador se utilizará un interruptor, para elegirlo se necesitan los cálculos siguientes.

-Cálculo del interruptor general de baja tensión

Es necesario calcular la corriente nominal en el lado de baja tensión para elegir el interruptor.

$$I_{Nom.B.T} = \frac{KVA \text{ Transformador}}{\sqrt{3} \times KV_{Nom.B.T}}$$

$$I_{pc_{Nom.B.T}} = \frac{9375 \text{ KVA}}{\sqrt{3} \times 0.22 \text{ KV}} = 24602.99 \text{ A}$$

-Capacidad interruptiva

La capacidad interruptiva nos sirve para determinar si el interruptor seleccionado será de alta o baja capacidad interruptiva.

Se calcula el corto circuito por el método de bus infinito

$$I_{cc} = I_{nom} \times I_{p.u.}$$

$$I_{nom} = \frac{9375 \text{ KVA}}{\sqrt{3} \times 0.440 \text{ KV}} = 12301.5 \text{ A}$$

$$I_{p.u.} = \frac{1}{Z}$$

Dónde:

Z es la impedancia del transformador, dato mostrado en la ficha técnica de este.

Si el voltaje es de 0440V=1p.u. y la impedancia de 8%=0.08 p.u.

Entonces:

$$I_{p.u.} = \frac{1}{0.08} = 12.5 \text{ p.u.}$$

Sustituyendo valores

$$I_{cc} = 12301.5 \text{ A} \times 12.5 \text{ p.u.} = 153768.75 \text{ A} = 153.76 \text{ KA}$$

Se elige un interruptor de alta capacidad interruptiva. Modelo 3AP1 SIEMENS, para una tensión nominal de 145 kV y corriente nominal de hasta 4000 A.

-Selección de apartarrayos

Para seleccionar el apartarrayos que protegerá al transformador se aplica la siguiente ecuación:

$$KV_L = \frac{KV_{Nom.A.T}}{\sqrt{3}} = \frac{145 \text{ KV}}{\sqrt{3}} = 83.71 \text{ KV}$$

El voltaje en el apartarrayos debe seleccionarse al 150% del voltaje obtenido

$$V_{apartarrayos} = 1.5 \times 83.71 \text{ KV} = 125.56 \text{ KV}$$

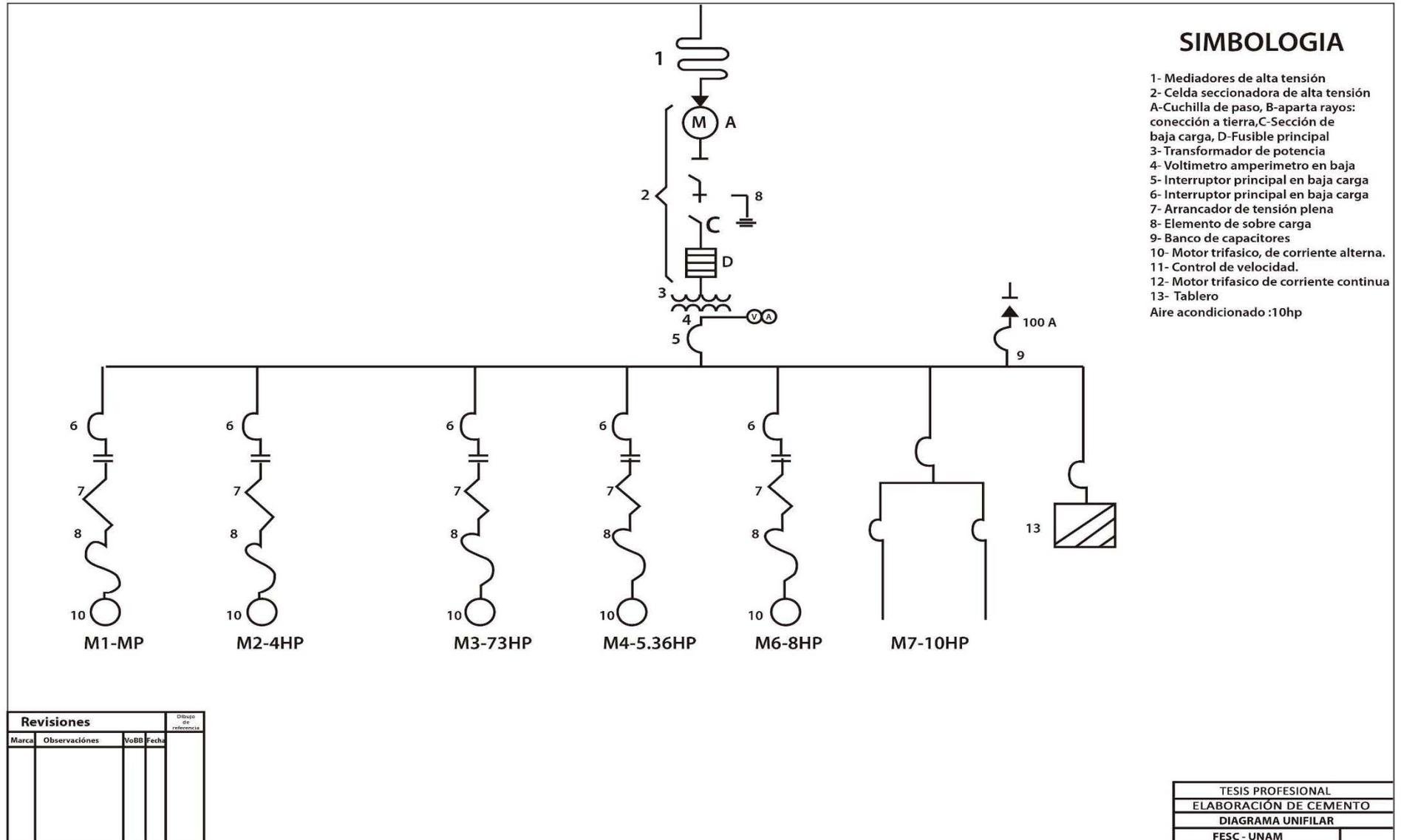
Se elige el apartarrayos 3EP4 de la marca SIEMENS el cual es útil para redes de hasta 362 kV.

Con los datos calculados previamente se elige una subestación aislada en gas de la marca SIEMENS. En la tabla 47 se muestran una recopilación de datos técnicos:

Tabla 47*Subestación aislada en gas*

Característica	Valor
Serie de subestaciones	8DN8
Tensión nominal	145 kV
Frecuencia nominal	60 Hz
Tensión nominal a frecuencia industrial soportable (1 min)	275 kV
Barra colectora (Cobre)	3150 kV
Corriente nominal de corte	40 kA
Corriente nominal de choque	108 kA
Accionamiento del interruptor de potencia	Con acumulador de resorte
Interruptor de potencia	4000 A
Intensidad cc	153.76 KA
Apartarrayos	362 kV
Transformador de corriente	Power VT
Transformador de potencia	Se utilizará el elegido anteriormente
Rango de temperatura ambiente	-30°C a 40°C

4.6 Diagrama unifilar



Conclusión

La producción de cemento es una de las más importantes en la industria mexicana debido a todos los alcances que tiene y gracias a los recursos naturales que se tienen en el país. La producción de cemento es una industria compleja e interesante por lo tanto me pareció muy interesante realizar el diseño de una planta dedicada totalmente a la producción de cemento, gracias a los datos tomados a la página de la Cámara Nacional del Cemento (CANACEM) tuve un aproximado de cuál es la producción anual y en base a eso realizar la propuesta de diseño, llegando a un valor de 500000 toneladas por año. Debido a la gran variedad de cementos que se tienen en el mercado tome la decisión de realizar el diseño al tipo de cemento más comercial el cual fue el Cemento Portland Ordinario (CPO). En México la producción de cemento está repartida en 6 empresas diferentes con 37 plantas instaladas en total, Cemex es quien representa el 50% de producción de cemento, además es una industria la cual va en aumento en el consumo por lo tanto la producción crece proporcionalmente. La importancia vital en la industria cementera es que va directamente relacionada con la industria de la construcción, las cuales crecen proporcionalmente; es decir, si la industria de construcción va en crecimiento lo hace de la misma manera la industria cementera.

Al realizar las bases de diseño generales para la industria productora de cemento pude darme cuenta que el iniciar un proyecto real es necesaria maquiraría la cual representa grandes costos, además otro reto que se presenta es incursionar en un mercado tan dominado como el que se tiene en México, sin embargo con la información presentada en este trabajo invertir en una planta cementera representa beneficios es cuestión de costos.

Una parte crucial en la producción de cemento es el cuidado del medio ambiente, ya que como fue visto el 80% del proceso con lleva una gran cantidad de emisiones a la atmosfera por el tipo de operación que se realiza; sin embargo gracias a tecnología desarrollada a través de los años y al compromiso que tienen las empresas de minimizar dichas emisiones además de las normas que rigen esta industria, la producción de cemento es una industria limpia. En cuanto al consumo de energía eléctrica, la parte del proceso que más demanda de energía tiene es la molienda ya que los molinos son los que tienen los motores de mayor potencia, sin embargo el 100% de las industrias instaladas en México están del todo automatizadas por lo tanto son beneficiados en tener un ahorro de energía.

Referencias

- Arnal, J. (2010). *Diseño de una instalación para la producción de cemento Portland*. (tesis de pregrado). Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica Industrial de Zaragoza, México.
- Becerril, D.O. (2002). *Instalaciones eléctricas prácticas*. México: Instituto Politécnico Nacional.
- Cámara Nacional del Cemento (CANACEM). (2017). *Estadísticas*, México: Recuperado de: <http://www.canacem.org.mx/>
- Duda, W.H. (1977). *Manual Tecnológico del Cemento*. Barcelona, España: Editores Técnicos Asociados.
- Enríquez, G. (2007). *Manual Práctico del Alumbrado*. México: Limusa
- Enríquez, G. (2005). *Elementos de diseño de subestaciones eléctricas*. México: Limusa
- Garza, O.J. y Arteaga, J.C. (2011, 21 de Septiembre). Análisis de la competencia en la industria cementera en México. *EconoQuantum*. Recuperado de <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=125021309004>
- Himmelblau, D. M. (1997). *Principios básicos y cálculos en Ingeniería Química*. Estado de México, México: Prentice-Hall.
- Holcim Apaxco. (2017). *Procesos de elaboración del cemento*. México: Grupo Holcim. Recuperado de http://www.33docu.com/minisite/HOLCIM-APASCO/induccin/html/manufactura_elabcimiento.htm
- Labahn, O. (1985). *Prontuario del Cemento*. Barcelona, España: Editores Técnicos Asociados.

- López, Y. (2013). *Análisis exergoeconómico de una planta productora de cemento (CPO)* (tesis de pregrado). Universidad Nacional Autónoma de México, México.
- Montalván, R., & Suárez, D. (2010). *Estudio de la aplicación normativa en la fabricación del cemento*. (tesis de pregrado), Instituto Politécnico Nacional, México.
- Norma Oficial Mexicana NOM-C-414-ONNCCE-2010 “Industria de la construcción. Cementos hidráulicos. Especificaciones y métodos de prueba”. Diario Oficial de la Federación, México, 30 de Septiembre de 2010.
- Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEDE-2012 “Instalaciones Eléctricas (utilización), Diario Oficial de la Federación, 18 de Junio de 2012
- Norma Oficial Mexicana NOM-025-STPS-2008 “Condiciones de iluminación en los centros de trabajo”, Diario Oficial de la Federación, 5 de Junio de 2008
- Norma Oficial Mexicana NOM-040-ECOL-2002 “Protección Ambiental-Fabricación de cemento hidráulico- Niveles máximos de emisión a la atmósfera”, Diario Oficial de la Federación, México, 24 de Septiembre de 2002
- Sanz, J.L. & Toledano, J.C. (2009). *Técnicas y Procesos en las Instalaciones eléctricas en Media y Baja Tensión*. Madrid, España: Paraninfo.
- SEDECO. (2011). *Norma técnica complementaria para el proyecto arquitectónico*. México.
Recuperado de: <http://sedecodf.gob.mx>
- Vidaud E. (2013, 28 de Octubre). De la historia del cemento. *Construcción y tecnología en concreto*. Recuperado de <http://www.revistacyt.com.mx/index.php/ingenieria/60-de-la-historia-del-cemento>