



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Química

**EVALUACIÓN DE LA CINÉTICA DE REACCIÓN DE CONVERSIÓN DE
PIEDRA CALIZA A CAL VIVA POR EFECTO DE TRES TEMPERATURAS,
UTILIZANDO UN TAMAÑO DE PARTÍCULA Y UN TIEMPO DETERMINADO
A 640 mm Hg DE PRESIÓN BAROMÉTRICA A NIVEL LABORATORIO**

Henry Estuardo Quiñónez Fernández

Asesorado por el Ing. Byron René Aguilar Uck

Guatemala, octubre de 2015

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**EVALUACIÓN DE LA CINÉTICA DE REACCIÓN DE CONVERSIÓN DE
PIEDRA CALIZA A CAL VIVA POR EFECTO DE TRES TEMPERATURAS,
UTILIZANDO UN TAMAÑO DE PARTÍCULA Y UN TIEMPO DETERMINADO
A 640 mm Hg DE PRESIÓN BAROMÉTRICA A NIVEL LABORATORIO**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

HENRY ESTUARDO QUIÑÓNEZ FERNÁNDEZ
ASESORADO POR EL ING. BYRON RENÉ AGUILAR UCK

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO QUÍMICO

GUATEMALA, OCTUBRE DE 2015

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL I	Ing. Angel Roberto Sic García
VOCAL II	Ing. Pablo Christian de León Rodríguez
VOCAL III	Inga. Elvia Miriam Ruballos Samayoa
VOCAL IV	Br. Raúl Eduardo Ticún Córdova
VOCAL V	Br. Henry Fernando Duarte García
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

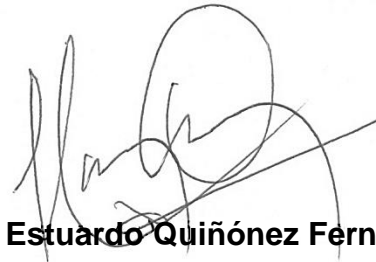
DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
EXAMINADOR	Ing. Manuel Gilberto Galván Estrada
EXAMINADOR	Ing. Víctor Manuel Monzón Valdez
EXAMINADOR	Ing. Gerardo Ordóñez
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

**EVALUACIÓN DE LA CINÉTICA DE REACCIÓN DE CONVERSIÓN DE
PIEDRA CALIZA A CAL VIVA POR EFECTO DE TRES TEMPERATURAS,
UTILIZANDO UN TAMAÑO DE PARTÍCULA Y UN TIEMPO DETERMINADO
A 640 mm Hg DE PRESIÓN BAROMÉTRICA A NIVEL LABORATORIO**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Química, con fecha 9 junio de 2014.



Henry Estuardo Quiñónez Fernández

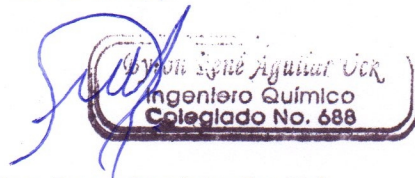
Guatemala, 14 Octubre de 2015

Ingeniero Víctor Monzón
Director de la Escuela de Ingeniería Química
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala
Ciudad de Guatemala

Estimado Ingeniero Monzón,

Por este medio le informe que he asesorado y revisado, como Asesor, el informe final del trabajo de tesis del estudiante Henry Estuardo Quiñonez Fernández, carne 89-16362, titulado **"EVALUACION DE LA CINETICA DE REACCION DE CONVERSION DE PIEDRA CALIZA A CAL VIVA POR EFECTO DE TRES TEMPERATURAS, UTILIZANDO UN TAMANO DE PARTICULA Y UN TIEMPO DETERMINADO A 640 mm Hg DE PRESION BAROMETRICA A NIVEL LABORATORIO"**, trabajo que considero satisfactorio y por tanto recomiendo su aprobación. Sin otro motivo en particular, me suscribo a usted,

Atentamente,



Byron René Aguilar Uck
Ingeniero Químico
Colegiado No. 688

Ing. Byron René Aguilar Uck

Colegiado 688

Guatemala, 15 de octubre de 2015.
Ref. EIQ.TG-IF.070.2015.

Ingeniero
Víctor Manuel Monzón Valdez
DIRECTOR
Escuela de Ingeniería Química
Facultad de Ingeniería

Estimado Ingeniero Monzón:

Como consta en el registro de evaluación del informe final EIQ-PRO-REG-007 correlativo **062-2014** le informo que reunidos los Miembros de la Terna nombrada por la Escuela de Ingeniería Química, se practicó la revisión del:

INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADUACIÓN

Solicitado por el estudiante universitario: **Henry Estuardo Quiñonez Fernández**.
Identificado con número de carné: **89-16362**.
Previo a optar al título de **INGENIERO QUÍMICO**.

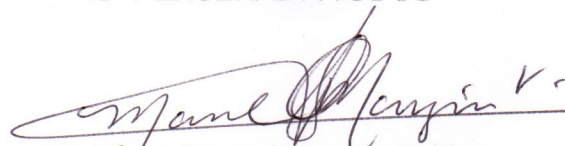
Siguiendo los procedimientos de revisión interna de la Escuela de Ingeniería Química, los Miembros de la Terna han procedido a **APROBARLO** con el siguiente título:

EVALUACIÓN DE LA CINÉTICA DE REACCIÓN DE CONVERSIÓN DE PIEDRA CALIZA A CAL VIVA POR EFECTO DE TRES TEMPERATURAS, UTILIZANDO UN TAMAÑO DE PARTÍCULA Y UN TIEMPO DETERMINADO A 640 mmHg DE PRESIÓN BAROMÉTRICA A NIVEL LABORATORIO

El Trabajo de Graduación ha sido asesorado por el Ingeniero Químico: **Byron René Aguilar Uck**.

Habiendo encontrado el referido informe final del trabajo de graduación **SATISFACTORIO**, se autoriza al estudiante, proceder con los trámites requeridos de acuerdo a las normas y procedimientos establecidos por la Facultad para su autorización e impresión.

"ID Y ENSEÑAD A TODOS"



Ing. Víctor Manuel Monzón Valdez
COORDINADOR DE TERNA
Tribunal de Revisión
Trabajo de Graduación



C.c.: archivo



Ref.EIQ.TG.149.2015

El Director de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor y de los Miembros del Tribunal nombrado por la Escuela de Ingeniería Química para revisar el Informe del Trabajo de Graduación del estudiante, **HENRY ESTUARDO QUIÑÓNEZ FERNÁNDEZ** titulado: "**EVALUACIÓN DE LA CINÉTICA DE REACCIÓN DE CONVERSIÓN DE PIEDRA CALIZA A CAL VIVA POR EFECTO DE TRES TEMPERATURAS, UTILIZANDO UN TAMAÑO DE PARTÍCULA Y UN TIEMPO DETERMINADO A 640 mm Hg DE PRESIÓN BAROMÉTRICA A NIVEL LABORATORIO**". Procede a la autorización del mismo, ya que reúne el rigor, la secuencia, la pertinencia y la coherencia metodológica requerida.

"Id y Enseñad a Todos"


Ing. Víctor Manuel Monzón Valdez
DIRECTOR
Escuela de Ingeniería Química



Guatemala, octubre 2015

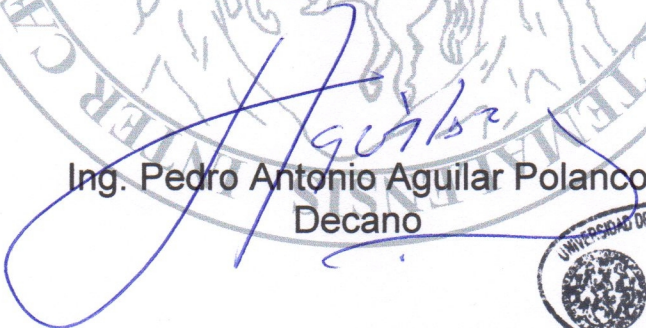
Cc: Archivo
VMMV/ale





El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Química, al trabajo de graduación titulado: **EVALUACIÓN DE LA CINÉTICA DE REACCIÓN DE CONVERSIÓN DE PIEDRA CALIZA A CAL VIVA POR EFECTO DE TRES TEMPERATURAS, UTILIZANDO UN TAMAÑO DE PARTÍCULA Y UN TIEMPO DETERMINADO A 640 mm Hg DE PRESIÓN BAROMÉTRICA A NIVEL LABORATORIO**, presentado por el estudiante universitario: **Henry Estuardo Quiñonez Fernández**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, se autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE


Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
Decano



Guatemala, octubre de 2015

ACTO QUE DEDICO A:

Dios	Por darme la oportunidad de cumplir una meta más.
Mis padres	Aura Cristina Fernández Mazariegos y Pedro Quiñónez Guzmán, por haberme concedido la oportunidad de estudiar.
Mis abuelos	Mariano Miguel Fernández y María Mercedes Mazariegos, como reconocimiento a su esfuerzo al compartirme su experiencia.
Mis tíos	Dr. Guillermo E., Ethel C. y Alba Gloria, por darme su apoyo moral y económico en el momento exacto que lo necesitaba.
Mis hermanos	Carlos Rene, Ing. Juan Pedro e Ing. Pablo David, para alcanzar lo que ustedes ya han logrado. (Nunca es tarde para concluir los pendientes).

AGRADECIMIENTOS A:

**Universidad de San
Carlos de Guatemala**

Tengo el orgullo de decir que esta es mi casa.

Facultad de Ingeniería

Recuerdo de días alegres y días largos estudiando en la biblioteca.

**Mis amigos de la
Facultad**

Son muchos para nombrar y tanto para quienes decididamente compartieron conmigo lo que aprendían en las clases y luego me ayudaban a entender, como con quienes aprendí también de la universidad de la vida. Recuerdo sonriente muchas historias.

Los amigos

Para quienes contribuyeron con sus palabras y acciones a concluir esta etapa de mi vida. Ustedes saben quienes son.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	III
LISTA DE SÍMBOLOS	V
GLOSARIO	VII
RESUMEN	IX
OBJETIVOS	XI
Hipótesis	XII
INTRODUCCIÓN	XV
1. ANTECEDENTES	1
2. MARCO TEÓRICO	5
2.1. Generalidades de la caliza y de la cal	5
2.2. Usos de la cal	6
2.2.1. En la industria de la construcción	6
2.2.2. En la industria del vidrio	7
2.2.3. En la industria metalúrgica	7
2.2.4. En la industria química	8
2.2.5. En la protección del medio ambiente	8
2.2.6. Otros usos de la cal	9
2.3. La descomposición de la caliza	9
3. DISEÑO METODOLÓGICO	13
3.1. Variables	13
3.1.1. Variables independientes	13
3.1.2. Variables dependientes y respuesta	13

3.1.3.	Variables de medición	13
3.2.	Delimitación de campo de estudio	14
3.3.	Recursos humanos disponibles.....	15
3.4.	Recursos materiales disponibles	16
3.5.	Técnica cualitativa.....	16
3.6.	Recolección y ordenamiento de la información	18
3.7.	Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información	18
3.8.	Análisis estadístico.....	19
4.	RESULTADOS	23
4.1.	Cálculo de W1 - para obtener el peso original del CaCO_3 en una muestra trabajada (W1).....	26
4.2.	Cálculo de W2 - para calcular de peso de CO_2 liberado a un tiempo n	26
4.3.	Cálculo de W3 - para calcular el peso de CaCO_3 que se ha disociado a un tiempo n	27
4.4.	Cálculo de W4 - porcentaje de conversión de caliza a cal viva a un tiempo n	27
4.5.	Gráficas de resultados	28
5.	INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS	33
	CONCLUSIONES	37
	RECOMENDACIONES	39
	BIBLIOGRAFÍA.....	41
	APÉNDICES	43

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Partícula esférica de caliza en descomposición	11
2.	Diseño experimental	17
3.	Conversión de caliza a cal viva <i>versus</i> tiempo de calcinación a 750 °C	28
4.	Conversión de caliza a cal viva <i>versus</i> tiempo de calcinación a 850 °C.....	29
5.	Conversión de caliza a cal viva <i>versus</i> tiempo de calcinación a 950 °C.....	30
6.	Conversión de caliza a cal viva <i>versus</i> tiempo de calcinación a 750, 850 y 950 °C	31

TABLAS

I.	Composición química de la caliza	18
II.	Porcentaje de conversión a 30 minutos de calcinación	21
III.	Resultados Anova para conversiones obtenidas a 30 minutos de calcinación	21
IV.	Resultados de F y F_{crit} para la calcinaciones a diferentes tiempos	22
V.	Datos originales de pesos de la caliza durante la calcinación a los tiempos estipulados (cada muestra tiene un peso inicial de 10 g caliza con tamaño de partícula de 3,36 a 4,76 mm), en gramos.....	23
VI.	Datos calculados para conversiones a 750 °C	24
VII.	Datos calculados para conversiones a 850 °C	25

VIII.	Datos calculados para conversiones a 950 °C.....	25
IX.	Resumen de resultados obtenidos.....	33

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
CaCO₃	Carbonato de calcio
MgCO₃	Carbonato de magnesio
S²	Cuadrado medio del error
S₁²	Cuadrado medio del tratamiento
S	Desviación estándar
CO₂	Dióxido de carbono
f	f de pruebas para tratamientos
°C	Grados Celsius
g	Gramo
H_i	Hipótesis de investigación
H_o	Hipótesis nula
h	Hora
H	Humedad
mg	Miligramo
k	Número de tratamientos
CaO	Óxido de calcio
PM	Peso molecular
%	Porcentaje
i	Subíndice para tratamientos
SSA	Suma de cuadrados de tratamientos
SSE	Suma de cuadrados del error
SST	Suma de cuadrados totales
T	Temperatura

t	Tiempo
Y_{ij}^2	Todos los datos de todas las muestras
T_{i*}	Total de tratamiento i
T_{**}	Total general
μ	Valor medio

GLOSARIO

Balanza analítica	Clase de balanza de laboratorio diseñada para medir pequeñas masas, en un principio de un rango menor del miligramo, actualmente, las digitales llegan hasta la diezmilésima de gramo (0,0001 g o 0,1 mg).
Calcinación	Proceso de calentar una sustancia a temperatura elevada, (temperatura de descomposición), para provocar la descomposición térmica o un cambio de estado en su constitución física o química.
Desecador	Instrumento de laboratorio que se utiliza para mantener limpia y deshidratada una sustancia por medio del vacío.
Mufla	Horno que puede alcanzar temperaturas muy altas para cumplir con los diferentes procesos que requieren este tipo de característica.
Presión de equilibrio	En el proceso de calcinación, es la presión a la cual se encuentran en equilibrio el carbonato de calcio, el óxido de calcio y el dióxido de carbono, a una temperatura dada.
Reacción endotérmica	Cualquier reacción química que absorbe energía.

Reacción reversible	Reacción química en la cual los productos de la reacción vuelven a combinarse para generar los reactivos.
Tamizado	Método físico para separar mezclas en el cual se separan dos sólidos formados por partículas de tamaño diferente. Consiste en hacer pasar una mezcla de partículas de diferentes tamaños por un tamiz.
Triturado	Nombre del proceso para reducir el tamaño de las partículas de una sustancia por la molienda.

RESUMEN

El objetivo principal de esta investigación radica en determinar el efecto de la temperatura sobre la cinética de la reacción química del proceso de calcinación de piedra caliza con alto grado de pureza a cal viva, bajo ciertas condiciones de laboratorio.

Las muestras de piedra caliza se obtendrán de la empresa Cementos Progreso S. A. e incluirán el análisis respectivo de su composición química. Las muestras serán trituradas y tamizadas para obtener muestras con tamaño de rocas entre 3,36 y 4,76 mm. Cada muestra será de un peso de unos 10 g de piedra caliza, a las cuales se les eliminará la humedad por medio de un horno, y luego serán pesadas y guardadas en bolsas plásticas, identificadas y almacenadas en una desecadora.

Para cada temperatura de 750, 850 y 950 °C se harán calcinaciones de las muestras por un tiempo definido de 7 horas, para asegurar la máxima conversión de piedra caliza a cal viva a esa temperatura, obteniendo pesas de las muestras y determinar la pérdida de peso cada 30 minutos durante este proceso. Cada corrida constará de dos etapas o fases.

Los resultados permitirán calcular las conversiones de piedra caliza a cal viva, cada media hora durante las diez horas de calcinación para determinar el grado de conversión en función del tiempo. Esto permitirá establecer un modelo matemático para expresar la cinética de la reacción para cada una de las temperaturas estudiadas.

OBJETIVOS

General

Evaluar si la velocidad de conversión de piedra caliza a cal viva es una función de la temperatura de proceso.

Específicos

1. Determinar la expresión matemática de la velocidad de conversión de piedra caliza a cal viva a distintas temperaturas de calcinación.
2. Determinar si la cinética de conversión de piedra caliza a cal viva es una función de la temperatura de proceso.

Hipótesis

1. Hipótesis de trabajo

Es factible evaluar el efecto de la temperatura sobre la velocidad de conversión de piedra caliza a cal viva, a través de ensayos en laboratorio.

2. Hipótesis de investigación: H_{i1}

La velocidad de conversión de piedra caliza a cal viva es afectada por el tiempo de calcinación en la conversión de piedra caliza a cal viva, para una temperatura dada.

$$\mu_i \neq \mu_j \neq \mu_z$$

Donde:

μ_i = velocidad de conversión a un tiempo x respecto a 750 °C

μ_j = velocidad de conversión a un tiempo x respecto a 850 °C

μ_z = velocidad de conversión a un tiempo x respecto a 950 °C

3. Hipótesis nula: H_{o1}

La velocidad de conversión de piedra caliza a cal viva no es afectada por el tiempo de calcinación en la conversión de piedra caliza a cal viva para una temperatura dada.

$$\mu_i = \mu_j = \mu_z$$

Donde:

μ_i = velocidad de conversión a un tiempo x respecto a 750 °C

μ_j = velocidad de conversión a un tiempo x respecto a 850 °C

μ_z = velocidad de conversión a un tiempo x respecto a 950 °C

INTRODUCCIÓN

El presente trabajo busca aportar mayor información técnica sobre el proceso de calcinación a nivel de laboratorio.

Se han realizado varios estudios sobre el proceso de calcinación en los cuales se ha manejado una gama de variables, como el tamaño de roca de piedra caliza, tiempo de calcinación, temperatura de calcinación y el uso de carbón vegetal como coadyuvante energético.

En este trabajo se tomaron dos parámetros, considerados los óptimos para definir las condiciones del estudio. Se escogieron: tiempo óptimo de calcinación con base a los estudios anteriores y el tamaño de piedra caliza que permite una conversión bastante alta durante el tiempo óptimo.

Se manejarán las variables del tiempo y temperatura de calcinación; se considera que tomar muestras cada media hora es adecuado para estudiar el grado de conversión de piedra caliza a cal viva a lo largo de las diez horas de calcinación.

Debido a que el estudio busca determinar la cinética de la reacción de la conversión de piedra caliza a cal viva, no se incluirá el uso de carbón como coadyuvante energético, ya que esto influiría en los resultados.

1. ANTECEDENTES

- En 1990, María Morales Díaz realizó el estudio titulado "*Evaluación de la eficiencia en el grado de conversión de piedra caliza a cal viva por efecto de incorporación de carbón vegetal, mediante el procesamiento a diferentes temperaturas y tiempos de calcinación*".

La investigación consistió en estudiar el efecto sobre la conversión debido a tres periodos de calcinación: 3, 5 y 7 horas, tres temperaturas: 650, 750 y 850 °C y tres porcentajes de carbón vegetal: 0, 10 y 20 %.

Los resultados obtenidos, y en función del análisis estadístico hecho, se demostró que, para 650 °C el grado de conversión aumenta con el tiempo de calcinación y con el porcentaje de carbón vegetal, pero solo se logró un bajo grado de conversión de caliza a cal viva de 34,45 %. Para una temperatura de 750 °C, también aumenta la conversión de piedra caliza a cal viva en función del tiempo de calcinación, pero el efecto del aumento de carbón vegetal es insignificante para los tiempos de 5 y 7 horas. Para una temperatura de 850 °C no existe diferencia significativa de la conversión de piedra caliza a cal viva, ni al tiempo de calcinación ni al porcentaje de carbón vegetal.

- En 1991, Edy Pérez Orozco realizó el estudio titulado "*Evaluación a nivel de laboratorio del efecto en el grado de conversión de piedra caliza a cal viva por la adición de tres tipos de carbón vegetal con diferente poder calorífico, realizado a diferentes temperaturas y tiempos de calcinación para una presión atmosférica de 640 mm Hg*".

La investigación consistió en estudiar el efecto sobre la conversión debido a tres periodos de calcinación: 3, 5 y 7 horas, dos temperaturas: 650 y 750 °C y 10 % de carbón vegetal con tres poderes caloríficos: 5 740, 6 861 y 7 514 Kcal/Kg.

Los resultados obtenidos, y en función del análisis estadístico, se demostró que, para una temperatura de 650 °C, aunque la conversión aumenta con tiempo de calcinación y mejora con carbón de mayor poder calorífico, aún no se logra una conversión de piedra caliza a cal viva mayor a un 40 %. A 750 °C, la conversión de piedra caliza a cal viva aumenta con carbón de mayor poder calorífico. En cuanto al tiempo de calcinación, también existe un aumento de conversión al aumentar el tiempo de calcinación, sin embargo, el efecto no es significativo para los dos carbones de mayor poder calorífico.

- En febrero de 1997, José Gabriel May realizó el estudio titulado *"Evaluación de la eficiencia de la conversión de piedra caliza a cal viva por efecto de incorporación de carbón vegetal mediante el procesamiento a diferentes tamaños de partícula, tiempos de calcinación y porcentajes de carbón agregados para una presión de 640 mm Hg y una temperatura de 750 °C"*.

La investigación consistió en estudiar el efecto sobre la conversión debido a una temperatura de 750° C, tres tiempos de calcinación: 3,5 y 7 horas dos porcentajes de carbón vegetal de 7,563 Kcal/Kg y dos tamaños de piedra: 2,38 – 3,36 mm y 3,36 – 4,76 mm.

Los resultados obtenidos, y en función del análisis estadístico efectuado, se demostró que, no existe diferencia significativa en el grado de

conversión de piedra caliza a cal viva debido al porcentaje de carbón vegetal ni al tamaño de partícula, y aunque se obtuvieron mejoras en la conversión en función del tiempo, no existe diferencia significativa para los tiempos de 5 y 7 horas.

- En febrero de 1997, Byron René Aguilar Uck realizó el estudio titulado "*Evaluación del efecto del tamaño de la caliza sobre el proceso de calcinación de periodo variable a 700 °C y 640 mm Hg de presión barométrica cuando se utiliza carbón vegetal como coadyuvante energético*".

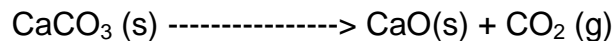
La investigación consistió en estudiar el efecto sobre la conversión debido a una temperatura de 700 °C, tres tamaños de piedras caliza: 6,35 – 12,70 mm, 19,05 – 25,40 mm y 38,10 – 50,80 mm y tres tiempos de calcinación: 3, 5 y 7 horas.

Los resultados obtenidos y en función del análisis estadístico hecho, se demostró que el grado de conversión de piedra caliza a cal viva disminuye cuando se aumenta el tamaño de la partícula. También se mostró que el grado de conversión aumenta con el tiempo de calcinación, y que este efecto es mayor, estadísticamente, que el efecto de tamaño de partícula sobre el grado de conversión. Este estudio también demostró que la relación entre la velocidad de conversión de piedra caliza a cal viva no es lineal en función del tiempo.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Generalidades de la caliza y de la cal

La cal es un sólido cristalino y es obtenida por medio del calentamiento del carbonato de calcio por medio de la reacción:



La reacción es altamente endotérmica y reversible, por lo que el dióxido de carbono reaccionará con el óxido cálcico para volver a formar carbonato de calcio. Para que la reacción vire hacia la derecha, hay que ir eliminando el dióxido de carbono de la cámara de reacción a lo largo del proceso. Esta transformación es uno de los procesos más antiguos conocidos y desarrollados por el hombre, no solo por la abundancia de caliza y facilidad de su transformación a cal viva, sino también, por las aplicaciones que se le puede dar al producto de esta transformación.

La caliza se encuentra en forma natural en el ambiente, principalmente en forma de rocas, y está compuesto principalmente de carbonato de calcio y carbonato de magnesio. El grado de pureza es determinado por la cantidad de carbonato de calcio y carbonato de magnesio presentes en la caliza. La caliza, en su forma natural, también contiene otras sustancias denominadas impurezas, e incluyen varias clasificaciones de la piedra caliza; las tres principales son:

- Las ricas en calcio que contienen un porcentaje de carbonato de calcio mayor al 95 %.
- Las magnesianas que contienen un porcentaje de carbonato de magnesio mayor al 5 %.
- Las dolomíticas aquellas que contengan entre 30 y un 45 % de magnesio.

También puede contener pequeñas cantidades de minerales como arcilla, hermatita, siderita, cuarzo, entre otros, que modifican (a veces sensiblemente), el color y el grado de coherencia de la roca.

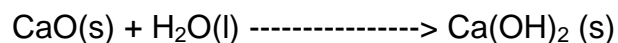
2.2. Usos de la cal

Estos son variados y muy importantes en varias industrias.

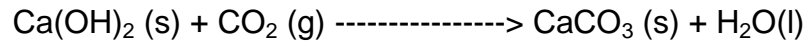
2.2.1. En la industria de la construcción

Esta aplicación de la cal busca la reformación de cal a carbonato de calcio.

Al mezclar la cal con agua y arena se forma el hidróxido de calcio en forma de pasta que se usa para pegar *blocks* o repello. Esto se da por medio de la reacción:



La reacción del hidróxido de calcio y el dióxido de carbono en el ambiente produce carbonato de calcio y causa que esta pasta endurezca, cumpliendo con su objetivo, y se da por medio de la reacción:



2.2.2. En la industria del vidrio

Quizá la propiedad de mayor importancia de la cal es su habilidad de formar soluciones con silicatos. Cuando la cal es calentada con arena (sílice) y bicarbonato de sodio, se forma una solución que no cristaliza cuando se enfría y forma un sólido amorfo, claro e incoloro llamado vidrio.

Debido a que es una mezcla y no un compuesto químico no tiene un punto de fusión exacto y se funde al ser calentado. Por lo tanto puede ser moldeado a sus tantas aplicaciones.

2.2.3. En la industria metalúrgica

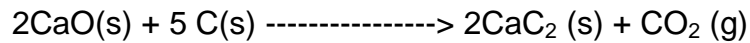
Otra aplicación de la cal, también es debido a su habilidad de formar soluciones con silicatos. Casi la mitad de la producción de cal es destinada a la industria metalúrgica. El mineral de hierro contiene cantidades importantes de silicatos.

Cuando se mezcla la cal con el mineral de hierro fundido, la cal se combina con los silicatos y forman una escoria que es inmisible con el hierro fundido. De tal manera que, por decantación se remueve esta escoria, logrando así eliminar los silicatos del hierro.

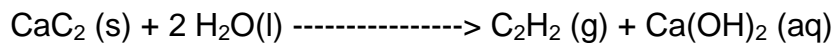
Aproximadamente se utilizan 80 kg de cal para cada tonelada métrica de hierro. La cal también es usada de la misma forma en la producción del aluminio.

2.2.4. En la industria química

Su uso principal es la producción del carburo de calcio (CaC_2) este se produce al calentar la cal con el coque:



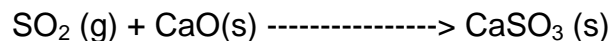
El carburo de calcio reacciona con el agua para formar acetileno (C_2H_2):



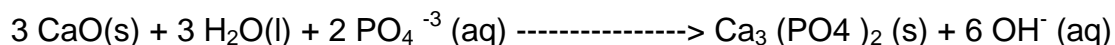
El acetileno tiene mucha utilidad en la soldadura y, también se usa en la producción del cloruro de vinilo, neopreno y el acrilonitrilo; que son materia prima para polímeros.

2.2.5. En la protección del medio ambiente

La cal tiene aplicación como lavador de gases de chimenea en plantas eléctricas, para reducir las emisiones del dióxido de azufre. La cal reacciona con el dióxido de azufre para formar el sulfito de calcio en fase sólida, por medio de la reacción:



La cal también se usa en el tratamiento de aguas negras para remover fosfatos:



2.2.6. Otros usos de la cal

Se utiliza en el tratamiento de agua potable para reducir su acidez, suavizarlo y clarificarlo. Otros usos incluyen: opacificante en los plásticos. Debido a su alcalinidad en la industria del papel se utiliza para disolver la lignina; en el proceso azucarero se utiliza como regulador de pH y precipitante de impurezas, y en asfaltos sirve para llenar espacios de vacío y extender la vida útil del mismo.

2.3. La descomposición de la caliza

El proceso de calcinación de piedra caliza se refiere al calentamiento de la piedra para lograr la descomposición del carbonato de calcio y magnesio para formar óxidos de los mismos y liberar dióxido de carbono. Este efecto logra que se pierda aproximadamente un 40 % de peso original de la piedra.

El proceso ocurre en etapas que incluyen el precalentamiento de la piedra (hasta 100 °C), la evaporación de agua higroscópica (de 100 hasta 450 °C), la descomposición del carbonato de magnesio y el comienzo de la descomposición del carbonato de calcio (de 450 a 800 °C), y a temperaturas mayores, la descomposición del carbonato de calcio restantes y de la arcilla. Estos son valores teóricos.

En trabajos anteriores realizados sobre el tema, se ha encontrado que hay otros factores que influyen sobre este proceso. Estos incluyen impurezas de la caliza, tamaño de roca, presión barométrica, tiempo y temperatura de calcinación. Otro factor que ha afectado los resultados obtenidos a nivel de laboratorio es el manejo de la eliminación del dióxido de carbono.

Este estudio busca determinar la cinética de la reacción de calcinación a nivel de laboratorio.

En forma general, en cuanto a la cinética de la descomposición de la caliza en una mufla de laboratorio, el proceso es afectado por el calor suministrado a la piedra y la eliminación del dióxido de carbono. Aparte de las etapas mencionadas antes, existen otros aspectos de este proceso que son relevantes. Cuando se da la descomposición de los carbonatos y la formación de óxidos junto a la liberación del dióxido de carbono, se pierde un 44 % del peso original de la piedra caliza. La liberación de este gas resulta en una porosidad de alrededor del 50 % en la piedra, y esto afecta tanto la facilidad de calentamiento del núcleo de la piedra, así como la velocidad de eliminación del dióxido de carbono que se esté formando.

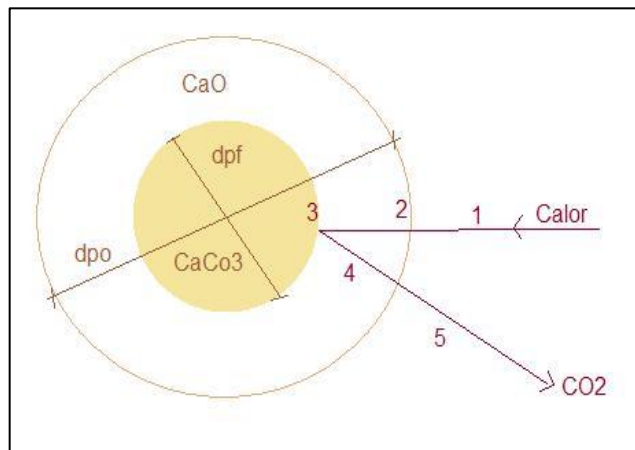
La presión atmosférica, también tiene un efecto en la velocidad de reacción. Esto es debido a que la ciudad de Guatemala tiene una presión atmosférica de 640 mm Hg y, por lo tanto se tiene una presión parcial menor de dióxido de carbono, esto favorece la descomposición de la caliza si se da una adecuada eliminación del gas formado a la hora de la calcinación.

Estos efectos resultan en variaciones entre datos teóricos y reales obtenidos en estudios realizados.

Si se considera una partícula esférica, el calor causa la descomposición de la piedra, comenzando en la superficie. A medida que transcurre el tiempo, esta superficie de descomposición se va moviendo hacia el núcleo de la partícula, ya que las capas exteriores se van calcinando. Al descomponerse los carbonatos en las capas exteriores, y dado el aumento de porosidad en estas capas, los factores que afectan al progresar la calcinación son: la temperatura

alcanzada, la forma de la piedra, la densidad de la caliza, el coeficiente de transmisión de calor de la piedra, el coeficiente de conductividad de la cal viva, ya que la reducción en la porosidad de capas calcinadas, también influyen en la eliminación del dióxido de carbono que se viene formando en las nuevas superficies de descomposición. De igual manera, a razón que la superficie de descomposición se mueve hacia el núcleo de la partícula; el área superficial también se va reduciendo. Esto tiene efectos en la cantidad de descomposición que está ocurriendo: la cantidad de energía requerida, la cantidad de dióxido de carbón liberado, así como una distancia mayor que este gas tiene que viajar hacia la superficie para ser liberado. Estos factores afectan la velocidad de descomposición de la partícula de caliza. El siguiente diagrama representa lo anterior:

Figura 1. **Partícula esférica de caliza en descomposición**



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Paint.

La distancia dpo es el diámetro original de la partícula y dpf es el diámetro del núcleo que aún no se ha calcinado.

La velocidad global del proceso depende de cada una de estas etapas.

- La transmisión de calor hacia la superficie de la partícula no calcinada por convección.
- Conducción del calor a través de la capa ya disociada (CaO) a la zona de reacción.
- Descomposición de carbonatos en la superficie de reacción, formación de óxido de calcio y formación de dióxido de carbono.
- La difusión de dióxido de carbono a través de la capa porosa de óxido de calcio a la superficie externa de las partículas.
- El transporte de la materia (CO₂) de la superficie externa de las partículas al ambiente.

3. DISEÑO METODOLÓGICO

3.1. Variables

Son aquellas que no tienen un valor fijo en la realización del estudio. Estas son:

3.1.1. Variables independientes

Las variables independientes en este trabajo son:

- El tiempo (horas)
- Temperatura (°C)
- Tamaño de partícula (3,36 a 4,76 mm)

3.1.2. Variables dependientes y respuesta

Las variables dependientes son la conversión de piedra caliza a cal viva (gramos).

3.1.3. Variables de medición

La variable medible será el peso de piedra caliza no calcinada, más el peso de cal viva producida a lo largo del experimento (gramos).

3.2. Delimitación de campo de estudio

- Área: cinética de reacciones químicas
- Industria: este estudio va dirigido a los centros educativos, universidades e industria buscando ampliar el conocimiento técnico de este proceso, con el fin de mejorar eficiencia y disminuir la contaminación ambiental.
- Línea de investigación: cinética de descomposición térmica de caliza
- Proceso: calcinación de piedra caliza a cal viva
- Ubicación: la trituración, tamizado y secado de las muestras, así como la calcinación de las muestras se llevará a cabo en el laboratorio del Centro de Investigaciones de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

El análisis químico de las muestras se hará en el laboratorio de la empresa Cementos Progreso S. A.

El presente estudio tiene como objetivo de estudiar la cinética de la conversión de piedra caliza a cal viva bajo ciertas condiciones de laboratorio, tomando los resultados de estudios anteriores para definir dos condiciones fijas y dos variables. Las condiciones de la calcinación a estudiar son: tres

temperaturas de calcinación: 750, 850 y 950 °C, un tiempo total de calcinación de 7 horas y un tamaño de piedras caliza de 3,36 a 4,76 mm.

Para lograr esto se tomarán datos de pérdida de peso de la piedra caliza durante la calcinación a cada temperatura en intervalos de 30 minutos. Esta información se utilizará para calcular la conversión a cada media hora para luego correlacionar los resultados y obtener un modelo matemático de la conversión de la piedra caliza en función del tiempo. Esto permitirá establecer la cinética de la calcinación a cada temperatura y permitir estudiar la correlación entre esos resultados.

La materia prima se obtendrá de la empresa Cementos Progreso S. A., ya que se considera una excelente fuente, tanto de la piedra caliza, así como el hecho que proporcionarán el análisis químico (composición) de la caliza. El manejo de las muestras se hará por personal del Centro de Investigaciones de Ingeniería de la Universidad de San Carlos quienes después proporcionarán un certificado de los resultados de los ensayos.

3.3. Recursos humanos disponibles

- **Investigador:** Henry Estuardo Quiñónez Fernández
- **Asesor:** Ing. Byron René Aguilar Uck

3.4. Recursos materiales disponibles

- Materia:
 - Piedras de caliza

- Cristalería y equipo
 - Equipo
 - Instrumentos de medición:
 - ✓ Balanza analítica

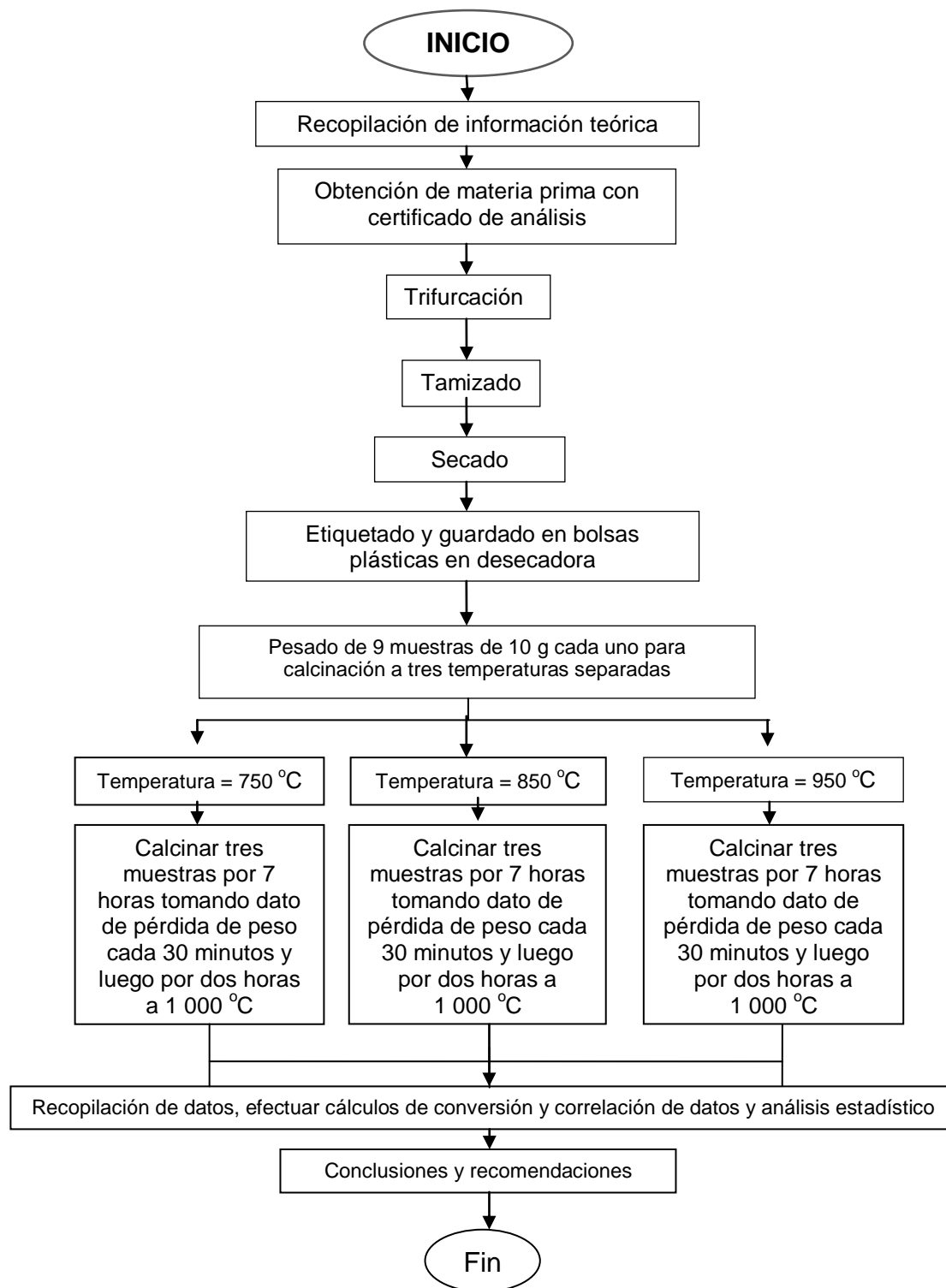
 - Otros equipos:
 - ✓ Mufla
 - ✓ Desecadora
 - ✓ Trituradora
 - ✓ Tamiz

 - Cristalería y otros
 - Crisoles
 - Pinzas

3.5. Técnica cualitativa

En la figura 2 se muestra el diseño experimental del presente trabajo de graduación.

Figura 2. **Diseño experimental**



Fuente: elaboración propia.

3.6. Recolección y ordenamiento de la información

Las muestras de piedra caliza (y su análisis químico) se obtendrán de la empresa Cementos Progreso S.A. Los trabajos anteriores sobre este tema obtuvieron sus muestras de esta empresa y resultaron de muy buena calidad y su análisis químico muy confiable.

3.7. Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información

- Datos predeterminados

Composición química de la caliza, datos que se obtuvieron antes de hacer las pruebas de laboratorio.

Tabla I. **Composición química de la caliza**

COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LA CALIZA	
COMPONENTE	PORCENTAJE
CaCO ₃	96,58
MgCO ₃	1,42
Al ₂ O ₃	0,98
SiO ₂	1,02
Fe ₂ O ₃	0,00
K ₂ O	0,00

Fuente: elaboración propia.

- Datos experimentales

Estos datos se obtendrán durante los ensayos de laboratorio y son considerados como datos originales o resultantes de las mediciones en el laboratorio. Para este trabajo corresponde a las pesas de la piedra caliza a tiempos determinados durante la calcinación.

3.8. Análisis estadístico

De trabajos anteriores se determinó que el tamaño de partícula que proporciona un alto porcentaje de conversión es de 3,36 a 4,76 mm. El tamaño de partícula no tiene una conversión rápida, pero sí bastante alta a los tiempos y temperaturas escogidas, que permitirá estudiar un comportamiento de la conversión durante el tiempo establecido.

También se determinó que el tiempo adecuado para ver la tendencia de la conversión es de 7 horas. Esto permitirá ver inclusive, la etapa inicial que es el precalentamiento de la roca, evaporación del agua higroscópica, la descomposición inicial y la velocidad de la descomposición a como vaya pasando el tiempo. Trabajos anteriores obtuvieron altas conversiones a tiempos de 7 horas para partículas más pequeñas. Se considera que 7 horas será adecuado para estudiar la razón de conversión casi completa.

- Tratamientos a realizar 3 X 3: para cada una de las tres temperaturas se harán tres corridas de 7 horas, usando partículas del mismo tamaño (3,36 a 4,76 mm).

- En el primer tratamiento se hará una corrida de tres muestras a una temperatura de 750 °C por un tiempo de 7 horas, utilizando partículas de 3,36 a 4,76 mm.

En el segundo tratamiento se hará una corrida de tres muestras a una temperatura de 850 °C por un tiempo de 7 horas, utilizando partículas de 3,36 a 4,76 mm.

En el tercer tratamiento se hará una corrida de tres muestras a una temperatura de 950 °C por un tiempo de 7 horas, utilizando partículas de 3,36 a 4,76 mm.

Se utilizó el programa Anova (de un solo factor) para el análisis estadístico. Esto debido a que la única variable de interés en esta tesis es la temperatura. Para el análisis se tomaron grupos de datos de acuerdo a los tiempos establecidos en los cuales se tomaron las medidas. Por lo tanto, de acuerdo al diseño experimental, se analizaron 14 grupos de datos, consistiendo cada uno de 9 datos (debido a que se hicieron tres repeticiones a tres temperaturas; $3 \times 3 = 9$). A continuación se presenta como ejemplo el análisis hecho para los 9 datos de conversiones a los 30 minutos. El resto de resultados se presentan en la tabla III.

Tabla II. **Porcentaje de conversión a 30 minutos de calcinación**

	750 °C	850 °C	950 °C
Corrida 1	13,2	26,4	70,7
Corrida 2	11,7	23,3	60,0
Corrida 3	11,5	21,4	55,6

Fuente: elaboración propia.

Tabla III. **Resultados Anova para conversiones obtenidas a 30 minutos de calcinación**

SUMMARY

<i>Groups</i>	<i>Count</i>	<i>Sum</i>	<i>Average</i>	<i>Variance</i>
750 °C	3	0,363627	0,121209	8,34E-05
850 °C	3	0,710763	0,236921	0,000634
950 °C	3	1,863460	0,621153	0,005995

ANOVA

<i>Source of Variation</i>	<i>SS</i>	<i>df</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>P-value</i>	<i>Fcrit</i>
Between Groups	0,410968	2	0,205484	91,83174	3,17E-05	5,143253
Within Groups	0,013426	6	0,002238			
Total	0,424394	8				

Fuente: elaboración propia.

Debido a que $F > F_{crit}$ se rechaza la hipótesis nula, debido a que este resultado indica que sí hay un efecto significativo de la temperatura sobre la conversión de las muestras de piedra caliza a cal viva a 30 minutos de calcinación. A continuación, en la tabla V se presentan los F y F_{crit} resultantes para cada uno de los tiempos de calcinación de acuerdo al diseño experimental:

Tabla IV. **Resultados de F y F_{crit} para la calcinaciones a diferentes tiempos**

Tiempo de Calcinación (minutos)	F	F_{crit}
30	91,83174	5,14325
60	18,54886	5,14325
90	12,59061	5,14325
120	12,59061	5,14325
150	11,50168	5,14325
180	14,84506	5,14325
210	19,32657	5,14325
240	34,05328	5,14325
270	20,63340	5,14325
300	16,26247	5,14325
330	35,59362	5,14325
360	6,1484	5,14325
390	0,12286	5,14325
420	0,00870	5,14325

Fuente: elaboración propia.

De los resultados obtenidos se rechaza la hipótesis nula para todos los tiempos con excepción para 390 y 420 minutos de calcinación. Este efecto es observable en la tabla IV, que muestra que únicamente para estos tiempos es cuando las tres curvas coinciden, y es debido a que todas las muestras llegan a casi una calcinación completa (arriba del 99 % de conversión de piedra caliza a cal viva).

4. RESULTADOS

La información original corresponde a datos de pérdida de peso de las muestras calcinadas a tiempos específicos. Estos se presentan en la tabla V:

Tabla V. **Datos originales de pesos de la caliza durante la calcinación a los tiempos estipulados (cada muestra tiene un peso inicial de 10 g caliza con tamaño de partícula de 3,36 a 4,76 mm), en gramos**

Tiempo de toma de pesos (minutos)	750 °C			850 °C			950 °C		
	M1	M2	M3	M1	M2	M3	M1	M2	M3
0	10,03	10,015	10,01	10,006	10,007	10,007	10,02	10,016	10,02
30	9,461	9,51	9,517	8,167	9,003	9,083	6,666	7,424	8,316
60	8,714	8,971	8,995	6,749	8,176	8,382	6,175	6,155	6,454
90	8,18	8,426	8,462	5,915	7,426	7,865	5,916	5,901	5,896
120	7,437	7,931	7,947	5,698	6,749	7,425	5,805	5,797	5,792
150	7,07	7,545	7,674	5,692	6,201	7,035	5,749	5,758	5,762
180	6,984	7,252	7,403	5,687	5,823	6,69	5,791	5,77	5,794
210	6,712	7,073	6,94	5,689	5,709	6,35	5,765	5,758	5,78
240	6,526	6,782	6,862	5,701	5,706	6,065	5,718	5,735	5,763
270	6,202	6,671	6,485	5,635	5,71	5,86	5,746	5,737	5,758
300	6,033	6,485	6,408	5,685	5,696	5,727	5,725	5,727	5,751
330	5,968	6,005	6,125	5,717	5,706	5,707	5,728	5,721	5,743
360	5,789	5,914	6,038	5,683	5,693	5,701	5,721	5,716	5,737
390	5,542	5,754	5,972	5,689	5,697	5,705	5,708	5,716	5,739
420	5,457	5,791	5,919	5,694	5,7	5,707	5,708	5,715	5,736

Fuente: elaboración propia.

Para los cálculos de las conversiones se toma el promedio de los pesos de las tres muestras para cada tiempo, es decir, en la tablas siguientes,

$$W_o = \frac{M1 + M2 + M3}{3}$$

para cada tiempo de muestreo.

Tabla VI. **Datos calculados para conversiones a 750 °C**

Tiempo de toma de pesos (minutos)	Datos calculados para temperatura 750 °C				
	W0	W1	W2	W3	W4
0	10,020	9,819	-	-	0.0%
30	9,496	9,819	524	1,190	12.1%
60	8,893	9,819	603	2,560	26.1%
90	8,356	9,819	537	3,781	38.5%
120	7,772	9,819	584	5,109	52.0%
150	7,430	9,819	342	5,886	59.9%
180	7,213	9,819	217	6,379	65.0%
210	6,908	9,819	305	7,071	72.0%
240	6,723	9,819	185	7,492	76.3%
270	6,453	9,819	271	8,107	82.6%
300	6,309	9,819	144	8,434	85.9%
330	6,033	9,819	276	9,061	92.3%
360	5,914	9,819	119	9,332	95.0%
390	5,756	9,819	158	9,690	98.7%
420	5,722	9,819	34	9,767	99.5%

Fuente: elaboración propia.

Tabla VII. **Datos calculados para conversiones a 850 °C**

Tiempo de toma pesos (minutos)	Datos calculados para temperatura 850 °C				
	W0	W1	W2	W3	W4
0	10,007	9,807	-	-	0,0%
30	8,984	9,807	1,022	2,323	23,7%
60	7,769	9,807	(5)	5,086	51,9%
90	7,069	9,807	(3)	6,677	68,1%
120	6,624	9,807	445	7,688	78,4%
150	6,309	9,807	315	8,403	85,7%
180	6,067	9,807	243	8,955	91,3%
210	5,916	9,807	151	9,297	94,8%
240	5,824	9,807	92	9,506	96,9%
270	5,735	9,807	89	9,708	99,0%
300	5,703	9,807	32	9,782	99,7%
330	5,710	9,807	(7)	9,765	99,6%
360	5,692	9,807	18	9,805	100,0%
390	5,697	9,807	(5)	9,795	99,9%
420	5,700	9,807	(3)	9,787	99,8%

Fuente: elaboración propia.

Tabla VIII. **Datos calculados para conversiones a 950 °C**

Tiempo de toma pesos (minutos)	Datos calculados para temperatura 950 °C				
	W0	W1	W2	W3	W4
0	10,019	9,818	-	-	0,0%
30	7,335	9,818	2,683	6,098	62,1%
60	6,261	9,818	1,074	8,539	87,0%
90	5,904	9,818	357	9,351	95,2%
120	5,798	9,818	106	9,592	97,7%
150	5,756	9,818	42	9,687	98,7%
180	5,785	9,818	(29)	9,622	98,0%
210	5,768	9,818	17	9,661	94,4%
240	5,739	9,818	29	9,727	99,1%
270	5,747	9,818	(8)	9,708	98,9%
300	5,734	9,818	13	9,737	99,2%

Continuación de la tabla VIII.

330	5,731	9,818	4	9,745	99,3 %
360	5,725	9,818	6	9,759	99,4 %
390	5,721	9,818	4	9,767	99,5 %
420	5,720	9,818	1	9,770	99,5 %

Fuente: elaboración propia.

Donde

W₀ = peso de caliza a un tiempo X

W₁ = peso de CaCO₃ presente en la muestra original

W₂ = peso de CO₂ liberado hasta ese momento

W₃ = peso de CaCO₃ que se ha disociado hasta ese momento

W₄ = porcentaje de conversión de caliza a cal viva hasta ese momento

Se repetirán estos cálculos para cada muestra bajo cada una de las temperaturas trabajadas. Esto con el fin de calcular el porcentaje de conversión de cada muestra a los tiempos indicados y a su temperatura sometida.

4.1. Cálculo de W₁ - para obtener el peso original del CaCO₃ en una muestra trabajada (W₁)

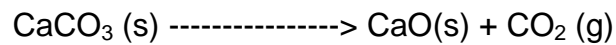
W₁ = W₀ * % contenido de CaCO₃ (según Certificado de Calidad de Caliza)

4.2. Cálculo de W₂ - para calcular de peso de CO₂ liberado a un tiempo n

$$W_{2n} = W_{0n-1} - W_{0n}$$

4.3. Cálculo de W3 - para calcular el peso de CaCO₃ que se ha disociado a un tiempo n

De la ecuación estequiométrica de la reacción se tiene:



y se establece que la relación molar de 1 : 1 :1 entre el carbonato de calcio, el óxido cálcico y el dióxido de carbono.

Sabiendo que los pesos molares son:

$$\text{CaCO}_3 = 100 \text{ g}$$

$$\text{CaO} = 56 \text{ g y}$$

$$\text{CO}_2 = 44 \text{ g}$$

$$W3_n = \frac{W2_n \text{ g de CO}_2}{44 \text{ g / mol CO}_2} * \frac{1 \text{ mol de CaCO}_3 \text{ disociado}}{1 \text{ mol de CO}_2 \text{ liberado}} * \frac{100 \text{ g de CaCO}_3}{1 \text{ mol de CaCO}_3}$$

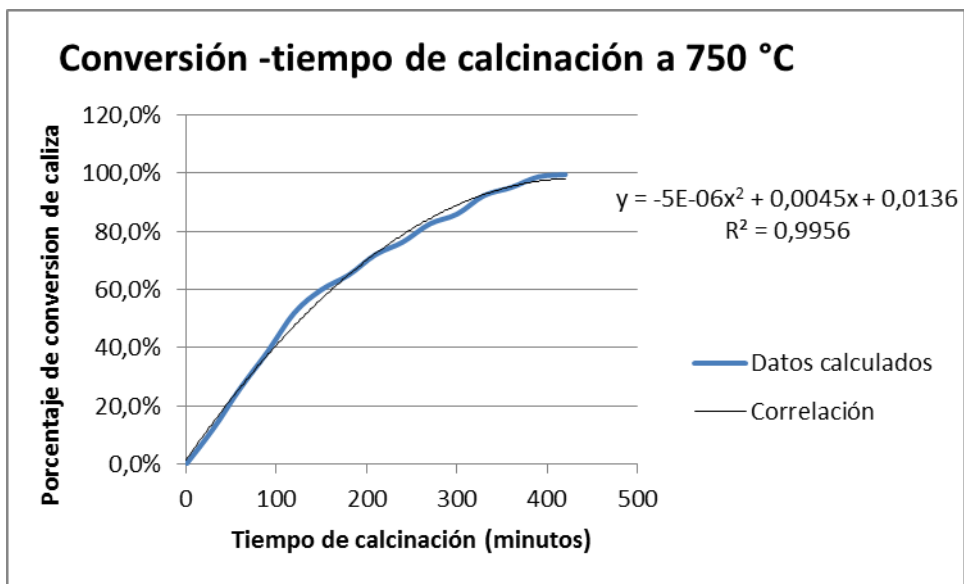
4.4. Cálculo de W4 - porcentaje de conversión de caliza a cal viva a un tiempo n

$$W4_n = \frac{W3_n}{W1} * 100$$

4.5. Gráficas de resultados

A continuación se muestran los resultados en las figuras 3, 4, 5 y 6.

Figura 3. **Conversión de caliza a cal viva versus tiempo de calcinación a 750 °C**



Fuente: elaboración propia.

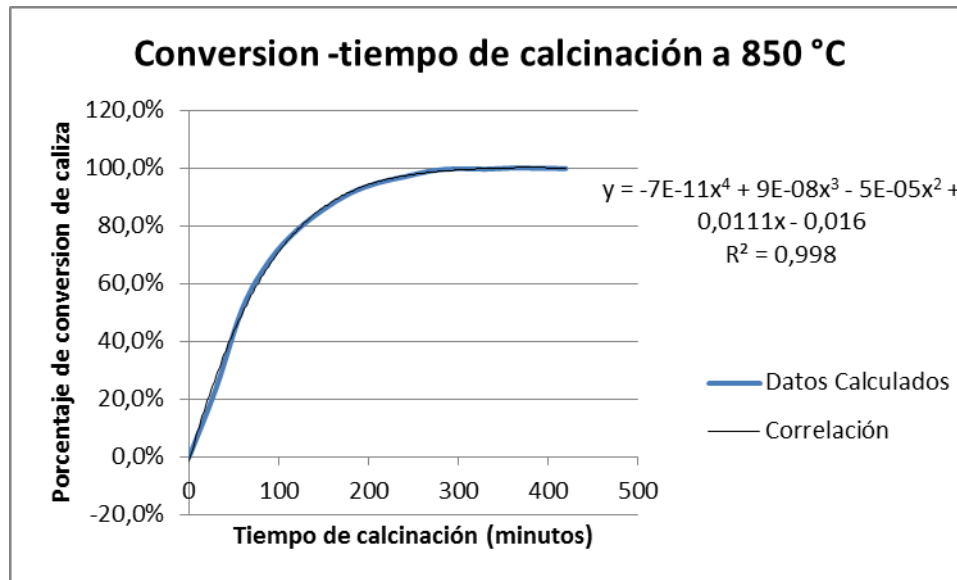
Los resultados indican una correlación de segundo orden con una regresión R^2 de 0,9956. La ecuación resultante es:

Ecuación 1:

$$y (\% \text{ conversión}) = -5E-06x^2 + 0,0045x + 0,0136$$

donde x es el tiempo de calcinación en minutos.

Figura 4. **Conversión de caliza a cal viva versus tiempo de calcinación a 850 °C**



Fuente: elaboración propia.

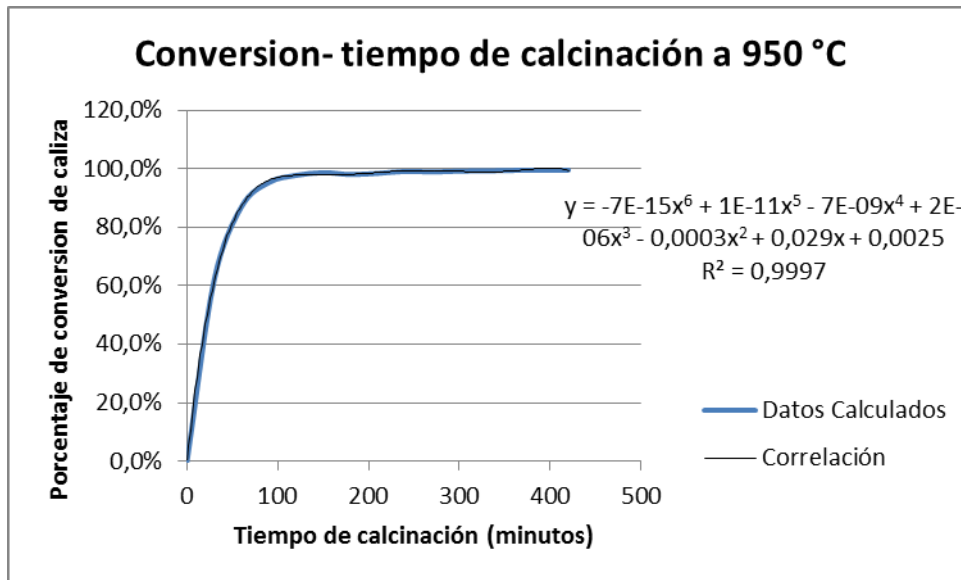
Los resultados indican una correlación de cuarto orden con una regresión R² de 0,9998. La ecuación resultante es:

Ecuación 2:

$$y (\% \text{ conversión}) = -8E-11x^4 + 1E-07x^3 - 5E-05x^2 + 0,01112x + 0,0006$$

donde x es el tiempo de calcinación en minutos.

Figura 5. **Conversión de caliza a cal viva versus tiempo de calcinación a 950 °C**



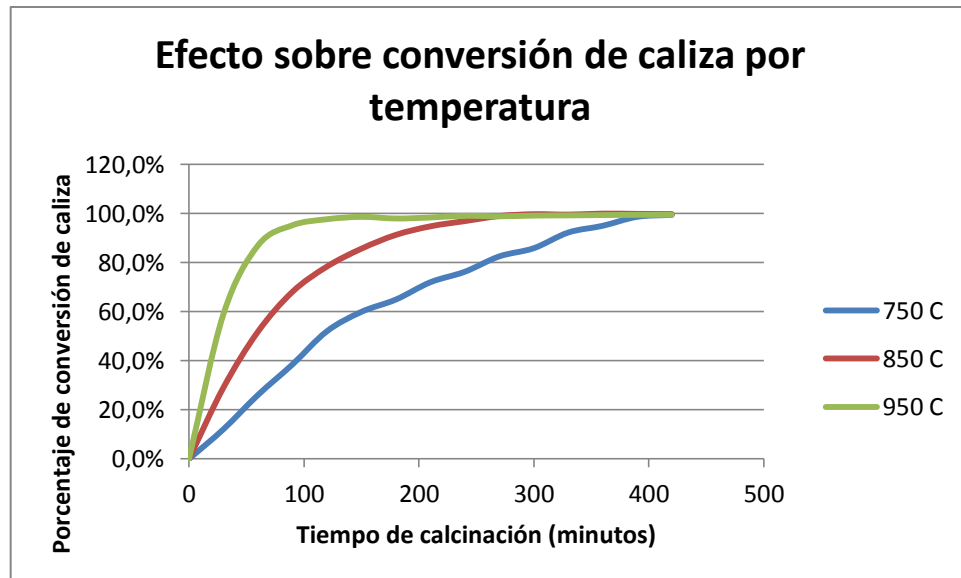
Fuente: elaboración propia.

Los resultados indican una correlación de sexto orden con una regresión R^2 de 0,9998. La ecuación resultante es:

$$y (\% \text{ conversión}) = -5E-15x^6 + 9E-12x^5 - 5E-09x^4 + 2E-06x^3 - 0,0003x^2 + 0,0277x - 0,0006$$

donde x es el tiempo de calcinación en minutos.

Figura 6. **Conversión de caliza a cal viva versus tiempo de calcinación a 750, 850 y 950 °C**



Fuente: elaboración propia.

Las tendencias son el resultado de las correlaciones polinomiales de 2do, 4to y 6to grado para las temperaturas de 750, 850 y 950 °C, respectivamente.

5. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

De manera general, los resultados concuerdan con lo esperado. Las figuras 3,4 y 5 muestran los resultados del porcentaje de conversión de caliza a cal viva para las temperaturas 750, 850 y 950 °C, respectivamente y las correlaciones porcentaje de conversión – tiempo resultan en polinomios de segundo, cuarto y sexto orden.

Tabla IX. **Resumen de resultados obtenidos**

Temperatura de calcinación	Tiempo para llegar al 99 % de conversión	Correlación conversión-tiempo
750 °C	7 hrs	2 ^{do} orden
850 °C	4,5 hrs	4 ^{to} orden
950 °C	3 hrs	6 ^{to} orden

Fuente: elaboración propia.

Estas correlaciones se obtuvieron utilizando programas de análisis de datos, ya que por su complejidad no permitieron utilizar otros métodos. Estos resultados también concuerdan, de manera general, con trabajos anteriores sobre el tema.

Para el caso de la calcinación efectuada a 750 °C, la correlación de segundo orden sí concuerda exactamente con trabajos anteriores, aunque hay diferencias entre las constantes del polinomio. Una correlación R^2 de 0,9956 es

bastante aceptable. Esto se da debido a otros factores, incluyendo el tamaño de partícula, los tiempos de toma de datos, y la mufla, entre otros. De la figura 3, se puede observar que la velocidad de conversión de caliza es mayor al comienzo de la calcinación y disminuye un poco a mayor tiempo. Esto es obvio debido a que la pendiente de la curva es mayor durante las primeras tres horas de calcinación (alcanzando un 65 % de conversión). La velocidad de conversión va disminuyendo a cómo va transcurriendo el tiempo.

En este caso se logra una conversión de caliza de un 99,5 % a un tiempo de 7 horas, aunque no se llega a un periodo de peso constante. Este comportamiento se explica en la figura 1. Al inicio de la calcinación, la distancia entre la superficie de la roca original y la superficie de reacción es menor, pero va aumentando según como va transcurriendo el tiempo. Esto afecta dos factores que impactan de manera directa al proceso de calcinación: el calor tiene que llegar a la superficie de la piedra por convección y después por conducción atravesar la capa calcinada para llegar a la superficie de reacción. Por difusión, el dióxido de carbono tiene que atravesar la capa de óxido de calcio para ser liberado en la superficie de la piedra. Este fenómeno se da en la calcinación de piedra caliza de cualquier tamaño, aun a nivel de laboratorio.

Esta tendencia también se observa para las calcinaciones efectuadas a 850 y 950 °C. Se obtiene una calcinación bastante completa a las 7 horas a los 750 °C. En la práctica no es posible llegar a un 100 % de conversión de piedra caliza a cal viva debido al proceso de recarbonatación, el cual permite la reformación del carbonato de calcio, ya que la descomposición de carbonato de calcio no es irreversible. Hay que tomar en cuenta, que durante el transcurso de la calcinación, la concentración del dióxido de carbono aumenta en la mufla.

Para el caso de la calcinación a 850 °C, se obtiene un polinomio de 4to grado con una correlación R^2 de 0,9998. En este caso, también se observa una mayor velocidad de descomposición de la piedra caliza durante las primeras tres horas de calcinación (durante el cual alcanza el 91,3 % de conversión), y luego decrece esta velocidad de descomposición hasta alcanzar una conversión del 99 % en cuatro horas y media. A partir de ese punto, las muestras ya prácticamente habían alcanzado peso constante, no por haber llegado al 100 % de conversión, sino debido a la recarbonatación.

A un tiempo de tres horas, las muestras calcinadas a 850 °C habían alcanzado una conversión 50 % mayor que las muestras calcinadas a 750 °C. Esto es debido a mayor calor llegando más rápidamente a la superficie de reacción en la piedras calcinadas a 850 °C que a los de 750 °C. Es interesante observar que al hacer correlaciones por etapa de calcinación (0 a 3 horas y 3 a 7 horas), se obtiene un polinomio de 3^{er} orden y una ecuación lineal, respectivamente.

Para el caso de calcinación a 950 °C se obtiene un polinomio de 6^{to} orden con una correlación R^2 de 0,9998. Se observa la misma tendencia de la velocidad de descomposición, siendo mucho mayor al inicio de la calcinación. Para referencia, en este caso se obtiene, prácticamente una calcinación completa en las primeras tres horas (a este tiempo, para 850 °C se logra el 91,3 % y para 750 °C se logra un 65 %). A partir de las primeras tres horas se tiene peso constante pero sin obtener una calcinación al 100 %, por los motivos expresados anteriormente. Es interesante observar que al hacer correlaciones por etapa de calcinación (0 a 3 horas y 3 a 7 horas), se obtiene un polinomio de 4^{to} orden y una ecuación lineal, respectivamente.

En las tablas VI, VII y VIII se pueden observar valores negativos para W2 (peso de CO₂ liberado a tiempo x). Estos valores negativos son como resultado de error humano al pesar la muestra en la balanza analítica. Se observa que se dieron estos errores, únicamente para las calcinaciones a 850 y 950 °C. Esto es debido a que en ciertas etapas de estas calcinaciones, las pérdidas en peso son muy pequeñas, resultando en error humano al momento de tomar datos.

En la figura 6 se comparan las tres curvas de conversión-tiempo, en donde se observa la gran diferencia en los resultados de conversión obtenidos. Se nota que únicamente en los últimos 30 minutos de calcinación que las curvas coinciden.

El orden de las correlaciones conversión-tiempo aumentan en función de la temperatura debido a la complejidad de todos los factores, afectando las calcinaciones a cada temperatura. Por ejemplo, en el caso de 750 °C, la curva se extiende a lo largo de las 7 horas de calcinación y se alcanza un 99 % de conversión hasta al final del periodo. Esta curva tiene el menor grado de complejidad. En el caso de 850 °C se alcanza el peso constante después de 4,5 horas. Para esta temperatura se pudiese diferenciar estas dos etapas, que daría de 0 a 4,5 horas una correlación de orden 2 y de 4,5 a 7 horas una correlación lineal. Lo mismo se cumple para los resultados de la calcinación a 950 °C. En la práctica, debido a que se trabaja con rocas de mucho mayor tamaño, la calcinación industrial se lleva a cabo a temperaturas de unos 1 000 a 1 200 °C.

El análisis estadístico indica que se descarta la hipótesis nula, ya que se encontraron diferencias significativas en la variable respuesta (conversión de piedra caliza a cal viva).

CONCLUSIONES

1. No es posible lograr una conversión de piedra caliza a cal viva, a nivel de laboratorio, bajo las condiciones trabajadas.
2. La temperatura de calcinación afecta la velocidad de conversión de piedra caliza a cal viva.
3. A mayor temperatura de calcinación, menor tiempo se requiere para lograr la calcinación de piedra caliza cal viva.
4. La correlación entre conversión de piedra caliza a cal viva y el tiempo de calcinación es compleja y puede ser expresada por polinomios de mayor orden.

RECOMENDACIONES

1. Tener mucho cuidado para controlar la ventilación de la mufla, ya que esto también afecta la temperatura de la misma, afectando así el proceso de calcinación.
2. Realizar un trabajo de investigación con respecto a la hidratación de cal viva, para estudiar el efecto exotérmico de la reacción, tomando la temperatura como factor.
3. Investigar con respecto a la hidratación de la cal viva, para estudiar la cinética de la reacción, tomando el pH como factor.

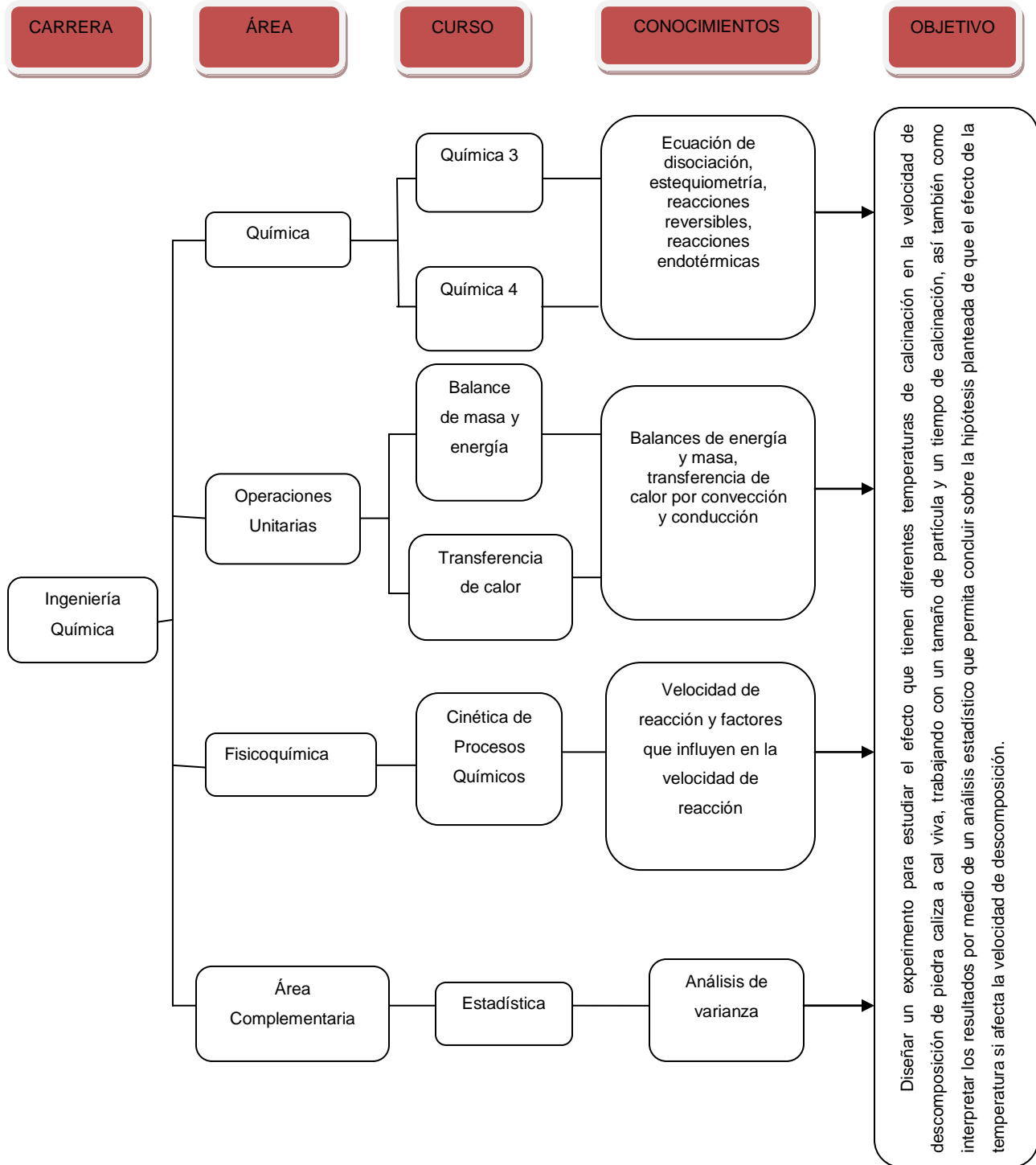
BIBLIOGRAFÍA

1. AGUILAR UCK, Byron René. *Evaluación del efecto del tamaño de la caliza sobre el proceso de calcinación de periodo variable a 700o C y 640 mm Hg de presión barométrica cuando se utiliza carbón vegetal como coadyuvante energético*. Trabajo de graduación de Ing. Químico. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 1996. 75 p.
2. BOYNTON, Robert. *Chemistry and technology of lime and limestone*. 2a ed. USA: ohn Wiley @ Sons, 1980. 592 p.
3. *Calcinación de caliza*. [en línea]. <<http://www.scribd.com/doc/98840818/Calcinacion-de-La-Caliza#scribd>> [Consulta: abril de 2015].
4. MAY CARRILLO, José Gabriel. *Evaluación de la eficiencia de la conversión de piedra caliza a cal viva por efecto de incorporación de carbón vegetal, mediante el procesamiento a diferentes tamaños de partícula, tiempos de calcinación y porcentajes de carbón agregados para una presión de 640 mm Hg y una temperatura de 750 °C*. Trabajo de graduación de Ing. Químico. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 1997. 56 p.

5. *Modelización de un proceso de calcinación en un horno rotatorio.* [en línea]. <http://www.ucbcba.edu.bo/Publicaciones/revistas/actanova/documentos/v1n3/v1.n3.vargas.pdf>. [Consulta: abril de 2015].
6. MORALES DIAZ, María. *Evaluación de la eficiencia en el grado de conversión de piedra caliza a cal viva por efecto de incorporación de carbón vegetal, mediante el procesamiento a diferentes temperaturas y tiempos de calcinación.* Trabajo de graduación de Ing. Químico. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 1990. 38 p.
7. PÉREZ OROZCO, Edy. *Evaluación a nivel de Laboratorio del efecto en el grado de conversión de piedra caliza a cal viva por la adición de tres tipos de carbón vegetal con diferente poder calorífico, realizada a diferentes temperaturas y tiempos de calcinación para una presión atmosférica de 640 mm Hg.* Trabajo de graduación de Ing. Químico. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 1991. 56 p.
8. *Proceso productivo de la cal.* [en línea]. <http://anfacal.org/pages/proceso-productivo-de-la-cal.php> [Consulta: abril de 2015].

APÉNDICES

Apéndice 1. Tabla de requisitos académicos



Apéndice 2. Diagrama de Ishikawa

