



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

**EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE LA ELECTROREOLOGÍA DEL ALMIDÓN A
TRAVÉS DE CAMPOS ELÉCTRICOS INDUCIDOS POR UNA CORRIENTE ELÉCTRICA**

Marvin Danilo Ajcip Xuyá

Asesorado por el Ing. Jorge Emilio Godínez Lemus

Guatemala, febrero de 2017

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE LA ELECTROREOLOGÍA DEL ALMIDÓN A
TRAVÉS DE CAMPOS ELÉCTRICOS INDUCIDOS POR UNA CORRIENTE ELÉCTRICA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

MARVIN DANILO AJCIP XUYÁ

ASESORADO POR EL Ing. JORGE EMILIO GODÍNEZ LEMUS

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO QUÍMICO

GUATEMALA, FEBRERO DE 2017

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. Jurgen Adoni Ramírez Ramírez
VOCAL V	Br. Oscar Humberto Galicia Nuñez
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
EXAMINADOR	Ing. Adolfo Narciso Gramajo Antonio
EXAMINADOR	Ing. César Ariel Villela Rodas
EXAMINADOR	Ing. Jorge Mario Estrada Asturias
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 DEL COMPORTAMIENTO DE LA ELECTROREOLOGÍA DEL ALMIDÓN A TRAVÉS DE CAMPOS ELÉCTRICOS INDUCIDOS POR UNA CORRIENTE ELÉCTRICA

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Química, con fecha 15 de junio de 2015.

MARVIN DANILO AJCIP XUYÁ

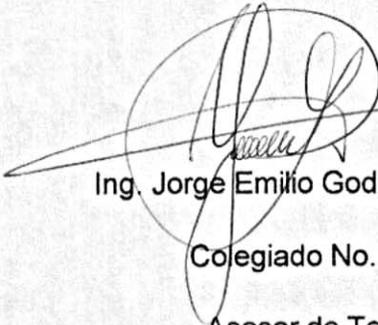
Guatemala octubre de 2016

Ing. Carlos Salvador wong Davi:
Director de Escuela de Ingeniería Química
Facultad de Ingeniería USAC

Por este medio me dirijo a usted para informarle que he revisado el Trabajo de Graduación titulado **"EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE LA ELECTROREOLOGÍA DEL ALMIDÓN A TRAVÉS DE CAMPOS ELÉCTRICOS INDUCIDOS POR UNA CORRIENTE ELÉCTRICA"**. Elaborado por el estudiante de Ingeniería Química, **MARVIN DANILO AJCIP XUYÁ** identificado con el número de carné **2010-20476**, y considero que cumple los requisitos establecidos por la escuela. Por lo tanto apruebo para que pueda ser presentado.

Agradezco de antemano su colaboración.

Atentamente,



Ing. Jorge Emilio Godínez Lemus
Colegiado No. 874
Asesor de Tesis

Ing. Jorge Emilio Godínez Lemus
INGENIERO QUÍMICO
Colegiado 874



Guatemala, 18 de noviembre de 2016.
 Ref. EIQ.TG-IF.067.2016.

Ingeniero
 Carlos Salvador Wong Davi
 DIRECTOR
 Escuela de Ingeniería Química
 Facultad de Ingeniería

Estimado Ingeniero Wong:

Como consta en el registro de evaluación del informe final EIQ-PRO-REG-007 correlativo **029-2015** 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: **Marvin Danilo Ajcip Xuyá**.
 Identificado con número de carné: **2010-20476**.
 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 DEL COMPORTAMIENTO DE LA ELECTROREOLOGÍA DEL ALMIDÓN A TRAVÉS DE CAMPOS ELÉCTRICOS INDUCIDOS POR UNA CORRIENTE ELÉCTRICA

El Trabajo de Graduación ha sido asesorado por el Ingeniero Químico: **Jorge Emilio Godínez Lemus**.

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. Pablo Enrique Morales Paniagua
 COORDINADOR DE TERNA
 Tribunal de Revisión
 Trabajo de Graduación



C.c.: archivo



Ref.EIQ.TG.004.2017

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, **MARVIN DANILO AJCIP XUYÁ** titulado: **"EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE LA ELECTROREOLOGÍA DEL ALMIDÓN A TRAVÉS DE CAMPOS ELÉCTRICOS INDUCIDOS POR UNA CORRIENTE ELÉCTRICA"**. 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. Carlos Salvador Wong Davi
Director
Escuela de Ingeniería Química

Guatemala, febrero 2017

Cc: Archivo
CSWD/ale

Universidad de San Carlos
de Guatemala

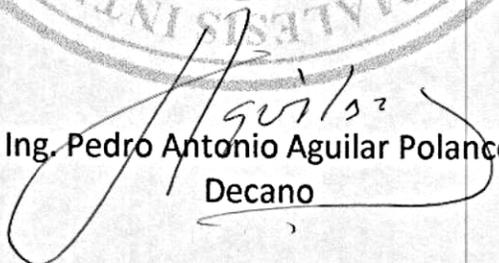


Facultad de Ingeniería
Decanato

DTG. 090.2017

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 DEL COMPORTAMIENTO DE LA ELECTROREOLOGÍA DEL ALMIDÓN A TRAVÉS DE CAMPOS ELÉCTRICOS INDUCIDOS POR UNA CORRIENTE ELÉCTRICA**, presentado por el estudiante universitario: **Marvin Danilo Ajcip Xuyá**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:


Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
Decano

Guatemala, febrero de 2017

/gdech



ACTO QUE DEDICO A:

Dios

Por todas las bendiciones que me ha brindado, la sabiduría, paciencia e inteligencia y sobre todo la salud de mi familia y de todos los que me rodean.

Mi padre

German Ajcip Oxcal por ser la persona quien me guío durante todo este tiempo, por el apoyo y comprensión en cada decisión tomada para llegar a esta meta, por ser mi ejemplo a seguir, por ser mi mejor consejero y amigo; gracias por inculcarme todos los valores que hoy me hacen una buena persona, que se siente bendecido y agradecido por tener un padre muy trabajador, es un orgullo ser tu hijo.

Mi madre

Etelvina Xuyá por darme la vida, por todo su amor y cariño, por el apoyo en cada una de las etapas de mi vida, por brindarme muchos momentos de alegría y tenerme mucha paciencia.

Mis hermanos

German Adolfo Ajcip Xuyá, por brindarme su apoyo y confianza, a quien yo quiero como a un padre porque siempre ha estado pendiente del bienestar de cada uno de los miembros de la familia y sobre todo guiarme para ser una mejor persona; Elvis Manuel Ajcip Xuyá, por ser un buen hermano y apoyarme en todo momento y brindarme la confianza necesaria para llegar a cumplir esta meta; Sergio Orlando Ajcip Xuyá, por apoyarme y demostrarme su cariño y confianza, para alcanzar esta meta, sobre todo por ser mi mejor amigo de la infancia; Flor de María Pocón por ser la cuñada que adopte como una hermana ya que siempre me brinda su apoyo y confianza para lograr esta meta.

Mis sobrinos

Daniela Fernanda Ajcip Pocón, Sofia Alejandra Ajcip Pocón, Ericka Alexandra Ajcip Pocón, Manuel Andres Ajcip López y Gabriela Ajcip López por darle un mejor sentido a mi vida y regalarme tantas alegrías con cada una de sus travesuras y ocurrencias, y por ser una de las principales razones para lograr esta meta

Mis amigos

Por estar siempre al pendiente del avance en la carrera y demostrarme su apoyo, confianza, paciencia y sobre todo acompañarme en cada una de las etapas de alegría, preocupación, desesperación, frustración y diversión que fueron parte de esta meta, en especial a : Edy Payes, Marco Pérez, Kevin Carias, Jose Zuñiga, Miguel Martinez, Jeaffry Cheesman, Gerson Cuzco, Luis Bucaro, Héctor Mendoza, Daniel Mendoza, Sandra Ayala, Stefanie Montenegro, María Jose Ponce, Karen Gatica, Selvyin Solórzano, Eduardo De Paz, Gabriel Solórzano, Pablo Méndez, Luis Linares, Mario Arévalo, Pedro García, Fernando Villagrán, Mildred Ola, Andrea Morales, Cindy Perez, Cecilia Vaquero, Diana Cermeño, Katherine Callejas, Alexandra García,

AGRADECIMIENTOS A:

Universidad de San Carlos de Guatemala	Por ser mi alma máter, por brindarme la educación, valores con sentido social y la oportunidad de conocer a grandes personas dentro de esta institución. Orgulloso de ser sancarlista.
Facultad de Ingeniería	Por darme la oportunidad de crecer académicamente y formarme como profesional de la ingeniería.
La Escuela de Ingeniería Química	Por las enseñanzas brindadas acerca de cada uno de los roles que desempeña un ingeniero químico en cada una de las industrias, así como, los conocimientos básicos y necesarios para llegar a ser un buen ingeniero químico.
Ing. Jorge Emilio Godinez Lemus	Por compartir su conocimiento y apoyarme en la realización de este trabajo de graduación que me permitió aplicar los conocimientos adquiridos durante la carrera.

**El Departamento de
Química General**

Por haberme dado la oportunidad de demostrar y aplicar mis conocimientos, desempeñándome como auxiliar de cátedra e instructor de laboratorio y la experiencia docente que me orientó a ser mejor persona y profesional. En especial a la Dra. Casta Zeceña, Inga. Tannia de León, Inga. Adela Marroquín y todos mis compañeros de trabajo por haberme brindado su apoyo, confianza conocimientos y sobre todo una gran amistad y relación laboral que fue parte de mi formación como profesional y que esta meta no hubiese sido posible sin ustedes.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	V
LISTA DE SÍMBOLOS	VII
GLOSARIO	IX
RESUMEN	XI
OBJETIVOS.....	XIII
HIPÓTESIS.....	XV
INTRODUCCIÓN	XVII
1. ANTECEDENTES	1
2. MARCO TEÓRICO.....	3
2.1. Fluido.....	3
2.2. Características de los fluidos.....	4
2.2.1. Movimiento no acotado de las moléculas	4
2.2.2. Compresibilidad.....	4
2.2.3. Viscosidad	4
2.2.4. Distancia molecular grande	5
2.2.5. Fuerzas de Van der Waals	5
2.2.6. Ausencia de memoria de forma	5
2.3. Propiedades de los fluidos.....	6
2.3.1. Propiedades primarias o termodinámicas.....	6
2.3.1.1. Presión.....	6
2.3.1.2. Densidad.....	6
2.3.1.3. Temperatura	6
2.3.1.4. Energía interna	7

	2.3.1.5.	Entalpía	7
	2.3.1.6.	Entropía.....	7
	2.3.1.7.	Calor específico.....	7
	2.3.1.8.	Coeficiente de viscosidad.....	8
	2.3.1.9.	Conductividad térmica.....	8
2.3.2.		Propiedades secundarias.....	8
	2.3.2.1.	Viscosidad.....	8
	2.3.2.2.	Tensión superficial.....	9
	2.3.2.3.	Compresibilidad.....	9
	2.3.2.4.	Capilaridad	10
2.4.		Clasificación de los fluidos	10
	2.4.1.	Fluido newtoniano	11
	2.4.2.	Fluido no newtoniano	12
	2.4.2.1.	Independiente del tiempo	13
		2.4.2.1.1. Seudoplásticos o tixotrópicos	13
		2.4.2.1.2. Fluidos dilatantes	13
		2.4.2.1.3. Fluidos de Bingham.....	13
	2.4.2.2.	Dependiente del tiempo.....	14
		2.4.2.2.1. Fluidos magnetorreológicos.....	14
		2.4.2.2.2. Fluidos electrorreológicos.....	15
2.5.		El almidón.....	16
	2.5.1.	Componentes del almidón.....	17
	2.5.2.	Forma de los granos de almidón	19
	2.5.3.	Hidratación	20
	2.5.4.	Retrogradación.....	21
	2.5.5.	Gelatinización.....	22

2.5.6.	Dextrinización	23
2.5.7.	Sacarificación	24
2.6.	Prueba de yodo	24
3.	DISEÑO METODOLÓGICO	27
3.1.	Variables.....	27
3.2.	Delimitación de campo de estudio	30
3.3.	Recursos humanos disponibles.....	31
3.4.	Recursos materiales disponibles	31
3.4.1.	Material a estudiar	31
3.4.2.	Reactivos.....	31
3.4.3.	Cristalería e instrumentos de medición.....	31
3.4.4.	Equipo	32
3.5.	Técnica cualitativa o cuantitativa	32
3.6.	Recolección y ordenamiento de la información	33
3.6.1.	Elaboración de la celda	33
3.6.2.	Elaboración de la solución almidón-agua	33
3.6.3.	Determinación de la viscosidad según los cambios de flujo eléctrico.....	34
3.6.4.	Determinación de no variabilidad química en el almidón	34
3.7.	Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información	36
3.8.	Análisis estadístico	39
3.8.1.	Diseño experimental	39
3.8.2.	Medidas de tendencia central	40
3.8.2.1.	Media aritmética	40
3.8.3.	Medidas de dispersión	40
3.8.3.1.	Varianza.....	42

3.8.3.2.	Desviación estándar	42
4.	RESULTADOS.....	43
5.	INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS	49
	CONCLUSIONES.....	51
	RECOMENDACIONES.....	53
	BIBLIOGRAFÍA.....	55
	APÉNDICES.....	57

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1. Clasificación de los fluidos	11
2. Gradiente de velocidad de un fluido en movimiento.....	12
3. Granos de almidón	20
4. Gelificación.....	23
5. Diagrama de procedimiento experimental.....	35
6. Equipo para evaluación de viscosidad	43
7. Viscosidad en función de la corriente.....	48

TABLAS

I. Variables presentes en el proceso de elaboración de la celda.....	28
II. En la elaboración de la solución de almidón	28
III. Determinación de propiedades a temperatura ambiente.....	29
IV. Determinación de los cambios en la viscosidad.....	29
V. Cantidades de sustancia utilizadas para las soluciones.....	36
VI. Propiedades de las soluciones antes de la evaluación	36
VII. Viscosidades y corrientes obtenidas en cada muestra.....	37
VIII. Propiedades de las soluciones después de la evaluación.....	38
IX. Resultados obtenidos en la prueba de yodo	38
X. Arreglo rectangular para tratamientos con tres réplicas	39
XI. Cantidades de sustancia utilizadas para las soluciones a estudiar	44
XII. Propiedades de las soluciones antes de la evaluación del comportamiento electroreológico	44
XIII. Prueba de yodo antes de evaluar el comportamiento electroreológico ...	45

XIV.	Viscosidades y corrientes obtenidas en cada prueba electroreológica realizada..	46
XV.	Propiedades de las soluciones después de la evaluación del comportamiento electroreológico	47
XVI.	Resultados obtenidos en la prueba de yodo despues de evaluar el comportamiento electroreológico	47
XVII.	Modelos matemáticos determinados.....	48

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
A	Amperios
cm	centímetro
cP	centípoise
I	corriente
τ	esfuerzo cortante
°C	grados Celsius
g	gramos
kPa	kilopascales
μ	micro
mL	mililitros
mS	milisiemens
Pa*s	Pascales por segundo
T	Temperatura
V	Voltios

GLOSARIO

Cristalización	Proceso mediante el cual las moléculas se ordenan de un modo natural formando un retículo repetitivo que se le denomina cristal.
Dextrinas	Son un grupo de oligosacáridos de poco peso molecular producidas por la hidrólisis del almidón.
FER	Fluido electrorreológico, suspensión con la capacidad de variar la viscosidad debido a una corriente eléctrica.
Hidrólisis	Es una reacción química que se da en una molécula y esta se divide en sus átomos y forma su respectiva especie química.
Polisacárido	Son polímeros cuyos constituyentes son monosacáridos, las cuales se unen repetitivamente mediante enlaces glucosídicos.

RESUMEN

En la investigación se evaluaron los cambios que sufre el almidón debido a la presencia de una corriente eléctrica con el objetivo de establecer y confirmar la propiedad electroreologica del almidón.

Se determinó el comportamiento de la viscosidad en función del flujo eléctrico, utilizando distintas concentraciones de almidón en solución, lo que permitió establecer la tendencia de esta propiedad; el comportamiento de dicha propiedad es característico de fluidos hidráulicos utilizados en la industria de amortiguadores y sistemas hidráulicos.

La recolección y análisis de los datos se realizó mediante técnicas cualitativas y cuantitativas, utilizando como fundamento de los métodos de evaluación. Los resultados obtenidos se analizaron, utilizando herramientas gráficas. Asimismo, se realizó un análisis estadístico de los datos por medio de un modelo aleatorio con arreglo combinatorio. Aplicando una experimentación factorial se evaluaron tres soluciones de almidón gelatinizadas; se realizaron tres repeticiones de cada ensayo con el resultado de nueve combinaciones experimentales.

Para el estudio y evaluación de esta propiedad se utilizó un equipo de medición de viscosidad y una celda electroquímica que permitió realizar cambios en los flujos eléctricos, los cuales fueron aplicados a través de las distintas soluciones de almidón; se evaluó y determinó el comportamiento del mismo a través de gráficos que permitieron establecer modelos matemáticos que describan el comportamiento de la electroreología del almidón.

OBJETIVOS

General

Evaluar el comportamiento de la viscosidad del almidón a través de cambios de flujo eléctrico, así como la tendencia del mismo a través de un modelo matemático que permita definir comportamiento electroreológico del almidón a distintas concentraciones.

Específicos

1. Elaborar una celda que permita realizar cambios de corrientes eléctricas que pasan a través del fluido.
2. Comparar el comportamiento de la electroreología con respecto a las diferentes concentraciones de almidón en solución.
3. Determinar si existe degradación del almidón debido a las corrientes eléctricas involucradas en el estudio.
4. Determinar si existen variaciones de temperatura debido a la corriente eléctrica.
5. Elaborar un gráfico que describa el comportamiento de la propiedad electroreológica del almidón con respecto a los flujos eléctricos.

Hipótesis

Hipótesis de trabajo

Es posible modificar la viscosidad de una solución de almidón a partir de la aplicación de campos eléctricos inducidos por una corriente eléctrica, utilizando una celda electroquímica de electrodos inertes para no alterar la composición del almidón.

INTRODUCCIÓN

Un fluido electrorreológico está formado por un medio continuo generalmente un líquido aislante y un medio disperso que puede ser sólido o líquido. En el primer caso son llamadas suspensiones electrorreológicas (ER) y en el segundo emulsiones ER. La particularidad del medio disperso es que sea capaz de polarizar en presencia de un campo eléctrico.

Las propiedades reológicas (viscosidad, esfuerzo de cedencia, módulo de corte, etc.) de un fluido electrorreológico pueden sufrir cambios reversibles de varios órdenes de magnitud bajo la acción de un campo eléctrico externo, con intensidades que alcanzan incluso varios kilovoltios por milímetro. Las propiedades de flujo pueden ser fácilmente controladas (desde un líquido viscoso hasta un sólido elástico) y, por esa razón, los FER pueden ser usados como interfaces eléctricas y mecánicas en varias áreas de la industria, por ejemplo, en la industria automotriz para embragues, frenos y sistemas de amortiguamiento. También pueden ser usados en estructuras de robots y en aplicaciones médicas, ópticas, militares y en procesos de impresión.

Su aplicación potencial ha generado un gran interés de los industriales y académicos desde que el efecto ER fue descrito por primera vez por Winslow en 1949. Hoy en día, existe un cúmulo importante de literatura acerca del mecanismo responsable del efecto ER y del diseño de aplicaciones industriales de los FER.

1. ANTECEDENTES

No hay estudios realizados en Guatemala acerca de los fluidos electroreológicos (FER).

En 2 002 se llevó a cabo una investigación de fluidos electroreológicos en la Universidad Veracruzana (UV) por el investigador Leonardo Rejón García, maestro en ingeniería química por la Universidad Autónoma Metropolitana, unidad Iztapalapa y doctor en ciencias químicas por la Universidad Autónoma de México (UNAM). Es miembro del Sistema Nacional de Investigadores nivel 1 investigador de tiempo completo desde 1 989 a la fecha en el instituto de investigaciones eléctricas.

En 2 003 se realizaron investigaciones sobre el comportamiento de la reología de fluidos a través de las variaciones de campos eléctricos por Octavio Manero Brito, ingeniero químico y maestro en ingeniería química por la Facultad de Química de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), doctor en matemáticas aplicadas, reología (Ph.D) por la Universidad de Gales, Gran Bretaña. Desde 1 975 labora en el Instituto de Investigaciones en Materiales (IIM) de la UNAM, jefe del Departamento de Polímeros del IIM del que es investigador titular C.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Fluido

Se denomina fluido a un tipo de medio continuo formado por alguna sustancia entre cuyas moléculas sólo hay una fuerza de atracción débil. La propiedad definitoria es que los fluidos pueden cambiar de forma sin que aparezca en su seno fuerzas resitutivas tendentes a recuperar la forma original, lo cual constituye la principal diferencia con un sólido deformable donde sí hay fuerzas resitutivas.

Un fluido es un conjunto de partículas que se mantienen unidas entre sí por fuerzas cohesivas débiles y las paredes de un recipiente; el término engloba a los líquidos y los gases. En el cambio de forma de un fluido la posición que toman sus moléculas varía, ante una fuerza aplicada sobre ellos, pues justamente fluyen. Los líquidos toman la forma del recipiente que los aloja, manteniendo su propio volumen; mientras que los gases carecen tanto de volumen como de forma propia. Las moléculas no cohesionadas se deslizan en los líquidos y se mueven con libertad en los gases. Los fluidos están conformados por los líquidos y los gases, siendo los segundos mucho menos viscosos, casi fluidos ideales.

2.2. Características de los fluidos

2.2.1. Movimiento no acotado de las moléculas

Son infinitamente deformables, los desplazamientos que un punto material o molécula puede alcanzar en el seno del fluido no están determinados (esto contrasta con los sólidos deformables, donde los desplazamientos están mucho más limitados). Esto se debe a que sus moléculas no tienen una posición de equilibrio como sucede en los sólidos donde la mayoría de moléculas ejecutan pequeños movimientos alrededor de sus posiciones de equilibrio.

2.2.2. Compresibilidad

Todos los fluidos son compresibles en cierto grado. No obstante, los líquidos son altamente incompresibles a diferencia de los gases que son altamente compresibles. Sin embargo, la compresibilidad no diferencia a los fluidos de los sólidos ya que la compresibilidad de los sólidos es similar a la de los líquidos.

2.2.3. Viscosidad

La viscosidad en los gases es mucho menor que en los líquidos. La viscosidad hace que la velocidad de deformación puede aumentar las tensiones en el seno del medio continuo. Esta propiedad acerca a los fluidos viscosos a los sólidos viscoelásticos.

2.2.4. Distancia molecular grande

Esta es una de las características de los fluidos en la cual sus moléculas se encuentran separadas a una gran distancia en comparación con los sólidos y esto le permite cambiar muy fácilmente su velocidad debido a fuerzas externas y facilita su compresión.

2.2.5. Fuerzas de Van der Waals

Esta fuerza fue descubierta por el físico holandés Johannes Van der Waals; el físico encontró la importancia de considerar el volumen de las moléculas y las fuerzas intermoleculares y en la distribución de cargas positivas y negativas en las moléculas estableciendo la relación entre presión, volumen y temperatura de los fluidos.

2.2.6. Ausencia de memoria de forma

Toman la forma del recipiente que lo contenga, sin que existan fuerzas de recuperación elástica como en los sólidos. Debido a su separación molecular, los fluidos no poseen una forma definida, por tanto, no se puede calcular su volumen o densidad a simple vista; para esto se introduce el fluido en un recipiente en el cual toma su forma y así se puede calcular su volumen y densidad, esto facilita su estudio. Esta última propiedad es la que diferencia más claramente a los fluidos (líquidos y gases) de sólidos deformables.

2.3. Propiedades de los fluidos

Las propiedades de un fluido son las que definen su comportamiento y características, tanto en reposo como en movimiento. Existen propiedades primarias y propiedades secundarias del fluido.

2.3.1. Propiedades primarias o termodinámicas

Las propiedades primarias son nueve magnitudes auténticas propiedades, que se determinan por la condición termodinámica o estado del fluido, ya que las propiedades termodinámicas describen el estado del sistema, esto es, una porción de materia de identidad conocida que interactúa con su entorno.

2.3.1.1. Presión

La presión es la magnitud escalar que relaciona la fuerza con la superficie sobre la cual actúa, es decir, el equivalente a la fuerza que actúa sobre la superficie.

2.3.1.2. Densidad

La densidad es la magnitud escalar referida a la cantidad de masa en un determinado volumen de una sustancia.

2.3.1.3. Temperatura

La temperatura es una magnitud escalar relacionada con la energía interna de un sistema termodinámico, definida por la ley cero de la termodinámica, relacionada directamente con la parte de la energía interna

conocida como energía cinética que es la energía asociada a los movimientos de las partículas del sistema, sea en un sentido traslacional, rotacional o en forma de vibraciones.

2.3.1.4. Energía interna

La energía interna es el reflejo de la energía a escala macroscópica, es decir, que es la suma de la energía cinética interna y la energía potencial interna.

2.3.1.5. Entalpía

La entalpía es una magnitud termodinámica cuya variación expresa una medida de la cantidad de energía absorbida o cedida por un sistema termodinámico, es decir, la cantidad de energía que un sistema intercambia con su entorno.

2.3.1.6. Entropía

La entropía es una magnitud física que calcula aquella energía que existe en un determinado objeto o elemento pero que no es útil para realizar un trabajo o esfuerzo, es decir, que es la energía que no es utilizable ante el advenimiento de un proceso termodinámico.

2.3.1.7. Calor específico

Es una magnitud física que se define como la cantidad de calor que hay que suministrar a la unidad de masa de una sustancia o sistema termodinámico

para elevar su temperatura en una unidad. En general, el valor del calor específico depende del valor de la temperatura inicial.

2.3.1.8. Coeficiente de viscosidad

El coeficiente de viscosidad es la fuerza por unidad de superficie necesaria para mantener una diferencia de velocidad de un centímetro por segundo entre dos capas paralelas separadas por un centímetro.

2.3.1.9. Conductividad térmica

La conductividad térmica es una propiedad física de los materiales que mide la capacidad de conducción de calor. En otras palabras, la conductividad térmica es también la capacidad de una sustancia de transferir la energía cinética de sus moléculas a otras adyacentes o a sustancias con las que está en contacto.

2.3.2. Propiedades secundarias

Las propiedades secundarias son otras magnitudes que caracterizan el comportamiento específico de cada fluido. La más importante de estas es la viscosidad que relaciona el esfuerzo o tensión local en un fluido en movimiento con la velocidad de deformación de las partículas fluidas.

2.3.2.1. Viscosidad

La viscosidad de un fluido es una medida de su resistencia a las deformaciones graduales producidas por tensiones cortantes o tensiones de tracción. La viscosidad se corresponde con el concepto informal de espesor.

La viscosidad es una propiedad física característica de todos los fluidos que emerge de las colisiones entre las partículas del fluido que se mueven a diferentes velocidades, provocando una resistencia a su movimiento. Cuando un fluido se mueve forzado por un tubo, las partículas que componen el fluido se mueven más rápido cerca del eje longitudinal del tubo, y más cerca de las paredes. Por lo tanto, es necesario que exista una tensión cortante para sobrepasar la resistencia de fricción entre las capas del líquido y que el fluido se siga moviendo por el tubo. Para un mismo perfil radial de velocidades, la tensión requerida es proporcional a la viscosidad del fluido.

2.3.2.2. Tensión superficial

Es la fuerza que actúa tangencialmente por unidad de longitud en el borde de una superficie libre de un líquido en equilibrio y que tiende a contraer dicha superficie. Las fuerzas cohesivas entre las moléculas de un líquido son las responsables del fenómeno conocido como tensión superficial.

2.3.2.3. Compresibilidad

La compresibilidad es un número positivo, lo que significa que cuando se aumenta la presión sobre el sistema, este disminuye su volumen.

El caso contrario se puede observar en sistemas inestables, por ejemplo, en un sistema químico cuando la presión inicia una explosión. Los sólidos a nivel molecular son muy difíciles de comprimir, ya que las moléculas que tienen los sólidos están muy pegadas y existe poco espacio libre entre ellas como para acercarlas sin que aparezcan fuerzas de repulsión fuertes. Esta situación contrasta con la de los gases, los cuales tienen sus moléculas muy separadas y que en general son altamente compresibles bajo condiciones de presión y

temperatura normales. Los líquidos bajo condiciones de temperatura y presión normales son también bastante difíciles de comprimir aunque presenta una pequeña compresibilidad mayor que la de los sólidos.

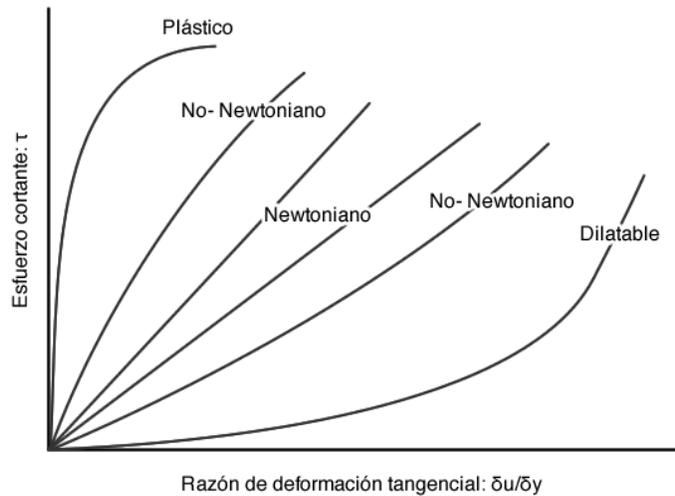
2.3.2.4. Capilaridad

La capilaridad es una propiedad de los líquidos que dependen de su tensión superficial la cual depende de la cohesión del líquido y que le confiere la capacidad de subir o bajar por un tubo capilar.

2.4. Clasificación de los fluidos

El estudio de la deformación y las características del flujo de las sustancias se denomina reología: campo que estudia la viscosidad de los fluidos. Es importante saber si un fluido es newtoniano o no newtoniano.

Figura 1. **Clasificación de los fluidos**



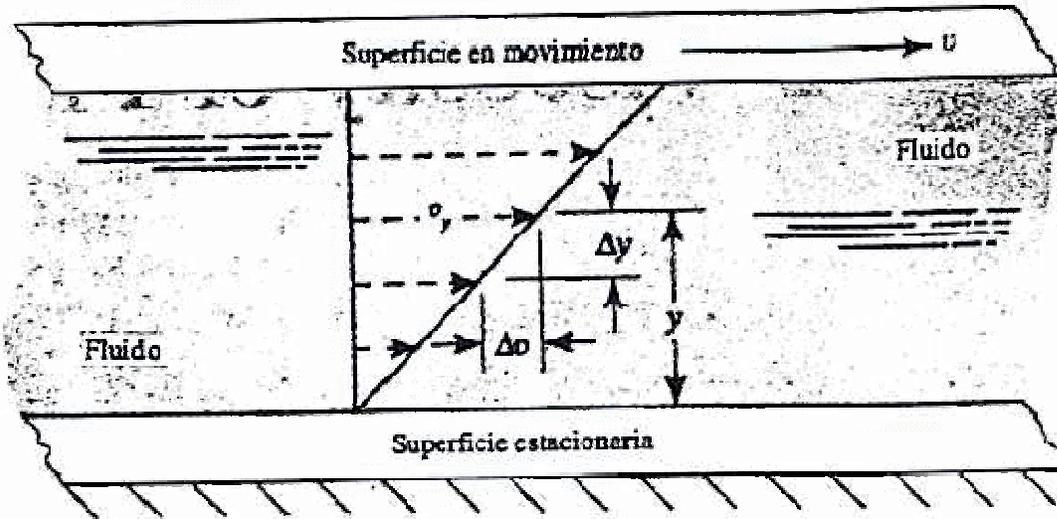
Fuente: *Clasificación de los fluidos*.

https://clasificaciondelosfluidos.blogspot.com/2009_1_11.archive.html. Consulta: 2 de mayo de 2015.

2.4.1. **Fluido newtoniano**

A cualquier fluido que se comporte de acuerdo con la ecuación que indica que el esfuerzo cortante es directamente proporcional al gradiente de velocidad que enuncia de la siguiente forma matemática: $\tau = n(\Delta v / \Delta y)$, donde la constante de proporcionalidad n se le denomina viscosidad dinámica del fluido.

Figura 2. **Gradiente de velocidad de un fluido en movimiento**



Fuente: MOTT, Robert L., *Mecánica de fluidos*. p.27

2.4.2. **Fluido no newtoniano**

Un fluido no newtoniano es aquel fluido cuya viscosidad varía con la temperatura y la tensión cortante que se le aplica. Como resultado, un fluido no newtoniano no tiene valor de viscosidad definido y constante, a diferencia de un fluido newtoniano. Estos fluidos se pueden caracterizar mejor mediante otras propiedades reológicas, propiedades que tienen que ver con la relación entre el esfuerzo y los tensores de tensiones bajo diferentes condiciones de flujo, tales como condiciones de esfuerzo cortante.

Es importante clasificar los fluidos no newtonianos en independientes del tiempo o dependientes del tiempo. Como su nombre lo dice, los fluidos independientes tienen una viscosidad que no varía con el tiempo a cualquier esfuerzo cortante dado. Sin embargo, la viscosidad de los fluidos dependientes del tiempo cambia si varía este.

2.4.2.1. Independiente del tiempo

2.4.2.1.1. Seudoplásticos o tixotrópicos

La gráfica del esfuerzo cortante versus el gradiente de velocidad queda por arriba de la línea recta (de pendiente constante) de los fluidos newtonianos, como se observa en la figura 1. La curva comienza con mucha pendiente, lo cual indica una viscosidad aparente elevada. Después, la pendiente disminuye con el incremento del gradiente de velocidad. Ejemplos de estos fluidos son el plasma sanguíneo, polietileno fundido, látex, almíbares, adhesivos, melazas y tintas.

2.4.2.1.2. Fluidos dilatantes

La gráfica del esfuerzo cortante versus el gradiente de velocidad queda por debajo de la línea recta para fluidos newtonianos. La curva comienza con poca pendiente, lo que indica viscosidad aparente baja. Después, la pendiente se incrementa conforme crece el gradiente de velocidad. Algunos ejemplos de fluidos dilatantes son los compuestos acuosos con concentraciones altas de sólidos: el almidón de maíz en etilenglicol, almidón en agua y el dióxido de titanio, un ingrediente de las pinturas.

2.4.2.1.3. Fluidos de Bingham

En ocasiones recibe el nombre de fluidos de inserción, y requieren la aplicación de un nivel significativo de esfuerzo cortante antes de que comience el flujo, como se ilustra en la figura 1. Una vez que el flujo se inicia, la pendiente de la curva es lineal, en esencia, lo que indica una viscosidad aparente

constante. Algunos ejemplos de los fluidos de Bingham son el chocolate, salsa catsup, mostaza, mayonesa, pasta de dientes, pintura, asfalto, ciertas grasas y suspensiones de agua y ceniza o fango del drenaje.

2.4.2.2. Dependiente del tiempo

Los fluidos que dependen del tiempo son muy difíciles de analizar porque la viscosidad aparente varía con el tiempo, así como con el gradiente de velocidad y la temperatura. Ejemplos de fluidos que dependen del tiempo son ciertos petróleos crudos a temperaturas bajas, tinta para impresoras, nylon, ciertas gelatinas, mezcla de harinas y varias soluciones de polímeros. Dichos fluidos también son tixotrópicos.

2.4.2.2.1. Fluidos magnetorreológicos

Son similares a los fluidos ER, y contienen partículas suspendidas en una base de fluido. Sin embargo, en este caso, las partículas son polvos finos de fierro. El fluido base puede ser un aceite de petróleo, de silicón o agua. Cuando no hay un campo magnético presente, el fluido MR se comporta en forma muy parecida a otros, con una viscosidad que varía entre 0.2 Pa*s y 0.3 Pa*s a 25°C. La presencia de un campo magnético hace que el fluido MR se convierta, virtualmente, en un sólido tal que soporte un esfuerzo cortante de hasta 100kPa. El cambio se controla por medios electrónicos con mucha rapidez. Se vislumbran eventuales aplicaciones en amortiguadores de choques, embragues, frenos, amortiguadores de vibración, válvulas servo y en dispositivos de freno y bloqueo.

2.4.2.2.2. Fluidos electrorreológicos

Están en desarrollo fluidos que poseen propiedades únicas, controlables por medio de la aplicación de una corriente eléctrica. A veces se les conoce como fluidos ER y son suspensiones de partículas finas como almidón, polímeros y cerámicas, en un aceite no conductor (como el aceite mineral o silicón). Sino se le aplica corriente se comporta como otros líquidos. Pero si se les aplica, se convierte en un gel y se comportan más bien como un sólido. El cambio ocurre en menos de 1/1 000 s. Algunas aplicaciones potenciales de estos fluidos se les encuentra en la sustitución de válvulas convencionales, en embragues, en sistemas de suspensión para vehículos y maquinaria y en actuadores automáticos.

El cambio en la viscosidad aparente es dependiente del campo eléctrico aplicado, es decir, el potencial dividido por la distancia entre las placas. El cambio no es un simple cambio en la viscosidad, por lo tanto, estos fluidos son ahora conocidos como fluidos ER, en lugar de por el término más viejo Electro fluidos viscosos.

El efecto se describe mejor como una cizalla dependiente de la tensión de fluencia del campo eléctrico. Cuando se activa un fluido ER se comporta como un plástico de Bingham (un tipo de material viscoelástico), con un punto que está determinado por la intensidad de campo eléctrico de rendimiento. Después de que se alcanza el punto de fluencia, la cizalla de fluido como un fluido, es decir, la tensión de corte incremental es proporcional a la velocidad de cizalladura (en un fluido newtoniano no hay punto de fluencia y la tensión es directamente proporcional a la cizalladura).

Por lo tanto, la resistencia al movimiento del fluido se puede controlar mediante el ajuste del campo eléctrico aplicado. ER composición del fluido y la teoría fluidos ER son un tipo de fluido inteligente.

Un fluido electrorreológico simple puede hacerse mediante la mezcla de la harina de maíz en un aceite vegetal de luz o de aceite de silicona que es un ER.

Hay dos teorías principales para explicar el efecto: la tensión interfacial o teoría "puente de agua" y la teoría electrostática. La teoría puente de agua asume un sistema trifásico, las partículas contienen la tercera fase que es otro líquido (por ejemplo agua) miscible con el líquido de fase principal (por ejemplo, aceite). Con ningún campo eléctrico aplicado la tercera fase está fuertemente atraída por y se mantiene dentro de las partículas. Esto significa que el fluido ER es una suspensión de partículas que se comporta como un líquido. Cuando se aplica un campo eléctrico de la tercera fase es conducido a un lado de las partículas por electro ósmosis y se une partículas adyacentes entre sí para formar cadenas. Esta estructura de la cadena significa que el fluido ER se ha convertido en un sólido.

2.5. El almidón

El almidón es el principal polisacárido de reserva de la mayoría de los vegetales y la fuente de calorías más importante consumida por el ser humano.

Es un constituyente imprescindible en los alimentos en los que está presente, desde el punto de vista nutricional. Gran parte de las propiedades de la harina y de los productos de panadería y repostería pueden explicarse conociendo las características del almidón.

2.5.1. Componentes del almidón

El almidón está constituido por dos compuestos de diferente estructura:

Amilosa: está formada por α -D-glucopiranosas unidas por centenares o miles (normalmente de 300 a 3 000 unidades de glucosa) mediante enlaces α -(1 \rightarrow 4) en una cadena sin ramificar, o muy escasamente ramificada mediante enlaces α -(1 \rightarrow 6) . Esta cadena adopta una disposición helicoidal y tiene seis monómeros por cada vuelta de hélice. Suele constituir del 25 % al 30 % del almidón.

Amilopectina: representa el 70 %-75 % restante. También está formada por α -D-glucopiranosas, aunque en este caso conforma una cadena altamente ramificada en la que hay uniones α -(1 \rightarrow 4), como se indicó en el caso anterior, y muchos enlaces α -(1 \rightarrow 6) que originan lugares de ramificación cada doce monómeros. Su peso molecular es muy elevado ya que cada molécula suele reunir de 2.000 a 200.000 unidades de glucosa.

De todos modos, la proporción entre estos dos componentes varía según el organismo en el que se encuentre.

Los almidones de los cereales contienen pequeñas cantidades de grasas. Los lípidos asociados al almidón son, generalmente, lípidos polares, que necesitan disolventes polares tales como metanol-agua, para su extracción. Generalmente el nivel de lípidos en el almidón cereal está entre 0,5 % y 1 %. Los almidones no cereales no contienen esencialmente lípidos.

Desde el punto de vista químico, es una mezcla de dos polisacáridos muy similares: la amilosa y la amilopectina; contienen regiones cristalinas y no

cristalinas en capas alternadas. Puesto que la cristalinidad es producida por el ordenamiento de las cadenas de amilopectina, los gránulos de almidón céreo tienen parecido grado de cristalinidad que los almidones normales. La disposición radial y ordenada de las moléculas de almidón en un gránulo resulta evidente al observar la cruz de polarización (cruz blanca sobre un fondo negro) en un microscopio de polarización cuando se colocan los polarizadores a 90° entre sí. El centro de la cruz corresponde con el hilum, el centro de crecimiento del gránulo.

La amilosa es el producto de la condensación de D-glucopiranosas por medio de enlaces glucosídicos $\alpha(1,4)$ que establece largas cadenas lineales con 200-2 500 unidades y pesos moleculares hasta de un millón; es decir, la amilosa es una α -D-(1,4)-glucana cuya unidad repetitiva es la α -maltosa. Tiene la facilidad de adquirir una conformación tridimensional helicoidal en la que cada vuelta de hélice consta de seis moléculas de glucosa. El interior de la hélice contiene sólo átomos de hidrógeno, y es, por tanto, lipofílico; mientras que los grupos hidroxilo están situados en el exterior de la hélice. La mayoría de los almidones contienen alrededor del 25 % de amilosa. Los dos almidones de maíz comúnmente conocidos como ricos en amilosa que existen comercialmente poseen contenidos aparentes de masa alrededor del 52 % y del 70 %-75 %.

La amilopectina se diferencia de la amilosa en que contiene ramificaciones que le dan una forma molecular similar a la de un árbol; las ramas están unidas al tronco central (semejante a la amilosa) por enlaces α -D-(1,6), localizadas cada 15-25 unidades lineales de glucosa. Su peso molecular es muy alto ya que algunas fracciones llegan a alcanzar hasta 200 millones de daltones. La amilopectina constituye alrededor del 75 % de los almidones más comunes. Algunos almidones están constituidos exclusivamente por amilopectina y son

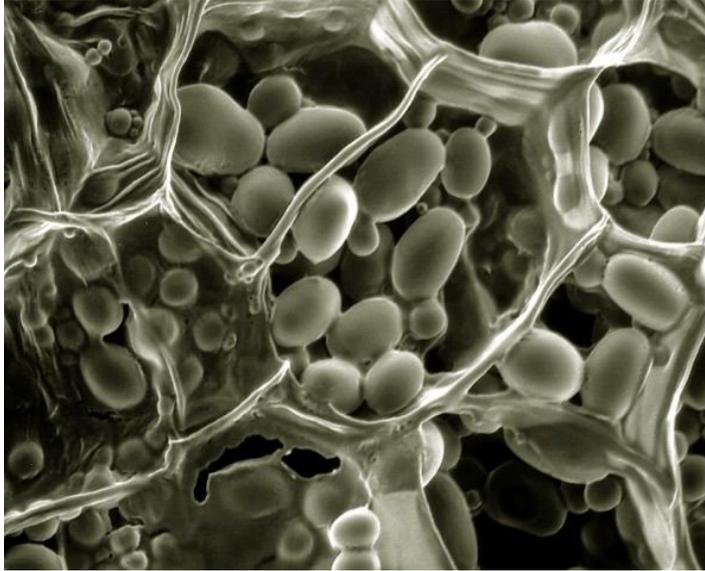
conocidos como céreos. La amilopectina de papa es la única que posee en su molécula grupos éster fosfato, unidos más frecuentemente en una posición O-6, mientras que el tercio restante lo hace en posición O-3.

2.5.2. Forma de los granos de almidón

Los tamaños y las formas de los granos de almidón de las células del endospermo, varía de un cereal a otro; en el trigo, centeno, cebada, maíz, sorgo y mijo, los granos son sencillos; mientras que los de arroz son compuestos. La avena tiene granos sencillos y compuestos predominando estos últimos.

La mayor parte de los granos de almidón de las células del endospermo prismático y central del trigo tiene dos tamaños: grande, 30-40 micras de diámetro; y pequeño, 1-5 micras; mientras que los de las células del endospermo sub-aleurona son principalmente de tamaño intermedio 6-15 micras de diámetro. En las células del endospermo sub-aleurona hay relativamente más proteína y los granos de almidón están menos apretados que en el resto del endospermo.

Figura 3. **Granos de almidón**



Fuente: http://es.wikipedia.org/wiki/Almid%C3%B3n#/media/File:Potato_starch.jpg

Consulta: 20 de abril de 2015.

2.5.3. Hidratación

Los gránulos de almidón son insolubles en agua fría, pero pueden contener agua al aumentar la temperatura; es decir, los gránulos de almidón sufren el proceso denominado gelatinización. Durante la gelatinización se produce la lixiviación de la amilosa, la gelatinización total se produce normalmente dentro de un intervalo más o menos amplio de temperatura, siendo los gránulos más grandes los que primero gelatinizan.

Los diversos estados de gelatinización pueden ser determinados. Estos estados son: la temperatura de iniciación (primera observación de la pérdida de birrefringencia), la temperatura media, la temperatura final de la pérdida de birrefringencia (TFPB, es la temperatura a la cual el último gránulo en el campo

de observación pierde su birrefringencia), y el intervalo de temperatura de gelatinización.

Al final de este fenómeno se genera una pasta en la que existen cadenas de amilosa de bajo peso molecular altamente hidratadas que rodean a los agregados, también hidratados, de los restos de los gránulos.

2.5.4. Retrogradación

Se define como la insolubilización y la precipitación espontánea, principalmente de las moléculas de amilosa, debido a que sus cadenas lineales se orientan paralelamente y reaccionan entre sí por puentes de hidrógeno a través de sus múltiples hidroxilos; se puede efectuar por diversas rutas que dependen de la concentración y de la temperatura del sistema. Si se calienta una solución concentrada de amilosa y se enfría rápidamente hasta alcanzar la temperatura ambiente se forma un gel rígido y reversible, pero si las soluciones son diluidas, se vuelven opacas y precipitan cuando se dejan reposar y enfriar lentamente.

La retrogradación está directamente relacionada con el envejecimiento del pan; las fracciones de amilosa o las secciones lineales de amilopectina que retrogradan, forman zonas con una organización cristalina muy rígida que requiere de una alta energía para que se rompan y el almidón gelatinice.

Las moléculas de amilosa y amilopectina están dispersas en la solución acuosa (gelatinizada) de almidón. Después del enfriamiento, las porciones lineales de varias moléculas se colocan paralelamente debido a la formación de enlaces H. Esto obliga a las moléculas de agua a apartarse y a permitir que las moléculas cristalicen juntas.

Cuando se disuelve el almidón en agua, la estructura cristalina de las moléculas de amilosa y amilopectina se pierde y estas se hidratan, formando un gel, es decir, se gelatiniza. Si se enfría este gel, e inclusive si se deja a temperatura ambiente por suficiente tiempo, las moléculas se reordenan, colocándose las cadenas lineales de forma paralela y formando puentes de hidrógeno. Cuando ocurre este reordenamiento, el agua retenida es expulsada fuera de la red (proceso conocido como sinéresis), es decir, se separan la fase sólida (cristales de amilosa y de amilopectina) y la fase acuosa (agua líquida).

2.5.5. Gelatinización

Consiste en calentar los gránulos de almidón en agua y separar la amilosa de la amilopectina (lixiviación).

Figura 4. **Gelificación**

Tipo de almidón	maíz	Trigo
Amilosa	27 %	24 %
Forma del gránulo	Angular poligonal, esférico	Esférico o lenticular
Tamaño	5-25 micras	11-41 micras
Temperatura de gelatinización	88°C-90°C	58°C-64°C
Características del gel	Tiene una viscosidad media, es opaco y tiene una tendencia muy alta a gelificar.	Viscosidad baja es opaca y tiene una alta tendencia a gelificar.

Fuente: BERMAN, M.J. y PEARSALL D. *At the crossroads: starch grain and phytolith analyses in lucayan prehistory*, p.181-203.

2.5.6. Dextrinización

Luego de la gelatinización del almidón, se procede a obtener polisacáridos de bajo y alto peso molecular (maltodextrinas) aplicando una hidrolización parcial.

Las dextrinas también pueden experimentar cambio de coloración cuando reaccionan con una solución de yoduro de potasio. La coloración obtenida va a depender del grado de hidrólisis de la molécula, (en este caso se trata de

macromoléculas las cuales están conformadas por una cantidad importante de átomos en su estructura).

2.5.7. Sacarificación

En esta etapa, se hidrolizan totalmente las maltodextrinas a glucosa, completándose el proceso.

En el procedimiento industrial anteriormente detallado, puede utilizarse la prueba de yodo para realizar seguimiento de las reacciones de hidrólisis. Cuando el almidón se degrada totalmente a glucosa ya no se obtiene la coloración azul oscura que caracteriza a la reacción entre el almidón y la solución de yodo-yodurada.

2.6. Prueba de yodo

La prueba del yodo es una reacción química usada para determinar la presencia o alteración de almidón u otros polisacáridos. Una solución de yodo di-yodo disuelto en una solución acuosa de yoduro de potasio reacciona con almidón produciendo un color púrpura profundo.

Este tipo de prueba puede realizarse con cualquier producto que contenga almidón como ser patatas, pan o determinados frutos.

Esta reacción es el resultado de la formación de cadenas de poliyoduro a partir de la reacción del almidón con el yodo presente en la solución de un reactivo llamado lugol. La amilosa, el componente del almidón de cadena lineal, forma hélices donde se juntan las moléculas de yodo, formando un color azul oscuro a negro. La amilopectina, el componente del almidón de cadena

ramificada, forma hélices mucho más cortas, y las moléculas de yodo son incapaces de juntarse, obteniéndose un color entre naranja y amarillo. Al romperse o hidrolizarse el almidón en unidades más pequeñas de carbohidrato, el color azul-negro desaparece. En consecuencia, esta prueba puede determinar el final de una hidrólisis cuando ya no hay cambio de color constituyendo una evidencia experimental ampliamente utilizada.

La solución de yodo también reacciona con el glucógeno, aunque el color producido es más castaño y mucho menos intenso.

Esta prueba se utiliza como indicador del grado de madurez de los frutos. El fruto cuando está inmaduro contiene altas cantidades de almidón que son detectadas a través de la tinción con la prueba de almidón, apareciendo como grandes zonas en el fruto teñidas de azul. Mientras que cuando un fruto está maduro, ese almidón se ha transformado en azúcares y, por lo tanto, no se tiñe en la prueba.

3. DISEÑO METODOLÓGICO

3.1. Variables

Para el desarrollo de la investigación es necesaria la definición de las variables y los parámetros de estudio, para cada una de las etapas del proyecto.

El proyecto comprende las siguientes etapas:

- Elaboración de la celda.
- Elaboración de la solución de almidón.
- Determinación de propiedades a temperatura ambiente.
- Determinación de cambios en la viscosidad debido a los cambios de flujo eléctrico.
- Evaluación del comportamiento por medio de un gráfico.
- Determinación de la degradación del almidón.

A continuación se muestra el análisis de las variables y los parámetros presentes en cada procedimiento involucrado en la investigación.

Tabla I. **Variables presentes en el proceso de elaboración de la celda**

Nombre	Unidades	Factor potencial de diseño		Característica	Descripción
		Constante	Variables		
Recipiente	mL	X		Controlable	La capacidad máxima que debe contener el recipiente de la celda
Los electrodos de carbono	Adimensional	X		Controlable	Material que conducirá el flujo eléctrico
Voltímetro	V,A	X		Controlable	Medidor de flujo eléctrico
Reóstato	A		X	Controlable	Cambios de corrientes de corrientes eléctricas

Fuente: elaboración propia.

Tabla II. **En la elaboración de la solución de almidón**

Nombre	Unidades	Factor potencial de diseño		Característica	Descripción
		Constante	Variables		
Masa de almidón	g		X	Controlable	La cantidad de almidón según la concentración requerida
Masa de agua	g		X	Controlable	Cantidad de agua según sea la concentración requerida
Volumen de la muestra	ml		X	controlable	Cantidad requerida para el estudio

Fuente: elaboración propia.

Tabla III. **Determinación de propiedades a temperatura ambiente**

Nombre	Unidades	Factor potencial de diseño		Característica	Descripción
		Constante	Variables		
Densidad	g/ml	X		No controlable	Relación masa/volumen de la solución
Temperatura	°C	X		No controlable	Temperatura a la que se encuentra la solución
Color	Adimensional		X	No controlable	Color que presenta la solución a analizar

Fuente: elaboración propia.

Tabla IV. **Determinación de los cambios en la viscosidad**

Nombre	Unidades	Factor potencial de diseño		Característica	Descripción
		Constante	Variables		
Viscosidad	cP		X	Controlable	Viscosidad a que se encuentra el fluido
Amperaje	A		X	Controlable	Flujo eléctrico suministrado a la solución
Temperatura	°C		X	No controlable	Temperatura a la que se encuentra la solución

Fuente: elaboración propia.

3.2. Delimitación de campo de estudio

3.2.1. Campo de estudio

Propiedades reológicas y de transporte, análisis de transferencia de momento.

3.2.2. Etapas que conforman la investigación

- Preparación de las soluciones a 0.02, 0.04 y 0.06 gramos de almidón por mL de agua.
- Evaluación de propiedades a temperatura ambiente.
- Evaluación de la viscosidad con respecto a cambios en el flujo eléctrico.
- Desarrollo de gráficos: viscosidad en función de la corriente eléctrica.

3.2.3. Material de estudio

Almidón grado reactivo.

3.2.4. Material de control de la investigación

Cambios visibles en la viscosidad así como el control de degradación del almidón debido a la presencia de una corriente eléctrica.

3.3. Recursos humanos disponibles

Investigador: Marvin Danilo Ajcip Xuyá.

Asesor: Ingeniero Químico
Jorge Emilio Godínez Lemus
Colegiado No. 874

3.4. Recursos materiales disponibles

3.4.1. Material a estudiar

- Almidón

3.4.2. Reactivos

- Agua desmineralizada
- Almidón grado reactivo
- yodo
- yoduro de potasio

3.4.3. Cristalería e instrumentos de medición

- Agitadores magnéticos
- Balanza analítica
- Beacker
- Tubos de ensayo
- Multímetro
- Vidrio de reloj

- Espátula
- Varilla de vidrio
- Gradilla
- termómetro
- Probeta

3.4.4. Equipo

- Viscosímetro Brookfield
- Plancha de agitación magnética
- Celda electroquímica
- Reóstato
- Potenciómetro

3.5. Técnica cualitativa o cuantitativa

Se evaluarán las propiedades físicas y químicas visibles del almidón con el uso de técnicas cualitativas. Se determinará si existen cambios en la composición del almidón durante el proceso a través de una prueba de yodo. En esta etapa se definirá la consistencia en la composición del almidón.

Así mismo, se realizará una evaluación de los cambios en la viscosidad debido a la corriente que se le hace pasar a través de la solución.

3.6. Recolección y ordenamiento de la información

La evaluación de la electrorreología del almidón tiene como objetivo principal determinar el comportamiento de la viscosidad de una solución de almidón en presencia de una corriente eléctrica directa, a través de los cambios en el flujo eléctrico se modifica la viscosidad según sea la intensidad, y al mismo tiempo se requiere realizar pruebas para poder identificar si el almidón se encuentra completo, es decir, que no sufra cambios en su composición química, para ello se realizará una prueba con yodo para verificar que no hayan cambios en la composición del almidón.

3.6.1. Elaboración de la celda

Procedimiento:

- Se procede a la conexión de los electrodos de carbono junto a la base (beacker).
- Se conecta el reóstato a las terminales de los electrodos para poder variar los flujos eléctricos.
- Se conecta el voltímetro en serie para poder monitorear el flujo eléctrico así como los cambios que se requieran.

3.6.2. Elaboración de la solución almidón-agua

Procedimiento:

- Se procede con la determinación de la masa de agua y almidón según los porcentajes a trabajar.

- Se mezcla con la ayuda del agitador magnético hasta que sea una mezcla homogénea.
- Se procede a calentar la solución hasta generar la emulsión y/o hidratación del almidón.
- Luego de la hidratación se continúa con la agitación hasta obtener un gel a temperatura ambiente.
- Se determinan las propiedades físicas de la solución: color, olor, viscosidad a temperatura ambiente.

3.6.3. Determinación de la viscosidad según los cambios del flujo eléctrico

Procedimiento:

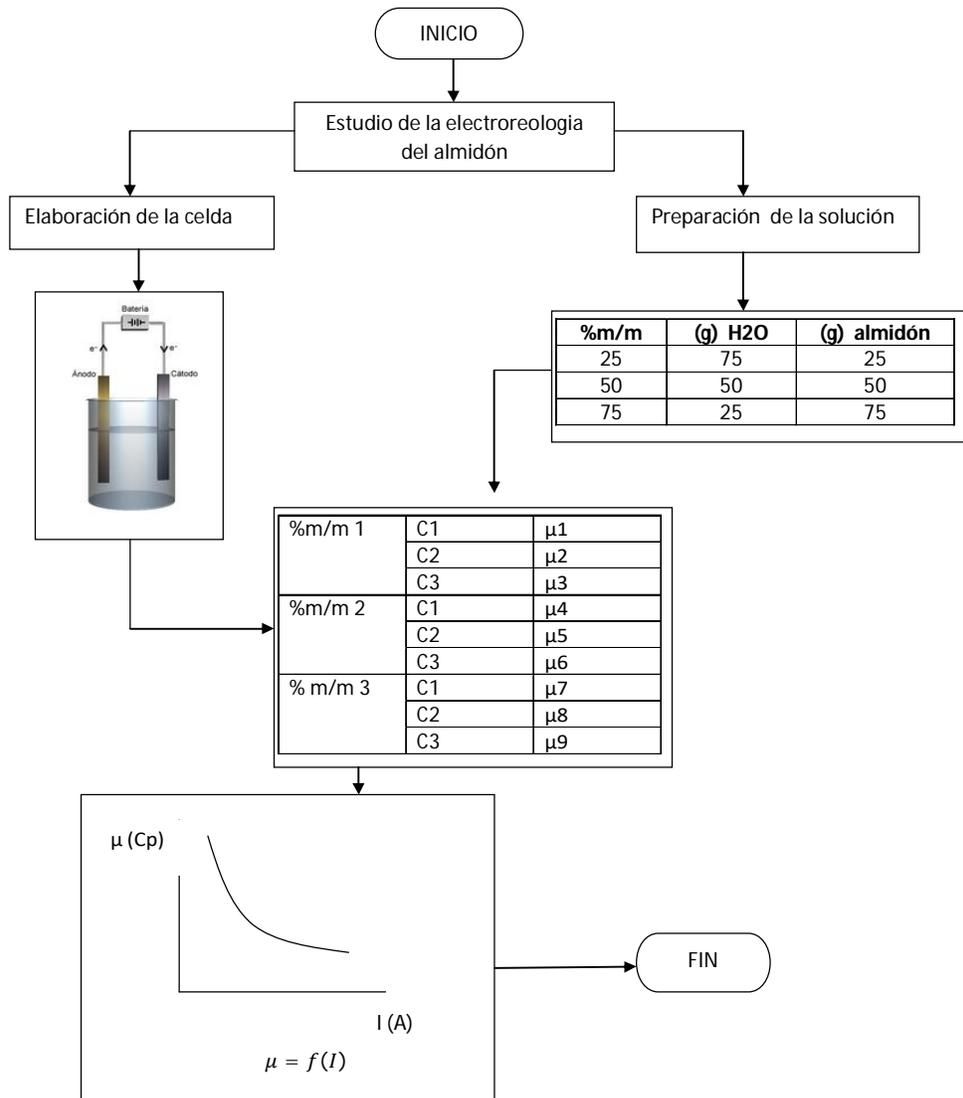
- Se vierte la solución a trabajar en el recipiente de la celda.
- Se comienza a pasar el flujo eléctrico a través de la celda el cual debe ser fijo y verificado a través del voltímetro.
- Se comienza a determinar la viscosidad del almidón con la ayuda del viscosímetro.
- Se varían los flujos según los rangos establecidos.

3.6.4. Determinación de no variabilidad química en el almidón

Procedimiento:

- Se toma una muestra de la solución de almidón en un tubo de ensayo.
- Se le agrega una solución de yoduro de potasio.
- Con base en la variación o no, se determina si el almidón sufrió cambios en su composición debido a la corriente eléctrica utilizada.

Figura 5. Diagrama de procedimiento experimental



Fuente: elaboración propia.

3.7. Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información

A continuación se muestran las tablas que serán utilizadas para el control y recolección de datos en las distintas etapas del proyecto.

Tabla V. **Cantidades de sustancia utilizadas para las soluciones**

No. de muestra	% m/v	Almidón (g)	Agua (mL)
1	2		
2	4		
3	6		

Fuente: elaboración propia.

Tabla VI. **Propiedades de las soluciones antes de la evaluación**

No. de muestra	T(°C)	μ (cP)	Color	Conductividad (mS/cm)
1				
2				
3				

Fuente: elaboración propia.

Tabla VII. **Viscosidades y corrientes obtenidas en cada muestra**

%m/v muestra	I(A)	μ (cP)	$\bar{\mu}$ (cP)	
2				
4				
6				

Fuente: elaboración propia.

Tabla VIII. **Propiedades de las soluciones después de la evaluación**

No. de muestra	T(°C)	μ (cP)	Color	Conductividad (mS/cm)
1				
2				
3				

Fuente: elaboración propia.

Tabla IX. **Resultados obtenidos en la prueba de yodo**

No. de muestra	Cambio de color	
	Positivo	Negativo
1		
2		
3		

Fuente: elaboración propia.

3.8. Análisis estadístico

3.8.1. Diseño experimental

Se utilizará un modelo estadístico aleatorio con arreglo combinatorio en el cual se aplicará una experimentación factorial evaluando 3 soluciones de almidón y 3 flujos eléctricos; con 3 repeticiones cada una, resultando 9 combinaciones experimentales y un total de 27 corridas o muestras a analizar.

Tabla X. **Arreglo rectangular para tratamientos con tres réplicas**

Formulación	I(A)	μ (cP)
F1	I1	μ_1
		μ_2
		μ_3
	I2	μ_4
		μ_5
		μ_6
	I3	μ_7
		μ_8
		μ_9
F2	I1	μ_{10}
		μ_{11}
		μ_{12}
	I2	μ_{13}
		μ_{14}
		μ_{15}
	I3	μ_{16}
		μ_{17}
		μ_{18}
F3	I1	μ_{19}
		μ_{20}
		μ_{21}
	I2	μ_{22}
		μ_{23}
		μ_{24}
	I3	μ_{25}
		μ_{26}
		μ_{27}

Fuente: elaboración propia.

Para el análisis estadístico de los datos obtenidos, se hará uso de las medidas de tendencia central y de dispersión necesarias para representar los resultados.

3.8.2. Medidas de tendencia central

3.8.2.1. Media aritmética

La media aritmética de un conjunto de valores $\{x_1, x_2, \dots, x_i\}$ de una variable x viene determinada por la suma de dichos valores, dividida por el número de la muestra (n), representada matemáticamente de la siguiente forma:¹

$$x_p = \frac{\sum x_i}{n}$$

3.8.3. Medidas de dispersión

Describen la cantidad de dispersión, o variabilidad que se encuentra entre los datos. El agrupamiento entre los datos indica una dispersión baja y viceversa.

¹JOHNSON, Robert. *Estadística elemental*. p.64.

3.8.3.1. Varianza

Es la media de las desviaciones (x) al cuadrado respecto a la media aritmética (x_p) de una distribución estadística.²

$$S^2 = \frac{\sum(x - x_p)^2}{n - 1}$$

Donde, n es el tamaño de la muestra.

3.8.3.2. Desviación estándar

La desviación estándar es la raíz cuadrada positiva de la varianza. Es decir, la raíz cuadrada de la media de los cuadrados de las puntuaciones de desviación.³

$$S = \sqrt{S^2}$$

²JOHNSON, Robert. *Estadística elemental*. p.66.

³JOHNSON, Robert. *Estadística elemental*. p.67.

4. RESULTADOS

Figura 6. Equipo para evaluación de viscosidad



Fuente: elaboración propia.

Tabla XI. **Cantidades de sustancia utilizadas para las soluciones a estudiar**

No. de muestra	% m/v	Almidón (g)	Agua (mL)
1	2	5	250
2	4	10	250
3	6	15	250

Fuente: elaboración propia.

Tabla XII. **Propiedades de las soluciones antes de la evaluación del comportamiento electroreológico**

No. de muestra	T(°C)	μ (cP)	Color	Conductividad (mS/cm)
1	26,0	3375	Blanco	0,22
2	23,8	4 700	Blanco	0,24
3	24,7	5 360	Blanco	0,20

Fuente: elaboración propia.

Tabla XIII. **Prueba de yodo antes de evaluar el comportamiento electroreológico**

No. de muestra	Cambio de color	
	Positivo	Negativo
1	✓	
2	✓	
3	✓	

Fuente: elaboración propia

Tabla XIV. **Viscosidades y corrientes obtenidas en cada prueba electroreológica realizada**

%m/v muestra	I(μA)	μ (cP)	$\bar{\mu}$ (cP)
2	35	3 786,10	3 806,65
		3 888,85	
		3 745,00	
	53	5 882, 20	5 991,80
		5 984,95	
		6 108,25	
	74	11 286,85	11 348,50
		11 512,90	
		11 245,75	
4	75	5 327,35	5 450,65
		5 450,65	
		5 573,95	
	81	7 587,85	7 779,65
		7 896,10	
		7 855,00	
	98	12 910,30	12 759,60
		12 766,45	
		12 602,05	
6	26	7 793,35	7 944,05
		8 122,15	
		7 916,65	
	42	11 574,55	11 547,15
		11 656,75	
		11 410,15	
	72	13 773,40	13 965,20
		13 978,90	
		14 143,30	

Fuente: elaboración propia.

Tabla XV. **Propiedades de las soluciones después de la evaluaci3n del comportamiento electroreol3gico**

No. de muestra	T(°C)	μ (cP)	Color	Conductividad (mS/cm)
1	24,6	10 355,15	Blanco	0,31
2	23,8	12 112,50	Blanco	0,34
3	24.7	13 265,35	Blanco	0,25

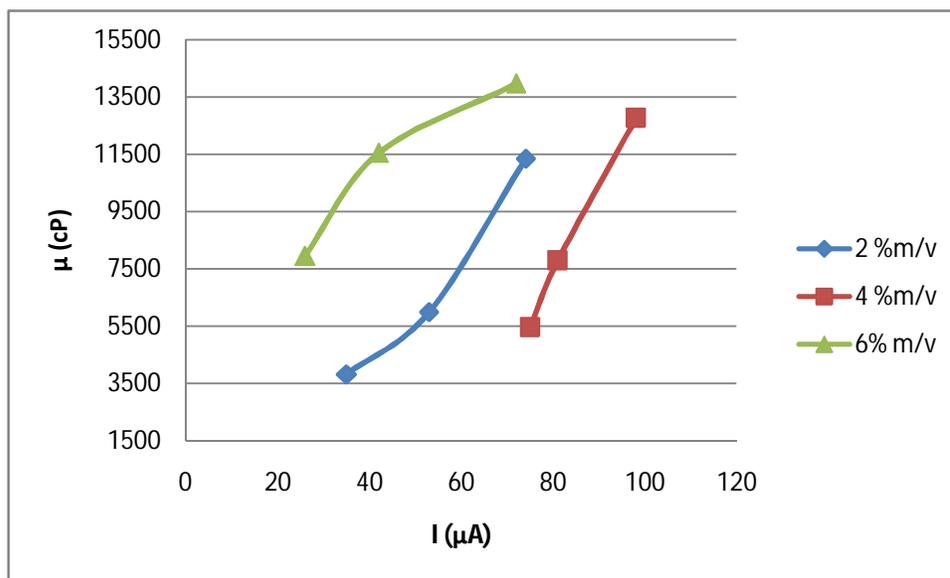
Fuente: elaboraci3n propia.

Tabla XVI. **Resultados obtenidos en la prueba de yodo despues de evaluar el comportamieto electroreol3gico**

No. de muestra	Cambio de color	
	Positivo	Negativo
1	✓	
2	✓	
3	✓	

Fuente: elaboraci3n propia.

Figura 7. Viscosidad en función de la corriente



Fuente: elaboración propia.

Tabla XVII. Modelos matemáticos determinados

línea	Modelo matemático	Intervalo de validez	R ²
2% m/v	$\mu = 1\,399 \cdot e^{0,028 \cdot I}$	35 – 74 μA	0,997
4% m/v	$\mu = 312,3 \cdot I - 17\,782$	75 – 98 μA	0,996
6% m/v	$\mu = 5\,882 \cdot \ln(I) - 10\,950$	26 – 72 μA	0,978

Fuente: elaboración propia.

5. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

En la evaluación del comportamiento de la electrorreología del almidón se procedió a la elaboración de una celda electrolítica que permitiera realizar cambios de corriente eléctrica y, al mismo tiempo, poder determinar la viscosidad para evaluar los cambios producidos por el paso de corriente eléctrica, dicho equipo se encuentra en la figura 6.

Se determinaron las propiedades de la emulsión y/o hidratación realizada a partir de del calentamiento de la solución agua-almidón hasta obtener una mezcla homogénea con el debido enfriamiento a través de convección natural hasta obtener un gel, el cual es evaluado hasta llegar a temperatura ambiente; en la tabla XII se encuentran las principales propiedades de las emulsiones realizadas donde la viscosidad aumenta conforme aumenta la concentración de almidón en la solución, por el contrario, la conductividad no tiene la misma tendencia, esto se debe a la falta de control en el proceso de gelatinización o gelificación. Ya que uno de los principales problemas en la preparación de gel de almidón es la formación de grumos que se deben a un hinchamiento desigual de los gránulos de almidón el cual es producido por una agitación no uniforme durante el enfriamiento.

Se realizó la prueba de yodo para poder confirmar que no se tiene degradación del almidón debido al calentamiento requerido para producir la emulsión o gel, ya que al sobrepasar la temperatura de emulsión o gelificación se degrada las moléculas de amilosa y amilopectina en azúcares los cuales no forman el compuesto complejo que permite identificar la presencia de amilosa y amilopectina a partir del cambio de coloración de la solución yodo-yoduro de potasio.

La tendencia de la viscosidad en función de la corriente eléctrica se presenta de forma creciente tal como se ilustra en la figura 7, que conforme aumenta la corriente eléctrica, aumenta la viscosidad del gel, esto se debe a que el paso de corriente a través del gel genera hidratación de las moléculas de amilosa y amilopectina que no fueron hidratadas en el proceso de gelificación, este proceso se puede verificar a través de la tabla XV que presenta la conductividad de cada gel analizado con un valor mayor al inicial; el incremento en la conductividad se debe a la continuación de formación de puentes de hidrogeno, a medida que se forman puentes de hidrógeno el agua es capaz de penetrar más profundamente en el gránulo de almidón y tiene lugar el hinchamiento que permite agrandar el gránulo de almidón el cual permite el aumento de viscosidad y mayor conducción de corriente eléctrica debido al aumento de puentes de hidrógeno. Los modelos matemáticos propuestos no pueden utilizarse para cualquier tipo de almidón debido a que la capacidad de gelificación depende de la cantidad o concentración de amilosa en el almidón así como la agitación y la temperatura a la cual comienza el hinchamiento de las moléculas.

La viscosidad del gel después de aplicarle la corriente eléctrica no se restituye a las condiciones iniciales y no permanece con la viscosidad idéntica a las últimas mediciones realizadas aplicándole corriente eléctrica, esto se debe a que el movimiento o agitación del gel genera deshidratación y ruptura de los gránulos que en consecuencia aumenta la fluidez de la mezcla de almidón.

La prueba de yodo realizada después de la aplicación de corriente eléctrica es positiva, lo que indica que la corriente eléctrica no degrada ni altera la composición del almidón, lo que permite afirmar la propiedad electroreológica del almidón.

CONCLUSIONES

1. La variación en la viscosidad y conductividad de un gel de almidón depende directamente del grado de hidratación alcanzado en el calentamiento y enfriamiento, debido a que a mayor hidratación mayor hinchamiento del gránulo de almidón y más formación de puentes de hidrógeno.
2. En el proceso de gelificación es necesario tener el equipo adecuado para monitorear la temperatura y la agitación ya que estos parámetros de control son los principales causantes de una hidratación no uniforme que como consecuencia genera la formación de grumos en el gel lo que conlleva un cambio en la concentración.
3. El efecto de la electrorreología del almidón se debe a la hidratación de las moléculas amilosa y amilopectina que se refleja en el aumento de la viscosidad debido al aumento de agua contenida por el almidón que se refleja en el aumento de la conductividad por la formación de más puentes de hidrógeno.
4. Es posible generar un modelo matemático que demuestre la tendencia de la viscosidad de un gel de almidón ya que se confirma la propiedad electrorreológica del almidón.
5. La prueba de yodo-yoduro de potasio no es prueba suficiente para verificar que no existe alteración de la molécula de almidón debido a la aplicación de corriente eléctrica ya que solo es una prueba cualitativa.

RECOMENDACIONES

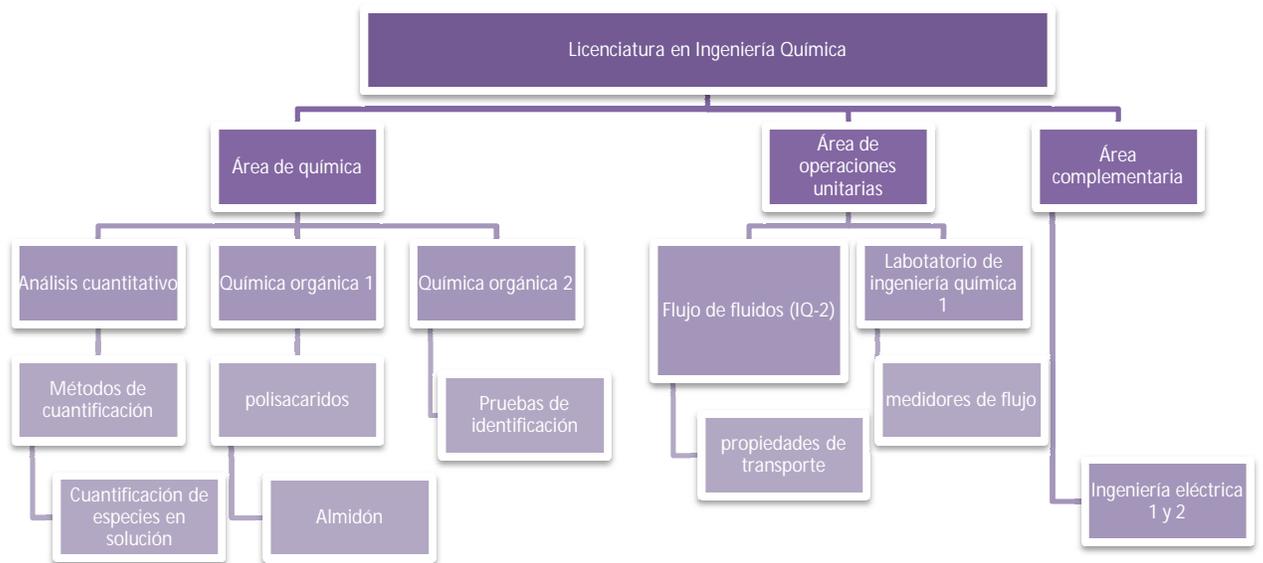
1. Verificar el origen del almidón ya que existen almidones que no gelifican y que requieren de otra metodología para analizar el comportamiento de la electrorreología.
2. Establecer el tiempo de cocción y agitación del almidón para establecer un parámetro de control de formación del gel, es decir, estandarizar el procedimiento.
3. Ampliar el rango de corriente eléctrica para visualizar mejor la tendencia de la propiedad electrorreológica, así como verificar el máximo y mínimo de corriente eléctrica donde pueden apreciarse cambios en la viscosidad.
4. Utilizar una celda que no permita el contacto de la muestra con el aire ya que puede ocurrir una acidificación del agua presente en la mezcla que permitiría la formación de dextrinas o polímeros de cadena corta.
5. Utilizar pruebas cuantitativas que permitan determinar que no existe degradación del almidón debido a la presencia de corriente eléctrica.

BIBLIOGRAFÍA

1. CAREY, Francis. *Química orgánica*. Velázquez, Jorge (trad). 6ta ed. México: McGraw-Hill, 2006. 1245 p.
2. MOTT, Robert L. *Mecánica de fluidos*. 6ta. ed. México: Pearson educación, 2006. 115 p.
3. PAAR, Anton. *electroreología y fluidos electro y magneto reológicos*. [En línea]. www.anton-paar.com/mx-es/productos/detalles/electroreologia/ [Consulta: 25 de marzo de 2015].
4. PERRY Robert H. CHILTON Cecil H. *Biblioteca del ingeniero químico*. 5ta. ed. México: McGraw-Hill 1986. 465 p.
5. REIÓN G., Leonardo. *Fluidos electroreológicos*, [En línea]. www.iie.org.mx/boletin012003/tecni1.pdf , [Consulta: 18 de marzo de 2015].

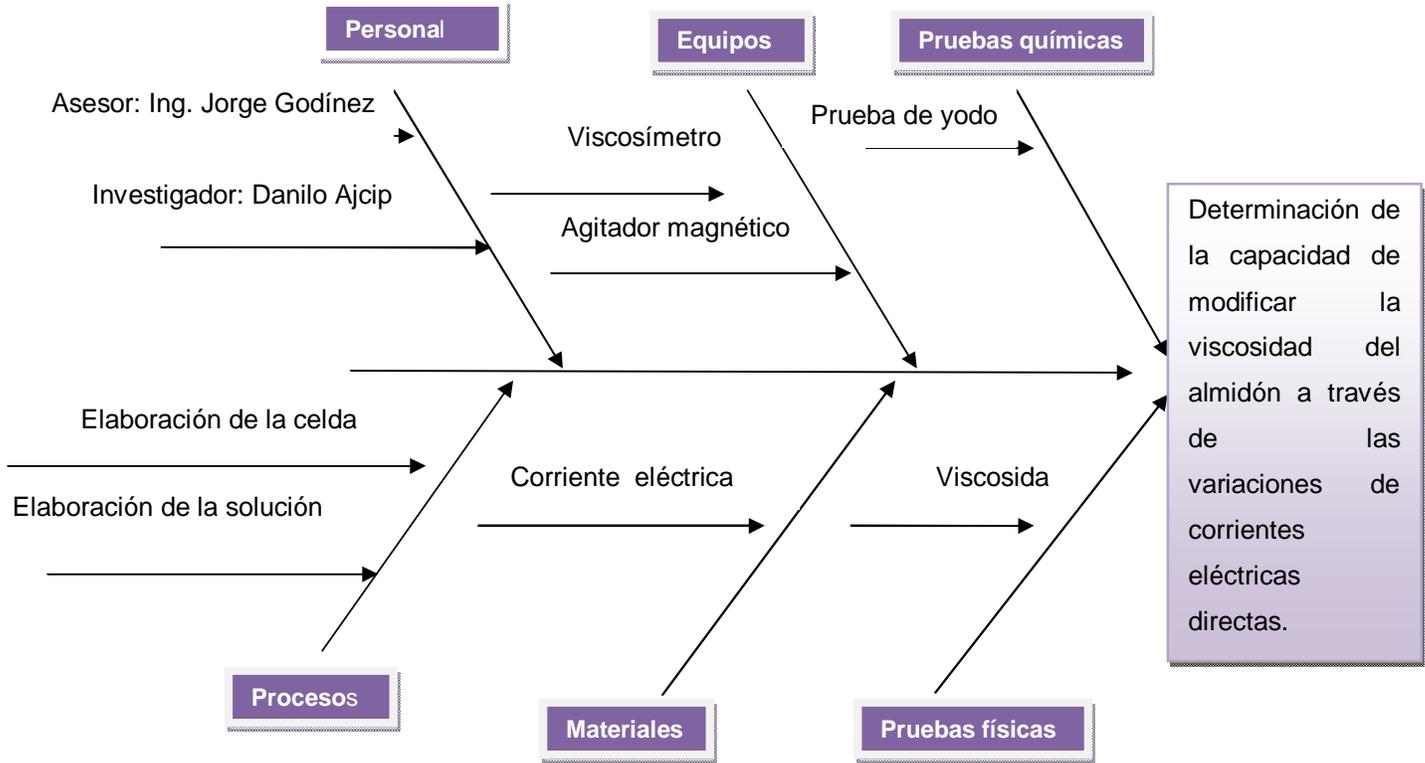
APÉNDICES

Apéndice 1. Requisitos académicos



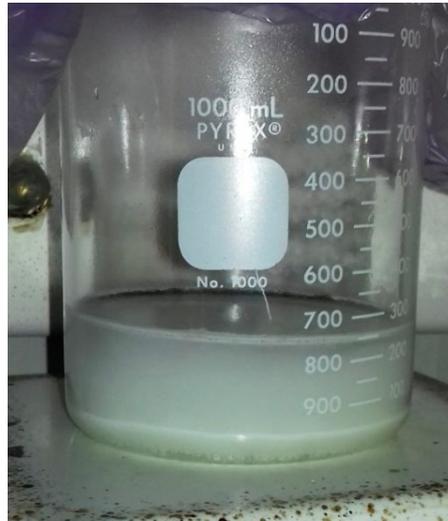
Fuente: elaboración propia.

Apéndice 2. Diagrama de causa y efecto



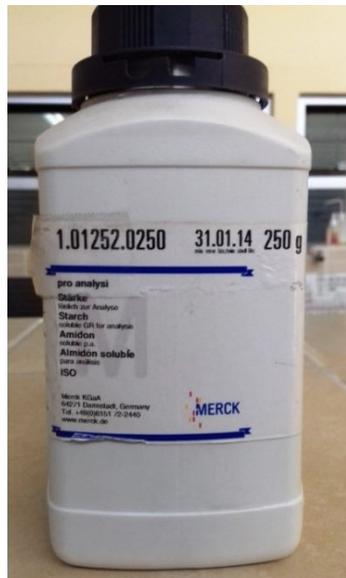
Fuente: elaboración propia.

Apéndice 3. Formación de la emulsión o gelificación



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 4. Almidón grado reactivo



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 5. **Determinación de viscosidad del fluido patrón**



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 6. **Viscosimetro Brookfield**



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 7. **Prueba de yodo-yoduro de potasio**



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 8. **Prueba de yodo-yoduro de potasio antes de aplicar corriente eléctrica**



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 9. Determinación de temperatura



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 10. Determinación de conductividad



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 11. Formación de grumos en la gelificación



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 12. Prueba de yodo-yoduro de potasio después de la aplicación de corriente eléctrica



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 13. Prueba de yodo-yoduro de potasio después de aplicarle corriente eléctrica



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 14. . Formación de pseudo plástico por exceso de corriente eléctrica



Fuente: elaboración propia.