



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

**PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA  
FACULTAD DE INGENIERÍA**

**SIMULACIÓN  
DEL PROCESO DE  
CALCINACIÓN DEL CEMENTO**

**T E S I S**

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

**MAESTRO EN INGENIERÍA**

CAMPO DE CONOCIMIENTO: **INGENIERÍA DE SISTEMAS**

**P R E S E N T A :**

**TOMÁS GUILLERMO PEREA RIVERA**

TUTOR:

**DRA. IDALIA FLORES DE LA MOTA**



CIUDAD UNIVERSITARIA

2012



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**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.

**JURADO ASIGNADO:**

Presidente: **Dr. José de Jesús Acosta Flores.**  
Secretario: **Dra. Mayra Elizondo Cortés.**  
Vocal: **Dra. Idalia Flores de la Mota.**  
1<sup>er</sup>. Suplente: **Dra. Patricia Balderas Cañas.**  
2<sup>o</sup>. Suplente: **M.I. Mariano Antonio García Martínez.**

Lugar donde se realizó la tesis: Ciudad Universitaria, México D.F.

**TUTOR DE TESIS:**

**Dra. Idalia Flores de la Mota.**

---

**FIRMA**

### **A MIS PADRES Y HERMANOS:**

Porque gracias a su apoyo y motivación han sido partícipes importantes en la realización de este proyecto:

Gracias **Tomás**, porque me has enseñado que el trabajo es lo único que nos dignifica y nos hace ser hombres.

Gracias **Amanda**, porque aprendí a que hay que luchar por los sueños y no declinar hasta conseguirlos.

Gracias **Yanet, Imelda Víctor, Hania, Ximena y Rafael** porque el núcleo familiar es la fuente de inspiración y fortaleza.

### **A MI ESPOSA KARLA:**

Que por su comprensión y apoyo en estos tiempos difíciles, encontré en ella un motor que me impulsó a dar lo mejor de mí en este trabajo.

### **A LA DRA. IDALIA FLORES DE LA MOTA:**

Porque fue pilar fundamental en la orientación, desarrollo y culminación de este proyecto.

Agradecimiento **especial** porque me impulsó y motivó a presentar este trabajo en **Roma**, Italia.

**A LA UNAM:**

Porque me tomó en sus brazos, me brindó los conocimientos técnicos y me enseñó la mística de ser **universitario**, con la sencilla condición de aplicarlos en pro de la industria y la sociedad.

**AL PROYECTO  
PAPIIT No.**

**IN 116012-3 DGAPA**

“Simulación y  
Optimización de  
Sistemas Logísticos y  
de Manufactura”.

**AL C.P. TOMÁS  
RIVERA CARRASCO:**

Por su colaboración en la información técnica, sus acertados comentarios y por el ejemplo que ha sido en mi vida. Ánimo en estos momentos.

## Resumen.

Ante la sensibilidad económica que nuestro país presenta frente a la economía norteamericana e internacional gracias al fenómeno de la "globalización", una de las prioridades dentro de las empresas es **desarrollar sistemas, herramientas, métodos, técnicas y/o procedimientos que permitan obtener los máximos ahorros en sus operaciones**, con la firme intención de mantener la calidad en el servicio, la cartera de clientes o simplemente sobrevivir.

Constantemente los responsables de estas organizaciones toman decisiones importantes cuyos resultados se observan, generalmente, a corto o mediano plazo. Las mejores decisiones son aquellas que se toman bajo un análisis completo de los diferentes escenarios posibles y consideran la probabilidad de que diversos factores de índole interno como externo se presenten (análisis de riesgos), reduciendo al máximo los imponderables y asegurando en gran medida el éxito en los proyectos.

La **Simulación** es una respuesta para aquellas empresas que desean evaluar el desempeño actual de sus procesos, analizar las operaciones clave o aquellas que generan "cuellos de botella" y sobre todo, es una solución para aquellas otras organizaciones que deseen **experimentar cambios radicales sin llevarlos a cabo en la vida real**. Emplear la simulación significa ahorro en costo en el diseño e implementación de nuevos proyectos.

El **cemento** es uno de los principales insumos en la industria de la construcción y a pesar de que el proceso de elaboración es casi automatizado, requiere del monitoreo frecuente de variables importantes que definen la calidad final del producto y que solo la experiencia del ser humano puede controlar.

En el presente trabajo se desarrolla un **modelo de simulación del proceso de calcinación de cemento**, inicialmente conoceremos al cemento y su proceso de fabricación; posteriormente trataremos el tema de la **Simulación** como técnica de **investigación de operaciones**, su justificación y uso para el caso práctico. Finalmente desarrollaremos un **modelo** conforme a la **metodología de Simulación de Sistemas**.

Cabe mencionar que el software utilizado para la versión final del modelo fue **SIMIO®**. Previamente se estudiaron programas como **Promodel®** y **Arena®**.

## Abstract

Given the economic sensitivity that our country has against U.S. and international economy thanks to the phenomenon of "globalization", a priority into the companies is to **develop systems, tools, methods, techniques and / or procedures to maximize savings in their operations**, with the strong intention to maintain service quality, customer base or simply to survive.

Some executives are constantly taking important decisions that are made on a short or medium term. The best decisions are those taken under a full analysis of the different scenarios and consider the probability that various factors internal and external nature arise (risk analysis), minimizing the uncertainties and ensuring the success largely in projects.

**Simulation** is an answer for companies who wish to evaluate the current performance of their processes, analyzing key operations or those that create "bottlenecks" and specially, is a solution for those organizations **to pursue radical changes without performing in real time**. Employing the simulation means cost savings in the design and implementation of new projects.

**Cement** is one of the main inputs in the construction industry and although the process is almost automatic, it requires frequently monitoring of important variables that define the final product quality and only experienced humans can control it.

This paper develops a **simulation model of the calcination process of cement**, initially cement and its manufacturing process will be known, and then we will discuss the issue of **Simulation** as **operations research** technique, its rationale and use for the case study. Finally we will develop a **model** according to the **methodology of System Simulation**.

It should be mentioned that the software used for the final version of the model was **SIMIO**<sup>®</sup>. Programs like **Promodel**<sup>®</sup> and **Arena**<sup>®</sup> were previously studied.

## Índice

Resumen. ....	5
Abstrac .....	6
Índice .....	7
Índice de figuras. ....	9
Índice de tablas. ....	11
Objetivo general. ....	12
Objetivos particulares. ....	12
Hipótesis. ....	12
Introducción. ....	13
Capítulo 1: La industria del cemento y proceso de elaboración. ....	16
1.1. El Cemento. ....	16
1.1.1. ¿Qué es el cemento? .....	16
1.1.2. Componentes del cemento. ....	17
1.1.3. Proceso de Producción. ....	23
1.1.4. Tipos de cemento. ....	27
1.2. La Industria del Cemento.....	31
1.2.1. Historia.....	31
1.2.2. El cemento en el mundo.....	34
1.2.3. El cemento en México. ....	35
1.3. Importancia de la Unidad de Calcinación en el cemento.....	37
Capítulo 2: Simulación. ¿Por qué emplearla?.....	39
2.1. La Simulación como técnica de Investigación de Operaciones. ....	39
2.1.1. Investigación de Operaciones.....	39
2.1.2. Técnicas de Investigación de Operaciones. ....	41
2.1.3. ¿Por qué usar la Simulación?.....	44
2.2. Simulación en la Ingeniería de Sistemas. ....	45
2.2.1. Enfoque sistémico de la simulación. ....	45
2.2.2. Metodología de la Simulación. ....	48
2.2.3. Elementos de Simulación. ....	49
2.2.4. Ventajas, desventajas y aplicaciones de la Simulación. ....	51
2.3. Software para Simulación.....	54
2.3.1. Lenguaje de Propósito General vs Software de Simulación. ....	54

Capítulo 3: Justificación del uso de la simulación en el caso práctico. ....	57
3.1. Planteamiento del Problema. ....	57
3.2. Justificación. ....	58
3.3. Estado del Arte. ....	59
3.3.1. Robert Herman Bogue. ....	59
3.3.2. Fórmulas de Bogue. ....	61
3.3.3. Replanteamiento de las Ecuaciones de Bogue en el cálculo mineralógico del Clinker para una cementera colombiana. ....	61
3.3.4. Departamento de Ingeniería de Procesos (Cooperativa La Cruz Azul). ....	62
Capítulo 4: Modelo de Simulación del proceso de calcinación del Cemento. Caso: Cooperativa La Cruz Azul S.C.L. ....	66
4.1. Introducción. ....	66
4.2. Software de Simulación: SIMIO®. ....	68
4.3. Desarrollo del Modelo de Simulación para pronosticar y analizar el proceso de calcinación del cemento. ....	70
4.3.1. Metodología: ....	70
4.3.2. Análisis económico. ....	109
Capítulo 5: Conclusiones. ....	113
Anexos. ....	117
A) Introducción a la Estequiometría. ....	117
B) Análisis estequiométrico de la Harina Cruda y el Clinker. ....	122
C) Cálculo de consumo de combustibles. ....	130
D) Cuadro comparativo de Software para Simulación. ....	135
Referencias bibliográficas. ....	141
Páginas web consultadas. ....	143

## Índice de figuras.

Figura 1. Cemento Gris .....	16
Figura 2. Hidratación del cemento. ....	17
Figura 3. Componentes del cemento. ....	17
Figura 4. Piedra caliza.....	18
Figura 5. Arena de silicio. ....	19
Figura 6. Ceniza volcánica. ....	19
Figura 7. Muestra de clinker. ....	20
Figura 8. Humo de sílice.....	21
Figura 9. Puzolana.....	22
Figura 10. Proceso de fabricación del cemento. ....	23
Figura 11. Molino vertical de crudo. ....	24
Figura 12. Edificio precalentador de ciclones. ....	24
Figura 13. Horno rotatorio de cemento.....	25
Figura 14. Enfriador de clinker. ....	25
Figura 15. Molino de bolas para clinker. ....	26
Figura 16. Silos de almacenamiento de cemento. ....	26
Figura 17. Faro de Eddystone. ....	33
Figura 18. Ubicación geográfica de los principales productores de cemento en México. ....	36
Figura 19. Trabajo en equipo para la solución de problemas. ....	40
Figura 20. Ejemplos de modelos de simulación.....	43
Figura 21. La temperatura es un ejemplo de sistema continuo. ....	46
Figura 22. Sistemas discretos: Vehículos que arriban a una caseta. ....	47
Figura 23. Formación microscópica del clinker.....	60
Figura 24. Hojas de cálculo para balance masa-energía.....	63
Figura 25. Diagrama de flujo hechos en AutoCAD.....	64
Figura 26. Software SIMIO. ....	68
Figura 27. Proceso de calcinación del cemento. ....	71
Figura 28. Proceso de calcinación del cemento. ....	71
Figura 29. Obtención de la información. ....	72
Figura 30. Horno No.9 Cruz Azul .....	73
Figura 31. Unidad de Calcinación No.9 Cruz Azul .....	73
Figura 32. Diagrama de Bloques.....	74
Figura 33. Diagrama de Flujo Masa-Calor. ....	75
Figura 34. Modelo Básico 2D en software Arena (Diagrama de Flujo). ....	76
Figura 35. Adición de gráficos a modelo básico.....	77
Figura 36. Modelo básico concluido. ....	78

Figura 37. Trayectoria de harina cruda y calor del horno. (FL Smidth).....	80
Figura 38. Definición de las rutas de la harina cruda y calor del horno.....	81
Figura 39. Locaciones del modelo de simulación. ....	82
Figura 40. Sistema de combustión del horno.....	83
Figura 41. Módulos de materia prima y conversión molar. ....	84
Figura 42. Definición de variables de estado y procesos. ....	85
Figura 43. Simulación de las reacciones químicas dentro del horno.....	86
Figura 44. Desarrollo de las Ecuaciones de Bogue en el modelo.....	87
Figura 45. Consumo de combustible y conversión molar.....	88
Figura 46. Comparación de los valores simulados y teóricos (Bogue). ....	89
Figura 47. Modelo final de simulación.....	90
Figura 48. Membrete del modelo. ....	91
Figura 49. Inicio de corrida de la simulación. ....	93
Figura 50. Alimentación de entidades.....	94
Figura 51. Fin de corrida (24 hrs de producción) ....	95
Figura 52. Repercusión de la variable de control Pureza en la Caliza en la producción de clinker. ....	101
Figura 53. Diseño de Experimentos en SIMIO®.....	102
Figura 54. Resultados del Experimento. ....	103
Figura 55. Comportamiento gráfico de los resultados. ....	103
Figura 56. Gráfica comparativa de datos simulados vs teóricos. ....	105
Figura 57. Variación en la producción de clinker vs Pureza de la caliza. ....	106
Figura 58. Costo-Beneficio.....	110
Figura 59. Reacciones Químicas simuladas del Horno.....	128
Figura 60. Coque de petróleo.....	130
Figura 61. Mezcla de combustibles. ....	133

## Índice de tablas.

Tabla 1. Denominación del cemento. ....	27
Tabla 2. Cementos especiales. ....	27
Tabla 3. Clasificación de los cementos según norma ASTM 150 .....	28
Tabla 4. Producción Mundial de Cemento.....	34
Tabla 5. Producción Nacional de Cemento.....	35
Tabla 6. Principales productores de cemento en México.....	35
Tabla 7. Justificación del uso de la simulación en el proceso de calcinación del cemento.....	44
Tabla 8. Resultados de una sola corrida. ....	96
Tabla 9. Datos para validación del modelo. ....	96
Tabla 10. Histograma de frecuencias datos simulados.....	97
Tabla 11. Histograma de frecuencias con datos teóricos. ....	97
Tabla 12. Prueba Chi-Cuadrada.....	98
Tabla 13. Prueba Kolmogorov-Smirnov .....	99
Tabla 14 Escenarios para realizar la Simulación.....	102
Tabla 15. Resumen del experimento. ....	104
Tabla 16. Análisis de Costos. ....	109
Tabla 17. Análisis Económico .....	109
Tabla 18. Información química de la materia prima. ....	122
Tabla 19. Módulos de materia prima. ....	123
Tabla 20. Conversión molar de la materia prima.....	123
Tabla 21. Reacciones químicas fase Secado. ....	124
Tabla 22. Reacciones químicas fase Calcinación. ....	125
Tabla 23. Reacciones químicas fase Sinterización y Clinkerización. ....	126
Tabla 24. Reacciones químicas fase Enfriamiento. ....	127
Tabla 25. Formación de minerales artificiales.....	128
Tabla 26. Conversión molar de minerales artificiales.....	129
Tabla 27. Consumo de Combustibles.....	132
Tabla 28. Proporciones de combustibles. ....	133
Tabla 29. Consumo de combustible en un día de producción de clinker. ....	134
Tabla 30. Costo de combustibles. ....	134
Tabla 31. Comparativo de software para Simulación. ....	139

## Objetivo general.

Mediante la **metodología de simulación de sistemas** se cuantificará el impacto que representa la variable **Pureza de Caliza** en la producción de clinker y de cemento, a través de la construcción de un **Modelo de Simulación**, que **analice y pronostique fisicoquímicamente** la producción del **clinker**, los consumos de materia prima y combustibles utilizados.

## Objetivos particulares.

- Conocer la situación actual de la industria del cemento y el impacto que ejerce en nuestra economía.
- Entender el proceso de fabricación del cemento como base para el análisis y desarrollo del modelo de simulación.
- Investigar las ventajas de la simulación, características y aplicaciones.
- Análisis de la información técnica de la empresa "Cooperativa la Cruz Azul S.C.L."
- Desarrollo del Modelo de Simulación de la Unidad de Calcinación del Cemento, validación y presentación de informe técnico y de costo.

## Hipótesis.

Si modelamos las diferentes reacciones químicas que se suscitan en el interior de un horno de cemento a través de la Simulación, entonces podemos predecir la cantidad y calidad del clinker producido, a partir de los niveles de carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ) existentes en la piedra caliza (materia prima principal).

## Introducción.

El presente trabajo describe la forma en que la técnica de Simulación es empleada para modelar un problema industrial. Veremos cómo la Simulación y el proceso de fabricación del cemento se fusionan para crear un modelo que representa la interacción química dentro del horno y pronostica los resultados del clinker obtenido (producto), variando el nivel de pureza en la caliza (materia prima).

Lo anterior obedece a que la Cooperativa La Cruz Azul S.C.L. **no cuenta con una estimación económica del impacto que ejerce la variabilidad en la calidad de la materia prima existente en sus yacimientos, con respecto al clinker y cemento que produce** (utilidad).

La **Cooperativa La Cruz Azul S.C.L.** es una empresa mexicana productora de cemento originaria del Estado de Hidalgo. Actualmente ocupa el tercer lugar de producción en México después de Cemex y Apasco.

Los cementos que elabora son los siguientes:

- CPO 40B (Cemento Portland Ordinario Blanco)
- CPC 30R RS (Cemento Portland Compuesto Resistente a los Sulfatos)
- CPP 30R RS (Cemento Portland Puzolánico Resistente a los Sulfatos)
- Mortero

Cuenta con 4 plantas productoras las cuales se ubican en Cruz Azul Hidalgo, Lagunas Oaxaca, Tepezalá Aguascalientes y Palmar de Bravo Puebla.

Los temas serán tratados de acuerdo a los siguientes capítulos:

El capítulo 1 se refiere al **cemento**, su composición, materiales, tipos y proceso de fabricación. Conoceremos los principales productores de cemento a nivel mundial y nacional y hablaremos de la importancia de la unidad de calcinación en la fabricación de cemento.

Posteriormente en el capítulo 2 trataremos el tema de la Simulación y su importancia como técnica de Investigación de Operaciones. Conoceremos sus ventajas y desventajas así como su metodología y el software existente para desarrollarla.

El capítulo 3 expone el problema a resolver y el estado del arte de la simulación de la industria cementera. Analizaremos algunos artículos que hacen referencia al estudio del cemento y análisis estadístico. Introduciremos el tema de las Ecuaciones de Bogue que serán empleadas como referencia al momento de evaluar los resultados del modelo de simulación.

En el capítulo 4 se desarrollan tanto el modelo básico de simulación como el modelo final, a partir de la información técnica proporcionada por la Cooperativa La Cruz Azul S.C.L. Así mismo hablaremos del software SIMIO y la forma en que se desarrolló la experimentación.

Los resultados obtenidos son analizados y nos permiten calcular el beneficio económico, a medida que se simulan diferentes niveles de **carbonato de calcio (CaCO<sub>3</sub>)** o también conocido como **pureza de la caliza**.

La estrategia a seguir para realizar el modelo de simulación, obedece a los siguientes enfoques:

1. **Químico (Simulación Discreta):** Simularemos la descomposición química de los materiales entrantes al modelo, en función a sus fórmulas químicas y fracciones molares. Así mismo se simulará la formación de los componentes del Clinker (alita, belita, celita y ferrita) para estimar la cantidad de producción.
2. **Teórico:** La Literatura Técnica establece una serie de ecuaciones (Bogue) para que de forma teórica y con la composición inicial de los materiales entrantes, se determine la cantidad de alita, belita, celita y ferrita formadas.

Finalmente en el capítulo 5 realizamos las conclusiones y algunas recomendaciones técnicas.

Se agrega un apartado de Anexos en los que desarrollan los temas de Estequiometría en la harina cruda y clinker, cálculo de combustibles y un cuadro comparativo de los diversos software de simulación.

**CAPÍTULO 1**  
**LA INDUSTRIA DEL CEMENTO**  
**Y PROCESO DE ELABORACIÓN.**

## Capítulo 1: La industria del cemento y proceso de elaboración.

### 1.1. El Cemento.

#### 1.1.1. ¿Qué es el cemento?

El cemento es un conglomerante hidráulico, es decir, un material inorgánico finamente molido que amasado con agua, forma una pasta que fragua y endurece por medio de reacciones y procesos de hidratación y que, una vez endurecido conserva su resistencia y estabilidad incluso bajo el agua.

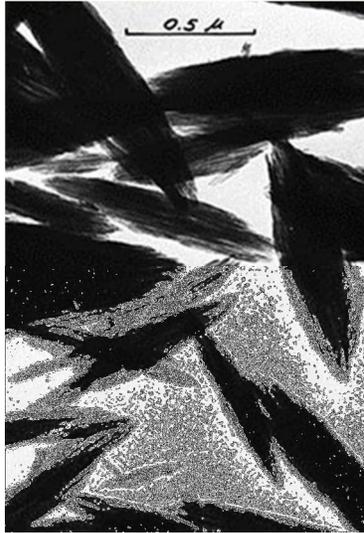


**Figura 1. Cemento Gris**

Dosificado y mezclado apropiadamente con agua y áridos debe producir un concreto o mortero que conserve su trabajabilidad durante un tiempo suficiente, alcanzar unos niveles de resistencias preestablecido y presentar una estabilidad de volumen a largo plazo.

El endurecimiento hidráulico del cemento se debe principalmente a la hidratación de los silicatos de calcio, aunque también pueden participar en el proceso de endurecimiento otros compuestos químicos, como por ejemplo, los aluminatos. La suma de las proporciones de óxido de calcio reactivo ( $\text{CaO}$ ) y de dióxido de silicio reactivo ( $\text{SiO}_2$ ) será al menos del 50% en masa, cuando las proporciones se determinen conforme con la Norma Europea EN 196-2.

Simulación del proceso de calcinación del cemento.



**Figura 2. Hidratación del cemento.**

### 1.1.2. Componentes del cemento.

De todos los conglomerantes hidráulicos, el cemento portland y sus derivados son los más empleados en la construcción debido a estar formados, básicamente, por mezclas de caliza, arcilla y yeso que son minerales muy abundantes en la naturaleza, por ser su precio relativamente bajo en comparación con otros materiales y tener propiedades muy adecuadas para las metas que deben alcanzar.



**Figura 3. Componentes del cemento.**

### 1.1.2.1. Caliza

Las calizas son rocas sedimentarias de origen fundamentalmente químico u organógeno (integrados por Carbono, Hidrógeno, Oxígeno y Nitrógeno), formadas al menos por un 50% de carbonato cálcico. Las de origen bioquímico se forman por la acción de los seres vivos. Estos fijan el calcio disueltos en el agua y lo utilizan para construir sus esqueletos en forma de calcita o aragonito, cuando estos mueren, sus esqueletos darán unas calizas formadas por calcita, siempre el aragonito es inestable y se transforma en calcita, también se depositan calizas en los fondos marinos como consecuencia indirecta del metabolismo de los seres vivos

Especificaciones:

- $\text{CaCO}_3 \geq 75\%$  en masa.
- Contenido de arcilla  $< 1.20 \text{ g}/100 \text{ g}$ .
- Contenido de carbono orgánico total  $\leq 0.50\%$  en masa.



**Figura 4. Piedra caliza.**

### 1.1.2.2. Silicio

El silicio es el segundo elemento más abundante del planeta y se encuentra en la mayoría de las aguas.

Es el constituyente común de las rocas ígneas, el cuarzo y la arena.

La sílice existe normalmente como óxido ( $\text{SiO}_2$  en la arena y como silicato  $\text{SiO}_3$ ). Puede estar en forma insoluble, soluble y coloidal.

Muchas aguas naturales contienen menos de 10 mg/l de sílice, algunas pueden llegar a contener hasta 80 mg/l. Las aguas volcánicas la contienen en abundancia.



**Figura 5. Arena de silicio.**

#### **1.1.2.3. Cenizas volantes calcáreas**

Las cenizas volantes se obtienen por precipitación electrostática o mecánica de partículas pulverulentas arrastradas por los flujos gaseosos de hornos alimentados con carbón pulverizado. La ceniza volante calcárea es un polvo fino que tiene propiedades hidráulicas y/o puzolánicas.

Composición:  $\text{SiO}_2$  reactivo,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  y otros compuestos.

- $\text{SiO}_2$  reactivo  $\geq 25\%$
- Expansión  $\leq 10$  mm



**Figura 6. Ceniza volcánica.**

#### 1.1.2.4. Clínter

El clínter de cemento portland es un material hidráulico que se obtiene por  **sintetización o calcinación de caliza y arcilla** (mezcla cruda o harina cruda) a temperaturas que oscilan entre los 1350 y 1450°C.



**Figura 7. Muestra de clínter.**

#### **Composición del Clínter**

El clínter está compuesto por:

- Silicato tricálcico: de 40 a 60%
- Silicato dicálcico: de 20 a 30%
- Aluminato tricálcico: de 7 a 14%
- Ferrito aluminato tetracálcico: de 5 a 12%.

El aluminato tricálcico reacciona con el agua de inmediato, por eso, al hacer cemento, éste fragua rápidamente. Para impedirlo se le agrega yeso; éste reacciona con el aluminato produciendo etringita o Sal de Candlot (sustancia dañina para el cemento). Por lo general el curado se efectúa dentro de los 28 días, aunque su resistencia sigue en aumento después de ese tiempo.

El clínter portland es un aglomerante hidráulico, por ello:

- Necesita de agua para su proceso de fraguado.
- El agua de amasado no se evapora sino que pasa a formar parte de él una vez endurecido.
- Aunque esté sumergido en agua, completa su proceso de fraguado.

#### 1.1.2.5. Humo de Sílice

El humo de Sílice se origina por la reducción de cuarzo de elevada pureza con carbón en hornos de arco eléctrico, para la producción de silicio y aleaciones de ferrosilicio, y consiste en partículas esféricas muy finas.

Especificaciones:

- $\text{SiO}_2$  amorfo  $\geq 85\%$
- Pérdida por calcinación  $\leq 4\%$  en masa
- Superficie específica  $\geq 15 \text{ m}^2/\text{g}$



Figura 8. Humo de sílice.

#### 1.1.2.6. Puzolana natural

Las puzolanas naturales son normalmente materiales de origen volcánico o rocas sedimentarias de composición silíceo o sílico-aluminosa o combinación de ambas, que finamente molidos y en presencia de agua, reaccionan para formar compuestos de silicato de calcio y aluminato de calcio capaces de desarrollar resistencia.

Composición química:  $\text{SiO}_2$  reactivo,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$  y otros compuestos.

Especificaciones:  $\text{SiO}_2$  reactiva  $> 25\%$

#### 1.1.2.7. Puzolana natural calcinada

Las puzolanas naturales calcinadas son materiales de origen volcánico, arcillas, pizarras o rocas sedimentarias activadas por tratamiento térmico.

Composición química:  $\text{SiO}_2$  reactivo,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$  y otros compuestos.

Especificaciones:  $\text{SiO}_2$  reactiva > 25%



**Figura 9. Puzolana.**

### 1.1.3. Proceso de Producción.

#### 1.1.3.1. Obtención y preparación de materias primas:

El proceso de fabricación del cemento comienza con la extracción de materias primas que se encuentran en yacimientos, normalmente canteras a cielo abierto. Las canteras se explotan mediante voladuras controladas, en el caso de materiales duros como calizas y pizarras, mientras que en el caso de materiales blandos (arcillas y margas) se utilizan excavadoras para su extracción.

Una vez extraído y clasificado el material, se procede a su trituración hasta obtener una granulometría adecuada para el producto de molienda y se traslada a la fábrica mediante cintas transportadoras o camiones para su almacenamiento en el parque de prehomogeneización.



Figura 10. Proceso de fabricación del cemento.

#### 1.1.3.2. Homogeneización y molienda de crudo:

En el parque de prehomogeneización, el material triturado se almacena en capas superiores para ser seleccionadas posteriormente de manera controlada. La prehomogeneización permite preparar la dosificación adecuada de los distintos componentes reduciendo su variabilidad.

Posteriormente, estos materiales se muelen en molinos verticales o de bolas para reducir su tamaño y favorecer así su cocción en el horno. En el molino vertical se tritura el material a través de la presión que ejercen sus rodillos sobre una mesa giratoria. A partir de ahí, la materia prima (harina o crudo) se almacena en un silo para incrementar la uniformidad de la mezcla.



**Figura 11. Molino vertical de crudo.**

#### **1.1.3.3. Precalentador de ciclones:**

En función de cómo se procesa el material antes de su entrada en el horno de clinker, se distinguen cuatro tipos de proceso de fabricación: vía seca, vía semi-seca, vía semi-húmeda o vía húmeda. En la actualidad, la mayoría de las cementeras utilizan la vía seca.

La alimentación al horno se realiza a través del precalentador de ciclones que calienta la materia prima para facilitar su cocción. La harina o crudo (materia prima molida) se introduce por la parte superior de la torre y va descendiendo por ella. Mientras tanto, los gases provenientes del horno, que están a altas temperaturas, ascienden a contracorriente, precalentando así el crudo que alcanza los 1,000°C antes de entrar al horno.



**Figura 12. Edificio precalentador de ciclones.**

#### 1.1.3.4. Fabricación de clinker-horno:

A medida que la harina cruda va avanzando en el interior del horno, mientras éste gira, la temperatura va aumentando hasta alcanzar los 1,500 °C. A esta temperatura se producen complejas reacciones químicas que dan lugar al clinker.

Para alcanzar las temperaturas necesarias para la cocción de las materias primas y la producción del clinker, el horno cuenta con una llama principal (quemador) que arde a 2,000 °C. En algunos casos también hay una llama secundaria situada en la cámara de combustión, que se encuentra en la torre del precalentador. Estas llamas se alimentan con combustibles tradicionales, como el carbón o el coque de petróleo, o alternativos como las llantas, entre otros.



Figura 13. Horno rotatorio de cemento.

#### 1.1.3.5. Fabricación de clinker-enfriador:

A la salida del horno, el clinker se introduce en el enfriador que inyecta aire frío al exterior para reducir su temperatura de los 1,400 °C a los 100 °C. El aire caliente generado en este dispositivo se introduce nuevamente en el horno para favorecer la combustión, mejorando así la eficiencia energética del proceso.



Figura 14. Enfriador de clinker.

#### 1.1.3.6. Molienda de clinker:

Una vez obtenido, el clinker se mezcla con yeso y adiciones, en proporciones adecuadas, dentro de un molino de cemento. En su interior, los materiales se muelen, se mezclan y se homogenizan.

Los molinos pueden ser de rodillos (horizontales y verticales) y de bolas. Este último consiste en un gran tubo que rota sobre sí mismo y que contiene bolas de acero en su interior. Gracias a la rotación del molino, las bolas colisionan entre sí, triturando el clinker y las adiciones hasta lograr un polvo fino y homogéneo: el cemento.

Las distintas calidades del cemento se obtienen con la adición de materiales como escorias de alto horno, humo de sílice, puzolanas naturales, cenizas volantes y caliza, que le permiten alcanzar determinadas características para su uso que se establece en la reglamentación vigente.



**Figura 15. Molino de bolas para clinker.**

#### 1.1.3.7. Distribución:

Por último, el cemento se almacena en silos, separando según sus clases, antes de ser ensacado o descargado en un camión para su transporte por carretera o ferrocarril.



**Figura 16. Silos de almacenamiento de cemento.**

#### 1.1.4. Tipos de cemento.

La clasificación de los tipos de cemento está proporcionada por la norma **NMX-C-414-ONNCCE-2010**, la cual establece:

##### 1.1.4.1. Por su composición:

Tipo	Denominación
<b>CPO</b>	Cemento Portland Ordinario
<b>CPP</b>	Cemento Portland Ordinario
<b>CPP</b>	Cemento Portland Puzolánico
<b>TPEG</b>	Cemento Portland con Escoria Granulada de alto horno
<b>CPC</b>	Cemento Portland Compuesto
<b>CPS</b>	Cemento Portland con humo de Sílice
<b>CEG</b>	Cemento con Escoria Granulada de alto horno

**Tabla 1. Denominación del cemento.**

##### 1.1.4.2. Por sus características especiales:

Nomenclatura	Características Especiales
<b>RS</b>	Resistente a los sulfatos
<b>BRA</b>	Baja reactividad álcali-agregado
<b>BCH</b>	Bajo calor de hidratación
<b>B</b>	Blanco

**Tabla 2. Cementos especiales.**

##### 1.1.4.3. Por su resistencia y norma ASTM C-150:

La resistencia normal de un cemento es la resistencia mínima mecánica a la compresión a los 28 días y se indica como 20, 30 ó 40 Newton por milímetro cuadrado (N/mm<sup>2</sup>).

De acuerdo a la norma **ASTM 150** (American Society for Testing Materials), establece 8 diferentes tipos de cementos, de acuerdo a los usos y necesidades de producción:

Tipos de cemento
<b>I: Normal.</b> Para uso general, donde no son requeridos otros tipos de cemento.
<b>IA: Normal.</b> Uso general, con inclusor de aire.
<b>II: Moderado.</b> Para uso general y además en construcciones donde existe un moderado ataque de sulfatos o se requiera un moderado calor de hidratación.
<b>IIA: Moderado.</b> Igual que el tipo II, pero con inclusor de aire.
<b>III: Altas resistencias.</b> Para uso donde se requieren altas resistencias a edades tempranas.
<b>IIIA: Altas resistencias.</b> Mismo uso que el tipo III, con aire incluido.
<b>IV: Bajo calor de hidratación.</b> Para uso donde se requiere un bajo calor de hidratación.
<b>V: Resistente a la acción de los sulfatos.</b> Para uso general y además en construcciones donde existe un alto ataque de sulfatos.

**Tabla 3. Clasificación de los cementos según norma ASTM 150**

### Tipo I

Este tipo de cemento es de uso general, y se emplea cuando no se requiere de propiedades y características especiales que lo protejan del ataque de factores agresivos como sulfatos, cloruros y temperaturas originadas por calor de hidratación. Entre los usos donde se emplea este tipo de cemento están: pisos, pavimentos, edificios, estructuras, elementos prefabricados.

### Tipo II

El cemento Pórtland tipo II se utiliza cuando es necesario la protección contra el ataque moderado de sulfatos, como por ejemplo en las tuberías de drenaje, siempre y cuando las concentraciones de sulfatos sean ligeramente superiores a lo normal, pero sin llegar a ser severas (En caso de presentarse concentraciones mayores se recomienda el uso de cemento Tipo V, el cual es altamente resistente al ataque de los sulfatos).

Genera normalmente menos calor que el cemento tipo I, y este requisito de moderado calor de hidratación puede especificarse a opción del comprador. En casos donde se especifican límites máximos para el calor de hidratación, puede emplearse en obras de gran volumen y particularmente en climas cálidos, en aplicaciones como muros de contención, pilas, presas, etc.

La Norma ASTM C 150 establece como requisito opcional un máximo de 70 cal/g a siete días para este tipo de cemento.

### Tipo III

Este tipo de cemento desarrolla altas resistencias a edades tempranas, a 3 y 7 días. Esta propiedad se obtiene al molerse el cemento más finamente durante el proceso de molienda. Su utilización se debe a necesidades específicas de la construcción, cuando es necesario retirar cimbras lo más pronto posible o cuando por requerimientos particulares, una obra tiene que ponerse en servicio muy rápidamente, como en el caso de carreteras y autopistas.

### Tipo IV

El cemento Pórtland tipo IV se utiliza cuando por necesidades de la obra, se requiere que el calor generado por la hidratación sea mantenido a un mínimo. El desarrollo de resistencias de este tipo de cemento es muy lento en comparación con los otros tipos de cemento. Los usos y aplicaciones del cemento tipo IV están dirigidos a obras con estructuras de tipo masivo, como por ejemplo grandes presas.

La hidratación inicia en el momento en que el cemento entra en contacto con el agua; el endurecimiento de la mezcla da principio generalmente a las tres horas, y el desarrollo de la resistencia se logra a lo largo de los primeros 30 días, aunque éste continúa aumentando muy lentamente por un período mayor de tiempo

#### **1.1.4.4. Cementos Especiales**

##### *Cementos para Pozos Petroleros*

Estos cementos, empleados para sellar pozos petroleros, normalmente están hechos de clinker de cemento Pórtland. Generalmente deben tener un fraguado lento y deben ser resistentes a temperaturas y presiones elevadas. El Instituto Americano del Petróleo (American Petroleum Institute) establece especificaciones (API 10-A) para nueve clases de cemento para pozos (clases A a la H). Cada clase resulta aplicable para su uso en un cierto rango de profundidades de pozo, temperaturas, presiones y ambientes sulfatados. También se emplean tipos convencionales de cemento Pórtland con los aditivos adecuados para modificar el cemento.

##### *Cementos Plásticos*

Los cementos plásticos se fabrican añadiendo agentes plastificantes, en una cantidad no mayor del 12% del volumen total, al cemento Pórtland de TIPO I ó II durante la operación de molienda. Estos cementos comúnmente son empleados para hacer morteros y aplanados.

##### *Cementos Pórtland Impermeabilizados*

El cemento Pórtland impermeabilizado usualmente se fabrica añadiendo una pequeña cantidad de aditivo repelente al agua como el estearato de sodio, de aluminio, u otros, al clinker de cemento durante la molienda final.

##### *Cemento Portland Blanco*

El cemento Pórtland blanco difiere del cemento Pórtland gris únicamente en el color. Se fabrica conforme a las especificaciones de la norma ASTM C 150, normalmente con respecto al tipo I o tipo III; el proceso de manufactura, sin embargo, es controlado de tal manera que el producto terminado sea blanco. El cemento Pórtland blanco es fabricado con materias primas que contienen cantidades insignificantes de óxido de hierro y de manganeso, que son las sustancias que dan el color al cemento gris.

El cemento blanco se utiliza para fines estructurales y para fines arquitectónicos, como muros precolados, aplanados, pintura de cemento, paneles para fachadas, pegamento para azulejos y como concreto decorativo.

## 1.2. La Industria del Cemento.

### 1.2.1. Historia.

La historia de este preciado producto se puede resumir en los siguientes hitos:

- **Prehistoria:** Se utilizaron bloques de piedra de gran tamaño y cuya estabilidad dependía de su colocación. (v.gr. Stonehenge de Inglaterra).
- **Egipto:** Se utilizan ladrillos de barro o adobe secados al sol y colocados en forma regular pegándolos con una capa de arcilla del Nilo con o sin paja para crear una pared sólida de barro seco. Este tipo de construcción prevalece en climas desérticos donde la lluvia es nula. Este tipo de construcción todavía se practica en muchas partes del planeta.
- **Grecia y Roma:** Se utiliza en la cal mezclada con arena para hacer mortero en la isla de creta. Los romanos adaptaron y mejoraron esta técnica para lograr construcciones de gran durabilidad como son el Coliseo Romano y Panteón Roma así como un sin número de construcciones desperdigadas por todo el Imperio Romano.
- Los griegos fueron los primeros en percatarse de las propiedades cementantes de los depósitos volcánicos al ser mezclados con cal y arena que actualmente conocemos como puzolanas (latín: Puteoli, un pueblo cercano a la bahía de Nápoles).
- **Siglos IX al XI:** Se pierde el arte de calcinar para obtener cal. Los morteros usados son de mala calidad.
- **Siglos XII al XIV:** Revive el arte de preparar mortero con las técnicas usadas por los romanos.
- **Siglos XIV al XVII:** El mortero producido es excelente y empieza a utilizarse en un proceso continuo.
- **Siglo XVIII:** Se erige el faro de Eddystone en Inglaterra. Se reconoce el valor de la arcilla sobre las propiedades hidráulicas de la cal.
- **1756:** John Smeaton, un ingeniero inglés, encuentra las proporciones para el cemento. Aparecen los primeros concretos.
- **1796:** James Parker saca una patente para un cemento hidráulico natural (cemento de Parker o cemento Romano).

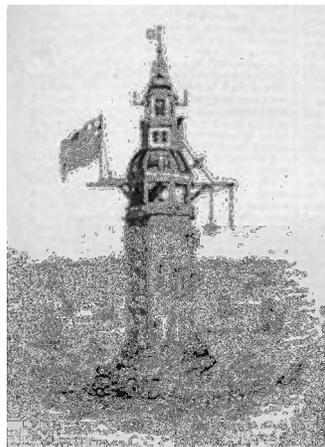
**Siglo XIX:** L. J. Vicat prepara una cal hidráulica al calcinar una mezcla de creta y arcilla molida en forma de lodo (nace el método húmedo).

- **1800 - 1850:** Este periodo fue caracterizado por la aplicación de tres materiales: el acero, el cristal y el concreto que permitirían la industrialización de la producción, la prefabricación, el rápido montaje y la pronta recuperación de capital; todo esto en busca de una prosperidad económica a través del libre mercado y en donde la competencia era la fuerza motriz del progreso.
- **1820:** Se asoció un entrapado de barras de hierro con concreto en ambas caras, se aplicó en una iglesia de Courbevoie, Francia.
- **1824:** Joseph Aspdin logra desarrollar una excelente cal hidráulica para construcción a la que llamó cemento Portland porque el gris era muy parecido al de las piedras halladas en la localidad de ese nombre, en Inglaterra y obtiene la primera patente británica para producir Cemento Portland por medio de un proceso de pasta (método húmedo).
- **1851:** En Londres nace el primer evento de carácter mundial acerca de la construcción. Para conmemorar este evento, se construye un edificio único en el que se albergara a todas las naciones, tarea que es encomendada a Joseph Pastón, quien haciendo uso de acero recubierto con cristal crea "El Palacio de Cristal".
- **1855:** Es en la segunda exposición de un evento mundial, con sede en París, Francia, cuando se enfatiza el uso del concreto. En este evento se rindió homenaje a los creadores de prototipos; a los diseñadores de maquinaria y muebles; y una parte sustantiva al diseño industrial.
- Es durante la construcción del Palacio Industrial, fundado en los Campos Elíseos en Francia, donde se piensa que se realizaron las primeras investigaciones y los primeros productos de la técnica del concreto armado, planteando la integración de las artes y las técnicas.
- **1861:** El francés Coignet construye un solar con el principio de entrapado de acero y cimbrado para recibir el concreto.
- **1867:** Se crean las primeras losas con refuerzo metálico embebido en el concreto.
- **1868:** El jardinero Monier construyó un depósito de agua de 200 m<sup>3</sup>, y sus procedimientos fueron aplicados en la construcción de bóvedas armadas, y después, en vigas rectas.
- **1873:** Se construye el primer puente haciendo uso de concreto.
- **1876:** El Ing. Mazas aplica por primera vez el cálculo de los elementos de concreto, fundamentando las bases de las resistencias de materiales.

- **1877:** Se funda la primera asociación para fijar especificaciones del Cemento Portland, en Alemania para controlar la calidad del producto.
- **1886:** El primer horno rotatorio es utilizado para la producción de clinker.
- **1890:** Se introduce el yeso como retardante del fraguado y se utilizan altas temperaturas para obtener silicatos con alto contenido de óxido de calcio.

### **Siglo XX:**

- **1900:** Las pruebas básicas del cemento son estandarizadas.
- **1903:** Se comienzan a introducir las innovaciones del concreto armado a la arquitectura e ingeniería; y es a partir de este momento cuando alcanza un gran desarrollo en la sistematización de sus técnicas, métodos constructivos y cálculos. Con este crecimiento tecnológico nacen industrias relacionadas o derivadas del cemento; para controlar mejor su uso y para su empleo más eficiente, se crean industrias como: del concreto premezclado, de la prefabricación, del pre esfuerzo, tubos, blocks, entre otros.
- **1904:** Se funda la Institución Británica de Estándares y se publica la primera especificación del Cemento Portland por la American Society for Testing Materials (A. S. T. M). Asimismo, comienzan las investigaciones sobre las propiedades del cemento en una base científica y sistemática.
- **1908:** Se patenta el cemento aluminoso (Lafarge).
- **1909:** Thomas Edison promueve una patente para hornos rotatorios.
- **1930:** Agentes inclusores de aire son introducidos para mejorar la resistencia del concreto al daño por congelamiento.
- **1960:** Se patenta el cemento sulfoaluminoso (Klein)
- **1985:** Cenizas volantes son introducidas como aditivo puzolánico.



**Figura 17. Faro de Eddystone.**

### 1.2.2. El cemento en el mundo.

De acuerdo con el “Mineral Commodity Sumaries 2011” emitido por el Departamento del Interior de Estados Unidos, la producción mundial de cemento en el año 2010 se distribuyó de la siguiente forma:

Producción Mundial de Cemento (miles de toneladas)		Producción de cemento		Capacidad de clinker	
		2009	2010	2009	2010
1	China	1,629,000	1,800,000	1,300,000	1,500,000
2	India	205,000	220,000	250,000	260,000
3	Estados Unidos (incluye Puerto Rico)	64,900	63,500	114,000	109,000
4	Turquía	54,000	60,000	63,000	65,000
5	Brasil	51,700	59,000	50,000	55,000
6	Japón	54,800	56,000	63,000	63,000
7	Irán	50,000	55,000	50,000	57,000
8	Vietnam	47,900	50,000	50,000	55,000
9	España	50,000	50,000	42,000	42,000
10	Rusia	44,300	49,000	65,000	65,000
11	Egipto	46,500	48,000	45,000	46,000
12	República de Corea	50,100	46,000	50,000	50,000
13	Arabia Saudita	40,000	45,000	40,000	50,000
14	Indonesia	40,000	42,000	42,000	42,000
15	Italia	36,300	35,000	46,000	46,000
16	México	35,200	34,000	42,000	42,000
17	Tailandia	31,200	31,000	50,000	50,000
18	Alemania	30,400	31,000	31,000	31,000
19	Pakistán	32,000	30,000	42,000	45,000
20	Otros países (redondeado)	466,000	520,000	460,000	470,000
<b>Total Mundial</b>		<b>3,059,300</b>	<b>3,324,500</b>	<b>2,895,000</b>	<b>3,143,000</b>

**Tabla 4. Producción Mundial de Cemento.**

### 1.2.3. El cemento en México.

En el año 2010, México ocupó el lugar 16 en producción de cemento con aproximadamente 34 millones de toneladas.

Tal cantidad de cemento fue el resultado de la producción de más de 30 plantas cementeras instaladas en territorio nacional:

Empresa:	Número de plantas:
<b>Cemex México</b>	15
<b>Holcim Apasco</b>	6
<b>Cementos Moctezuma</b>	2
<b>GCC Cemento</b>	3
<b>LaFarge Cementos</b>	2
<b>Cooperativa La Cruz Azul S.C.L.</b>	2
<b>Cementos y Concretos Nacionales</b>	2
Total:	<b>32</b>

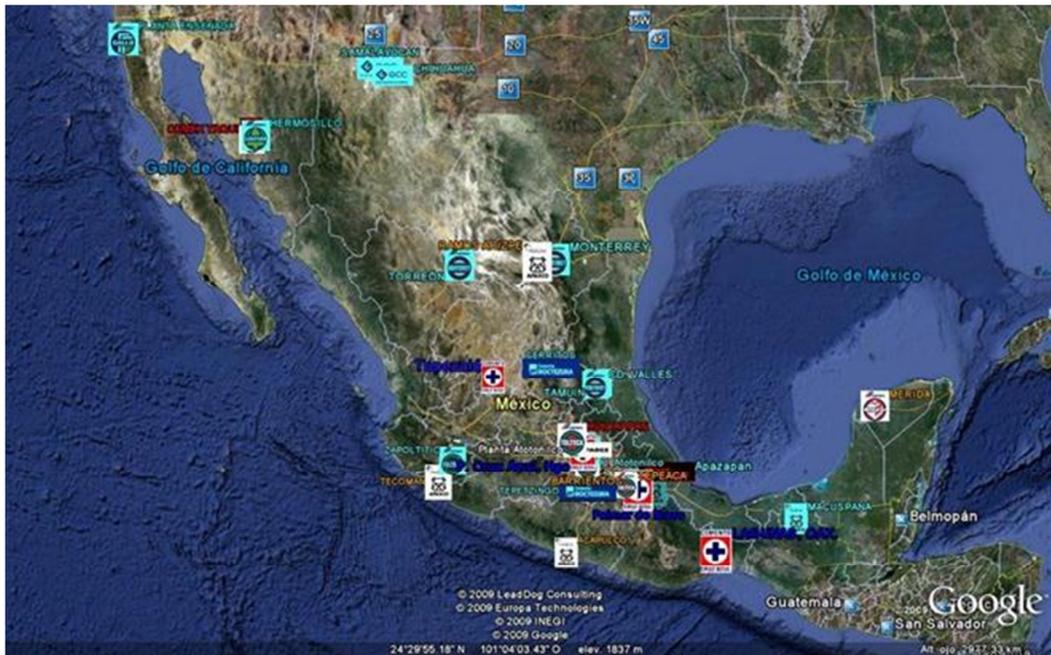
Tabla 5. Producción Nacional de Cemento.

Y distribuida de la siguiente manera:

DISTRIBUCIÓN DE LA PRODUCCIÓN NACIONAL DE CEMENTO AÑO 2010	CEMEX	HOLCIM APASCO	CRUZ AZUL	MOCTEZUMA	LA FARGE	CEMENTOS CHIHUAHUA	TOTAL
Capacidad Instalada de clinker	44.67%	20.33%	17.34%	12.27%	1.29%	4.09%	100.00%
Capacidad total de cemento instalada	44.04%	21.09%	17.79%	11.95%	1.23%	3.90%	100.00%
Producción total	42.93%	21.59%	17.99%	12.24%	1.26%	3.99%	100.00%
Capacidad total de cemento blanco	90.80%		9.20%				100.00%

Tabla 6. Principales productores de cemento en México.

Las principales fábricas de cemento en el país se encuentran en los estados de Hidalgo, Sonora, Chihuahua, Coahuila, Nuevo León, Jalisco, Puebla y Estado de México entre otros.



**Figura 18. Ubicación geográfica de los principales productores de cemento en México.**

### 1.3. Importancia de la Unidad de Calcinación en el cemento.

El cemento es el resultado de diferentes operaciones unitarias que representan cambios físicos en la materia prima (reducción de tamaño y mezcla con otros materiales) y es solamente en la etapa de calcinación donde se suscitan los cambios químicos de los materiales por las altas temperaturas.

La fabricación del clinker de cemento portland, en los primeros tiempos, se realizaba en hornos verticales cargados y controlados manualmente. Este procedimiento exigía grandes esfuerzos físicos y presentaba el inconveniente de un funcionamiento irregular produciendo un clinker de composición química y mineralógica variable y, a menudo, de mala calidad. Además la capacidad de producción de dichos hornos era muy baja.

Este sistema, tan poco satisfactorio, fue reemplazado por hornos verticales automáticos, en los cuales con un buen crudo y con un combustible conveniente, era posible obtener un funcionamiento regular del horno y, por tanto, un clinker más homogéneo. El inconveniente que seguía presentándose era el de una producción limitada, nunca superior a las 300 toneladas por día.

A finales del siglo XIX apareció en Gran Bretaña el horno rotatorio, y hoy en día la **calcinación del crudo** (piro-procesamiento), con el fin de obtener el clinker tiene lugar, casi exclusivamente, con este tipo de horno.

La capacidad de producción de los hornos rotatorios, comparada con la de los hornos verticales, es mayor y aumentó considerablemente, especialmente después de la introducción de los sistemas de intercambiadores de calor y de precalcinación, así como del adecuado control y automatización del proceso de calcinación. Hoy en día existen plantas con una capacidad de producción de 10,000 toneladas de clinker por día. Además hay que tener en cuenta que todo esto se ha logrado sin disminuir o incluso aumentando la calidad del clinker.

La unidad de calcinación representa "**el corazón**" del proceso de fabricación del cemento y si deseamos desarrollar un **modelo que simule su comportamiento** es preciso conocer su funcionamiento y variables, pero también es importante conocer la **metodología** propia de la **simulación**, la cual estudiaremos en el siguiente capítulo.

**CAPÍTULO 2**  
**MARCO TEÓRICO**  
**SIMULACIÓN:**  
**¿POR QUÉ EMPLEARLA?**

## Capítulo 2: Simulación. ¿Por qué emplearla?

### 2.1. La Simulación como técnica de Investigación de Operaciones.

#### 2.1.1. Investigación de Operaciones.

##### **Historia.**

La primera actividad de Investigación de Operaciones se dió durante la Segunda Guerra Mundial en Gran Bretaña, donde la Administración Militar llamó a un grupo de científicos de distintas áreas del saber para que estudiaran los problemas tácticos y estratégicos asociados a la defensa del país.

Al término de la guerra y atraídos por los buenos resultados obtenidos por los estrategas militares, los administradores industriales empezaron a aplicar las herramientas de la Investigación de Operaciones a la resolución de sus problemas que empezaron a originarse debido al crecimiento del tamaño y la complejidad de las industrias.

Un segundo factor en el progreso impresionante de la Investigación de Operaciones fue el desarrollo de la computadora digital, que con sus tremendas capacidades de velocidad de cómputo y de almacenamiento y recuperación de información, permitieron al tomador de decisiones rapidez y precisión.

Si no hubiera sido por la computadora digital, la Investigación de Operaciones con sus grandes problemas de computación no hubiera crecido al nivel de hoy en día.

##### **Definición:**

La definición de Churchman, Ackoff y Arnoff: ***La investigación de operaciones es la aplicación, por grupos interdisciplinarios, del método científico a problemas relacionados con el control de las organizaciones o sistemas (hombre-máquina), a fin de que se produzcan soluciones que mejor sirvan a los objetivos de la organización.***

La Investigación de Operaciones intenta encontrar una mejor solución (llamada solución óptima), para el problema bajo consideración. En lugar de contentarse con mejorar el estado de las cosas, la meta es identificar el mejor curso de acción posible.

En la Investigación de Operaciones es necesario emplear el enfoque de equipo. Este equipo debe incluir personal con antecedentes firmes en matemáticas, estadísticas y teoría de probabilidades, economía, administración de empresas ciencias de la computación, ingeniería, etc. El equipo también necesita tener la experiencia y las habilidades para permitir la consideración adecuada de todas las ramificaciones del problema.



**Figura 19. Trabajo en equipo para la solución de problemas.**

### 2.1.2. Técnicas de Investigación de Operaciones.

La Investigación de Operaciones ha desarrollado una serie de técnicas y modelos muy útiles a la Ingeniería de Sistemas. Algunos ejemplos son:

- **Programación Lineal:** Es el estudio de modelos matemáticos concernientes a la asignación eficiente de los recursos limitados en las actividades conocidas, con el objetivo de satisfacer las metas deseadas (tal como maximizar beneficios o minimizar costos). El propósito de la programación lineal es el de MAXIMIZAR o MINIMIZAR funciones lineales de la forma :

$$f(X) = C_1X_1 + C_2X_2 + C_3X_3 + \dots + C_nX_n$$

Sujeta a un sistema de inecuaciones o ecuaciones lineales.

$$a_{11}X_1 + a_{12}X_2 + a_{13}X_3 + \dots + a_{1n}X_n \leq b_1$$

$$a_{21}X_1 + a_{22}X_2 + a_{23}X_3 + \dots + a_{2n}X_n \leq b_2$$

$$a_{m1}X_1 + a_{m2}X_2 + a_{m3}X_3 + \dots + a_{mn}X_n \leq b_n$$

En donde las variables  $X_i$  ( $i = 1, 2, 3, \dots, n$ ) son no negativas.

- **Programación No Lineal:** Es aquella donde las variables de decisión se expresan como funciones no lineales ya sea en la función objetivo y/o restricciones de un modelo de optimización. Esta característica particular de los modelos no lineales permite abordar problemas donde existen economías o deseconomías de escala o en general donde los supuestos asociados a la proporcionalidad no se cumplen.
- **Teoría de Colas:** Es el estudio matemático de las colas o líneas de espera. La formación de líneas de espera es, por supuesto, un fenómeno común que ocurre siempre que la demanda actual de un servicio excede a la capacidad actual de proporcionarlo, con frecuencia, en la industria y en otros sitios, deben tomarse decisiones respecto a la cantidad de capacidad que debe proporcionarse. La meta final es lograr un balance económico entre el costo del servicio y el costo asociado con la espera por ese servicio.

- **Programación Entera:** El modelo matemático para programación entera es sencillamente el modelo de programación lineal, con la restricción adicional de que las variables deben tener valores enteros. Si solo es necesario que algunas de las variables tengan valores enteros (y la suposición de divisibilidad se cumple para el resto), el modelo es de **Programación Entera Mixta**. Cuando se hace la distinción entre un problema con todas las variables enteras y este caso mixto, el primero se llama de programación entera pura.
- **Programación Dinámica:** Es una técnica matemática útil en una serie de decisiones interrelacionadas. Proporciona un procedimiento sistemático para determinar la combinación de decisiones que maximiza la efectividad total. En contraste con la Programación Lineal, no cuenta con una formulación matemática estándar para el problema de programación dinámica, sino que se trata de un enfoque de tipo general para la solución de problemas y las ecuaciones específicas que se usan se deben desarrollar para que representen cada situación individual. Entonces, se necesita un cierto grado de creatividad y un buen conocimiento de la estructura general de los problemas de Programación Dinámica para reconocer cuándo un problema se puede resolver por medio de estos procedimientos y cómo esto se puede llevar a cabo.
- **Control de Inventarios:** Mantener un inventario (existencia de bienes) para su venta o uso futuro es una práctica común en el mundo de los negocios. Las empresas de venta al menudeo, los mayoristas, los fabricantes y aún los bancos de sangre por lo general almacenan bienes y artículos. ¿Cómo decide una instalación de este tipo sobre su "política de inventarios", es decir, cuándo y cómo se reabastece? En una empresa pequeña, el administrador puede llevar un recuento de su inventario y tomar estas decisiones. Sin embargo, como esto puede ser no factible incluso en empresas chicas, muchas compañías han ahorrado grandes sumas de dinero al aplicar la "Administración Científica de Inventario". En particular, ellos:
  1. Formulan un modelo matemático que describe el comportamiento del sistema de inventarios.
  2. Derivan una política óptima de inventarios con respecto a este modelo.
  3. Con frecuencia, utilizan una computadora para mantener un registro de los niveles de inventario y señalar cuándo y cuánto conviene reabastecer.

- **Simulación:** Es una técnica numérica para conducir experimentos en una computadora digital, haciendo uso de gráficos, animación y otros dispositivos tecnológicos; lo cual involucra ciertos tipos de modelos matemáticos y lógicos, que describen el comportamiento de un sistema (o algún componente de éste) durante cierto tiempo. La Simulación, permite imitar el comportamiento de un sistema real o hipotético según ciertas condiciones particulares de operación. El proceso de desarrollo de la Simulación se subdivide en las siguientes etapas:

1. Formulación del problema,
2. Diseño del modelo conceptual,
3. Obtención de datos,
4. Construcción del modelo,
5. Verificación y validación,
6. Análisis y documentación e
7. Implementación.

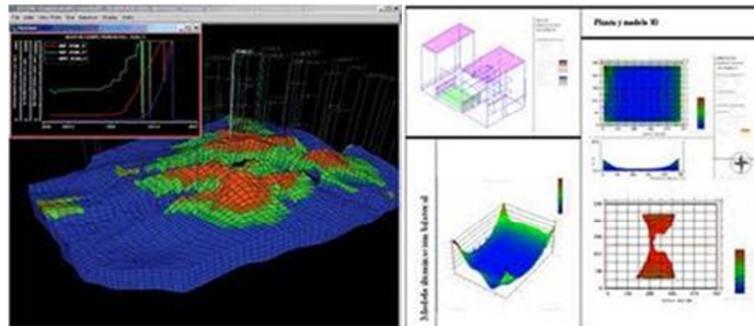


Figura 20. Ejemplos de modelos de simulación.

### 2.1.3. ¿Por qué usar la Simulación?

Dependiendo de la problemática, las diferentes técnicas de Investigación de Operaciones se pueden adaptar para resolverla, en especial, se debe emplear a la Simulación si nuestro problema a resolver presenta las siguientes características:

<b>Se debe emplear a la simulación si:</b>	<b>¿Es aplicable la simulación al proceso de calcinación del cemento?</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ No existe una completa formulación matemática del problema o los métodos analíticos para resolver el modelo matemático no se han desarrollado aún. Muchos modelos de líneas de espera corresponden a esta categoría.</li> </ul>	<p>Sí, debido a que el proceso de calcinación del cemento implica una gran cantidad de variables termodinámicas que difícilmente se pueden integrar en un modelo matemático completo, por lo que es necesario simplificarlo.</p>
<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Los métodos analíticos están disponibles, pero los procedimientos matemáticos son tan complejos y difíciles, que la simulación proporciona un método más simple de solución.</li> </ul>	<p>Sí, porque existen estudios técnicos parciales del proceso de calcinación y que se centran en situaciones muy puntuales. Ejemplo: Estudios de la mecánica del horno, Diseños de precalentadores, etc.</p>
<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Las soluciones analíticas existen y son posibles, pero están más allá de la habilidad matemática del personal disponible El costo del diseño, la prueba y la corrida de una simulación debe entonces evaluarse contra el costo de obtener ayuda externa.</li> </ul>	<p>Sí, actualmente las diversas áreas técnicas de La Cooperativa La Cruz Azul realizan estudios de forma aislada y acorde a los planes y estrategias de sus propias gerencias. Se carece de un enfoque sistémico e integrador.</p>
<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Se desea observar el trayecto histórico simulado del proceso sobre un período, además de estimar ciertos parámetros.</li> </ul>	<p>Sí, el monitoreo de la unidad de calcinación indica que su comportamiento es uniforme (proceso continuo) y regular en los valores de sus variables de estado, pero no toma en cuenta a los parámetros de la materia prima entrante al sistema.</p>
<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ La simulación puede ser la única posibilidad, debido a la dificultad para realizar experimentos y observar fenómenos en su entorno real, por ejemplo, estudios de vehículos espaciales en sus vuelos interplanetarios.</li> </ul>	<p>Desde luego porque es muy costoso realizar pruebas de materia prima en una unidad de calcinación en operación y esperar a que los resultados no deterioren la calidad de grandes lotes de clinker y cemento producidos.</p>
<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Se requiere la aceleración del tiempo para sistemas o procesos que requieren de largo tiempo para realizarse. La simulación proporciona un control sobre el tiempo, debido a que un fenómeno se puede acelerar o retardar según se desee.</li> </ul>	<p>Sí, porque no solo se requiere que el modelo simule un día de producción, sino un periodo mucho mayor como por ejemplo un año o más.</p>

**Tabla 7. Justificación del uso de la simulación en el proceso de calcinación del cemento.**

## **2.2. Simulación en la Ingeniería de Sistemas.**

### **2.2.1. Enfoque sistémico de la simulación.**

Recientes avances en las metodologías de simulación y la gran disponibilidad de software que actualmente existe en el mercado, han hecho que la técnica de simulación sea una de las herramientas más ampliamente usadas en el análisis de sistemas. Además de las razones antes mencionadas, Thomas H. Taylor ha sugerido que un estudio de simulación es muy importante para la ingeniería de sistemas porque presenta las siguientes ventajas en el diseño de estos:

- A través de un estudio de simulación, se puede estudiar el efecto de cambios internos y externos del sistema, al hacer alteraciones en el modelo del sistema y observando los efectos de esas alteraciones en el comportamiento del sistema.
- Una observación detallada del sistema que se está simulando puede conducir a un mejor entendimiento del sistema y por consiguiente a sugerir estrategias que mejoren la operación y eficiencia del sistema.
- La simulación de sistemas complejos puede ayudar a entender mejor la operación del sistema, a detectar las variables más importantes que interactúan en el sistema y a entender mejor las interrelaciones entre estas variables.
- La técnica de simulación puede ser utilizada para experimentar con nuevas situaciones, sobre las cuales tiene poca o ninguna información. A través de esta experimentación se puede anticipar mejor a posibles resultados no previstos.
- Cuando nuevos elementos son introducidos en un sistema, la simulación puede ser usada para anticipar cuellos de botella o algún otro problema que puede surgir en el comportamiento del sistema.
- En simulación cada variable puede sostenerse constante excepto algunas cuya influencia está siendo estudiada. Como resultado el posible efecto de descontrol de las variables en el comportamiento del sistema necesitan no ser tomados en cuenta. Como frecuentemente debe ser hecho cuando el experimento está desarrollado sobre un sistema real.

Para introducir el concepto de modelo de un sistema, y presentar los tipos de modelos de simulación y sus principales características, debe previamente especificarse qué se entiende por sistema.

### 2.2.1.1. Sistema.

***Un sistema puede definirse como una colección de objetos o entidades que interactúan entre sí para alcanzar un cierto objetivo.***

Sin perder generalidad y considerando como finalidad de los experimentos el estudio del comportamiento de un sistema en el tiempo, los sistemas pueden clasificarse en: continuos, discretos, orientados a eventos discretos y combinados.

El estado de un sistema puede ser definido como el conjunto mínimo de variables necesarias para caracterizar o describir todos aquellos aspectos de interés del sistema en un cierto instante del tiempo.

- ***Sistemas continuos:*** Las variables de estado del sistema evolucionan de modo continuo a lo largo del tiempo. Un ejemplo de este tipo de sistemas es la evolución de la temperatura en una habitación durante cualquier intervalo de tiempo, o bien, el nivel del líquido en un tanque.



**Figura 21. La temperatura es un ejemplo de sistema continuo.**

- ***Sistemas discretos:*** Se caracterizan en que las propiedades de interés del sistema cambian únicamente en un cierto instante o secuencia de instantes, y permanecen constantes el resto del tiempo. La secuencia de instantes en los cuales el estado del sistema puede presentar un cambio obedece a un patrón periódico.



Figura 22. Sistemas discretos: Vehículos que arriban a una caseta.

- **Sistemas orientados a eventos discretos:** Al igual que los sistemas discretos, se caracterizan en que las propiedades de interés del sistema cambian únicamente en una secuencia de instantes de tiempo. La secuencia de instantes en los cuales el estado del sistema puede presentar un cambio obedece a un patrón aleatorio.
- **Sistemas combinados:** Aquellos que combinan subsistemas cuyas dinámicas responden a características continuas y discretas. Es el caso de los sistemas que poseen componentes que deben ser necesariamente modelados según alguno de dichos enfoques específicos.

Un buen sistema debe contener retroalimentación, es decir, un monitoreo del comportamiento con respecto a ciertos estándares de medición. De este modo será posible tomar medidas de control cuando se encuentren desviaciones.

#### 2.2.1.2. Modelo.

El arte de la modelación consiste, precisamente, en encontrar el justo medio entre la sencillez y a adecuada representación del modelo.

***Un modelo es la representación simplificada de un problema o situación real.***

Existen alternativas a las técnicas de simulación para imitar (simular) el comportamiento de un sistema. Sería el caso de la construcción de un prototipo a escala del sistema real (plantas piloto, procesos en miniatura, etc.), la representación analógica del sistema mediante circuitos eléctricos, la descripción cualitativa del sistema, o la analogía con otros sistemas físicos o biológicos, como la experimentación de drogas en animales para prever sus efectos en las personas.

La descripción en términos matemáticos de un problema real no es una metodología de trabajo propia de la simulación. Aunque existe una gran diversidad de metodologías para el desarrollo de modelos matemáticos de sistemas físicos, se deben tener en cuenta un conjunto de consideraciones a fin de garantizar una representación eficiente del sistema real.

- Un modelo se desarrolla siempre a partir de una serie de aproximaciones e hipótesis y, consecuentemente, representa tan solo parcialmente la realidad.
- Un modelo se construye para una finalidad específica y debe ser formulado para que sea útil a dicho fin.
- Un modelo tiene que ser, por necesidad, un compromiso entre la simplicidad y la necesidad de recoger todos los aspectos esenciales del sistema en estudio.

Así pues, un buen modelo debe preservar las siguientes propiedades:

- Representar adecuadamente aquellas características del sistema que son de nuestro interés.
- Ser una representación abstracta de la realidad lo suficientemente sencilla como para facilitar su mantenimiento, adaptación y reutilización.

### 2.2.2. Metodología de la Simulación.

Generalmente diversos autores que escriben sobre la simulación de sistemas, proponen de acuerdo con su experiencia personal el proceso siguiente:

1. **Formulación del problema:** No debe desarrollarse ningún estudio, simulación o actividad parecida, hasta que se enuncien claramente el problema y los objetivos de estudio. Al definir los objetivos de la simulación, se debe considerar el uso que se dará al modelo, algunos se construyen para usarse una vez, otros para análisis estadístico y otros para animación realista y convencer a un cliente escéptico.
2. **Conceptualización del sistema:** En esta etapa se definen las variables, distribuciones de probabilidad, parámetros, etc. juega un papel importante la persona que conoce el sistema a simular.
3. **Recolección de información y datos para la construcción del modelo conceptual:** Es necesario definir los datos a investigar, la forma de obtenerlos, el tiempo a invertir y la forma de validarlos. También se especifican los parámetros del modelo y las distribuciones de probabilidad. Se construye un modelo básico.

4. **Validación del modelo conceptual:** Esta etapa ayuda a asegurar que los supuestos del modelo son correctos y completos. Es posible detectar posibles errores antes de convertirlos en mayores dentro de la programación del modelo completo.
5. **Desarrollo y verificación del modelo completo:** Los objetivos del modelo están muy ligados al lenguaje de programación que se usará. Puede usarse un lenguaje de propósito general como "C" o un software comercial de simulación.
6. **Validación del Modelo:** Uno de los problemas más difíciles que enfrenta el analista es precisamente tratar de determinar cuándo un modelo de simulación es una representación adecuada del sistema real en estudio, es decir, determinar cuándo el modelo es *válido*. La Estadística juega un papel fundamental en la validación del modelo, como por ejemplo, pruebas de **igualdad de medias y varianzas** o pruebas no paramétricas con la **Ji-Cuadrada** o la prueba de **Kolmogorov-Smirnov**.
7. **Diseño, ejecución y análisis de experimentos:** El diseño de experimentos incluye diseñar las diferentes corridas que se quieran hacer con el modelo, y obtener resultados que al ser analizados den luz de las alternativas de solución posibles. Aquí se definen las variables de control y las respuestas a analizar.
8. **Presentación y documentación de los resultados de la simulación:** Se debe elaborar un documento que contenga las metas, medidas de desempeño de interés, diagrama de flujo del proceso, validación del modelo, datos de entrada, fuentes de información y resultados obtenidos así como su interpretación técnica y económica.

### 2.2.3. Elementos de Simulación.

A continuación mencionaremos diversos elementos que forman parte de un modelo de simulación, entre los cuales tenemos:

- **Entidad:** Es la representación de los flujos de entrada a un sistema; éste elemento es responsable de que el estado del sistema cambie. Las entidades son objetos dinámicos en la simulación, por lo general, son creados, se mueven alrededor durante un tiempo y después son desechados conforme se van. Sin embargo, es posible tener entidades que nunca se van sino que se mantienen circulando en el sistema. Ejemplos de entidades pueden ser los clientes que llegan a la caja de un banco, las piezas que llegan a un proceso o el embarque de piezas que llegan a un inventario.

- **Estado del sistema:** Es la condición que guarda el sistema bajo estudio en un momento determinado; es como una fotografía de lo que está pasando en el sistema en cierto instante. Se caracteriza por un conjunto de atributos de interés y el estado del sistema en un momento dado será el valor particular de cada uno de ellos.
- **Evento:** Es un cambio en el estado del sistema; por ejemplo, la entrada o salida de una entidad, la finalización de un proceso en un equipo, la descompostura de una máquina o la interrupción o reactivación de una operación.
- **Localización:** Son todos aquellos lugares en los que la pieza puede detenerse para ser transformada o esperar a serlo. Dentro de estas localizaciones tenemos almacenes, bandas transportadoras, máquinas, estaciones de inspección, etc.
- **Recursos:** Con frecuencia las entidades compiten entre ellas por el servicio de los recursos, que representan cosas como el personal, equipo, espacio en el área de almacenaje de tamaño limitado. Los recursos son aquellos dispositivos para llevar a cabo una operación.
- **Atributo:** Es una característica de una entidad. Por ejemplo, si la entidad fuera un motor, los atributos serían su color, peso, tamaño y cilindraje. Los atributos son muy útiles para diferenciar entidades sin necesidad de generar una entidad nueva.
- **Variables:** Una variable (o variable global) es información que refleja alguna característica de su sistema sin importar cuántos o qué tipo de entidades haya alrededor. Las variables se clasifican como determinísticas si puede predecirse su valor con certeza absoluta, o estocásticas si esto no es posible.
- **Colas:** Cuando una entidad no puede seguir adelante, quizá porque necesita aprovechar una unidad de un recurso que está inmovilizada por otra entidad, se requiere un lugar para esperar que es la cola.
- **Reloj de simulación:** El valor actual del tiempo en la simulación se mantiene en una variable llamada reloj de simulación. A diferencia del tiempo real, el reloj de simulación no se encarga de todos los valores ni fluye de manera continua, más bien, va del tiempo de un evento al tiempo del siguiente evento programado. Puesto que nada cambia entre los eventos, no hay necesidad de desperdiciar tiempo (real) analizando el tiempo (simulado) que no importa.

## **2.2.4. Ventajas, desventajas y aplicaciones de la Simulación.**

### **2.2.4.1. Ventajas**

La simulación es una de las diversas herramientas con las que cuenta el analista para tomar decisiones y mejorar sus procesos. Sin embargo, es necesario destacar que, como todas las demás opciones de que disponemos, la simulación presenta ventajas y desventajas que son precisos tomar en cuenta al determinar si es apta para resolver un problema determinado.

La disponibilidad en el mercado de entornos de simulación orientados a campos específicos, con librerías preprogramadas y validadas de componentes típicos, junto con la capacidad de programación gráfica y de visualización, han hecho posible que la simulación sea una técnica más utilizada en el análisis y la mejora de sistemas.

Algunos de los objetivos para los cuales pueden utilizarse muy satisfactoriamente las técnicas de simulación de sistemas orientados a eventos discretos son:

- El análisis y estudio de la incidencia sobre el rendimiento global del sistema de pequeños cambios realizados sobre alguno de sus componentes. En la actualidad, los sistemas logísticos son considerados sistemas complejos, entre otros motivos, porque un pequeño cambio o una mala sincronización entre los elementos que intervienen en los mismos pueden derivar fácilmente en un comportamiento no deseado, lo que frecuentemente implica una importante repercusión económica.
- Cambios en la organización de una empresa, así como en la gestión de la información pueden ser fácilmente simulados, y los efectos sobre el sistema real pueden ser analizados a partir de la experimentación con el modelo.
- El conocimiento que se obtiene en el desarrollo de un modelo de simulación es de gran interés para poder sugerir posibles mejoras en su rendimiento, más allá del estricto encargo del estudio de simulación propiamente dicho.
- La observación de los resultados que se obtienen de un simulador a partir de experimentar con ciertos parámetros del modelo, así como los cambios en las entradas, permiten inferir aspectos relativos a la sensibilidad del sistema y qué variables son las que más pueden beneficiar al rendimiento del mismo.

- La simulación suele ser utilizada desde una perspectiva pedagógica para ilustrar y facilitar la comprensión de los resultados que se obtienen mediante técnicas analíticas.
- Experimentar con condiciones de operación que podrían ser peligrosas o de elevado coste económico en el sistema real.

En resumen, las técnicas de simulación pueden generalmente ser utilizadas como una metodología de trabajo barata y segura que,

- Permite responder muy satisfactoriamente a preguntas del tipo “qué ocurriría si realizamos este cambio en...”
- Contribuye a la reducción del riesgo inherente a la toma de decisiones.

#### **2.2.4.2. Desventajas.**

Entre las desventajas que pueden presentarse con la simulación, están:

- Aunque muchos paquetes de software permiten obtener el mejor escenario a partir de una combinación de variaciones posibles, la simulación no es una herramienta de optimización.
- La simulación puede ser costosa cuando se requiere utilizarla en problemas relativamente sencillos de resolver, en lugar de obtener soluciones analíticas que se han desarrollado de manera específica para este tipo de casos.
- Se requiere demasiado tiempo (generalmente meses) para realizar un buen estudio de simulación; por desgracia, no todos los analistas tienen la disposición (o la oportunidad) de esperar ese tiempo para obtener una respuesta.
- Es preciso que el analista domine el uso del paquete de simulación y que tenga sólidos conocimientos de estadística para interpretar los resultados.
- Si la toma de decisiones se basa únicamente en la Simulación, se cuenta con un elevado riesgo si el modelo en el cual se basa el estudio no ha sido validado y las fases del proyecto conveniente verificadas.
- El problema es todavía más complicado cuando se pretende optimizar el rendimiento de un sistema que presenta un comportamiento estocástico (predecible desde un punto de vista estadístico) a partir en la logística del sistema.

### 2.2.4.3. Aplicaciones.

Las herramientas de simulación ofrecen una plataforma que permite abordar con éxito un proceso de mejora continua de sistemas complejos para los cuales las técnicas analíticas clásicas basadas en el uso del cálculo diferencial, teoría de probabilidades y métodos algebraicos no pueden ser utilizadas para formalizar de modo sencillo la complejidad de los procesos.

Dentro de las aplicaciones de la Simulación tenemos:

- **Procesos de fabricación:** Fue una de las primeras áreas beneficiadas por estas técnicas. La simulación se emplea tanto en el diseño como para la ayuda a la toma de decisiones operacionales.
- **Logística:** La simulación contribuye de forma significativa a la mejora de los procesos logísticos en general. Dentro de esta área, se incluye una cadena completa de suministros (supply chain) como la gestión de inventarios de un almacén.
- **Transporte:** Ya sea por ferrocarril, por carretera, por vía aérea y ligada o no a decisiones logísticas. La intermodalidad entendida como la interconexión de diferentes medios de transporte, ha merecido especial atención en los últimos años. También se ha introducido con fuerza la simulación visual de modelos de tránsito, tanto en lo que se refiere a modelos macroscópicos como microscópicos.
- **Sanidad:** Se emplea en la mejora tanto de un departamento hospitalario, como en la logística asociada a los trasplantes o a la coordinación médica en una región.
- **Negocios (Business Processing):** simulación de los procesos administrativos y de negocio de una empresa.
- **Construcción:** Por ejemplo, la planificación de la construcción en obra civil o la gestión de recursos en la industria.
- **Emergencias:** La simulación se emplea para la gestión de la emergencia; por ejemplo, diseño de planes de evacuación en edificios o recintos públicos.
- **Servicios en general:** Servicios públicos, gestión de restaurantes, banca, empresas de seguros.

## **2.3. Software para Simulación.**

### **2.3.1. Lenguaje de Propósito General vs Software de Simulación.**

La simulación es una de las diversas herramientas con las que cuenta el analista para tomar decisiones y mejorar sus procesos. Sin embargo, es necesario destacar que, como todas las demás opciones de que disponemos, la simulación presenta ventajas y desventajas que son precisas tomar en cuenta al determinar si es apta para resolver un problema determinado.

Se han desarrollado tantos lenguajes de programación de propósito general y de propósito específico, que es difícil decidir qué lenguaje se ajusta mejor a una aplicación en particular.

#### **2.3.1.1. Lenguaje de propósito general.**

Al elaborar un modelo de simulación, se tiene la alternativa de usar algún lenguaje de propósito general si es que estamos familiarizados con su uso. Los lenguajes más comunes que se utilizan son C++, Pascal, así como las hojas de cálculo. Las ventajas al utilizar estos lenguajes son:

- Ofrecen la máxima flexibilidad matemática para describir modelos.
- El programador puede elegir el tipo y formato de los reportes de salida.
- La mayoría de los modeladores ya conocen un lenguaje de programación y no siempre conocen un paquete de simulación.
- El costo del software es generalmente menor, aunque el costo total del proyecto puede no serlo.

#### **2.3.1.2. Software de Simulación.**

Las herramientas de simulación ofrecen los módulos necesarios para programar de forma ágil un modelo, pueden destacarse: generación de números aleatorios que responden a ciertas funciones de distribución particulares, gestión automatizada del tiempo de simulación, análisis de resultados y generación de informes. Todas estas características repercuten en una reducción considerable del tiempo de programación del modelo. Adicionalmente, el mantenimiento de un modelo de simulación se ve enormemente simplificado cuando éste ha sido programado con una herramienta de simulación.

En un principio, los programas de Simulación se elaboraban utilizando algún lenguaje de propósito general, como ASSEMBLER, FORTRAN, ALGOL o LP/1. A partir de la década de 1960 hacen su aparición los lenguajes específicos para simulación que permiten a analistas y programadores desarrollar modelos de una forma más rápida, gracias a módulos estandarizados. En aquella época surgieron lenguajes como GPSS, GASP, SIMSCRIPT, SLAM, SIMAN y SSED.

En la última década del siglo pasado la aparición de las interfaces gráficas revolucionan el campo de las aplicaciones en esta área, y ocasionaron el nacimiento de los simuladores, con los cuales se ha facilitado enormemente la programación de los modelos, software como **Arena**<sup>®</sup>, **ProModel**<sup>®</sup> y **SIMIO**<sup>®</sup> son ejemplos de ello.

En el terreno práctico, es importante utilizar la aplicación que mejor se adecúe al tipo de sistema a simular, ya que de la selección del lenguaje o simulador dependerá el tiempo de desarrollo del modelo de simulación.

En la actualidad la selección del lenguaje o simulador depende de los siguientes factores:

- Los mercados primarios a los que atenderá la simulación, así como las aplicaciones típicas en que se le utilizará, por ejemplo: administración estratégica, logística, telecomunicaciones, manufactura, sistemas militares, sistemas de salud, manejo de materiales, análisis de riesgo, simulación continua o discreta, etc.
- Requerimientos de equipo, como plataforma o sistema operativo, memoria RAM y utilización de disco duro.
- Capacidad de construcción y programación del modelo a través de íconos o mediante procesos del tipo "arrastrar y colocar" (drag and drop), así como acceso a programación estándar.
- Inclusión de herramientas complementarias para la realización de pruebas de bondad de ajuste en forma automática, el análisis de las variables de respuesta, la posibilidad de crear diseño de experimentos y la optimización del sistema simulado.
- La animación del sistema, considerando aspectos como velocidad, diversas vistas, facilidad de exportación, compatibilidad con otras aplicaciones y la posibilidad de poder prescindir del uso de la animación.
- El costo y el tipo de licencia otorgada, soporte técnico, facilidad de entrenamiento, uso de manuales y ayuda en línea.

**CAPÍTULO 3**

**JUSTIFICACIÓN DEL USO DE LA  
SIMULACIÓN EN EL CASO PRÁCTICO**

## Capítulo 3: Justificación del uso de la simulación en el caso práctico.

### 3.1. Planteamiento del Problema.

Debido a la complejidad y automatización en la mayoría de los procesos en la fábrica de cemento Cooperativa La Cruz Azul S.C.L., resulta en parte complicado encontrar áreas de oportunidad para la mejora continua. Actualmente, la Cruz Azul cuenta con áreas de Ingeniería de Proyectos y un departamento de Optimización cuya función es la búsqueda constante de tecnologías o información técnica innovadora que permita aprovechar al máximo los recursos existentes, evaluar la sustitución de equipo, el rendimiento de la energía y combustibles y si es necesario, supervisar la construcción de una fábrica totalmente nueva. Usualmente estas áreas (optimización o proyectos) trabajan de forma separada y el alcance de cada una difiere notablemente.

Sin embargo, tanto para el área de Proyectos como el área de Optimización, el proceso clave dentro de la fabricación del cemento (área de oportunidad), se encuentra en la **Calcinación**. A partir del proceso de Calcinación se diseña el tamaño y capacidad del horno, que a su vez determinará la capacidad del propio edificio Precalentador, y secuencialmente definirán las diversas capacidades de los equipos que intervendrán en el diseño de una línea de producción y de la planta completa.

Para el área de Optimización, el ahorro de combustible y el aprovechamiento total de la energía son los objetivos principales a conseguir, y como ya se mencionó, el sector en donde se consume la mayor cantidad de combustible, es el área de Calcinación.

Ambas áreas emplean hojas electrónicas para realizar sus cálculos, diseño asistido por computadora para los planos y diapositivas electrónicas para sus presentaciones, de igual forma, cuentan con software especializado en ingeniería civil, de proceso, eléctrico y electrónico.

Como puede observar estimado lector, existe la necesidad real de integrar la información técnica que cada área emite, con el firme objetivo de crear un modelo de simulación de la zona de Calcinación esperando con ello representar las capacidades, temperaturas, consumo de combustibles así como el análisis estequiométrico (fisicoquímico) desarrollado desde el edificio del Precalentador, Horno y Enfriador. Todo ello a través de un entorno de animación y tiempo simulado.

### 3.2. Justificación

Como ya se mencionó, la empresa cementera "Cooperativa La Cruz Azul S.C.L." cuenta con un área de Proyectos a nivel corporativo y departamentos de Optimización en cada una de sus fábricas. Cada uno de estos departamentos trabaja bajo un plan estratégico de desarrollo pero con funciones totalmente independientes. Por ejemplo, el área de Proyectos se encarga de la administración y construcción de proyectos nuevos o modificaciones a equipos principales ya instalados. Mientras que los departamentos de Optimización, son responsables de realizar estudios técnico-económicos para definir áreas de oportunidad y eficientar los recursos existentes (ahorros), por ejemplo: estudios de consumo de energía eléctrica, consumo de combustibles, aprovechamiento del calor emitido en una zona determinada para canalizarlo a otra, etc.

En entrevista con el personal ejecutivo de ambas áreas, se coincidió que la tecnología empleada actualmente "es útil para describir lo que pasa en los procesos", es decir, tanto los planos que se elaboran, las hojas de trabajo, cálculos de masa y flujo y los sistemas de cómputo principales, solo representan la información histórica procesada y, en ciertos casos, proyectada de forma **estática**. Siendo más directo, no se cuenta con herramientas que nos permitan "experimentar" (simular) cambios en el proceso y conocer las posibles respuestas en el sistema en una forma dinámica. No se cuenta con simuladores que proporcionen información técnica y estadísticos más precisos sobre las repercusiones en el proceso. Lo que a su vez generaría ahorros en inversión, horas-hombre y la consideración al medio ambiente (sustentabilidad)

Ante tal situación, después de conocer que la parte del proceso en la fabricación del cemento con mayor oportunidad de eficiencia es, precisamente, la de Calcinación, y por otro lado, es evidente la necesidad de contar con modelos de simulación que permitan (en forma dinámica) diagnosticar y analizar la operación de clinkerización y consumos actuales de los recursos. De tal forma que si el área de Proyectos decide realizar alguna modificación en la Unidad de Calcinación, el modelo proporcione la información de los diferentes escenarios a contemplar.

A su vez, los departamentos de optimización pueden contar con información oportuna de las capacidades y consumos simulados, como base para realizar los estudios técnico-económicos correspondientes.

### 3.3. Estado del Arte.

Se han realizado diversos estudios buscando eficientar el proceso de calcinación del cemento, destacan por su análisis matemático y estequiométrico, las famosas Ecuaciones de Bogue.

#### 3.3.1. Robert Herman Bogue.

Antes de tomar posesión en el cargo de Director del Portland Cement Association (PCA) en 1924, se licenció en la Tufts University en 1912, el Massachusetts College (1915), y la Universidad de Pittsburgh (Doctor en Filosofía, 1920), y había adquirido la experiencia profesional como Profesor Adjunto en el Montana State College (1915-1917), un Adjunto del Mellon Institute (1917-1922), y Profesor Asociado en el Lafayette College de Easton (1922-1924).

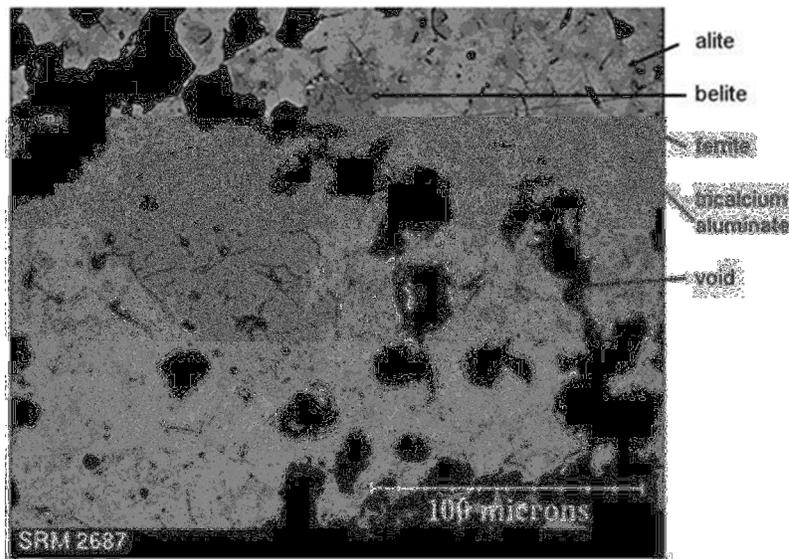
Entre las contribuciones personales de Bogue se encuentra con una importancia destacada el "**Cálculo de Compuestos en el Cemento Portland**", publicado en 1929. Para entender la importancia del papel que desempeñó este tratado, es necesario conocer un poco sobre el cemento Portland y su fabricación.

De los estudios petrográficos, Bogue sabía que el **clínker de cemento Portland** por lo general contenía cuatro compuestos principales (mencionó **alita, belita, celita y ferrita**) de composición desconocida, pero no había, aún, ningún modo práctico de determinar sus cantidades. Del creciente, pero todavía incompleto, conocimiento de las relaciones de las fases CaO (caliza), SiO<sub>2</sub>

(sílice),  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (aluminio) y  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (hierro) ó (C-S-A-F) en el sistema, Bogue concluyó que los compuestos principales en la escoria eran:

- Silicato tricálcico ( **$\text{Ca}_3\text{SiO}_5$  ó C3S ó Alita**),
- Silicato dicálcico ( **$\text{Ca}_2\text{SiO}_4$  ó C2S ó Belita**),
- Aluminato tricálcico ( **$\text{Ca}_6\text{Al}_2\text{O}_6$  ó C3A ó Celita**), y
- Ferrito-aluminato tetracálcico ( **$\text{Ca}_4\text{Al}_2\text{Fe}_2\text{O}_{10}$  ó C4AF ó Ferrita**)

Y que las cantidades de cada uno podrían ser calculadas a partir de la composición de óxido del clinker, a condición de que las reacciones a altas temperaturas hubieran finalizado en la producción de los productos del equilibrio y ninguna cantidad significativa de material no reaccionado permaneciese.



**Figura 23. Formación microscópica del clinker.**

Bogue comprendió que los compuestos eran poco probables que fuesen puros debido a la presencia de óxidos no deseados en una menor cantidad en las materias primas, pero no tenía los datos que le permitirían tomar los óxidos minoritarios en consideración en sus cálculos. A pesar de esta limitación, Bogue creyó que las cantidades deliberadas de los compuestos eran bastante cercanas a la realidad para ser útiles. *Esto es verdad y es ampliamente demostrado por el hecho que desde que las ecuaciones de Bogue se hicieron, 70 años más tarde todavía son la base para el esquema de clasificación usada en el ASTM C-150, la especificación para el cemento Portland.*

### 3.3.2. Fórmulas de Bogue

De vital trascendencia en el estudio de la química del clinker y el cemento. Útiles para los ingenieros civiles que deben conocer la composición potencial del clinker para cementos a partir de calizas y arcillas como materias primas. Evitan desarrollar la estequiometría de los compuestos del cemento, que tienen masas moleculares altas, difíciles de trabajar, dando una sencilla relación de coeficientes:

<b>%C3S</b> = 4.071 CaO - 7.6 SiO <sub>2</sub> - 1.43 Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> - 6.718 Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	(Alita)
<b>%C2S</b> = 2.867 SiO <sub>2</sub> - 0.7544 C <sub>3</sub> S	(Belita)
<b>%C3A</b> = 2.65 Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> - 1.692 Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	(Celita)
<b>%C4AF</b> = 3.043 Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	(Ferrita)

**Estas fórmulas sólo son válidas para cemento Portland.**

### 3.3.3. Replanteamiento de las Ecuaciones de Bogue en el cálculo mineralógico del Clinker para una cementera colombiana.

(Jorge Iván Tobón y Fredy López Universidad Nacional de Colombia 2006)

Las Ecuaciones de Bogue fueron creadas para calcular el porcentaje de las fases minerales del clinker, asumiendo que las materias primas utilizadas tienen una pureza del 100%, y que las reacciones son completas, lo cual no ocurre. Esto ha llevado durante años a las cementeras a sobrevalorar o subvalorar dichos porcentajes.

Este trabajo muestra los resultados obtenidos durante 8 meses del clinker producido en una cementera colombiana en sus principales hornos, al cual se le cuantificaron las fases mineralógicas mediante petrografía de luz reflejada con estimación volumétrica por conteo de puntos. A su vez, los porcentajes mineralógicos se calcularon por el método tradicional de las Ecuaciones de Bogue y se hizo una comparación sistemática de los resultados obtenidos,

encontrándose que el método químico teórico (Bogue) subestima la producción de minerales en el clinker de esta cementera hasta en un 5%.

Taylor (1997), Glasser (1998) y Lawrence (1998) muestran como algunos investigadores han concluido que los cálculos con las ecuaciones de Bogue, generalmente subestiman el contenido de Alita y sobreestiman el de Belita y Celita hasta en un 10%. En el mundo, se han realizado variaciones a las ecuaciones ya que cada cementera tiene materias primas y procesos de producción con características propias.

Los autores tomaron 64 muestras puntuales de clinker provenientes de 2 hornos. De cada una de las muestras se conocían los módulos (relaciones entre los óxidos principales) con los que fue dosificado y el estimativo de fases minerales por medio de las ecuaciones de Bogue. Los resultados finales muestran que la correlación de los datos del Horno 1 con el 2 es mayor al 95%, el cual es un ajuste muy significativo. Recomiendan encontrar para cada cementera las ecuaciones que se "ajustan" a sus materias primas y procesos.

#### **3.3.4. Departamento de Ingeniería de Procesos (Cooperativa La Cruz Azul)**

Para La Cruz Azul, contar con un área propia encargada de la planeación y desarrollo de Nuevos Proyectos, representa una ventaja en cuanto al enriquecimiento de la información y experiencia de su personal. Tal es el caso del departamento de Ingeniería de Procesos cuyo objetivo principal es calcular la cantidad y capacidad de los equipos principales que se emplearán en el desarrollo de un proyecto. Ésta área es la responsable de realizar balances de masa-energía para encontrar un equilibrio y defina las capacidades de los equipos y sea la punta de lanza de las siguientes ingenierías (civil, mecánica, eléctrica, electrónica).

La metodología empleada por el departamento de ingeniería de proceso consiste en utilizar la Literatura Técnica reciente, visitas directas a la obra, consultas técnicas con el proveedor y el desarrollo de Diagramas de Flujo (planos). Referente a los cálculos técnicos, los ingenieros no emplean otra herramienta que no sea la hoja de cálculo electrónica (Excel) apoyados con esquemas básicos que ejemplifican a los procesos que se estén analizando.

Simulación del proceso de calcinación del cemento.

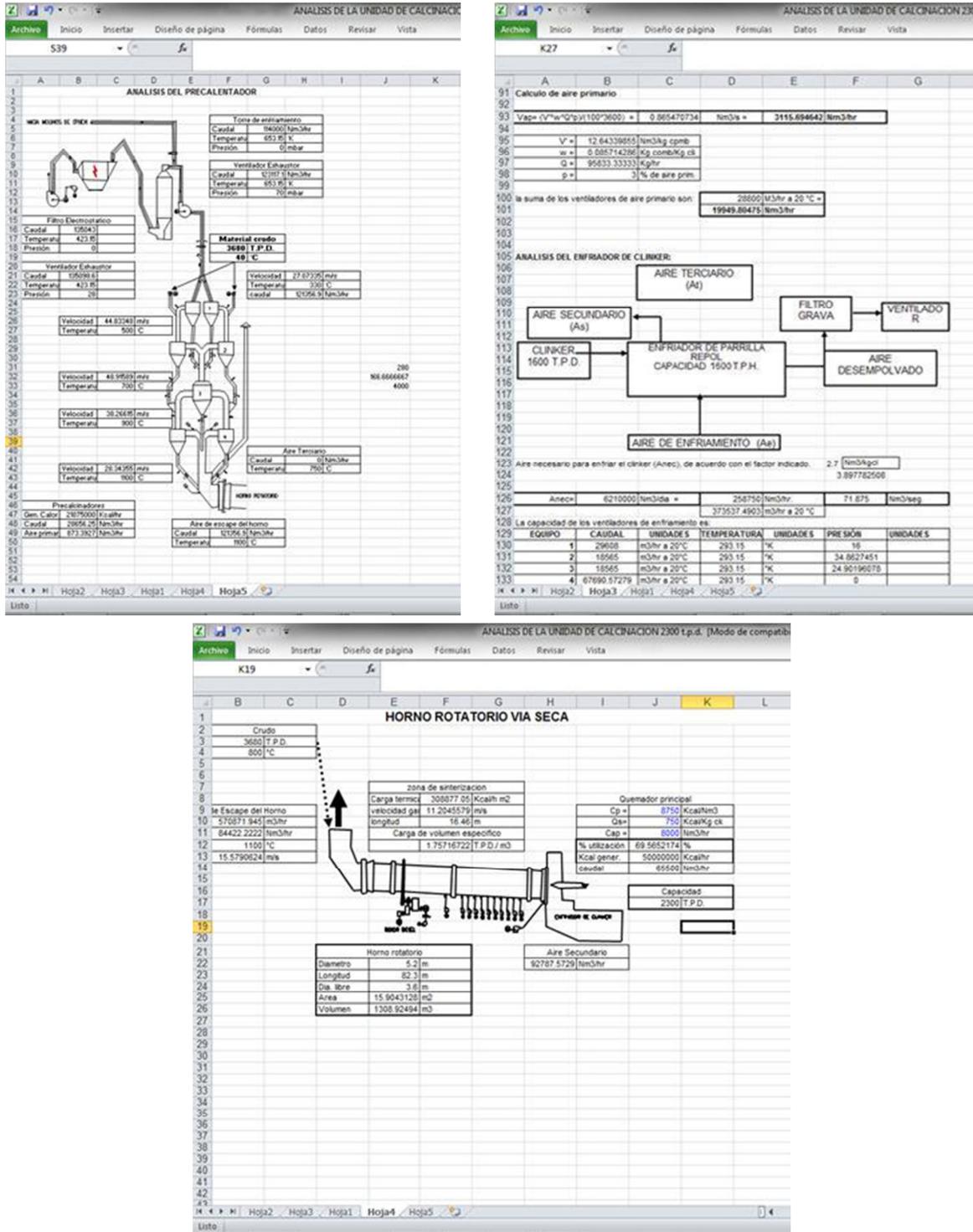


Figura 24. Hojas de cálculo para balance masa-energía.

En la elaboración de diagramas de flujo, esquemas o arreglos, utilizan el Diseño Asistido por Computadora (AutoCAD)

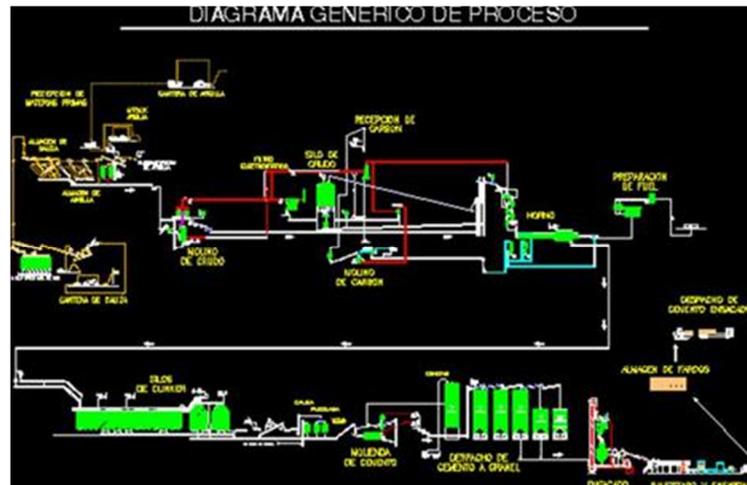


Figura 25. Diagrama de flujo hechos en AutoCAD.

Sin embargo, cuando se requiere realizar algún tipo de cálculo en cierto sector del proceso, los modelos presentan un comportamiento lineal y estático, es decir, primero desarrollan el diagrama de flujo con sus capacidades, enseguida trasladan los datos iniciales a la hoja de cálculo para observar el comportamiento tras la modificación de alguna variable. Posteriormente retroalimentan el diagrama de flujo inicial hasta obtener un balance equilibrado lo más cercano a la realidad.

Surgen las siguientes interrogantes:

- ¿Por qué no contar con una herramienta integral que nos permita desarrollar y simular el proceso fabricación del cemento?
- ¿Por qué no analizar los flujos de entrada-salida bajo un ambiente controlado de masa-energía y tiempo?
- ¿Por qué no cambiar gradualmente la manera de trabajar en el departamento ingeniería de proceso, mediante una forma científica gracias a la metodología que nos proporciona la simulación?

**CAPÍTULO 4**

**MODELO DE SIMULACIÓN DEL PROCESO  
DE CALCINACIÓN DEL CEMENTO.**

**CASO:**

**COOPERATIVA LA CRUZ AZUL S.C.L.**

## Capítulo 4: Modelo de Simulación del proceso de calcinación del Cemento. Caso: Cooperativa La Cruz Azul S.C.L.

### 4.1. Introducción.

En años recientes, el advenimiento de nuevas tecnologías en el área de la computación ha traído consigo innovaciones igualmente importantes en los terrenos de la toma de decisiones y en el diseño de procesos y productos. En este sentido, una de las técnicas con mayor impacto es la **simulación**.

**Simular** es reproducir artificialmente un fenómeno o las relaciones de entrada-salida de un sistema, cuando su operación o experimentación en él son imposibles, costosas, peligrosas o poco prácticas.

La **Cooperativa La Cruz Azul S.C.L.** es una empresa originaria del estado de Hidalgo, México, que produce cemento Portland de diversos tipos: Ordinario, Puzolánico, Compuesto, Blanco. Está integrada por 4 fábricas de cemento ubicadas en Hidalgo, Oaxaca, Aguascalientes y Puebla. Actualmente ocupa el tercer lugar en producción anual de cemento, después de Cementos Mexicanos (CEMEX) y Apasco.

El **Cemento Pórtland** es un producto finamente molido, altamente reactivo y compuesto de: clinker, yeso y algunos materiales de adición. El clinker para cemento gris, es el resultado de la sinterización o fusión parcial de  $\text{CaCO}_3$  (caliza),  $\text{SiO}_2$  (sílice),  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (alúmina) y  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (hierro) compuestos presentes en las materias primas del cemento (materiales calcáreos y arcillosos). Además pueden encontrarse óxido de magnesio, álcalis y azufre que son contaminantes indeseables.

Los compuestos de las materias primas al ser sometidos a la temperatura de clinkerización (1,450 °C) en el horno, sufren una serie de transformaciones que dan como resultado la formación de fases "minerales" anhidras que son los constituyentes esenciales del clinker, en sentido estricto estas fases cristalinas no son minerales, ya que son artificiales, pero industrialmente y por comodidad se les llama minerales.

Las principales fases en el clinker son: **Alita** ( $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ , silicato tricálcico ó C3S), **Belita** ( $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ , silicato dicálcico ó C2S) que son el equivalente a los fenocristales en una roca porfirítica y están embebidos en una matriz normalmente vítrea constituida por aluminatos tricálcicos (**celita** - C3A) y ferroaluminatotetracálcico (**ferrita** - C4AF).

La cantidad de las diferentes fases minerales dentro del clinker depende de factores como: características y dosificación de materias primas (módulos), temperatura, tiempo de residencia en el horno y velocidad de enfriamiento.

Las proporciones, la cristalinidad y la textura de estos mineraloides en el clinker controlan propiedades tan importantes en el cemento como: fraguado, calor de hidratación, reactividad y desarrollo de resistencias.

En el mundo, el método clásico de cuantificar los minerales de clinker es usando las **ecuaciones propuestas por Bogue** hace cerca de un siglo, conocidas como **Cálculo Potencial de Bogue (ASTM C150-94)**. En su formulación, estas ecuaciones asumen materias primas con pureza y reacción entre ellas del 100% lo cual no es cierto para la mayoría de las cementeras, donde se tienen diferentes combinaciones de materias primas y procesos de clinkerización no totalmente controlados. Ellas fueron planteadas así:

Alita	<b>%C3S</b> = $4.071 \text{ CaO} - 7.6 \text{ SiO}_2 - 1.43 \text{ Fe}_2\text{O}_3 - 6.718 \text{ Al}_2\text{O}_3$
Belita	<b>%C2S</b> = $2.867 \text{ SiO}_2 - 0.7544 \text{ C}_3\text{S}$
Celita	<b>%C3A</b> = $2.65 \text{ Al}_2\text{O}_3 - 1.692 \text{ Fe}_2\text{O}_3$
Ferrita	<b>%C4AF</b> = $3.043 \text{ Fe}_2\text{O}_3$

La simulación nos permitirá experimentar cambios en los parámetros (módulos) y encontrar las condiciones óptimas de fabricación de clinker.

En el presente trabajo se desarrolla un modelo de simulación del proceso de calcinación de cemento Portland. La metodología que se utiliza es la empleada en simulación, misma que establece la **definición del problema, análisis de las variables a modelar, realizar un modelo básico, desarrollo de modelo detallado, validación e informe y conclusiones.**

#### 4.2. Software de Simulación: SIMIO®

Para el desarrollo del modelo de simulación se empleó el **Software SIMIO.**

**SIMIO** es un software moderno de simulación discreta para el estudio de flujos logísticos que permite abordar cualquier tipo de problemática en diferentes sectores (manufactura, logística, transportes). Debido a su concepción moderna, el programa puede aprenderse sin dificultad y no requiere conocimientos de programación en lenguajes de alto nivel.

**SIMIO** ha sido desarrollado por la empresa del mismo nombre, SIMIO LLC, <http://www.simio.com>. El creador de Simio es C. Dennis Pegden, quien fue igualmente autor del lenguaje de simulación Siman y de la herramienta de simulación Arena.

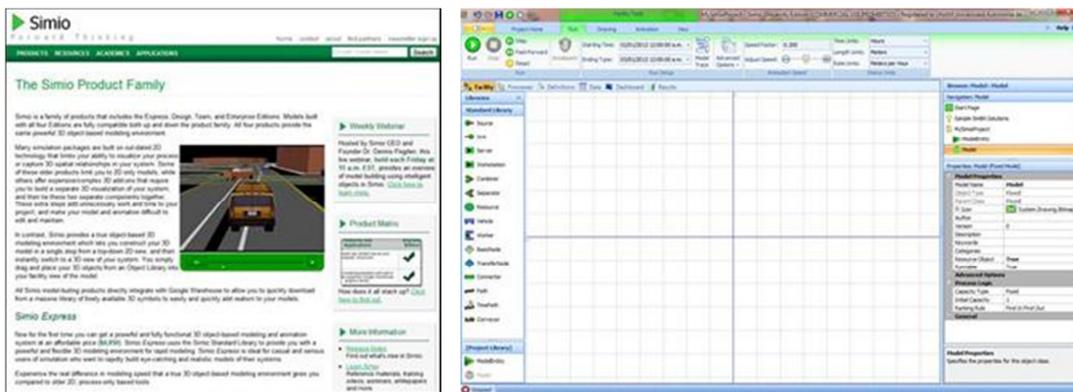


Figura 26. Software SIMIO.

Simio ha sido diseñado como el primer y único software de simulación que combina la velocidad de modelamiento, permitida por la tecnología orientada a objetos junto con la flexibilidad y potencia de los procedimientos. Simio es capaz de construir modelos animados en 3D en un tercio del tiempo habitual, y por tanto libera tiempo para consagrarlo al análisis de alternativas y la toma de decisión fundamentada científicamente.

Simio es un programa único en cuanto que ofrece todas sus prestaciones sin necesidad del desarrollo de código o que sea necesario conocer lenguaje de programación alguno.

### 4.3. Desarrollo del Modelo de Simulación para pronosticar y analizar el proceso de calcinación del cemento.

#### 4.3.1. Metodología:

Para desarrollar el modelo de simulación de la Unidad de Calcinación, es preciso seguir los pasos de la metodología de simulación:

- Formulación del Problema.
- Conceptualización del sistema.
- Recolección de información.
- Modelo básico.
- Modelo completo.
- Verificación.
- Validación.
- Diseño de experimentos.
- Análisis de resultados e interpretación.

#### 4.3.1.1. Formulación del Problema:

Dentro del proceso de fabricación del cemento encontramos a la **Calcinación**, misma que se define como el cambio físico-químico de la harina cruda (piedra caliza y agregados molidos) ( $3\text{CaCO}_3$ ) a altas temperaturas por medio de la quema de coque y combustibles alternos. La harina cruda es alimentada al precalentador en donde eleva su temperatura a aproximadamente  $1,450^\circ\text{C}$ , como consecuencia, los componentes de la harina cruda se fusionan en un solo elemento llamado Clinker, que es el producto resultante del horno de calcinación. Para optimizar este proceso requerimos de un modelo que nos permita manipular a las diferentes variables del sistema.

El modelo debe ser capaz de ingresar un cierto número de entidades en la unidad de tiempo para simular la alimentación de materia prima, posteriormente deberá descomponer a dichas entidades en moles (unidad química de masa) para representar la descomposición química que tienen los elementos entrantes dentro del horno y reagruparlos en los nuevos materiales que, como ya se mencionó, serán los minerales artificiales (alita, belita, celita y ferrita). A medida que el modelo registra la contabilidad de la materia prima consumida, de igual forma, deberá registrar los consumos de combustible y contabilizar el producto terminado (clinker).

#### 4.3.1.2. Conceptualización del Sistema:

El sistema analizado consistió en un proceso lineal tal y como se muestra en el siguiente diagrama de bloques:



Figura 27. Proceso de calcinación del cemento.

Como ya se comentó en el capítulo 1, la materia prima alimentada (caliza, hierro, alúmina, sílice y magnesia) es triturada, molida y almacenada en silos que la mezclan finamente (homogeneización) la cual es llamada Harina Cruda. En seguida se alimenta al Edificio de Precalentamiento en donde comienza un intercambio de calor previo a la llegada al Horno, es en este lugar donde se llevan a cabo las reacciones químicas a 1,450 °C y dan lugar al clinker (subproducto del cemento). Lo anterior es denominado **Proceso de Calcinación** dentro del proceso de elaboración del cemento. (Ver rectángulo de la Figura 28)

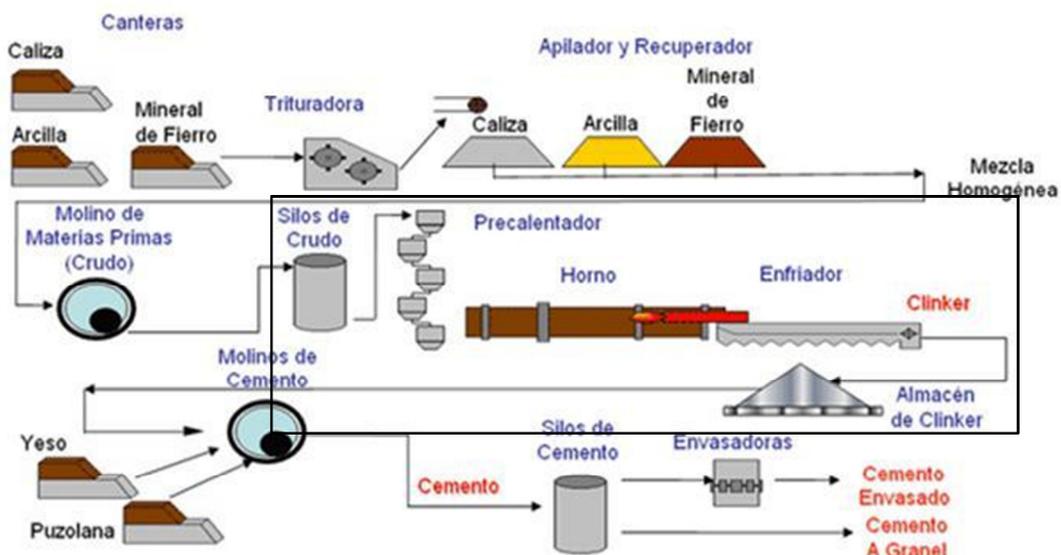


Figura 28. Proceso de calcinación del cemento.

#### 4.3.1.3. Recolección de la Información:

La información se obtuvo de diversas fuentes, tales como:

- **Literatura Técnica:** Se revisaron libros de simulación de sistemas, libros referentes a la industria del cemento y estadística. (Ver Anexo bibliográfico).
- **Entrevistas** al área de Ingeniería de Proceso y Contabilidad: Contamos con la aportación de los conocimientos técnicos de los ingenieros **Miguel Segundo Cortés** y **Horacio García Reséndiz** integrantes del departamento de Ingeniería de Proceso. Un especial agradecimiento al **C.P. Tomás Rivera Carrasco** por la información técnica proporcionada relativa a costos del área de Finanzas en la Cooperativa La Cruz Azul.
- **Panorama Internacional:** Gracias al apoyo de la Universidad Nacional Autónoma de México acudí al **Simposio Europeo de Modelación y Simulación (EMMS 2011)** con sede en Roma Italia, lo que contribuyó a conocer los trabajos de colegas de otros países y obtener nuevas aportaciones en cuanto a la simulación y modelación.
- Visita a planta: Agradezco al **Ing. Adalberto Lugo** el apoyo brindado para realizar la visita a la Unidad de Calcinación No.9 en la Planta Cementera de Cruz Azul Hidalgo. Ahí pude exponer mis dudas y recolecté información muy importante para el desarrollo del modelo final.

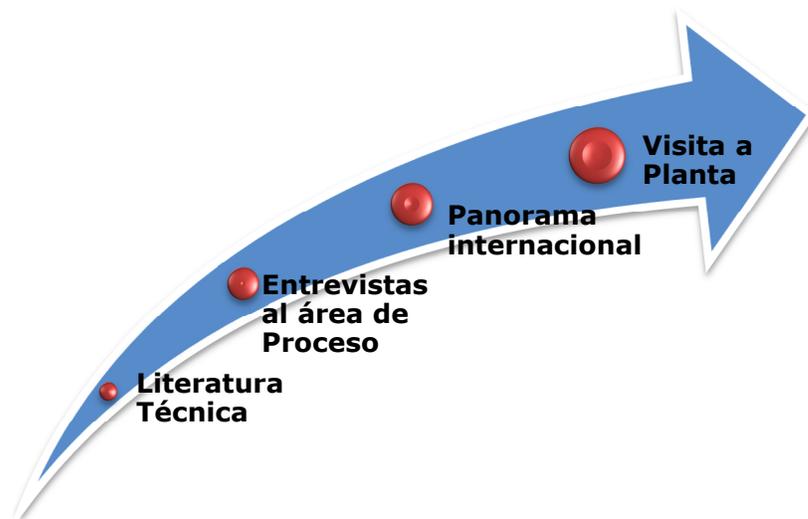


Figura 29. Obtención de la información.

Simulación del proceso de calcinación del cemento.



Figura 30. Horno No.9 Cruz Azul

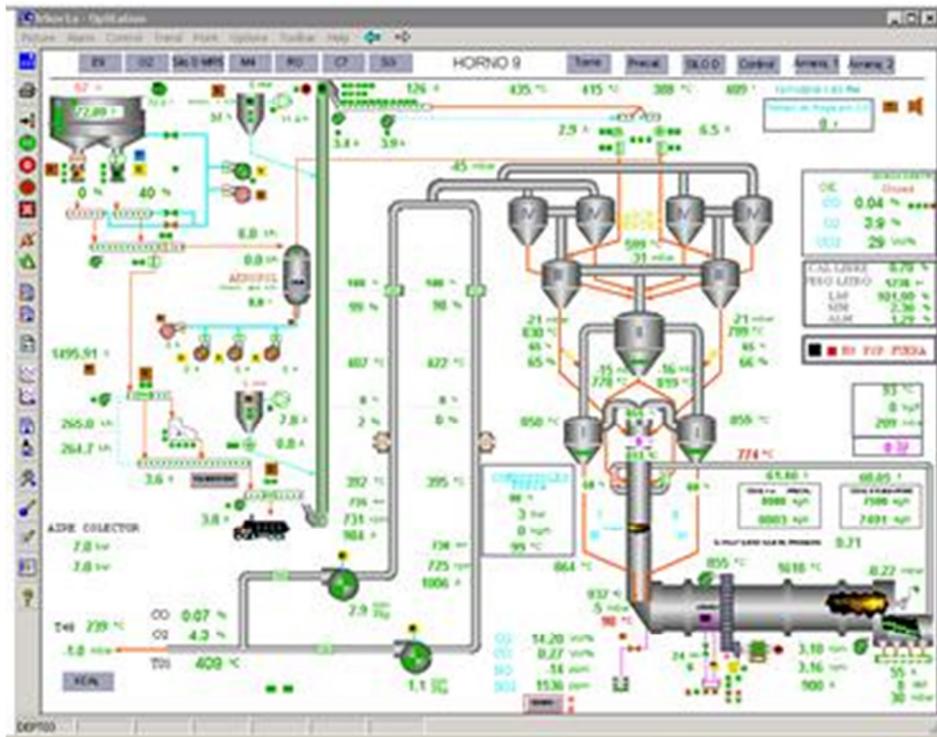
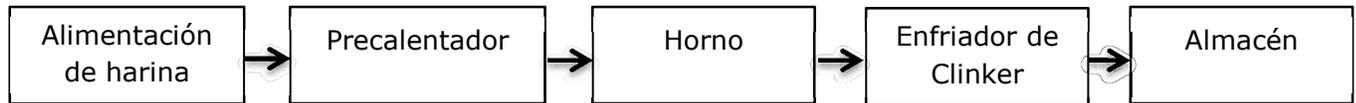


Figura 31. Unidad de Calcinación No.9 Cruz Azul

#### 4.3.1.4. Modelo Básico: Diagrama de Bloques y Diagrama de Flujo.

Con base a la información obtenida, se elaboró el **diagrama de bloques** referente al modelo de Simulación:



**Figura 32. Diagrama de Bloques.**

La figura anterior se refiere al proceso de calcinación para la fabricación de cemento Portland. (Ver capítulo 1) en donde la materia prima triturada y molida se alimenta al precalentador y horno para llevarla a una temperatura de 1,450°C y obtener Clinker.

#### **Diagrama de Flujo.**

A continuación veremos el Diagrama de Flujo, mismo que se empleó para desarrollar el modelo final de Simulación.

Describiéndolo de izquierda a derecha, comenzamos con la alimentación en polvo de las materias primas (caliza, sílice, hierro, alúmina y magnesia), posteriormente ingresarán a los silos de homogeneización para una mejor mezcla y de ahí serán enviadas al precalentador para comenzar su calentamiento. El modelo simulará estos pasos hasta la llegada al horno, justo aquí comienzan dos procesos paralelos: la simulación química y la simulación teórica. En la primera la materia prima se convierte en moles y se realiza la simulación estequiométrica para posteriormente convertir los productos de moles a toneladas. En la segunda, la proporción de cada material es utilizada para simular las reacciones a través de las ecuaciones de Bogue y obtener las proporciones teóricas de los componentes del Clinker.

Finalmente simulamos el proceso de los combustibles, donde los diversos materiales (coque, llantas y aire) son alimentados al quemador con sus respectivas proporciones y convertidos en calor representados por una flama y un flujo de aire caliente que viaja en sentido contrario a través de todo el sistema, hasta llegar a la chimenea y finalmente al medio ambiente.

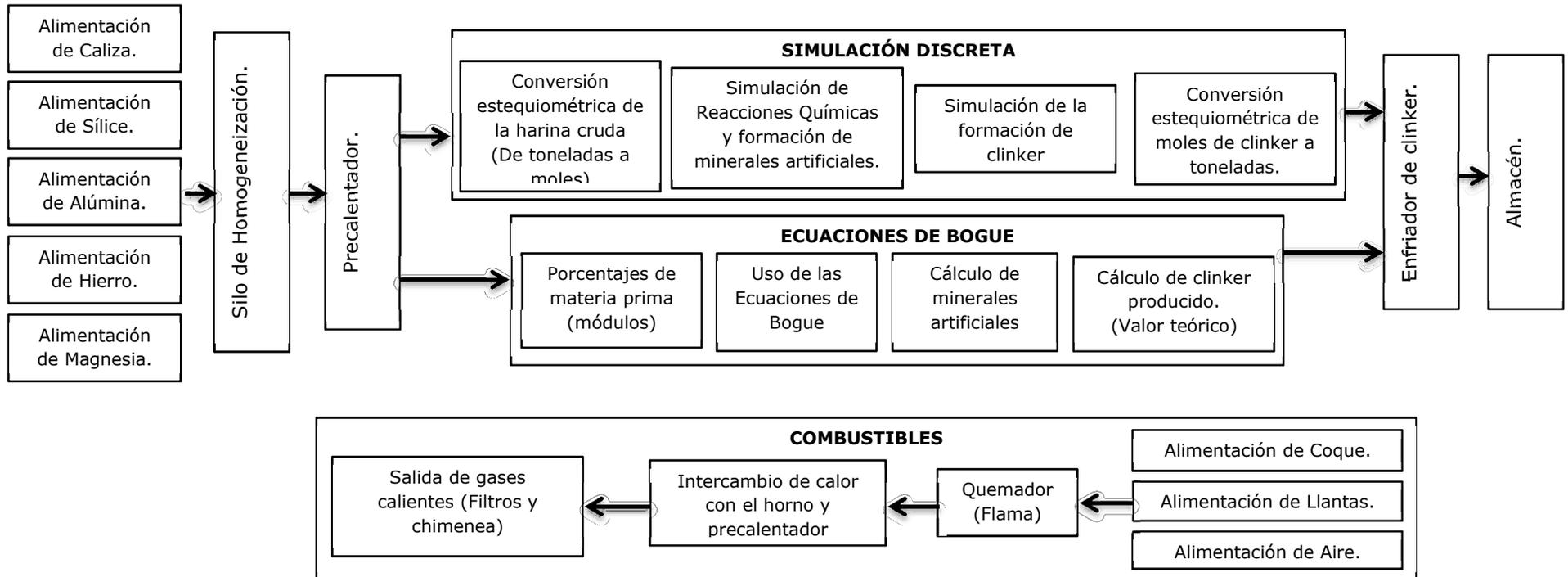


Figura 33. Diagrama de Flujo Masa-Calor.

A partir de la información obtenida, se generó un modelo básico de acuerdo al Diagrama de Flujo Masa-Calor, para ello se utilizó el software **Arena** y en 2D:

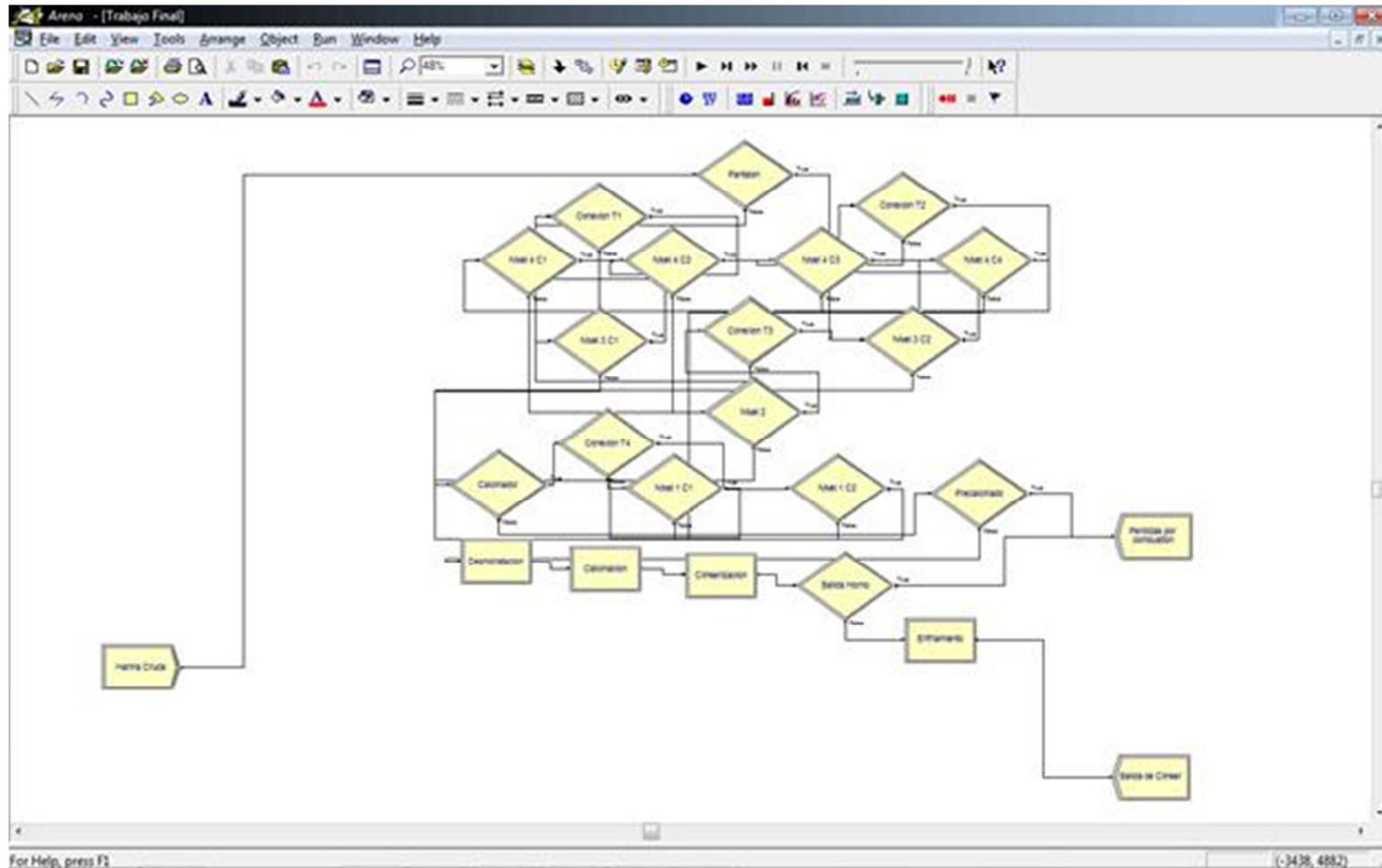


Figura 34. Modelo Básico 2D en software Arena (Diagrama de Flujo).

Posteriormente se le agregaron gráficos para completar el modelo y darle más vista.

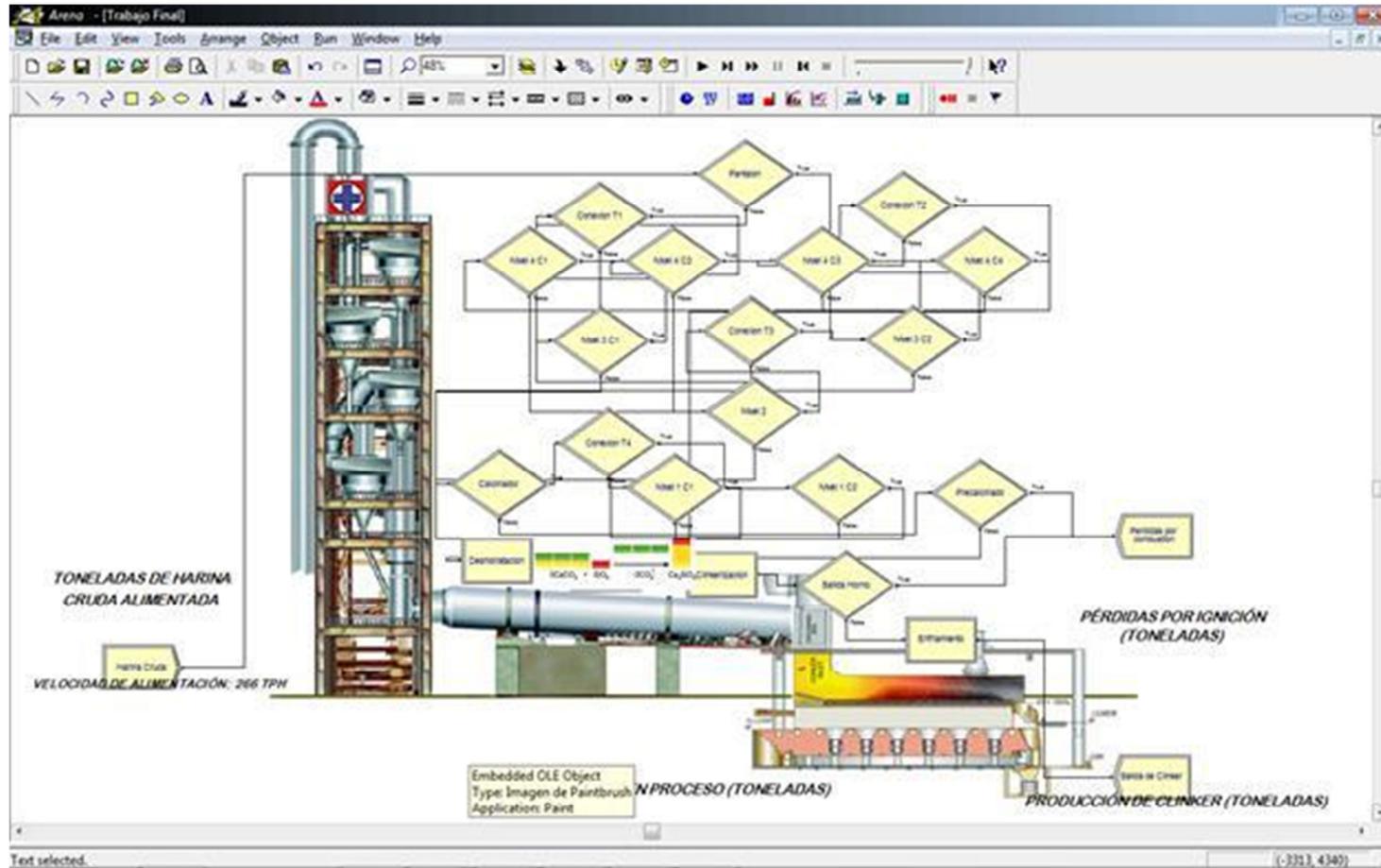


Figura 35. Adición de gráficos a modelo básico.

Y el modelo básico quedó de la siguiente forma:

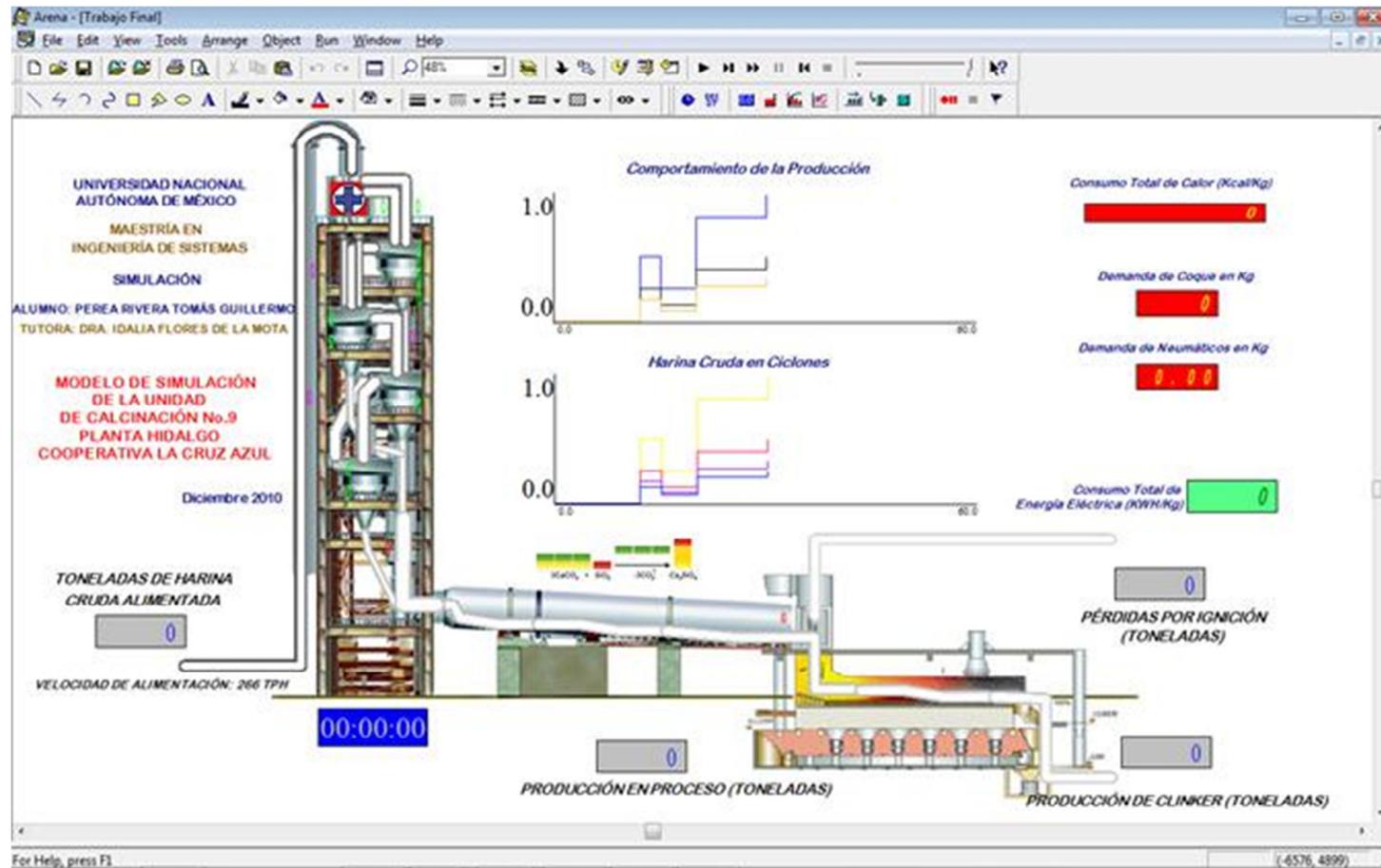


Figura 36. Modelo básico concluido.

### **Conclusiones del Modelo Básico:**

- El tiempo a simular será 24 horas de producción.
- Cada entidad alimentada representa una tonelada de materia prima.
- El flujo simulado de alimentación es de 266 Ton/hr y considerando una pérdida por ignición del 41% de la masa, obtenemos en 24 horas, aproximadamente 3,800 toneladas de clinker.
- El consumo de combustible es en razón directa (proporcional) a la producción.
- La harina cruda alimentada se divide en 2 flujos: Clinker producido y gases por ignición.
- Para simular las reacciones químicas, es preciso convertir unidades de masa real (toneladas) en unidades de masa atómica (moles).

#### 4.3.1.5. Desarrollo del Modelo Completo:

A partir del modelo básico se procedió a realizar el modelo completo con el apoyo del software SIMIO en un **tiempo aproximado de 6 meses** y tomando en cuenta las siguientes consideraciones:

- 1) Se estudió la lógica del proceso y el movimiento caótico que sufre la harina cruda dentro de los ciclones en el precalentador.

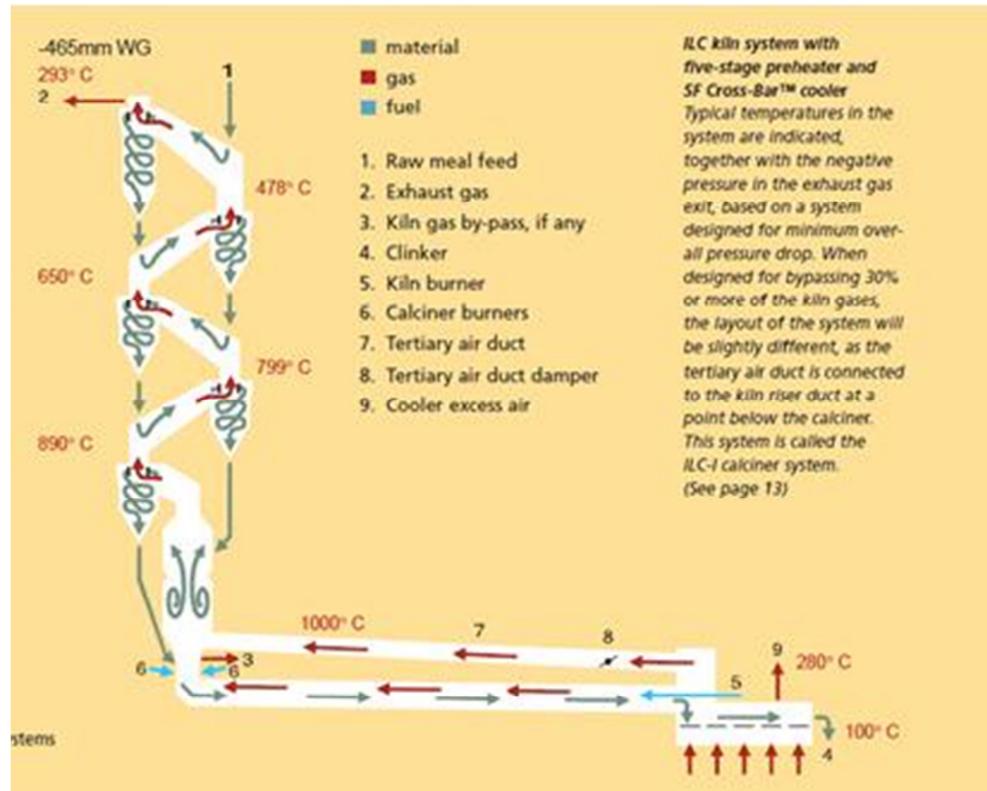


Figura 37. Trayectoria de harina cruda y calor del horno. (FL Smidth)

Simulación del proceso de calcinación del cemento.

2) Por ello, se definieron las rutas de los ciclones con base a una probabilidad de salida:

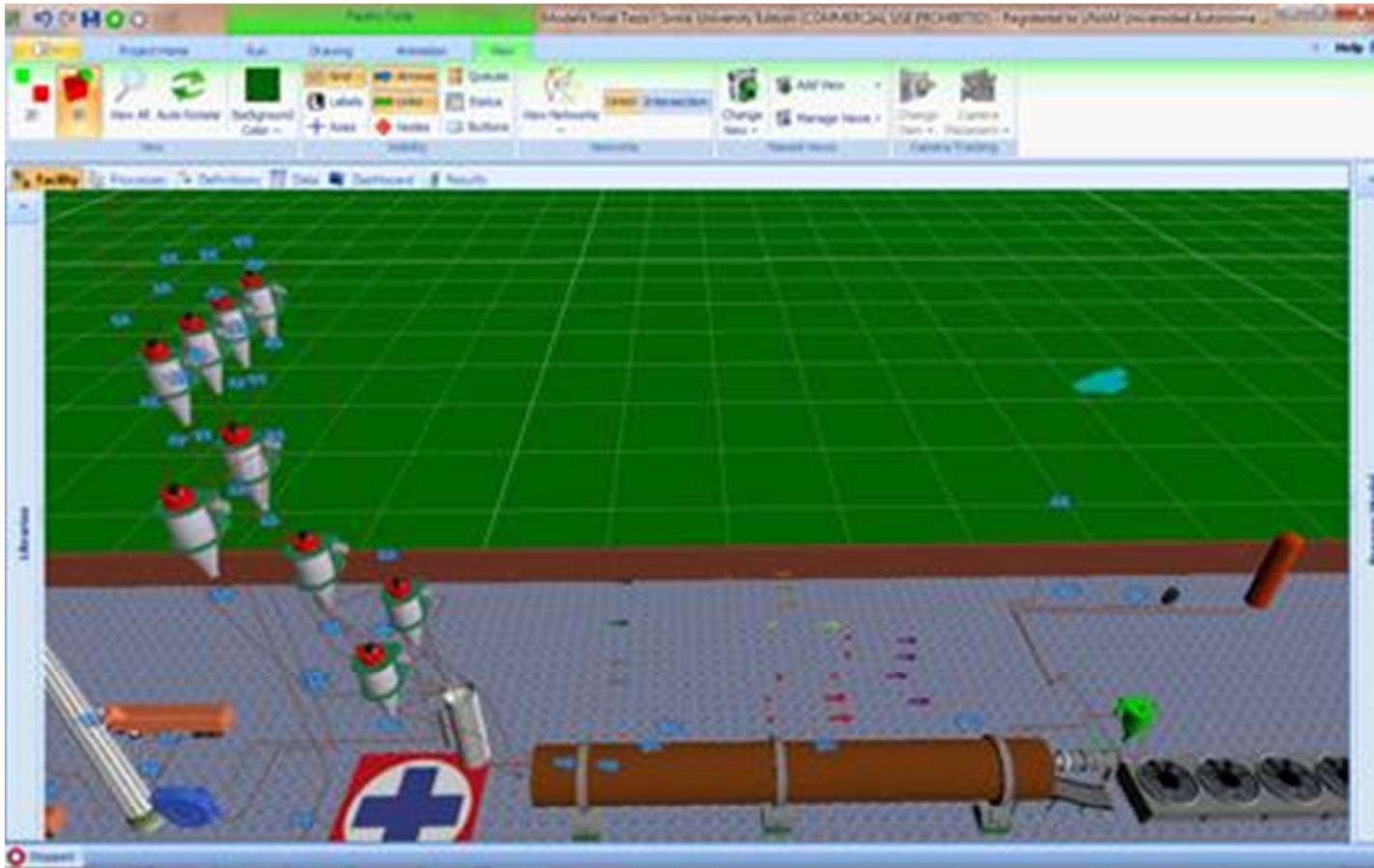


Figura 38. Definición de las rutas de la harina cruda y calor del horno.

Simulación del proceso de calcinación del cemento.

- 3) Fue diseñada la ruta que las entidades entrantes (materia prima) seguirán durante el proceso para convertirse en clinker y gases. Las locaciones son: Silos de Homogeneización–Precalentador–Horno–Enfriador–Almacén de clinker.

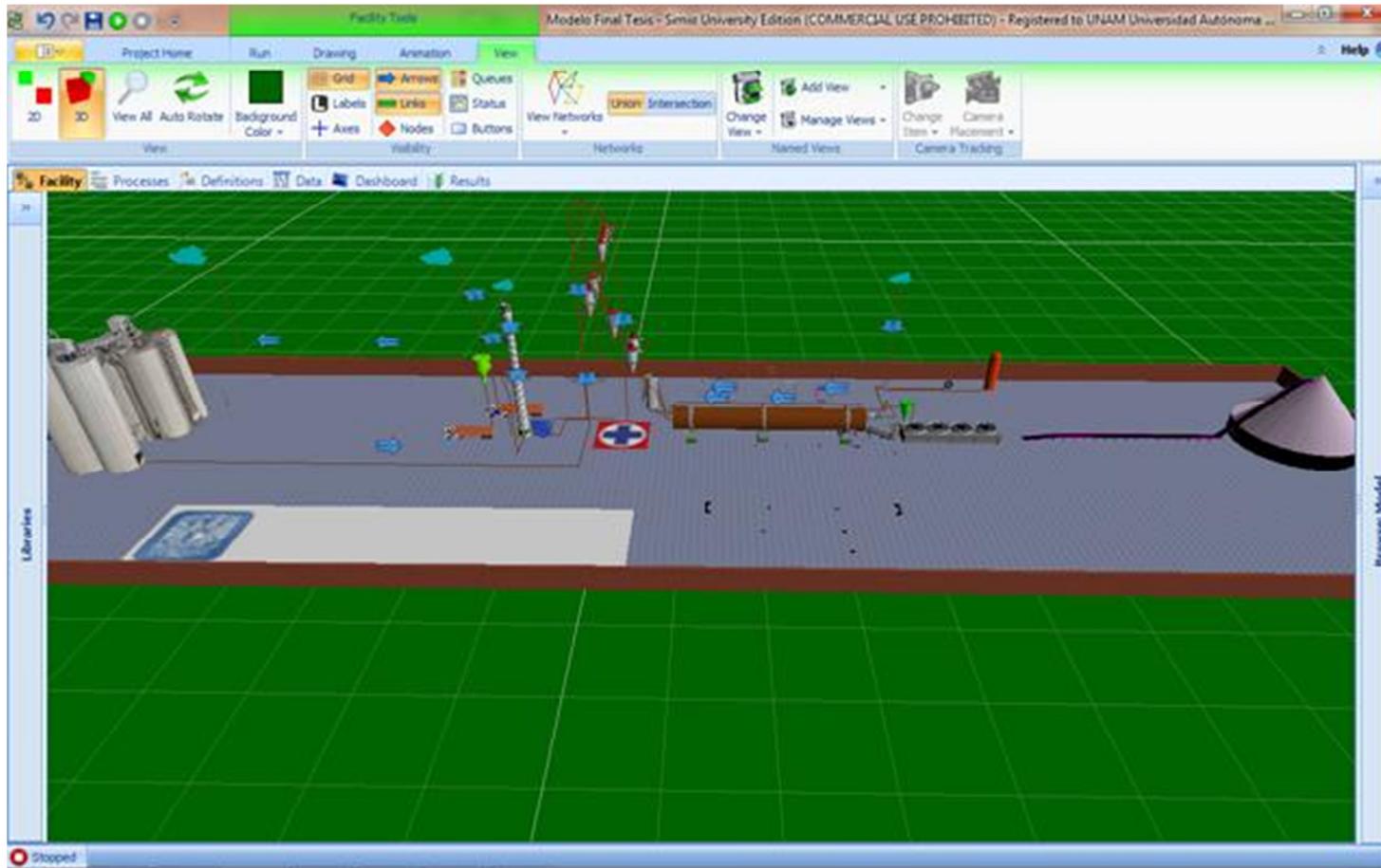


Figura 39. Locaciones del modelo de simulación.

Simulación del proceso de calcinación del cemento.

- De igual forma, se diseñó la ruta que los combustibles (coque, llantas y aire) seguirán a lo largo del proceso, pasando por el quemador y terminando en la chimenea y nubes del medio ambiente.

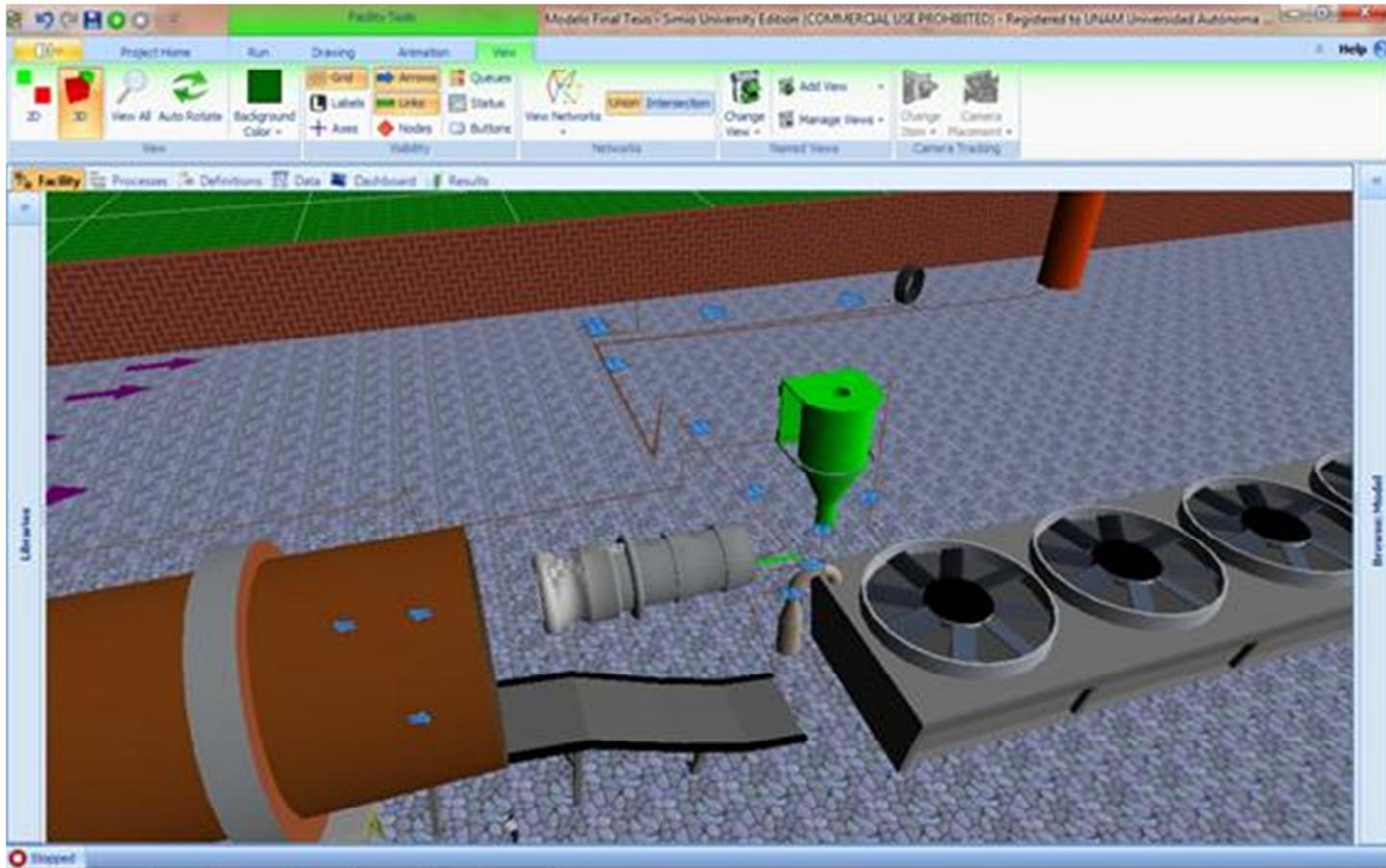


Figura 40. Sistema de combustión del horno.

Simulación del proceso de calcinación del cemento.

- 5) Se asignaron los parámetros de conversión de la materia prima (módulos) por tonelada de harina cruda alimentada y la descomposición química basada en análisis estequiométrico.

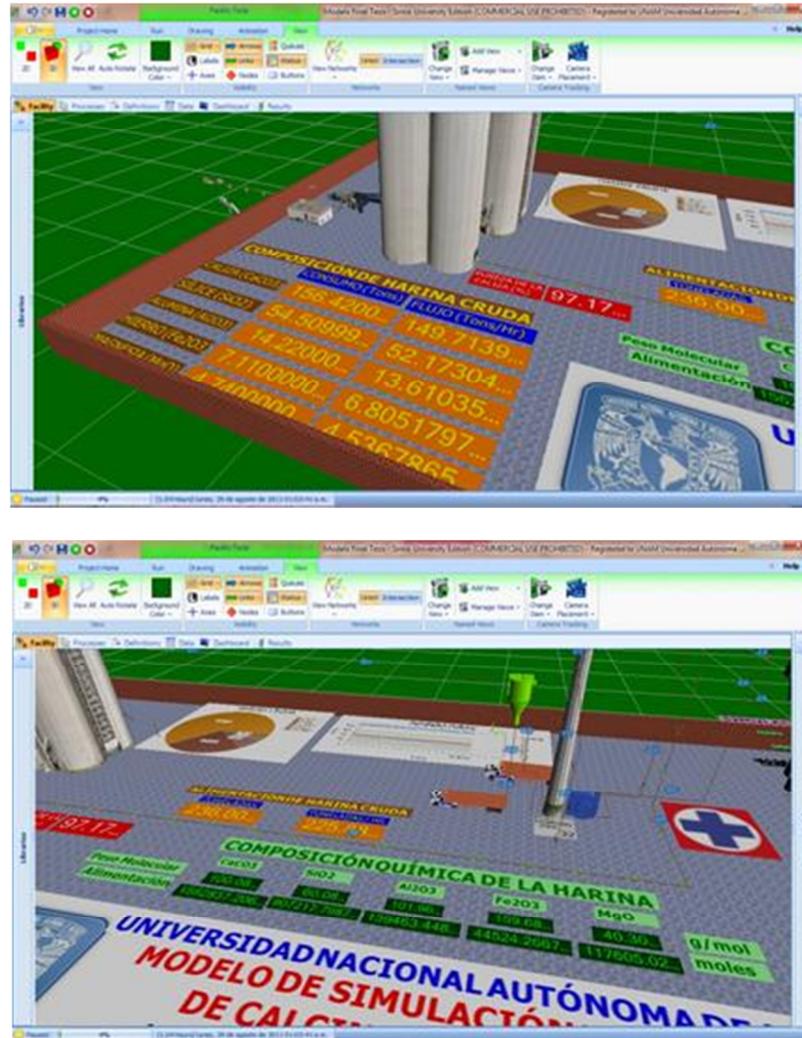


Figura 41. Módulos de materia prima y conversión molar.

Simulación del proceso de calcinación del cemento.

6) Asignación de variables de estado y control del sistema así como desarrollo de procesos internos.

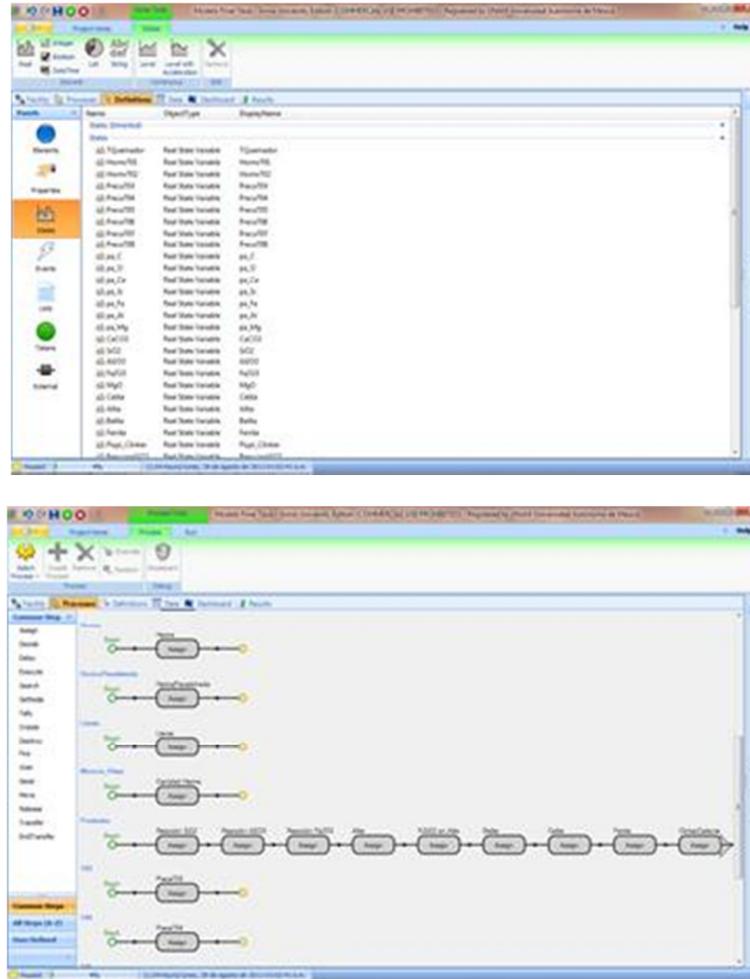


Figura 42. Definición de variables de estado y procesos.

Simulación del proceso de calcinación del cemento.

- 7) Desarrollo de las reacciones químicas que simularán la formación de los materiales sinterizados. (alita, belita, celita y ferrita)



Figura 43. Simulación de las reacciones químicas dentro del horno.

Simulación del proceso de calcinación del cemento.

- 8) Desarrollo de las Ecuaciones de Bogue en el modelo. Dinámicamente, registrarán la formación de los componentes de clinker y la producción total.

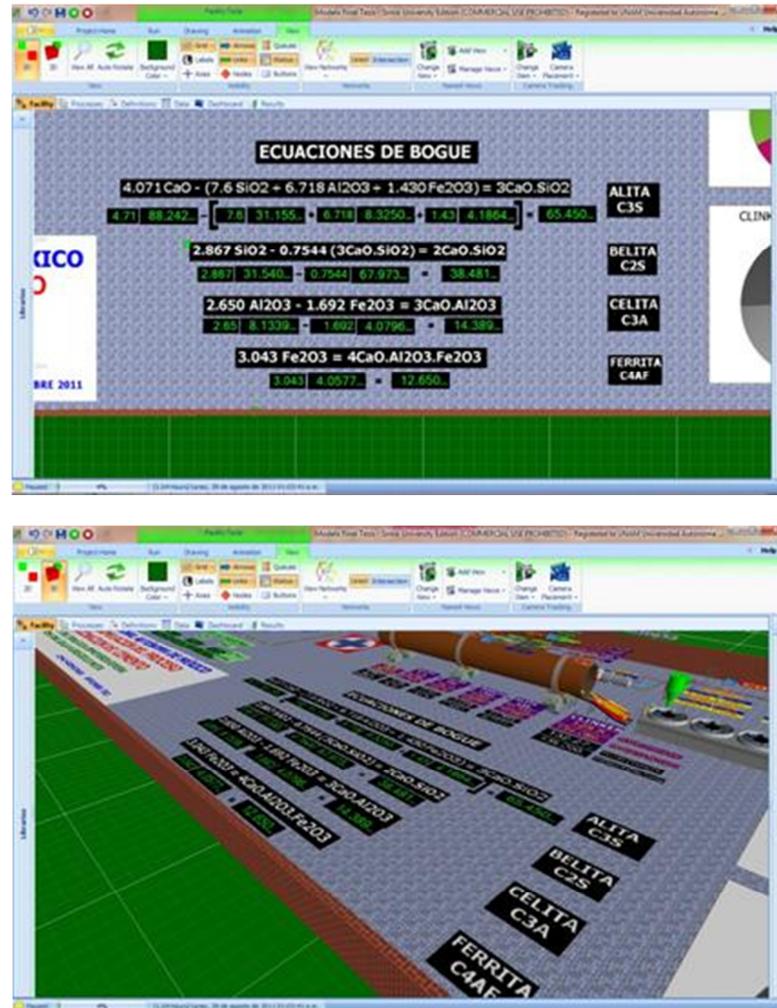


Figura 44. Desarrollo de las Ecuaciones de Bogue en el modelo.

Simulación del proceso de calcinación del cemento.

- 9) Desarrollo del subsistema de combustibles, asignación de parámetros para la combinación proporcional de coque de petróleo, llantas trituradas y aire del medio ambiente (oxígeno y nitrógeno) así como el cálculo del calor generado de conversión.

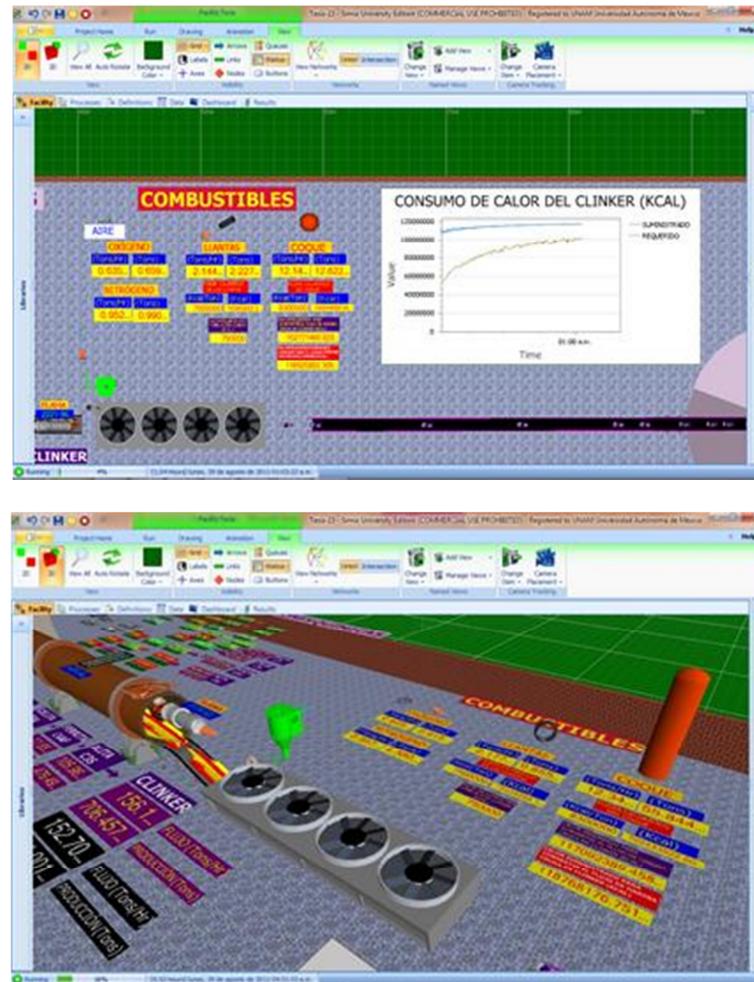


Figura 45. Consumo de combustible y conversión molar.

Simulación del proceso de calcinación del cemento.

- 10) Desarrollo de **cuadro comparativo** de formación de Alita, Belita, Celita, Ferrita y en suma, de Clinker, a través de ambos métodos: 1) Químico-Simulación Discreta y 2) Teórico-Ecuaciones de Bogue.

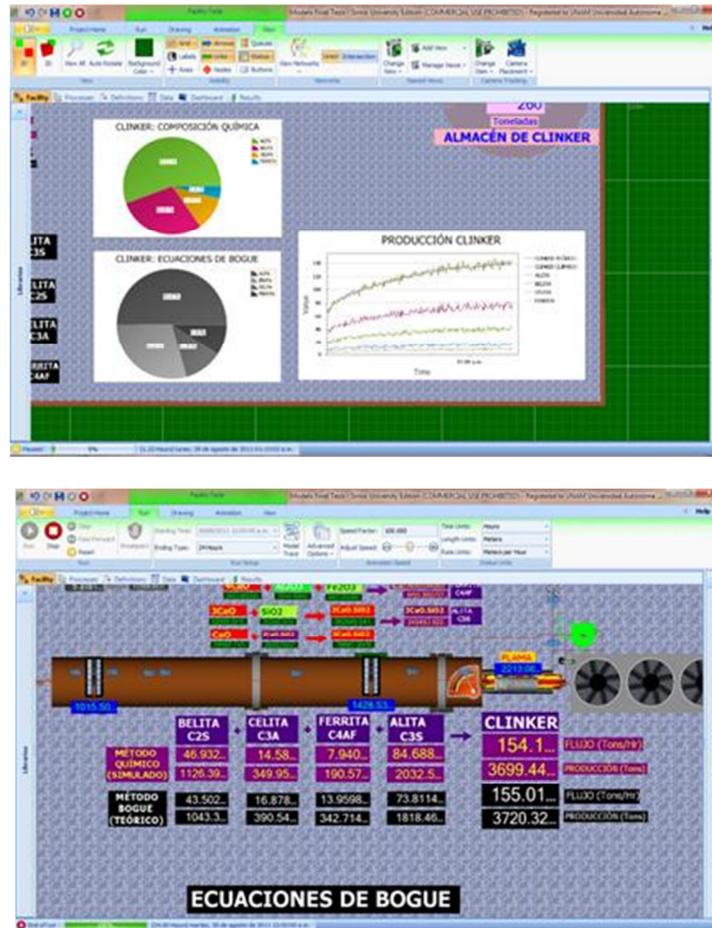


Figura 46. Comparación de los valores simulados y teóricos (Bogue).

Simulación del proceso de calcinación del cemento.

### 11) Obtención del Modelo Final de Simulación de la Unidad de Calcinación del Cemento.



Figura 47. Modelo final de simulación.

Simulación del proceso de calcinación del cemento.

COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LA HARINA

	CaCO <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	
Peso Molecular	0	0	0	0	0	g/mol
Alimentación	0	0	0	0	0	moles

**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**  
**MODELO DE SIMULACIÓN DEL PROCESO DE CALCINACIÓN DEL CEMENTO**  
ALUMNO: ING. TOMÁS GUILLERMO PEREA RIVERA  
TUTORA: DRA. IDALIA FLORES DE LA MOTA  
CIUDAD UNIVERSITARIA    NOVIEMBRE 2011

Figura 48. Membrete del modelo.

#### **4.3.1.6. Verificación del Modelo.**

Después de realizar una serie de pruebas cualitativas al modelo, simularemos ahora el Proceso de Calcinación de Cemento por un periodo de 24 horas, en donde analizaremos lo siguientes datos:

1. Cantidad de Harina Cruda alimentada
2. Cantidad de Harina Cruda que se pierde por Ignición
3. Consumo de combustibles.
4. Cantidad de Clinker a la salida del Horno:
  - 4.1. Cantidad de Alita.
  - 4.2. Cantidad de Belita.
  - 4.3. Cantidad de Celita.
  - 4.4. Cantidad de Ferrita.

Simulación del proceso de calcinación del cemento.

Iniciamos la simulación con nuestro reloj virtual en 00:00:00 como se ve en la siguiente figura:

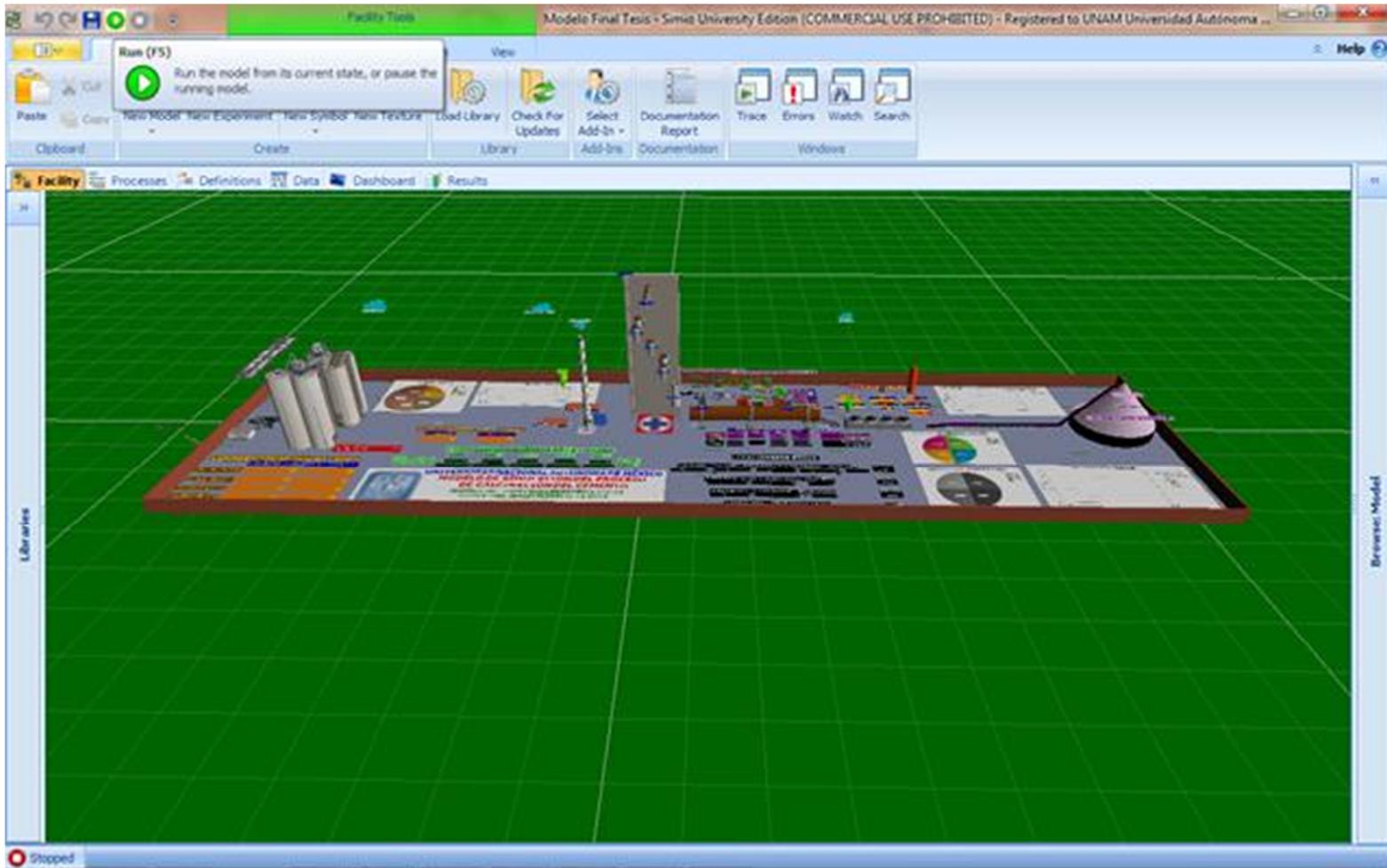


Figura 49. Inicio de corrida de la simulación.

Simulación del proceso de calcinación del cemento.

Simulamos la alimentación de la Harina Cruda a la Unidad de Calcinación:

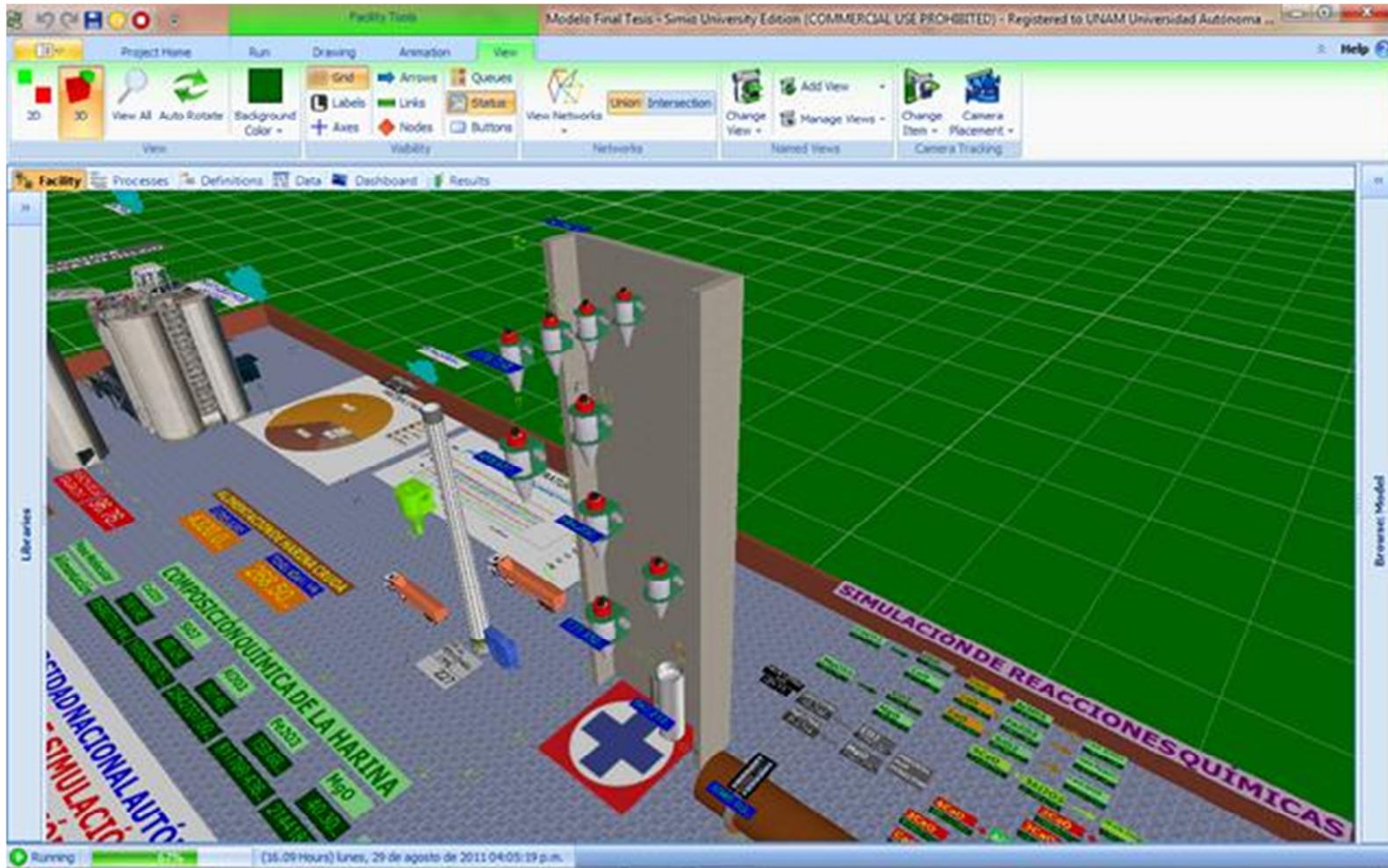


Figura 50. Alimentación de entidades.

Simulación del proceso de calcinación del cemento.

El modelo continúa trabajando hasta que concluye el periodo de simulación (un día de producción = 24 hrs) tal como se observa en la siguiente figura:

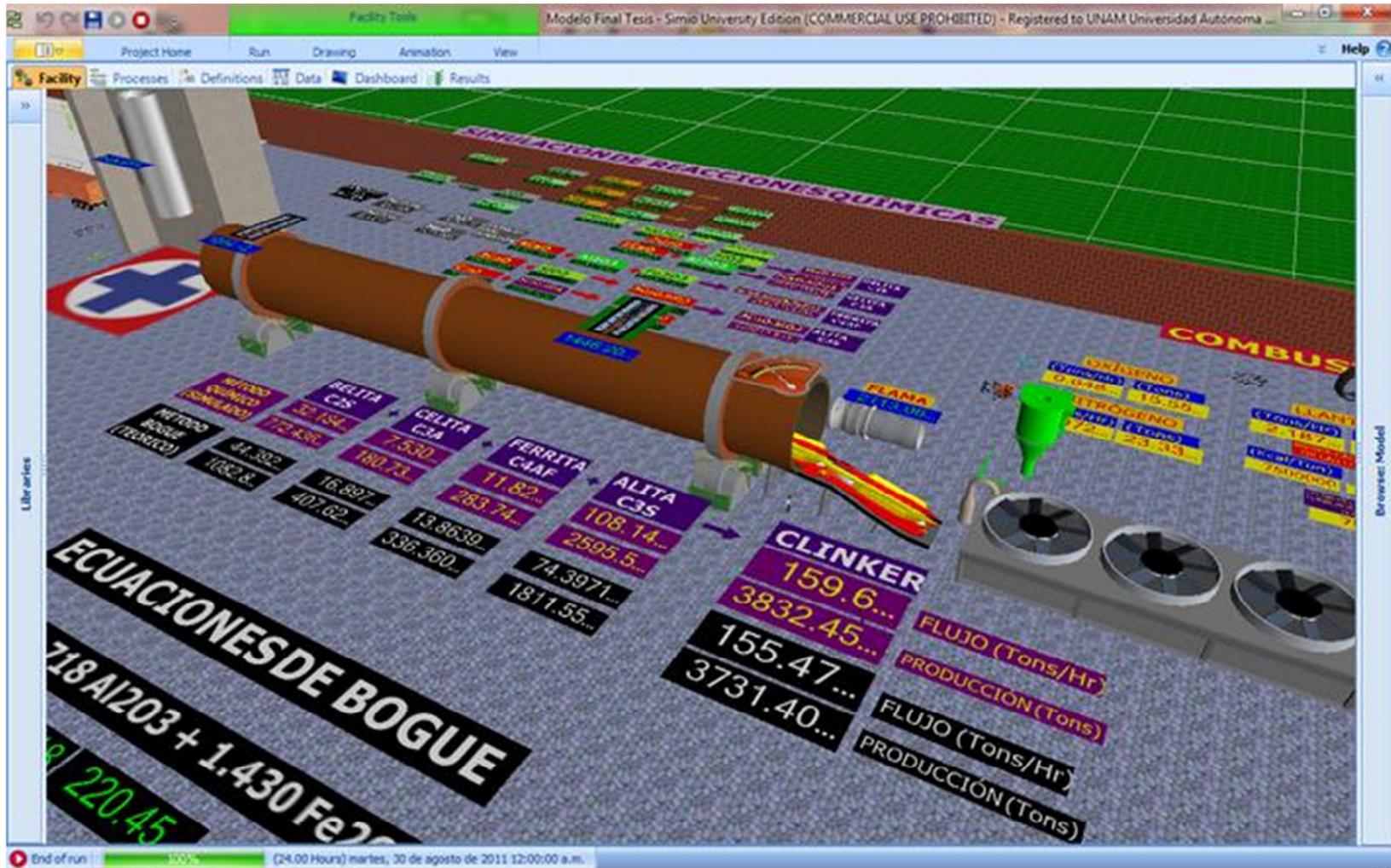


Figura 51. Fin de corrida (24 hrs de producción)

Finalmente obtenemos los siguientes resultados:

Parámetro	Simulación (Químico)	Ecuaciones de Bogue (Teórico)
Harina cruda alimentada (Tons)	6,439.00	N/A
Pérdida por Ignición CO <sub>2</sub> (Tons)	83.70	N/A
<b>Combustible</b>		
Consumo de Coque (Tons)	297.50	N/A
Consumo de Llantas (Tons)	52.50	N/A
<b>Producción de CLINKER (Tons)</b>	<b>3,879.35</b>	<b>3,754.73</b>
Producción de Alita	2,111.50	1,862.02
Producción de Belita	1,066.21	1,061.60
Producción de Celita	443.84	408.34
Producción de Ferrita	257.74	340.40

Tabla 8. Resultados de una sola corrida.

#### 4.3.1.7. Validación del Modelo.

El propósito principal de nuestro modelo es el análisis y pronóstico de la producción de Clinker, en consecuencia, se realizaron 35 corridas y se obtuvo la siguiente información:

MODELO DE SIMULACIÓN: RESULTADOS DE PRODUCCIÓN DE CLINKER					
Id	Simulación (análisis químico)	Ecuaciones de Bogue	Id	Simulación (análisis químico)	Ecuaciones de Bogue
1	3,988.75	3,564.96	19	3,617.88	3,646.62
2	3,821.59	3,578.44	20	3,887.89	3,639.77
3	3,859.04	3,712.99	21	3,935.63	3,694.42
4	3,877.95	3,730.41	22	3,885.81	3,660.94
5	3,898.09	3,560.32	23	3,757.26	3,670.18
6	3,813.91	3,580.16	24	3,655.57	3,684.61
7	3,765.63	3,547.71	25	3,928.39	3,677.68
8	3,641.06	3,556.67	26	3,976.20	3,732.51
9	3,542.51	3,570.65	27	3,925.87	3,698.68
10	3,806.89	3,563.94	28	3,796.00	3,708.01
11	3,854.48	3,618.25	29	3,693.25	3,722.60
12	3,805.69	3,585.46	30	3,968.88	3,715.60
13	3,679.79	3,594.50	31	4,016.78	3,770.60
14	3,580.19	3,608.64	32	3,965.93	3,736.42
15	3,847.39	3,601.85	33	3,834.73	3,745.85
16	3,895.06	3,656.34	34	3,730.94	3,760.58
17	3,845.75	3,623.20	35	4,009.38	3,753.51
18	3,718.53	3,632.34			

Tabla 9. Datos para validación del modelo.

#### 4.3.1.7.1. Histograma de Frecuencias.

A continuación procedemos a elaborar el histograma de frecuencias de cada grupo de datos (simulación vs Bogue):

### DISTRIBUCIÓN DE LOS DATOS SIMULADOS

Distribución Simulación Química		Frecuencia Relativa
3,542.51	1	0.02857
3,621.55	2	0.05714
3,700.60	4	0.11429
3,779.64	4	0.11429
3,858.69	9	0.25714
3,937.73	9	0.25714
4,016.78	5	0.14286
4,095.82	1	0.02857
$\mu=3,846.3$	<b>35</b>	<b>1</b>

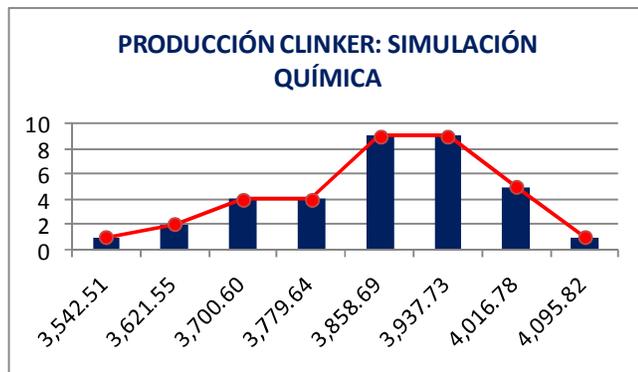


Tabla 10. Histograma de frecuencias datos simulados.

### DISTRIBUCIÓN DE LOS DATOS TEÓRICOS (BOGUE)

Distribución Ecuaciones de Bogue		Frecuencia Relativa
3,547.71	1	0.02857
3,584.86	7	0.20000
3,622.01	5	0.14286
3,659.16	5	0.14286
3,696.30	5	0.14286
3,733.45	7	0.20000
3,770.60	4	0.11429
3,807.75	1	0.02857
$\mu=3,648.9$	<b>35</b>	<b>1</b>

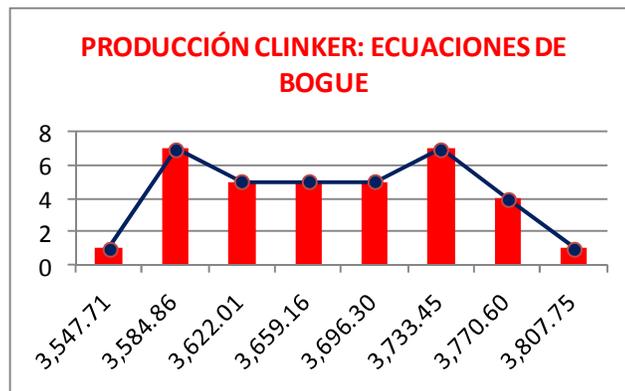


Tabla 11. Histograma de frecuencias con datos teóricos.

#### 4.3.1.7.2. Prueba de Hipótesis: Chi-Cuadrada.

Vamos a analizar los datos producto de la simulación, contra los datos calculados a través de las Ecuaciones de Bogue, por medio del estimador  $\chi^2$  (Chi-Cuadrada:  $E_i - O_i$ ) con un nivel de confianza del 95%:

##### **Hipótesis Nula:**

***H0:*** Los resultados simulados **se comportan de forma homogénea** con los resultados obtenidos por las ecuaciones de Bogue.

##### **Hipótesis Alternativa:**

***H1:*** Los resultados simulados **no se comportan de forma homogénea** con los resultados obtenidos por las ecuaciones de Bogue.

El estimador  $\chi^2$  hace referencia a la diferencia entre los datos simulados y los teóricos ( $E_i - O_i$ ).

FRECUENCIAS RELATIVAS		ESTIMADOR CHI-CUADRADA		
SIMULACIÓN	BOGUE			
Probabilidad Obtenida ( $O_i$ )	Probabilidad Esperada ( $E_i$ )	$(E_i - O_i)$	$(E_i - O_i)^2$	$(E_i - O_i)^2 / E_i$
0.02857	0.02857	0.00000	0	0
0.05714	0.20000	0.14286	0.02040816	0.102040816
0.11429	0.14286	0.02857	0.00081633	0.005714286
0.11429	0.14286	0.02857	0.00081633	0.005714286
0.25714	0.14286	-0.11429	0.01306122	0.091428571
0.25714	0.20000	-0.05714	0.00326531	0.016326531
0.14286	0.11429	-0.02857	0.00081633	0.007142857
0.02857	0.02857	0.00000	0	0
<b>1</b>	<b>1</b>		<b>c=</b>	<b>0.22837</b>

Tabla 12. Prueba Chi-Cuadrada.

A partir de un nivel de significancia de  $\alpha=0.05$  y con ( $m-1$ , es decir,  $8-1=7$  grados de libertad), obtenemos el Estadístico directamente de la Tabla Chi-Cuadrada: **14.067**

Puesto que el estimador Chi Cuadrada  $c = 0.22837$  **ES MENOR** al obtenido de la Tabla  $X^2 = 14.067$ , **NO SE RECHAZA LA HIPÓTESIS NULA Y SE ACEPTAN LOS DATOS SIMULADOS.**

#### 4.3.1.7.3. Prueba de Hipótesis: Kolmogorov-Smirnov.

La prueba Kolmogorov-Smirnov analiza el estimador obtenido por la diferencia entre las probabilidades acumuladas **esperadas** y **obtenidas** ( $PEA_i - POA_i$ ):

##### Hipótesis Nula:

**H0:** Los resultados simulados **se comportan de forma homogénea** con los resultados obtenidos por las ecuaciones de Bogue.

##### Hipótesis Alternativa:

**H1:** Los resultados simulados **no se comportan de forma homogénea** con los resultados obtenidos por las ecuaciones de Bogue.

Con un nivel de confianza del 95%, obtenemos la siguiente tabla:

FRECUENCIAS RELATIVAS		ESTIMADOR KOLMOGOROV-SMIRNOV		
SIMULACIÓN	BOGUE	Probabilidad Obtenida Acumulada	Probabilidad Esperada Acumulada	( $PEA_i - POA_i$ )
Probabilidad Obtenida ( $O_i$ )	Probabilidad Esperada ( $E_i$ )			
0.02857	0.02857	0.02857	0.02857	0.00000
0.05714	0.20000	0.08571	0.22857	0.14286
0.11429	0.14286	0.20000	0.37143	0.17143
0.11429	0.14286	0.31429	0.51429	0.20000
0.25714	0.14286	0.57143	0.65714	0.08571
0.25714	0.20000	0.82857	0.85714	0.02857
0.14286	0.11429	0.97143	0.97143	0.00000
0.02857	0.02857	1.00000	1.00000	0.00000
<b>1</b>	<b>1</b>		<b>c =</b>	<b>0.200</b>

Tabla 13. Prueba Kolmogorov-Smirnov

A partir de un nivel de significancia de  $\alpha=0.05$  y con ( $m-1$ , es decir,  $8-1=7$  grados de libertad), obtenemos el Estadístico directamente de la **Tabla Kolmogorov-Smirnov: 0.486**

Puesto que el estimador Kolmogorov-Smirnov  $c= 0.200$  **ES MENOR** al obtenido de la Tabla = 0.486, **NO SE RECHAZA LA HIPÓTESIS NULA Y SE ACEPTAN LOS DATOS SIMULADOS.**

#### 4.3.1.8. Diseño del Experimento.

Recordemos la redacción de nuestra Hipótesis al comenzar con la investigación:

*"Si modelamos las diferentes reacciones químicas que se suscitan en el interior de un horno de cemento a través de la Simulación, entonces podemos predecir la cantidad y calidad del clinker producido, a partir de los niveles de Carbonato de Calcio ( $\text{CaCO}_3$ ) existentes en la piedra caliza (materia prima principal)."*

Inicialmente comentamos que para analizar el proceso de calcinación del cemento era necesario definir las variables de entrada, de estado, de control y los costos asociados con cada resultado.

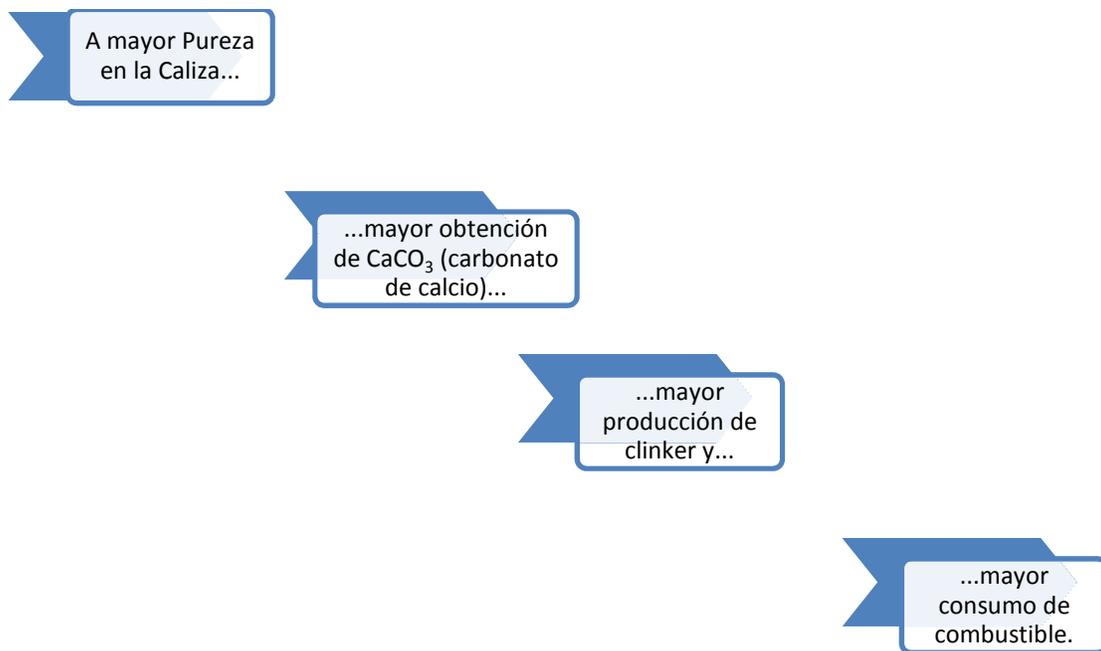
Así que analicemos las diferentes alternativas que vamos a estudiar con nuestro Modelo de Simulación del Proceso de Calcinación del Cemento.

##### 4.3.1.8.1. Variables de entrada, de control, respuestas, réplicas y escenarios.

**Variables de entrada:** Cada entidad que ingresa a nuestro modelo representa una tonelada de harina cruda, ésta a su vez, se conforma por **66% Caliza, 23% Sílice, 3% Hierro, 6% Alúmina y 2% Magnesia.**

Debido a la naturaleza lineal del proceso, el modelo contabilizará la cantidad de harina cruda entrante y registrará los consumos de cada material a través de una Lista de Materiales declarada previamente, lo que nos permitirá conocer la cantidad de caliza, sílice, hierro, alúmina y magnesia que se consume en 24 horas de producción.

**Variable de control:** Deseamos conocer el impacto que tiene la variabilidad de la materia prima con respecto a la producción de clinker y consumo de combustible. La variable a controlar de la materia prima es la **pureza de la caliza**, la cual determina la cantidad de **CaCO<sub>3</sub>** (carbonato de calcio) obtenido en la reacción química, y por ende mayor producción de los minerales sinterizados (alita, belita, celita y ferrita). Generalmente la pureza en la caliza oscila entre un **94% y 99%**. Dentro del horno, mayor cantidad de CaCO<sub>3</sub> generará químicamente mayor cantidad de CaO (óxido de calcio) mismo que reaccionará con el SiO<sub>2</sub> (sílice) para formar mayores cantidades de Alita y Belita principalmente.



**Figura 52. Repercusión de la variable de control Pureza en la Caliza en la producción de clinker.**

**Respuestas:** Toda aquella información que el modelo proporciona en cuanto a la **producción** de alita, belita celita, ferrita, clinker y consumo de combustibles a medida que la variable de control (pureza en la caliza) cambia.

También será preciso conocer el impacto económico que representa dicha variable.

**Escenarios:** Puesto que la **variable de control es la Pureza de la Caliza**, cada escenario a simular corresponderá a un valor de pureza **presentado en la naturaleza**. El primer escenario simulará a la variable de control bajo un

comportamiento de distribución uniforme (0.94, 0.99). Los siguientes 6 escenarios corresponden a un incremento de un punto porcentual en la pureza de la caliza, comenzando en 0.94 y terminando en 0.99.

ESCENARIO	VARIABLE DE CONTROL: PUREZA DE LA CALIZA	TIEMPO DE SIMULACIÓN
1	Distribución Uniforme (0.94, 0.99)	24 Hrs.
2	0.94	24 Hrs.
3	0.95	24 Hrs.
4	0.96	24 Hrs.
5	0.97	24 Hrs.
6	0.98	24 Hrs.
7	0.99	24 Hrs.

Tabla 14 Escenarios para realizar la Simulación

Se considera un periodo de **3 horas** de calentamiento (**Warm up**) para tomar en cuenta a aquellos datos que el modelo arroje en su estado estable. Y un nivel de confianza del **95%**, tal y como lo muestra la siguiente figura:

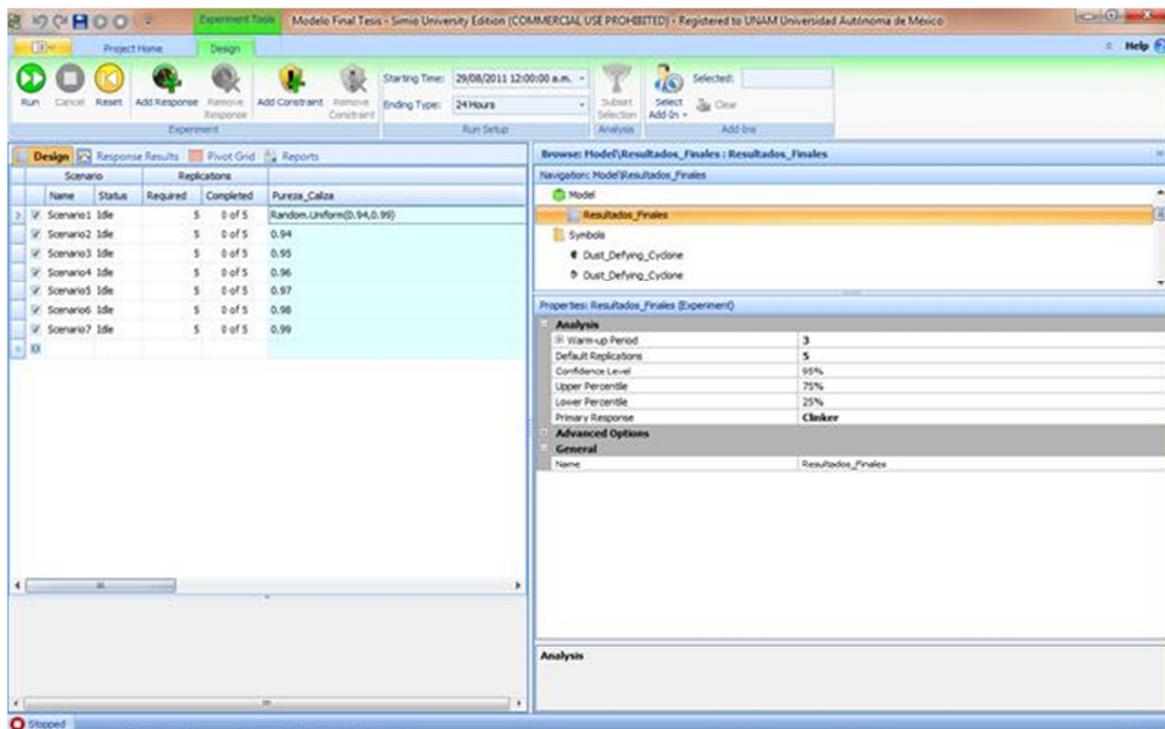


Figura 53. Diseño de Experimentos en SIMIO®.

#### 4.3.1.9. Análisis de resultados.

Después de realizar el experimento, el modelo arrojó los siguientes resultados:

Object Type	Category	Data Item	Scenario1	Scenario2	Scenario3	Scenario4	Scenario5	Scenario6	Scenario7
Model	1_Simulacion	1.1_Alta	2,045.0939	1,990.6236	2,011.8005	2,032.9773	2,054.1542	2,075.3310	2,096.5079
		1.2_Belta	1,160.5812	1,085.6991	1,097.2491	1,108.7991	1,120.3491	1,131.8991	1,143.4491
		1.3_Celta	496.3024	393.0295	397.2107	401.3919	405.5730	409.7542	413.9354
		1.4_Felta	223.1280	244.6462	247.2488	249.8514	252.4540	255.0567	257.6593
	2_Escalones Bogue	1.5_Clinker	3,889.0845	3,713.9985	3,753.5091	3,793.0197	3,832.5303	3,872.0410	3,911.5516
		2.1_Alta	1,809.0936	1,753.7591	1,772.4161	1,791.0731	1,809.7301	1,828.3871	1,847.0441
		2.2_Belta	1,052.1139	1,026.9871	1,037.9125	1,048.8379	1,059.7633	1,070.6887	1,081.6141
		2.3_Celta	396.6881	385.7486	389.8523	393.9560	398.0597	402.1634	406.2671
	3_Combustible	2.4_Felta	330.7444	325.0220	326.4787	331.9363	335.3940	338.8517	342.3093
		3.1_Clinker	3,426.4254	3,363.8247	3,401.7567	3,439.6887	3,477.6207	3,515.5527	3,553.4847
		3.1_Coque	268.8388	256.7557	259.4670	262.1783	264.8896	267.6009	270.3122
		3.2_Litronite	52.9026	50.1390	50.6724	51.2058	51.7392	52.2726	52.8060
	3.3_Costo	3.3_Costo	520,661.7290	497,221.6124	502,511.2051	507,800.7977	513,090.3893	518,379.9800	523,669.5716
		4.1_Clinker	2,009,645.3202	1,918,171.5701	1,929,588.2890	1,940,005.0079	1,950,421.7268	1,960,838.4455	1,971,255.1643
		4.2_Cemento	6,795,125.0963	6,489,209.5492	6,558,243.6934	6,627,277.8375	6,696,311.9817	6,765,346.1258	6,834,380.2699
	5_Beneficio	5.1_Clinker-Combustible	1,488,983.7912	1,421,949.9967	1,431,077.0839	1,440,204.2111	1,449,331.3383	1,458,458.4655	1,467,585.5927
		5.2_Cemento-Combustible	6,274,463.3679	5,991,987.6358	6,055,722.4883	6,116,457.3408	6,183,221.5833	6,246,966.1408	6,310,720.6883

Figura 54. Resultados del Experimento.

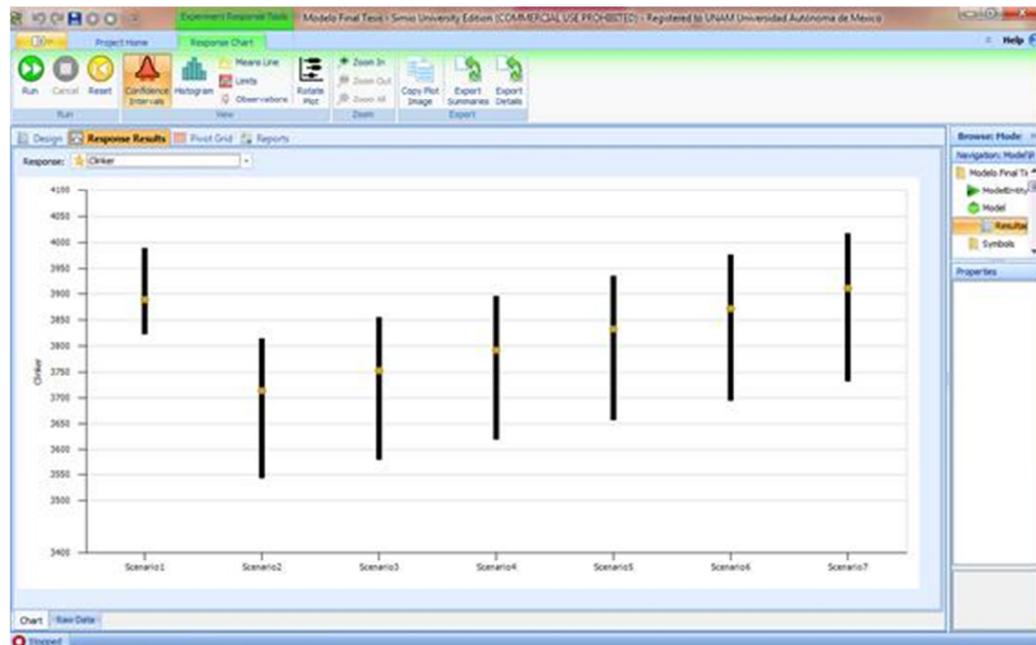


Figura 55. Comportamiento gráfico de los resultados.

La siguiente tabla resume el promedio de las 5 réplicas por escenario referente al pronóstico de clinker, análisis de sus componentes, costo de combustible y costo de producción:

<b>RESULTADOS OBTENIDOS DEL MODELO DE SIMULACIÓN DEL PROCESO DE CALCINACIÓN DEL CEMENTO.</b>							
	<b>Escenario 1</b>	<b>Escenario 2</b>	<b>Escenario 3</b>	<b>Escenario 4</b>	<b>Escenario 5</b>	<b>Escenario 6</b>	<b>Escenario 7</b>
<b>% Pureza de caliza</b>	<b>Uniforme(0.94, 0.99)</b>	<b>0.94</b>	<b>0.95</b>	<b>0.96</b>	<b>0.97</b>	<b>0.98</b>	<b>0.99</b>
<b>1 Simulacion (tons)</b>							
1.1_Alita	2,049.09	1,990.62	2,011.80	2,032.98	2,054.15	2,075.33	2,096.51
1.2_Belita	1,160.56	1,085.70	1,097.25	1,108.80	1,120.35	1,131.90	1,143.45
1.3_Celita	456.30	393.03	397.21	401.39	405.57	409.75	413.94
1.4_Ferrita	223.13	244.65	247.25	249.85	252.45	255.06	257.66
1.5_Clinker	3,889.08	3,714.00	3,753.51	3,793.02	3,832.53	3,872.04	3,911.55
<b>2 Ecuaciones Bogue (tons)</b>							
2.1_Alita	1,809.09	1,753.76	1,772.42	1,791.07	1,809.73	1,828.39	1,847.04
2.2_Belita	1,052.12	1,026.99	1,037.91	1,048.84	1,059.76	1,070.69	1,081.61
2.3_Celita	396.70	385.75	389.85	393.96	398.06	402.16	406.27
2.4_Ferrita	330.74	325.02	328.48	331.94	335.39	338.85	342.31
2.5_Clinker	3,629.42	3,563.83	3,601.74	3,639.65	3,677.57	3,715.48	3,753.39
<b>3 Combustible (tons)</b>							
3.1_Coque	268.84	256.74	259.47	262.20	264.93	267.66	270.39
3.2_Llantas	52.50	50.14	50.67	51.21	51.74	52.27	52.81
3.3_Costo Combustible <sup>1</sup>	\$ 520,661.73	\$ 497,221.61	\$ 502,511.21	\$ 507,800.80	\$ 513,090.39	\$ 518,379.98	\$ 523,669.57
<b>4 Costo de Producción <sup>2</sup></b>							
4.1_Clinker	\$ 2,009,645.52	\$ 1,919,171.57	\$ 1,939,588.29	\$ 1,960,005.01	\$ 1,980,421.73	\$ 2,000,838.45	\$ 2,021,255.16
4.2_Cemento	\$ 6,795,125.10	\$ 6,489,209.55	\$ 6,558,243.69	\$ 6,627,277.84	\$ 6,696,311.98	\$ 6,765,346.13	\$ 6,834,380.27

<sup>1</sup> Precio del coque a \$1,800 /ton y el precio de las llantas a \$700 /ton (Fuente: Cooperativa La Cruz Azul)

<sup>2</sup> Costo de producción de clinker: \$516.74 /ton y costo de producción de cemento: \$1,257 /ton (Fuente: Cooperativa La Cruz Azul)

**Tabla 15. Resumen del experimento.**

La siguiente gráfica compara los resultados finales Simulados vs Calculados (Ecuaciones de Bogue) obtenidos para el clinker y sus componentes:

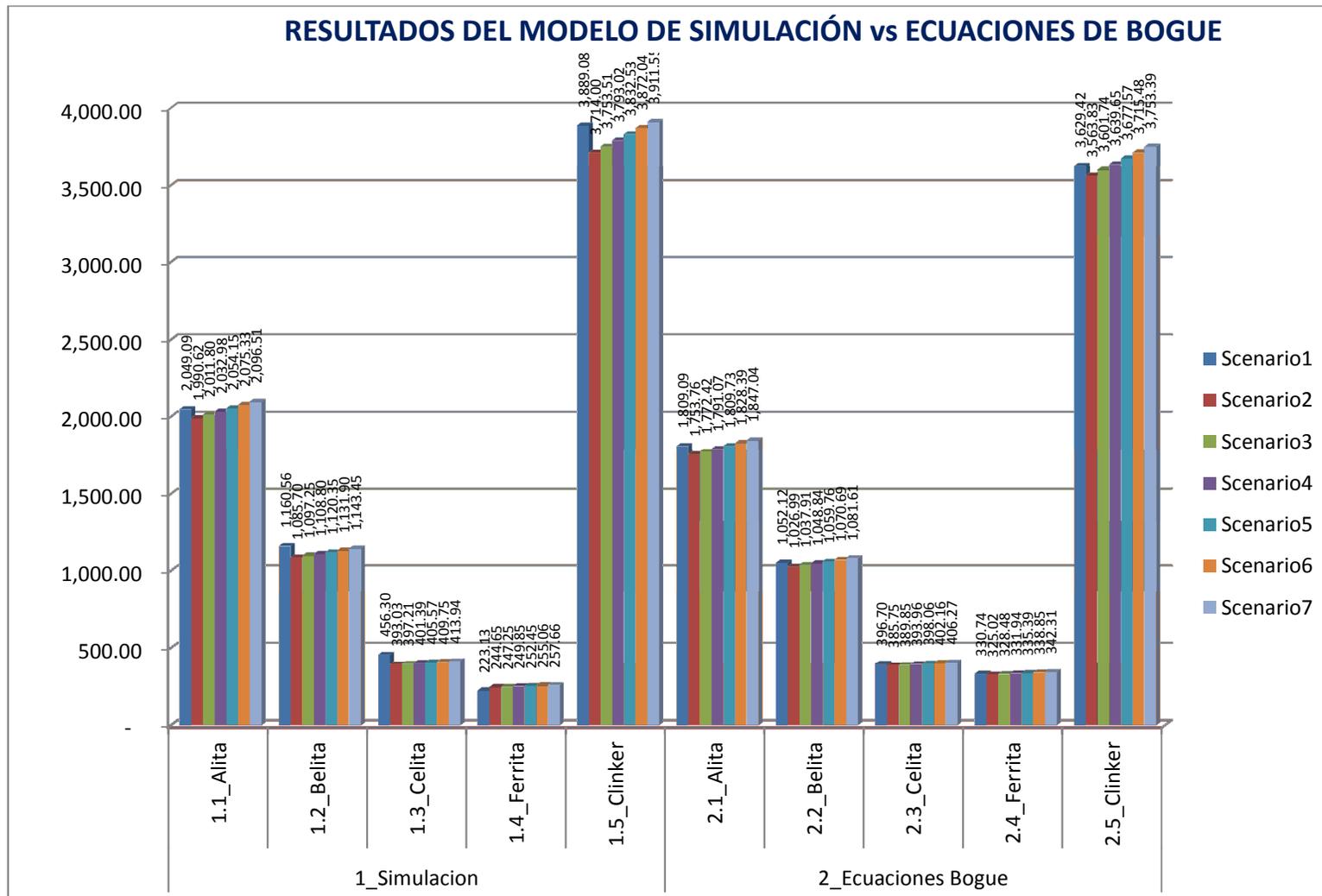


Figura 56. Gráfica comparativa de datos simulados vs teóricos.

Las gráficas siguientes ilustran el incremento en la producción de clinker en función a la pureza de la caliza. Aunque físicamente la alimentación de materias primas es constante, la calidad de la piedra caliza tiene un impacto muy importante en la cantidad y calidad del producto.

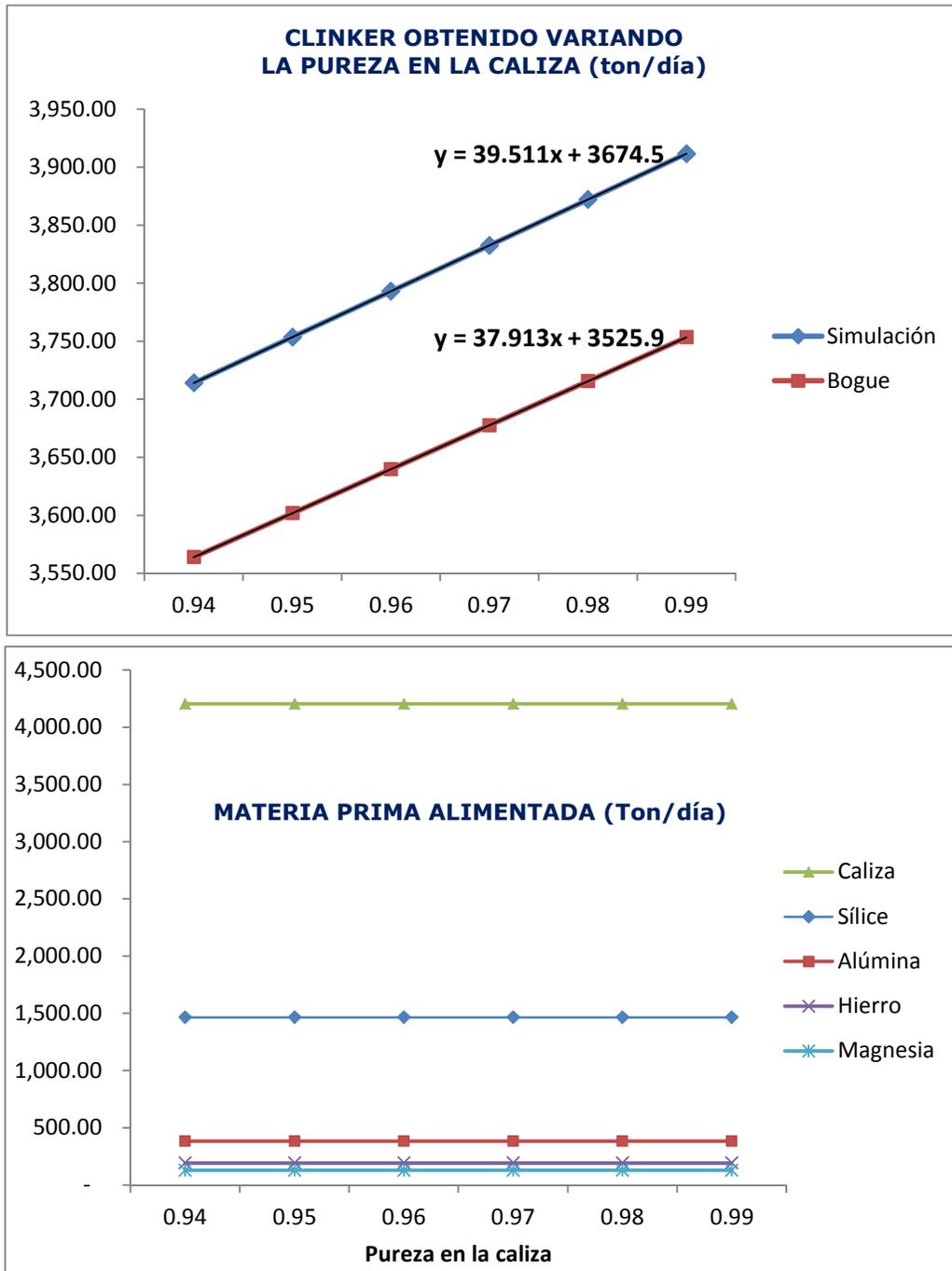


Figura 57. Variación en la producción de clinker vs Pureza de la caliza.

#### 4.3.1.10. Interpretación.

El Modelo de Simulación de la Unidad de Calcinación, permite observar que pequeñas variaciones en la propiedad química de la caliza llamada **pureza**, representa cambios importantes en la producción de minerales artificiales (alita, belita, celita y ferrita) y en consecuencia, de clinker.

Estadísticamente hablando, el incremento de un punto porcentual en la pureza de la caliza, representa un aumento **proporcional** aproximado de **39.51 toneladas** en la producción de **clinker** en un periodo de **24 horas**, debido al incremento de **CaCO<sub>3</sub>** (carbonato de calcio) y su descomposición química en el horno como **reactivo limitante** llamado **CaO (óxido de calcio)**. Ello reacciona en mayor cantidad con sílice para incrementar la formación de Alita (silicato tricálcico) y Belita (silicato dicálcico) principalmente, aumentando la cantidad de clinker.

Lógicamente que mayor masa dentro del horno requiere mayor cantidad de calor para transformar la harina cruda en clinker. Desde el punto de vista termoquímico, se necesitan 750 Kilocalorías de calor generado por el combustible para convertir harina cruda en un kilogramo de clinker (Deolalkar, "Manual de diseño de Plantas de Cemento"). Puesto que el calor de conversión es una propiedad intensiva (proporcional a la masa), el modelo de simulación la considera y calcula el calor necesario para convertir la harina cruda entrante al sistema. El combustible que se utiliza es una mezcla al 76.5% de coque, 13.5% de llanta triturada y el 10% restante aire de combustión (oxígeno 6% y nitrógeno 4%). El **coque** tiene la capacidad de generar **8,300 Kilocalorías por cada kilogramo** que se consume (capacidad calorífica) y la **llanta** triturada de **7,500 Kilocalorías por kilogramo** consumido.

Dentro de los resultados del experimento sabemos que para generar el calor necesario en el horno durante 24 horas, se consume un total de 268.84 y 52.5 toneladas de coque y llanta triturada respectivamente. Si consideramos que el precio del coque es de \$1,800 por tonelada y de \$700 la tonelada de llanta triturada (Fuente: Cooperativa La Cruz Azul), el costo aproximado de consumo de **combustible** es de **\$520,661** en un día de producción.

La producción promedio de clinker de acuerdo al modelo es de **3,889 toneladas** por día; cuyo costo unitario (materia prima+combustible+energía+almacenamiento+refacciones) es de **\$516.74** por tonelada (Fuente: Cooperativa La Cruz Azul), generando un costo total de producción de clinker por día de **\$2,009,645.52**. La misma fuente menciona que el costo unitario de materia prima es de **\$221.68** por tonelada de harina cruda, por lo que el costo total de materia prima por día de **\$862,137.93**

Ahora bien, el costo unitario de cemento Pórtland Cruz Azul (clinker+yeso+energía+almacenamiento+refacciones) es de **\$1,257** por tonelada, por lo que el modelo estima un costo total de producción de cemento de **\$6,795,125.10** MXN por día.

### 4.3.2. Análisis económico.

La siguiente tabla resume lo hasta ahora expuesto en cuanto a los resultados obtenidos del Modelo de Simulación:

ANÁLISIS DE COSTOS								
ESCENARIO	VARIABLE DE CONTROL: PUREZA EN CALIZA	MATERIA PRIMA (Tons)	PRODUCCIÓN CLINKER (Tons)	EFICIENCIA DE LA REACCIÓN	COSTOS			
					MATERIA PRIMA	COMBUSTIBLE	CLINKER	CEMENTO
1	Uniforme(0.94, 0.99)	6,368.39	3,889.08	61.07%	\$ 823,324.60	\$ 520,661.73	\$ 2,009,645.52	\$ 6,795,125.10
2	0.94	6,368.39	3,714.00	58.32%	\$ 823,324.60	\$ 497,221.61	\$ 1,919,171.57	\$ 6,489,209.55
3	0.95	6,368.39	3,753.51	58.94%	\$ 823,324.60	\$ 502,511.21	\$ 1,939,588.29	\$ 6,558,243.69
4	0.96	6,368.39	3,793.02	59.56%	\$ 823,324.60	\$ 507,800.80	\$ 1,960,005.01	\$ 6,627,277.84
5	0.97	6,368.39	3,832.53	60.18%	\$ 823,324.60	\$ 513,090.39	\$ 1,980,421.73	\$ 6,696,311.98
6	0.98	6,368.39	3,872.04	60.80%	\$ 823,324.60	\$ 518,379.98	\$ 2,000,838.45	\$ 6,765,346.13
7	0.99	6,368.39	3,911.55	61.42%	\$ 823,324.60	\$ 523,669.57	\$ 2,021,255.16	\$ 6,834,380.27

Tabla 16. Análisis de Costos.

De acuerdo a la literatura técnica, el factor de conversión de cemento/clinker es de **1.39** (Deolalkar, "Manual de diseño de Plantas de Cemento"), es decir, que por cada tonelada de clinker producido se espera obtener 1.39 toneladas de cemento.

El precio de la **tonelada de cemento** al usuario final es en promedio de **\$2,050 MXN** (Precio promedio de distribuidores y casas de materiales a enero de 2012) lo que nos permitirá calcular un ingreso aproximado de nuestra producción de clinker y cemento en un día:

ANÁLISIS ECONÓMICO									
VARIABLE DE CONTROL: PUREZA EN CALIZA	PRODUCCIÓN		COSTOS		VENTA		UTILIDAD BRUTA	% INCREMENTO UTILIDAD	EQUIVALENCIA EN \$MXN
	CLINKER (Tons)	CEMENTO (Tons)	CLINKER	CEMENTO	PRECIO/TON	INGRESOS			
Uniforme(0.94, 0.99)	3,889.08	5,405.83	\$ 2,009,645.52	\$ 6,795,125.10	\$ 2,050.00	\$ 11,081,946.26	\$ 4,286,821.16		
0.94	3,714.00	5,162.46	\$ 1,919,171.57	\$ 6,489,209.55	\$ 2,050.00	\$ 10,583,038.64	\$ 4,093,829.10		
0.95	3,753.51	5,217.38	\$ 1,939,588.29	\$ 6,558,243.69	\$ 2,050.00	\$ 10,695,624.16	\$ 4,137,380.47	1.06%	\$ 43,551.37
0.96	3,793.02	5,272.30	\$ 1,960,005.01	\$ 6,627,277.84	\$ 2,050.00	\$ 10,808,209.68	\$ 4,180,931.84	1.05%	\$ 43,551.37
0.97	3,832.53	5,327.22	\$ 1,980,421.73	\$ 6,696,311.98	\$ 2,050.00	\$ 10,920,795.20	\$ 4,224,483.22	1.04%	\$ 43,551.37
0.98	3,872.04	5,382.14	\$ 2,000,838.45	\$ 6,765,346.13	\$ 2,050.00	\$ 11,033,380.71	\$ 4,268,034.59	1.03%	\$ 43,551.37
0.99	3,911.55	5,437.06	\$ 2,021,255.16	\$ 6,834,380.27	\$ 2,050.00	\$ 11,145,966.23	\$ 4,311,585.96	1.02%	\$ 43,551.37

Tabla 17. Análisis Económico

Bajo el supuesto de que la pureza en la caliza se mantuviera constante y su valor aumentara gradualmente, los resultados de los diferentes escenarios y el análisis Costo-Beneficio respectivo nos dice que **el incremento en una unidad porcentual en la pureza de la caliza, económicamente representa un incremento aproximado de \$43, 551 MXN en las utilidades de un solo día de producción.**

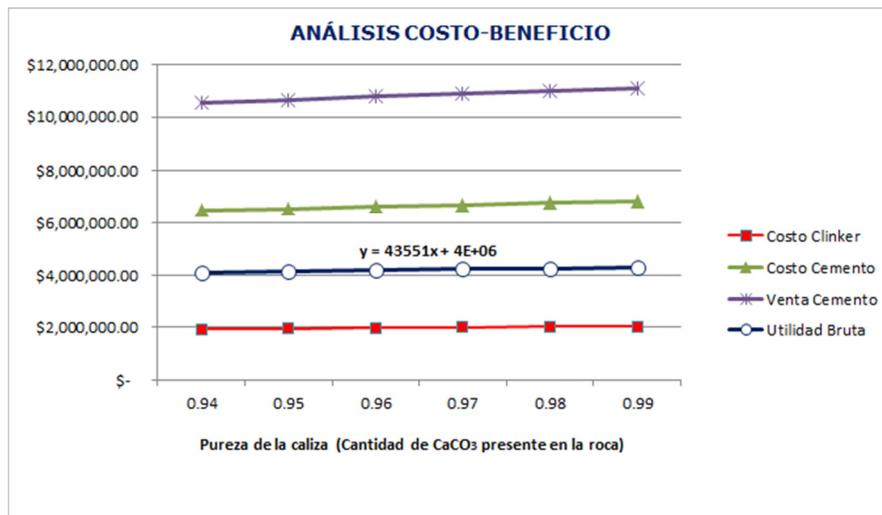


Figura 58. Costo-Beneficio.

Tal afirmación podría parecer exagerada, pero en realidad adquiere mucho sentido si es analizada desde el enfoque fisicoquímico, ya que, como lo hemos comentado, una caliza rica en CaCO<sub>3</sub> representa mayor formación de CaO y en consecuencia mayor formación de Alita (silicato tricálcico) y Belita (silicato dicálcico).

Si en un día de producción de clinker se utiliza piedra caliza de muy baja calidad, (pureza de 94%) la utilidad esperada por la venta de dicho clinker convertido en cemento es aproximadamente de **\$4,093,829.10 MXN.**

Y por el contrario, si se emplea una caliza muy rica en  $\text{CaCO}_3$  (pureza de 99%), la utilidad esperada asciende a **\$4,311,585.96 MXN**, representando una diferencia económica de **\$217,756.86 MXN** por día de producción.

Tal cantidad se considera como la **oportunidad de maximizar las utilidades** de la compañía controlando la Pureza en la Caliza (Materia Prima)

**CAPÍTULO 5**  
**CONCLUSIONES**

## Capítulo 5: Conclusiones.

La Simulación nos permite igualar matemáticamente las condiciones de operación de cualquier sistema, llámese empresa, departamento, flujo vehicular, restaurante, centro comercial, almacén, aeropuertos, tanques industriales, etc. Así mismo, es posible experimentar con las variables de entrada y observar su respuesta casi en forma instantánea al considerar al tiempo relativo y controlado para los fines propios de la simulación.

Los fenómenos en la naturaleza pueden ser de tipo discreto o continuo, todo depende la forma en que sus variables de estado se actualicen. Decimos que un sistema es discreto si experimenta cambios drásticos en la unidad de tiempo y dichos cambios obedecen a una unidad o patrón (ej. vehículos entrantes y salientes de una caseta, número de pasajeros que llegan en un tren, aviones en tierra y en aire, etc.). Cuando las variables de estado se modifican de manera casi imperceptible o gradual, hablamos de un fenómeno continuo (ej. la temperatura, el llenado de un tanque, el movimiento de rotación de nuestro planeta, etc.)

El cemento es un insumo muy importante en la industria de la construcción, su proceso de elaboración consiste en cambios físicos y químicos a su materia prima: la piedra caliza. Requiere de la mezcla de otros materiales como sílice, alúmina, hierro, magnesia, puzolana y yeso. La parte medular en la fabricación del cemento se encuentra en la unidad de calcinación que consiste de un precalentador, un horno y un enfriador. Industrialmente, el cemento es producido en forma continua las 24 horas del día durante 360 días del año (5 días de paro por mantenimiento llamado libranza) por lo que sus flujos de entrada y salida son "constantes" y opera como un sistema continuo.

¿Qué pasaría si en lugar de simular a un sistema continuo (como lo es la elaboración del cemento), vamos más allá y simulamos las reacciones termoquímicas que se suscitan dentro de la unidad de calcinación y específicamente dentro del horno de cemento?

El resultado, la construcción de un **modelo de simulación del proceso de calcinación del cemento**. Que mediante la alimentación de entidades de forma discreta, simulamos la masa química de los materiales (moles), su descomposición y agrupamiento en nuevos elementos químicos para convertirlos posteriormente en el producto del horno al que llamamos clinker. Todo bajo el seguimiento de las directrices que la Química y en especial la Estequiometría establece en sus leyes.

Aunque dentro del proceso de elaboración de clinker las cantidades de materia prima alimentadas se controlan cuidadosamente, los equipos de pesaje (poidómetros) responsables, registran el peso en toneladas y no consideran la composición química en el momento. Previamente en el departamento de Pre-homogeneización, se busca "igualar la composición" de diversas piedras calizas provenientes de diferentes secciones de la cantera. Esto no es suficiente porque el porcentaje promedio de la pureza en la caliza está en función a la encontrada en el momento, por lo que se sugiere realizar análisis puntuales a las canteras y determinar el grado de pureza en la caliza para establecer "mapas de calidad en la materia prima" y pronosticar de forma más aproximada la cantidad de clinker a obtener y desarrollar presupuestos de producción con mayor precisión.

El desarrollo del Modelo de Simulación implicó la integración de conocimientos en metodología de sistemas, simulación desde luego, Estequiometría, procesos industriales, dominio del software SIMIO y aplicación de la Estadística para el diseño de experimentos.

Resultado de la conclusión, validación y experimentación del modelo logramos representar las cantidades de materias primas que son alimentadas en la vida real, calculamos la cantidad en moles y la descomposición química de cada material en sus elementos y simulamos todas y cada una de las reacciones que se suscitan dentro del horno, para posteriormente calcular la formación de clinker de forma estequiométrica. Como referencia de que el modelo trabaja en forma muy similar a la realidad, se emplearon las Ecuaciones de Bogue. Estas ecuaciones nos permitieron calcular y predecir la cantidad de los minerales artificiales que se forman dentro del horno a partir de la composición inicial en la alimentación. Representaron nuestros valores teóricos de comparación y validación.



# **ANEXOS**

## Anexos.

### A) Introducción a la Estequiometría.

En química, la Estequiometría (del griego "stoicheion" (elemento) y "metrón" (medida)) es el cálculo de las relaciones cuantitativas entre reactivos y productos en el transcurso de una reacción química.

La estequiometría es una herramienta indispensable en la química. Problemas tan diversos como, por ejemplo, la medición de la concentración de ozono en la atmósfera, la determinación del rendimiento potencial de oro a partir de una mina y la evaluación de diferentes procesos para convertir el carbón en combustibles gaseosos, comprenden aspectos de estequiometría.

El primero que enunció los principios de la estequiometría fue Jeremías Benjamín Richter (1762-1807), en 1792. Escribió:

***La Estequiometría es la ciencia que mide las proporciones cuantitativas o relaciones de masa en la que los elementos químicos que están implicados (en una reacción química).***

### Principio científico

*En una reacción química se observa una modificación de las sustancias presentes: los reactivos se modifican para dar lugar a los productos.*

A escala microscópica, la reacción química es una modificación de los enlaces entre átomos, por desplazamientos de electrones: unos enlaces se rompen y otros se forman, pero los átomos implicados se conservan. Esto es lo que llamamos la ley de conservación de la materia (masa), que implica las dos leyes siguientes:

- 1.- La conservación del número de átomos de cada elemento químico.
- 2.- La conservación de la carga total.

Para entender la Estequiometría hay que tener claridad conceptual de los siguientes términos:

**Elementos** -----> **Átomos** -----> **Símbolos**  
**Compuestos** -----> **Moléculas** -----> **Fórmulas**  
**Reacciones Químicas (cambios químicos)** -----> **Ecuaciones Químicas**

**Símbolo** es la representación gráfica de un elemento. El símbolo de un elemento representa no solamente su nombre, sino también un átomo o un número prefijado ("mol") de átomos de ese elemento.

**Fórmula** es la representación gráfica de un compuesto. La fórmula de una sustancia indica su composición química.

**Ecuación Química** es la representación gráfica de un cambio químico. Una reacción química siempre supone la transformación de una o más sustancias en otra u otras; es decir, hay un reagrupamiento de átomos o iones, y se forman otras sustancias.

**Peso Atómico:** Se puede definir como la masa en gramos de un mol de átomos. En términos más específicos, el peso atómico es el peso total de las masas de los isótopos naturales del elemento.

Las relaciones estequiométricas entre las cantidades de reactivos consumidos y productos formados dependen directamente de estas leyes de conservación, y están determinadas por la ecuación (ajustada) de la reacción.

**Mol:** Es una de las magnitudes físicas fundamentales que forman parte del Sistema Internacional de Unidades. Esta unidad permite medir la cantidad de cualquier sustancia.

El *mol* se define como la cantidad de sustancia que contiene tantas entidades elementales de un tipo como átomos hay en 12 gramos de carbono-12. Esto quiere decir que la cantidad de unidades elementales (como átomos, moléculas o iones, por ejemplo) reflejadas en un mol de sustancia es una

constante que no depende del tipo de partícula o del material en cuestión. Dicha cantidad se conoce como número de **Avogadro**.

Esta constante, bautizada en homenaje al científico italiano Amedeo Avogadro (1776-1856), permite contar partículas microscópicas a partir de medidas macroscópicas (como es el caso de la masa).

El número de Avogadro, por lo tanto, ayuda a que los químicos expresen el peso de los átomos. La ecuación señala que un mol equivale a  $6,022 \times 10$  elevado a 23 cifras. Se trata de un número inmenso, que refleja una enorme cantidad de partículas.

Al expresar el número de átomos que se encuentran en 12 gramos de carbono-12, la masa en gramos de un mol de átomos de un elemento siempre es igual al peso atómico en unidades de masa atómica del mismo elemento. Esto quiere decir que **el número de Avogadro permite realizar conversiones entre el gramo y la unidad de masa atómica.**

### **Ajustar o balancear una reacción**

Una **ecuación química** (que no es más que la representación escrita de una reacción química) ajustada debe reflejar lo que pasa realmente antes de comenzar y al finalizar la reacción y, por tanto, debe respetar las leyes de conservación del número de átomos y de la carga total.

Para respetar estas reglas, se pone delante de cada especie química un número llamado coeficiente estequiométrico, que indica la proporción de cada especie involucrada (se puede considerar como el número de moléculas o de átomos, o de iones o de moles; es decir, la cantidad de materia que se consume o se transforma).

Por ejemplo:

En la reacción de combustión de metano ( $\text{CH}_4$ ), éste se combina con oxígeno molecular ( $\text{O}_2$ ) del aire para formar dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) y agua ( $\text{H}_2\text{O}$ ).

La reacción sin ajustar (sólo representando los elementos que interactúan) será:



Esta reacción no es correcta, porque no cumple la ley de conservación de la materia. Para el elemento hidrógeno (H), por ejemplo, hay 4 átomos en los reactivos (CH<sub>4</sub>) y sólo 2 en los productos (H<sub>2</sub>O). Se ajusta la reacción introduciendo delante de las fórmulas químicas de cada compuesto un coeficiente estequiométrico adecuado.

De esta manera, si se pone un 2 delante del H<sub>2</sub>O:



Se respeta la conservación para el carbono (C) y el hidrógeno (H), pero no para el oxígeno (O), situación que puede corregirse poniendo otro 2 delante de O<sub>2</sub> en los reactivos:



Y se obtiene así, finalmente, la reacción ajustada.

Ésta dice que 1 molécula de metano (CH<sub>4</sub>) reacciona con 2 moléculas de oxígeno molecular (O<sub>2</sub>) para dar 1 molécula de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) y 2 moléculas de agua (H<sub>2</sub>O). Si verificamos el número de átomos veremos que en ambos lados de la ecuación hay 1 átomo de carbono (C), 4 átomos de hidrógeno (H) y 4 átomos de oxígeno (O). La materia (la cantidad de átomos) se ha conservado una vez terminada la reacción química.

### **Mezcla/proporciones/condiciones estequiométricas**

Cuando los reactivos de una reacción están en cantidades proporcionales a sus coeficientes estequiométricos se dice:

- La mezcla es estequiométrica;
- Los reactivos están en proporciones estequiométricas;
- La reacción tiene lugar en condiciones estequiométricas;
- Las tres expresiones tienen el mismo significado.

En estas condiciones, si la reacción es completa, todos los reactivos se consumirán dando las cantidades estequiométricas de productos correspondientes.

*Ejemplo:*

**¿Qué cantidad de oxígeno es necesaria para reaccionar con 100 gramos de carbono produciendo dióxido de carbono?**

Masa atómica del oxígeno = 15.9994.

Masa atómica del carbono = 12.0107.

La reacción es: **C + O<sub>2</sub> --> CO<sub>2</sub>**

Para formar una molécula de dióxido de carbono, hace falta un átomo de carbono y dos de oxígeno, o lo que es lo mismo, un mol de carbono y dos mol de oxígeno.

1 mol de carbono + 2 moles de oxígeno

12.0107 gramos de carbono	+	2 • 15.994 gramos de oxígeno
100 gramos de carbono	+	x gramos de oxígeno

Despejando x:  $(100 \times 2 \times 15.994) / 12.0107$

**x = 266,41 gramos de oxígeno**

## B) Análisis estequiométrico de la Harina Cruda y el Clinker.

Se llama **Harina Cruda** a la mezcla triturada y pulverizada de la piedra caliza, sílice, alúmina, hierro y magnesia. Es la materia prima entrante a la unidad de calcinación para producir **Clinker**, subproducto en la elaboración de **cemento**.

Las fórmulas químicas para representar a cada elemento de la harina cruda son:

- **Caliza:**  $\text{CaCO}_3$  (carbonato de calcio + impurezas)
- **Sílice:**  $\text{SiO}_2$  (óxido de silicio)
- **Alúmina:**  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (óxido de aluminio)
- **Hierro:**  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (óxido de hierro)
- **Magnesia:**  $\text{MgO}$  (óxido de magnesio)

Procederemos ahora a calcular el peso molecular de cada elemento para convertir la cantidad de masa entrante (toneladas) en unidades molares, lo que permitirá llevar a cabo reacciones estequiométricas de la materia prima y su transformación en clinker.

INSUMO	ELEMENTO	PESO ATÓMICO	PESO MOLECULAR g/gmol
<b>CaCO<sub>3</sub></b>	Calcio (Ca)	40.078	<b>100.08</b>
	Carbono (C)	12.011	
	Oxígeno (O)	15.9994 x 3	
<b>SiO<sub>2</sub></b>	Silicio (Si)	28.086	<b>60.08</b>
	Oxígeno (O)	15.9994 x 2	
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	Aluminio (Al)	26.982 x 2	<b>101.96</b>
	Oxígeno (O)	15.9994 x 3	
<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	Fierro (Fe)	55.845 x 2	<b>159.68</b>
	Oxígeno (O)	15.9994 x 3	
<b>MgO</b>	Magnesio (Al)	24.305	<b>40.30</b>
	Oxígeno (O)	15.9994	

**Tabla 18. Información química de la materia prima.**

La tabla anterior nos explica que una molécula de carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ) está formada por la unión de un átomo de calcio (Ca), un átomo de carbono (C) y tres átomos de oxígeno ( $\text{O}_3$ ), cuyo peso molecular es equivalente a la suma de cada uno de los pesos atómicos de los átomos que la integran, en este caso 100.08 g/gmol.

### Módulos de la materia prima (harina cruda) y flujo molar.

Definimos como módulos de materia prima a la proporción en porcentaje de los diferentes materiales que integran a la Harina Cruda entrante a nuestro sistema:

MATERIAL	MÓDULO (%)	FLUJO TOTAL DE HARINA CRUDA	FLUJO PARCIAL (Ton/hr)	FLUJO PARCIAL (gramos/hr)
Caliza	66%	265 Ton/hr	174.9	174,900,000.00
Sílice	23%		60.95	60,950,000.00
Alúmina	6%		15.9	15,900,000.00
Hierro	3%		7.95	7,950,000.00
Magnesia	2%		5.3	5,300,000.00

Tabla 19. Módulos de materia prima.

El flujo másico entrante al sistema es aproximadamente 265 toneladas de harina cruda por hora, lo que implica que la proporción de caliza, sílice, alúmina, hierro y magnesia es de 174.9, 60.95, 15.9, 7.95 y 5.3 toneladas por hora respectivamente. Estas cantidades las convertimos en gramos para realizar las equivalencias con sus elementos químicos (moles) y calculamos la cantidad de masa química (flujo molar) entrante:

MATERIAL	FLUJO PARCIAL (gramos/hr)	PESO MOLECULAR (g/gmol)	FLUJO MOLAR (Flujo/Peso Molecular)
Caliza	174,900,000.00	100.08	1,747,601.92 gmol/hr
Sílice	60,950,000.00	60.08	1,014,480.69 gmol/hr
Alúmina	15,900,000.00	101.96	155,943.51 gmol/hr
Hierro	7,950,000.00	159.68	49,787.07 gmol/hr
Magnesia	5,300,000.00	40.30	131,513.65 gmol/hr

Tabla 20. Conversión molar de la materia prima.

### Reacciones químicas en el horno.

Las reacciones que ocurren en el proceso de calcinación son:

- Evaporación del agua de la mezcla.
- Eliminación del agua combinada de la arcilla.
- Disociación del carbonato de magnesio.
- Disociación del carbonato de calcio.
- Reacción en el horno: combinación de la cal y la arcilla.

El horno (intercambiador-enfriador) es el equipo que determina la producción, siendo la parte más importante de todo el proceso.

El **clinker** se produce calentando la harina cruda debidamente dosificada a altas temperaturas en una atmósfera generalmente oxidante. Las reacciones de clinkerización se producen esencialmente entre cuatro elementos principales:  $\text{CaO}$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , para formar silicatos de propiedades hidráulicas.

En forma global, el proceso de formación de clinker se puede dividir en cuatro partes:

#### a) Secado.

Temperatura (°C)	Reacciones
20-100	$\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O} \gg \text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{H}_2\text{O} \text{ (v)}$ Deshidratación de la mezcla (evaporación del agua libre)
100-400	$\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O} \gg \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiO}_2 + 2\text{H}_2\text{O} \text{ (v)}$ Se expelen el agua de cristalización (eliminación del agua combinada con arcilla)
400-900	Se libera el agua química.

Tabla 21. Reacciones químicas fase Secado.

**b) Calcinación.**

Temperatura (°C)	Reacciones
500-900	$\text{CaCO}_3 \gg \text{CaO} + \text{CO}_2$ Descarboxinación $\text{MgCO}_3 \gg \text{Mg} + \text{CO}_2$ Disociación del carbonato de magnesio CO <sub>2</sub> es expelido
Debajo de 800	$\text{CaO} + \text{Al}_2\text{O}_3 \gg \text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ Formación de aluminato cálcico $\text{CaO} + \text{Fe}_2\text{O}_3 \gg \text{CaO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ Formación de óxido ferroso
800-900	$\text{CaO} + \text{SiO}_2 \gg \text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ Formación de silicato cálcico
900-950	$5\text{CaO} + 3\text{Al}_2\text{O}_3 \gg 5\text{CaO} \cdot 3\text{Al}_2\text{O}_3$ Formación del trialuminato cálcico
950-1200	$2\text{CaO} + \text{SiO}_2 \gg 2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ Formación de silicato dicálcico (C2S)

Tabla 22. Reacciones químicas fase Calcinación.

**c) Sinterización y clinkerización.**

Temperatura (°C)	Reacciones
1200-1300	$3\text{CaO} + \text{Al}_2\text{O}_3 \gg 3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ Formación de aluminato tricálcico (C3A)
1260	$4\text{CaO} + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 \gg 4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ Formación de ferroaluminato tetracálcico
1260-1450	$3\text{CaO} + \text{SiO}_2 \gg 3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ Formación de silicato tricálcico con desaparición de la cal libre $\text{CaO} + 2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \gg 3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ Formación de silicato tricálcico (C3S) a partir del C2S y cal libre

Simulación del proceso de calcinación del cemento.

**Tabla 23. Reacciones químicas fase Sinterización y Clinkerización.**

**d) Enfriado.**

Temperatura (°C)	Reacciones
1450	Formación de Belita y Alita
1300-1240	Cristalización de los aluminatos y ferritos

**Tabla 24. Reacciones químicas fase Enfriamiento.**

Dentro de la etapa de secado, las ecuaciones químicas muestran en primer lugar el cambio de fase del agua (H<sub>2</sub>O) de líquida a vapor, enseguida se observa que la humedad en los materiales se desprende y de igual forma se convierte en vapor.

En la etapa de calcinación, entre 500 °C y 900 °C se presenta la descarbonatación de la piedra caliza (CaCO<sub>3</sub>) descomponiéndose en óxido de calcio (CaO) y dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>)



El principio de la Estequiometría explicado en el Anexo A, establece, para el ejemplo anterior, que **“una mol (gmol) de carbonato de calcio al ser sometida a la temperatura oscilante de 500°C y 900°C, se descompone químicamente en una mol de óxido de calcio y una mol de dióxido de carbono”**.

Aplicando este principio al modelo de simulación, éste alimenta una masa de harina cruda y, como se ha explicado anteriormente, se alimenta un flujo aproximado de piedra caliza (CaCO<sub>3</sub>) de **1,747,601.92 gmol** por cada **hora** de proceso, es decir:



Es importante mencionar que la cantidad de óxido de calcio (CaO) y dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) formados, dependen de la cantidad de moles alimentadas de carbonato de calcio (CaCO<sub>3</sub>), esto es, que los reactivos “limitan” la cantidad de productos generados.

Para simular a las diversas reacciones que se suscitan dentro del horno de calcinación, se tomaron como base las ecuaciones químicas en cada etapa (mostradas anteriormente) y aunado a la información de moles alimentadas de harina cruda, obtuvimos los coeficientes de los flujos en cada una de ellas, como se muestra en la siguiente figura:

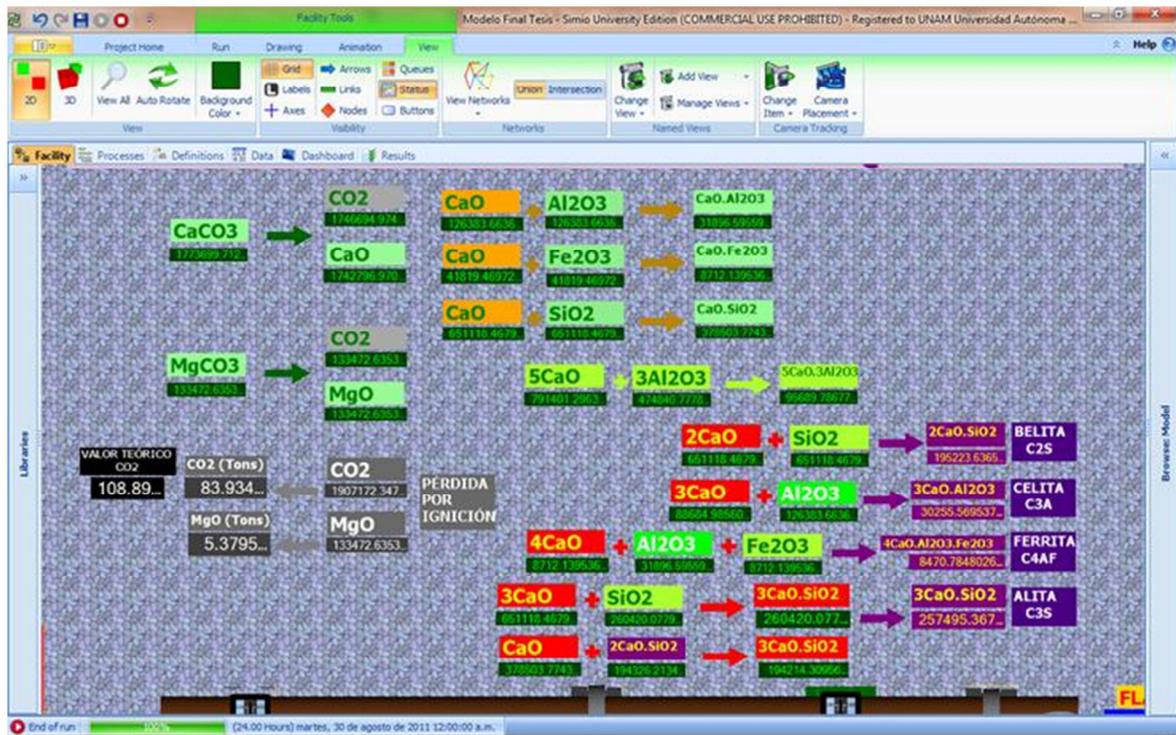


Figura 59. Reacciones Químicas simuladas del Horno.

Para la formación de clinker, el modelo de simulación calcula las reacciones de los diferentes silicatos, los cuales se resumen en la siguiente tabla:

MINERAL FORMADO	FÓRMULA QUÍMICA	FLUJO MOLAR (gmol/hr)	PESO MOLECULAR (g/gmol)
<b>Silicato Tricálcico</b>	$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	257,495.36	228.31
<b>Silicato Dicálcico</b>	$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	195,223.63	172.23
<b>Aluminato Tricálcico</b>	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	30,255.56	270.19
<b>Ferroaluminato Tetracálcico</b>	$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$	8,470.78	485.96

Tabla 25. Formación de minerales artificiales.

Y realizando la operación inversa de convertir la masa molar de los minerales artificiales en masa de clinker obtenido, tenemos:

MINERAL FORMADO	FLUJO MOLAR (gmol/hr)	PESO MOLECULAR (g/gmol)	FLUJO PARCIAL (Flujo Molar*Peso Molecular)	FLUJO PARCIAL (Ton/hr)
<b>Silicato Tricálcico</b>	513,796.81	228.31	117,304,949.69 g/hr	117.31
<b>Silicato Dicálcico</b>	39,875.70	172.23	6,867,791.81 g/hr	6.87
<b>Aluminato Tricálcico</b>	48,398.96	270.19	13,076,915.01 g/hr	13.08
<b>Ferroaluminato Tetracálcico</b>	43,705.89	485.96	21,239,314.30 g/hr	21.24
<b>Flujo de Clinker (Suma)</b>			<b>158,488,970.81</b>	<b>158.5</b>

Tabla 26. Conversión molar de minerales artificiales.

El modelo calculó un flujo de producción de **clinker** de aproximadamente **158.5 toneladas por hora**, lo que nos da una **producción diaria de 3,804 toneladas**.

Básicamente el modelo descompone las cantidades de materiales entrantes en sus equivalentes molares. Posteriormente simula las reacciones químicas que se llevan a cabo dentro del horno para determinar la cantidad de minerales artificiales formados, y finalmente, estima la cantidad de clinker producido.

### **C) Cálculo de consumo de combustibles.**

En la industria cementera, dentro del proceso de calcinación, se utilizan diversas clases de combustibles, hace algún tiempo se utilizaba el combustóleo principalmente, aceites industriales tratados que aportan energía (calor de combustión). Europa es un continente innovador en materia de combustibles porque han incluido dentro de la combustión en el horno a las llantas trituradas y basura tratada que es alimentada de forma molida.

Dentro de esta investigación, se trabajó con dos combustibles: el coque de petróleo y llantas trituradas. Desde luego, el aire (oxígeno + nitrógeno) también fue tomado en cuenta para que fuese posible el proceso de combustión.

#### **Coque de petróleo.**

El coque es un combustible obtenido de la destilación de la hulla calentada a temperaturas muy altas en hornos cerrados y a la cual añaden calcita para mejorar su combustión, que la aíslan del aire, y que sólo contiene una pequeña fracción de las materias volátiles que forman parte de la misma. Es producto de la descomposición térmica de carbones bituminosos en ausencia de aire. Cuando la hulla se calienta desprende gases que son muy útiles industrialmente; el sólido resultante es el carbón de coque, que es liviano y poroso.

Durante la revolución industrial sustituyó al carbón vegetal como reductor y fuente de energía en los altos hornos, facilitando el desarrollo de la industria siderúrgica, que dependía hasta entonces de un recurso muy limitado como es la leña. Su empleo se popularizó para la calefacción de hogares, pues su combustión no produce humo y es menos contaminante. El carbón de coque es un combustible muy importante para la fabricación del hierro y del acero.



**Figura 60. Coque de petróleo.**

### **Llanta triturada.**

El reciclaje de las llantas es uno de los problemas de primer orden para el ambiente.

Hoy en día, la industria del renovado ha logrado tener avances significativos en el proceso de reciclaje de los neumáticos, logrando excelentes compuestos de hule que consiguen el mayor aprovechamiento de la carcasa o casco.

En algunas zonas en el noroeste de México, como Ensenada BC, Rosarito y algunas partes de Estados Unidos, lo utilizan en el asfalto, para el sobreencarpetado del pavimento.

Para la industria del cemento, la llanta representa un combustible complementario (15%) con respecto al principal que es el coque, cuya mezcla permite reducir su consumo y representa ahorros significativos para este sector.

### **Consumo de combustibles en el modelo de simulación del proceso de calcinación del cemento.**

Para explicar la forma en que el Modelo de Simulación determina las cantidades de combustible a utilizar, es necesario conocer el significado de algunos conceptos:

- **Reacción de combustión:** la reacción química exotérmica de una sustancia (o una mezcla de ellas) denominada **combustible**, con el oxígeno. Como consecuencia de la reacción de combustión se tiene la formación de una llama.
- **Comburente:** La combustión puede llevarse a cabo directamente con el oxígeno o con una mezcla de sustancias que contengan oxígeno. Esta mezcla de sustancias que contiene oxígeno se denomina comburente. El aire es el comburente más usual.
- **Poder calorífico:** El poder calorífico de un combustible es la cantidad de energía desprendida en la reacción de combustión, referida a la unidad de masa de combustible.

Los combustibles se clasifican teniendo en cuenta su estado de agregación en sólidos, líquidos y gaseosos. Un ejemplo de combustible sólido es el carbón o la madera. Un ejemplo de combustible líquido es el gasóleo, y de combustibles gaseosos, el propano y el gas natural.

Si se supone (caso más común) que la combustión se realiza con aire, la reacción química que se debe plantear es la del proceso por el cual el combustible reacciona con el aire para formar los productos correspondientes, es decir,



Como se indicó anteriormente, la combustión es una reacción de oxidación exotérmica. Esto significa que durante la reacción se libera calor.

La reacción química entre el combustible y el oxígeno origina sustancias gaseosas. Los productos más comunes son **CO<sub>2</sub>** y **H<sub>2</sub>O**. A los productos de una reacción de combustión se los denomina, en forma genérica, humos.

Dentro del proceso de calcinación de la harina cruda para obtener clinker, debemos considerar el poder calorífico que desprenden los combustibles por unidad de masa empleada. Ya se mencionó que los combustibles utilizados son el coque de petróleo en greña y llantas trituradas. La siguiente tabla resume los conceptos relacionados con los combustibles y el clinker:

COMBUSTIBLE	PODER CALORÍFICO	PROPORCIÓN EN MEZCLA	CALOR DE CONSUMO DEL CLINKER	COMBUSTIBLE POR TONELADA DE CLINKER
<b>Coque de petróleo</b>	8,300 Kcal/Kg	85%	750 Kcal/ Kg Clinker	76.807 Kg
<b>Llanta triturada</b>	7,500 Kcal/Kg	15%		15 Kg

Tabla 27. Consumo de Combustibles.

No debemos olvidar el papel que desempeña el oxígeno y la cantidad que debe ser suministrada para que la combustión se lleve a cabo, por lo que:

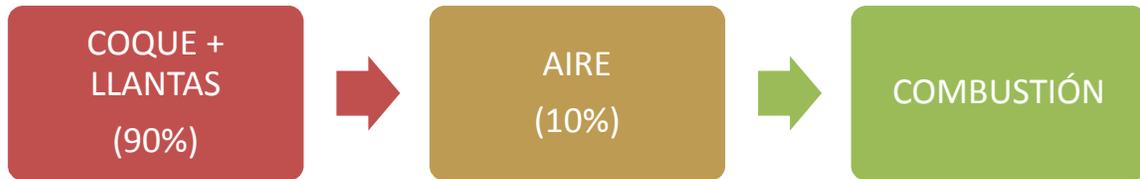


Figura 61. Mezcla de combustibles.

Basados en la literatura técnica se determina que la cantidad de masa entrante a nuestro sistema para realizar la combustión en el dispositivo llamado quemador, está integrada en un 90% por combustibles (coque+llantas) y el 10% restante por aire (oxígeno+nitrógeno)

Por lo anterior, la siguiente tabla resume las proporciones empleadas por el modelo de simulación para el cálculo en el consumo de combustibles:

	COMBUSTIBLES Y COMBURENTES	PROPORCIÓN MATERIAL ENTRANTE	PROPORCIÓN EN MEZCLA	PROPORCIÓN RELATIVA	COMBUSTIBLE POR TONELADA DE CLINKER
COMBUSTIBLE	Coque de petróleo	90%	85%	76.5%	76.80 Kg
	Llanta triturada		15%	13.5%	15 Kg
COMBURENTE	Oxígeno	10%	40%	4%	3.27 Kg
	Nitrógeno		60%	6%	4.91 Kg

Tabla 28. Proporciones de combustibles.

Después de estimar la cantidad de combustible y comburente que se requiere para convertir Harina Cruda en **una tonelada de clinker**, procedemos a calcular la cantidad de combustible y comburente que necesita el horno para trabajar correctamente con el flujo másico que se desplaza en su interior en un periodo de **un día de producción**:

		<b>COMBUSTIBLE POR TONELADA DE CLINKER</b>	<b>PRODUCCIÓN CLINKER POR HORA</b>	<b>PRODUCCIÓN CLINKER POR DÍA</b>	<b>COMBUSTIBLE POR DÍA DE PRODUCCIÓN</b>
<b>COMBUSTIBLE</b>	Coque de petróleo	76.80 Kg	159.6 Tons	3,830.4 Tons	294.17 Tons
	Llanta triturada	15 Kg			57.45 Tons
<b>COMBURENTE</b>	Oxígeno	3.27 Kg			12.52 Tons
	Nitrógeno	4.91 Kg			18.80 Tons

**Tabla 29. Consumo de combustible en un día de producción de clinker.**

Enseguida calculamos el costo del combustible por día de producción de clinker: (Fuente: Cooperativa La Cruz Azul S.C.L.)

		<b>COSTO POR TONELADA</b>	<b>COMBUSTIBLE POR DÍA DE PRODUCCIÓN</b>	<b>COSTO TOTAL COMBUSTIBLE POR DÍA</b>
<b>COMBUSTIBLE</b>	Coque de petróleo	\$1,800 MXN	294.17 Tons	\$529,506 MXN
	Llanta triturada	\$700 MXN	57.45 Tons	\$40,215 MXN
				<b>\$569,721</b>

**Tabla 30. Costo de combustibles.**

Hemos explicado el camino lógico que el modelo emplea para simular y calcular la alimentación de coque, llanta triturada, oxígeno y nitrógeno necesarios para generar el calor mínimo necesario que el horno requiere para convertir la harina cruda alimentada en clinker que fluye en promedio a una tasa aproximada de 159.6 toneladas por hora.

Simulación del proceso de calcinación del cemento.

**D) Cuadro comparativo de Software para Simulación.**

A continuación se presenta un cuadro comparativo de Software de Simulación de mayor impacto en el mercado, se evalúan aspectos como Aplicaciones típicas, Mercados primarios para los que aplica, Hardware, Precio, Herramientas adicionales, etc.

	Software	Vendedor	Aplicaciones típicas del software	Mercados primarios para los que aplica	RAM	Sistema Operativo	Precio versión Estándar (Dólares)	Precio versión Estudiante (Dólares)	Ajuste de datos de entrada (Distribución)	Soporte para el análisis de las salidas	Ejecución predeterminada o por diseño experimental	Nuevas características principales	Comentarios del proveedor
1	<b>@RISK</b>	Palisade Corporation	Análisis de hojas de cálculo de Microsoft Excel mediante la simulación de Monte Carlo	Finanzas; Seguro; Petróleo, Gas, energía; Productos farmacéuticos; Fabricación		Windows	\$1495 Professional Edition (incluye RISKOptimizer)	\$50	Pruebas de bondad de ajuste Komogorov-Smirnov y Anderson-Darling; distribuciones acumuladas y discretas	Amplia gama de estadísticas sobre los resultados de la simulación, datos y gráficos		Nueva interfaz; gráficos nuevos; nuevas funciones; simulaciones mucho más rápidas. Ver <a href="http://www.palisade.com/risk">www.palisade.com/risk</a>	
2	<b>@RISK 5.5</b>	Palisade Corporation	@ RISK realiza análisis de riesgos mediante la simulación Monte Carlo para mostrar muchos posibles resultados en Excel	Finanzas y banca, servicios públicos, fabricación, seguros y reaseguros, seis sigma en la salud, académico	512	Windows XP, Vista	@ RISK 5.5 incluye un año libre de mantenimiento estándar, \$1,195	\$50	Más de 40 funciones de distribución integrada	Gráficos de presentación-calidad totalmente personalizables		@ RISK 5.5 ha sido totalmente traducida en español, alemán, francés, portugués y japonés.	Versiones de prueba gratuitas en <a href="http://www.palisade.com">http://www.palisade.com</a>
3	<b>Analytica 4.2</b>	Lumina Decision Systems, Inc	Inversión, riesgo, decisión, análisis de flujo de red de cartera; dinámica de sistemas; recursos, R & D, planificación; simulación de organización	Empresarial, financiera, política pública, energía, medio ambiente, salud, defensa, fabricación, educación, telecomunicaciones	128	Windows 98, 2000, NT, XP, MP, Vista	\$1,295 Professional, \$2,495 para empresa	Aproximadamente la mitad del precio comercial	Biblioteca única para una gran variedad de distribuciones.	Análisis de sensibilidad e incertidumbre		Disponibilidad de licencias y licencia centralizada, las ediciones de 64 bits actualiza las bibliotecas y los módulos vinculados.	
4	<b>AnyLogic</b>	XJ Technologies	Herramienta de simulación de propósito general flexible. Modelado de evento y dinámica de sistemas discretos.	Suministro de atención médica, logística, cadenas, fabricación, defensa, productos farmacéuticos, marketing, finanzas, energía, educación	2 GB	MS Windows Vista o XP, Apple Mac OS, Linux	Edición avanzada: 6.200 dólares, edición profesional: 15.800 dólares por asiento, descuento en volúmenes	Licencia educativa: de 850 dólares, licencia de investigador de la Universidad: 3.500 dólares	Stat::Fit	Estadísticas de DataSet, distribuciones, histogramas regulares y 2D, varios gráficos, etc..	Simulación, optimización, variación de parámetro, comparaciones, Monte Carlo, análisis de sensibilidad, calibración, experimento personalizado.	Plantillas para agente basado y otros métodos, biblioteca de patto de ferrocarril, dinámica peatonal de modelado, animación 3D (2009)	Herramienta muy flexible, el único apoyo a varios métodos de modelado (abrir a nivel de Java)
5	<b>Arena Simulation Software</b>	Rockwell Automation	Una herramienta de software fácil de usar probada de propósito general DES. Los límites sólo están en la capacidad para describir el proceso.	Fabricación, seis sigma, embalaje, cadena logística de suministro, salud, militares/defensa, servicio, centros de contacto, etc..	1GB	Windows Vista (SP1 o una versión posterior, de 32 bits), Windows Server 2003 Standard Edition R2 (SP2 o versión posterior, de 32 bits), Windows XP Professional (SP2 o posterior), o Windows XP Home (Service Pack 2 o posterior).	Póngase en contacto con nosotros para precios. Versiones y funcionalidad disponible para satisfacer necesidades.	Versión de estudiante incluida en la simulación con el libro de Arena o la versión de evaluación.	Input Analyzer, Chi y (para datos no enteros) pruebas de bondad de ajuste de Kolmogorov-Smirnov	Herramienta Analyzer, resumen de resultados, capacidad para exportar datos a otras fuentes de salida.	Escenarios pueden definirse para experimentar en los parámetros.	Facilidad de uso de funciones así como ingresar los datos en un modelo, colección de estadísticas periódicas, ejemplo conceptual de modelos avanzados.	Probado, flexible y fácil de aprender. Metodología de flowcharting para construir modelos sin tener que escribir código.
6	<b>Blues Simulation System (Bluesss)</b>	Stanislaw Raczynski	De propósito general, modelos discretos y continuos.	Educación, investigación		Windows XP, Vista	US\$ 99			Análisis de varianza de post mortem	Simulación repetitiva		Necesidades de C++ Builder de Borland. Genera código fuente en Bluesss y C++.
7	<b>Clinical Trials Simulator</b>	ProModel Corporation	Análisis automatizado de simulación y optimización matemática de múltiples sitios de ensayo clínico y escenarios de reclutamiento de pacientes	Ensayos clínicos farmacéuticos	1GB min; Recomendada 2 GB	Windows XP, Vista, Windows 7	Precios personalizados	N/A	Distribuciones definidas por el usuario, 15 distribuciones predefinidas, además de conexión de distribución mediante software de Stat::Fit (adicional)	Informe de análisis de salida y los gráficos incluidos.	Escenarios ilimitados predefinidos para experimentar parámetros	Nuevo producto	Soluciones de ProModel Corp VAO de simulador de ensayos clínicos (herramientas, analizador, optimizar)
8	<b>CSIM for Java</b>	Mesquite Software, Inc.	Modelos de procesos y sistemas de procesos	Educación	depende de modelo	Cualquier sistema con Java	Licencia académica \$1,195	preguntar					Los programadores de Java parece ser una bienvenida a su kit de herramientas de modelado
9	<b>CSIM20</b>	Mesquite Software, Inc.	Modelado de sistemas grandes y complejos	Sistemas informáticos, redes, educación	depende de modelo	Mac OSx de Solairs96, Solaris, Windows, Linux.	\$1,195 por asiento.	\$65				Soporte para plataformas de 64 bits, mejorar las estadísticas	CSIM20 controla modelos de sistemas grandes y complejos con ejecución eficiente; los modelos son programas de C++.
10	<b>DecisionTools Suite</b>	Palisade Corporation	Análisis integrado de riesgo, decisión y datos en Excel combina la simulación de Monte Carlo, árboles de decisión y optimización.	Finanzas; seguro; petróleo, gas, energía; productos farmacéuticos; fabricación; seis sigma		Windows	Edición profesional de \$2295; \$2995 Industrial incluyendo RISKOptimizer y mayor capacidad	\$50	Komogorov-Smirnov y pruebas de bondad de ajuste de Anderson-Darling; distribuciones continuas y discretas	Amplia variedad de gráficos, datos e informes de análisis de optimización, simulación y árboles de decisión		Gráficos nuevos; nuevas interfaces; nuevas funciones; simulaciones más rápidas; convenciones de interfaz común a través de productos	

Simulación del proceso de calcinación del cemento.

	Software	Vendedor	Aplicaciones típicas del software	Mercados primarios para los que aplica	RAM	Sistema Operativo	Precio versión Estándar (Dólares)	Precio versión Estudiante (Dólares)	Ajuste de datos de entrada (Distribución)	Soporte para el análisis de las salidas	Ejecución predeterminada o por diseño experimental	Nuevas características principales	Comentarios del proveedor
11	<b>Emergency Department Simulator</b>	ProModel Corporation	Rendimiento del Departamento de emergencia, personal, flujo de paciente y análisis de la eficiencia.	Mejora del rendimiento de urgencias	128 MB min, se recomiendan 512 MB	Windows 2000, XP	39000	N/A	Distribuciones definidas por el usuario. 15 predefinidos con conexión de distribución mediante Stat::Fit o Software de analizador de datos (adicionales)	Tablas y gráficos, como LOS, censo por el estado del paciente y la hora del día y más de salida de datos específicos de ED personalizados	DOE completa a través de escenarios limitados y examen de los datos de salida	Ninguno	Soluciones de tecnología de ED simulador VAO (herramientas, analizar, optimizar) de ProModel Corp
12	<b>Enterprise Portfolio Simulator</b>	ProModel Corporation	Análisis de simulación basada en Web de múltiples planes de proyecto/producto simultáneo a través de una o varias carteras de proyectos.	Proyecto y la cartera de planificación, capacidad estratégica de recursos de planificación; desarrollo de nuevos productos, la investigación y el desarrollo, programación.	2 GB min; se recomienda 4 GB	Servidor: Windows Server 2003, 2008 para cliente: Mac o PC.	Precios personalizados	N/A	15 predefinidas distribuciones, además de conexión de distribución mediante software de Stat::Fit (adicional)	Informes de análisis de salida y los gráficos incluidos. Salida a Excel	Escenarios ilimitados para experimentar en parámetros	Nuevo producto-navegador que se ejecuta en Microsoft Silverlight; integra actualizaciones automáticas con MS Project Server	Soluciones de ProModel Corp se ejecuta en Microsoft VAO (herramientas, analizar, optimizar) tecnología, conduce a mejores decisiones y más rápido.
13	<b>ExtendSim AT</b>	Imagine That Inc.	Funcionalidad para los fabricantes que operan en un entorno de modo mixto de modelado basado en la tasa: proceso y eventos discretos por lotes.	Cualquier industria que opera en un escenario de alta velocidad o de gran volumen: líneas de empaque, procesos químicos, red de tráfico, etc..	512 MB	Windows Vista, XP, 2000, 2003 Server o mejor; Macintosh OS X 10.4 o mejor	\$2495; descuentos académicos están disponibles	descarga de 100 dólares de la tienda de ExtendSim; descuentos disponibles para estudiantes	Stat::FIT de Geer Mountain Software se incluye en este paquete	Intervalos de confianza se calculan en el clic de un botón.	Se admite la ejecución automática de diferentes escenarios.	Base de datos integrada, incorporado LP extendido, revisa y actualiza los componentes: mousing, arreglos de discos de conector variable, más escalables, etc.	ExtendSim en cuenta con amplia funcionalidad que admite el modelo a través de eventos discretos y modos de proceso por lotes.
14	<b>ExtendSim OR</b>	Imagine That Inc.	Arquitectura basada en mensajes de eventos discretos al modelo de procesos de objetos físicos o lógicos que a través de sistemas.	Fabricación y modelado; del negocio sistemas de comunicación, salud, seis sigma, transporte, servicios, educación, etc..	512 MB	Windows Vista, XP, 2000, 2003 Server o mejor; Macintosh OS X 10.4 o mejor	\$1,795; descuentos académicos disponibles	descarga de 100 dólares de la tienda de ExtendSim; descuentos disponibles para estudiantes	Stat::Fit se incluye en ExtendSimen y ExtendSim Suite.	Intervalos de confianza se calculan en el clic de un botón.	Se admite la ejecución automática de diferentes escenarios.	Base de datos integrada, modelado de componentes físicos o lógicos cuando arreglos de discos de conector variable, calendario integrado con control de fechas.	Pistas y analiza el comportamiento de entidades físicas o lógicas cuando eventos hacen cambiar estado moverse a través de un sistema.
15	<b>ExtendSim Suite</b>	Imagine That Inc.	Modelado 3D profesional de evento continuo, discreto y procesos de tipo discreto.	Cuando cuentan con impresionantes presentaciones. Modelado 3D de manufactura, logística, negocios, Gobierno, educación, ingeniería.	512 MB	Windows Vista, XP, 2000, 2003 Server o mejor; Macintosh OS X 10.4 o mejor	\$4,995; descuentos académicos disponibles.	descarga de 100 dólares de la tienda de ExtendSim; descuentos disponibles para estudiantes	Stat::FIT de Geer Mountain Software se incluye en este paquete	Intervalos de confianza se calculan con un clic de un botón.	Se admite la ejecución automática de diferentes escenarios.	Entorno 3D realista para la visualización de tiempo real, base de datos integrada, escalabilidad, incorporado LP existente +.	ExtendSim Suite incluye una capacidad de animación 3D de generación siguiente que proporciona una representación tridimensional.
16	<b>Flexsim</b>	Flexsim Software Products, Inc.	Mejora de procesos, optimización de procesos, justificación de la inversión de capital, implementaciones magras	fabricación, almacenaje, distribución, cadena de suministro y minería	256 MB	Windows Vista, Windows XP	\$15,000 - \$20,000	\$100	ExpertFit	Gráficos de Flexsim	Flexsim DOE	Descargar la versión de evaluación de Flexsim, selección "Ayuda" en el menú principal, entonces "Manual del usuario" y, a continuación, "What's New"	Fácil de aprender y construir modelos 3D real.
17	<b>Flexsim CT</b>	Flexsim Software Products, Inc.	Contenedor de aplicaciones terminal, estrategias de segregación, apilamiento de patio, asignación de grúas de muelle de envío, distribución.	Terminales de contenedores	256 MB		\$45,000 - \$65,000	\$100		Gráficos de Flexsim	Flexsim DOE	Completa biblioteca de objetos de construcción de modelos de recursos terminal de contenedores de modelo	Flexsim HC es el simulador sólo comercial diseñado específicamente para administradores e ingenieros para terminales de contenedores de modelo
18	<b>Flexsim HC</b>	Flexsim Software Products, Inc.	Hospital ER y aplicaciones de flujo de cuidado de la salud/paciente relacionados	Servicios de salud, salas de emergencia, flujo de paciente, servicios al paciente, laboratorio, personal de equilibrio	256 MB	Windows Vista, Windows XP	\$15,000 - \$20,000	\$100	ExpertFit	Flexsim listas, paneles de Flexsim	Flexsim HC DOE	Completley nuevo simulación producto de software creado específicamente y únicamente a los procesos de flujo de pacientes de cuidado de la salud de modelo	Paciente Track ♦ es la clave para que el fomento de la salud modelado tanto easy hacer y muy realista y precisa.
19	<b>ForeTell-DSS</b>	DecisionPath, Inc.	Prueba las decisiones por ejemplo, gestión de los riesgos de las amenazas terroristas, org.change, estrategia competitiva, mktg, transacciones de fusiones y adquisiciones.	Gobierno (por ejemplo, patria, DOD, sector civil política de seguridad), Ciencias de la vida, servicios financieros	512 MB	Windows, Mac OS, Linux (escrito en Java)	varia según la solución		distribuciones estadísticas, ajuste de curvas (trozos lineal, polinomio)	informes de resumen, gráficos parcelas (series temporales, freq, histogramas, parcelas de araña) extensibles	Monte Carlo front-end	Herramientas de desarrollo de CCA rápidas ahora integradas directamente con RDBMS para acelerar el desarrollo de soluciones personalizadas	Por lo general trabajamos con clientes para desarrollar modelos y soluciones de decisión personalizadas que despliegue a los usuarios de analista
20	<b>GoldSim</b>	GoldSim Technology Group	Análisis de riesgos de ingeniería de análisis de riesgos, incluyendo la administración de recursos de agua, minería, gestión de residuos y misión aeroespacial	Gestión de residuos radiactivos, consultoría de ingeniería de minería, energía, recursos hídricos, aeroespacial y defensa.	512 MB	Windows XP, 2003 celebra, Vista, 7	\$3,950	libre		análisis de sensibilidad e incertidumbre	Motor de Monte Carlo, herramientas de análisis de sensibilidad	Soporte de 64 bits, nuevos controles de panel, mejor ingeniería de confiabilidad y análisis de riesgo, mejorado distribuyen procesamiento	Híbrido que combina la dinámica de sistemas con aspectos de simulación de eventos discretos, incrustado en un marco de Monte Carlo

Simulación del proceso de calcinación del cemento.

	Software	Vendedor	Aplicaciones típicas del software	Mercados primarios para los que aplica	RAM	Sistema Operativo	Precio versión Estándar (Dólares)	Precio versión Estudiante (Dólares)	Ajuste de datos de entrada (Distribución)	Soporte para el análisis de las salidas	Ejecución predeterminada o por diseño experimental	Nuevas características principales	Comentarios del proveedor
21	<b>Integrated Performance Modelling Environment (IPME)</b>	Alion Science and Technology MA&D Operation	Rendimiento humano modelado, dotación de análisis, evaluación de la carga de trabajo humano, diseño de producto	Gobierno, defensa, industria, dotación de personal	512 MB	Mandrake 10 X, RedHat Enterprise, Windows 2000, Windows XP	\$12,000	\$75		Gráficos de resultados numéricos, análisis estadístico, presentación gráfica de la ejecución del modelo.	Diseño experimental	ninguno	
22	<b>LABSAG (Spanish &amp; Portuguese)</b>	Michelsen Consulting Ltd	Simulaciones siguiendo el modelo de diez empresas finanzas, producción, comercialización de B2B, Logística, hospitales, Hoteles, minas, Asamblea	De grado y postgrado en administración de empresas, gestión, ingeniería industrial, contabilidad, economía	1M	Windows XP	\$ 25,000, licencia de tres años, un número limitado de usuarios, incluye página Web			chat en línea	las decisiones son procesadas quincenal o semanalmente.	copias de seguridad automáticas, gráficos nuevos.	Siete simulaciones funcionalmente especializadas, tres simulaciones generales.
23	<b>LABAMS (English)</b>												
24	<b>MedModel Optimization Suite</b>	ProModel Corporation	Diseñar, planificar, evaluar y mejorar los procesos de hospitales, clínicas y otros sistemas de atención sanitaria para rendimiento de optimize	Hospitales, clínicas, sistemas de asistencia sanitaria, fabricación de dispositivos médicos y ventas	512 MB min; Recomendando 2 GB	Windows XP, Vista, Windows 7	\$8500	\$30	Distribuciones definidas por el usuario, 15 predefinidos distribuciones, además de conexión de distribución mediante Stat:Fit software incluido	Informes de análisis de salida y los gráficos incluidos. También salidas a Excel y Access para el análisis.	Escenarios ilimitados pueden predefinidos para experimentar en parámetros	Independiente modelo áreas separadas de un modelo más amplio y reunidos para simulación general. Conectividad de Minitab	Soluciones de MedModel VAO (herramientas, análisis, optimización) tecnología, conducir a mejores decisiones.
25	<b>Micro Saint Sharp</b>	Alion Science and Technology, MA&D Operation	modelado de rendimiento humano, fabricación, servicios de salud, industria de servicio militares, reingeniería, cadenas de suministro de procesos de negocios	rendimiento humano de modelado, fabricación, servicios de salud, las cadenas de suministro	256 MB	Microsoft Windows Server 2003, Windows Server 2008, Windows XP, Vista (sistemas operativos deben admitir la Microsoft.NET Framework 3.5)	Hay dos versiones de Micro Saint Sharp disponibles para los usuarios comerciales: plata y oro.	\$60 para una versión estudiante.		Sharp micro Saint recopila automáticamente datos que necesita para procesar. Automáticamente se recogen datos sobre utilización, colas, recursos y tareas. Los usuarios pueden personalizar la recopilación de datos para ver cualquier resultado.	Los usuarios pueden especificar una ejecución por lotes o pueden utilizar la función de experimento para definir diferentes condiciones experimentales y el número de repeticiones.	Animación 3D, tipos de objeto personalizados, módulo de comunicaciones, visio importación/exportación, exportación de versión de tiempo de ejecución, definición de experimento	Sharp micro Saint tiene la potencia, la flexibilidad, la velocidad y la interoperabilidad para satisfacer cualquier necesidad de simulación.
26	<b>Portfolio Simulator</b>	ProModel Corporation	Análisis de simulación y optimización de múltiples planes de proyecto/producto simultánea a través de una o varias carteras de proyectos	Proyecto y la cartera de planificación, capacidad estratégica de recursos de planificación; Desarrollo de nuevos productos, la investigación y el desarrollo, programación	1GB min; se recomiendan 4 GB	Windows XP, Vista, 7	39000	N/A	15 predefinidos distribuciones, además de conexión de distribución mediante software de Stat:Fit (adicional)	Informes de análisis de salida y los gráficos incluidos. Salida a MS Excel	Escenarios ilimitados pueden predefinidos para experimentar en parámetros	Optimización, la importación directa de Excel y Microsoft Project Server	Soluciones de tecnología de cartera simulador VAO (herramientas, analizar, optimizar) de ProModel Corp, conducir a mejor decisio
27	<b>Process Simulator</b>	ProModel Corporation	Lean, SixSigma, valor asignación de secuencia, asignación de proceso, simulación de diagrama de flujo, mejora continua del proceso	Todos	512 MB min; Recomendando 2 GB	Windows XP, Vista, Windows 7; También necesita MS Visio 2003 o 2007 o 2010	3500	PCS Lite - descarga gratuita	15 predefinidas distribuciones, además de conexión de distribución mediante software de Stat:Fit (adicional)	Informes de análisis de salida y los gráficos incluidos. También salidas a Excel y Access para el análisis. Además, información sobre el modelo es exportable a Excel para modificar e importarla en Process Simulator	Escenarios ilimitados pueden predefinidos para experimentar en parámetros	Mostrar directamente resultados simulados mediante gráficos de datos en el diagrama: Exportar y modificar datos en Excel, importar, integración de Minitab	Soluciones de tecnología de proceso simulador VAO (herramientas, analizar, optimizar) de ProModel Corp, conducir a mejores decisiones
28	<b>Project Simulator</b>	ProModel Corporation	Permite que los gerentes de proyecto predecir con mayor precisión los resultados de sus planes de proyecto	Cualquiera que utilice Microsoft Project	1GB min; Recomendando 2 GB	Windows XP, Vista, Windows 7; También necesita MS Project 2007, 2010	3500	Versión de prueba gratuita	15 predefinidos distribuciones, además de conexión de distribución mediante software de Stat:Fit (adicional)	Informes de análisis de salida y los gráficos incluidos. También salidas a MS Project para análisis.	Escenarios ilimitados pueden predefinidos para experimentar en parámetros	Interfaz de usuario, base de datos, motor de simulación más reciente, informes predefinidos, mejor validación de archivos de MS Project	Soluciones de tecnología de proyecto, simulador VAO (herramientas, analizar, optimizar) de ProModel Corp, conducir a mejores decisiones.
29	<b>ProModel Optimization Suite</b>	ProModel Corporation	Lean, SixSigma, capacidad de planificación, análisis de costos, proceso de modelado, reducción del tiempo de ciclo, optimización de rendimiento y más	Fabricación y logística, farmacéutica, defensa	512 MB min; Recomendando 2 GB	Windows XP, Vista, Windows 7	\$8500	\$30	Distribuciones definidas por el usuario, 15 distribuciones predefinidas, además de conexión de distribución mediante Stat:Fit software incluido	Informes de análisis de salida y los gráficos incluidos. También salidas a Excel y Access para el análisis.	Escenarios ilimitados pueden predefinidos para experimentar en parámetros	Independiente modelo áreas separadas de un modelo más amplio y reunidos para simulación general. Conectividad de Minitab	Soluciones de ProModel VAO (herramientas, analizar, optimizar) tecnología, conducir a mejores decisiones - más rápidas
30	<b>Proof 3D</b>	Wolverine Software Corporation	Proporciona capacidades de animación 3D para su uso en la simulación de eventos discretos	Control del tráfico aéreo, transporte, fabricación		Windows XP/Vista/7	2500	Libre				Prueba 3D es la actualización al software de prueba de animación 2D Wolverine 3D	

Simulación del proceso de calcinación del cemento.

	Software	Vendedor	Aplicaciones típicas del software	Mercados primarios para los que aplica	RAM	Sistema Operativo	Precio versión Estándar (Dólares)	Precio versión Estudiante (Dólares)	Ajuste de datos de entrada (Distribución)	Soporte para el análisis de las salidas	Ejecución predeterminada o por diseño experimental	Nuevas características principales	Comentarios del proveedor
31	<b>Proof 5</b>	Wolverine Software Corporation	Proporciona capacidades de animación 2D para su uso en la simulación de eventos discretos	Control del tráfico aéreo, transporte, fabricación		Windows XP/Vista/7	1750	Libre				Prueba 5 es la última versión del software de prueba de animación 2D Wolverine	
32	<b>PSM++</b>	Stanislaw Raczynski	De propósito general discrete y modelos continuos	Educación, los usuarios de Delphi		Windows XP, Vista	US\$ 90			Variación e intervalos de confianza	Algunos módulos PSM permiten corridas repetitivas para un análisis de varianza		
33	<b>QMS</b>	QuantMethods	Herramienta Pedagógica para la enseñanza de métodos cuantitativos, incluida la simulación	Educación superior	N/A	N/A - acceso de navegador	licencia de \$19.95 por asiento para acceso de 6 meses	licencia de \$19.95 por asiento para acceso de 6 meses	Constante, uniforme, Normal, Poisson, negativo exponencial y discreto	Análisis de sensibilidad completa			
34	<b>REACT</b>	MJC2	Programación en tiempo real y simulación	Todos grandes operaciones de logística y transporte.	varía	Windows, UNIX y Linux	POA	POA	Configurable	Configurable	Configurable		Potente solución flexible para redes complejas
35	<b>Renque</b>	Renque Corporation	Software de simulación de eventos discretos de propósito general	Transporte, comunicaciones, ingeniería y diseño, elaboración de modelos de negocio		Microsoft Windows Vista, Microsoft Windows XP, Microsoft Windows 2000	Euro 885	N/A			Microsoft Excel		Plantillas, Excel 2007, extendida exportación de datos, Variable y atributo de muestreo y gráficos
36	<b>Risk Solver</b>	Frontline Systems Inc.	Análisis y simulación de Monte Carlo, presupuestación de riesgos	Académico, petróleo y Gas, productos farmacéuticos, seguro	2 GB	Windows Vista o XP	US\$ 995 + apoyo anual de \$200	\$50 o menos - www.solver.com/ver	Conexión a decenas de distribuciones continuas y discretas	Gráficos - PDF, CDF, Tomado, Scatterplots, 30 medidas estadísticas y riesgo		Introducido en 2007: Ultra-rápido, probabilidad gestión SP/DISTs, parametrizadas simulaciones.	De los desarrolladores de Solver de Excel y Premium Solver: ampliable a riesgo Solver plataforma para una poderosa optimización estocástica.
37	<b>Risk Solver Platform</b>	Frontline Systems Inc.	Optimización convencional, optimización de simulación, simulación Monte Carlo, optimización robusta a programación estocástica.	Académico, empresarial general, petróleo y Gas, productos farmacéuticos, seguro, fabricación y distribución.	2 GB	Windows Vista o XP	\$3,330 + \$665 Soporte anual	\$50 o menos - www.solver.com/ver	Conexión a decenas de distribuciones continuas y discretas	PDF, CDF, Tomado, Scatterplots, 30 medidas estadísticas y riesgo		Introducido 2008: Todo en riesgo Solver y Premium Solver plataforma, más completa optimización estocástico y más	El más potente herramienta basada en Excel para simulación y optimización. Apoyo en las nuevas ediciones de libros de texto para la enseñanza de MBA.
38	<b>Risk Solver Premium</b>	Frontline Systems Inc.	El riesgo de análisis, simulación de Monte Carlo, optimización de simulación	Académico, petróleo y Gas, productos farmacéuticos, seguro, fabricación y distribución	2 GB	Windows Vista o XP	\$1,650 + Apoyo anual de \$345	\$50 o menos - www.solver.com/ver	Conexión a decenas de distribuciones continuas y discretas	PDF, CDF, Tomado, Scatterplots, 30 medidas estadísticas y riesgo		Introducido 2008: Todo en riesgo Solver, todo en Premium Solver, además de optimización de simulación	De los desarrolladores de Solver de Excel: comparar a mejores productos alternativos para la simulación de Monte Carlo y optimización de simulación
39	<b>ServiceModel Optimization Suite</b>	ProModel Corporation	Diseñar, planificar, evaluar y mejorar los sistemas de la industria de servicios, como servicios financieros, logística, reingeniería de negocios	Servicios financieros, logística, transporte, alimentos y servicios de Hotel, entretenimiento y otras industrias de servicios	512 MB min; Recomiendan 2 GB	Windows XP, Vista, Windows 7	18500	\$30	Distribuciones definidas por el usuario, 15 predefinidos distribuciones, además de conexión de distribución mediante Stat:Fit software incluido	Informes de análisis de salida y los gráficos incluidos. También salidas a Excel y Access para el análisis.	Escenarios predefinidos para experimentar parámetros	Modelo con áreas separadas de un modelo más amplio y unifies para simulación general. Conectividad de Minitab	Soluciones de ServiceModel VAC (herramientas, analizar, optimizar) conducir a mejores decisiones.
40	<b>ShowFlow</b>	Webb Systems Limited	fabricación; Logística; servicios financieros	fabricación - análisis de cuello de botella; Diseño, evaluación de equipos nuevos	1GB	Windows 2000; XP; Vista; 7	Manual de GBP 1095 inc y CD + gastos de envío y de IVA en su caso	Libre	Autoajustar a 16 distribuciones predefinidas	informes y gráficos; definida por el usuario exportar a Excel durante o después de la ejecución	tipos de experimento 4-analizar el modelo; optimizar; prueba de calentamiento; verificación de sensibilidad	Tipo de elemento adicional	Obtenga lo mejor de ShowFlow también disponibles más de 250 páginas, 30 libras Esterlinas
41	<b>Simcad Pro-Patented Dynamic Process Simulator</b>	CreateASoft, Inc	Proceso de mejora continua, diseño del fondo, RFID/Software optimización de procesos, Lean, justificación de gastos de capital	Soluciones de fabricación, soluciones en logística, herramientas de simulación en el cuidado de la salud.	256	Windows 2000 (XP/Vista). Se ejecutará en MAC con un Emulador. Para Windows se necesitan gráficos 3D, una aceleración de hardware ayudará a aumentar el rendimiento del sistema.	9450	Póngase en contacto con CreateASoft para descuentos de licencias educativas	Base de datos, csv, xls, etc.	Mapas de flujo de valor, Lean de diagrama de Gantt, análisis de escenarios, informes,	Diseño experimental: Interactúan dinámicamente con el modelo o a través de la optimización integrada. Corridas por lote: Monte Carlo se ejecuta y publica los resultados de la herramienta de análisis en escenario de Simcad integrado.	Procesador dinámico Optimizer, núcleos múltiples RFID/Software, Simcad en línea, asistentes de importación/exportación de Excel.	
42	<b>Simio</b>	Simio LLC	fabricación, servicios de salud, aeropuertos, militares, puertos, suministro de cadena, almacén, lean y seis sigma		2 MB	Windows XP, Windows Vista, Windows 7	Diseño edición Enterprise Edition \$13900	Laboratorio libre, estudiante personal versión \$50	Stat:: Fit y ExpertFit se venden por separado	Experimentación, intervalos de confianza, estadísticas.	Administración automatizada de escenario.	Demasiado numerosos para la lista, consulte el sitio Web para obtener más información.	Combina la velocidad de modelado de objetos con la flexibilidad de procesos.

Simulación del proceso de calcinación del cemento.

	Software	Vendedor	Aplicaciones típicas del software	Mercados primarios para los que aplica	RAM	Sistema Operativo	Precio versión Estándar (Dólares)	Precio versión Estudiante (Dólares)	Ajuste de datos de entrada (Distribución)	Soporte para el análisis de las salidas	Ejecución predeterminada o por diseño experimental	Nuevas características principales	Comentarios del proveedor
43	<b>SIMUL8 Professional</b>	SIMUL8 Corporation	Optimizar el rendimiento, maximizar la utilización de recursos, identificar cuellos de botella, las decisiones de reducción del riesgo, gestión de procesos empresariales	Procesos de negocios: llamar Centro, fabricación, cadena de suministro, logística, salud, finanzas, educación	256 MB	Todas las ediciones de Windows, incluido Windows 7 y Vista, Linux, Mac OS	4995	Libre con versión educativa	Stat::Fit	Proporciona todas las características estándar SIMUL8 resultados centralizados en bases de datos, escenario y comparación gráficas y capacidades de reporting.	Automatizado por lotes. Diseñar y ejecutar escenarios automáticamente con el administrador de escenarios. Se ejecuta simultáneamente en varios equipos con procesamiento en paralelo.	Ejecución 30% más rápido, SIMUL8 Manager con texto predictivo, matrices multidimensionales, gráficos personalizables de tiempo de ejecución.	SIMUL8 profesional extendió la facilidad de uso y potencia para vincular a cualquier origen de datos o aplicación con SQL y COM.
44	<b>SIMUL8 Standard</b>	SIMUL8 Corporation	Optimizar el rendimiento, maximizar la utilización de recursos, identificar cuellos de botella, decisiones para reducción del riesgo, gestión de procesos empresariales.	Procesos de negocios: Call Center, fabricación, cadena de suministro, logística, salud, finanzas, educación.	256 MB	Todas las ediciones de Windows, incluido Windows 7 y Vista, Linux, Mac OS	1,495	Libre con versión educativa	Stat::Fit	Cálculo automático de intervalo de confianza, resultados y gráficos para toda simulación. Exportación a aplicaciones externas de excel, V.I.S.A, Minitab y mucho más.	Automatización por lotes. Diseñar y ejecutar escenarios automáticamente con el administrador de escenarios. Ejecutar simultáneamente en varios equipos.		SIMUL8 es fácil de usar, potente y rápido, más rápido que cualquier otra herramienta en el mercado. Con soporte gratuito para ayudarle a comenzar.
45	<b>SIMUL8 Web</b>	SIMUL8 Corporation	Simulación en la web. Compartir los beneficios y la potencia de simulación con otros, sin instalación, sin curva de aprendizaje.	Procesos de negocios: Call Center, fabricación, cadena de suministro, logística, salud, finanzas, educación	Requisitos de navegador.	Todos los sistemas operativos.	Negociable, depende de la cantidad de usuarios.	Libre con versión educativa.	Stat::Fit	Intervalo de confianza automática requiere gráficos y resultados para todos los objetos de simulación.	Diseñar y ejecutar escenarios automáticamente con el administrador de escenarios.	SIMUL8 primero revolucionó el mercado en 1994, ahora lo estamos haciendo nuevamente con el lanzamiento de SIMUL8 en el web este año.	La sede en nuestro sitio Web, sitio Web o la red corporativa. Opción de animación o no. Ninguna instalación de cliente final.
46	<b>SLIM</b>	MJC2	Modelización estratégica, simulación y optimización.	Operaciones de logística y transporte.	varia	Windows, UNIX y Linux	POA	POA	Configurable	Configurable	Configurable		Potente solución flexible para redes complejas
47	<b>SLX</b>	Wolverine Software Corporation	Aplicaciones de high-end, únicas que requieren funciones no incorporadas en el software de simulación estándar	Control de tráfico, seguridad, telecomunicaciones, logística de aire		Windows XP/Vista/7	6000	Libre					Herencia, Interfaces de Java
48	<b>Stat::Fit</b>	Geer Mountain Software Corporation	Estadísticamente se ajusta a los datos de entrada para distribuciones analíticas y exporta en forma específica al software de simulación.	Simulación y modelado, riesgo de evaluación, fiabilidad, calidad, gestión de ingeniería y financiera.	4 MB	PC/ Windows	289	libre	distribuciones de 32. Capacidad de auto::FIT. Exportaciones en formas específicas para el software de simulación. Función de visor de distribución.				Visor de distribución permite la visualización interactiva de distribuciones. Generador de variable aleatoria incorporada.
49	<b>Tecnomatix Plant Simulation</b>	Siemens PLM Software	Software de simulación de planta de Tecnomatix permite la simulación y optimización de procesos y sistemas de producción.	Aeropuertos aerospacial automotriz y proveedor de consultoría casas CPG defensa MFO electrónico logística puertos astillero Whitegood	1GB	Windows XP, Windows Vista	pregunta directamente de proveedor	de libre	Módulo Datafit	Analizador de cuello de botella, Sankey gráfico, informe de resultado HTML, Diagrama de Gantt	Manager permite diseño experimental automático	Solución virtual de puesta en servicio, optimización y diseño de plantas, interfaz Team enter para la solución de administración del producto CIC	Real apertura de orientación a objetos, herencia, importación de SAP, Excel, los datos de Oracle, facilidad de uso a través de normas reales de Windows
50	<b>Vanguard Business Analytics Suite</b>	Vanguard Software	Modelado de colaboración, planificación estratégica, análisis de riesgos, previsión, administración de cartera, optimización, basada en la Web.	Consultoría (internos y externos), productos farmacéuticos, petróleo y gas, aerospacial, fabricación, comercialización, finanzas, académico.	128 MB	Windows 2000, XP, Vista	3495	50% de descuento académico. Donaciones posibles a través del programa de asociación académica de vanguardia.	Galería de distribución. Autoajustar, distribuciones definidas por el usuario, soporte SIP/SORBER	Estadísticas de simulación, análisis de sensibilidad, presentaciones gráficas. Se integra con Microsoft Office. Disponible como informes Web		Soporte SIP/SORBER de modelos e informes, colaborador de modelado, modelos Linkable, integración de sistemas, implementación basada en la web	Simulaciones escalable y de alto rendimiento con colaboración modelado, informatización en red, integración de sistemas, implementación basada en la web
51	<b>Vanguard Strategic Forecasting Suite</b>	Vanguard Software	Modelado de colaboración, planificación estratégica, análisis de riesgos, previsión, administración de cartera, optimización, basada en la Web si	Consultoría (internos y externos), productos farmacéuticos, petróleo y gas, aerospacial, fabricación, comercialización, financian, académico	128 MB	Windows 2000, XP, Vista	2495	50% de descuento académico. Donaciones posibles a través del programa de asociación académica de vanguardia.	Galería de distribución. Autoajustar asistente, distribuciones definidas por el usuario, soporte SIP/SORBER	Estadísticas de simulación, análisis de sensibilidad, presentaciones gráficas. Se integra con Microsoft Office. Disponible como informes Web	Lote y ejecutar interactivo	Modelos de computación, basada en la Web interactiva de cuadrícula e informes, colaborador de modelado, biblioteca: <a href="http://wiki.vanguardsw.com">http://wiki.vanguardsw.com</a>	Simulaciones escalables y de alto rendimiento con colaboración modelado, informatización en red, integración de sistemas, implementación basada en la web.
52	<b>Vanguard System</b>	Vanguard Software	Modelado de colaboración, planificación estratégica, análisis de riesgos, previsión, administración de cartera, optimización, basada en la Web.	Consultoría (internos y externos), productos farmacéuticos, petróleo y gas, aerospacial, fabricación, comercialización, finanzas, académicos.			Llame para obtener precios.	50% de descuento a académicos. Donaciones posibles a través del programa de asociación académica de vanguardia.	Galería de distribución. Autoajustar, distribuciones definidas por el usuario, soporte SIP/SORBER	Estadísticas de simulación, análisis de sensibilidad, presentaciones gráficas. Se integra con Microsoft Office. Disponible como informes Web		Implementación basada en la Web, licencias flotantes, modelado en colaboración, invariable de rama de optimización, SIP/SORBER.	Diseñado para el modelado de la empresa a gran escala. Es compatible con la colaboración de modelado, informes interactivos basados en web.
53	<b>WebGPSS</b>	Belber AB	Simulación de eventos discretos de propósito general de situaciones con incertidumbre, que requieren muchas comidas.	Educación, especialmente estudiantes de negocios, logística, sistemas de cadena de suministro	8 MB	Windows	700	Normal (150 bloques) \$ 40.00; extendido (400 bloques)\$90.00		Intervalos de confianza de distribución t de Student		Diagramas de bloques mejorado; manejo mejorado de matriz; libro de texto extendido.	Prende ser el mejor software de simulación para iniciar cursos de simulación, permite a los estudiantes a hacer proyectos reales de negocio.
54	<b>XLSim 3.0</b>	AnalyCoip	Pequeñas aplicaciones tradicionales de Monte Carlo y simulaciones interactivas basadas en DISTs.	Mercado general para los modelos de pequeñas simulaciones Monte Carlo.		Vista, XP, Requiere Excel 2003 o 2007 para Windows.	199.95			Simulación interactiva que permite el análisis de sensibilidad estocástica.		Simulación interactiva mediante cadenas de distribución DIST 1.0 (véase <a href="http://www.ProbilitTech.com">www.ProbilitTech.com</a> )	Una demostración de simulación interactiva con DISTs, visite <a href="http://www.ProbilitTech.com">www.ProbilitTech.com</a>

Tabla 31. Comparativo de software para Simulación.

## **REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

## Referencias bibliográficas.

- ✓ Flores de la Mota Idalia, Elizondo Cortés Mayra. **"Apuntes de Simulación"**. Facultad de Ingeniería UNAM. Año 2006.
- ✓ Piera Miguel Ángel, Guasch Antoni. **"Modelado y simulación. Aplicación a procesos logísticos de fabricación y servicios"**. Universidad Politécnica de Cataluña. Año 2002. España.
- ✓ Aguilar Barona Byrthzee Rubén. Tesis de Maestría: **"La Simulación de Sistemas en la mejora de procesos de manufactura y servicios"**. Facultad de Ingeniería UNAM. Año 2004.
- ✓ Barceló Jaime. **"Simulación de Sistemas Discretos"**. Primera Edición. Año 1996. Editorial Isdefe. Madrid España.
- ✓ García Dunna Eduardo, García Reyes Heriberto y Cárdenas Barrón Leopoldo. **"Simulación y análisis de sistemas con ProModel"**. Primera Edición. Editorial Prentice Hall, México 2006.
- ✓ Kelton David, Sadowski Randall y Sturrock David. **"Simulación con Software Arena"**. Cuarta edición. Editorial Mc Graw Hill. Año 2008.
- ✓ Rivett Patrick. **"Construcción de modelos para análisis de decisiones"**. Primera Edición. Año 1983. Editorial Limusa. México D.F.
- ✓ Deolalkar S P. **"Handbook for Designing Cement Plants"**. Año 2009. BS Publications.
- ✓ Ackoff Russell L., Sasieni Maurice W. **"Fundamentos de Investigación de Operaciones"** Sexta Edición. Año 1984. Editorial Limusa. México D.F.
- ✓ Bogue Robert H., **"The Chemistry of Portland Cement"**, Reinhold Publishing Co., New York (1947).
- ✓ Tobón Jorge Iván, López Fredy **"Replanteamiento de la Ecuaciones de Bogue en el cálculo mineralógico del**

**clinker para una cementera colombiana**", Universidad Nacional de Colombia, Medellín Año 2007.

- ✓ Taylor, Harold F.W. "**Cement Chemistry**" Academic Press Limited, London. Año 1990.
- ✓ Tokheim, Lars-André. Tesis de Doctorado: "**The Impact of staged combustion on the operation of a precalciner cement kiln**". Institute of Environmental Technology. Norway 1999.
- ✓ Naylor, H. Thomas; Burdick S. Donald. Artículo: "**Design of computer simulation experiments for Industrial Systems**". Duke University, Durham, North Carolina. 1966.

## **Páginas web consultadas.**

<http://canacem.org.mx/canacem.htm>

<http://www.cruzazul.com.mx>

<http://www.holcim.com.mx>

<http://www.ieca.es>

<http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/mcs/2011/mcs2011.pdf>

<http://www.investigacion-operaciones.com/Historia.htm>

<http://www.vaticgroup.com/unlimitpages.asp?id=81&pid=-1>

<http://www.flsmidth.com>

<http://orbita.starmedia.com/~arivera/lineal.htm>

<http://www.lionhrtpub.com/orms/surveys/Simulation/Simulation.html>

<http://www.scs.org/home>

<http://www.imcyc.com/normas/NMX-C-414-ONNCCE-2004.pdf>

[http://www.cement.org/tech/cct\\_cement\\_types.asp](http://www.cement.org/tech/cct_cement_types.asp)

<http://www.polysius.com/en/>

<http://wintersim.org/exhibits.htm>

<http://myweb.dal.ca/mawhite/3303/supplementals/cementpaper.pdf>

[http://www.material\\_simulacion.ucv.cl/definicion\\_de\\_la\\_simulacion\\_de\\_s1.htm](http://www.material_simulacion.ucv.cl/definicion_de_la_simulacion_de_s1.htm)

<http://www.avantsim.es/>

<http://www.simio.com/products/>

<http://www.construmatica.com/construpedia/Clinker>

<http://www.profesorenlinea.cl/Quimica/Estequiometria.html>

<http://www.deepdyve.com/lp/association-for-computing-machinery/design-of-computer-simulation-experiments-for-industrial-systems-XRLkePHaDo>