



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL



**CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN CIENCIA APLICADA
Y TECNOLOGÍA AVANZADA, UNIDAD LEGARIA**

**DIFUSIÓN DE LOS IONES DE CALCIO DURANTE LA NIXTAMALIZACIÓN
DEL GRANO DE MAÍZ EN PRESENCIA DE UN CAMPO ELÉCTRICO
PULSADO.**

TESIS

Que para obtener el grado de
Maestro en Tecnología Avanzada

Presenta

Ing. Juan Carlos García Gallegos

Director

Dr. José Luis Fernández Muñoz

México D. F., Diciembre de 2007



INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL
SECRETARIA DE INVESTIGACION Y POSGRADO

ACTA DE REVISION DE TESIS

En la Ciudad de México, D. F. siendo las 11:00 horas del día 23 del mes de Octubre del 2007 se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de Tesis designada por el Colegio de Profesores de Estudios de Posgrado e Investigación de CICATA-LEG para examinar la tesis de titulada: "Difusión de los iones de calcio durante la nixtamalización del grano de maíz en presencia de un campo eléctrico pulsado"

Presentada por el alumno:

García
Apellido paterno

Gallegos
materno

Juan Carlos
nombre(s)

Con registro:

B	0	5	1	7	4	8
---	---	---	---	---	---	---

aspirante de: Maestría en Tecnología Avanzada

Después de intercambiar opiniones los miembros de la Comisión manifestaron **SU APROBACION DE LA TESIS**, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes.

LA COMISION REVISORA

Director de tesis

Dr. José Luis Fernández Muñoz

Dr. Eduardo San Martín Martínez

Dr. José Antonio Calderón Arenas

Dr. José Antonio Irán Díaz Góngora

Dr. Sergio A. Tomas Velazquez

EL PRESIDENTE DEL COLEGIO
CENTRO DE INVESTIGACION EN CIENCIA
APLICADA Y TECNOLOGIA AVANZADA
DEL IPN

Dr. José Antonio Irán Díaz Góngora



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

CARTA CESION DE DERECHOS

En la Ciudad de México D. F. el día 30 del mes diciembre del año 2007, el (la) que suscribe Juan Carlos García Gallegos alumno (a) del Programa de Maestría en Tecnología Avanzada con número de registro B051748, adscrito a CICATA LEGARIA, manifiesta que es autor (a) intelectual del presente trabajo de Tesis bajo la dirección de Dr. José Luis Fernández Muñoz y cede los derechos del trabajo titulado Difusión de los iones de calcio durante la nixtamalización del grano de maíz en presencia de un campo eléctrico pulsado, al Instituto Politécnico Nacional para su difusión, con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráficas o datos del trabajo sin el permiso expreso del autor y/o directores del trabajo. Este puede ser obtenido escribiendo a la siguiente dirección: juancarlosgg09@hotmail.com. Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.

Juan Carlos García Gallegos
Nombre y firma

RESUMEN

En este estudio se obtuvo la hidratación y el contenido de calcio de muestras de granos de maíz usando un diseño experimental de Box-Behnken para tres factores. El maíz se colocó en una solución 0.014 molar de hidróxido de calcio como dieléctrico en dos celdas de placas conductoras paralelas, a las cuales se les aplicó un campo eléctrico pulsado. El volumen total de la solución con granos de maíz fue de aproximadamente 30 mL. El dieléctrico se mantuvo a temperaturas de 25, 35 y 45° C durante 4 horas, en las cuales un campo eléctrico pulsado de 41.67, 25 y 8.33 V/cm estuvo presente. Tres variables del campo eléctrico: voltaje, frecuencia y porcentaje de trabajo de los pulsos se controlaron en el experimento. La frecuencia de los pulsos de voltaje permaneció constante a 1 Hz; los pulsos de voltaje tuvieron una amplitud de 50, 30 y 10 V; y el porcentaje de trabajo tuvo valores de 70, 50 y 30%. Se utilizaron muestras de maíz blanco de un peso promedio de 7.5g; el tamaño y forma de los granos se eligieron uniformemente para conformar a las muestras. Finalmente, se obtuvo la hidratación y el contenido de calcio de las muestras por gravimetría y espectroscopía de absorción atómica respectivamente. Concluido el experimento, se observó que de los tres factores analizados, únicamente la temperatura fue significativa en la hidratación del grano, en cambio, para las mediciones de contenido de calcio en los granos de maíz, ninguno de los factores fue significativo. A pesar de esto, en el análisis de las superficies de respuesta para la hidratación y el contenido de calcio de los granos de maíz, se observan algunas tendencias por efecto de los factores.

SUMMARY

In this study was obtained the maize kernel hydration and its calcium amount using a Box-Behnken experimental design to three factors. The maize kernel was placed into calcium hydroxide solution 0.014 molar as dielectric in two parallel conductive plate cells and applied them pulsed electric field. The total alkaline solution with maize kernel volume was approximately 30 mL. The dielectric was kept up to 25, 35 and 45°C temperatures for 4 hours. In this period a pulsed electric field of 41.67, 25 and 8.33 V/cm was applied. Three pulsed electric field variables: voltage, frequency and work percentage were controlled in the experiment. The voltage pulses frequency remained constant to 1 Hz; the pulses had amplitude of 50, 30 and 10 V; and the work percentage had 70, 50 and 30% values. White maize kernel samples of 7.5g average weight were used; the kernel size and its form were uniformly chosen to integrate the samples. Finally, the maize samples hydration and its calcium content were obtained by gravimetry and atomic absorption spectroscopy respectively. When the experiment was concluded, was observed that solely the temperature was significant in the maize kernel hydration, however, to calcium amount measurements of samples, none of three analyzed factors were significant. Nevertheless, some tendencies were observed because of the factor's effects on response surface of hydration and calcium amount.

ÍNDICE DE TESIS

RESUMEN	Pág.
SUMMARY	iv
	Iv
ÍNDICE DE TESIS	v
ÍNDICE DE FIGURAS	vi
ÍNDICE DE TABLAS	ix
GLOSARIO	xi
I. INTRODUCCIÓN	1
II. ANTECEDENTES	2
2.1. Nixtamalización del maíz	2
2.1.1. Estructura del grano de maíz	2
2.1.2. Nixtamalización	2
2.1.3. Difusión de agua e iones calcio en el grano de maíz	4
2.2. Campos eléctricos pulsados	6
2.2.1. Pulsos de voltaje	6
2.2.2. Campo eléctrico pulsado	6
2.2.3. Aplicaciones de campos eléctricos pulsados	7
OBJETIVOS	8
JUSTIFICACIÓN	9
III. MATERIALES Y MÉTODOS	10
3.1. Diseño experimental	10
3.1.1. Diseño experimental fraccional $\frac{1}{2} 2^K$	10
3.1.2. Diseño experimental de Box-Behnken	10
3.2. Sistema experimental	12
3.2.1. Fuente de voltaje	12
3.2.2. Circuito electrónico generador de pulsos de voltaje	12
3.2.3. Control de temperatura	16
3.2.4. Diseño de las celdas de placas paralelas	16
3.2.5. Construcción de las celdas de placas paralelas	19
3.3. Experimentación	19
3.3.1. Selección de las muestras	19
3.3.2. Tratamiento de las muestras	20

3.3.3. Deshidratación de las muestras	20
3.3.4. Análisis de espectroscopía de absorción atómica de las muestras	20
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	21
4.1. Resultados de los diseños experimentales de tamizado 2^{3-1}_{III} para la hidratación de los granos de maíz	21
4.2. Resultados del diseño experimental de Box-Behnken	23
4.3. Análisis de varianza de las respuestas de hidratación y contenido de calcio de los granos de maíz	26
4.3.1. Análisis de varianza de la hidratación del maíz	26
4.3.2. Análisis de varianza del contenido de calcio	27
4.4. Modelos cuadráticos de las superficies de respuesta	29
4.5. Superficies de Respuesta de la hidratación y contenido de calcio de los granos de maíz	29
4.5.1. SR en función del Voltaje y el Trabajo a una temperatura de 25° C	29
4.5.2. SR en función del Voltaje y el Trabajo a una temperatura de 35° C	30
4.5.3. SR en función del Voltaje y el Trabajo a una temperatura de 45° C	31
4.5.4. SR en función de la Temperatura y el Voltaje a un Trabajo de 30%	33
4.5.5. SR en función de la Temperatura y el Voltaje a un Trabajo de 50%	34
4.5.6. SR en función de la Temperatura y el Voltaje a un Trabajo de 70%	35
4.5.7. SR en función de la Temperatura y el Trabajo a un Voltaje de 10	36
4.5.8. SR en función de la Temperatura y el Trabajo a un Voltaje de 30	37
4.5.9. SR en función de la Temperatura y el Trabajo a un Voltaje de 50	38
V. CONCLUSIONES	40
VI. BIBLIOGRAFÍA	41
VII. APÉNDICE	43
A)	43
B)	45
C)	53

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura		Página
2.1	Partes principales del grano de maíz	2
2.2	Diagrama de bloques del proceso de nixtamalización y elaboración de tortillas	3
2.3	Forma de onda pulsada	6
3.1	Representación geométrica del diseño de Box-Behnken para tres factores	11
3.2	Bipolar Operational Power Supply/Amplifier (BOP)	12
3.3	Circuito integrado ICL8030 y circuito generador de onda pulsada empleado en el sistema experimental	13
3.4	Circuito y salidas del generador de onda pulsada	14
3.5	Factores eléctricos de la onda pulsada	15
3.6	Circuito del calentador de agua	16
3.7	Plano de celda de placas paralelas	17
3.8	Plano de tapa de celda de placas paralelas	17
3.9	Vista lateral de la celda de placas paralelas y sus constantes dieléctricas	18
3.10	Vista lateral de la celda de placas paralelas y sus dimensiones	18
3.11	Esquema de la celda de placas paralelas	19
4.1	Perfiles de hidratación de muestras de maíz tratadas con campo eléctrico pulsado y controles en función de la temperatura	25
4.2	Perfiles de contenido de calcio de muestras de maíz tratadas con campo eléctrico pulsado y controles en función de la temperatura	25
4.3	Superficies de respuesta de hidratación y contenido de calcio en los granos de maíz a 25°C	30
4.4	Superficies de respuesta de hidratación y contenido de calcio en los granos de maíz a 35°C	31
4.5	Superficies de respuesta de hidratación y contenido de calcio en los granos de maíz a 45°C	32
4.6	Superficies de respuesta de hidratación y contenido de calcio en los granos de maíz a un Trabajo de 30	33
4.7	Superficies de respuesta de hidratación y contenido de calcio en los granos de maíz a un Trabajo de 50	34
4.8	Superficies de respuesta de hidratación y contenido de calcio en los granos de maíz a un Trabajo de 70	35
4.9	Superficies de respuesta de hidratación y contenido de calcio en los granos de maíz a un Voltaje de 10	36
4.10	Superficies de respuesta de hidratación y contenido de calcio en los granos de maíz a un Voltaje de 30	38

4.11	Superficies de respuesta de hidratación y contenido de calcio en los granos de maíz a un Voltaje de 50	39
B.1	Campo eléctrico entre placas paralelas finitas	45
B.2	Capacitor de placas paralelas	45
B.3	Señal unitaria cuadrada y el potencial pulsante $\Phi(t)$	46
B.4	Capacitor de placas paralelas con tres dieléctricos	47
B.5	Configuración de capacitores equivalentes al capacitor general	48
B.6	Diferencias de potencial de los capacitores equivalentes y la capacitancia total	48
C.1	Circuito eléctrico RC de la celda de placas paralelas C y resistencia R	53
C.2	Descarga eléctrica de las placas de la celda experimental C mediante la resistencia R a una amplitud de 50 V	54

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla		Página
3.1	Diseño experimental 2_{III}^{3-1}	10
3.2	Diseño experimental 2_{III}^{3-1} con variación del Trabajo	10
3.3	Diseño experimental Box-Behnken para la hidratación y contenido de calcio	11
3.4	Resistencias R_1 y R_2 para cada nivel de voltaje pulsado requerido en la experimentación	14
3.5	Valores resistivos requeridos para la frecuencia y el porcentaje de trabajo del diseño experimental	15
4.1	Resultados del primer diseño experimental 2_{III}^{3-1} para evaluar la hidratación en grano de maíz	21
4.2	Resultados del segundo diseño experimental 2_{III}^{3-1} para evaluar la hidratación en grano de maíz	22
4.3	Respuesta de hidratación y contenido de calcio de granos de maíz aplicando campo eléctrico pulsado	23
4.4	Evaluación de la hidratación y contenido de calcio en muestras de maíz influenciadas por un campo eléctrico pulsado a 25,35 y 45°C	24
4.5	Análisis de varianza de la superficie de respuesta evaluada para la hidratación de los granos de maíz	26
4.6	Análisis de varianza de la superficie de respuesta para evaluar el contenido de calcio de los granos de maíz	28
4.7	Equivalencias entre las variables naturales y las codificadas	29
4.8	Condiciones de voltaje y porcentaje de trabajo en grano de maíz detectadas en el punto máximo de hidratación y contenido de calcio	30
4.9	Condiciones de voltaje y porcentaje de trabajo en grano de maíz detectadas en el punto máximo de hidratación y contenido de calcio	31
4.10	Condiciones de voltaje y porcentaje de trabajo en grano de maíz detectadas en el punto máximo de hidratación y contenido de calcio	32
4.11	Condiciones de voltaje y temperatura en grano de maíz detectadas en el punto máximo de hidratación y contenido de calcio	34
4.12	Condiciones de voltaje y temperatura en grano de maíz detectadas en el punto máximo de hidratación y contenido de calcio	35
4.13	Condiciones de voltaje y temperatura en grano de maíz detectadas en el punto máximo de hidratación y contenido de calcio	36
4.14	Condiciones de voltaje y temperatura en grano de maíz detectadas en el punto máximo de hidratación y contenido de calcio	37

4.15	Condiciones de voltaje y temperatura en grano de maíz detectadas en el punto máximo de hidratación y contenido de calcio	38
4.16	Condiciones de voltaje y temperatura en grano de maíz detectadas en el punto máximo de hidratación y contenido de calcio	39
A.1	Masas iniciales e hidratadas de las muestras de maíz de los experimentos de tamizado	43
A.2	Peso inicial y final de las muestras de maíz sometidas al experimento	43
B.1	Capacitancia de las celdas con diferentes dieléctricos a distintos niveles de temperatura	51
B.2	Resultados del potencial, campo, carga, polarización y momento dipolar eléctrico a diferentes niveles de temperatura y a un potencial de 10V	52
B.3	Resultados del potencial, campo, carga, polarización y momento dipolar eléctrico a diferentes niveles de temperatura y a un potencial de 30V	52
B.4	Resultados del potencial, campo, carga, polarización y momento dipolar eléctrico a diferentes niveles de temperatura y a un potencial de 50V	52

GLOSARIO

Dieléctrico: Sustancia que es mala conductora de la electricidad y que amortiguará la fuerza de un campo eléctrico que la atraviese. Sus propiedades son producto de la polarización de esta sustancia. Como resultado de esta polarización, el dieléctrico queda sometido a una tensión eléctrica, almacenando energía que quedará disponible al retirar el campo eléctrico. La eficacia de los dieléctricos se mide por su relativa capacidad de almacenar energía y se expresa en términos de la constante dieléctrica, tomando como unidad el valor del vacío.

Difusión: Flujo de energía o materia desde una zona de mayor concentración a otra de menor concentración, tendente a producir una distribución homogénea. La difusión es un proceso molecular, que depende exclusivamente de los movimientos aleatorios de las moléculas. La velocidad de difusión es, por tanto, directamente proporcional a la velocidad media de las moléculas.

Campo eléctrico: Región del espacio donde se ponen de manifiesto los fenómenos eléctricos. Se representa por E y es de naturaleza vectorial. La dirección del campo eléctrico en cualquier punto viene dada por la de la fuerza que actúa sobre una unidad de carga positiva colocada en dicho punto. Las líneas de campo eléctrico se trazan de modo que son, en todos sus puntos, tangentes a la dirección del campo, y su sentido positivo se considera que es el que partiendo de las cargas positivas termina en las negativas.

Capacitor: Es un dispositivo que almacena energía en un campo electrostático mediante dos conductores aislados en el vacío o en materia dieléctrica. Los capacitores tienen funciones importantes en los circuitos electrónicos, especialmente para voltajes y corrientes variables con el tiempo.

Nixtamalización: Proceso en el que se cuecen granos de maíz en agua con cal (hidróxido de calcio). Los granos, luego de la cocción, se dejan reposar en la solución alcalina. Posteriormente el nixtamal se lava y es convertida en masa fresca con la que se elaboran tortillas o se procesan harinas que pueden rehidratarse para la elaboración de productos nixtamalizados.

Polarización: Al colocarse un material dieléctrico en un campo eléctrico, los electrones y protones que constituyen sus átomos y moléculas, se reorientarán en función de la dirección e intensidad del campo eléctrico, a esta reorientación de las cargas eléctricas que conforman al dieléctrico, se le conoce como polarización.

Punto estacionario: En las superficies de respuesta, el punto estacionario, podría representar a un punto de respuesta máxima, de respuesta mínima o de silla.

I. INTRODUCCIÓN

Para estudiar la hidratación y la difusión de los iones calcio en granos de maíz durante la nixtamalización en presencia de un campo eléctrico pulsado, se trabajaron 21 muestras. Los granos de maíz fueron inmersos en una solución 0.014 molar de hidróxido de calcio. Se construyeron dos celdas de placas conductoras paralelas, en las cuales en su interior se depositó los granos y el $\text{Ca}(\text{OH})_2$ para que esta mezcla estuviera afectada por un campo eléctrico. Por otra parte, se implementó un circuito electrónico generador de pulsos de voltaje de 0 a 100 V, frecuencia variable y un porcentaje de trabajo variable que se conectó a las terminales de las celdas, asimismo, una resistencia se conectó en paralelo a estas terminales para la descarga eléctrica de las placas después de cada pulso. Para la variación de temperatura de la celda experimental, se trabajó con un baño de agua calentada con una resistencia eléctrica. Bajo estas condiciones, la mezcla de solución alcalina con los granos de maíz fue sometida a un campo eléctrico pulsado durante cuatro horas a diferentes temperaturas. Posteriormente se analizó la hidratación y contenido de calcio de las muestras tratadas.

II. ANTECEDENTES

2.1. Nixtamalización del maíz

2.1.1. Estructura del grano de maíz

Desde el punto de vista estructural, el grano maduro o cariópside del maíz está formado de cuatro partes principales (figura 1): el pericarpio, el endospermo, el germen y el pedicelo (Paredes-López 2006). El pericarpio es una capa de células fibrosas que comprende el 5% del peso del grano y está cubierto por una capa cerosa impermeable llamada cutícula. El endospermo es el segundo tejido de reserva con aproximadamente un 83% del peso del grano, y presenta un alto contenido de almidón. El almidón está formado por moléculas de amilosa y amilopectina cuya proporción depende de la variedad del maíz. La dureza del grano está dada por la composición y grosor del pericarpio, y de la relación de amilosa y amilopectina. El endospermo se ha clasificado en base a su contenido de amilosa-amilopectina como vítreo o ceroso y puede presentar una consistencia suave o harinosa. Por su parte, el germen representa el 11% del peso del grano maduro y contiene la mayoría de los lípidos del maíz. El germen es considerado el primer tejido de reserva ya que almacena una gran cantidad de nutrientes utilizados durante la germinación donde se origina el tallo (plúmula) y las raíces (radícula). Finalmente, el pedicelo o capa terminal es la continuación del pericarpio y permite la unión del grano con el olote (Paredes-López 2006).

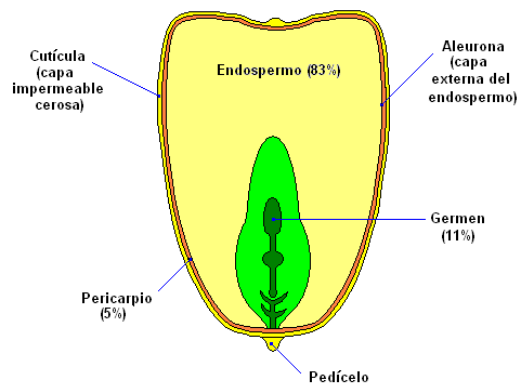


Figura 2.1 Partes principales del grano de maíz (Paredes-López, 2006)

2.1.2. Nixtamalización

Las grandes revoluciones agrícolas que ocurrieron durante los pasados 10 000 años, se han asociado con el origen de grandes civilizaciones y han tenido que ver con un cultivo en particular. El trigo y otros cereales fueron domesticados primero en el Oriente Medio, el arroz en Asia Oriental y el maíz (*Zea mays L.*) en el Hemisferio Occidental. Estos hechos, señalan el principio de una dependencia en los cereales que han tenido un profundo efecto en la evolución del hombre moderno (Paredes-López, 2006).

En México, la dieta de la mayor parte de la población está basada en el consumo de productos de maíz nixtamalizado. La masa de maíz nixtamalizado sirve para preparar un gran número de alimentos, entre los que destaca notablemente la tortilla. El consumo *per cápita* de la tortilla es de 325g (Saharopulos-Paredes, 1983).

En su forma tradicional, para llevar a cabo el ablandamiento del grano de maíz se realiza un tratamiento térmico-alcalino conocido como nixtamalización (palabra náhuatl, derivada de *nextli* que significa cenizas o cenizas de cal y *tamalli*, masa de maíz). Para llevar a cabo el proceso de nixtamalización, primero se hierva el maíz en agua de 20 a 40 minutos añadiendo de 1 a 3% de cal. La proporción de maíz:agua en la mezcla es 1:3 (peso: volumen), con pH variable de 11 a 13. Después de este corto tiempo de ebullición, se deja reposar al maíz de 8 a 12 horas. Cabe mencionar que el tiempo de cocción del grano es variable ya que dependen del tipo de endospermo. Las variedades de endospermo suave requieren menos tiempo de cocción que las de endospermo duro. El agua de cocción llamada “nejayote” se elimina, posteriormente el maíz se lava con agua limpia para eliminar el exceso de álcali. Finalmente, el maíz se muele mediante la fricción en un molino de piedras para generar la masa cuya textura servirá para la preparación de productos nixtamalizados. En la figura 2 se presenta un diagrama de bloques del proceso de la nixtamalización del maíz y la elaboración de tortillas. (Badui-Dergal, 2006).

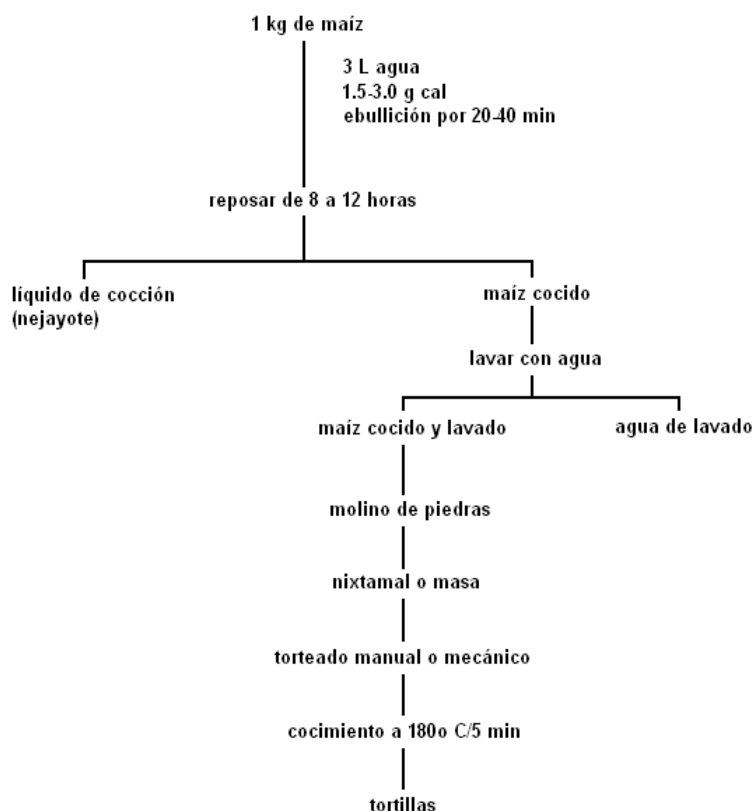


Figura 2.2 Diagrama de bloques del proceso de nixtamalización y elaboración de tortillas (Badui-Dergal, 2006)

Durante las distintas etapas del proceso de nixtamalización, pueden ocurrir una gran cantidad de reacciones fisicoquímicas, por ejemplo: la gelatinización parcial o total del almidón, la hidrólisis de la hemicelulosa, la difusión de iones calcio y la interacción calcio-almidón en el interior del grano. Todas estas reacciones, aunadas a las características del maíz y las diferentes condiciones durante el proceso,

otorgan a la masa las propiedades sensoriales, organolépticas y mecánico-plásticas adecuadas para elaborar productos nixtamalizados.

2.1.3. Difusión de agua e iones calcio en el grano de maíz

Actualmente se han realizado estudios para tratar de explicar el fenómeno de la difusión de agua e iones calcio en el interior del grano de maíz crudo y cocido durante el proceso de nixtamalización. Para el caso del maíz cocido, existe una mayor información sobre esta difusión. Algunas investigaciones han sido encaminadas a estudiar los cambios fisicoquímicos del grano durante la cocción alcalina y el proceso de remojo los cuales tienen relación significativa con la difusión del agua y calcio (Gómez, McDonough, Rooney, & Waniska, 1989; Mistry & Eckhoff, 1992; Paredes-López & Sahararoupulos, 1982; Robles, Murray & Paredes López, 1988; Trejo-González, Faria-Morales, & Wild-Altamirano, 1982). Algunos resultados del estudio del proceso de nixtamalización indican que la solución alcalina degrada y solubiliza a los componentes de la pared celular del pericarpio y produce un ablandamiento de la estructura del endospermo. Durante este proceso, ocurre la difusión de agua y de iones calcio en los gránulos de almidón, los cuales se hinchan, gelatinizan parcial o totalmente y se desorganiza su estructura cristalina (Fernández-Muñoz *et al*; 2005). La función que tienen los iones calcio durante el remojo del maíz es limitar la gelatinización en los gránulos de almidón debido a la posible interacción calcio-amilosa. Esta interacción previene que el agua siga absorbiéndose, evitando una mayor hinchazón y degradación de los gránulos (Laria, Meza & Peña, 2005).

Otros estudios muestran que durante la cocción alcalina y el reposo del grano de maíz las rutas de difusión del agua y del ión calcio son similares, aunque la difusión del calcio es más lenta (Fernández-Muñoz *et al.*, 2002; McDonough, Gomez, Rooney & Serna-Saldivar, 2001, chapter 4; McDonough *et al.*, 1987; Trejo-González *et al.*, 1982; Zazueta *et al.*, 2002). También en estas investigaciones se muestra que al inicio de la cocción alcalina y el reposo del grano, los iones calcio se fijan casi instantáneamente en el pericarpio, posteriormente en la aleurona, la superficie externa del germen y en los intersticios entre el germen y el endospermo. Después de algunas horas de reposo, los iones calcio entran a las capas más internas del endospermo, difundiéndose pronunciadamente en el pedicelo. De manera evidente y casi al final del proceso de nixtamalización, el calcio se fija en el germen debido a la degradación del pericarpio

Fernández-Muñoz *et al* (2002), demostraron que la variación del contenido de calcio en granos de maíz evaluados a diferentes tiempos de remojo, es el resultado de un proceso de difusión cinética simultánea que sucede en el pericarpio, endospermo y germen. Ellos mencionan que la difusión de calcio es un proceso no lineal, ya que la incorporación de calcio no se realiza a la misma velocidad para todos los granos. Si el grano tiene un daño significativo, el proceso de difusión de calcio puede ocurrir abruptamente en tiempos cortos de reposo.

Por su parte, McDonough y colaboradores en 1987 y 2001, estudiaron la distribución de calcio en granos de maíz en diferentes etapas del proceso de nixtamalización. Ellos concluyeron que, en tiempos cortos de reposo, los iones calcio se difunden principalmente en el pericarpio y germen. Mientras que la difusión del calcio en el grano es poco probable en la aleurona y las capas internas del endospermo. En este sentido el trabajo de Fernández-Muñoz *et al* (2002) mostraron que para un tiempo corto de remojo, los iones calcio están presentes solo en las capas externas del endospermo. Cuando se incrementa el tiempo de remojo del grano, los iones penetran al endospermo. Fernández y colaboradores concluyen que la entrada de calcio en el interior del endospermo depende de la madurez y el estado físico del grano. Los granos rotos o fracturados tienen una mayor superficie efectiva que los enteros para que el calcio se difunda al grano. Cabe destacar que ellos también concluyen que la difusión del ión calcio en

el grano de maíz (pericarpio, germen y endospermo) durante el proceso tradicional de nixtamalización es influido notablemente por la temperatura de cocción, el tiempo de remojo, la concentración inicial de hidróxido de calcio y el contenido de agua.

El grupo de investigación de Lloyd Rooney fue pionero en estudiar las rutas de difusión de calcio durante la nixtamalización (Mc Donough *et al* 1987, 2001 citado por Zazueta, *et al*; 2002). Ellos estudiaron la distribución del calcio en el grano durante el proceso de nixtamalización evaluándola a diferentes tiempos de reposo. Concluyeron que para tiempos cortos, el calcio es depositado principalmente en el pericarpio y germen, y poco en la aleurona y la última capa del endospermo (Mc Donough *et al* 1987, 2001). Zazueta *et al.* (2002) estudiaron la difusión del calcio durante la nixtamalización usando el isótopo calcio-45. Ellos mostraron que al inicio del proceso, los iones calcio se fijan en el pericarpio casi de manera instantánea. En la etapa de cocción y las primeras horas de remojo, el calcio se fija poco entre los intersticios del endospermo y el germen. Durante el remojo, el calcio comienza a difundirse de manera radial hacia el endospermo, incrementándose en la parte proximal del pedicelo. Después de un tiempo prolongado, el calcio se presenta de manera significativa en el germen.

Las evaluaciones de Fernández-Muñoz *et al* (2004) encontraron que el contenido de calcio en el pericarpio, endospermo y germen, depende del tiempo de remojo del maíz. Los investigadores, usando la técnica de espectroscopía por absorción atómica, mostraron que el contenido de calcio tiene un máximo local después de 9 hr de remojo. El análisis de las diferentes partes del grano nixtamalizado mostró que en tiempos cortos de remojo (0-5 hr), la difusión del calcio ocurre primero en el pericarpio. También encontraron que el calcio se establece principalmente en las capas externas del endospermo. Gutiérrez *et al* (2006) estudiaron la difusión de calcio en el endospermo durante la nixtamalización. Mostraron que el calcio está presente en las capas más externas del endospermo, representando un 20% del mismo. Esto implica que durante este proceso, los cambios fisicoquímicos en esta fracción del endospermo podrían tener una importante influencia en las propiedades funcionales, nutricionales, organolépticas y sensoriales del producto final.

Hurtado-Castañeda *et al* (2005) estudiaron la difusión de agua y calcio en el pericarpio del maíz a diferentes temperaturas de cocción. Sus resultados mostraron que la difusión de agua y calcio en los granos en saturación alcalina, son dependientes de la temperatura. Laria, Meza & Peña, 2005 mencionan que la velocidad de difusión en el grano es directamente proporcional a la temperatura de la solución alcalina.

A pesar de que menos estudios han sido realizados en el maíz crudo que en el cocido, las investigaciones en maíz crudo también han mostrado complejidad en las rutas internas de difusión de agua y/o iones calcio al interior del grano. El fenómeno de la difusión del agua a temperatura ambiente se ha explicado de la siguiente manera: la difusión ocurre en el grano de maíz a través de la capa más externa del pericarpio y del pedicelo, posteriormente el agua se difunde entre la capa interna del pericarpio y el saco de la semilla dirigiéndose lentamente hacia el endospermo, la capa aleurona y el germen (Cox, MacMaster, Majel, & Hilbert, 1944; Krochta, Look, & Wang, 1980; Wolf, Buran, 1952, citados por Laria *et al*, 2005). Estudios realizados por Charan y Prasad, 1996, muestran que la velocidad de la difusión del agua al interior del grano de maíz depende del grosor del pericarpio y el tipo de endospermo. Laria *et al*, 2005, estudiaron la difusión en el grano crudo de maíz a temperatura ambiente utilizando un tratamiento alcalino. Ellos mencionaron que la eficiencia de difusión del agua e iones calcio dentro del grano, depende de la presencia de estos iones que afectan directamente la velocidad y las rutas de difusión. Además concluyeron que las rutas de difusión en el grano de maíz entero se mantienen durante todo el proceso de remojo.

2.2. Campos eléctricos pulsados

2.2.1. Pulsos de voltaje

Una forma de onda rectangular o pulsada tiene dos valores fijos de voltaje a la salida (ver figura 2.3). Las siguientes variables la pueden caracterizar: la amplitud, la frecuencia y el ciclo o porcentaje de trabajo. La amplitud se obtiene de la diferencia de los dos voltajes de salida. La frecuencia se define como el número de variaciones completas o ciclos que se realiza en una unidad de tiempo. El porcentaje de trabajo se obtiene de la razón entre el tiempo en que la onda tiene el voltaje superior y el periodo de la onda pulsada.

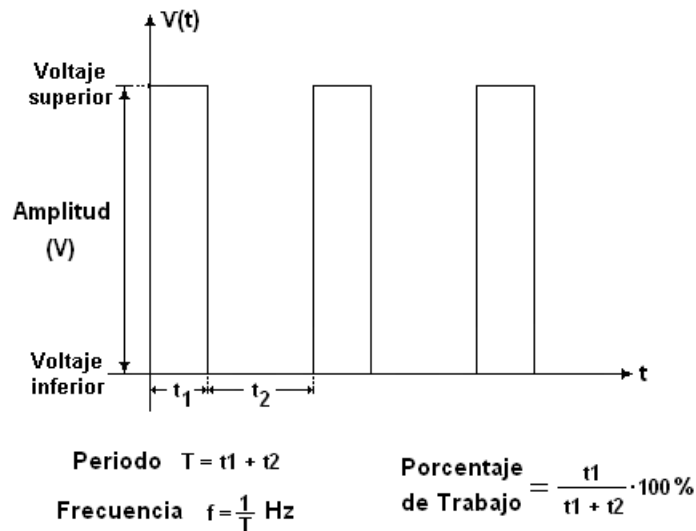


Figura 2.3 Forma de onda pulsada

Las ondas pulsadas pueden ser generadas por circuitos integrados tales como el 555, el 8038, entre otros. Estos circuitos, mediante dispositivos externos como resistencias y capacitores crean constantes de tiempo que sirven de base para las frecuencias de las señales de salida. Cuando el usuario diseña una señal, puede calcular los valores apropiados de estos dispositivos mediante los manuales de los circuitos integrados respectivos. Igualmente, circuitos integrados mucho más complejos como los microcontroladores o microprocesadores generan ondas pulsadas al utilizar cristales de cuarzo como relojes internos. Esta complejidad se refleja en la manera en que el usuario diseña una onda pulsada, ya que generalmente se utiliza un lenguaje de programación de bajo o medio nivel, como los lenguajes ensamblador y C. Utilizando a los microcontroladores o microprocesadores pueden diseñarse ondas pulsadas con frecuencias mucho más altas y precisas, pero la elección del dispositivo generador de ondas dependerá de las necesidades tecnológicas del usuario. Posteriormente, la señal pulsada podría pasar por una etapa de potencia en la que la onda pulsada adquiriría la energía necesaria para una tarea determinada.

2.2.2. Campo eléctrico pulsado

Se supondrá que existe un voltaje o diferencia de potencial entre dos puntos fijos ubicados en el espacio, luego, se infiere la existencia de un campo eléctrico en este espacio. Si dichos puntos están totalmente aislados en materia no conductora, ésta se polarizará en función de la intensidad y las líneas

del campo eléctrico. Si en lugar de puntos, se colocan densidades de carga lineales, superficiales o volumétricas, las líneas de campo eléctrico se conformarán dependiendo de la geometría de dichas densidades de carga. Si de estas densidades de carga se escogen dos planos finitos con una densidad de carga superficial, y si además se colocan paralelamente, las líneas de campo podrían suponerse paralelas entre los planos en función de que tan cerca se coloquen. Igualmente, la polarización de la materia ubicada entre los planos tendría una polarización más uniforme según que éstos se vayan acercando. Si además, la diferencia de potencial es pulsada, el campo eléctrico y por lo tanto, la polarización de la materia también lo será. Estas suposiciones, encuentran aplicación práctica inmediata si se colocan dos placas conductoras en paralelo a una distancia determinada entre ellas. Si se aplica una diferencia de potencial en las placas, la materia dieléctrica entre éstas se polarizará. Si el potencial es pulsado y en las placas se conecta una resistencia para su descarga (ver figura 3.4 y Apéndice C), se obtendría un campo eléctrico pulsado polarizando intermitentemente a la materia dieléctrica entre las placas.

2.2.3. Aplicaciones de campos eléctricos pulsados

La utilización de campos eléctricos pulsados en alimentos líquidos o semisólidos no es tecnología nueva. En 1924, J. M. Beattie y F. C. Lewis reportaron que leche tratada eléctricamente se suministró en la ciudad de Liverpool, Inglaterra en 1915, y sugirieron que el calor producido por tal tratamiento no fue el principal factor en la destrucción de bacterias en la leche, por lo que la corriente eléctrica fue un agente destructor importante. Posteriormente, en 1960, B. S. Gossling propuso la utilización de campos eléctricos pulsados intensos (PEF por sus siglas en inglés) para la inactivación de microorganismos en alimentos (Knorr *et al*, 1994). Para esta inactivación, generalmente se aplican pulsos cortos (1-100 μ s) de campos eléctricos altos (10-80 KV/cm) a alimentos que fluyen o permanecen entre dos electrodos, los cuales constituyen la cámara de tratamiento. La tecnología PEF ha recibido amplia atención en universidades, industrias y grupos de investigación en el mundo por lo que actualmente se sigue investigando para definir la cinética de inactivación microbiana en los alimentos, y así, poder validar con mayor rigor la implementación de esta tecnología en la industria (Góngora-Nieto *et al*, 2004). Particularmente, Martin *et al* (1997) en un estudio describieron la inactivación de *Escherichia Coli* en leche desnatada por un intenso campo eléctrico pulsado. Jeyamkondan *et al*. (1998) utilizaron el mismo método de pasteurización que Martin *et al*, para alimento líquido. Los investigadores concluyeron que los pulsos de alto voltaje probablemente causaron una polarización de la membrana celular de los microorganismos, produciendo su inactivación. Puesto que el objetivo general de la aplicación de campos eléctricos pulsados a los alimentos es la inactivación microbiana, no se han encontrado estudios en los que se utilicen campos eléctricos de baja intensidad para producir algún efecto en los alimentos.

OBJETIVOS

Se desarrollará un prototipo de celda de placas paralelas al que se le aplicará una diferencia de potencial pulsada para generar entre las placas un campo eléctrico pulsado.

Durante la nixtamalización de granos de maíz, se determinará experimentalmente si un campo eléctrico pulsado de baja intensidad, tiene efecto en la hidratación y en la incorporación de iones calcio al interior del grano.

JUSTIFICACIÓN

Un aspecto importante del maíz desde un punto de vista nutricional, es su relación calcio:fósforo y su incidencia en la formación de los huesos. Muchos experimentos han mostrado que una dieta con una relación calcio:fósforo de 0.66 a 1.0, produce patologías y una precaria salud en el esqueleto (Cramer, 1968). La relación ideal de calcio:fósforo en la dieta humana para mantener una densidad mineral apropiada en los huesos, debe ser de 1 a 1.5 (Whiting et al, 2002). La relación calcio:fósforo que en el maíz no nixtamalizado es de aproximadamente 0.05, llega a ser frecuentemente de 1.0 en los productos nixtamalizados (Paredes-López, 2006). La nixtamalización de los granos de maíz aumenta el contenido de calcio en su interior, por consiguiente, la relación calcio:fósforo aumenta, elevándose así la calidad nutritiva de los productos nixtamalizados. Por otro lado, Martínez-Flores et al (2002) estudiaron las propiedades físicas y la composición química de fémures de ratas alimentadas con tortillas de maíz nixtamalizado y sin nixtamalizar. En este estudio, los investigadores concluyeron que los fémures de las ratas alimentadas con tortillas nixtamalizadas fueron más pesados, más gruesos y más fuertes que aquellos de las ratas alimentadas con tortillas no nixtamalizadas. Estos estudios, entre otros, muestran la importancia de la difusión del calcio al interior del grano, y la necesidad de que se sigan realizando más investigaciones. Asimismo, se debe tener en cuenta que los productos nixtamalizados proveen más de la mitad del calcio total ingerido *per capita* en México (Paredes-López, 2006).

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Diseño experimental

3.1.1. Diseño experimental fraccional $\frac{1}{2} 2^K$

Al inicio de la etapa experimental, se quiso averiguar cuales de las tres variables implicadas en el estudio –amplitud, frecuencia y ciclo de trabajo del pulso- podrían tener poco o nulo efecto en la hidratación de los granos de maíz, por lo que se eligió un diseño experimental fraccional $\frac{1}{2} 2^K$ que permitió reducir de $2^3 = 8$ a $2^{3-1} = 4$ combinaciones factoriales. Esta reducción en corridas experimentales logró que se realizaran dos experimentos en vez de uno y así poder tener una mayor certeza acerca de los factores más significativos que se tomarían en cuenta en el diseño experimental siguiente. En las tablas 3.1 y 3.2 se observan los diseños experimentales. Éstos se llevaron a cabo a una temperatura de 40°C. La amplitud o nivel de voltaje, la frecuencia y el ciclo de trabajo se representaron con x_1 , x_2 y x_3 respectivamente.

Tabla 3.1. Diseño experimental 2_{III}^{3-1}

Corrida	x_1 (amplitud en volts)	x_2 (frecuencia en hertz)	x_3 (porcentaje de trabajo)	Hidratación del grano
1	(-1) 50	(-1) 1	(1) 70	
2	(1) 100	(-1) 1	(-1) 30	
3	(-1) 50	(1) 21	(-1) 30	
4	(1) 100	(1) 21	(1) 70	
Los valores entre paréntesis indican la codificación del diseño experimental				

Tabla 3.2. Diseño experimental 2_{III}^{3-1} con variación del Trabajo

Corrida	x_1 (amplitud en volts)	x_2 (frecuencia en hertz)	x_3 (porcentaje de trabajo)	Hidratación del grano
1	(-1) 50	(-1) 1	(1) 90	
2	(1) 100	(-1) 1	(-1) 10	
3	(-1) 50	(1) 21	(-1) 10	
4	(1) 100	(1) 21	(1) 90	
Los valores entre paréntesis indican la codificación del diseño experimental				

3.1.2. Diseño experimental de Box-Behnken

Box y Behnken, propusieron diseños de tres niveles para ajustar superficies de respuesta que se forman combinando factoriales 2^K con diseños de bloques incompletos, los diseños suelen ser muy eficientes en términos del número requerido de corridas, y son rotables o casi rotables. La rotabilidad de los

diseños es importante para encontrar los puntos característicos de la superficie de respuesta de una forma más eficiente (Montgomery, 2005). En la tabla 3.3 se muestra el diseño utilizado de Box-Behnken para tres variables en el experimento. La amplitud o voltaje, el porcentaje de trabajo y la temperatura se representaron con A, B y C respectivamente. El diseño también se ilustra geométricamente en la figura 3.1 para tres factores en general.

En los experimentos fraccionales vistos en la sección anterior, las tres variables: voltaje, frecuencia y ciclo de trabajo, se relacionan directamente con la onda pulsada de campo eléctrico. En este diseño, se utilizó el voltaje y el porcentaje de trabajo como variables de la onda pulsada, la temperatura se introdujo como tercera variable. El motivo de la elección de estas variables se muestra en la sección 4.1.

Tabla 3.3. Diseño experimental Box-Behnken para la hidratación y contenido de calcio del grano de maíz

Corrida	A (Voltaje en voltios)	B (Porcentaje de trabajo)	C (Temperatura)	Hidratación del grano	Contenido de calcio del grano
1	(-1) 10	(-1) 30	(0) 35		
2	(-1) 10	(1) 70	(0) 35		
3	(1) 50	(-1) 30	(0) 35		
4	(1) 50	(1) 70	(0) 35		
5	(-1) 10	(0) 50	(-1) 25		
6	(-1) 10	(0) 50	(1) 45		
7	(1) 50	(0) 50	(-1) 25		
8	(1) 50	(0) 50	(1) 45		
9	(0) 30	(-1) 30	(-1) 25		
10	(0) 30	(-1) 30	(1) 45		
11	(0) 30	(1) 70	(-1) 25		
12	(0) 30	(1) 70	(1) 45		
13	(0) 30	(0) 50	(0) 35		
14	(0) 30	(0) 50	(0) 35		
15	(0) 30	(0) 50	(0) 35		

Los valores entre paréntesis indican la codificación del diseño experimental

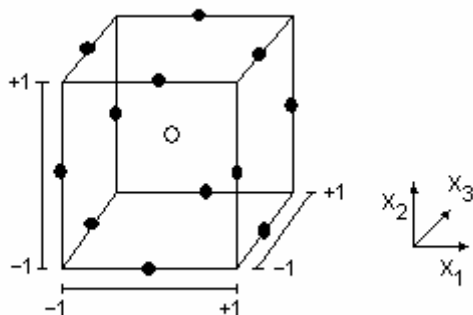


Figura 3.1 Representación geométrica del diseño de Box-Behnken para tres factores

3.2. Sistema experimental

3.2.1. Fuente de voltaje

Para controlar la amplitud del voltaje de los pulsos cuadrados, se contó con una fuente de voltaje/corriente KEPCO Bipolar Operational Power Supply/Amplifier (BOP), la cual tiene salidas lineales de corriente y voltaje que son controladas analógicamente mediante unas perillas. Para el sistema experimental, se utilizó la salida de voltaje con un dominio de 0 a 100 V. En la figura 3.2 se muestra la fuente de voltaje.



Figura 3.2 Bipolar Operational Power Supply/Amplifier (BOP)

3.2.2. Circuito electrónico generador de pulsos de voltaje

El generador de pulsos de voltaje constó de dos etapas. La primera generó dos señales de voltaje pulsado de igual amplitud y frecuencia, pero con un porcentaje de trabajo opuesto entre ellas, es decir, cuando la primera señal estuvo en alto, la otra estuvo en bajo y viceversa. La segunda etapa utilizó estas señales para activar a dos relevadores de estado sólido que mediante una fuente externa, generaron dos ondas pulsadas similares a las primeras aunque de mayor energía.

La primera etapa se conformó de un circuito integrado generador de formas de onda de precisión ICL8038, el cual produce tres tipos de señal de salida: cuadrada, triangular y senoidal en las patas 9, 3 y 2 respectivamente. Para los fines experimentales se utilizó la salida de señal de voltaje pulsado de la pata 9. En la figura 3.3 se observa la vista superior de la pastilla del circuito integrado y la configuración general del circuito utilizada en el sistema experimental.

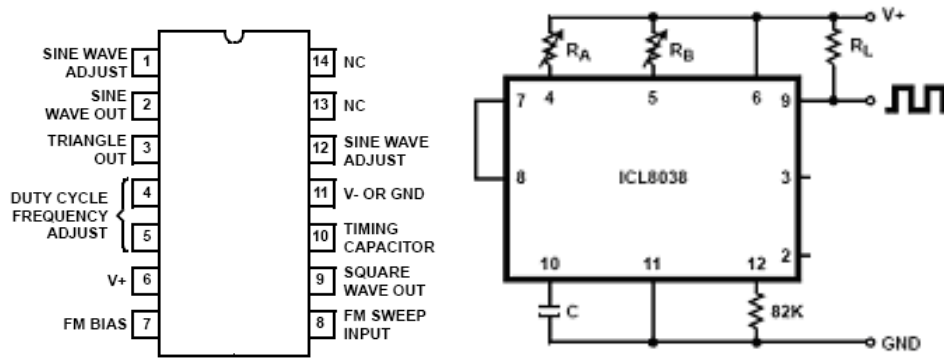


Figura 3.3 Circuito integrado ICL8030 y circuito generador de onda pulsada empleado en el sistema experimental

La señal de onda cuadrada se conectó a una configuración de transistores de conmutación BC337-25 (figura 3.4). El circuito integrado y los transistores se alimentaron con 9V, por lo que las dos señales S1 y S2 tuvieron tal amplitud.

La segunda etapa tuvo como entradas a las señales S_1 y S_2 , las cuales se conectaron respectivamente a un relevador de estado sólido G3NA-D210B de Omron, ocasionando que éstos se encendieran y apagaran a la misma frecuencia que los pulsos de las señales de entrada. Los relevadores conmutaron de abierto a cerrado al circuito eléctrico en el que se conectó la fuente de voltaje BOP de KEPSCO con las celdas C_1 y C_2 y sus respectivas resistencias en paralelo R_1 y R_2 . Esta configuración generó en las terminales de las celdas una onda pulsada de amplitud variable (0-100V). Las resistencias R_1 y R_2 garantizaron una corriente mínima de 0.1A para que los relevadores de estado sólido pudieran conmutar de manera adecuada.

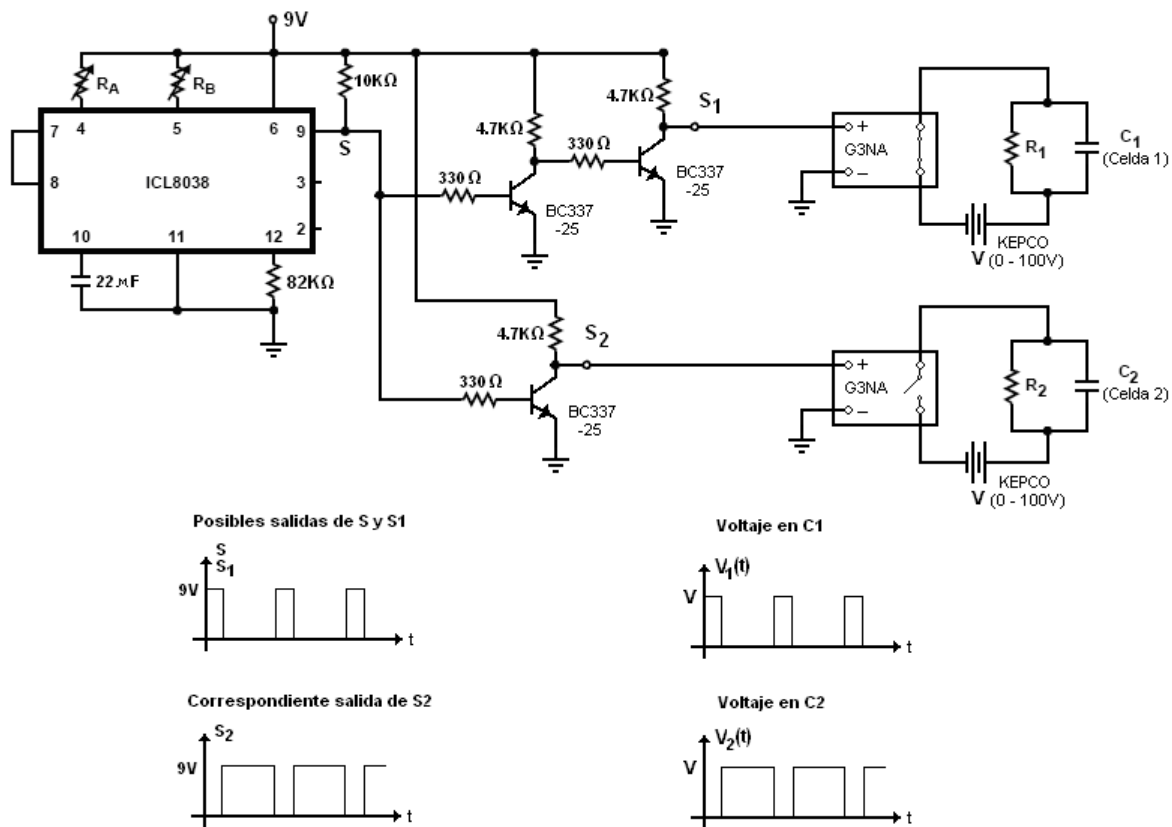


Figura 3.4 Circuito y salidas del generador de onda pulsada

Para cada nivel de voltaje utilizado en los experimentos, se tuvieron que implementar configuraciones de resistencias en serie-paralelo para conformar a R_1 y R_2 ya que sus valores no pudieron encontrarse comercialmente. Los valores se muestran en la tabla 3.4.

Tabla 3.4. Resistencias R_1 y R_2 para cada nivel de voltaje pulsado requerido en los experimentos

Voltaje (voltios)	$R_1, R_2 (\Omega)$
10	82
30	230
50	447
100	982

A la salida del generador de pulsos de voltaje se pudo obtener una onda cuadrada similar a la representada en la figura 3.5., a la cual se le pudo variar la amplitud, la frecuencia y el porcentaje de trabajo. A esta última variable se le controló variando las resistencias R_A y R_B .

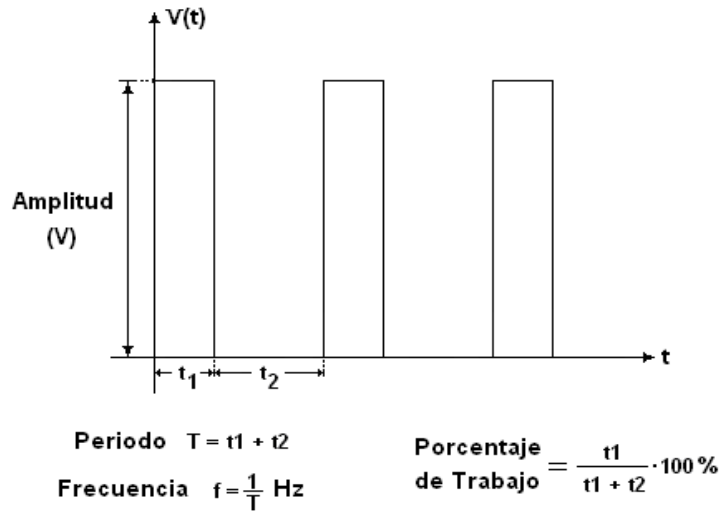


Figura 3.5 Factores eléctricos de la onda pulsada

Dado el diseño experimental, se requirieron valores fijos de frecuencia, porcentaje de trabajo y amplitud. Bajo tales condiciones se calcularon los valores necesarios de R_A y R_B basándose en el manual de usuario del circuito integrado ICL8038. De esta manera, se obtuvieron los valores de frecuencia y porcentaje de trabajo correspondientes a los diseños experimentales. Para la amplitud sólo se tuvo que variar el voltaje de la fuente BOP y utilizar las resistencias R_1 y R_2 adecuadas. En la tabla 3.5 se muestran los valores de R_A y R_B para los niveles de frecuencia y porcentaje de trabajo requeridos. El ciclo de trabajo de 70% no se muestra en la tabla porque éste se obtiene implícitamente con el de 30%, ya que si la señal S_1 tiene un porcentaje de trabajo de 30%, entonces S_2 tendrá un ciclo de trabajo de 70% y viceversa.

Tabla 3.5 Valores resistivos requeridos para la frecuencia y el porcentaje de trabajo del diseño experimental

Frecuencias ICL8038	Porcentaje de trabajo de 30	Porcentaje de trabajo de 50
1Hz	$R_A = 9.2K\Omega$ $R_B = 12.68K\Omega$	$R_A = R_B = 15K\Omega$
11Hz	$R_A = 780\Omega$ $R_B = 1K\Omega$	$R_A = R_B = 1.39K\Omega$
21Hz	$R_A = 440\Omega$ $R_B = 600\Omega$	$R_A = R_B = 730\Omega$

3.2.3. Control de temperatura

La temperatura de las celdas se controló mediante un baño de inmersión de agua que se preparó en un vaso de precipitado de 2L. El agua del baño se calentó con una resistencia eléctrica de 26 ohms y 350 W. La potencia de la resistencia, se controló mediante un circuito electrónico basado en un triac y un potenciómetro, conocido como dimmer, el cual limita la potencia de una carga resistiva. En el caso de la resistencia del baño de inmersión, el dimmer permitió disipar de 0 a 350W, por lo que se tuvo un control de temperatura del agua a partir de la temperatura ambiente hasta 92°C. Asimismo, se conectó en serie a la resistencia, un foco de 25W que permitió aproximar visualmente el nivel de potencia que se estaría disipando en un momento dado. La temperatura del baño de inmersión y del interior de las celdas, se monitorearon con un termómetro convencional de mercurio.

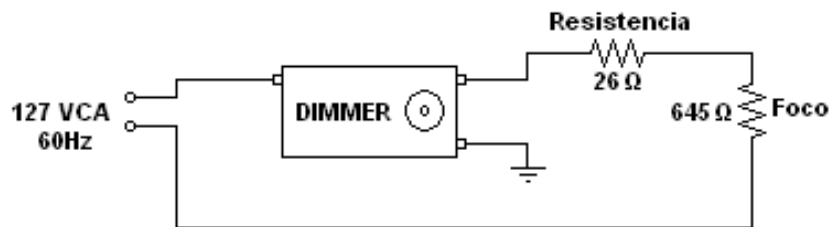


Figura 3.6 Circuito del calentador de agua

3.2.4. Diseño de las celdas de placas paralelas

Al diseñarse las celdas experimentales, se propuso una capacidad volumétrica suficiente para llevar a cabo la nixtamalización de granos de maíz en su interior, a la vez que las muestras tuvieran un tamaño adecuado para los análisis experimentales. Además, se escogió un sistema de placas paralelas para evitar la dificultad que presenta una dependencia radial del campo eléctrico en un sistema de conductores cilíndricos concéntricos.

Se optó por resina poliéster para conformar el cuerpo de las celdas ya que es un material aislante y casi indeformable a temperatura de ebullición del agua, asimismo las placas conductoras de cobre podrían encapsularse con relativa facilidad en el interior del cuerpo de las celdas. El dibujo del diseño de la celda y su tapa se muestran en las figuras 3.7 y 3.8.

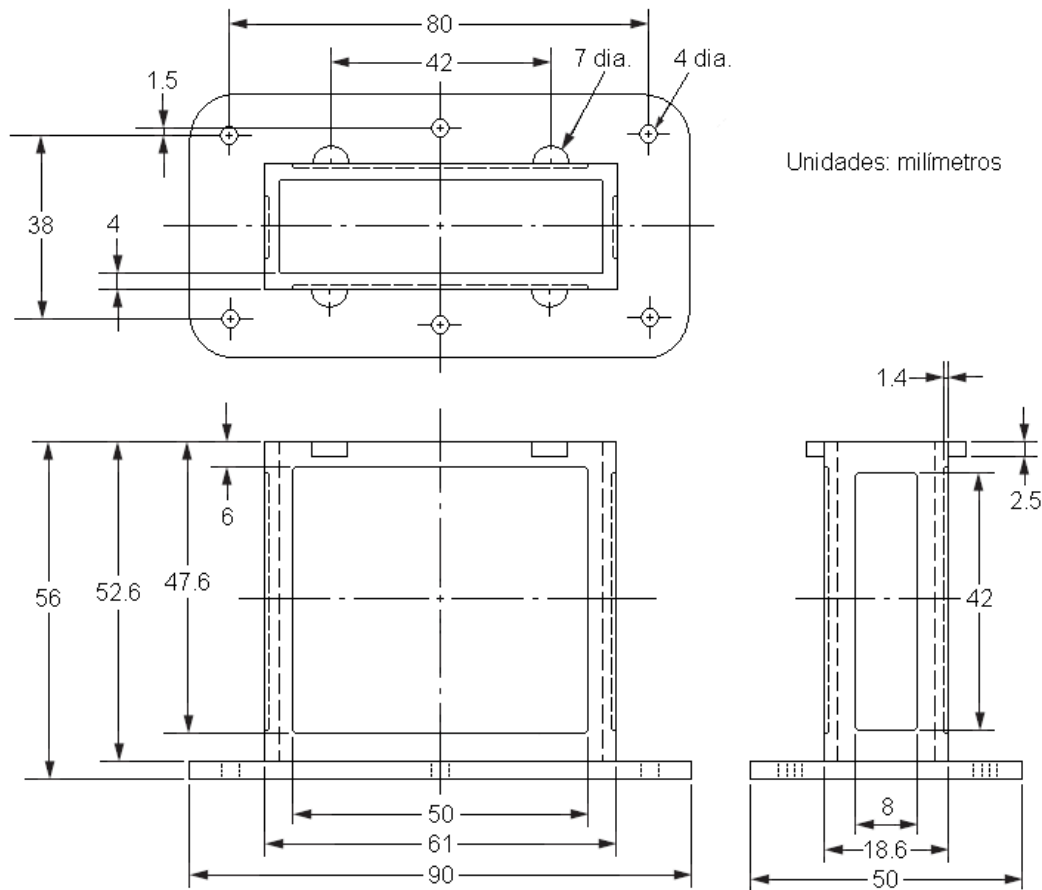
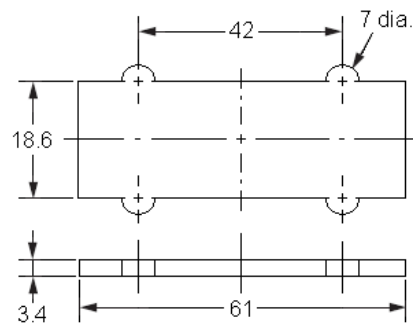


Figura 3.7 Plano de celda de placas paralelas



Unidades: milímetros

Figura 3.8 Plano de tapa de celda de placas paralelas

Ante este diseño, fue posible calcular la capacitancia total de la celda de placas paralelas. En la figura 3.9, se representa la vista lateral de la celda. Su interior se dividió en cuatro partes: una representa a la solución alcalina con constante dieléctrica K_1 , dos representan a las capas de resina que recubren las placas de cobre con constante K_2 , y la última representa a la mezcla de la solución alcalina con los granos de maíz, con constante K_3 .

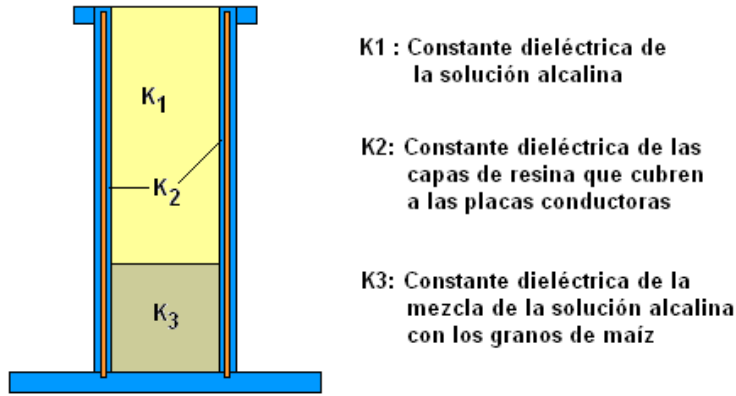


Figura 3.9 Vista lateral de la celda de placas paralelas y sus constantes dieléctricas

En base a los tres materiales dieléctricos del interior de la celda, se calculó la capacitancia total de la siguiente manera:

Sean: L la altura de las placas que está en contacto con los materiales dieléctricos; y la altura del material dieléctrico de constante K_3 ; $A_1 = (L - y)L$ y $A_2 = yL$, las áreas de las placas correspondientes a los materiales de constantes K_1 y K_3 respectivamente; d el ancho interior de la celda; y x el grosor de la capa de resina que recubre a las placas.

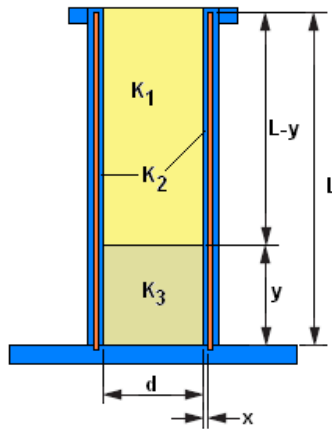


Figura 3.10 Vista lateral de la celda de placas paralelas y sus dimensiones

Además, si C_1 , C_2 y C_3 son las capacitancias dadas por los dieléctricos K_1 , K_2 y K_3 , entonces la capacitancia total C (ver Apéndice B) estará dada por

$$C = \frac{1}{\frac{1}{C_1 + C_3} + \frac{2}{C_2}} = \frac{C_2(C_1 + C_3)}{C_2 + 2(C_1 + C_3)}$$

de donde

$$C_1 = \varepsilon_0 K_1 \frac{A_1}{d - 2x}$$

$$C_3 = \varepsilon_0 K_3 \frac{A_2}{d - 2x}$$

$$C_2 = \varepsilon_0 K_2 \frac{A}{x}$$

Por lo tanto la expresión de la capacitancia total, queda como

$$C = \frac{\varepsilon_0 K_2 A [K_1 A_1 + K_3 A_2]}{K_2 A (d - 2x) + 2x [K_1 A_1 + K_3 A_2]}$$

3.2.5. Construcción de las celdas de placas paralelas

Se construyeron dos celdas de placas paralelas en base al diseño de la sección anterior. Se encapsularon las placas de cobre en el cuerpo de la celda cuidando que quedaran paralelas y a una distancia de 12 mm entre ellas. En la figura 3.11 se observa un esquema general de las celdas.

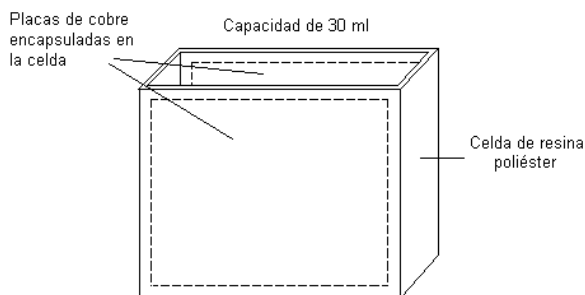


Figura 3.11 Esquema de la celda de placas paralelas

Las dos celdas de placas paralelas terminadas se sometieron a diferentes pruebas para medir sus capacitancias en función del tiempo; del volumen del agua bidestilada; del volumen de la solución alcalina; de la concentración de la solución; y de la temperatura de la solución. Algunos resultados de estas mediciones se utilizaron para la discusión de resultados.

3.3 Experimentación

3.3.1. Selección de las muestras

Se seleccionó maíz de un tamaño y forma semejantes para conformar a las muestras. Se procuró que las muestras fueran lo más homogéneas posible. Su masa promedio fue de 7.5 g. Por cada muestra de maíz se preparó una solución 0.014 molar de hidróxido de calcio. Se adicionaron alícuotas de 24 mL de

solución alcalina. La mezcla de la solución con los granos de maíz se colocó dentro de la celda. El volumen de la mezcla fue de aproximadamente 29.5 mL.

3.3.2. Tratamiento de las muestras

Las celdas con las muestras de maíz se introdujeron en el baño de inmersión (ver sección 3.2.2) previamente calentado y controlado a la temperatura requerida. Se colocó un termómetro de mercurio cerca de las bases de las celdas para controlar la temperatura. Las terminales de las celdas se conectaron al generador de ondas pulsadas de campo eléctrico y mediante un cronómetro digital se midieron las 4 horas de tratamiento.

3.3.3. Medición de humedad de las muestras

Al término del tratamiento con el campo eléctrico pulsado, las celdas se sacaron del baño de inmersión, se desechó la solución alcalina, se llenaron las celdas con agua bidestilada para el lavado de los granos de maíz, posteriormente, esta agua también se desechó, los granos se extrajeron de la celda, se secaron con papel y se pesaron en una balanza analítica Explorer OHAUS. Mediante la diferencia en peso de cada muestra, se estimó su hidratación.

3.3.4. Análisis de espectroscopía de absorción atómica de las muestras

La cuantificación del contenido de calcio de las muestras de maíz se realizó mediante espectroscopía de absorción atómica de acuerdo al método AOAC 968.08 1998. Se utilizó un equipo Analyst 3300 de Perkin Elmer. Las muestras de maíz, previamente molidas, se redujeron a cenizas por duplicado utilizando una mufla a una temperatura de 550°C durante 1.67 horas. Las cenizas se agregaron a 100 mL de solución de HCl al 25%, la solución con las cenizas se calentó a punto de ebullición hasta llegar a un volumen final de 50 mL, finalmente, la solución se aforó a 100 mL con agua bidestilada. Los parámetros utilizados en el equipo de espectroscopía atómica fueron los siguientes: presión de aire seco: 12 psi; presión de acetileno: 70 psi; longitud de onda del láser: 422.76 nm; corriente de la lámpara: 10 mA; apertura de la rejilla: 0.7 nm.

IV. Resultados y Discusión

4.1 Resultados de los diseños experimentales de tamizado 2_{III}^{3-1} para la hidratación de los granos de maíz

Para conocer la hidratación de los gramos de maíz al aplicarle un campo eléctrico pulsado, se evaluó el peso inicial y final de las muestras a 40°C (tabla A.1). Los factores evaluados en el experimento fueron: x_1 : voltaje, x_2 : frecuencia y x_3 : porcentaje de trabajo (ver sección 3.1.1). En la tabla 4.1 se observan los resultados del diseño experimental 2_{III}^{3-1} . El análisis de este diseño mostró que los tres factores evaluados no fueron significativos. El porcentaje de hidratación de los granos de maíz fluctuó de 24.9% a 25.7%. En los datos se observó una ligera tendencia positiva en la hidratación del grano, influenciada por el voltaje y porcentaje de trabajo.

Tabla 4.1 Resultados del primer diseño experimental 2_{III}^{3-1} para evaluar la hidratación en grano de maíz

Corrida	x_1 (Voltaje en V)	x_2 (Frecuencia en Hz)	x_3 (% de trabajo)	Porcentaje (%) de hidratación del grano
1	(-1) 50	(-1) 1	(1) 90	25.455
2	(1) 100	(-1) 1	(-1) 10	24.932
3	(-1) 50	(1) 21	(-1) 10	25.675
4	(1) 100	(1) 21	(1) 90	24.993
Los valores entre paréntesis indican la codificación del diseño experimental				

De la tabla 4.1, se obtienen las combinaciones lineales (l_{x_1} , l_{x_2} y l_{x_3}) para estimar los efectos principales del voltaje (x_1), la frecuencia (x_2) y el porcentaje de trabajo (x_3):

$$l_{x_1} = -0.60$$

$$l_{x_2} = 0.14$$

$$l_{x_3} = -0.08$$

de las cuales se aprecia que el voltaje fue el factor que más efecto tuvo en la hidratación relativa del grano de maíz con una estimación de -0.60, en cambio, la frecuencia y el porcentaje de trabajo tuvieron menos efecto con valores de 0.14 y -0.08 respectivamente.

El modelo empírico de regresión lineal para la hidratación del grano de maíz fue:

$$y = 25.26 - 0.30x_1 - 0.07x_2 - 0.04x_3$$

Los coeficientes del modelo y la estimación de los efectos de los tres factores evaluados, confirman que no hay significancia sobre la hidratación del grano de maíz.

A consecuencia de este primer resultado de tamizado, se decidió trabajar con un segundo experimento modificando los niveles del porcentaje de trabajo a 30 y 70%. Los resultados experimentales del segundo diseño 2^{3-1}_{III} se observan en la tabla 4.2.

Tabla 4.2 Resultados del segundo diseño experimental 2^{3-1}_{III} para evaluar la hidratación en grano de maíz

Corrida	x_1 (Voltaje en V)	x_2 (Frecuencia en Hz)	x_3 (% de trabajo)	Porcentaje (%) de hidratación del grano
1	(-1) 50	(-1) 1	(1) 70	27.73
2	(1) 100	(-1) 1	(-1) 30	25.33
3	(-1) 50	(1) 21	(-1) 30	25.37
4	(1) 100	(1) 21	(1) 70	25.48
Los valores entre paréntesis indican la codificación del diseño experimental				

Al analizarse los resultados de este experimento, se obtuvieron las siguientes estimaciones de los efectos principales del voltaje (x_1), frecuencia (x_2) y porcentaje de trabajo (x_3):

$$l_{x_1} = -1.14$$

$$l_{x_2} = -1.11$$

$$l_{x_3} = 1.26$$

de las cuales la frecuencia y el voltaje tuvieron menos efecto en la hidratación del grano de maíz con valores de -1.11 y -1.14. Mientras que el porcentaje de trabajo, mostró el mayor efecto sobre la hidratación con un valor de 1.26.

El modelo empírico de regresión lineal para la hidratación del grano de maíz usando un campo eléctrico pulsado, es el siguiente:

$$y = 25.98 - 0.58x_1 - 0.55x_2 + 0.63x_3$$

Al igual que en el anterior experimento, los valores de las estimaciones de los efectos y el modelo empírico de regresión, indican que ninguno de los factores fue significativo en la hidratación relativa del grano de maíz.

En conclusión, de los dos experimentos de tamizado, ninguno de los tres factores fue significativo para

la hidratación del grano de maíz, y consecuentemente para la difusión del calcio en su interior (ver sección 2.1.3). A pesar de esto, como ya se apreció en el análisis, los factores tuvieron cierto efecto en la hidratación del grano, por lo que se eligieron dos de los tres factores para seguir con dicho estudio.

Al ser el voltaje un factor imprescindible en la onda pulsada, se eligió entre la frecuencia y el porcentaje de trabajo. En el segundo experimento de tamizado se observó la mayor estimación correspondiente al porcentaje de trabajo, por lo que se optó por este factor y sus niveles en este diseño para plantear el ulterior experimento de superficie de respuesta. Se decidió que la temperatura ocuparía el lugar de la frecuencia, ya que es un factor importante en la hidratación del grano de maíz (Hurtado-Castañeda *et al*, 2005).

4.2 Resultados del diseño experimental de Box-Behnken

En la tabla 4.3 se muestra la respuesta a la hidratación y el contenido de calcio de los granos de maíz después de aplicarse condiciones de voltaje (A), ciclo de trabajo (B) y temperatura (C). En la tabla se han incluido las muestras control. La hidratación de los granos de maíz vario de 18.1 a 27.25 % y el contenido de calcio de 0.0909 a 0.1592%. La discusión de las interacciones de los tratamientos aplicados se muestra más adelante en las graficas de superficie respuesta (ver sección 4.5).

Tabla 4.3 Respuesta de hidratación y contenido de calcio de granos de maíz aplicando campo eléctrico pulsado

Corrida	Condiciones de tratamiento			% de hidratación del grano	% de contenido de calcio
	A (Voltaje V)	B (% de trabajo)	C (Temperatura °C)		
1	10	30	35	24.14	0.1151
2	10	70	35	23.74	0.1377
3	50	30	35	25.16	0.1531
4	50	70	35	23.73	0.1150
5	10	50	25	18.63	0.1592
6	10	50	45	25.96	0.1273
7	50	50	25	18.10	0.1226
8	50	50	45	27.25	0.1307
9	30	30	25	19.97	0.1150
10	30	30	45	26.51	0.1467
11	30	70	25	20.25	0.1096
12	30	70	45	27.23	0.1167

13	30	50	35	24.82	0.1420
14	30	50	35	24.21	0.1123
15	30	50	35	23.58	0.0972
i	-	-	25	21.88	0.1086
ii	-	-	25	19.09	0.1148
iii	-	-	35	24.32	0.1096
iv	-	-	35	24.29	0.1103
v	-	-	45	24.86	0.1121
vi	-	-	45	25.52	0.0909
Las muestras control se denotan por las letras i, ii, ...vi					

En la tabla 4.4 se observan los promedios del porcentaje de hidratación relativa y contenido de calcio de las muestras de maíz por nivel de temperatura para realizar una comparación de las muestras experimentales con los controles. En las muestras tratadas con campo eléctrico pulsado, el promedio del porcentaje de hidratación fue de 19.24, 24.20 y 26.74% a 25, 35 y 45°C respectivamente, en las muestras control, para los mismos niveles de temperatura, los promedios fueron de 20.48, 24.30 y 25.19%, no se aprecia mucha diferencia entre los promedios (ver figura 4.1) o tendencias que permitan inferir un efecto del campo eléctrico pulsado en la hidratación relativa de los granos de maíz. Para el porcentaje de contenido de calcio, en la tabla se aprecia que a 25, 35 y 45°C las muestras tratadas tuvieron una media de contenido de calcio de 0.1266, 0.1302 y 0.1303% respectivamente, en cambio los controles a los mismos niveles de temperatura tuvieron un promedio de contenido de calcio de 0.1117, 0.1099 y 0.1015%, por lo que las muestras de maíz tratadas con el campo eléctrico pulsado, mostraron a 25, 35 y 45°C, 1.13, 1.18 y 1.28 veces más calcio que los controles. Estos resultados podrían favorecer la hipótesis de que el contenido de calcio en los granos de maíz aumenta con la presencia de un campo eléctrico pulsado (ver figura 4.2).

Tabla 4.4. Evaluación de la hidratación y contenido de calcio en muestras de maíz influenciadas por un campo eléctrico pulsado a 25,35 y 45°C

Temperatura (°C)	Promedio (sin tratamiento)		Promedio (con tratamiento)	
	Hidratación (%)	Contenido de calcio (%)	Hidratación (%)	Contenido de calcio (%)
25	20.48	0.1117	19.24	0.1266
35	24.30	0.1099	24.20	0.1302
45	25.19	0.1015	26.74	0.1303
El promedio de las muestras control fue de 2 repeticiones y las muestras tratadas de 4 repeticiones El control: fueron muestras sin campo eléctrico pulsado en cada nivel de temperatura				

La media del contenido de calcio de las muestras tratadas fue de 0.1267%, el calcio endógeno del grano de maíz es aproximadamente de 0.024% (Fernández-Muñoz *et al*, 2004), por lo que hubo un incremento de calcio en el grano de maíz tratado de más de 500%.

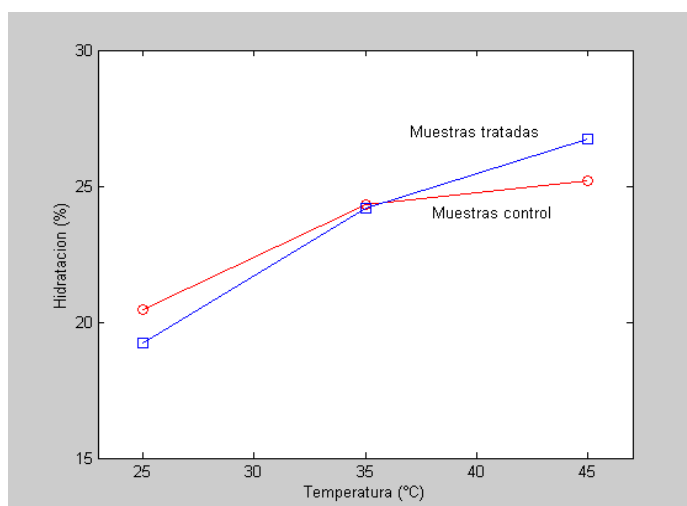


Figura 4.1 Perfiles de hidratación de muestras de maíz tratadas con campo eléctrico pulsado y controles en función de la temperatura

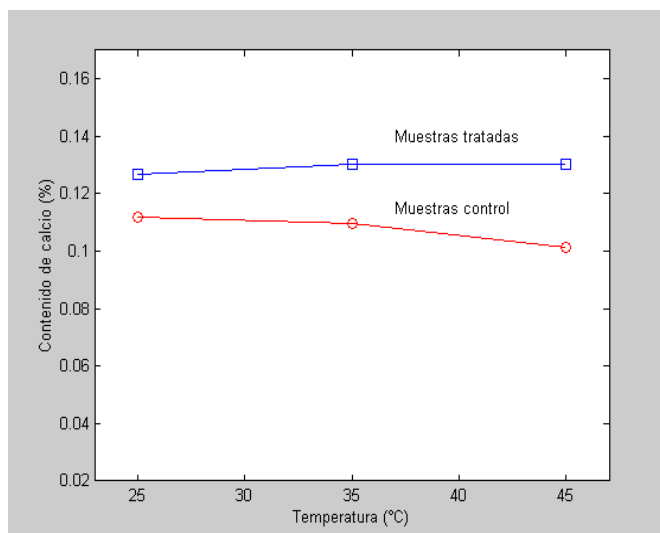


Figura 4.2 Perfiles de contenido de calcio de muestras de maíz tratadas con campo eléctrico pulsado y controles en función de la temperatura

4.3 Análisis de varianza de las respuestas de hidratación y contenido de calcio de los granos de maíz

4.3.1 Análisis de varianza de la hidratación del maíz

En la tabla 4.5 se observa el análisis de varianza para evaluar la hidratación relativa de los granos de maíz influenciados por un campo eléctrico pulsado. El modelo cuadrático de tres factores para la hidratación del grano, fue significativo con un valor de F de 23.52. Esto implica que existe sólo una probabilidad de 0.0014 para que este modelo pudiera fallar debido a perturbaciones experimentales.

Los factores del modelo cuadrático que tuvieron un valor de probabilidad menor que 0.050, no se les consideró como significativos. Al observar la tabla, se puede apreciar que solamente los términos C (temperatura) y C^2 , fueron significativos, ya que tuvieron una probabilidad respectiva de más de 0.9999 y de 0.97 de representar la variabilidad de sus efectos en el modelo. En cambio, los factores A (voltaje) y B (porcentaje de trabajo) tuvieron probabilidades respectivas de 0.56 y 0.29, por lo que A podría describir alguna tendencia en la hidratación del maíz, no así el término B. Las interacciones AB, AC y BC, tuvieron probabilidades respectivas de 0.48, 0.72 y 0.21. La probabilidad de AC podría indicar alguna sinergia entre estos factores, no así en AB y menos aún en BC. Los términos cuadráticos A^2 y B^2 , tuvieron probabilidades de 0.75 y 0.74 respectivamente, lo que indica que podrían tener una cierta tendencia en el modelo. Un valor de Falta de Ajuste de 1.82 implica que este valor no es significativo en relación con el error puro.

Tabla 4.5 Análisis de varianza de la superficie de respuesta evaluada para la hidratación de los granos de maíz

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	Valor F	Valor P Prob > F
<i>Modelo</i>	122	9	13.5	23.5	0.00142 (significativo)
A (Voltaje)	0.395	1	0.395	0.688	0.445
B (Trabajo)	0.0878	1	0.0878	0.153	0.712
C (Temperatura)	112	1	112	196	< 0.0001
AB	0.271	1	0.271	0.472	0.523
AC	0.826	1	0.826	1.44	0.284
BC	0.0473	1	0.0473	0.0824	0.786
A^2	0.953	1	0.953	1.66	0.254

B^2	0.906	1	0.906	1.58	0.265
C^2	5.40	1	5.40	9.41	0.0279
<i>Residual</i>	2.87	5	0.574		
Falta de Ajuste	2.10	3	0.701	1.82	0.374 (no significativo)
Error puro	0.769	2	0.384		
Total corregido	124	14			

4.3.2 Análisis de varianza del contenido de calcio

En la tabla 4.6, se observa el análisis de varianza para evaluar en el contenido de calcio en el grano de maíz influenciado por los factores estudiados y las interacciones entre ellos. Un valor F de 0.76 indica que el modelo no es significativo en relación al error experimental, por lo que hay una probabilidad de 0.663 de que el modelo pudiera fallar debido al error.

No hubo términos del modelo cuadrático de contenido de calcio de los granos de maíz que tuvieran una probabilidad menor que 0.050, por lo tanto, no hubo factores significativos que influyeran en el contenido de calcio de los granos. Las probabilidades de A (voltaje), B (porcentaje de trabajo) y C (temperatura) de representar sus variaciones en el modelo fueron de 0.24, 0.60 y 0.20 respectivamente. Solamente B, con probabilidad de 0.60 podría sugerir una mayor influencia de este factor en el contenido de calcio del maíz, no así A y C, con probabilidades respectivas de 0.24 y 0.20. En cuanto a las interacciones, AB, AC y BC tuvieron probabilidades de 0.82, 0.65 y 0.45 respectivamente. AB y AC, tuvieron una mayor representatividad de sus variaciones en el modelo, lo cual sugiere la posibilidad de sinergias entre el voltaje y el porcentaje de trabajo y entre el voltaje y la temperatura. Los términos cuadráticos A^2 , B^2 , C^2 , tuvieron probabilidades de 0.75, 0.004 y 0.34 respectivamente. El término A^2 tuvo la mayor probabilidad de representar su variación en el modelo, en cambio B^2 prácticamente tuvo una probabilidad de cero. El valor de Falta de Ajuste del modelo de 0.54 no fue significativo en relación con el error puro.

Tabla 4.6 Análisis de varianza de la superficie de respuesta para evaluar el contenido de calcio de los granos de maíz

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	Valor F	Valor P Prob > F
<i>Modelo</i>	0.002546	9	0.0002829	0.75644	0.6633 (no significativo)
A (Voltaje)	0.00003926	1	0.00003926	0.104991	0.7590
B (Trabajo)	0.0003223	1	0.0003223	0.861758	0.3959
C (Temperatura)	0.00002791	1	0.00002791	0.074642	0.7956
AB	0.0009214	1	0.0009214	2.46393	0.1773
AC	0.0003998	1	0.0003998	1.06903	0.3486
BC	0.0001518	1	0.0001518	0.40589	0.5521
A ²	0.0006261	1	0.0006261	1.67428	0.254
B ²	8.858E-09	1	8.858E-09	0.0000237	0.9963
C ²	0.0000829	1	0.0000829	0.22157	0.6577
<i>Residual</i>	0.00187	5	0.000374		
Falta de ajuste	0.00083493	3	0.00027831	0.537845	0.7016 (no significativo)
Error puro	0.0010349	2	0.0005175		
Total corregido	0.0044158	14			

4.4 Modelos cuadráticos de las superficies de respuesta

En la tabla 4.7 se muestran los niveles de los factores codificados para la evaluación de la hidratación y el contenido de calcio de los granos de maíz. Los modelos cuadráticos de de la hidratación y el contenido de calcio fueron los siguientes

$$\text{Hidratación} = 24.2 + 0.222A - 0.105B + 3.75C - 0.26AB \\ + 0.455AC + 0.109BC - 0.508A^2 + 0.495B^2 - 1.21C^2$$

$$\text{ContenidoCalcio} = 0.1172 - 0.0022A - 0.0064B + 0.0019C - 0.0152AB \\ + 0.01AC - 0.0062BC + 0.013A^2 + 0.00005B^2 + 0.0047C^2$$

Tabla 4.7 Equivalencias entre las variables naturales y las codificadas

Factores	Factores naturales			Factores codificados		
A (Voltaje en V)	10	30	50	-1	0	1
B (Trabajo en %)	30	50	70	-1	0	1
C (Temperatura en °C)	25	35	45	-1	0	1

4.5 Superficies de Respuesta de la hidratación y contenido de calcio de los granos de maíz

4.5.1 SR en función del voltaje y el trabajo a una temperatura de 25° C

Los modelos para la hidratación y el contenido en calcio el grano de maíz aplicando el análisis de superficies de respuesta son:

$$\text{Hidratación} = 19.24 - 0.233A - 0.214B - 0.26AB - 0.508A^2 + 0.495B^2$$

$$\text{ContenidoCalcio} = 0.12 - 0.0122A - 0.0002B - 0.0152AB - 0.013A^2 + 0.00005B^2$$

Para la superficie de respuesta de la hidratación del grano, el punto estacionario o de silla se encontró a un voltaje de 24.7 V y un porcentaje de trabajo de 52.9%. Como se observa en la figura 4.5, si se mantiene fijo al voltaje, cualquier desplazamiento del punto sobre la superficie de respuesta, aumentará el valor de hidratación. La hidratación máxima, se encontró en un porcentaje de trabajo de 30%, y se llegó a la siguiente ecuación

$$\text{Hidratación} = 19.949 + 0.027A - 0.508A^2$$

a la que se le encontró su máximo en $A = 0.027$ (30.5 V), por lo que la máxima hidratación resultó en un voltaje de 30.5 V y un trabajo de 30%. En la superficie respuesta para el contenido de calcio, podemos apreciar que el máximo valor se encuentra en un voltaje de 10 V y un trabajo de 70% (tabla 4.8). Al compararse las superficies de respuesta de hidratación y contenido de calcio del grano de maíz,

se observó que la difusión de agua y de iones calcio al interior del grano discrepa pronunciadamente. La razón de esta discrepancia, podría deberse a que a 25°C, es difícil que el pericarpio del grano de maíz sufra algún daño en su estructura debido a la solución alcalina, por lo que los iones calcio se fijarían mayoritariamente a esta capa, y no al interior del grano. Debe considerarse que la confiabilidad del modelo para la hidratación del grano es mucho más alta que el de contenido de calcio (sección 4.3), pero existe una probabilidad de que la superficie de respuesta indique tendencias de los factores experimentales en la difusión del calcio en el grano de maíz.

En las tablas B.2, B.3 y B.4 del apéndice B, se observan los resultados de los cálculos para el potencial, el campo eléctrico, la carga eléctrica en las placas, la polarización y el momento dipolar total de la solución alcalina con los granos de maíz a diferentes niveles de temperatura y voltaje. Para los puntos de máxima hidratación y máximo contenido de calcio del grano, se obtuvo una polarización respectiva del dieléctrico de 2.89×10^{-7} y 9.64×10^{-8} C/m², por lo que hubo una mayor polarización dieléctrica para el primer punto que para el de contenido de calcio. En consecuencia, hubo una mayor alineación en los dipolos del dieléctrico para la máxima hidratación que para el máximo contenido de calcio del grano de maíz.

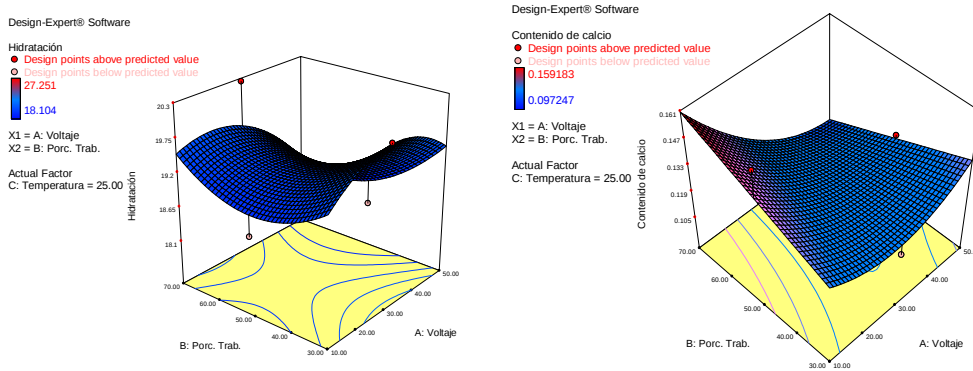


Figura 4.3 Superficies de respuesta de hidratación y contenido de calcio en los granos de maíz a 25°C

Tabla 4.8 Condiciones de voltaje y porcentaje de trabajo en grano de maíz detectadas en el punto máximo de hidratación y contenido de calcio

Respuesta experimental máxima a una temperatura de 25°C	Condiciones de voltaje y porcentaje de trabajo
Hidratación = 19.95 (Contenido de calcio = 0.1204)	30.5 V, 30%
Contenido de calcio = 0.1603 (Hidratación = 19.4960)	10 V, 70%

4.5.2 SR en función del voltaje y el trabajo a una temperatura de 35° C

Los modelos cuadráticos de hidratación y contenido de calcio en los granos de maíz se obtuvieron de la misma forma que en la sección anterior. El punto estacionario de la superficie de respuesta de la hidratación se localizó a un voltaje de 33.6 V y un ciclo de trabajo de 53.1% (ver figura 4.4). Se utilizó un procedimiento similar a la sección anterior para obtener la hidratación máxima, la cual ocurrió en

las condiciones de voltaje y temperatura de 39.5 V y 30%. Para el contenido de calcio, se aprecia en su superficie de respuesta un valor máximo a un voltaje de 50 V y un trabajo de 30% (tabla 4.9). Para una temperatura de 35°C, la discrepancia entre las superficies de respuesta de hidratación y contenido de calcio del grano de maíz disminuye en comparación a las superficies de la sección anterior. Los puntos máximos de ambas superficies se encuentran en un valor de 30% del porcentaje de trabajo, sólo los valores de voltaje varían de 39.5 y 50 V para la hidratación y el contenido de calcio respectivamente. La creciente correspondencia entre ambas respuestas podría ser debido a que a 35°C la temperatura interactúa en mayor medida con la alcalinidad de la solución, produciendo más daño al pericarpio y consecuentemente, provocando que más iones calcio se difundan al interior del grano, a la vez que, una fracción del calcio fijado al pericarpio se perdería al sufrir éste un daño en su estructura.

De la tablas B.2, B.3 y B.4 del apéndice B, se observó que para los puntos de máxima hidratación y máximo contenido de calcio en el grano de maíz, se obtuvo una polarización respectiva del dieléctrico de casi 4.13×10^{-7} y de 5.16×10^{-7} C/m². La alineación dipolar de los átomos y moléculas de la mezcla de solución alcalina con granos de maíz, fue similar para las respuestas máximas de hidratación y contenido de calcio del grano de maíz.

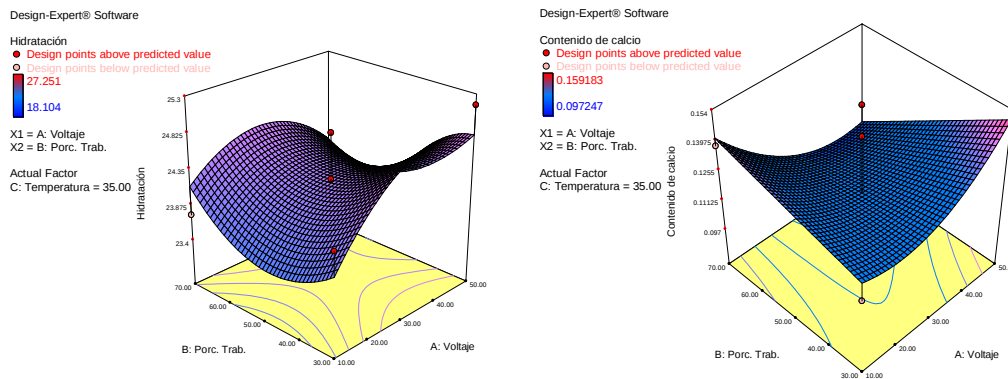


Figura 4.4 Superficies de respuesta de hidratación y contenido de calcio en los granos de maíz a 35°C

Tabla 4.9 Condiciones de voltaje y porcentaje de trabajo en grano de maíz detectadas en el punto máximo de hidratación y contenido de calcio

Respuesta experimental máxima a una temperatura de 35°C	Condiciones de Voltaje y Trabajo
Hidratación = 24.91 (Contenido de calcio = 0.1327)	39.5V, 30%
Contenido de calcio = 0.1496 (Hidratación = 24.764)	50 V, 30%

4.5.3 SR en función del voltaje y el trabajo a una temperatura de 45° C

Como se aprecia en la figura 4.5, el punto estacionario de la superficie de respuesta de la hidratación de los granos de maíz se localizó a un voltaje de 42.3 V y un trabajo de 53.2%. Para la hidratación máxima de los granos, la condición de voltaje y porcentaje de trabajo fue de 43.3V y 30%. En la superficie del

contenido de calcio del maíz, se localizó el punto máximo a un voltaje de 50 V y un trabajo de 30% (tabla 4.10). Para una temperatura de 45°C, las superficies de respuesta de hidratación y contenido de calcio del grano de maíz, muestran cierta similitud en sus respectivos puntos máximos, los dos se generan a un 30% de ciclo de trabajo y a un voltaje de 43.3 V para la hidratación y 50 V para el contenido de calcio. Esta similitud en las respuestas podría explicarse de la misma manera que en la sección anterior, esto es, que la temperatura de 45°C junto a la alcalinidad de la solución habría causado más daño al pericarpio, provocándose así una mayor difusión de calcio al interior del grano a la vez que una fracción de calcio fijado a esta capa se habría perdido junto al pericarpio dañado. Asimismo, más calcio pudo haber sido difundido al interior del grano transportado por agua, ya que a 25, 35 y 45°C, la hidratación máxima en el grano de maíz fue de 19.95, 24.91 y 27.63% respectivamente. En cambio, para los mismos niveles de temperatura, se tuvo un contenido de calcio máximo de 0.1603, 0.1496 y 0.1723% respectivamente. El contenido máximo de calcio en el grano de maíz a las tres temperaturas estudiadas, no aumentó conforme lo hizo la hidratación. Esto podría deberse a que conforme el calcio se difunde al interior del grano, éste se pierde al sufrir más daño el pericarpio en tanto la temperatura aumenta.

De la tablas B.2, B.3 y B.4 del apéndice B, se observó que para los puntos de máxima hidratación y máximo contenido de calcio en los granos de maíz, se obtuvo una polarización respectiva del dieléctrico de casi 4.13×10^{-7} y de 5.16×10^{-7} C/m². La alineación dipolar de los átomos y moléculas de la mezcla de la solución alcalina con granos de maíz, fue similar para las respuestas máximas de hidratación y contenido de calcio del grano de maíz.

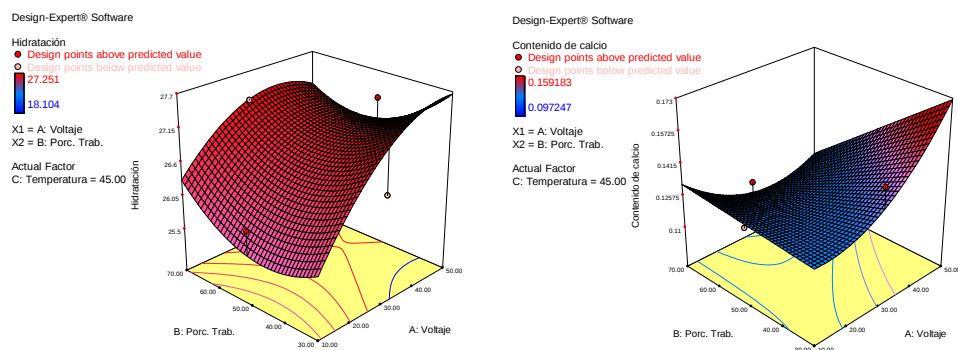


Figura 4.5 Superficies de respuesta de hidratación y contenido de calcio en los granos de maíz a 45°C

Tabla 4.10 Condiciones de voltaje y porcentaje de trabajo en grano de maíz detectadas en el punto máximo de hidratación y contenido de calcio

Respuesta experimental máxima a una temperatura de 45°C	Condiciones de voltaje y porcentaje de trabajo
Hidratación = 27.63 (Contenido de calcio = 0.1574)	43.3 V, 30%
Contenido de calcio = 0.1723 (Hidratación = 27.65)	50 V, 30%

4.5.4 SR en función de la temperatura y el voltaje a un trabajo de 30%

En la figura 4.6 se observan las dos superficies de respuesta para la hidratación y el contenido de calcio de los granos de maíz. Se estimó en la superficie de respuesta de la hidratación, que a una temperatura de 45°C, se tendrían las condiciones para encontrar el punto máximo de hidratación, por lo tanto, se llegó a la siguiente ecuación

$$\text{Hidratación} = 27.231 + 0.937A - 0.508A^2$$

de la cual su punto máximo se encuentra en $A = 0.922$ (48.4 V). La hidratación máxima se obtuvo a condiciones de voltaje y temperatura de 42.3 V y 45°C. Para el contenido de calcio, se observó en su superficie de respuesta que su punto máximo se encuentra a un voltaje de 50 V y una temperatura de 45°C (tabla 4.11). Para un ciclo de trabajo de 30%, las superficies de respuesta para la hidratación y contenido de calcio del grano de maíz, muestran similitud en sus puntos máximos respectivos. Ambos ocurren a una temperatura de 45°C y a un voltaje de 42.3 y 50 V respectivamente. La interacción voltaje-temperatura a un ciclo de trabajo de 30% podría tener un efecto importante en ambas respuestas. Por cada ciclo del campo eléctrico pulsado, se tendría en un 30% del ciclo, a nivel molecular, una alineación relativa de los dipolos eléctricos con respecto a las líneas del campo eléctrico. Aún no se tiene una posible explicación física del porqué ante un porcentaje de trabajo de 30% se obtuvieron respuestas máximas similares de hidratación y contenido de calcio del grano de maíz.

De la tablas B.2, B.3 y B.4 del apéndice B, se observó que para los puntos de máxima hidratación y máximo contenido de calcio en los granos de maíz, se obtuvo una polarización respectiva del dieléctrico de casi 4.13×10^{-7} y de 5.16×10^{-7} C/m². La alineación dipolar de los átomos y moléculas de la mezcla de la solución alcalina con granos de maíz, fue similar para las respuestas máximas de hidratación y contenido de calcio del grano de maíz.

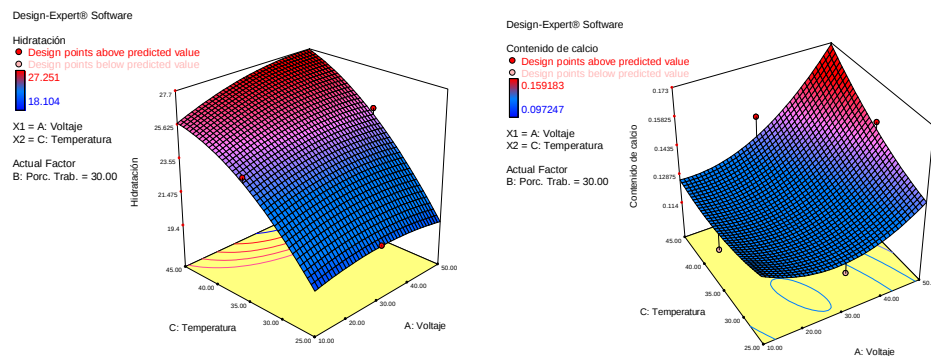


Figura 4.6 Superficies de respuesta de hidratación y contenido de calcio en los granos de maíz a un trabajo de 30%

Tabla 4.11 Condiciones de voltaje y temperatura en grano de maíz detectadas en el punto máximo de hidratación y contenido de calcio

Respuesta experimental máxima a un porcentaje de trabajo de 30%	Condiciones de voltaje y temperatura
Hidratación = 27.6546 (Contenido de calcio = 0.1686)	42.3 V, 45° C
Contenido de calcio = 0.1723 (Hidratación = 27.65)	50 V, 45° C

4.5.5 SR en función de la temperatura y el voltaje a un trabajo de 50%

De las superficies de respuesta de la figura 4.7, se obtuvo la máxima hidratación de los granos de maíz en el punto cuya condición de voltaje y temperatura fue de 43.3 V y 45° C. Con respecto al contenido de calcio de los granos de maíz, su punto máximo se encontró en un voltaje de 50 V y una temperatura de 45°C (tabla 4.12). Para un porcentaje de trabajo de 50%, las superficies de respuesta de hidratación y contenido de calcio muestran cierta similitud en cuanto sus puntos máximos, ambos suceden a una temperatura de 45°C y a voltajes respectivos de 43.33 y 50V. La interacción voltaje-temperatura para un ciclo de trabajo de 50%, parece tener la misma tendencia que para el caso anterior. Sólo que para el porcentaje de trabajo de 30% se tuvo un punto máximo de contenido de calcio de 0.1723%, en cambio para este caso, se tuvo un punto máximo de 0.1446%. Dados estos resultados experimentales, aparentemente un ciclo de trabajo de 30% a una temperatura de 45°C, favorece la difusión de calcio al interior del grano, pero aún no se tienen los elementos suficientes para explicar tal situación.

De la tablas B.2, B.3 y B.4 del apéndice B, se observó que para los puntos de máxima hidratación y máximo contenido de calcio en los granos de maíz, se obtuvo una polarización respectiva del dieléctrico de casi 4.13×10^{-7} y de 5.16×10^{-7} C/m². Al igual que en el caso anterior, la alineación dipolar de los átomos y moléculas de la mezcla de la solución alcalina con granos de maíz, fue similar para las respuestas máximas de hidratación y contenido de calcio del grano de maíz.

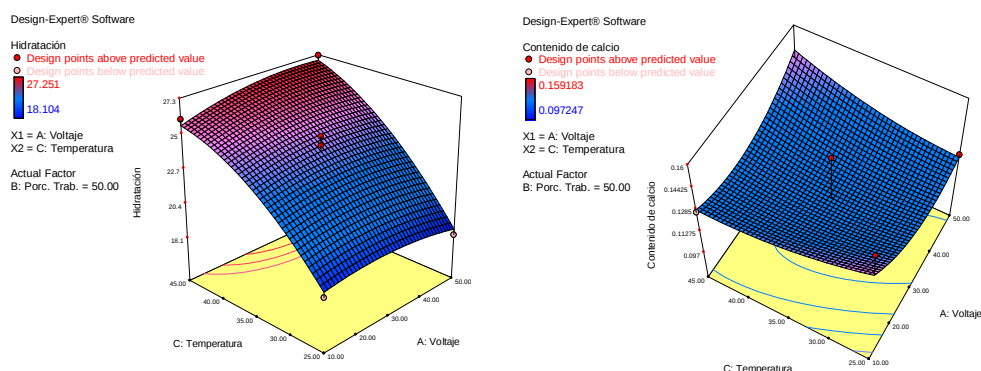


Figura 4.7 Superficies de respuesta de hidratación y contenido de calcio en los granos de maíz a un trabajo de 50%

Tabla 4.12 Condiciones de voltaje y temperatura en grano de maíz detectadas en el punto máximo de hidratación y contenido de calcio

Respuesta experimental máxima a un porcentaje de trabajo de 50%	Condiciones de voltaje y temperatura
Hidratación = 26.9611 (Contenido de calcio = 0.1348)	43.33 V, 45° C
Contenido de calcio = 0.1446 (Hidratación = 26.899)	50 V, 45° C

4.5.6 SR en función de la temperatura y el voltaje a un trabajo de 70%

El punto máximo de la superficie de respuesta para la hidratación de los granos de maíz de la figura 4.8 se obtuvo en la condición de voltaje de 38.2 V y temperatura de 45°C. La superficie correspondiente al contenido de calcio de los granos de maíz, mostró su punto máximo a un voltaje de 10 V y una temperatura de 25°C (tabla 4.13). Para un porcentaje de trabajo de 70%, las superficies de respuesta de hidratación y contenido de calcio en el grano, muestran sus puntos máximos discrepar totalmente. El contenido de calcio máximo de 0.16%, se encontró a 10 V y 25°C, punto correspondiente a una hidratación del grano de 19.5%. Es posible que esta cantidad de calcio se haya obtenido en tales condiciones de temperatura y voltaje por el calcio fijado en el pericarpio del grano.

De la tablas B.2, B.3 y B.4 del apéndice B, se observó que para los puntos de máxima hidratación y máximo contenido de calcio en los granos de maíz, se obtuvo una polarización respectiva del dieléctrico de casi 3.61×10^{-7} y de 9.64×10^{-8} C/m². La alineación dipolar de los átomos y moléculas del dieléctrico fue mayor para la hidratación que para la máxima difusión de calcio en el grano de maíz.

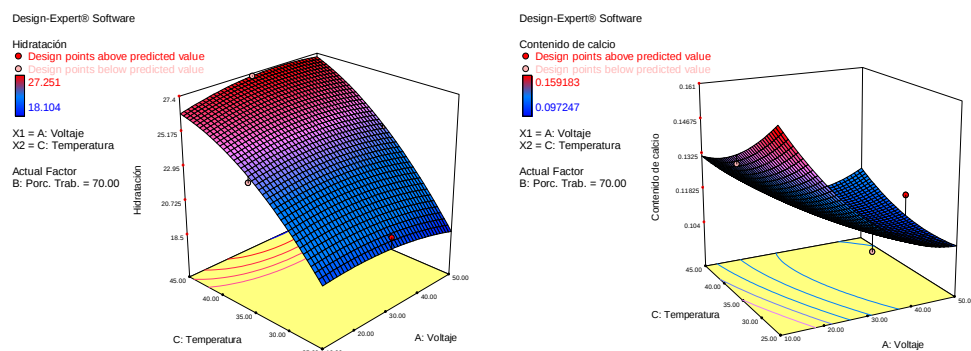


Figura 4.8 Superficies de respuesta de hidratación y contenido de calcio en los granos de maíz a un trabajo de 70%

Tabla 4.13 Condiciones de voltaje y temperatura en grano de maíz detectadas en el punto máximo de hidratación y contenido de calcio

Respuesta experimental máxima a un porcentaje de trabajo de 70%	Condiciones de voltaje y temperatura
Hidratación = 27.323 (Contenido de calcio = 0.1105)	38.2 V y 45° C
Contenido de calcio = 0.1603 (Hidratación = 19.496)	10 V y 25° C

4.5.7 SR en función de la temperatura y el trabajo a un voltaje de 10 V

En la superficie de respuesta de hidratación de los granos de maíz de la figura 4.9, se observó que su punto máximo se ubica en la condición de temperatura de 45°C y trabajo de 70%. Para la superficie del contenido de calcio de los granos de maíz, su punto máximo se encontró a una temperatura de 25°C y un trabajo de 70% (ver tabla 4.14). Al comparar las superficies de respuesta para la hidratación y el contenido de calcio del grano de maíz a un voltaje de 10 V, se aprecia que sus puntos máximos coinciden en el porcentaje de trabajo de 70% pero no así en la temperatura, que ocurrieron a 45 y 25°C respectivamente. Como ya se observó, una mayor hidratación en el grano de maíz ocurre conforme aumenta la temperatura, por lo que queda explicado el punto máximo de hidratación, además, de la superficie de respuesta correspondiente, se observa el poco efecto del porcentaje de trabajo en la hidratación del grano de maíz. Para el contenido de calcio en el grano, su valor máximo podría explicarse en términos del calcio fijado en el pericarpio del grano de maíz a 25°C. Aparentemente, a esta temperatura, el porcentaje de trabajo tiene un efecto importante.

De la tablas B.2, B.3 y B.4 del apéndice B, se observó que para los puntos de máxima hidratación y máximo contenido de calcio en los granos de maíz, se obtuvo una polarización respectiva del dieléctrico de casi 1.11×10^{-7} y de 9.64×10^{-8} C/m². Los dipolos de los átomos y moléculas de la solución alcalina con los granos de maíz, tuvieron una mayor alineación con las líneas del campo eléctrico para la hidratación que para la difusión del calcio al interior del grano.

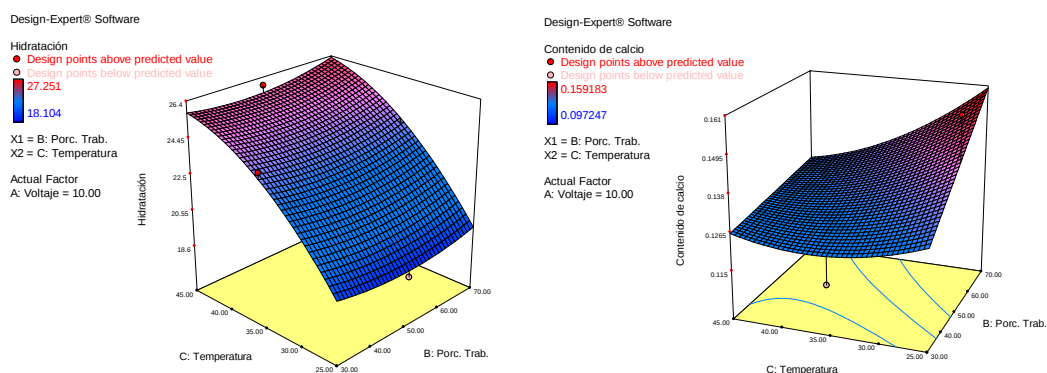


Figura 4.9 Superficies de respuesta de hidratación y contenido de calcio en los granos de maíz a un voltaje de 10 V

Tabla 4.14 Condiciones de voltaje y temperatura en grano de maíz detectadas en el punto máximo de hidratación y contenido de calcio

Respuesta experimental máxima a un voltaje de 10 V	Condiciones de porcentaje de trabajo y temperatura
Hidratación = 26.304 (Contenido de calcio = 0.1317)	70%, 45° C
Contenido de calcio = 0.1603 (Hidratación = 19.496)	70%, 25° C

4.5.8 SR en función de la temperatura y el trabajo a un voltaje de 30 V

En la figura 4.10 se observan las superficies de respuesta para la hidratación y el contenido de calcio de los granos de maíz. En la primera superficie, el punto máximo de hidratación se encontró con la condición de temperatura de 45°C y ciclo de trabajo de 70%, pero se encontró otro punto que es prácticamente el mismo que el primero a idéntica temperatura pero a un ciclo de trabajo de 30%. La diferencia entre los puntos fue de solo 0.008. Por tal razón, se tomaron los puntos máximos de hidratación a una temperatura de 45°C y cualquier valor del porcentaje de trabajo. En la superficie del contenido de calcio, su punto máximo se localizó a una temperatura de 45°C y un trabajo de 30% (ver tabla 4.15). Para un voltaje de 30 V, algunas similitudes se aprecian en las superficies de respuesta para la hidratación y contenido de calcio del grano de maíz. Los puntos máximos ocurrieron a una temperatura de 45°C, y un porcentaje de trabajo de 30% para el contenido de calcio. Es de notarse que conforme el voltaje aumenta, las discrepancias entre las superficies de respuesta de hidratación y contenido de calcio del maíz disminuyen. Esto podría indicar que el voltaje tiene un efecto importante en las respuestas estudiadas.

De la tablas B.2, B.3 y B.4 del apéndice B, se observó que para los puntos de máxima hidratación y máximo contenido de calcio en los granos de maíz, se obtuvo una polarización del dieléctrico de $3.33 \times 10^{-7} \text{ C/m}^2$ para ambas respuestas. Esto indica que los dipolos eléctricos de la solución alcalina con los granos de maíz tuvieron el mismo alineamiento con el campo eléctrico para los puntos máximos de hidratación y contenido de calcio del grano de maíz.

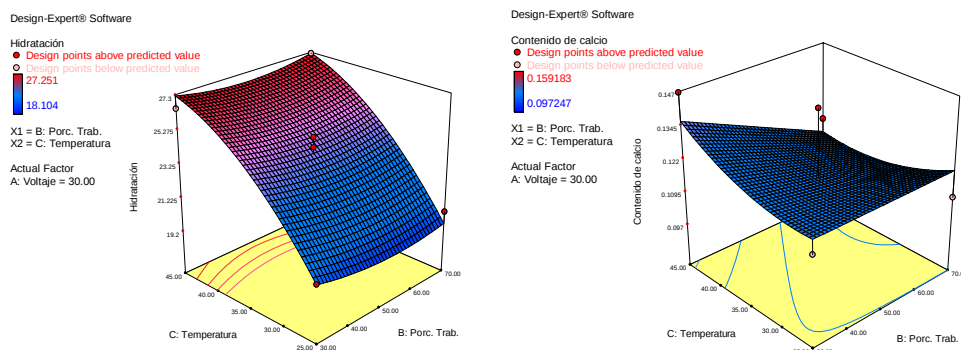


Figura 4.10 Superficies de respuesta de hidratación y contenido de calcio en los granos de maíz a un voltaje de 30 V

Tabla 4.15 Condiciones de voltaje y temperatura en grano de maíz detectadas en el punto máximo de hidratación y contenido de calcio

Respuesta experimental máxima a un voltaje de 30 V	Condiciones de Trabajo y Temperatura
Hidratación = 27.239 (Contenido de calcio = 0.1113)	30-70%, 45°C
Contenido de calcio = 0.1363 (Hidratación = 27.231)	30%, 45°C

4.5.9 SR en función de la temperatura y el trabajo a un voltaje de 50 V

Al observar las superficies de respuesta de la figura 4.11, se encontró a los puntos máximos de hidratación y contenido de calcio de los granos de maíz. En la primera superficie, el punto se ubicó en la condición de temperatura de 45°C y porcentaje de trabajo de 30%. Para la superficie de contenido de calcio, el punto máximo se localizó a la misma temperatura y trabajo que el de hidratación (ver tabla 4.16). Para un voltaje de 50 V, es mayor la similitud entre las superficies de respuesta de hidratación y contenido de calcio del grano de maíz. Prácticamente la máxima hidratación y el máximo contenido de calcio se observa a una temperatura de 45°C y a un porcentaje de trabajo de 30%, aunque el efecto de este último factor es mayor en la superficie del contenido de calcio del grano. Las respuestas de hidratación y contenido de calcio se vuelven más similares conforme el voltaje aumenta. Se puede concluir que los niveles factoriales para una mayor hidratación y difusión de calcio del grano de maíz, son: voltaje de 50 V; temperatura de 45°C; y porcentaje de trabajo de 30%. Aunque es claro que para dar certidumbre a estos resultados se tendrán que realizar más experimentos.

De la tablas B.2, B.3 y B.4 del apéndice B, se observó que para los puntos de máxima hidratación y máximo contenido de calcio en los granos de maíz, se obtuvo una polarización respectiva del dieléctrico de $5.56 \times 10^{-7} \text{ C/m}^2$ para ambas respuestas. Esto indica que los dipolos eléctricos de la solución alcalina con los granos de maíz tuvieron el mismo alineamiento con el campo eléctrico para los puntos máximos de hidratación y contenido de calcio del grano de maíz.

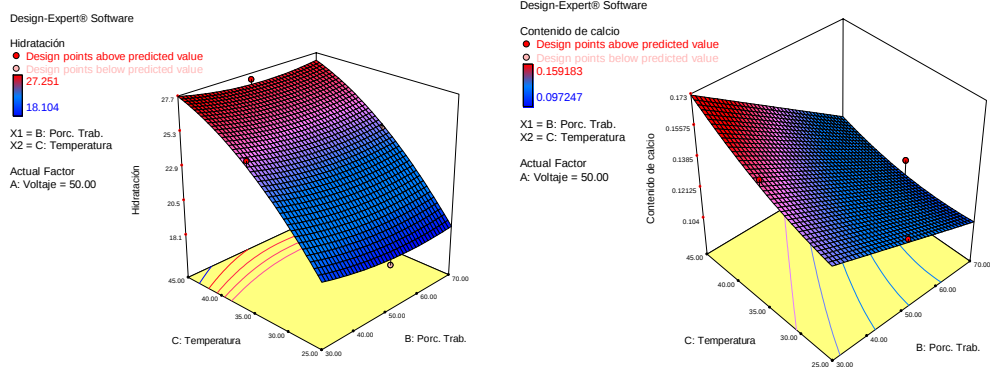


Figura 4.11 Superficies de respuesta de hidratación y contenido de calcio en los granos de maíz a un voltaje de 50 V

Tabla 4.16 Condiciones de voltaje y temperatura en grano de maíz detectadas en el punto máximo de hidratación y contenido de calcio

Respuesta experimental máxima a un voltaje de 50 V	Condiciones de porcentaje de trabajo y temperatura
Hidratación = 27.65 (Contenido de calcio = 0.1763)	30%, 45°C
Contenido de calcio = 0,1763 (Hidratación = 27.65)	30%, 45°C

V. CONCLUSIONES

En los resultados experimentales de hidratación y difusión del ión calcio al interior del grano de maíz, se observó que el campo eléctrico pulsado aplicado a las muestras, tuvo un efecto positivo en la difusión del calcio al interior del grano. El incremento de calcio en las muestras tratadas con el campo eléctrico pulsado fue en promedio de casi 20% con respecto a las muestras que no fueron tratadas, y de más de 500% con respecto al contenido de calcio endógeno del grano de maíz. Al analizarse las superficies de respuesta para la hidratación y contenido de calcio del maíz, se obtuvieron los niveles factoriales para una máxima hidratación y difusión de calcio al interior del grano. Estos fueron: voltaje de 50 V, ciclo de trabajo de 30% y temperatura de 45°C. Aparentemente, aunque no de manera significativa, el ciclo de trabajo y el voltaje del campo eléctrico pulsado tuvieron más efecto en la difusión de calcio en el grano de maíz que la temperatura. En contraste, la temperatura fue el único factor significativo en la hidratación del grano, aunque el voltaje y el porcentaje de trabajo no dejaron de tener cierto efecto en este fenómeno. Para dar certidumbre a estos resultados y una satisfactoria explicación física, se tendrían que realizar más experimentos.

Con lo que respecta al trabajo futuro, podría utilizarse un microcontrolador en lugar del circuito integrado ICL8038 para manejar frecuencias más altas de la señal de onda pulsada; la etapa de potencia del generador de campo eléctrico pulsado podría mejorarse para incrementar la amplitud de los pulsos; la temperatura de las celdas podría variarse y mantenerse con un controlador automático; la capacidad volumétrica de las celdas experimentales podría aumentarse para trabajar con muestras más grandes. Estas mejoras ampliarían el dominio de los factores experimentales pudiéndose diseñar experimentos más variados y específicos y en consecuencia encontrar los niveles factoriales óptimos para obtener una máxima difusión del ión calcio al interior del grano de maíz, que fue el objetivo principal del presente estudio.

VI. BIBLIOGRAFÍA

- Cramer, C. F. 1968. Effect of Ca-P ratio and pH on calcium and phosphorus absorption from dog gut loops in vivo. *Can. J. Physiol. Pharmacol.* 46:171-173.
- Fernández-Muñoz, J. L., Rodríguez, M. E., Baños, L., Martínez, J.L., Martínez-Flores, H.E., Pless, R., and Leal, M. 2002. Changes in nixtamalized corn flour dependent of the postcooking time. *Cereal Chem.* 79:162-166.
- Fernández-Muñoz, J. L., Rojas-Molina, I., González-Dávalos, M. L., Leal, M., Valtierra, M. E., San Martín-Martínez, E., & Rodríguez, M. E. (2004). Study of calcium ion diffusion in components of maize kernels during traditional nixtamalization process. *Cereal Chemistry* 81(1):65-69.
- Gómez, M. H., McDonough, C. M., Rooney, L. W., & Waniska, R. D. (1989). Changes in corn and sorghum during nixtamalization and tortilla baking. *Journal of Food Sciences*, 54(2), 330-336.
- Góngora-Nieto, N. M., Pedrow, P. D., Swanson, B. G., & Barbosa-Cánovas, G. V. (2004). Use of circuit analysis simulations in pulsed electric fields food processing. *Journal of Food Engineering* 61(2004) 413-420.
- Gutiérrez, E., Rojas-Molina, I., Pons-Hernández, J.L., Guzman H., Aguas-Angel, B., Arenas, J., Fernández, P., Palacios-Fonseca, A., Herrera G., & Rodríguez M. E. (2007). Study of calcium ion diffusion in nixtamalized quality protein maize as a function of cooking temperature. *Cereal Chemistry* 84(2):186-194.
- Hlavacova, Z. (2003). Low frequency electric properties utilization in agriculture and food treatment. *Res. Agr. Eng.*, 49, 2003(4):125-136.
- Hurtado-Castañeda, D., Fernández, J., Gutiérrez, E., Rojas-Molina, I., Fernández-Muñoz, J. L., & Rodríguez, M. E. (2005). The diffusion of calcium ion into the organic layers studied by a differential photoacoustic system. *J. Phys. IV*. 125:833-836.
- Knorr, D., Geulen, M., Grahl, T., & Sitzmann, W. (1994). Food application of high electric field pulses. *Trends in Food Science & Technology* March 1994 (vol. 5).
- Laria, J., Meza, E., & Peña, J. L. (2005). Water and calcium uptake by corn kernel during alkaline treatment with different temperature profiles. *Journal of Food Engineering* 78(2007) 288-295.
- Mistry, A. H., & Eckoff, S. R.(1992). Alkali Debranning of corn brand. *Cereal Chemistry*, 69(2), 202-205.
- Paredes-López, O., & Saharopulos-Paredes, M. E. (1982). Scanning electron microscopy studies of limed corn kernels for tortilla making. *Journal of Food Technology*, 17, 691.
- Paredes-López, O., & Saharopulos-Paredes, M. E. (1983). Maize: A review of tortilla production technology. *Bakers Digest*, 13, 16-25.
- Robles, R. R., Murray, E. D. & Paredes López, O. (1988). Physicochemical changes of maize starch during the lime cooking treatment for tortilla making. *Int. Food Sci. Technol.*, 24, 91-98.
- Trejo-González, A., Faria-Morales, A., & Wild-Altamirano, C. (1982). The role of lime in the alkaline treatment of corn for tortilla preparation. *Advances in chemistry series* (No. 198). American Chemical Society, Modification of proteins.
- Zazueta, C., Ramos, G., Fernández-Muñoz, J. L., Rodríguez, M. E., Acevedo-Hernández, G., & Pless, R. C. 2002. A radioisotopic study of the entry of calcium ion into the maize kernels during nixtamalization. *Cereal Chemistry* 79(4):500-503.
- Badui Dergal, Salvador; "Química de alimentos"; 4ª edición; Pearson-Addison Wesley; 2006.
- Paredes López, Octavio; "Los Alimentos Mágicos de las Culturas Indígenas Mesoamericanas"; 1ª edición; Fondo de Cultura Económica; 2006.
- Castellan, "Fisicoquímica". Ed. Addison Wesley.

Ander y Somness, “Fundamentos de Química”. Ed. Limusa.
Sears-Zemansky-Young – Freedman Ed. Addison Wesley Longman, “FÍSICA UNIVERSITARIA”, 1994.
Resnick, Halliday, Krane, "Física" Editorial: CECSA, Cuarta edición, México D.F., 1998
Robert L. Boylestad, “Electrónica: Teoría de Circuitos y Dispositivos electrónicos”; 8ª Edición; Pearson Educación; 2001.
C. Montgomery, Douglas, “Diseño y Análisis de Experimentos”; 2ª Edición; Ed. Limusa; 2005.
http://www.unicrom.com/Tut_triac.asp
www.integratedelectronicsolutions.com/
www.educyclopedia.be/electronics/powerelectronicsdiac.htm
http://www.prof.uniandes.edu.co/~infquimi/ANALISIS/calculos_equi/aplicacion.htm

VII. APÉNDICE

(A)

Los pesos iniciales y finales de las muestras experimentales de tamizado se muestran en la tabla A.1.

Tabla A.1 Masas iniciales e hidratadas de las muestras de maíz de los experimentos de tamizado

Experimento 1			Experimento 2		
Muestra	Peso de granos de maíz		Muestra	Peso de granos de maíz	
	Inicial	Final		Inicial	Final
1	7.4628	10.0483	1	7.6356	10.2430
2	7.4655	9.998	2	7.5608	10.072
3	7.6397	10.2362	3	7.5793	10.1975
4	7.5625	10.1482	4	7.4407	9.92

La tabla A.2 muestra el orden en que se realizaron las corridas experimentales del diseño de Box-Behnken, las muestras control y el peso ganado por la hidratación al concluir el tratamiento. El peso inicial de las muestras vario de 7.4819 a 7.6434 g y el peso final de 9.33 a 10.395 g.

Tabla A.2 Peso inicial y final de las muestras de maíz sometidas al experimento

Muestra	Corrida del diseño experimental	Peso de granos de maíz (g)	
		Inicial	Hidratado
1	1	7.5033	9.8905
2	2	7.5121	9.8507
3	3	7.5586	10.100
4	4	7.6271	9.9995
5	10	7.5219	10.2354
6	12	7.5645	10.3945
7	9	7.6032	9.5004
8	11	7.5495	9.4662
9	13	7.5669	10.065
10	14	7.5312	9.9369

11	5	7.5580	9.2884
12	i	7.4951	9.5944
13	6	7.4855	10.110
14	ii	7.4494	10.1722
15	7	7.6434	9.333
16	iii	7.5767	9.364
17	8	7.5407	10.3654
18	iv	7.5905	10.1912
19	15	7.6662	10.0341
20	v	7.4819	9.8858
21	vi	7.5958	10.0326

(B)

Para el análisis de los resultados experimentales se supuso que las celdas son capacitores de placas paralelas, por lo que las líneas de campo eléctrico se tomaron como paralelas al despreciarse los efectos de borde. En la figura B.1, se observan unas placas finitas paralelas sometidas a una diferencia de

potencial que genera un campo eléctrico entre ellas. La distancia entre las placas es grande en comparación con las dimensiones lineales de éstas, pero puede apreciarse que en general, las líneas de campo eléctrico fuera de los bordes son casi paralelas.

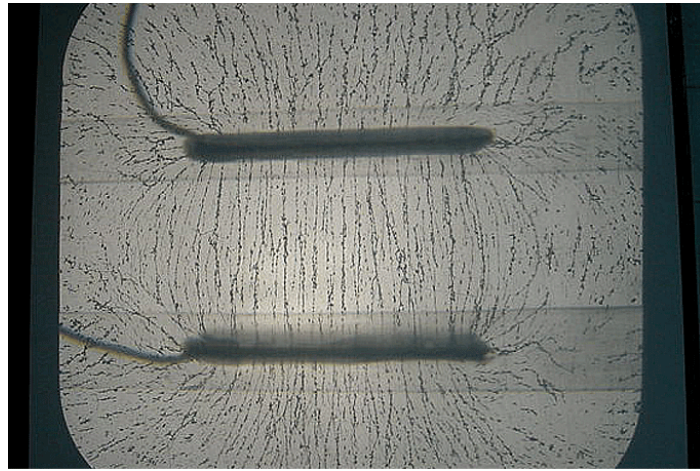


Figura B.1 Campo eléctrico entre placas paralelas finitas (Referencia)

Las celdas experimentales utilizadas en el presente estudio se representarán por el capacitor de placas paralelas que se muestra en el esquema de la figura B.2.

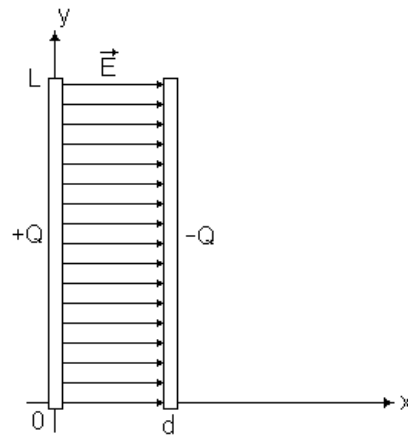


Figura B.2 Capacitor de placas paralelas

Las placas son paralelas de lado L y área $A = L^2$, las cargas en las placas se representan por Q .

El campo eléctrico está dado por

$$\vec{E} = \frac{\sigma}{\epsilon} \hat{x}$$

de donde $\sigma = \frac{Q}{A}$ es la densidad superficial de carga, ε es la capacidad inductiva específica y $\hat{x}$ es el vector unitario que se dirige hacia los valores positivos del eje X. Las unidades del campo eléctrico están dadas en V/m (voltios por metro).

El potencial entre las placas se representa por

$$\phi = Ed$$

Las unidades del potencial escalar están dadas en V (voltios).

Sea $u(t)$ la serie de Fourier de una señal unitaria cuadrada con un ciclo de trabajo de 50% (el análisis del campo eléctrico pulsado para ciclos de trabajo de 30 y 70% es similar a este, solamente debe sustituirse la señal $u(t)$ por las series de Fourier respectivas)

$$u(t) = \frac{1}{2} + \frac{1}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} [1 - (-1)^n] \text{sen} \frac{n\pi t}{T}$$

de donde T es el periodo de la señal (figura B.3). Si ϕ es un potencial constante, entonces

$$\phi(t) = \phi u(t)$$

será un potencial pulsante que puede aplicarse a las terminales del capacitor.

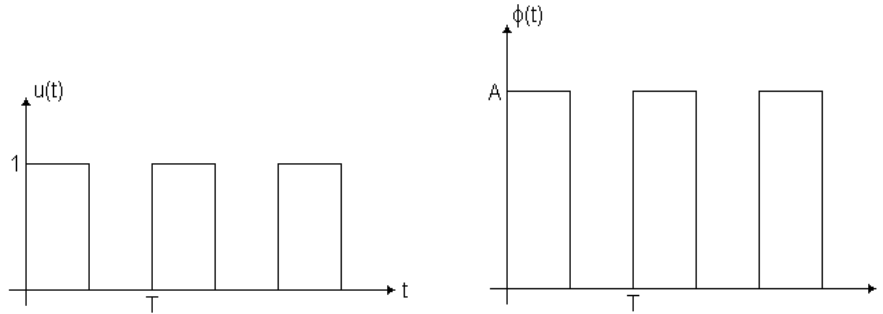


Figura B.3 Señal unitaria cuadrada y el potencial pulsante $\Phi(t)$

Por lo tanto, el campo eléctrico pulsado generado entre las placas paralelas estará dado por siguiente expresión

$$E(t) = \frac{1}{d} \phi(t)$$

A su vez, la carga en las placas del capacitor puede escribirse en función del tiempo como sigue

$$Q(t) = C\phi(t)$$

de donde C (ecuación de capacitancia total de la sección 3.2.4) es la capacitancia total del capacitor.

Ahora, se calculará la polarización y el momento dipolar del dieléctrico en función de la carga total en las placas. Se supondrá que se introduce un dieléctrico genérico entre las placas del capacitor sometidos a un potencial constante. Se obtendrá una polarización $\vec{P}$ del material dieléctrico igualmente constante. Esto implica que la densidad de carga ligada volumétrica del material ρ_b es igual a cero ya que por definición $\rho_b = -\nabla \cdot \vec{P} = 0$. La densidad de carga ligada superficial σ_b será igual a la polarización P_n ($\vec{P}$ es normal al área de las placas) ya que $\sigma_b = \vec{P} \cos \theta' = \vec{P} \cdot \hat{n}_1' = P_n$, entonces

$$P(t) = P_n(t) = \sigma_b(t) = \frac{Q(t)}{A}$$

El momento dipolar total puede obtenerse de la siguiente expresión

$$\vec{p} = \int_V \vec{P}(\vec{r}) d\tau = \int_{-L/2}^{L/2} \int_{-L/2}^{L/2} \int_{-d/2}^{d/2} \vec{P} dz dy dx = dL^2 \vec{P}$$

$$p = dL^2 P_n = dL^2 \sigma_b = dL^2 \frac{Q}{A} = dQ$$

$$p(t) = dQ(t)$$

Se calculará la polarización y el momento dipolar de cada uno de los tres dieléctricos que representan a la solución alcalina, a las capas de resina de las placas y a solución con los granos de maíz (ver figura B.4), cuyas constantes dieléctricas son K_1 , K_2 y K_3 respectivamente. El ancho de las placas que no se muestra en la figura se representó por Z .

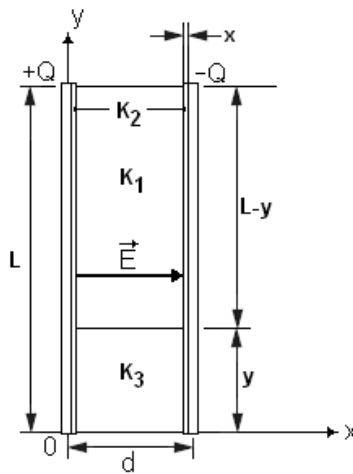


Figura B.4 Capacitor de placas paralelas con tres dieléctricos

El capacitor general puede descomponerse en una configuración de capacitores (figura B.5) en la que interesa conocer la diferencia de potencial que existe en los capacitores C_2 y en los nodos de los

capacitores en paralelo C_1 y C_3 cuando toda la configuración es alimentada con un potencial ϕ .

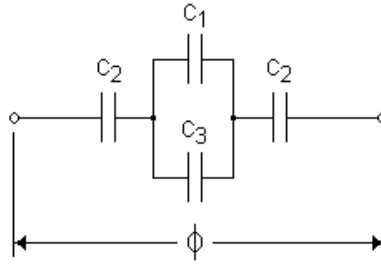


Figura B.5 Configuración de capacitores equivalentes al capacitor general

De la configuración de capacitores se llega a una capacitancia equivalente (figura B.6) que servirá para poder calcular las diferencias de potencial de interés. Esta capacitancia ya fue calculada en la sección 3.2.4.

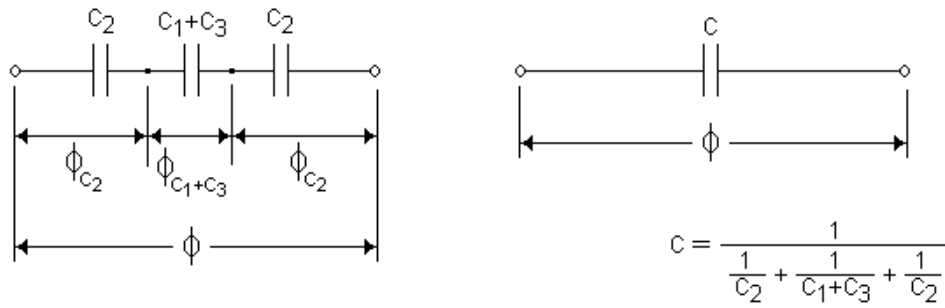


Figura B.6 Diferencias de potencial de los capacitores equivalentes y la capacitancia total

Las diferencias de potencial ϕ_{C_2} y $\phi_{C_1+C_3}$ se calculan como sigue

$$\phi_{C_2} = \left[\frac{1}{\frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_1 + C_3} + \frac{1}{C_2}} \right] \cdot \left[\frac{1}{C_2} \right] \cdot \phi = \frac{C_1 + C_3}{2C_1 + C_2 + 2C_3} \phi$$

$$\phi_{C_1+C_3} = \left[\frac{1}{\frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_1 + C_3} + \frac{1}{C_2}} \right] \cdot \left[\frac{1}{C_1 + C_3} \right] \cdot \phi = \frac{C_2}{2C_1 + C_2 + 2C_3} \phi$$

Finalmente,

$$\phi_{C_2} = \frac{x[K_1 A_1 + K_3 A_2]}{2x(K_1 A_1 + K_3 A_2) + K_2 A(d - 2x)} \phi$$

$$\phi_{C_1+C_3} = \frac{K_2 A(d - 2x)}{2x(K_1 A_1 + K_3 A_2) + K_2 A(d - 2x)} \phi$$

de donde

$$C_1 = \varepsilon_0 K_1 \frac{A_1}{d - 2x}$$

$$C_2 = \varepsilon_0 K_2 \frac{A}{x}$$

$$C_3 = \varepsilon_0 K_3 \frac{A_2}{d - 2x}$$

Un análisis similar al material dieléctrico constante del capacitor general se aplica a los tres capacitores equivalentes para obtener la polarización y el momento dipolar de cada uno de ellos. Por lo tanto, el campo eléctrico pulsado generado entre las placas de cada capacitor es

$$E_{C_2}(t) = \frac{1}{x} \phi_{C_2}(t)$$

$$E_{C_1+C_3}(t) = \frac{1}{d - 2x} \phi_{C_1+C_3}(t)$$

La carga en las placas del capacitor C_2 está dada por

$$Q_{C_2}(t) = C_2 \phi_{C_2}(t)$$

Para obtener la carga en los capacitores C_1 y C_3 , se debe tomar en cuenta que aunque tengan un mismo potencial $\phi_{C_1+C_3}$, la carga entre sus “placas” será distinta en función de las constantes dieléctricas K_1 y K_3 de cada material. Por lo que

$$Q_{C_1}(t) = C_1 \phi_{C_1+C_3}(t)$$

$$Q_{C_3}(t) = C_3 \phi_{C_1+C_3}(t)$$

Existe una polarización $\vec{P}$ constante de los materiales dieléctricos ya que su densidad de carga ligada volumétrica ρ_b es igual a cero ($\rho_b = -\nabla \cdot \vec{P} = 0$). La densidad de carga ligada superficial σ_b será igual a la polarización P_n ya que $\sigma_b = \vec{P} \cos \theta' = \vec{P} \cdot \hat{n}_1' = P_n$. Entonces las polarizaciones para los tres materiales dieléctricos son

$$P_{C_1}(t) = P_{nC_1}(t) = \sigma_{bC_1}(t) = \frac{Q_{C_1}(t)}{A_1}$$

$$P_{C_2}(t) = P_{nC_2}(t) = \sigma_{bC_2}(t) = \frac{Q_{C_2}(t)}{A}$$

$$P_{C_3}(t) = P_{nC_3}(t) = \sigma_{bC_3}(t) = \frac{Q_{C_3}(t)}{A_2}$$

Los momentos dipolares totales para cada material dieléctrico se obtienen como sigue

$$\bar{p}_{C_1} = \int_{V'} \bar{P}_{C_1}(\vec{r}) d\tau = \int_{-L/2}^{L/2} \int_{-(L-y)/2}^{(L-y)/2} \int_{-(d-2x)/2}^{(d-2x)/2} \bar{P}_{C_1} dz dy dx = (d-2x)(L-y)L\bar{P}_{C_1}$$

$$\bar{p}_{C_2} = \int_{V'} \bar{P}_{C_2}(\vec{r}) d\tau = \int_{-L/2}^{L/2} \int_{-L/2}^{L/2} \int_{-x/2}^{x/2} \bar{P}_{C_2} dz dy dx = xL^2\bar{P}_{C_2}$$

$$\bar{p}_{C_3} = \int_{V'} \bar{P}_{C_3}(\vec{r}) d\tau = \int_{-L/2}^{L/2} \int_{-y/2}^{y/2} \int_{-(d-2x)/2}^{(d-2x)/2} \bar{P}_{C_3} dz dy dx = (d-2x)Ly\bar{P}_{C_3}$$

luego

$$p_{C_1} = (d-2x)(L-y)L\bar{P}_{C_1} = (d-2x)(L-y)L \frac{Q_{C_1}}{A_1} = (d-2x)Q_{C_1}$$

$$p_{C_2} = xL^2\bar{P}_{C_2} = xL^2 \frac{Q_{C_2}}{A} = xQ_{C_2}$$

$$p_{C_3} = (d-2x)Ly\bar{P}_{C_3} = (d-2x)Ly \frac{Q_{C_3}}{A_2} = (d-2x)Q_{C_3}$$

finalmente

$$p_{C_1}(t) = (d-2x)Q_{C_1}(t)$$

$$p_{C_2}(t) = xQ_{C_2}(t)$$

$$p_{C_3}(t) = (d-2x)Q_{C_3}(t)$$

Después de este análisis general, se calculó el potencial, el campo, la carga, la polarización y el momento dipolar eléctrico de la región de interés cuya constante dieléctrica es K_3 , y que corresponde a la mezcla de la solución alcalina con los granos de maíz. Los cálculos se realizaron en base a mediciones de capacitancia realizadas a las celdas de placas paralelas en condiciones de concentración de Ca(OH)_2 y temperatura dados en el diseño experimental. Únicamente la constante dieléctrica K_2 de la resina poliéster se buscó en tablas.

A continuación, se muestran los valores utilizados para los cálculos:

$$\begin{aligned}
L &= 0.052m \\
Z &= 0.052m \\
y &= 0.018m \\
d &= 0.012m \\
x &= 0.0002m \\
A &= ZL = 0.002912m^2 \\
A_1 &= (L - y)Z = 0.001904m^2 \\
A_2 &= yZ = 0.001008m^2 \\
K_2 &= 3.0
\end{aligned}$$

En la tabla B.1 se muestran las capacitancias de las celdas medidas con aire, solución alcalina y solución con granos de maíz como dieléctricos. Las mediciones se realizaron a 25, 35 y 45°C. Se aprecia que cuando se tuvo al aire como dieléctrico, la capacitancia se mantuvo constante en 0.04 nF en los tres niveles de temperatura, en cambio con los otros dos dieléctricos, la capacitancia aumentó de 0.58 a 0.70 nF conforme la temperatura subió. Para los dieléctricos de solución alcalina y solución alcalina con granos de maíz, la capacitancia fue prácticamente la misma. La concentración de las soluciones, al igual que en la experimentación fue de 0.014 molar.

Tabla B.1. Capacitancia de las celdas con diferentes dieléctricos a distintos niveles de temperatura

Temperatura (°C)	Capacitancia de las celdas con diferentes dieléctricos (nF)		
	Aire	Solución alcalina	Solución alcalina y granos de maíz
25	0.04	0.59	0.58
35	0.04	0.64	0.64
45	0.04	0.70	0.70

De la tabla B.1 se obtuvieron las constantes dieléctricas K_1 y K_3 de la siguiente manera

$$K_1 = K_3 = \frac{0.59}{0.04} = 14.78 \quad \text{para } 25^\circ\text{C}$$

$$K_1 = K_3 = \frac{0.64}{0.04} = 16.00 \quad \text{para } 35^\circ\text{C}$$

$$K_1 = K_3 = \frac{0.70}{0.04} = 17.5 \quad \text{para } 45^\circ\text{C}$$

En la tabla B.2 se observan los resultados del potencial, campo, carga, polarización y momento dipolar eléctrico a 10V calculados a partir de los valores dimensionales de los dieléctricos de las celdas y las constantes dieléctricas K_1 , K_2 y K_3 . Ya que $\phi_{C_1} = \phi_{C_3} = \phi_{C_1+C_3}$, se representó al potencial de interés

como ϕ_{C_3} .

Tabla B.2. Resultados del potencial, campo, carga, polarización y momento dipolar eléctrico a diferentes niveles de temperatura y a un potencial de 10V

Temperatura (°C)	K1, K2	Potencial ϕ_{C_3} (V)	Campo eléctrico E_{C_3} (V/m)	Carga Q_{C_3} (C)	Polarización P_{C_3} (C/m ²)	Momento dipolar eléctrico P_{C_3} (Cm)
25	14.78	8.55	736.9	9.72×10^{-11}	9.64×10^{-8}	1.13×10^{-12}
35	16.0	8.45	728.2	1.04×10^{-10}	1.04×10^{-7}	1.21×10^{-12}
45	17.50	8.33	717.7	1.12×10^{-10}	1.11×10^{-7}	1.30×10^{-12}

En la tabla B.3 se aprecian los resultados del potencial, campo, carga, polarización y momento dipolar eléctrico a un potencial de 30V.

Tabla B.3. Resultados del potencial, campo, carga, polarización y momento dipolar eléctrico a diferentes niveles de temperatura y a un potencial de 30V

Temperatura (°C)	K1, K2	Potencial ϕ_{C_3} (V)	Campo eléctrico E_{C_3} (KV/m)	Carga Q_{C_3} (C)	Polarización P_{C_3} (C/m ²)	Momento dipolar eléctrico P_{C_3} (Cm)
25	14.78	25.64	2.21	2.91×10^{-10}	2.89×10^{-7}	3.38×10^{-12}
35	16.0	25.34	2.18	3.12×10^{-10}	3.09×10^{-7}	3.62×10^{-12}
45	17.50	24.98	2.15	3.36×10^{-10}	3.33×10^{-7}	3.90×10^{-12}

En la tabla B.4 se observan los resultados del potencial, campo, carga, polarización y momento dipolar eléctrico a un potencial de 50V.

Tabla B.4. Resultados del potencial, campo, carga, polarización y momento dipolar eléctrico a diferentes niveles de temperatura y a un potencial de 50V

Temperatura (°C)	K1, K2	Potencial ϕ_{C_3} (V)	Campo eléctrico E_{C_3} (KV/m)	Carga Q_{C_3} (C)	Polarización P_{C_3} (C/m ²)	Momento dipolar eléctrico P_{C_3} (Cm)
25	14.78	42.74	3.68	4.86×10^{-10}	4.82×10^{-7}	5.64×10^{-12}
35	16.0	42.23	3.64	5.2×10^{-10}	5.16×10^{-7}	6.03×10^{-12}
45	17.50	41.63	3.59	5.6×10^{-10}	5.56×10^{-7}	6.50×10^{-12}

(C)

Se realizó el análisis de la descarga eléctrica de las celdas de placas paralelas a través de las resistencias utilizadas en los experimentos. En la figura C.1, se muestra el circuito eléctrico RC de la celda de placas paralelas y una resistencia R (ver figura 3.4). Después de cada pulso de voltaje, la carga almacenada en las placas de la celda, se disipa en forma de calor a través de la resistencia R.

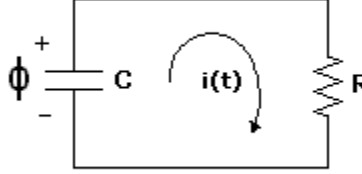


Figura C.1. Circuito eléctrico RC de la celda de placas paralelas C y resistencia R

La ecuación diferencial que describió la dinámica del circuito RC es

$$\frac{di}{dt} + \frac{1}{RC}i = 0$$

cuya solución es

$$i(t) = I_o e^{-t/RC}$$

finalmente, en términos del voltaje, la solución queda como

$$v(t) = \phi_o e^{-t/RC}$$

Para conocer el tiempo máximo de descarga de los pulsos de la forma de onda, se utilizó la mayor resistencia utilizada en el sistema experimental cuyo valor fue de $980 \, \Omega$ (ver tabla 3.4) y el mayor valor de capacitancia que la celda mostró que fue de $0.70 \, \text{nF}$ (ver tabla B.1). En la figura C.2, se observa la descarga de la celda de placas paralelas para una amplitud de pulso de $50 \, \text{V}$. Se aprecia que para un tiempo de $4 \, \mu\text{s}$, las placas de la celda experimental prácticamente se han descargado. Para los otros valores de resistencia y capacitancia utilizados en los experimentos, el tiempo de descarga fue menor, por lo tanto, para las frecuencias de 1 a $21 \, \text{Hz}$ utilizadas en la onda pulsada de este estudio, la descarga eléctrica de la celda de placas paralelas puede despreciarse. La forma del potencial pulsado en las terminales de la celda de placas paralelas, entonces puede tomarse como se observó en la figura B.3.

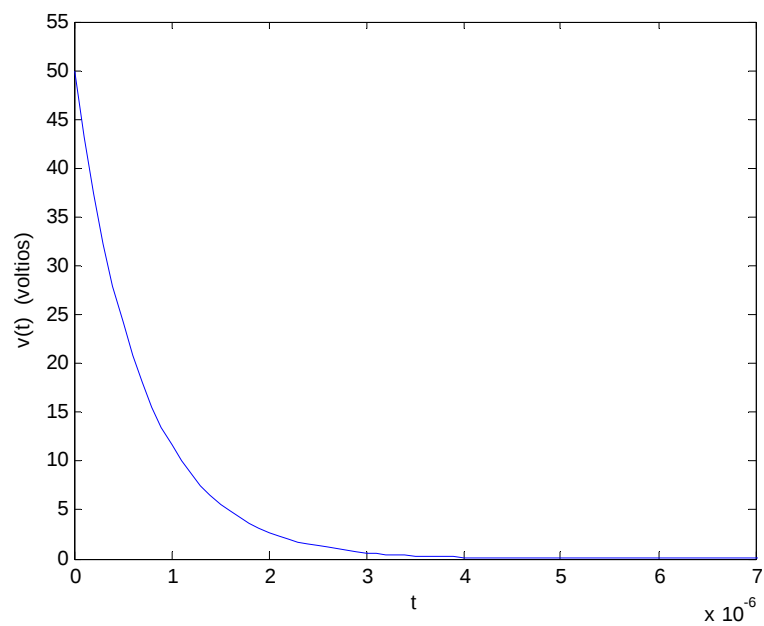


Figura C.2. Descarga eléctrica de las placas de la celda experimental C mediante la resistencia R a una amplitud de 50 V