

**DISEÑO DE UN SISTEMA INTELIGENTE DE  
DOSIFICACIÓN NEUMÁTICO DE SEMILLA**

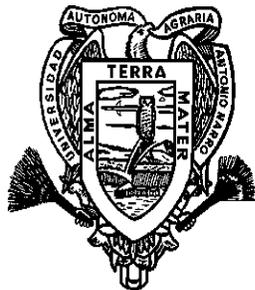
**MARCO ANTONIO REYNOLDS CHÁVEZ**

TESIS

Presentada como Requisito Parcial para  
Obtener el Grado de:

**MAESTRO EN CIENCIAS  
INGENIERÍA DE SISTEMAS AGRÍCOLAS**

Universidad Autónoma Agraria  
Antonio Narro  
PROGRAMA DE GRADUADOS



Buenavista, Saltillo, Coahuila, México.  
Marzo de 2006

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

SUBDIRECCIÓN DE POSTGRADO

DISEÑO DE UN SISTEMA INTELIGENTE DE DOSIFICACIÓN  
NEUMÁTICO DE SEMILLA

TESIS

POR

*MARCO ANTONIO REYNOLDS CHÁVEZ*

Tesis elaborada bajo la supervisión del comité particular de asesoría y  
aprobada como requisito parcial, para optar al grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS  
EN INGENIERIA DE SISTEMAS AGRICOLAS

COMITE PARTICULAR

Asesor principal:

\_\_\_\_\_  
MC. HÉCTOR URIEL SERNA FERNÁNDEZ

Asesor:

\_\_\_\_\_  
Dr. MARTÍN CADENA ZAPATA

Director externo:

\_\_\_\_\_  
Dr. SANTOS GABRIEL CAMPOS MAGAÑA

Asesor:

\_\_\_\_\_  
MC. TOMÁS GAYTAN MUÑIZ

\_\_\_\_\_  
DR. JERÓNIMO LADEROS FLORES  
SUBDIRECTOR DE POSTGRADO

Buenavista, Saltillo, Coahuila. Marzo de 2006

## AGRADECIMIENTOS

**A DIOS** por darme la oportunidad de tener una familia tan maravillosa, por las bendiciones recibidas y por estar siempre a mi lado.

**A LA UAAAN** por la suerte de estar en ella, por su bondad y por ser artífice de uno de mis sueños.

**AL DR. SANTOS GABRIEL CAMPOS MAGAÑA** por su apoyo incondicional, por la confianza, por su experiencia y conocimientos compartidos y por ser parte fundamental de este nuevo logro.

**AL M.C. HÉCTOR URIEL SERNA FERNANDEZ** por tu calidad de vida como persona, por el honor de poder llamarte amigo y por tus innumerables muestras de amistad.

**AL DR. MARTIN CADENA ZAPATA** gracias por su amistad y apoyo para la realización de este proyecto de investigación.

**A MIS COMPAÑEROS DE TRABAJO al Ing. Sergio Jácome Maldonado, al Ing. Joaquín Bonilla Bada por su apoyo, amistad y por las aportaciones realizadas para la culminación de este proyecto.**

**AL PERSONAL TÉCNICO DE MECANIZACIÓN AGRÍCOLA.** Timoteo Pérez Paredes, Apolinar García Zamora, Urbano Vela Osorio, Antonio Nieves Hernández, Israel Vela Carvajal, Raciél Osorio Bolaños e Irene del Angel Pérez. Gracias por ser parte fundamental en el desarrollo de este proyecto de investigación, por su colaboración, pero sobre todo por su valiosa amistad.

A la **Ing. Lucy Díaz** por su amistad y su apoyo incondicional.

Al departamento de maquinaria agrícola y suelos por haberme otorgado un lugar en sus instalaciones, gracias a JUANITA, LOLIS Y LILI, por su apoyo en todo momento y muy en especial para todos los catedráticos. A LUPITA con mucho cariño, por su amistad, por su apoyo y por darme la oportunidad de conocerle.

Gracias al Ing. Juan Arredondo, Ing. Tomás Gaytan, Ing. Elizabeth de la Peña, Ing. Lasso, Dr. Rubén López, Dr. Arturo Gallegos y al Ing. Silveira por su amistad y por compartir sus conocimientos.

A mis compañeros a los cuales les estaré agradecido por la oportunidad de haberme ofrecido su amistad, por su apoyo, por sus consejos, por su compañía y a quienes siempre tendré presente. Patricia Acuña, Francisco Martill (mi compadre), Mario Moreno, Eliseo Martínez, Minervo, Emilio, Alex, Heidi, Bruno, Sara, Sory, Ivan, Yaris, Ceci, Regina, Reme, Ana, Vale y otros más.

## DEDICATORIA

### **PARA MI PADRE**

Muy en especial para ti papá, por tus consejos, por tu apoyo, pero sobre todo por que se que crees en mi.

### **PARA MI MADRE**

Primero por darme la vida, por tu gran amor y apoyo mostrado siempre, por tus sacrificios y por todos los momentos en que nunca me has dejado solo.

### **PARA MIS HERMANOS**

**BORIS** por ser mi hermano y por tu apoyo incondicional.

**MARY** gracias por tu lucha constante, por tu valor, por cuidar la familia siempre y por todo tu amor.

**DAVID** por tus infinitas muestras de amor, por ser un ejemplo de lucha y perseverancia y por ser como eres.

**EDWIN** Por ser mi hermano, ánimo, te necesitamos .....

**PERLA:** Para ti chaparrita gracias por darme lo que más amo en el mundo: **mi hijo**, por ser mi apoyo incondicional y por compartir la vida conmigo, por tus muestras de entrega y amor que siempre me has dado.

**TOÑO** por que eres el motor de nuestras vidas y parte fundamental de nuestra lucha. Te amamos

**Gracias para mi familia y recuerden que mi triunfo también es suyo.**

Gracias también para todos mis tíos, primos, sobrinos, cuñadas y amigos que siempre me han apoyado y creído en mí.

**COMPENDIO****DISEÑO DE UN SISTEMA INTELIGENTE DE DOSIFICACIÓN  
NEUMÁTICO DE SEMILLA****TESIS  
POR:****MARCO ANTONIO REYNOLDS CHÁVEZ****MAESTRO EN CIENCIAS  
EN INGENIERIA DE SISTEMAS AGRÍCOLAS****UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO  
BUENAVISTA, SALTILLO, COAHUILA, MÉXICO. MARZO DE 2006****M.C. HÉCTOR URIEL SERNA FERNÁNDEZ - Asesor-****Palabras clave: Dosificación neumática, dosificador de semillas,  
siembra de precisión.**

La actual demanda en el consumo de alimentos es sin duda uno de los factores que originan la planeación de nuevas políticas para la modernización en el campo. Los requerimientos hoy en día en la producción de la agricultura moderna están orientados hacia los sistemas que reduzcan el uso de insumos y maximice rendimientos y utilidades. Un sistema que ofrece estos resultados es la agricultura de precisión. Para obtener el máximo potencial de rendimiento de un cultivo, se requiere lograr una adecuada población y distribución de las plantas en el sitio, por lo que el éxito o fracaso de la cosecha se concentra principalmente en la siembra. Las siembras de manera común la entrega que hace el dosificador es de una por una para lograr lo establecido, lo cual depende directamente del dosificador. En forma común se observan importantes

diferencias entre las poblaciones de números de plantas programadas y las logradas, así como de la uniformidad de siembra, por lo que optimizar los sistemas de dosificación se presenta como la alternativa de solución. El uso de dosificadores neumáticos surge como una respuesta a la necesidad de los agricultores de una tecnología de alta precisión.

El propósito de este estudio fue diseñar un sistema inteligente de dosificación neumático de semilla para grano grueso (maíz), con un porcentaje de llenado de celda de  $100\% \pm 5$ ; analizar y medir las variables: forma y masa de la semilla, fuerzas de succión, velocidad tangencial del plato dosificador y las fuerzas parásitas de impacto bajo condiciones de laboratorio. El sistema de dosificación se evaluó en dos fases, la primera con cuatro niveles de succión (22.5, 27.5, 32.5 y 37.5 milibares) y 10 velocidades de siembra (250, 360, 470, 580, 690, 800, 925, 1050, 1175 y 1300 celdas por minuto), para la segunda fase las condiciones de prueba fueron similares, pero con la adición de la variable impacto en dos frecuencias (8 y 16 golpes por minuto), los cuales simulaban las irregularidades del suelo o los posibles impactos ocasionados en la operación del equipo bajo condiciones de campo. Se cuantificaron 4 niveles de succión para semilla de maíz plano medio, en dos tipos de diseño de plato con huella y sin huella, así como la velocidad lineal y tangencial en celdas por minuto estimadas en velocidad de siembra en un rango entre 4 y 8  $\text{km h}^{-1}$  y con la variabilidad de dosis de siembra de 50 mil hasta 100 mil semillas por hectárea, lo que involucraba de manera directa todas las dosis (plantas por hectárea) utilizadas de manera común en la actividad de siembra en México. La variable a medir fue el porcentaje de llenado de celda utilizando tres factores (niveles de impacto, niveles de succión y velocidad de siembra), para cada prueba se utilizó semilla de maíz plano medio con un conteo establecido de 2000 semillas

registrados en el sensor de desplazamiento como semilla ideal y registrando en el sensor de caída de semilla, el conteo de semilla real.

Los resultados bajo condiciones de laboratorio mostraron que la mejor eficiencia del dosificador fue 100.9% de llenado en plato dosificador de celda con huella a un nivel de succión de 27.5 milibares y una frecuencia de impacto de 8 golpes por minuto a una velocidad de siembra entre los 4 y 8 km h<sup>-1</sup> con un arreglo de 4 hasta 8 semillas por metro. Por otra parte el plato dosificador de celdas sin huella fue rechazado bajo condiciones de impacto.

**ABSTRACT****ANALYSIS OF DESIGN PARAMETERS FOR PNEUMATIC  
SEED DISTRIBUTORS****THESIS****BY:****MARCO ANTONIO REYNOLDS CHÁVEZ****MASTER IN SCIENCES OF ENGINEER AGRICULTURAL SYSTEMS****UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO  
BUENAVISTA, SALTILLO, COAHUILA, MÉXICO. MARCH OF 2006****M.C. HÉCTOR URIEL SERNA FERNÁNDEZ - Advisor-****Key words: Pneumatic metering, dispenser of seeds, precision sowing.**

The present demand in the consumption of food is without doubt one of the factors that originate the planning of new politics for the modernization in the country. The requests nowadays in the production of the modern agriculture are oriented toward the systems that reduce the use of supplies and maximize performances and utilities. A system that offers these results is the agriculture of precision. To obtain the potential maximum of performance of a cultivation, is required to achieve an adequate population and distribution of the plants in the place, for which the success or fail of the crop concentrates mainly in the sowing. The traditional form of sowings delivery that does the dispenser is of one by one to achieve it established, which depends directly of the dispenser. In common form important differences among the plants numbers

populations are observed planned and them achieved, as well as of the uniformity of sowing, for which to optimize the systems of dosage is presented like the alternative of solution. The use of pneumatic dispensers arises like an answer to the need of the farmers of a technology of high precision.

The purpose of this study was to design an intelligent system of pneumatic dosage of seed for thick grain (corn), with a percentage of filled of cell of  $100\% \pm 5$ ; to analyze and to measure the variables: form and mass of the seed, forces of suction, velocity tangencial of the dish dispenser and the parasitic forces of under impact conditions of laboratory. The system of dosage was evaluated in two phases, the first one with four levels of suction (22.5, 27.5, 32.5 and 37.5 millibars) and 10 velocities of sowing (250, 360, 470, 580, 690, 800, 925, 1050, 1175 and 1300 cells per minute), for the second phase the conditions of test were similar, but with the addition of the variable impact in two frequencies (8 and 16 blows per minute), which they simulated the irregularities of the soil conditions or the possible caused impacts in the operation of the team under conditions of field.

Four levels of suction for seed of medium flat corn were quantified, in two dish design types with track and without track, as well as the lineal velocity and tangencial in cells per minute reckoned in velocity of sowing in a rank between 4 and 8 km h<sup>-1</sup> and with the sowing dose changeability of 50 thousand until 100 thousand seeds per hectare, what involved all the dose (plants per hectare) utilized in a common way in the activity of sowing in Mexico. The variable to measure was the percentage of filled of cell utilizing three factors (levels of impact, levels of suction and velocity of sowing), for each test

seed of medium flat corn with a count established of 2000 seeds registered in the sensor of displacement was utilized like ideal seed and registering in the seed fall sensor, the count of real seed.

The results under conditions of laboratory showed that the best efficiency of the dispenser was 100.9% of filled in cell dispenser dish with track to a level of suction of 27.5 millibars and a frequency of impact of 8 blows per minute to a velocity of sowing between the 4 and 8 km h<sup>-1</sup> with an arrangement of 4 to 8 seeds by meter. On the other hand the cells dispenser dish without track was rejected under conditions of impact.

## ÍNDICE DE CONTENIDO

	<b>Página</b>
<b>COMPENDIO</b> .....	v
<b>ABSTRACT</b> .....	viii
<b>ÍNDICE DE CONTENIDO</b> .....	xi
<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b> .....	xiii
<b>ÍNDICE DE CUADROS</b> .....	xv
<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	1
SITUACIÓN PROBLEMÁTICA.....	3
ANTECEDENTES.....	3
JUSTIFICACIÓN.....	9
OBJETIVO.....	9
HIPÓTESIS.....	9
<b>REVISIÓN DE LITERATURA</b> .....	11
SISTEMA DE AGRICULTURA DE PRECISIÓN.....	11
DEFINICIONES DE UN SISTEMAS INTELIGENTES.....	12
FUNCIONES DE UNA SEMBRADORA.....	14
SIEMBRA DE PRECISIÓN.....	16
MECANISMOS DE MEDICIÓN DE SEMILLAS.....	17
FACTORES QUE AFECTAN EL LLENADO DE SEMILLAS.....	25
ANÁLISIS CINEMÁTICO DEL PLATO DOSIFICADOR DE SEMILLA.....	29
ESTRUCTURA DE SISTEMAS DE MONITOREO Y DETECCIÓN.....	33
Componentes básicos en un microcontrolador.....	34
Arquitectura básica.....	36
El microcontrolador COP8SA.....	37
Ventajas de usar microcontroladores.....	38
Aplicaciones de los microcontroladores.....	39
CONTADOR ELECTRÓNICO.....	40
Conteo de eventos.....	41
Transductores detectores de luz para el conteo de semilla.....	42
<b>MATERIALES Y MÉTODOS</b> .....	47
UBICACIÓN DE ÁREA DE TRABAJO.....	47
MATERIALES.....	48
Dosificador neumático de semilla.....	48
Banco de prueba de dosificador sin condiciones de impacto.....	50
Banco de prueba de dosificador con impacto.....	51
Fuente de potencia.....	53
Sistema de monitoreo y detección.....	55
Software.....	57
<b>METODOLOGÍA</b> .....	57
Análisis de parámetros.....	60
Principios de operación.....	61
Análisis estadístico.....	62
<b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b> .....	64
Análisis cinemático de la partícula.....	64
Condiciones de evaluación sin impacto.....	67
Condiciones de evaluación con impacto.....	69

<b>CONCLUSIONES</b> .....	76
<b>LITERATURA CITADA</b> .....	77
<b>APÉNDICES</b> .....	79

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura №		Página
1.1	Rango de % de llenado de celdas para el diseño de dosificadores.....	10
2.1	Instrumentos utilizados en la AP.....	12
2.2	Componentes de un sistema inteligente en equipo de siembra.....	13
2.3	Componentes de una sembradora neumática.....	16
2.4	Fondo de las tolvas de semilla para sembradoras de plato horizontal.....	18
2.5	Mecanismo de medición de semillas de plato inclinado.....	19
2.6	Mecanismo de medición de semilla con rotación vertical.....	20
2.7	Mecanismo tipo banda de medición de semillas.....	21
2.8	Mecanismo de medición de semillas neumático.....	22
2.9	El aire presurizado mantiene las semillas en orificios.....	23
2.10	Limitador de semilla y mecanismos de entrega.....	23
2.11	Mecanismo de medición para hileras.....	24
2.12	Corte transversal de unidad de disco medidor al vacío.....	25
2.13	Efecto de la velocidad del plato y del tamaño de la celda para maíz.....	28
2.14	Análisis cinemática de la partícula considerando $\omega_{plato}$ .....	31
2.15	La aceleración gravitacional influye en el análisis cinemático.....	31
2.16	El microcontrolador.....	34
2.17	La arquitectura Harvard.....	36
2.18	Identificación del COP8SA, (S/A, 2003).....	37
2.19	Diagrama del microcontrolador COP8SA.....	38
2.20	Uso de una señal en un controlador electrónico.....	41
2.21	Contador electrónico usado como contador de eventos.....	42
2.22	Clasificación de dispositivos de fotones.....	45
2.23	Empaque de un optointerruptor.....	46
2.24	Uso de un sensor y un contador en un evento físico.....	46
3.1	Laboratorio de Pruebas y Evaluación de Maquinaria.....	47
3.2	Taller de maquinas y herramientas de la UIMA-INIFAP.....	48
3.3	Base porta plato semillero.....	49
3.4	Dosificador neumáticos de semilla.....	49
3.5	Plato maquinado en nylamid para semilla de maíz.....	50
3.6	Banco de pruebas de sistemas de dosificación de semillas sin impacto.....	51
3.7	Variador de frecuencia.....	51
3.8	Moto-reductor.....	51
3.9	Banco de pruebas de dosificado de semillas con impacto.....	52
3.10	Mecanismo simulador de impacto tipo leva.....	53
3.11	Banco simulador de potencia suministrada por el tractor.....	54
3.12	Sistema de aspiración utilizado en las pruebas con impacto.....	54
3.13	Sensor de caída de semilla A9321 John Deere.....	55
3.14	Sensor de desplazamiento desarrollado por INIFAP- Cotaxtla.....	56
3.15	Contador digital conectado a la fuente de voltaje.....	56
3.16	Plato semillero sin huella.....	58
3.17	Plato semillero con huella.....	58
3.18	Diagrama de secuencias de evaluación de llenado de celdas.....	60

4.1	Análisis cinemáticos de la partícula con velocidad angular del plato.....	64
4.2	Fuerzas debido a la rotación del plato y a la gravedad.....	67
4.3	Funcionamiento con curva de respuesta de dosificador de semillas.....	68
4.4	Comportamiento de variables en función de % de llenado de celda 15 Hz..	70
4.5	Comportamiento de variables en función de % de llenado de celda 30 Hz..	70
4.6	Plato semillero sin huella.....	73
4.7	Plato semillero con huella.....	74
4.8	Factor de seguridad aplicado en el funcionamiento del dosificador.....	74
4.9	Una o mas semillas alojadas en una celda.....	75

**ÍNDICE DE CUADROS**

<b>Cuadro Nº</b>		<b>Página</b>
4.1	Requerimiento de presión de vacío o fuerzas de succión.....	69
4.2	Análisis de varianza.....	71
4.3	Pruebas de contrastes de las medias del factor B.....	72
4.4	Pruebas de contrastes de la medias del factor C.....	72

## INTRODUCCIÓN

La actual demanda en el consumo de alimentos es sin duda uno de los factores que originan la planeación de nuevas políticas para la modernización en el campo. Los requerimientos hoy en día en la producción de la agricultura moderna están orientados hacia los sistemas que reduzcan el uso de insumos y maximice rendimientos y utilidades. Un sistema que ofrece estos resultados es la Agricultura de Precisión.

(Bragachini, 2003) describe la agricultura de precisión como la utilización de modernas herramientas capaces de facilitar la obtención y análisis de datos georreferenciados, mejorando el diagnóstico, la toma de decisiones y la eficiencia en el uso de insumos. Mayor producción con sostenibilidad del ambiente productivo. El término agricultura de precisión (AP) tiene diferentes significados. Para algunos, significa usar satélites, sensores y mapas todo esto con equipo de alto nivel tecnológico y de posicionamiento global. Para otros, es vislumbrar el futuro de la agricultura. Ese futuro significa manejar cada insumo del cultivo (fertilizante, corrector de pH, herbicida, insecticida, semilla, etc.) sobre una base de sitio específico para reducir el desperdicio, aumentar las ganancias y mantener la calidad ambiental.

Para obtener el máximo potencial de rendimiento de un cultivo, se requiere lograr una adecuada población y distribución de plantas en el sitio por lo que el éxito o fracaso de la cosecha se concentra principalmente en la siembra.

Las siembras, comúnmente la entrega que hace el dosificador, debe ser de una semilla por una para lograr poblaciones y distribuciones previamente establecidas la cual depende directamente del dosificador. **En forma común se observan importantes diferencias entre las poblaciones de números de plantas programadas y las logradas, así como uniformidad de siembra**, por lo que optimizar los sistemas de dosificación de semillas debería enfocarse al análisis de parámetros tales como: geometría y masa de la semilla, fuerzas de succión, velocidad de siembra y fuerzas de impacto (Kepner, 1978).

El uso de dosificadores neumáticos surge como respuesta a la necesidad de los agricultores de una tecnología de siembra de alta precisión. Esto representa sin duda una autonomía, en la calidad de siembra, de la variabilidad de parámetros a los que se enfrentan durante el establecimiento de cultivos de escarda, tales como: densidad de dosificación (semillas por metro), velocidad de siembra y clasificación de semillas (tamaño y forma de la semilla).

Un sistema de siembra de precisión no se concibe sin instrumentos que permitan al operador monitorear y realizar en forma oportuna los ajustes necesarios cuando sus parámetros de siembra se salen de los predefinidos.

Los dosificadores de semillas llamados inteligentes, como componentes de un equipo de siembra y que dosifican en forma variable siguiendo prescripciones preestablecidas con la inspección de sensores, son el componente tecnológico ideal para alcanzar los resultados esperados para afianzar la producción y recuperar la sostenibilidad de los suelos agrícolas.

## **SITUACIÓN PROBLEMÁTICA**

La falta de información documentada de tecnología de precisión en dosificadores neumáticos de semillas de grano grueso con rangos de confiabilidad de 100% y con porcentajes de error inferiores al  $\pm 5\%$  y sin daño a la semilla; representa sin duda una limitante para nuevos desarrollos de tecnología para la actividad de siembra. Aunado a esto el bajo precio estandarizado en el mercado y los altos costos de producción, conducen a buscar eficientar los procesos productivos de las zonas agrícolas.

## **ANTECEDENTES**

Según (Kachman y Smith, 1994), las sembradoras de precisión son aquellas máquinas que pueden sembrar en surcos y son capaces de dosificar las semillas de una en una. Describen también a las fuentes de variación en la precisión como: fallas en el llenado del dosificador, llenado múltiple o sembrado defectuoso por su espacio entre plantas. Establecieron que la no-emergencia de una semilla debiera ser estudiada en el marco de los ensayos de precisión, ya que introduce un factor adicional de variabilidad, en caso de interpretar sencillamente un no-nacimiento por una falla. Proponen, entonces, el uso de los histogramas de distancia entre plantas para evaluar el planteo. En la búsqueda de precisión debieran respetarse los siguientes pasos: búsqueda de la variabilidad natural del lote, incidencia de los factores de rendimiento predefinidos y realizar ensayos exploratorios con metodología probada en el cultivo.

En la apreciación de (De Boer, 1999), la agricultura de precisión contribuye muy poco para mejorar los precios de infraestructura de transporte o disponibilidad del crédito; sin embargo, algunos productores ven a esta tecnología como una ayuda para mantener su posición como productores de grano a bajo costo.

En otra tecnología (Campbell y Baker, 1989), desarrollaron el uso de rayos X, como método para tener una técnica adecuada a la ubicación tridimensional de una semilla dentro de un suelo agrícola bajo siembra directa. Para obtener el espaciamiento entre semillas dosificadas por una sembradora en laboratorio, aparece como una buena precisión el sistema de sensoramiento optoelectrónico desarrollado por (Kocher, 1998) y citado luego por (Lan, 1999). El sistema lleva una celda por donde pasan las semillas dosificadas y un data-logger analiza los datos. Exponen que la ventaja de este sistema sobre los comerciales existentes, es que no sólo registra las semillas que pasan, sino cuándo es que pasa cada una, dando entonces la localización anterior-posterior de cada semilla.

Entre los nuevos diseños para la siembra directa de precisión, destaca la propuesta de (Molin, 1998), en la que plantean un abresurco localizador para siembra a golpes, que se basa en acoplar un tubo dentro del suelo por donde la semilla alcanza la profundidad de siembra.

En una evaluación hecha basándose en índice de multiplicidad, calidad de alimentación, índice de pérdidas y precisión, el uso del dispositivo a 3 velocidades dentro del rango de 1 a 3 m s<sup>-1</sup>, se comportó sin influencias sobre el dosificador que portaba. En ensayos de

campo demostró no tener diferencias de desempeño trabajando sobre tres condiciones diferentes de residuos en siembra directa.

En lo que respecta a la adaptación de mecanismos a dosis variables (Ryu y Kim, 1998) han desarrollado un distribuidor de rodillo acanalado que se adapta a la siembra de precisión, de esa manera combina la sencillez para la variación de dosis, con posibilidad de comando satelital, con las ventajas de posicionar las semillas con la precisión requerida por los cultivos en línea.

En la búsqueda de asistencia para una siembra con la precisión y alternativa de variación continua que requiere la agricultura de precisión, (Weatherly y Bowers, 1997) presentaron una sembradora con avanzado grado de automatización para resolver la variación continua de la profundidad de siembra, pilotada por un sensor de humedad esto fue resuelto con una cuchilla delantera que trabaja como electrodo para la medición continua de la humedad del suelo, principio basado en la conductividad eléctrica.

Colombino A. A. (1996) diseñó y construyó un banco de ensayos para equipos dosificadores de sembradoras y fertilizadoras el cual lo componen: la fuente de potencia que consiste en un motor eléctrico de corriente alterna, con un régimen de  $1450 \text{ v s}^{-1}$  y  $0.75 \text{ kw}$  de potencia, para reducir la velocidad del motor empleando un variador mecánico.

García, *et al.*, (2000) desarrollaron un banco de ensayos para sembradoras neumáticas, que consiste en un moto reductor de relación 6:1 con motor de  $0.5 \text{ kw}$ , la succión de vacío fue proporcionada por un sistema aspirador de  $127 \text{ V}$ , finalmente para la

simulación de sacudidas empleó una leva, que permitió simular la magnitud y la amplitud de las sacudidas desde 0 hasta 25 mm. García, *et al.*, (2000) realizó un estudio sobre la calidad de dosificación de sembradoras neumáticas en laboratorio, donde evaluó una sembradora monogrado marca “STANHAY”, con tres tipos diferentes de semilla, a velocidades del disco dosificador de 12 y 24 rpm con tres niveles de vacío 30, 40 y 60 milibares con niveles de sacudidas de 2 y 4 impactos  $s^{-1}$ , con una amplitud de 20 mm. Como resultado de estos ensayos el reporta que las sacudidas alteran notablemente la calidad del trabajo, como también la velocidad excesiva del mismo disminuye la entrega de semillas del mecanismo dosificador.

Bernabé, *et al.* (1993) Señalaron que la calidad de la dosificación depende directamente de la velocidad de avance de la sembradora y de la calidad de preparación de la cama de siembra.

Kepner (1978). El porcentaje de llenado de celdas para una sembradora esta influenciada por factores tales como: el tamaño de semillas, la forma de éstas, el tiempo de exposición de una celda a la semilla dentro del depósito, y la velocidad lineal de la celda.

Los requerimientos principales para la siembra de precisión con un mecanismo de medición de tipo celda son: (Kepner, 1978).

1. Las semillas deben de ser uniformes en tamaño y forma, preferiblemente esféricas.
2. La celda debe de ser del tamaño apropiado para las semillas. Los platos y otras partes críticas del mecanismo de medición deben de ser hechas con exactitud.

3. Las semillas deben de tener una adecuada oportunidad de entrar a las celdas. La velocidad del plato y la distancia de exposición de las celdas en el depósito son los parámetros básicos, siendo más efectivo a baja velocidad que largas distancias de exposición.
4. Un buen mecanismo limpiador es necesario para prevenir llenado múltiple (exceso) de celda sin provocar una eliminación excesiva (déficit) de semillas.
5. Descargas positivas de las semillas desde las celdas.
6. Las semillas no deben de ser dañadas.
7. Las semillas deben de ser transportadas de la unidad de medición al fondo del surco, de tal manera que el patrón de espaciamiento producido por el mecanismo de medición sea mantenido.

El porcentaje de llenado de celdas para una sembradora esta influenciada por factores tales como el tamaño de semilla en relación al tamaño de la celda, el rango de tamaños de semillas, la forma de estas, la forma de las celdas, el tiempo de exposición de una celda a la semilla dentro del deposito, y la velocidad lineal de la celda. (Kepner, 1978).

Ramírez, (2000), desarrolló un sistema semiautomático para el control de la frecuencia de la dosificación de la semilla en dos sembradoras unitarias, donde realizó pruebas para determinar el porcentaje de llenado de celdas, a la máquina de vacío a diferentes rangos de presiones y velocidades del plato semillero, el autor reporta que los resultados mas satisfactorios se dieron a bajas velocidades (26 y 36 rpm) y de (10 y 12.5 pulgadas de agua).

La norma Mexicana NMX-0-168-SCFI-2002; para la evaluación de sembradoras indica que se deberá construir un banco de pruebas donde se pueda enganchar la sembradora, deberá tener un motor y transmisión con la que se podrá variar la velocidad de giro del eje de alimentación, además, deberá contar con los aditamentos necesarios con los cuales se podrá simular la pendiente del terreno para conocer el efecto en la dosificación de semilla.

La forma de la celda en los platos dosificadores determina la eficiencia en el porcentaje de llenado de celdas y además recomienda el uso de sensores de desplazamiento y frecuencia de caída de semilla para asegurar eficiencias superiores al 90 % (Ramírez, 2000).

Stein, (2002). Menciona que la cubierta de la recámara de vacío del dosificador deben de ser hechas en material de fibra de vidrio, ya que su costo es menor y fácil de maquinar, tiene poco peso y sugiere al Nylamid como el material que cumple con todas las características para el diseño de los platos dosificadores de semillas.

Segundo, (2004) menciona que el porcentaje de llenado de celdas en el dosificador neumático es afectado por las dimensiones de la celda con respecto al tamaño promedio de la semilla, la fuerza de succión y la velocidad de siembra.

También indica que el grado en que se afectan estos factores se debe a la forma y masa de la semilla.

## **JUSTIFICACIÓN**

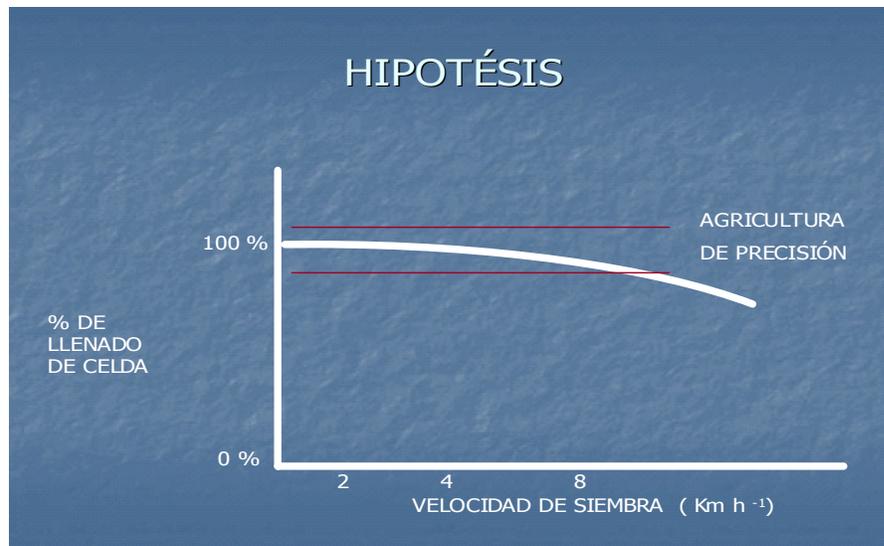
El presente trabajo surge de la necesidad de proporcionar a los agricultores una tecnología de siembra de alta precisión para labranza de conservación, donde puedan emplear la potencia de los tractores disponibles y asegurar una buena siembra que les proporcione resultados satisfactorios en calidad y cantidad de la misma.

## **OBJETIVO**

Desarrollar un sistema de dosificación neumático de semilla con un porcentaje de llenado de celdas de  $100 \% \pm 5$  para grano grueso (maíz, soya y sorgo.) con un sistema de monitoreo interconectado para sensar el desplazamiento de siembra y frecuencia de caída de semilla.

## **HIPÓTESIS**

Mediante el uso de un sistema de dosificación neumático de semillas se obtienen eficiencias de llenado de celdas de  $100 \% \pm 5$  a un rango de velocidades de 250 a 1300 celdas/minuto.



**Figura 1.1. Rango de % de llenado de celdas para el diseño de dosificadores neumáticos de semilla.**

## REVISIÓN DE LITERATURA

### SISTEMA DE AGRICULTURA DE PRECISIÓN

La Agricultura de Precisión (Bragachini, 2004), permite obtener datos georreferenciados cuantificando la variabilidad espacial del rendimiento dentro de un lote, disponiendo esa información se puede orientar un muestreo dirigido al suelo, lo que facilita la identificación de las causas para ajustar un diagnóstico mas preciso en cada sitio del lote esquematizado en la pantalla de un computador, obteniendo la información técnica para ajustar diagnósticos de fertilización y densidad de siembra. Niveles de fósforo en el suelo y respuestas esperadas para diferentes dosis, así como también el rendimiento de acuerdo a las características físico-químicas del suelo, fecha de siembra, cultivar, agua útil durante el ciclo, son parámetros útiles para orientar a la mejor densidad de siembra para cada sitio del lote, quedando en claro que la variabilidad cuantificada debe ser importante y el sitio no menor de 5 hectáreas dentro del lote. Mediante el uso de sembradoras neumáticas de precisión se optimizan al máximo los insumos, así como también se incrementa la eficiencia del dosificador para asegurar el éxito de la siembra y olvidarse de las líneas de siembra uniformes y la gran diferencia entre el número de plantas programadas y las cosechadas. En la actualidad se sabe un poco más acerca del aprovechamiento agronómico de los datos de rendimiento grabados espacialmente (mapas de rendimiento), se sigue avanzando en los conocimientos agronómicos, en la puesta a punto de las herramientas de cosecha de datos

georreferenciados, en el diseño de los ensayos, en el desarrollo de nuevas herramientas como los sensores remotos de tiempo real, la percepción remota que aportará importantes adelantos tecnológicos en cuanto a imágenes digitalizadas georreferenciadas, también y por otro camino paralelo se están mejorando aspectos de precisión, facilidad de ubicación y bajando los costos de todo el equipamiento necesario, como lo es el tractor, la sembradora y o cosechadora, para realizar en forma eficiente la aplicación de insumos de acuerdo a la real necesidad de cada sitio del lote.

La idea es relativamente simple: maximizar la producción y minimizar los costos.



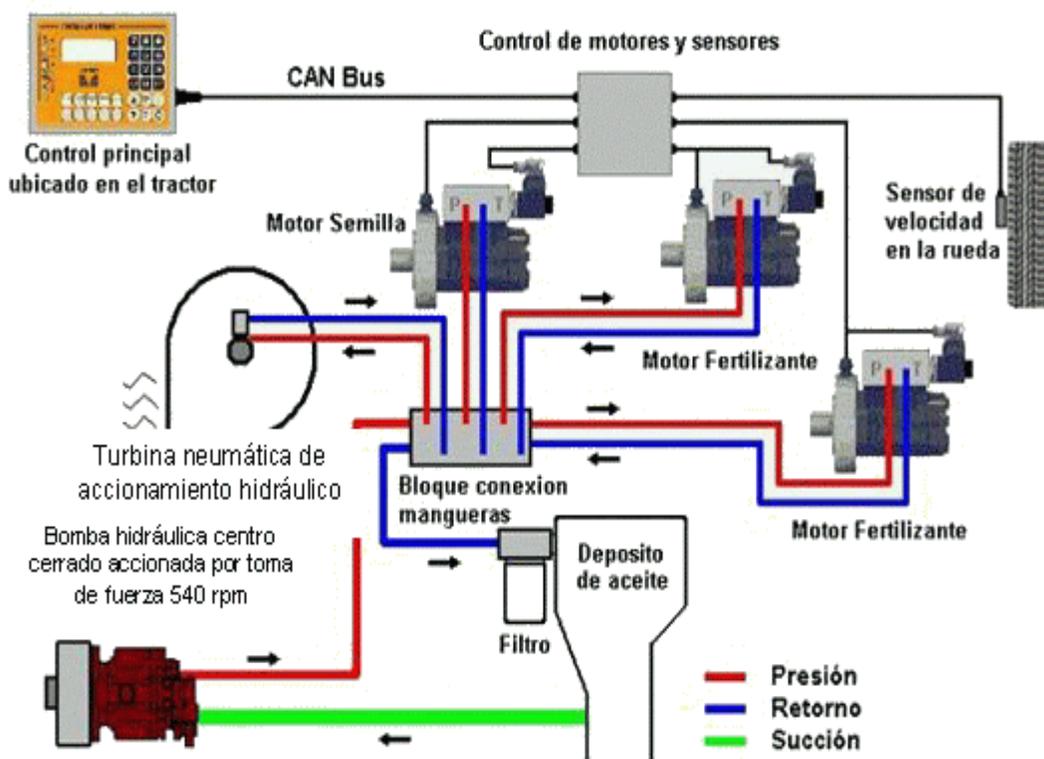
**Figura 2.1. Instrumentos utilizados en la AP**

## **DEFINICIÓN DE SISTEMAS INTELIGENTES**

Un sistema inteligente es un medio capaz de almacenar situaciones para lograr un objetivo, con la capacidad de controlar si la última acción realizada fue favorable o no, es decir, cuando un sistema se sale de los parámetros previamente definidos, logra

identificarlo Y se pueden preestablecer o corregir, en ese momento se dice que es un sistema inteligente.

En la actualidad el uso de sistemas de información geográfica (SIG), sistemas de posicionamiento global (GPS), así como herramientas de tipo sensor- motriz y herramientas de alto nivel tecnológico constituyen los sistemas inteligentes



**Figura 2.2. Componentes de un sistema inteligente en equipo de siembra**

El funcionamiento de una sembradora neumática Figura 2.2 responde a las variaciones de diagnóstico agronómico geoposicionado dentro de un sitio específico, respondiendo a prescripciones de diferentes densidades de siembra y dosis de fertilizante, lo que significa, que una vez cargado el croquis del lote específico con sus coordenadas, se

puede establecer en el lote dos o tres sitios específicos y con rendimientos potenciales muy diferentes. Esto es, que una vez cargadas las dos prescripciones de la semilla y fertilizante para cada sitio y calibrada la sembradora, se posiciona la máquina a través de la señal de un DGPS ( Digital Global Positioning Systems), recibirá ambas órdenes por separado, (semilla y fertilizante) por medio de dos navegadores que le enviarán la señal al controlador y a su vez, a los dos actuadores (motores hidráulicos comandados por un sistema eléctrico que accionan válvulas controladoras de giro de los distribuidores de semilla y fertilizante), todo ello posicionado en el lote con un metro de precisión a través de una señal DGPS en tiempo real. Al quedar geoposicionada la sembradora en el lote, lee la prescripción grabada y adapta el giro de los motores hidráulicos para entregar las semillas por hectárea programadas y el fertilizante correspondiente a cada sitio del lote.

Todo el sistema es controlado desde la cabina del operador a través de un monitor, que entrega la información de cada distribuidor por separado, las distancias entre semillas, las semillas por hectárea, la capacidad de trabajo, velocidad de avance y superficie sembrada.

## **FUNCIONES DE UNA SEMBRADORA**

Para la realización de una buena siembra se requiere que una sembradora efectúe las siguientes funciones, (Kepner, 1978):

1. Abra el surco para la semilla a una determinada profundidad.
2. Mida la semilla.
3. Deposite la semilla en el surco dentro de un patrón aceptable.

4. Cubra la semilla y compacte el suelo alrededor de la semilla a un grado propio para el tipo de semilla involucrada.

La sembradora debe ser capaz de no dañar la semilla, para que haya una buena germinación. La semilla debe ser colocada en el suelo de tal manera que todos los factores que afecten a la germinación y las labores de emergencia sean tan favorables como sea posible.

Las partes de una sembradora de precisión como la que se muestra en la Figura 2.3, son las siguientes (Ortiz, 1989):

- Bastidor
- Discos cortadores de residuo
- Abridor de surcos
- Dosificador de semilla
- Dosificador de fertilizante
- Tapadores de surcos
- Transmisión
- Sensores de dosificación
- Turbina

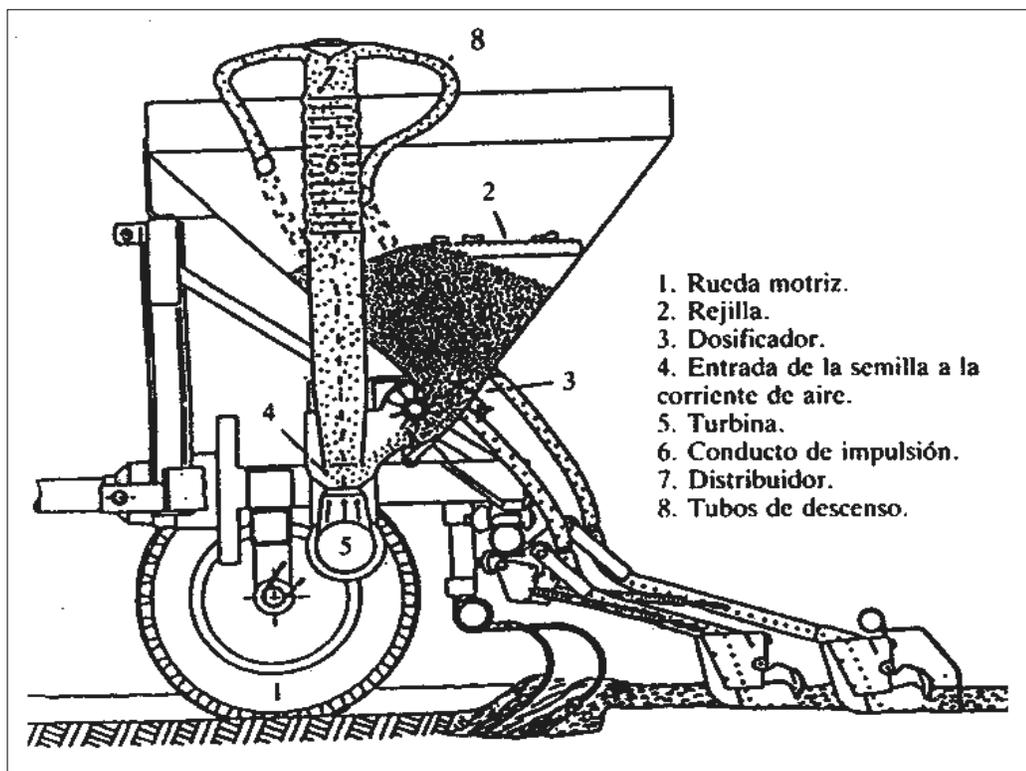


Figura 2.3. Componentes de una sembradora neumática (Ortiz, 1989).

## SIEMBRA DE PRECISIÓN

Ortiz, (1989) menciona las condiciones que se deben reunir para que una siembra pueda denominarse de precisión:

1. Las semillas deben de ser de tamaño uniforme y forma preferiblemente esférica.
2. Las celdas deben de ser de tamaño apropiado para las semillas. Los platos y otras partes críticas del mecanismo de medición deben de ser fabricadas con exactitud.
3. Las semillas deben tener tiempo suficiente para entrar en las celdas, para lo cual es importante la velocidad periférica del plato.

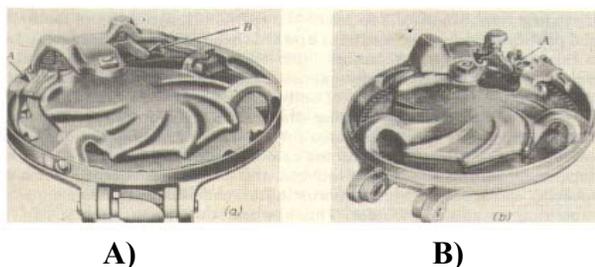
4. Debe de existir un buen cepillo, con objeto de evitar siembras múltiples y barrer las semillas mal colocadas con el objeto de que no se quiebren.
5. Debe existir un sistema positivo de inyección de las semillas de modo que las obligue a caer por el tubo de salida.
6. El tubo de caída debe ser de diámetro pequeño, liso, recto y debe terminar en la proximidad del fondo del surco, con el objeto de que no se retrase la semilla durante la caída. Así, sembrando a una velocidad de 5 km/h con un espacio de 5 cm, si una semilla se retrasa 1/30 seg. al caer, será alcanzada por la semilla siguiente.
7. Las semillas deben situarse a la profundidad adecuada y no deben desviarse por rebote o rodar en el surco.

## **MECANISMOS DE MEDICIÓN DE SEMILLAS**

Los mecanismos de medición de semillas se clasifican en:

- Con plato horizontal
- Con plato inclinado
- Con plato vertical
- Con celdas en un banda
- Con celdas circunferenciales
- Neumático con ranuras
- Por dosificación al vacío

a. **Mecanismo de medición con plato horizontal.** Existen dos tipos de platos que son: de fondo con celdas en el borde y de caída en la orilla, éstos se muestran en la Figura 2.4 (Kepner, 1978). Es el que más se utiliza para semillas de grueso calibre tales como maíz y garbanzo; ya que la precisión en estos casos puede considerarse aceptable. Sin embargo, dada la forma de alimentación ha de adaptarse perfectamente el alojamiento a la forma de la semilla.

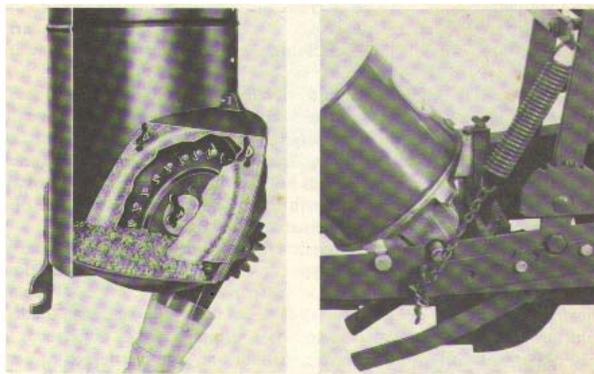


**Figura 2.4. Fondo de las tolvas de semillas para sembradoras de plato horizontal.**

**A) Plato de caída en la orilla para maíz.**

**B) Plato apropiado para siembra de precisión de remolacha azucarera o semillas recubiertas. (Kepner, 1978).**

b. **Mecanismo de medición con plato inclinado.** Otro tipo de sistema de medición que se usa en platos semilleros es el tipo plato inclinado ilustrado en la Figura 2.5. La alimentación es lateral donde las semillas se recogen desde la parte inferior de la tolva siendo descargadas bien por la parte superior, o bien en un segundo plato paralelo al interior que las conduce justo hasta la zona de descarga situado bajo la tolva. Los distribuidores de plato inclinado son sensibles a la caída de las semillas a la tolva, una vez alimentados, por efecto de las vibraciones producidas en el cuerpo de la siembra. La altura de caída varía entre 10 y 30 cm, según si la descarga es por abajo o por arriba (Ortiz, 1989).

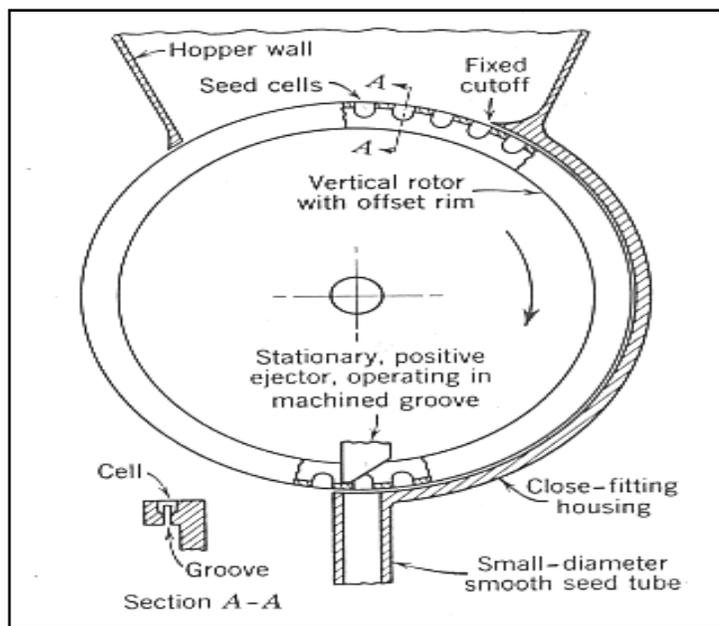


A)

B)

**Figura 2.5. A) Mecanismo de medición de semillas de plato inclinado  
B) Mecanismo de medición de semillas de plato inclinado diseñado para siembra de precisión de pequeñas semillas vegetales. (Kepner, 1978).**

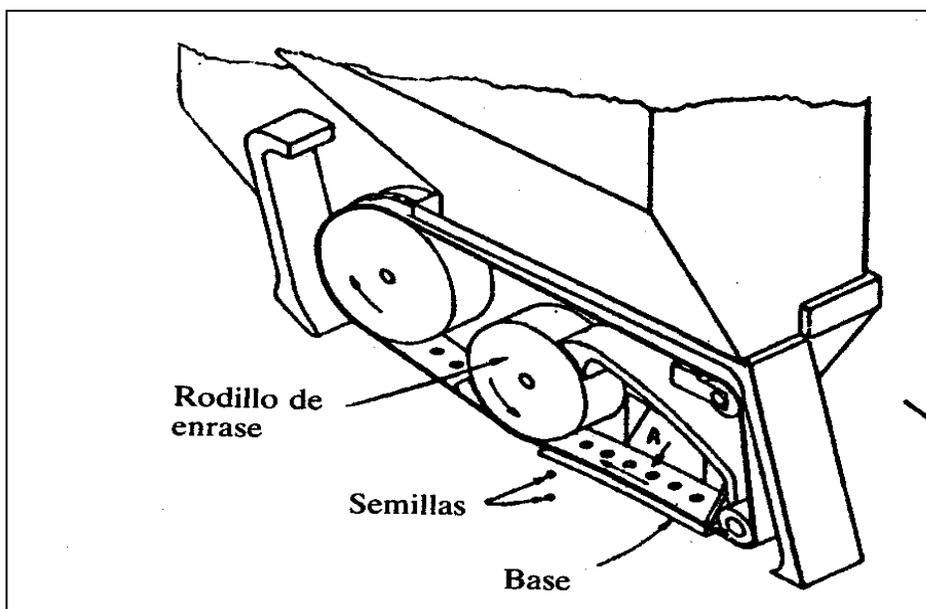
**c. Mecanismo de medición con plato vertical.** Los mecanismos de medición con rotación vertical del tipo mostrado en la Figura 2.6 son usados con frecuencia en siembras precisas de vegetales y remolacha azucarera, como lo menciona (Kepner, 1978). Mejor que disco, cabría hablar de tambor estrecho, de 2 a 4 cm de espesor en cuyo lomo se disponen los alojamientos de las semillas. Estos pueden disponerse sobre la superficie exterior en hilera simple o doble alternada. Este segundo caso posibilita duplicar el número de alojamientos, aumentar el tiempo de alimentación o mejorar el coeficiente de llenado. Dada la reducida altura de descarga, menor de 10 cm., se mejora notablemente la precisión, sin embargo, son más caras que las anteriormente mencionadas. El diámetro de los platos puede llegar a los 50 cm. (Ortiz, 1989).



**Figura 2.6. Mecanismo de medición de semilla con rotación vertical. (Kepner, 1978).**

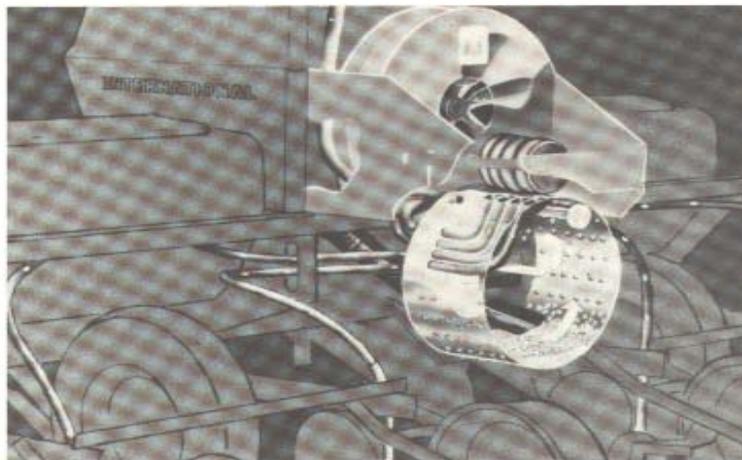
**d. Mecanismo de medición con celdas en una banda.** Este tipo de mecanismo preciso de medición tiene celdas en una banda, ajustadas a las semillas (Figura 2.7). Las semillas llegan desde un depósito y entran a la cámara por arriba de la banda por medio de la apertura A, y son mantenidas en un nivel controlado (Kepner, 1978).

Como la banda gira en sentido de las manecillas del reloj, el botador de semillas que también gira, retira las semillas en exceso, teniendo una semilla en cada celda. Las semillas que están en las celdas son transportadas sobre la base y son descargadas por la parte inferior de la banda en la rueda repelente de semillas. La falta de estos mecanismos repelentes de excesos de semillas causa variabilidad en el espaciamiento de las semillas.



**Figura 2.7. Mecanismo tipo banda de medición de semilla (Kepner, 1978)**

**e. Mecanismo de medición neumático con celdas circunferenciales.** El sistema de medición neumática (Figura 2.8) (aire a presión) dispone de un depósito centralizado y unidades de medición que abarcan 4, 6 u 8 hileras. (Kepner, 1978). El tambor de semillas tiene una hilera de celdas circunferenciales de semillas por unidad de sembradora en hilera. Es requerido un soplador para abastecer de aire al tambor, manteniendo una presión alrededor de 4 KPa (0.6 psi) en el tambor, el aire fluye a través de las celdas de semillas hasta que una semilla ocupa este lugar.



**Figura 2.8. Mecanismo de medición de semillas neumático y sistema de distribución diseñado para granos como maíz, fríjol y sorgo. (Kepner, 1978).**

Debido a la existente presión diferencial cada semilla se mantiene en la celda a medida que el tambor gira hasta pasar por un cepillo estacionario posicionado cerca de la parte superior, en donde se retiran excesos de semilla.

Las ruedas bloqueadoras de aire colocadas en la parte superior del tambor tapan momentáneamente las celdas, provocando que las semillas caigan en el tubo de semillas. El flujo de aire a través de los tubos las conduce a sus unidades respectivas de siembra y las deposita en los surcos. Este sistema está diseñado para semillas tales como el maíz, fríjol, granos de sorgo, empleando un tambor diferente para cada tipo de semilla. En la Figura 2.9 se muestra cómo funciona el sistema de medición neumática (aire a presión) con celdas circunferenciales y en la Figura 2.10 se ilustra como funciona el cepillo limitador y el mecanismo de entrega de semillas.

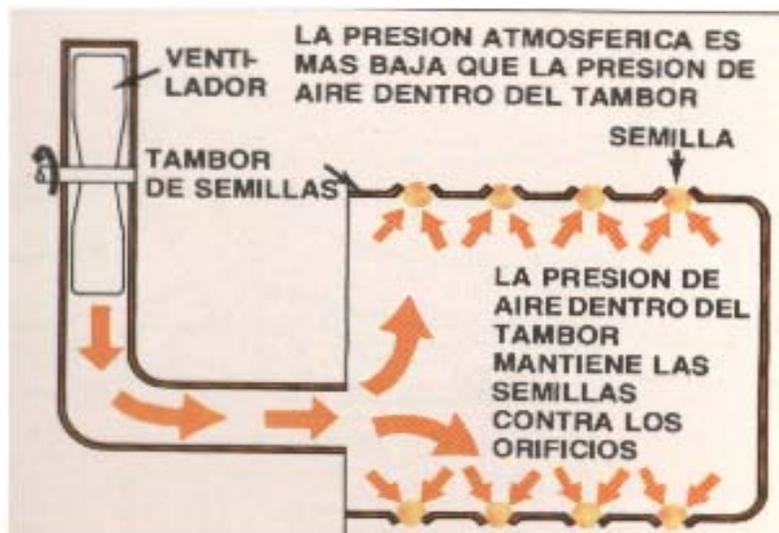


Figura 2.9. El aire presurizado mantiene las semillas en los orificios (Breece, 1975).

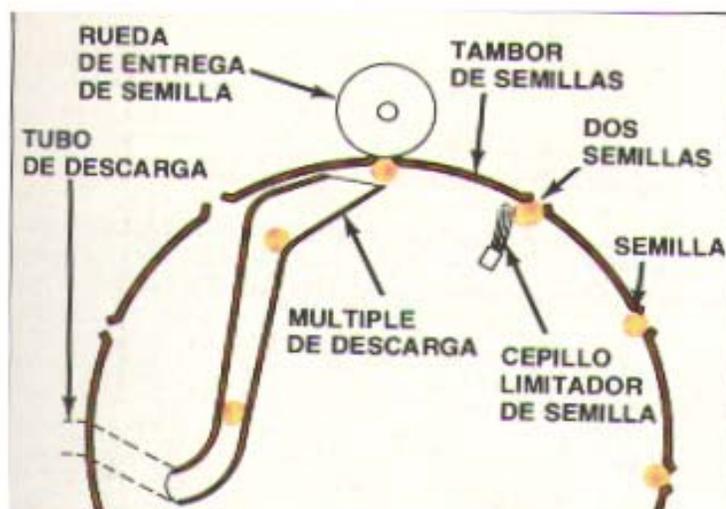
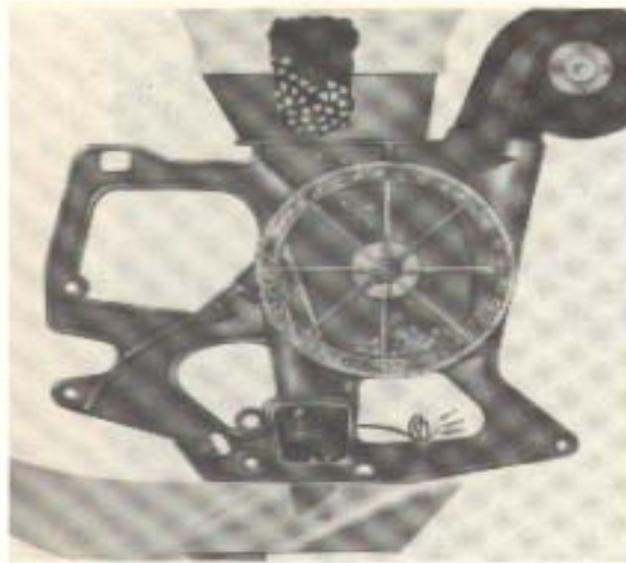


Figura 2.10. Limitador de semilla y mecanismo de entrega (medidor presurizado). (Breece, 1975).

**f. Mecanismo de medición neumático con ranuras.** El principio neumático es también utilizado para mecanismos de medición en surcos. Se necesitan pequeños sopladores manejados por motores eléctricos conectados al sistema eléctrico del tractor, y que proporcionen aire a presión a la cámara de medición (Kepner, 1978).

Las semillas sostenidas contra las ranuras son levantadas y transportadas en dirección contraria a las manecillas del reloj en la unidad mostrada en la Figura 2.11. Estas son liberadas en el tubo de semillas cuando las ranuras pasan una trampa que bloquea la presión del aire al interior de la porción frontal del rotor. Diferentes discos giratorios son usados para diferentes tipos de semillas.



**Figura 2.11. Mecanismo de medición para hileras. (Kepner, 1978).**

**g. Mecanismo de medición por dosificación al vacío.** Un gran número de mecanismos de medición de semillas empleando el principio del vacío han sido desarrollados experimentalmente y al menos un fabricante contaba con una sembradora con el mecanismo de vacío en el año de 1977. Muchos de estos mecanismos tienen una bomba central de vacío con regulación a cada unidad succionadora, cada unidad cuenta con su respectiva cámara de vacío y el plato giratorio para evitar fugas de aire.

Las semillas al ser succionadas en contra de las celdas del plato giratorio, se mantienen en ellas hasta llegar a un punto donde el sello de vacío termina, y debido a la diferencia de presión existente entre la recámara de vacío y la presión atmosférica, las semillas caen hacia el fondo del surco por gravedad. En la Figura 2.12 se ilustra el principio de operación del sistema de medición por dosificación al vacío.

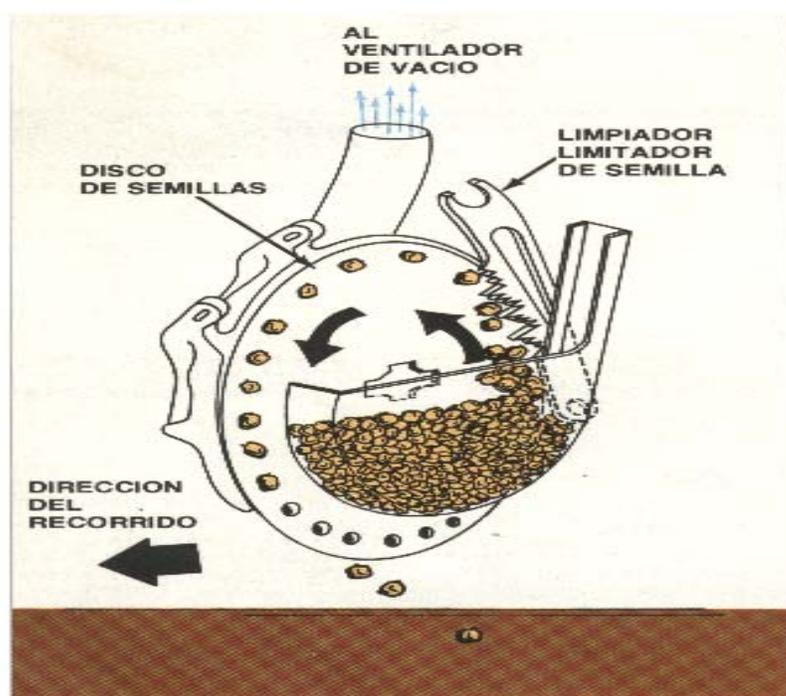


Figura 2.12. Corte transversal de unidad de disco medidor al vacío (Breece, 1975).

## FACTORES QUE AFECTAN EL LLENADO DE CELDAS Y DAÑO EN LAS SEMILLAS

El porcentaje de llenado de las celdas para una sembradora dada, está influenciado por factores tales como: el tamaño máximo de las semillas en relación al tamaño de la celda,

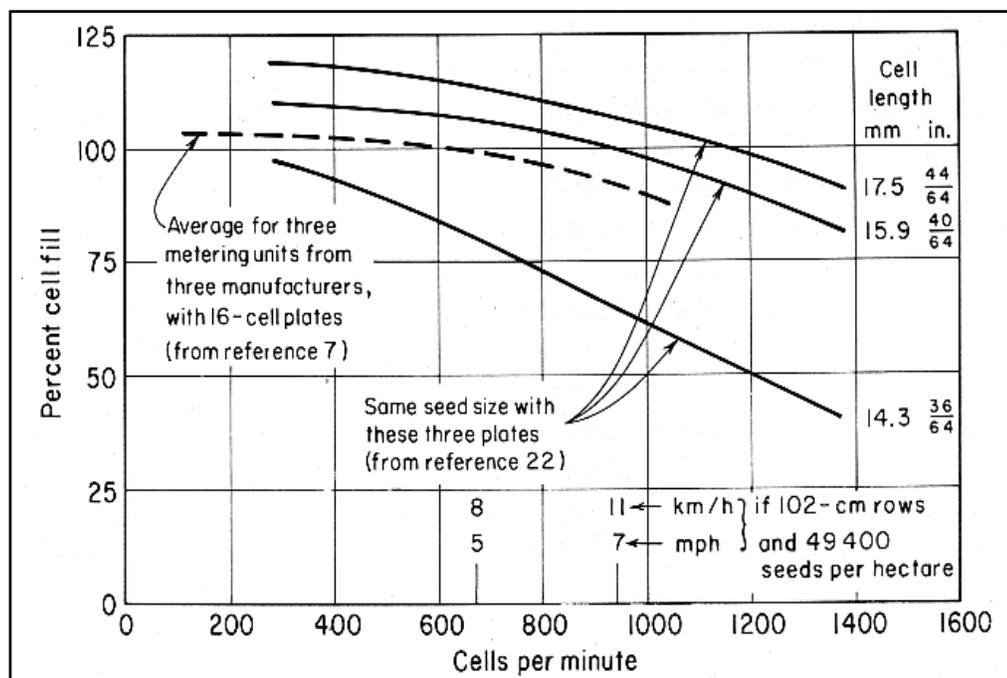
el rango de tamaño de la semilla, la forma de éstas, la forma de las celdas, el tiempo de exposición de una celda a la semilla dentro del depósito y la velocidad lineal de la celda (Kepner, 1978).

El porcentaje de llenado de la celda se define como el número total de semillas descargadas dividido por el número total de celdas pasando por el punto de descarga. De acuerdo con esta definición, el 100 % de llenado de las celdas no necesariamente significa que cada celda contenga a una semilla, pero meramente implica que alguna celda pueda estar vacía y que otras sean llenadas por múltiples semillas. La distribución más uniforme de la semilla es usualmente obtenida con combinaciones de semilla, tamaño de la celda y velocidad de la celda, que proporcionan alrededor del 100% de llenado promedio de las celdas.

$$\%LlenadodeCeldas = \frac{Semillas\ Re\ ales}{Semillas\ Teoricas} (100)$$

La Figura 2.13 (Kepner, 1978) muestra la relación de llenado de celdas contra la velocidad cuando la medición de la semilla de maíz es con sembradoras de plato de caída por la orilla y horizontal. La curva de líneas punteadas muestra muy pequeños incrementos en el llenado de celdas, debido posiblemente a unas cuantas celdas dobles, a medida que la velocidad fue reducida debajo del punto del 100 % de llenado, indicando que probablemente la semilla fue más uniforme y el tamaño de celda se aproxima a la semilla, que para alguna de las otras tres curvas, como se observa en la Figura 2.13.

La comparación de las curvas sólidas (Figura 2.13) muestra el efecto del tamaño de celda sobre el porcentaje de llenado. Aunque el plato de 14.3 mm (36/64 pulg.) ha sido recomendado por el productor de semilla para esta cantidad de semilla, éste obviamente fue demasiado pequeño. Las celdas más largas (curva superior) tuvieron un porcentaje de dobles a bajas velocidades y dañan excesivamente a la semilla en altas velocidades. El efecto de la relación entre tamaño de semilla y tamaño de celda fue además mostrado por pruebas con semilla de remolacha azucarera procesada en una sembradora de plato horizontal teniendo 4.37 mm (11/64 pulg.) de diámetro de celdas, en donde fueron escogidas semillas dentro de límites de tamaño desde 2.78 a 3.18 mm (7/64 a 8/64 pulg.), 3.18 a 3.57 mm (8/64 a 9/64 pulg.), y 3.57 a 3.97 mm (9/64 a 10/64 pulg.) produjeron llenados de celdas alrededor de 140%, 100%, y 90% respectivamente (Kepner, 1978).



**Figura 2.13. Efecto de la velocidad del plato y del tamaño de celda para maíz con platos de caída en la orilla y horizontal. (Espacio de hileras de 1.02 m con una velocidad de avance para 49 400 semillas por hectárea). (Kepner, 1978).**

En general, la experiencia ha indicado que el diámetro o longitud de la celda debe ser cerca del 10% mayor que la máxima dimensión de semilla, y que la profundidad de la celda debe ser igual al diámetro o espesor promedio de la semilla; tomando en cuenta además que los rendimientos son mejorados, por la graduación de la semilla dentro de tolerancias cercanas a los tamaños de las semillas reales.

La mayoría de las semillas dañadas en unidades de plato horizontal o rotación vertical, es provocada por el propio mecanismo botador. El porcentaje de semillas dañadas se incrementa conforme la velocidad de celda aumenta, y el daño es además mayor si las celdas son demasiado largas. Sin embargo, el daño puede ser minimizado haciendo el mecanismo botador flexible y suave o empleando diseños en los cuales, semillas

individuales sean botadas sin que sea necesario utilizar un elemento que las retire de la celda, como suele ser con el plato inclinado, aire a presión, y unidades de medición del tipo al vacío.

### ANÁLISIS CINEMÁTICO DEL PLATO DOSIFICADOR DE SEMILLA

Análisis de la aceleración de una partícula con notación polar compleja: expresando el vector de posición de una partícula en notación polar compleja obtenemos la ecuación 2.7.1 (Kimbrell, 1991).

$$P = p e^{i\theta} \quad (2.7.1)$$

Ahora si se obtiene la derivada de la ecuación 2.7.1 con respecto al tiempo, obtendremos la velocidad de la partícula y obtenemos la ecuación 2.7.2.

$$V_p = \frac{dp}{dt} e^{i\theta} + i p e^{i\theta} \frac{d\theta}{dt}$$

$$V_p = \dot{p} e^{i\theta} + i p \omega e^{i\theta} \quad (2.7.2)$$

Si volvemos a derivar con respecto al tiempo la ecuación 2.7.2, obtenemos la aceleración de la partícula, y obtenemos la ecuación 2.7.3

$$A_p = \frac{d^2 p}{dt^2} e^{i\theta} + i \frac{dp}{dt} e^{i\theta} \frac{d\theta}{dt} + i \frac{dp}{dt} e^{i\theta} \frac{d\theta}{dt} + i^2 p e^{i\theta} \left( \frac{d\theta}{dt} \right)^2 + i p e^{i\theta} \frac{d^2 \theta}{dt^2} \quad (2.7.3)$$

$$A_p = \ddot{p} e^{i\theta} + 2ip\omega e^{i\theta} - p\omega^2 e^{i\theta} + ip\alpha e^{i\theta}$$

En donde:

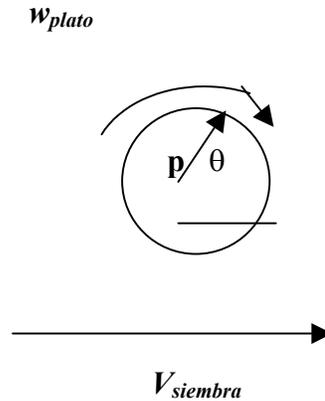
$\ddot{p} e^{i\theta} =$  Aceleración con la cual la magnitud del vector está cambiando

$2ip\omega e^{i\theta} =$  Componente Coriolis de la aceleración,  $i$  indica una rotación de  $90^\circ$  en la dirección de  $\theta$ .

$-p\omega^2 e^{i\theta} =$  Aceleración normal, el signo menos indica que la aceleración normal es dirigida hacia el vector de origen.

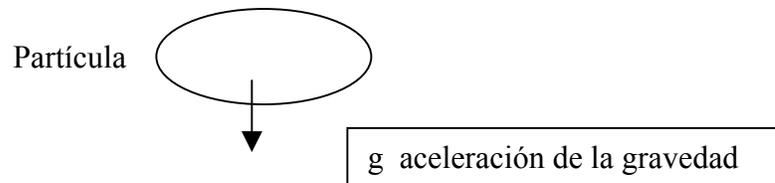
$ip\alpha e^{i\theta} =$  Aceleración tangencial,  $i$  indica una rotación de 90 grados en dirección de  $\theta$ .

En la Figura 2.14 se muestra el vector  $p$  que representa una partícula a un cierto ángulo con determinada magnitud y girando esta partícula a una velocidad angular  $w_{plato}$  con respecto a la velocidad de siembra de una máquina sembradora.



**Figura 2.14. Análisis cinemático de la partícula considerando  $w_{plato}$ .**

Otro factor muy importante que influye en los cálculos para la determinación de las fuerzas que tienen lugar en la partícula es la aceleración de la gravedad  $g$  ( $9.81 \text{ m/seg}^2$ ). En la Figura 2.15 se ilustra el efecto gravitatorio sobre la partícula en el análisis cinemático del plato dosificador.



**Figura 2.15. La aceleración gravitatoria influye en el análisis cinemático.**

Ahora se tiene dos factores que influyen directamente en el análisis cinemático en el plato dosificador que son, primero, la velocidad misma del plato,  $w_{plato}$ , y segundo, la fuerza de gravedad,  $g$ ; debiendo sumar este último término a la ecuación 2.7.3 para obtener la ecuación 2.7.4.

$$A_p = \ddot{P} e^{i\theta} + 2ip\omega e^{i\theta} - p\omega^2 e^{i\theta} + ip\alpha e^{i\theta} + g \quad (2.7.4)$$

Finalmente, para conocer las fuerzas que experimenta la partícula, es necesario multiplicar la ecuación 2.7.4 por la masa de la partícula (Segunda Ley de Newton,  $F = ma$ ) y de esta manera obtenemos la ecuación 2.7.5.

$$F_p = \left( \ddot{p} e^{i\theta} + 2ip\omega e^{i\theta} - p\omega^2 e^{i\theta} + ip\alpha e^{i\theta} + g \right) m \quad (2.7.5)$$

El funcionamiento esperado para este tipo de dosificadores neumáticos debe tener características de alta precisión en el porcentaje de llenado de celdas con diferentes velocidades tangenciales del plato semillero. Para el análisis de las fuerzas de las semillas de la ecuación (2.7.5) estas solo experimentan fuerzas debido a la rotación del plato (fuerza normal o centrífuga) y a la aceleración de la gravedad, es decir, solo se consideraron:

–  $p\omega^2 e^{i\theta}$  (el signo menos en la ecuación indica que la aceleración normal se dirige hacia el centro del plato) y que la gravedad ( $g$ ) al ser multiplicada por la masa de la semilla se obtiene la fuerza total ejercida por la semilla. La ecuación (2.7.5) queda de la siguiente manera:

$$F_{\text{semilla}} = (p\omega^2 + g) m$$

En donde:

$F_{\text{semilla}}$  = Fuerza total de la semilla en Newtons

$w$  = velocidad del plato en rad/ seg

$p = r =$  radio del plato en m

$g =$  aceleración de la gravedad (9.81 m/seg)

$m =$  masa de la semilla en Kg.

La fuerza necesaria requerida para vencer a la fuerza que experimenta la semilla, es la fuerza de vacío (generada por la turbina), es decir, para que la semilla sea adherida a la celda del plato desde que es succionada en el inicio y hasta el final de la recámara de vacío, esta fuerza debe ser mayor que la fuerza experimentada por la semilla, pudiendo describir numéricamente la presencia de fuerzas parásitas (Provocadas por la inestabilidad de las condiciones del terreno a sembrar).

Esta fuerza de vacío puede ser fácilmente calculada mediante la ecuación:

$$F \text{ vacío} = P \text{ vacío} \times A \text{ celda}$$

## **ESTRUCTURA DE SISTEMAS DE MONITOREO Y DETECCIÓN**

**Microcontroladores.-** Es un circuito integrado programable (PIC's) que contiene todos los componentes de un computador. Se emplea para controlar el funcionamiento de una tarea determinada y, debido a su reducido tamaño, suele ir incorporado en el propio dispositivo al que gobierna. Es decir, un microcontrolador (Figura 2.16) es un circuito integrado el cual, de no ser programado no realizará tarea alguna. Éste requiere ser programado para que realice desde la tarea más sencilla hasta el control más complicado (Flores, 2001).

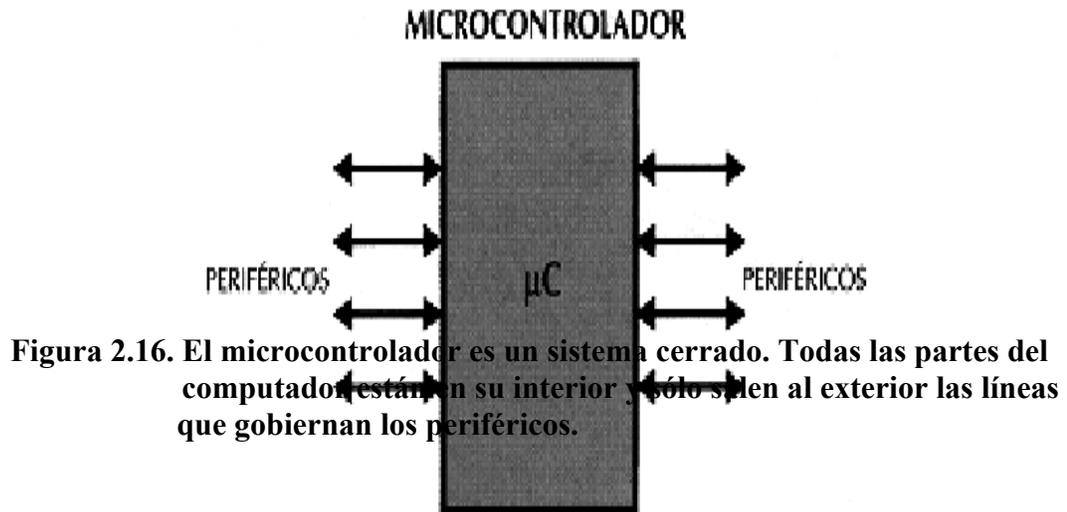


Figura 2.16. El microcontrolador es un sistema cerrado. Todas las partes del computador están en su interior y sólo salen al exterior las líneas que gobiernan los periféricos.

### Componentes básicos de un microcontrolador

Un microcontrolador dispone normalmente de los siguientes componentes, (Manual de Microcontroladores, 2003):

- **Procesador o UCP (Unidad Central de Proceso).** La Unidad de Procesamiento Central es el corazón del microcontrolador y es aquí donde todas las operaciones aritméticas y lógicas son realizadas. Es decir, es la unidad que calcula todas las operaciones que son ordenadas por la memoria del programa.
- **Memoria de Programa.** Contiene las instrucciones organizadas en una secuencia particular para realizar una tarea. Típicamente es denominada memoria de sólo lectura (ROM) u OTP, EPROM o FLASH que son memorias que una vez programadas almacenan información aunque el sistema no sea energizado, esto permite que el microcontrolador ejecute el programa almacenado en la memoria inmediatamente después de ser energizado.
- **Memoria de Datos.** Esta es una memoria que puede ser escrita y leída según sea requerido por el programa. Tiene las funciones de almacenamiento de datos (pila) y

como almacenamiento de variables. Este tipo de memoria es usualmente llamada memoria RAM (Memoria de Acceso Aleatorio). Cada localidad de memoria tiene una dirección única con la cual el UCP encuentra la información necesaria. Los microcontroladores actuales contienen ambas memorias (programa y datos) incluidas dentro del circuito integrado. Por otro lado, resulta necesario contar con otras unidades que hacen posible el funcionamiento mínimo de un microcontrolador que son circuitería de temporización y entradas / salidas.

- **Circuito de Temporización.** Los microcontroladores usan señales de Temporización llamadas reloj que proveen una referencia en el tiempo para la ejecución del programa. Esta señal determina en qué momento los datos deben ser escritos o leídos de la memoria. Así mismo, provee la sincronía con los dispositivos conectados al microcontrolador (Periféricos).

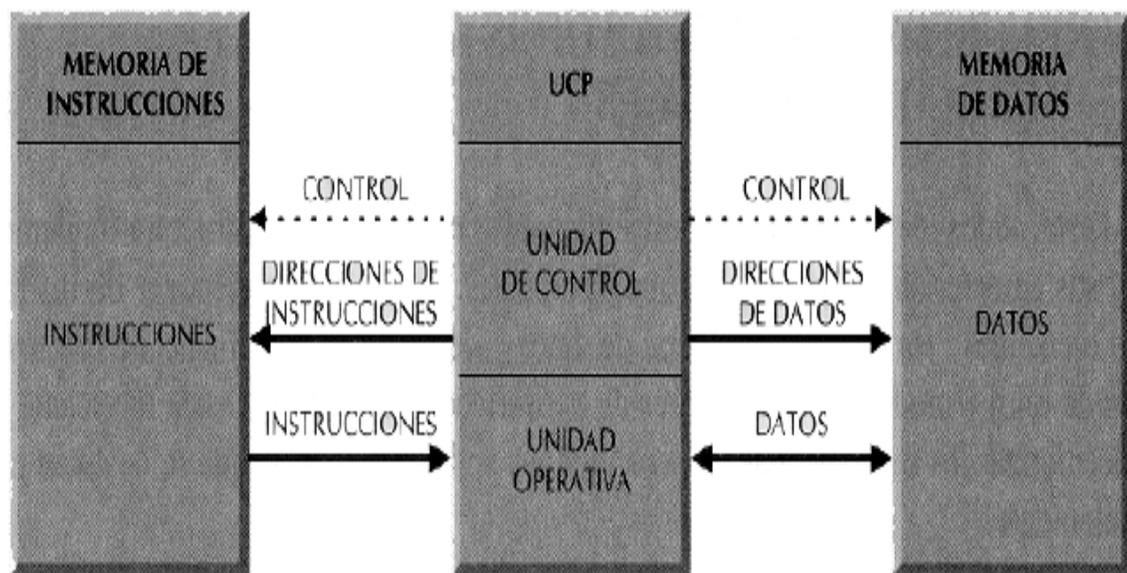
- **Entradas / Salidas.** Los microcontroladores requieren de una interfase para comunicarse con la circuitería externa. Esta interfase es denominada comúnmente como puerto. Existen puertos de entrada y salida, y éstos permiten que las señales o datos sean leídos del exterior o mandados al exterior del microcontrolador. Los puertos están formados de pines, (terminales del circuito integrado), los cuales, dependiendo de la aplicación son conectados a un sin fin de dispositivos como teclados, interruptores, sensores, relevadores, motores y otros.

### **Arquitectura Básica**

Aunque inicialmente todos los microcontroladores adoptaron la arquitectura clásica de Vonn Neumann, en el momento presente se impone la arquitectura Harvard. La

arquitectura de Vonn Neumann se caracteriza por disponer de una sola memoria principal donde se almacenan datos e instrucciones de forma indistinta. A dicha memoria se accede a través de un sistema de buses único (direcciones, datos y control).

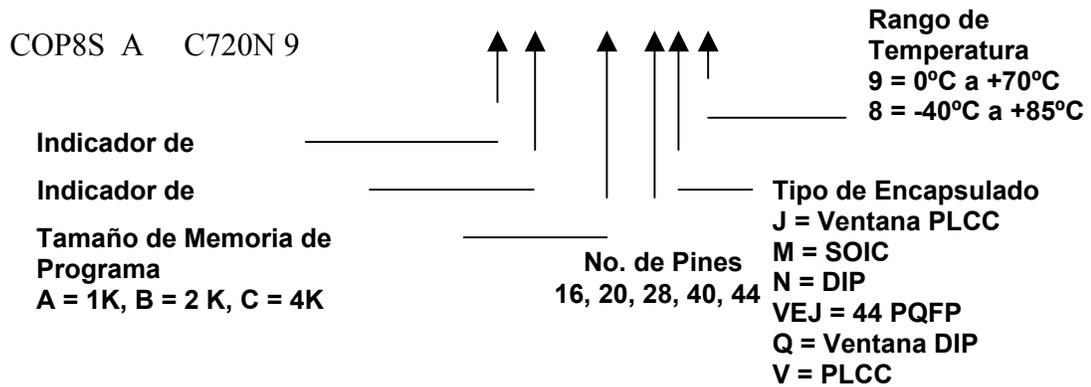
La arquitectura Harvard (Figura 2.17) dispone de dos memorias independientes una, que contiene sólo instrucciones y otra, sólo datos. Ambas disponen de sus respectivos sistemas de buses de acceso y es posible realizar operaciones de acceso (lectura o escritura) simultáneamente en ambas memorias, (S/A, 2003).



**Figura 2.17. La arquitectura Harvard dispone de dos memorias independientes para instrucciones y datos, permitiendo acceso simultáneo, (Manual de Microcontroladores,2003. <http://www.geocities.com>).**

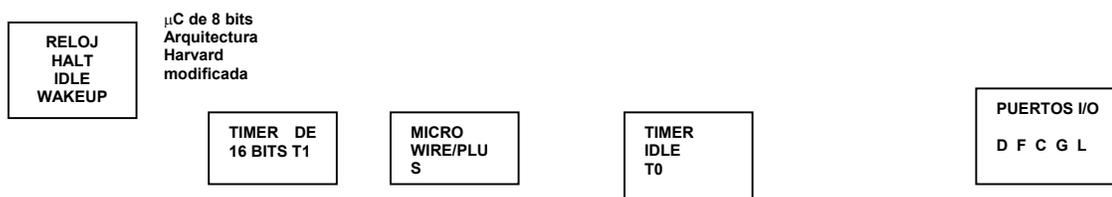
### El microcontrolador COP8SA

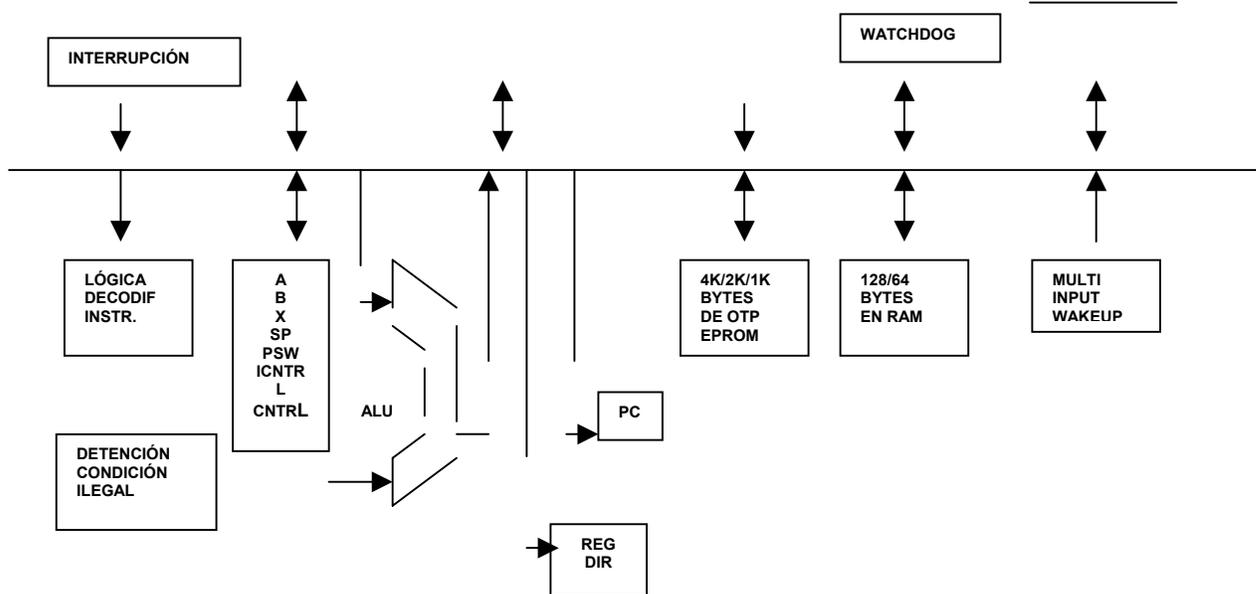
El COP8SA es un microcontrolador de la familia característica de 8 bits y un proceso EPROM de alta densidad, con una gran variedad en encapsulados, variedad en rangos de temperatura y voltaje (Figura 2.18).



**Figura 2.18. Identificación del COP8SA, (S/A, 2003).**

La Familia COP8SA se basa en la arquitectura Harvard Modificada, la cual permite que las tablas de datos se accesen directamente desde la memoria de programa. Consecuentemente las tablas de datos pueden estar en ROM o EPROM sin problemas que bajo alguna circunstancia los datos se pueden perder. El microcontrolador COP8SA es un controlador de 5 puertos de propósito general (D, F, C, G, L), memorias ROM que van desde 1K hasta los 4K, memorias RAM desde los 64 hasta los 128 bytes, funciones alternativas en algunos pines como “MultiInput Wakeup” orientados a “despertar” al COP8SA de los estados de bajo consumo de potencia. Por otro lado encontramos dos timers T0 y T1. El timer de 16 bits T1 es capaz de funcionar en varios modos. En la Figura 2.19 se ilustra un diagrama a bloques del COP8SA.





**Figura 2.19. Diagrama del microcontrolador COP8SA, (S/A, 2003).**

### Ventajas de usar microcontroladores

- Aumento de prestaciones: un mayor control sobre un determinado elemento, representa una mejora considerable en el mismo.
- Aumento de la fiabilidad: al reemplazar el microcontrolador por un elevado número de elementos disminuye el riesgo de averías y se precisan menos ajustes.
- Reducción del tamaño en el producto acabado: la integración del microcontrolador en un chip disminuye el volumen, la mano de obra y los stocks.
- Mayor flexibilidad: las características de control están programadas, por lo que su modificación sólo necesita cambios en el programa de instrucciones.

El microcontrolador es, en definitiva, un circuito integrado que incluye todos los componentes de un computador. Debido a su reducido tamaño es posible montar el

controlador en el propio dispositivo al que gobierna. En este caso el controlador recibe el nombre de controlador empotrado, (Manual de Microcontroladores, 2003).

### **Aplicaciones de los microcontroladores**

Cada vez existen más productos que incorporan un microcontrolador con el fin de aumentar sustancialmente sus prestaciones, reducir su tamaño y costo, mejorar su fiabilidad. Algunos fabricantes de microcontroladores superan el millón de unidades de un modelo determinado producidas en una semana. Este dato puede dar una idea de la masiva utilización de estos componentes, (Manual de Microcontroladores, 2003).

Los microcontroladores están siendo empleados en multitud de sistemas presentes en nuestra vida diaria, como pueden ser juguetes, horno microondas, frigoríficos, televisores, computadoras, impresoras, módems, el sistema de arranque de nuestro coche y otros, así como muchas más aplicaciones con las que seguramente no estaremos tan familiarizados como: instrumentación electrónica y control de sistemas en una nave espacial.

Una aplicación típica podría emplear varios microcontroladores para controlar pequeñas partes del sistema. Estos pequeños controladores podrían comunicarse entre ellos y con un procesador central, probablemente más potente, para compartir la información y coordinar sus acciones, como de hecho ocurre ya habitualmente en cualquier pc.

### **CONTADOR ELECTRÓNICO**

El contador electrónico es un dispositivo de conteo digital multipropósitos. Los principios de operación se basan en el oscilador o temporizador estable. (Beckwith, 1993)

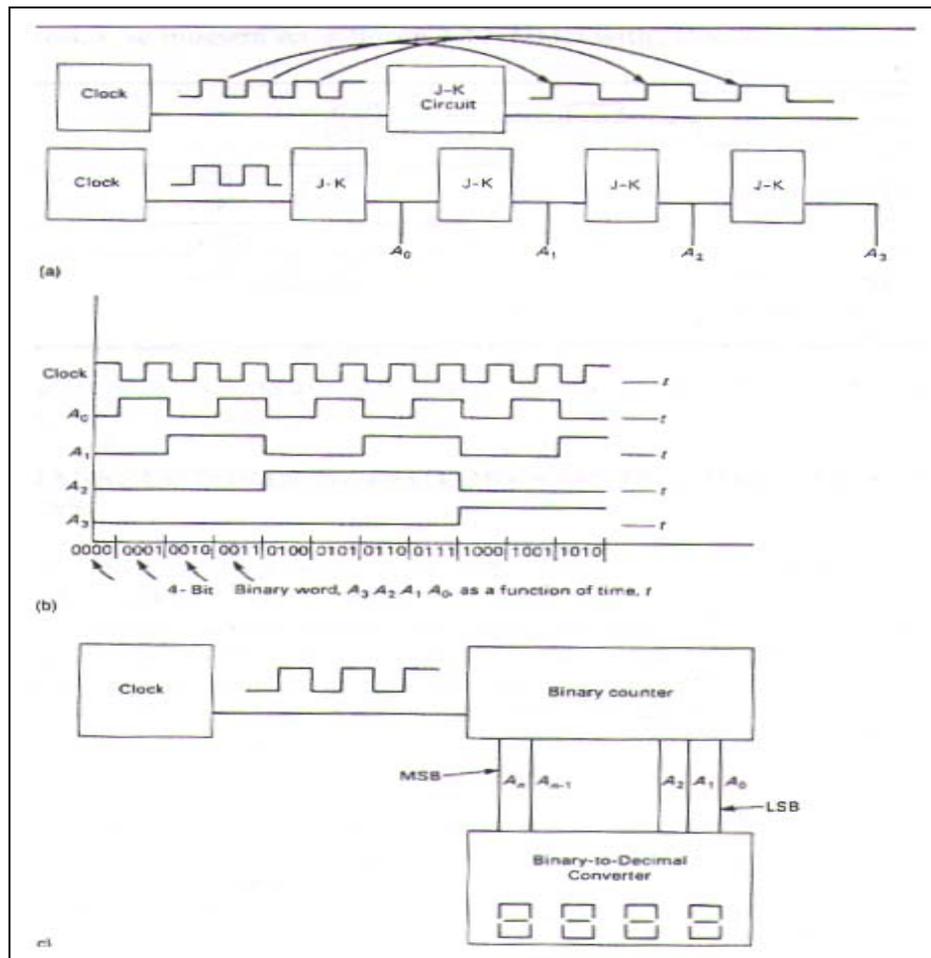
La salida del reloj de la Figura 2.20, es una onda cuadrada, ésta puede ser usada como una señal de sincronización e inmediatamente después, es usado un circuito J-K flip flop, el cual es una variación del S-R flip flop. La salida del J-K es barrida por el lado negativo de la onda cuadrada de entrada (reloj) y tiene conectados los flip flops en cascada (la salida de cada uno, se conecta a la entrada del siguiente), como se ilustra en la Figura 2.20 (a). Por ejemplo, para cada periodo del reloj de entrada, el valor de salida binario del bit 4, A3, A2, A1, A0, es como se muestra en la Figura 2.20 (b). A3 es el bit más significativo (MSB) y A0 es el bit menos significativo (LSB).

Este circuito es llamado contador binario y es el circuito gobernante para el contador universal. Como se muestra en la Figura 2.20 (c), el contador solo contará hasta  $1111_2$  ó  $15_{10}$ . Cascadeando ocho J-K flip flops, el contador será incrementado a  $1111\ 1111_2$  ó  $255_{10}$ .

El diagrama esquemático para el contador electrónico es mostrado en la Figura 2.20 (c). Los números binarios son convertidos a decimales y mostrados por diodos emisores de luz (LEDs) o por medio de un display de cristal líquidos (LCD).

### **Conteo de eventos.**

El contar eventos es la forma más simple de medición para demostrar el uso de un contador electrónico; si el reloj es desconectado y reemplazado por un dispositivo que produzca un pulso cuadrado (debido a un simple evento físico), el resultado es un instrumento que totaliza eventos o un contador de eventos, como se muestra en la Figura 2.21.

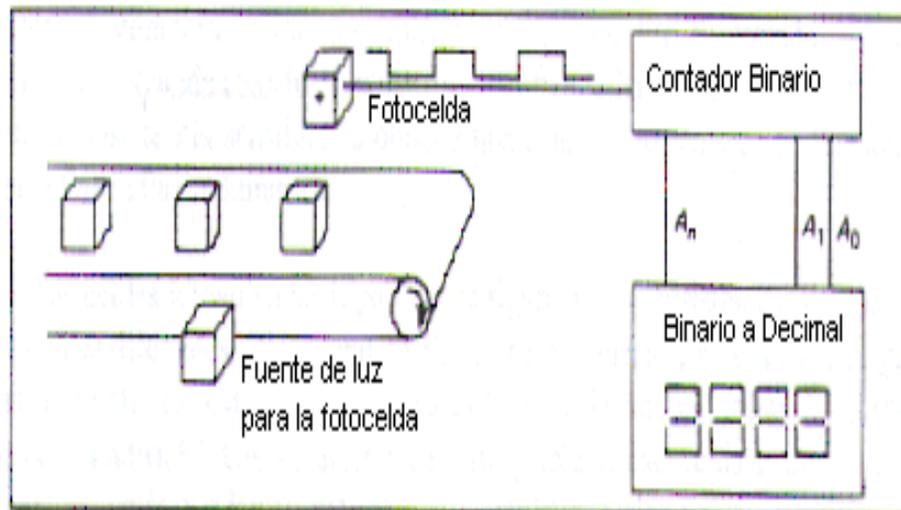


**Figura 2.20. Uso de una señal en un contador electrónico.**

- a) Cascado de la señal,**
- b) representación binaria de 4 bits,**
- c) Diagrama. (Beckwith, 1993).**

**Transductores detectores de luz para el conteo de semillas**

(Beckwith, 1993), menciona que los detectores sensibles a la luz, fotosensores o fotoceldas pueden ser categorizados como detectores térmicos o detectores de fotones. Los detectores térmicos involucran un elemento sensible a la temperatura, el cual es calentado por una luz incidente. El dispositivo de fotones responde directamente a la absorción de fotones o también por la emisión de electrones desde una superficie (efecto fotoeléctrico) o por la creación adicional de pares electrón-hueco en un semiconductor. Los dispositivos de fotones están categorizados en la Figura 2.22.



**Figura 2.21. Contador electrónico usado como contador de eventos, (Beckwith, 1993)**

(Tejeda, 2000), menciona que los detectores fotoemisivos, tipo A de la Figura 2.22 consisten en la combinación de un cátodo-ánodo dentro de un cristal aislado o de una pieza de cuarzo empacado. Dentro del circuito, el choque de luz sobre el cátodo provoca emisión de electrones. Los electrones viajan hacia el ánodo, por lo tanto se provee de una pequeña corriente, adicionando sucesivamente algunos electrodos de voltaje (diodos) al empaque y una corriente sustancial de amplificación es obtenida,

produciéndose así un tubo fotomultiplicador. Desde la invención de diminutos fotosensores semiconductores, estos dispositivos son usados solamente en aplicaciones muy especializadas. Cuando se requieren respuestas muy rápidas y altas ganancias o bien cuando longitudes de onda cortas (UV) están involucradas, estos tipos de dispositivos son muy útiles. Los fotosensores semiconductores son de varios tipos; en general, éstos trabajan mejor a longitudes de onda cercanas a los infrarrojos.

Las celdas fotoconductoras, tipo B de la Figura 2.22 consisten en una capa delgada de material, tal como el seleniuro de cadmio, algunos de sulfatos metálicos o germanio dopado cubierto entre electrodos sobre la superficie de un cristal plano. La celda se comporta como un resistor variable de luz controlada y su resistencia es reducida cuando se expone a una fuente luminosa. En conjunto con un circuito de resistencia sensible, se obtiene una señal de salida que es función de la intensidad luminosa.

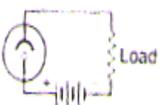
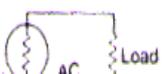
Las celdas fotovoltaicas, tipo C de la Figura 2.22 consisten en un “sandwich” de materiales diferentes, tales como un hierro base, cubierto con una capa delgada de seleniuro de hierro. Cuando la celda es expuesta a la luz, un voltaje es formado a través del “sandwich”. Una característica distintiva de esta celda es que no requiere fuente externa, más que la luz (celda solar).

Los fotodiodos, tipos D1 y D2 de la Figura 2.22 consisten en una unión P-N, similar a la celda fotoconductoras; básicamente, es una fuente de corriente sensible a la luz. El fotodiodo PIN, se diferencia en que una capa de semiconductor no dopado (intrínseco) es “sandwichado” entre las capa P y N para expandir el rango de sensibilidad a

longitudes de onda más largas. El fototransistor y el foto-darlington, tipos E1 y E2 de la Figura 2.22, son básicamente fotodiodos seguidos por una o dos etapas de amplificación incorporadas dentro del mismo empaque para ampliar la salida.

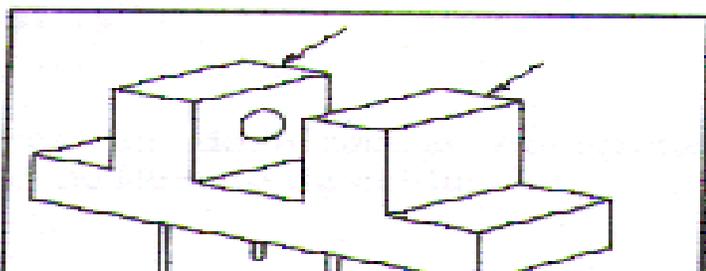
Los fotosensores pueden ser hechos selectivamente sensibles a la luz, no sólo dentro del espectro visible, sino también, dentro de los rangos infrarrojos y ultravioletas. Los sensores infrarrojos rastreadores de calor son comúnmente del tipo fotoconductor. La respuesta de los fotosensores a las rápidas variaciones en la intensidad de la luz no es instantánea, esta condición es determinada por la celda misma y por el circuito adicional. Los rangos de tiempo, son determinados por el tipo de celda y éstos son del orden de unos cuantos nanosegundos a algunos cientos de milisegundos.

Las aplicaciones de una foto celda en mediciones mecánicas incluyen un simple conteo (Figura 2.23), donde es utilizada la interrupción de un rayo de luz para la medida de esfuerzos, control de puntos de rocío, medición de temperatura y controles de tensión.

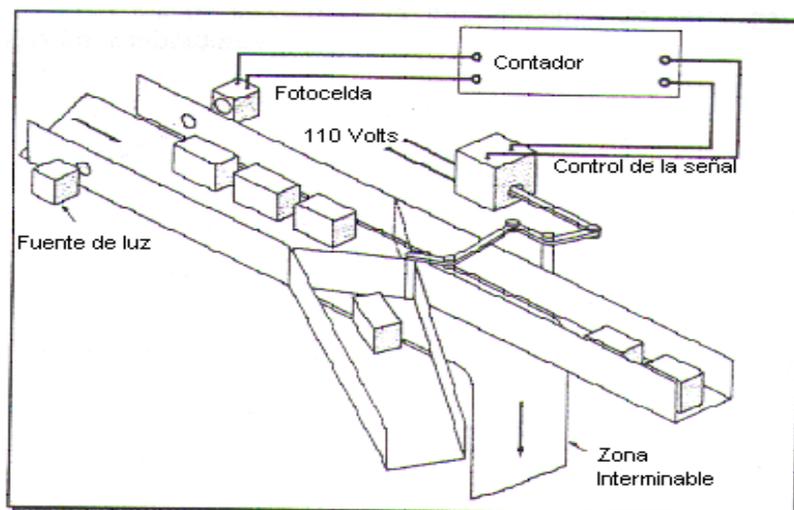
Type	Symbol and Typical Circuit	Form of Output	Relative Frequency Response	Comments
A. Photoemissive or Photomultiplier		Current	Extremely fast	Cathode-anode in evacuated glass or quartz envelope. PMT gain can be $10^2$ to $10^8$ . Bulky; requires high voltage, and has given way to solid-state devices.
B. Photoconductive (or photoresistive)		Resistance change	Slow	Light-sensitive resistor. Increased light intensity causes reduced resistance.

**Figura 2.22. Clasificación de dispositivos de fotones. (Beckwith, 1993).**

Algunos empaques especiales, (Beckwith, 1993) para opto-interruptores y opto-aisladores, consisten de fotoceldas combinadas con diodos emisores de luz (LEDs), arreglados de tal forma que la luz proveniente del led se proyecte hacia la celda (Figura 2.23). El opto-interruptor se activa hasta que alguna forma de partícula mecánica sea usada para interrumpir el rayo de luz entre el led y la celda, por lo tanto se provee de un switcheo ON-OFF para conteo o para una infinidad de propósitos, tal como se ilustra en la Figura 2.24.



Led

Fotocelda  
receptora**Figura 2.23. Empaque de un optointerruptor (Beckwith, 1993).****Figura 2.24. Uso de un sensor y un contador, en un evento físico, ( Beckwith, 1993).**

## MATERIALES Y MÉTODOS

### UBICACIÓN DEL ÁREA DE TRABAJO

En la Unidad de Ingeniería y Mecanización Agrícola del INIFAP (Figura 3.1), se llevó a cabo el desarrollo de un sistema inteligente de dosificación neumático de semilla durante el período 2004-2005. El campo experimental se encuentra ubicado a los 15°50' de latitud norte y a los 96°10' de longitud oeste, a una altitud de 14 m, en el kilómetro 34 de la carretera Veracruz-Córdoba.



**Figura 3.1. Laboratorio de Pruebas y Evaluación de Maquinaria y Equipo agrícola.**

## MATERIALES

Para el desarrollo del prototipo se utilizó el taller de máquinas y herramientas de la unidad de mecanización (Figura 3.2), el cual consta de: tornos, fresadoras, taladro radial electrónico y vertical, equipo de soldar, prensa etc.



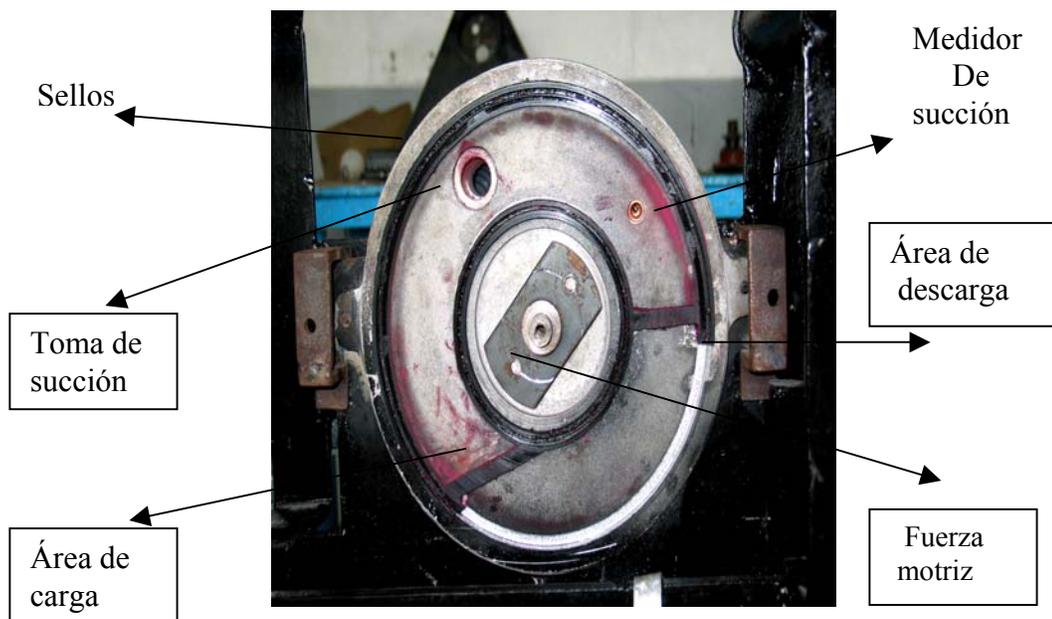
**Figura 3.2. Taller de máquinas y herramientas de la UIMA-INIFAP.**

El prototipo utilizado en la evaluación fue el desarrollado por el INIFAP en el proyecto **“Diseño de un sistema de siembra de alta precisión para labranza de conservación acoplado a tractores de potencia media”**; desarrollado por (Campos, et al; 1993) y del cual formo parte del grupo de trabajo. Partiendo del desarrollo de este prototipo:

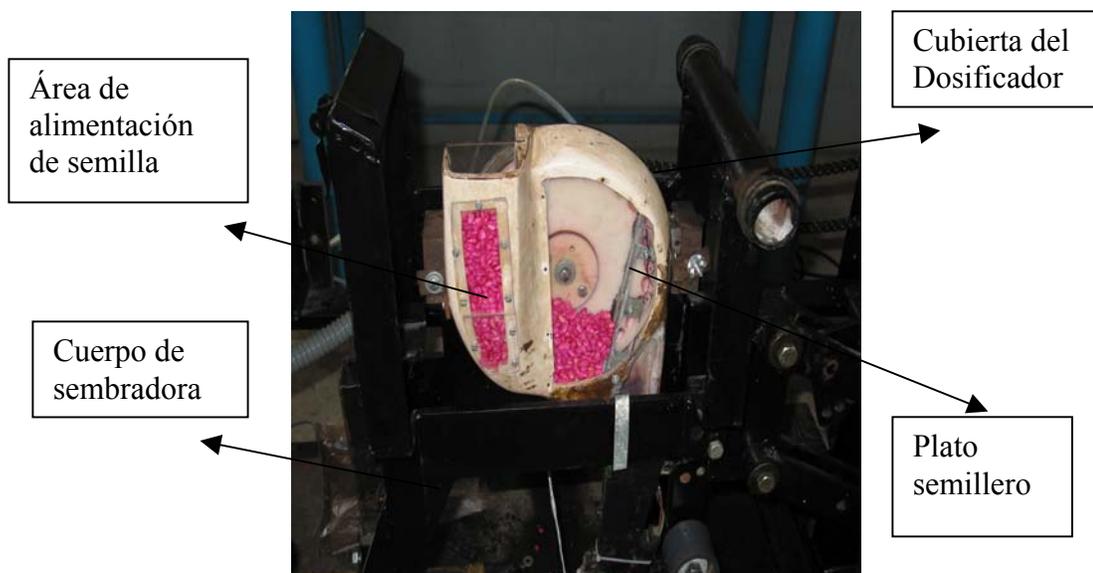
### **Dosificador neumático de semilla**

El dosificador sometido a evaluación Figura 3.3 y 3.4, está constituido básicamente por un plato semillero que gira en un plano vertical, una fuerza motriz utilizada para generar el movimiento, un limitador de semillas para controlar el exceso, una cámara de succión de celdas provistas entre el plato semillero y la base y un sello que permite mantener el

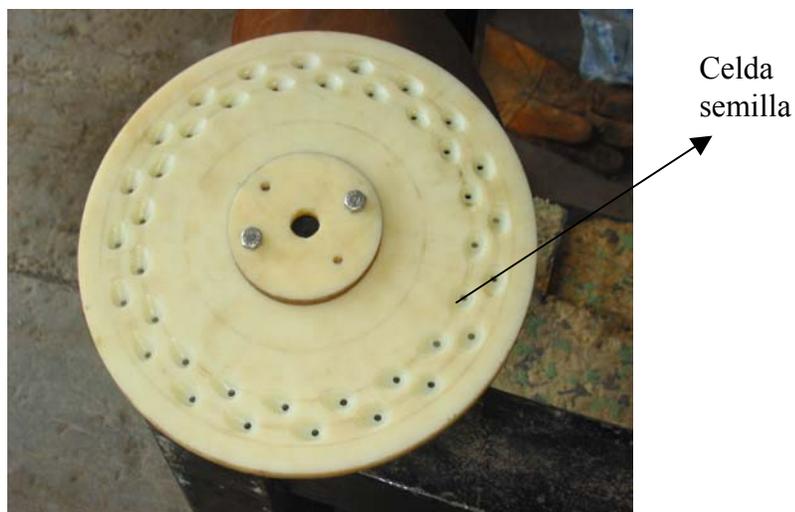
vacío de aire ubicado entre las cubiertas del dosificador. El flujo de aire es generado por la turbina y representa las fuerzas de vacío que mantienen adherida la semilla al plato, cuando las fuerzas de vacío superan a las de gravedad.



**Figura 3.3. Base porta plato semillero.**



**Figura 3.4. Dosificador neumático de semilla.**



**Figura 3.5. Plato maquinado en nylamid para semilla de maíz.**

### **Banco de prueba del dosificador sin condiciones de impacto**

Para las evaluaciones sin impacto se construyó un banco de pruebas con dimensiones tales que permiten evaluar máquinas sembradoras de una hasta cuatro unidades de siembra en forma simultánea (Figura 3.6), en este banco se simulan velocidades tangenciales en el plato dosificador a través de un variador de frecuencia marca Yaskawa de 1-60 Hz (Figura 3.7), un motor de tres caballos de potencia y 220 Volts (V), un moto-reductor con una reducción de 20:1 y 1700 rpm y 0.75 Hp y un mecanismo de transmisión por medio de flechas y engranes que provee el movimiento del dosificador (Figura 3.8).



**Figura 3.6. Banco de pruebas de sistema de dosificación de semilla sin impacto**



**Figura 3.7. Variador de frecuencia**



**Figura 3.8. Moto-reductor**

### **Banco de prueba del dosificador bajo condiciones de impacto**

Para las evaluaciones del dosificador con impacto se construyó un banco para pruebas unitarias de dosificación (Figura 3.9). Este banco está integrado por un moto-reductor

con una relación 22.2:1, un variador de frecuencia, un sistema de alimentación y control de vacío, un cuerpo completo de dosificación con sistema de flotación, este sistema es similar al del banco sin condiciones de impacto. Para el sistema integrado con condiciones de impacto se realizó a través de un mecanismo tipo leva, el cual simulaba las condiciones de irregularidad del suelo y los posibles eventos de impacto que ocurren bajo condiciones de impacto.

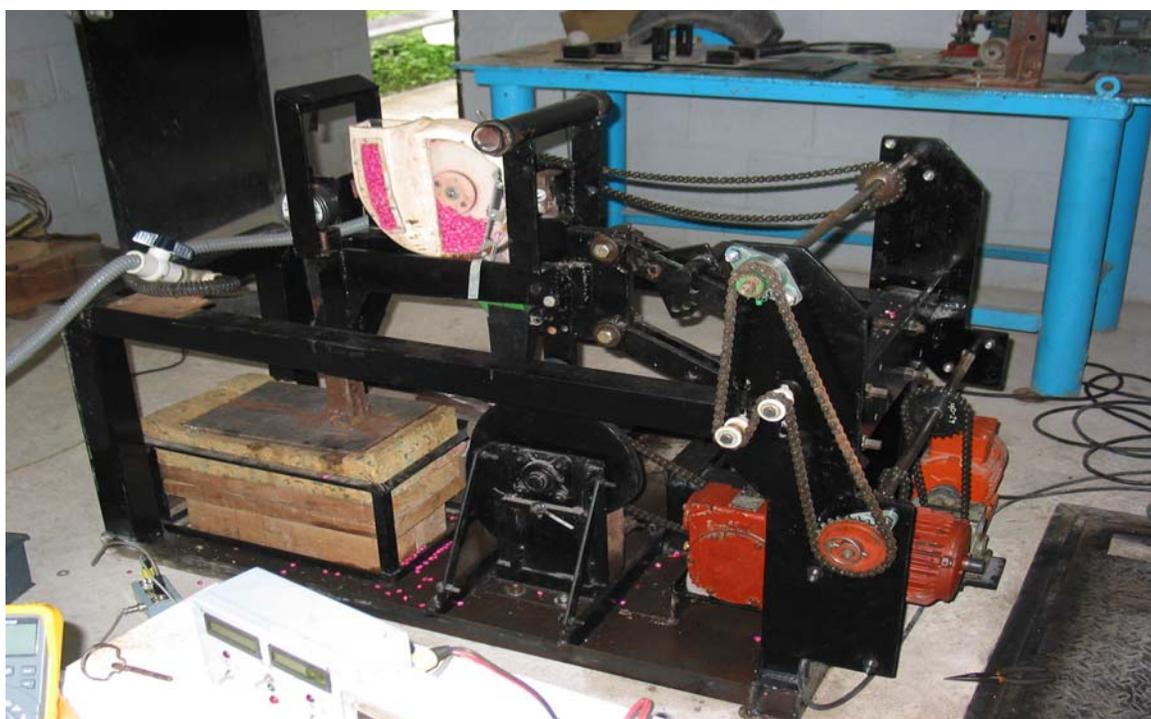
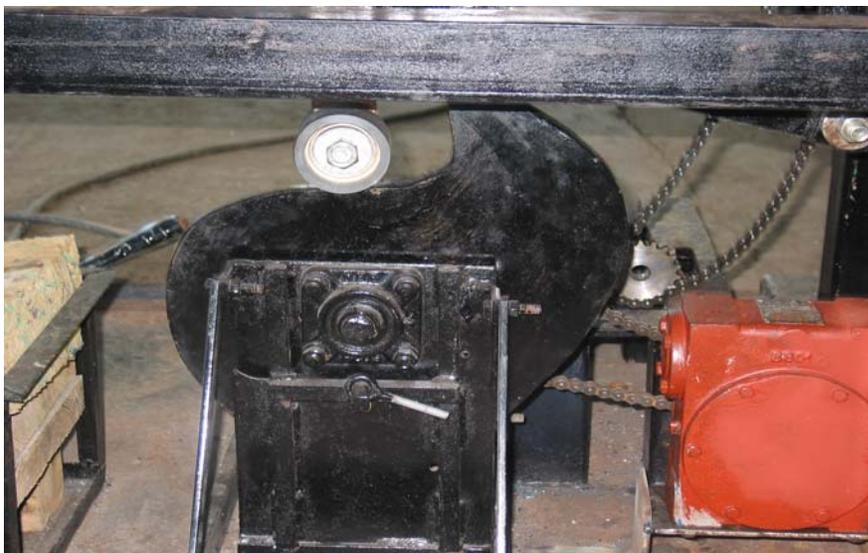


Figura 3.9. Banco de pruebas de dosificado de semillas con impacto

Este sistema de impacto estaba integrado por un mecanismo tipo leva con amplitud de 0.06 m (Figura 3.10), movido por un motor reductor guiado por un motor eléctrico, un variador de frecuencia de características similares al ya descrito, el cual proporcionaba las frecuencias de impacto seleccionadas en golpes por minuto.



**Figura 3.10. Mecanismo simulador de impacto tipo leva.**

### **Fuente de potencia**

El sistema de fuente de potencia, el cual simulaba al mecanismo hidráulico de válvulas del tractor se realizó con el desarrollo de un banco alimentador de potencia para el movimiento del motor hidráulico-turbina Figura (3.11), el cual genera la succión y contiene una bomba hidráulica de rodamientos (210 bar), 750 rpm con flujo de salida de 20 litros por minuto (Lpm), un motor hidráulico de 4674 rpm, 16 Lpm, turbina comercial de maquina Max Emerge de la compañía John Deere. Para el registro de los niveles de succión creados en la cámara de succión se acoplaron dos vacuómetros marca Dwyer Instruments, Inc. de 1-37.5 milibares (1-15 pulgadas de agua).



**Figura 3.11. Banco simulador de potencia suministrada por el tractor.**

Una alternativa utilizada para generar la succión dentro de la cámara, fue el uso de una aspiradora de tipo doméstico (Figura 3.12), una válvula para regular la succión y mangueras para su acoplamiento. Esta opción fue utilizada en las pruebas bajo condiciones de impacto para generar los niveles de succión.



**Figura 3.12. Sistema de Aspiración utilizado en las pruebas con impacto**

### **Sistema de monitoreo y detección**

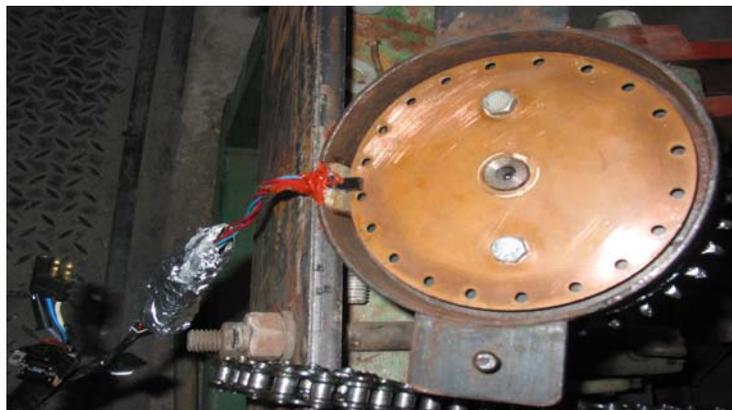
Para el registro y conteo de la frecuencia de la caída de semilla y desplazamiento de la sembradora se utilizaron dos sensores optoeléctricos, denominados, sensor de desplazamiento y sensor de semilla. Dichos sensores operan de la siguiente forma: “El emisor de luz (led) es activado por un voltaje directo de excitación emitiendo de esta manera un haz de luz de tipo infrarrojo; por otra parte, el fototransistor no conduce corriente hasta que la base es polarizada por el haz de luz del led generando un voltaje de salida”. El sensor de semilla es colocado en el tubo de descarga de la semilla (Figura 3.13) y al detectar la caída de la semilla, envía una señal de salida al microcontrolador y éste mediante funciones previamente programadas despliega en un display en forma visual el número total de semillas caídas en determinado tiempo.



**Figura 3.13. Sensor de caída de semilla A9321 John Deere**

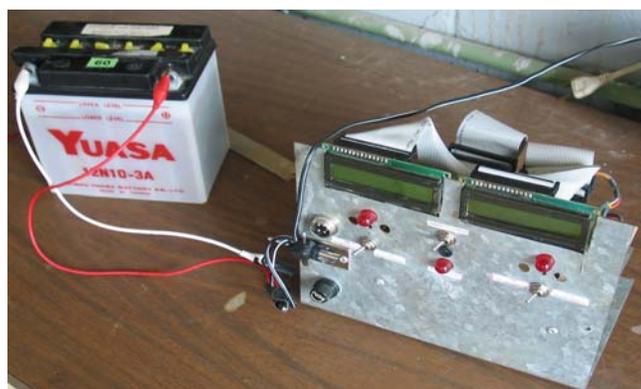
Con respecto al sensor de desplazamiento, dicho sensor está integrado por un disco de cobre de 123 mm de diámetro con 20 perforaciones, una cámara donde es colocado el disco de cobre sellada de tal forma que obstruya el paso de ondas de luz visible, un opto-

interruptor integrado por un led de luz infrarroja y un foto-transistor. La cámara se encuentra paralela al reductor de velocidad 1:35 sobre el mismo eje y dentro de ésta es colocado el opto-interruptor en donde se encuentra el disco perforado (Figura 3.14). Este sensor es el que se encargará de medir el desplazamiento que genera el disco, enviando una señal en pulsos al contador digital.



**Figura 3.14. Sensor de desplazamiento desarrollado por INIFAP-Cotaxtla**

Un contador digital, el cual registra las señales que le envían el sensor de semilla y el de desplazamiento. El contador está compuesto por dos microcontroladores COP8SA720N9, dos displays, cable plano de 14 guías y circuitos impresos (Figura 3.15); también, se requirió de una fuente de 12 Volts para conectar el contador.



**Figura 3.15. Contador digital conectado a la fuente de voltaje**

## **Software**

Se utilizó el paquete Microsoft Excel para capturar los datos que se obtuvieron durante las pruebas y se calcularon las variables como son: semillas teóricas, la media, la desviación estándar, el coeficiente de variación, la tendencia y ecuación de respuesta, para calcular la ecuación de respuesta de las variables. También se empleó el programa de diseños experimentales de la Facultad de Agronomía de la UANL, (Olivares, 1994).

## **METODOLOGÍA**

Para determinar las magnitudes de las fuerzas de succión que permiten mantener adherida la semilla al plato dosificador se realizó un análisis cinemático del comportamiento de una partícula en movimiento donde interviene la velocidad angular del plato, la fuerza de gravedad y la masa de la semilla, esto permite determinar las diferencias entre las fuerzas teóricas y reales producto del funcionamiento del equipo bajo condiciones de laboratorio.

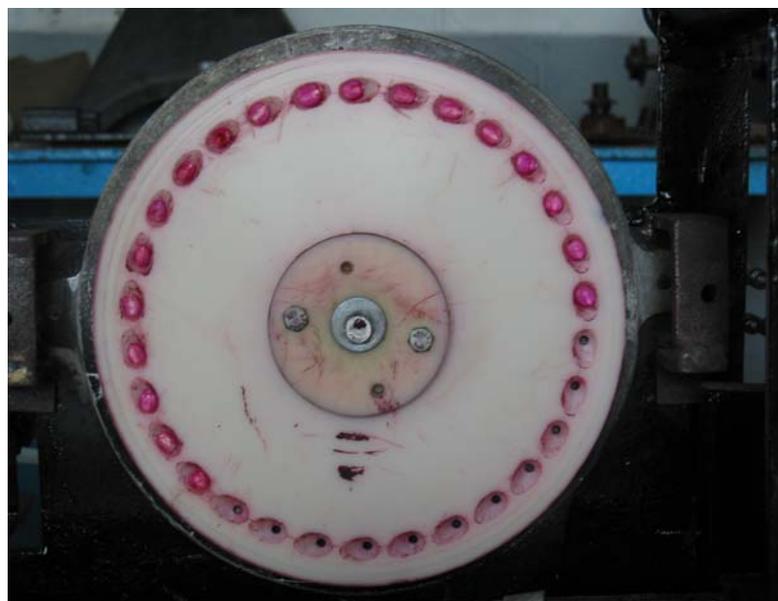
En la evaluación del funcionamiento del sistema de dosificación neumático de semilla se considerarán los siguientes parámetros: dos tipos de platos, dos niveles de impacto, cuatro niveles de succión y 10 velocidades de siembra.

La metodología de evaluación consistió en dos fases y en tres parámetros para dos tipos de platos: el primer plato sin huella (Figura 3.16) y el segundo con huella de forma

esférica (Figura 3.17). La primera fase sin condiciones de impacto y la segunda con condiciones de impacto, ambas fases de pruebas con la misma semilla.



**Figura 3.16. Plato semillero sin huella**



**Figura 3.17. Plato semillero con huella**

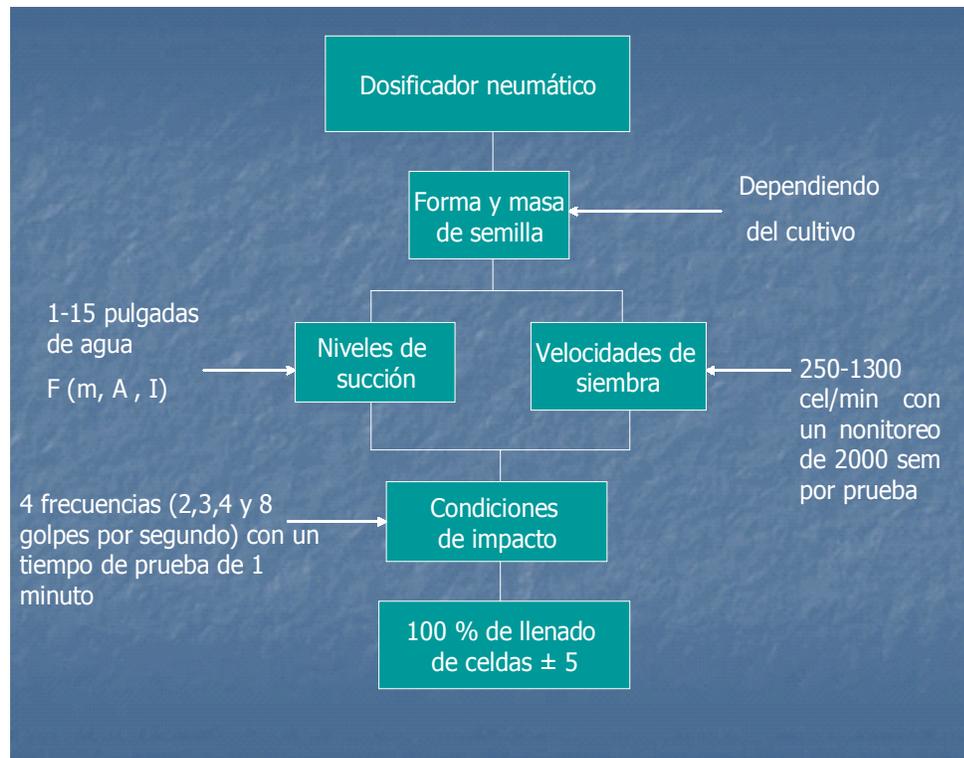
Los parámetros a evaluar fueron:

1. Conteo y registro de semillas (semillas por metro), esta operación se captura en el monitor y es ejecutada por el sensor de conteo de frecuencia y caída de semilla.
2. Conteo y registro de pulsos por desplazamiento (pulsos por metro), esta operación la ejecuta el sensor de desplazamiento.
3. Fuerza necesaria para mantener adherida la semilla al plato (Fuerzas de succión en milibares).

La primera fase se desarrolló sin niveles de impacto y con condiciones de prueba estáticas y dinámicas, es decir, se obtuvieron los niveles de succión requeridos para mantener las semillas del plato adheridas desde una velocidad en cero hasta el máximo rango de velocidades (valor de 0 para condiciones estáticas y 250,360, 470, 580, 690, 800, 925, 1050, 1175, 1300 celdas por minuto para pruebas dinámicas. (Ver apéndice. Cuadro 6).

La segunda fase fue similar a la primera pero con niveles de impacto. Para el desarrollo de las pruebas se seleccionaron 10 velocidades de rotación del plato dosificador, de acuerdo a las velocidades de siembra utilizadas de forma tradicional en el país y al tipo de suelos y de cultivos localizados en el mismo, es decir, en un rango de 4 a 8 km h<sup>-1</sup> y con una dosis de siembra de 50,000 a 100,000 semillas por hectárea (Ver apéndice. Cuadro 8). Los rangos de velocidad seleccionados fueron: 20, 29, 35, 38, 40, 45, 46, 51, 52, 57 rpm, que incluyen las posibles mínimas y máximas velocidades y densidades de siembra.

Para ambas fases de evaluación y de acuerdo a la hipótesis planteada se seleccionaron todas los posibles arreglos de los factores que intervenían en la prueba (Figura 3.18).



**Figura 3.18 Diagrama de secuencias de evaluación de llenado de celdas**

### Análisis de parámetros

Cada uno de los siguientes parámetros presenta influencia directa en el funcionamiento del dosificador según (Barmintong, 1948):

1. Forma y masa de la semilla
  - a) Tamaño de la celda

2. Fuerzas de succión
  - b) Tiempo de exposición de la semilla
  - c) Adhesión y descarga de la semilla
3. Velocidad de siembra
  - d) Velocidad tangencial del plato
4. Fuerzas parásitas
  - e) Fuerzas originadas por la inestabilidad del suelo
  - f) Orientación de la semilla con respecto a la celda

Establecidos los parámetros y la relación existente entre estos se analiza el porcentaje de llenado de celdas a diferentes niveles de vacío, determinados por la masa de la semilla, la velocidad de siembra e impactos en diferentes niveles y frecuencias.

El porcentaje de llenado de celda se describe como el número de semillas que efectúa el recorrido de la zona de carga hasta la zona de descarga y que es monitoreada por el sensor de caída de frecuencia de semilla contra el registro de pulsos que efectúa el sensor de desplazamiento, por lo que el número de pulsos debe de ser igual al número de semillas registrado en ambos sensores y mostrados en el display del monitor.

### **Principios de operación**

Los bancos de prueba utilizados fueron desarrollados para evaluar el dosificador bajo condiciones de laboratorio con impacto y sin impacto. El movimiento del plato de semillas fue generado por un sistema motriz de flechas, engranes y cadenas. La fuente

de potencia del sistema motriz y del sistema hidráulico se realizó a través de motores eléctricos. El sistema de monitoreo de frecuencia y caída de semilla se registró por un sensor opto-electrónico en un monitor integrado por microcontroladores y de desplazamiento, respectivamente. Los datos se registraron en un monitor integrado por microcontroladores.

Las fuerzas de succión fueron generadas por una turbina movida por el sistema hidráulico y un sistema de perno se empleó para la regulación de los niveles de succión. Las velocidades de siembra se simularon con un variador de frecuencia y las condiciones de impacto eran realizadas por medio de una leva con amplitud de 0.06 m y con frecuencias de impacto de 8, 16,24 y 32 golpes por segundo.

Para evaluar los niveles de succión requeridos para mantener la semilla adherida al dosificador se maquinó un plato con 30 celdas en una sola hilera, con huella en forma esférica y otro plato sin huella, únicamente con el orificio de la succión (0.0047m). Las evaluaciones realizadas a cada plato fueron de 60 segundos para cada uno de los niveles de succión y para cada velocidad con masa constante utilizando semilla de maíz plano medio y con un registro de conteo de prueba de 2000 semillas.

### **Análisis estadístico**

El diseño estadístico fue bloques completamente al azar para obtener los valores de las fuerzas de succión mínimas requeridas para mantener las semillas adheridas en condiciones estáticas y dinámicas para el plato con huellas y sin huellas.

Posteriormente y partiendo de las fuerzas mínimas requeridas de succión a las máximas condiciones sin impacto se realizó un diseño estadístico de parcelas subdivididas A x B x C para las evaluaciones en condiciones estáticas y dinámicas en el plato.

La variable a medir fue el porcentaje de llenado de celdas

Factor A: 2 niveles de impacto (8 y 16 golpes por minuto)

Factor B: 4 niveles de succión (9, 11, 13 y 15 pulgadas de agua)

Factor C: 10 velocidades de siembra (250, 360, 470, 580, 690, 800, 925, 1,050, 1,175, 1,300) celdas por minuto.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Análisis cinemático de la partícula

Para la determinación teórica de las fuerzas mínimas requeridas para mantener las semillas adheridas al plato dosificador se realizó un análisis (Figura 4.1), similar al descrito por (Kimbrell, 1991).

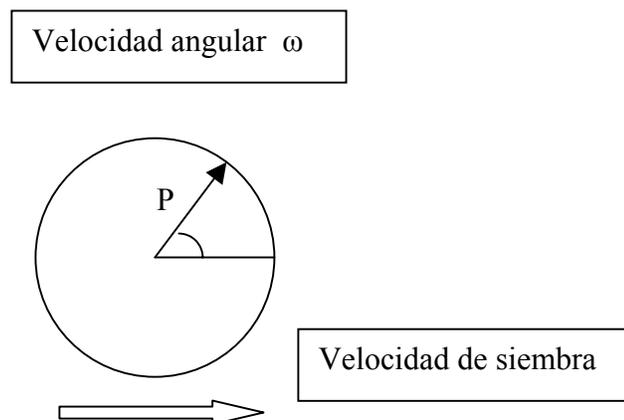
$$P = p e^{i\theta} \quad (4.1)$$

Donde:

$p e^{i\theta}$  = Aceleración con la cual la magnitud del vector está cambiando.

$i$  = Indica una rotación de  $90^\circ$  en la dirección  $\theta$ .

$\theta$  = Posición de la partícula



**Figura 4.1. Análisis cinemático de la partícula con velocidad angular del plato.**

Para determinar las fuerzas de aceleración de la partícula se realiza la segunda derivada a la ecuación (4.1) con respecto al tiempo, y obtenemos la velocidad, si volvemos a derivar obtenemos la aceleración, que multiplicada por la masa de la partícula (Segunda Ley de Newton  $F = ma$ ) se obtiene la ecuación (4.2), que da las fuerzas que se requieren para mantener adherida la semilla, producto de la fuerza de gravedad y de la masa de la semilla

$$F_p = (p e^{i\theta} + 2i p \omega e^{i\theta} - p \omega^2 e^{i\theta} + i p \dot{\theta} e^{i\theta} + g) m \quad (4.2)$$

En donde:

$p e^{i\theta}$  = Aceleración con la cual la magnitud del vector está cambiando.

$2i p \omega e^{i\theta}$  = Componente coriolis de la aceleración; (i) indica una rotación de 90° en la dirección  $\theta$ .

Ahora se tienen dos factores que influyen directamente en el análisis cinemático en el plato dosificador que son: la velocidad misma del plato ( $\omega$  plato) y segundo la fuerza de gravedad (g).

El funcionamiento esperado para este tipo de dosificadores neumáticos debe tener características de alta precisión en el porcentaje de llenado de celdas con diferentes velocidades tangenciales del plato semillero. Para el análisis de las fuerzas de las semillas de la ecuación (4.2) estas solo experimentan fuerzas debido a la rotación del plato (fuerza normal o centrifuga) y a la aceleración de la gravedad, es decir, sólo se consideraron:

- $p\omega^2 e^{i\theta}$  : el signo menos en la ecuación indica que la aceleración normal se dirige hacia el centro del plato y que la gravedad (g) al ser multiplicada por la masa de la semilla se obtiene la fuerza total ejercida por la semilla. La ecuación (4.3) queda de la siguiente manera:

$$F_{\text{semilla}} = (p\omega^2 + g) m + \text{Fuerzas parásitas} \quad (4.3)$$

En donde:

$F_{\text{semilla}}$  = Fuerza total de la semilla en Newtons

$\omega$  = Velocidad angular del plato en  $\text{rad seg}^{-1}$

$p = r$  = Radio del plato en m

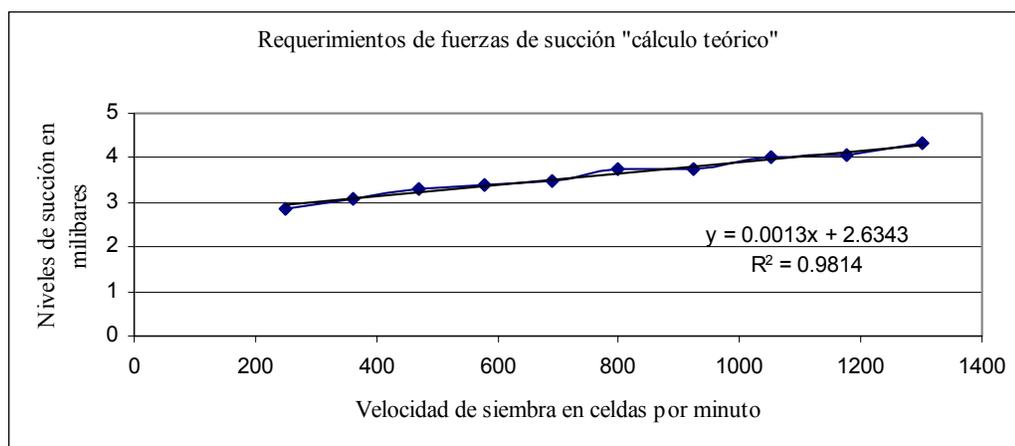
$g$  = Aceleración de la gravedad ( $9.81 \text{ m seg}^{-1}$ )

$m$  = Masa de la semilla en kg

$F_p$  = Fuerzas parásitas producto de las irregularidades del suelo

La ecuación anterior determina la magnitud de la fuerza para mantener adherida la semilla al plato dosificador. La fuerza necesaria requerida para vencer a la fuerza que experimenta la semilla, es la fuerza de vacío (generada por la turbina), es decir, para que la semilla sea adherida a la celda del plato desde que es succionada en el inicio y hasta el final de la recámara de vacío, esta fuerza debe ser mayor que la fuerza experimentada por la semilla, se puede describir numéricamente la presencia de fuerzas parásitas (provocadas por la inestabilidad de las condiciones del terreno a sembrar).

En la Figura 4.2, se indica la ecuación de respuesta de las fuerzas de succión determinadas a partir de el diámetro del plato dosificador y la masa de la semilla, dentro de un rango de velocidades de siembra de 4 a 8 km h<sup>-1</sup>, a partir de la ecuación (4.3) donde las semillas sólo experimentan fuerzas debido a la rotación del plato (fuerza normal o centrífuga) y a la gravedad, (Ver anexo. Cuadro 1).



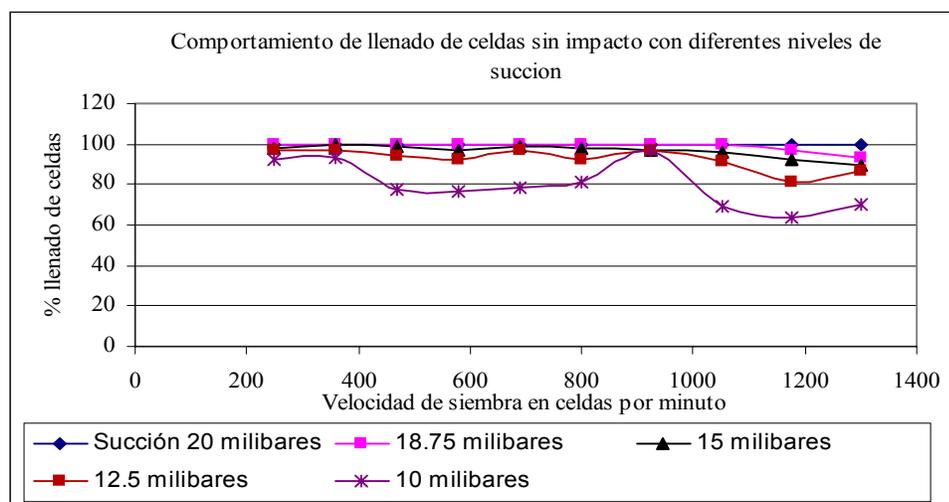
**Figura 4.2. Fuerzas debido a la rotación del plato y a la gravedad afectada por la masa de la semilla.**

En la Figura 4.3, se muestra el comportamiento del plato dosificador de 30 celdas con huella para semilla de maíz plano medio a diferentes niveles de succión y velocidades de siembra.

### Condiciones de evaluación sin impacto

Las evaluaciones realizadas en el dosificador de semilla y que fueron obtenidos bajo condiciones de laboratorio, muestran una línea de respuesta de 100% de llenado de semillas en las celdas a un nivel de succión de 20 milibares, se considera este valor a

todas las velocidades en un rango de 250 a 1300 celdas por minuto. Cabe mencionar que esta fase de evaluación no fue sometida a impacto, por lo que el resultado de la evaluación a las condiciones de máxima velocidad debía ser 100% de llenado, es decir, que se mantuvieran todas las semillas adheridas al plato desde la zona de carga hasta la zona de descarga, considerando que posterior a esta evaluación serían sometidas a impacto y que eso ocasionaba mayor demanda de fuerzas de succión. Por lo que se deduce que para la fase de evaluación bajo condiciones de impacto se tendría que iniciar con un nivel de succión mayor que 20 milibares para plato con huella y de 7.5 milibares para plato sin huella.



**Figura 4.3. Funcionamiento con curva de respuesta de dosificador de semillas.**

En el Cuadro 4.1, se muestran los niveles de succión requeridos para mantener adheridas las semillas a la celda en los platos dosificadores con y sin huella, sometidos a condiciones estáticas y dinámicas, máxima velocidad de siembra y sin impacto.

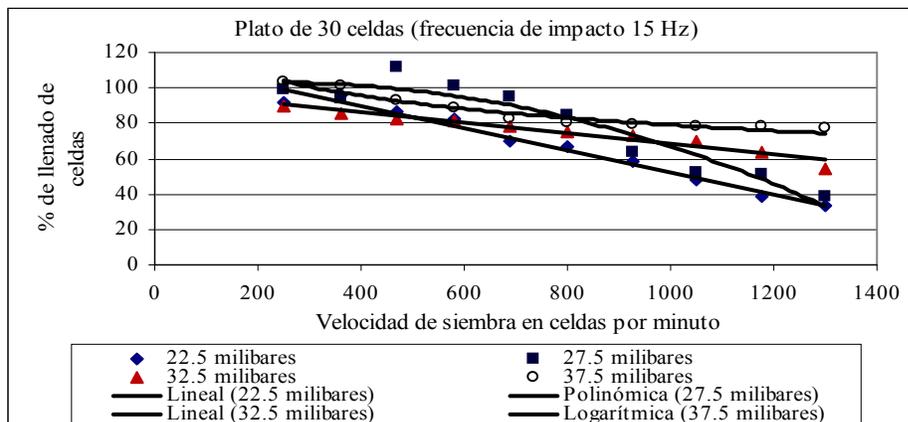
**Cuadro 4.1. Requerimientos de presión de vacío o fuerzas de succión.**

Plato dosificador succión	Presión de vacío (milibares)	Presión de vacío Nm <sup>2</sup>	Fuerzas mN
Plato sin huella (estático)	3.25	322.85	4.00
Plato sin huella (dinámico)	6.50	645.71	7.98
Plato con huella (estático)	7.50	745.04	9.21
Plato con huella (dinámico)	20.00	1986.80	24.57

### Condiciones de evaluación con impacto

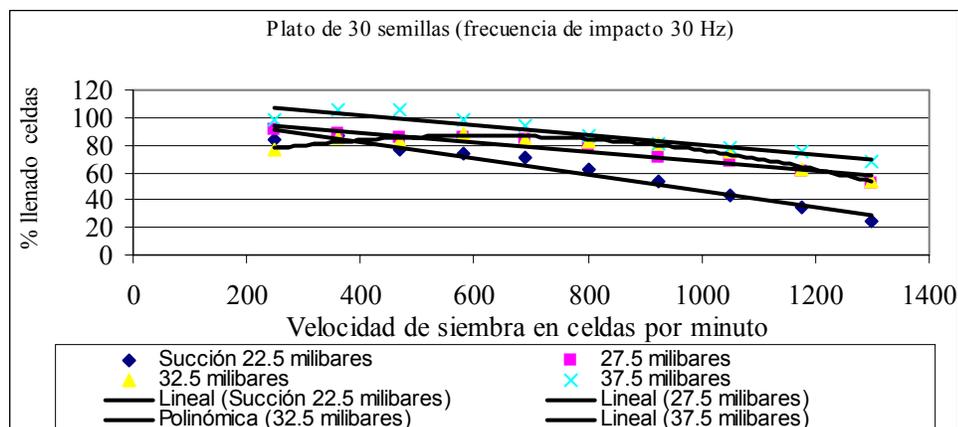
Al iniciar la fase de evaluación bajo condiciones de impacto en el diseño de plato dosificador con celda sin huella a los requerimientos mínimos de prueba, se observó que la semilla no se mantenía adherida al plato en un 100%, por lo que se rechazó la fase de evaluación para este tipo de diseño de plato, y se realizaron únicamente las evaluaciones al plato con celda y huella.

En los datos obtenidos en la Figura 4.4 (Ver anexo Gráficas 3, 4, 5 y 6), se observan los porcentajes de llenado de celdas a diferentes velocidades de siembra y en niveles de succión de (22.5, 27.5, 32.5 y 37.5 milibares), las tendencias de las combinaciones de las variables de prueba manifiestan que a mayor velocidad de siembra afecta la eficiencia del dosificador; y las variables, nivel de succión y frecuencia de impacto, repercuten de manera considerable en su funcionamiento.



**Figura 4.4. Comportamiento de variables en función de porcentaje de llenado sometidas a 15 Hz de frecuencia de impacto.**

En los valores mostrados en la Figura 4.5, y con un incremento al doble del nivel de impacto, se muestra que la mayor variación de los porcentajes de llenado de celdas es debida en mayor proporción a la velocidad de siembra y los niveles de succión.



**Figura 4.5. Comportamiento de variables en función del porcentaje de llenado sometidas a 30 Hz de frecuencia de impacto.**

En el Cuadro 4.2, se indica el análisis de varianza el cual muestra que el efecto de los bloques resulta ser no significativo para cada uno de los factores de prueba. La concentración de los datos muestra que el efecto de las condiciones de impacto en ambas frecuencias afecta de forma significativa el porcentaje de llenado de celdas; y que los

factores: niveles de succión, velocidad de siembra y las interacciones: impacto-succión, impacto-velocidad de siembra, succión-velocidad de siembra e impacto-succión-velocidad de siembra, afectan de manera considerable mostrando diferencias altamente significativas. Donde los factores que presentan mayor efecto en el desempeño de funcionamiento del dosificador son la velocidad de siembra y los niveles de succión, respectivamente.

**Cuadro 4.2. Análisis de varianza para determinar el comportamiento de los factores en el funcionamiento del dosificador neumático de semilla.**

FV	GL	SC	CM	F	P>F	F.05	F.01
Bloques	4	60 928	15 232	0.8235NS	0.573		
Factor A	1	209 920	209 920	11.3495*	0.029	7.71	21.2
Error A	4	73 984	18 496				
Factor B	3	65 847 552	21 949 184	4994.50**		3.01	4.72
AXB	3	4 514 816	1 504 938.62	342.44**		3.01	4.72
Error B	24	105 472	4 394.66				
Factor C	9	164 723 200	18 302 578	3009.41**		3.26	4.17
AXC	9	1 602 560	178 062.21	29.27**		3.26	4.17
BXC	27	75 700 480	2 803 721.5	461.03**		3.26	4.17
AXBXC	27	14 017 792	519 177.46	85.36**		1.5	1.76
Error C	288	1 751 552	6 081.77				
Total	399	328 608 256					

Factor A = Frecuencia de impacto. Factor B = Niveles de succión. Factor C = Velocidad de siembra. NS = No significativo. \* Significativo a 5 %. \*\* Altamente significativo a 1 %.

C.V. (Error C) = 3.18 %

Por otra parte para establecer los criterios de selección de las mejores combinaciones que se adecuen a la hipótesis planteada de 100 %  $\pm$  5 de llenado de celdas se realizó contrastes ortogonales de los factores de niveles de succión y velocidades de siembra. En el Cuadro 4.3, se muestran los resultados donde los niveles de succión de (32.5 vs 37.5) milibares, son estadísticamente iguales y los niveles de (22.5 vs 27.5) y (22.5, 27.5 vs 32.5, 37.5) son altamente significativos y diferentes entre si.

**Cuadro 4.3. Prueba de contrastes de las medias del factor B (evaluación de niveles de succión en el dosificador).**

Factor B	C.Medias	% llenado	CM error	GL	F	F.05	F.01
T1 = 22.5 (T1vsT2)	T4 a	55.43	4394.66	24	14.77**	4.26	7.82
T2 = 27.5 (T1T2vsT4T5)	T3 b	72.17			19.96**		
T3 = 32.5 (T4vsT5)	T2 c	74.62			2.68NS		
T4 = 37.5	T1 c	86.07					

NS = No significativo. \* Significativo al 5 %. \*\* Altamente significativo al 1 %. T = Tratamiento. Factor B = Niveles de succión en milibares. Medias con la misma letra los tratamientos son estadísticamente iguales (Tukey,  $P \leq 0.01$ ).

Para los contrastes obtenidos en las velocidades de siembra, en el Cuadro 4.4, se observa el efecto del porcentaje de llenado de celda, donde la comparación de medias del factor C (velocidades de siembra), muestra que son altamente significativos entre cada uno de los tratamientos y estadísticamente diferentes entre sí.

**Cuadro 4.4. Prueba de contrastes de las medias del factor C (evaluación de las velocidades de Siembra).**

Factor C	% llenado	Comparación de medias
T1 = 250	90.87	T2 = 92.21 a
T2 = 360	92.21	T1 = 90.87 b
T3 = 470	89.33	T3 = 89.33 c
T4 = 580	86.61	T4 = 86.61 d
T5 = 690	81.09	T5 = 81.09 e
T6 = 800	76.07	T6 = 76.07 f
T7 = 925	68.64	T7 = 68.64 g
T8 = 1050	61.10	T8 = 61.10 h
T9 = 1175	53.87	T9 = 53.87 i
T10 = 1300	44.02	T10 = 44.02 j

T = Tratamiento. Factor C = Velocidades de siembra en celdas por minuto. Medias con la misma letra los tratamientos son estadísticamente iguales (Tukey,  $P \leq 0.01$ ).

El comportamiento del plato semillero de 30 celdas de una sola hilera sin huella y con diámetro de 0.0047 m (Figura 4.6), presenta un comportamiento de 100 % de llenado de celdas a un nivel de succión de 6.5 milibares para evaluaciones sin impacto a las máximas condiciones de velocidad (1300 celdas por minuto); no así para las condiciones

de impacto que a la mínima velocidad de prueba (250 celdas por minuto) y a la mínima frecuencia de impacto (8 golpes por minuto) su comportamiento fue del 0% de llenado de celda, por lo tanto, se rechazó el plato sin huella bajo condiciones de impacto.



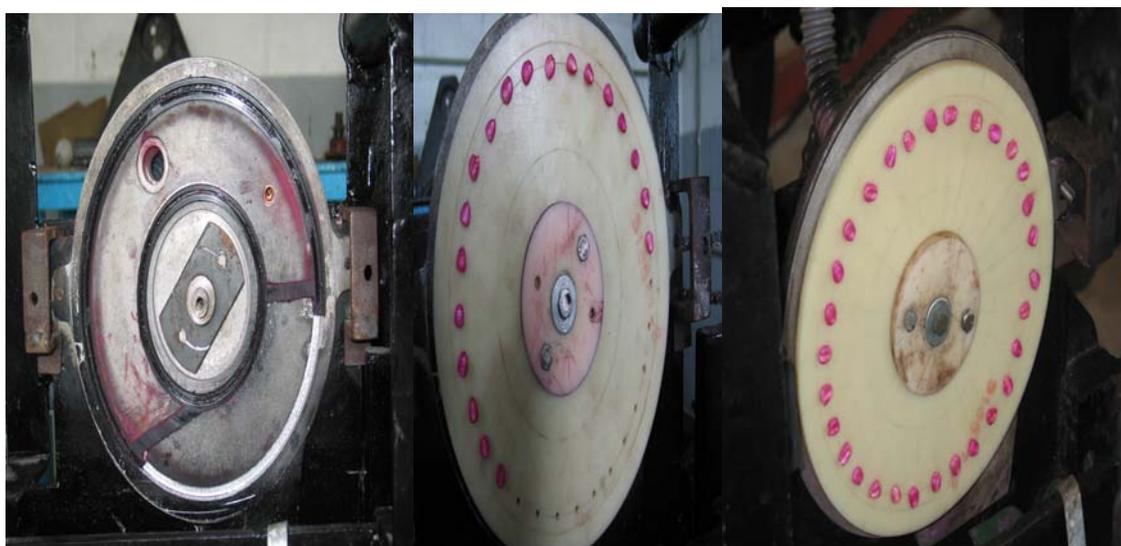
**Figura 4.6. Plato semillero sin huella.**

Para el plato con huellas de celda tipo esférica y con dimensiones iguales al ya descrito (Figura 4.7), se mostró un comportamiento aceptable para las condiciones de la hipótesis pero solo a bajas velocidades en rangos entre 250 y 580 celdas por minuto, equivalente a una velocidad tangencial de (28.2 y 65.4 m min<sup>-1</sup>), con un nivel de succión máximo de 37.5 milibares. Lo que nos permite observar que existen pérdidas de succión en la cámara, debido al ángulo de contacto entre el tamaño y forme de la celda y el de la semilla.



**Figura 4.7. Plato semillero con huella**

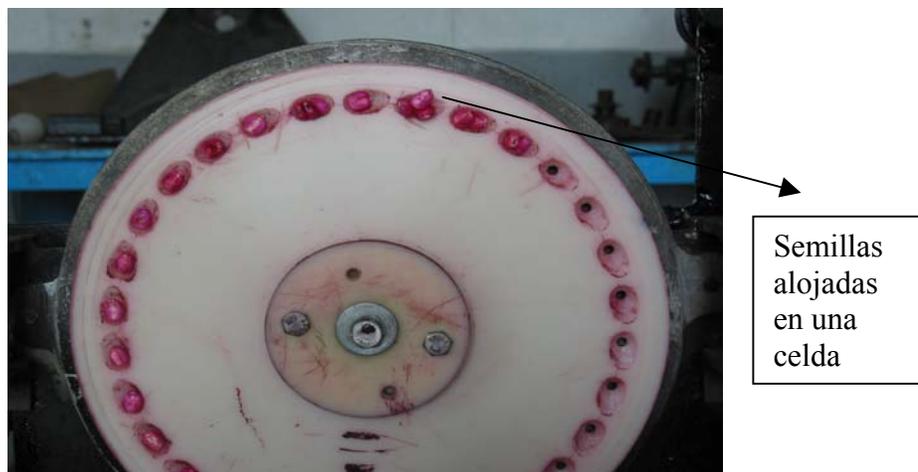
Las condiciones de funcionamiento del dosificador se realizaron con un factor de seguridad de diseño en la confiabilidad de la prueba de  $F_s = 1.5$ . Ver figura 4.8. Para establecer los posibles rangos de niveles de succión, así como para observar el comportamiento de la semilla y requerimientos de succión para pruebas estáticas y dinámicas.



**Figura 4.8 Factor de seguridad aplicado en el funcionamiento del dosificador**

Otra de las consideraciones de discusión y que afectan notablemente el comportamiento del dosificador en % de llenado de celdas es debido a la falta de un enrasador o limitador de exceso de semilla en la zona de carga, ya que durante el recorrido de la semilla hasta la zona de descarga, es posible encontrar mas de una semilla en la celda( Figura 4.9), lo que representa que la fuerza de succión para mantener adherida la semilla al plato sea dividida entre el número de semillas alojadas en la celda, haciendo mas viable que estas se caigan al momento de que se produzca un impacto.

Al producirse el impacto y lograr que la semilla se caiga, se produce una reacción en cadena de la pérdida de succión, es decir, existe una disminución en el sistema por cada celda vacía y es menos probable que se mantengan las semillas y así sucesivamente.



**Figura 4.9** Una o más semillas alojadas en una celda.

## CONCLUSIONES

El análisis del sistema de dosificación neumático bajo condiciones de laboratorio indica:

El tamaño y forma de la semilla influyen de manera directa en los niveles de succión.

El tamaño de la celda debe ser proporcional a la semilla, de tal manera que le permita a esta alojarse, mantenerse y descargarse.

La forma de la celda debe ser igual a la semilla (semilla esférica = celda esférica), (semilla plana = celda plana) en sus ángulos de contacto.

La eficiencia del dosificador se disminuye al incrementarse la velocidad y la frecuencia de impacto.

La pérdida de succión disminuye el porcentaje de llenado de celdas.

Se requiere de un limitador de semilla al momento de la carga y descarga.

Para las evaluaciones bajo condiciones de impacto, el cual simula irregularidades de suelo o siembra directa, es necesario que el plato dosificador de semilla tenga celdas con huella.

La orientación de la semilla depende de la forma y tamaño de la celda y de la fuerza de succión.

Los mejores resultados y que cumplen con la hipótesis se presentaron en un rango de velocidad de 250-580 celdas por minuto con niveles de succión 11 y 15 pulgadas de agua, siendo el mejor resultado de la evaluación cuando los factores se seleccionaron con frecuencia de impacto a 8 golpes por minuto, nivel de succión a 37.5 milibares y velocidad de siembra de 360 celdas por minuto.

## LITERATURA CITADA

- Barmintong R., D. The relation of seed cell size and speed to beet planter performance. *Agricultural Engineering* 29: 530-532, 1948.
- Beckwith, T., G.; Marangoni, R., D.; Lienhard, J., H.; (1993). *Mechanical Measurements*. Fifth edition, Addison-Wesley Publishing Company, Inc. USA.
- Bernabé J., J.; Morales C., N.; Chávez A., N.; 1993. Evaluación en campo de la sembradora unitaria. Memoria del III Congreso Nacional de Ingeniería Agrícola. Querétaro; Qro., México.
- Bragachini M., 2003. Agricultura de precisión. INTA Manfredi. Disponible en <http://www.agriculturadepresición.org>. (Revisado en Octubre de 2005).
- Breece H., E.; Hansen H., V.; Hoerner T., A.; 1975. *Fundamentos de maquinaria*. John Deere Service Publications. Moline, Illinois.
- Campbell A. & Baker C. An X Ray Technique for Determining Three Dimensional Seed Placement in Soils. *Transaction of the ASAE* 32(2):379-384.
- Colombino A., A.; Pollacino J., C.; 1996. Diseño y construcción de un banco de ensayos para conjuntos dosificadores de sembradoras y fertilizadoras. *Revista de la Facultad de Agronomía*. 16 (1-2) 69-72.
- De Boer, 1999. En línea <http://www.agriculturadepresición.org/Manejodesitio>.
- Flores V., J.; 2001. *Microcontrolador COP8™ Manual de Teoría y Práctica Básica*. National Semiconductor Corp. Guadalajara, Jalisco, México.
- García B., S.; Gracia L., C.; Serwatowski H., R.; 2000. Diseño y construcción de un banco de ensayos para el estudio de equipos neumáticos de siembra. Memoria del Congreso Latinoamericano de Ingeniería Agrícola (CLIA). X Congreso Nacional de Ingeniería Agrícola (AMIA), Guanajuato; Gto., México.
- Kachman S., D. and Smith J., A.; 1994. Alternative measures of accuracy in plant spacing for planters using single seed metering. *Transaction of the ASAE*, 38 (2): 379-387.

- Kepner R., A.; Barger E., C.; 1978. Principles of farm machinery. Third edition, The AVI Publishing Company, Inc. Connecticut, USA.
- Kimbrell J., T.; 1991. "Kinematics Analisis and Synthesis". McGraw Hill International Editions, Singapore.
- Kocher M., F.; Lan Y., Chen C. And Smith J.,1998. Opto- electronic sensor system for rapid evaluation of planter seed spacing uniformity. Transactions of the ASAE, 41(1): 237-245.
- Manual de microcontroladores, 2003. Información, herramientas y programador. En línea. Disponible en <http://www.geocities.com/TheTropics/2174/micro.htm>. Revisado en septiembre de 2003.
- Molin J., P.; 1998. Agricultura de precisión. Parte I. El estado del arte del sensoramiento Eng. Agri. Jaboticabal 17 (2) 97-107.
- Norma Mexicana. Secretaría de Economía, NMX-0-168-SCFI-2001. Tractores, implementos, sembradoras unitarias, fertilizadoras accionadas mecánicamente, con dosificador de semilla de disco y métodos de prueba en la maquinaria agrícola.
- Ortiz-Cañavate J.;Hernenz J., I.;1989. Técnica de la mecanización agraria. Edición Mundi-prensa, Madrid.
- Ramírez T., A.; 2000. Desarrollo de un sistema semiautomático para el control de la frecuencia de dosificación de semilla. Tesis de licenciatura.Universidad Veracruzana, Veracruz,Ver. México.
- Ryu y kim, 1998. Disponible en <http://www.ucm.es/BUC/tesis/bio/ucm-t26855.pdf>.
- Segundo R., G.; 2004. Diseño de un sistema inteligente dosificador de semilla, basado en el uso de microcontroladores(Fase I: Evaluación de dosificadores neumáticos). Tesis de licenciatura. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Buenavista, Saltillo. Coahuila; México.
- Stein B., M.; 2002. Diseño y evaluación de dosificación neumática de semilla. Tesis de licenciatura. Instituto tecnológico de Veracruz. Veracruz, Ver. México.
- Weatherly E., T. and Bowers Jr. G., C.; 1997. Automatic depth control of a seed planter based on drying front sensing. Transaction of ASAE 40(2):295-305. Receive ASAE Paper Award 1998.

# APENDICES

## MEMORIA DE CÁLCULO

## FUERZAS DE LA SEMILLA

Analizando a la ecuación 3.5 las semillas sólo experimentan fuerzas debido a la rotación del plato (fuerza normal o centrífuga) y a la aceleración de la gravedad; es decir para los siguientes cálculos sólo se considerarán el tercer y quinto término de los que se encuentran entre paréntesis del segundo miembro de la ecuación 3.5, siendo estos términos  $-p\omega^2 e^{i\theta}$  (el signo menos indica que la aceleración normal se dirige hacia el centro del plato) y  $g$ , que al ser multiplicados por la masa de la semilla obtenemos la fuerza total ejercida por la semilla.

La ecuación 3.5 queda de la siguiente manera:

$$F_{\text{semilla}} = (p\omega^2 + g) m$$

En donde:  $F_{\text{semilla}}$  = fuerza total de la semilla en *Newtons*  
 $\omega$  = velocidad del plato en *rad/seg*  
 $p = r$  = radio del plato (al centro de la celda) en *m*  
 $g$  = aceleración de la gravedad, *9.81 m/seg<sup>2</sup>*  
 $m$  = masa de la semilla en *kg*

La fuerza que se requiere para vencer a esta fuerza que experimenta la semilla, es la fuerza de vacío (generada por la turbomáquina de vacío); es decir, para que la semilla sea adherida a la celda del plato desde que es succionada al inicio hasta el final de la recámara de vacío, la fuerza de vacío debe ser mayor que la fuerza de la semilla, pudiendo entrar en juego además algunas otras fuerzas parásitas (provocada por la inestabilidad del terreno a sembrar).

Esta fuerza de vacío puede ser fácilmente calculada mediante la ecuación siguiente:

$$F_{\text{vacío}} = P_{\text{vacío}} A_{\text{celda}}$$

Los cálculos a determinar serán a las presiones en que se trabajaron en las máquinas John Deere, Bronco y en el prototipo propuesto, es decir, a las presiones de 7.5, 10, 12.5 y 15 pulgadas de agua transformadas estas a  $N/m^2$ ; considerando que una atmósfera estándar es equivalente a *408 pulgadas de agua* y a  $101.325 N/m^2$  a manera de facilitar los cálculos. Es decir, 1 pulgada de agua =  $0.248 N/m^2 = 2.50 \text{ milibares}$ .

## CALCULO DE LOS PORCENTAJES DE LLENADO DE CELDAS

El cálculo consiste en determinar la relación que existe entre el número de total de semillas descargadas por el plato dosificador, entre el número total de celdas que pasan por el punto de descarga (fin de la recámara de vacío) y multiplicando por 100 a esta relación, obtenemos el *Porcentaje de Llenado de Celdas*.

El número total de semillas descargadas por el plato dosificador se obtiene directamente de la lectura en el display del contador de semillas (Ergómetro) que se encuentra conectado al sensor de semillas.

Para conocer el número total de celdas que pasan por el punto descarga, solo basta con multiplicar el número de celdas que posee el plato por las rpm a las que se encuentre girando y además se debe multiplicar por el tiempo que dure la prueba, que durante todas las pruebas fue de un minuto.

Los cálculos se basan en variaciones de la velocidad del plato y rangos de vacío en el prototipo.

$\omega$	$\omega^2 r$	$\omega^2 r + g$	$F = (\omega^2 r + g)m$		sem/min	transm
rad/seg	m/seg <sup>2</sup>	m/seg <sup>2</sup>	Nw	mN	c/min	rel/eng
2.6167	0.73947	10.5495	0.0035	3.54357	250	(12/36)
3.7942	1.5547357	11.3647	0.0038	3.81741	360	(12/36)
4.5792	2.2646269	12.0746	0.0041	4.05587	470	(12/36)
4.9717	2.6694867	12.4795	0.0042	4.19186	580	(12/36)
5.2333	2.95788	12.7679	0.0043	4.28873	690	(12/36)
6.0183	3.9117963	13.7218	0.0046	4.60915	800	(22/36)
6.0183	3.9117963	13.7218	0.0046	4.60915	925	(22/36)
6.6725	4.8084037	14.6184	0.0049	4.91032	1050	(22/36)
6.8033	4.9988172	14.8088	0.005	4.97428	1175	(22/36)
7.4575	6.0063451	15.8163	0.0053	5.31271	1300	(22/36)

**Cuadro 1. Fuerzas debido a la rotación del plato y a la gravedad afectadas por la masa de la semilla.**

24.5767 mN = Fuerza necesaria para mantener adherida todas las semillas a la máxima velocidad  
 19.2639 mN = 78 % fuerzas parásitas o pérdidas de succión

5.31271 mN = 21.61% fuerzas debido a la rotación del plato y a la gravedad de la masa de la semilla

r = 0.108 m distancia del radio del plato al centro de la celda MASA  
 CONSTANTE DE SEMILLA .3359 g

Presión	Unidades equivalentes	Unidades equivalentes	Unidades equivalentes	F1= Fv- F( $\omega$ 2r+g)	F2= %FP= (F1/Fv)100	F1= Fv- F( $\omega$ 2r+g)	F2= %FP= (F1/Fv)100
Pulg. de agua	Milibares	N/m2	mN	F1mN	F2	F1mN	F2
1	2.5	248.35	3.0720277	6.612	215.23	6.882	215.23
2	5.0	496.69	6.1440553	9.684	157.62	9.954	157.62
3	7.5	745.04	9.216083	12.756	138.41	13.026	138.41
4	10	993.38	12.288111	15.828	128.81	16.098	128.81
5	12.5	1241.7	15.360138	18.900	123.05	19.170	123.05
6	15	1490.1	18.432166	21.972	119.21	22.242	119.21
7	17.5	1738.4	21.504194	25.044	116.46	25.314	116.46
8	20	1986.8	24.576221	28.116	114.4	28.386	114.4
9	22.5	2235.1	27.648249	31.188	112.8	31.458	112.8
10	25	2483.5	30.720277	34.260	111.52	34.530	111.52
11	27.5	2731.8	33.792304	37.332	110.48	37.602	110.48
12	30	2980.1	36.864332	40.404	109.6	40.674	109.6
13	32.5	3228.5	39.936359	43.476	108.86	43.746	108.86
14	35	3476.8	43.008387	46.548	108.23	46.818	108.23
15	37.5	3725.2	46.080415	49.620	107.68	49.890	107.68

**Cuadro 2. Fuerzas de vacío comparadas con la fuerza debida a la rotación del plato afectada por la masa de la semilla.**

Presión	Unidades equivalentes	Unidades equivalentes	Unidades equivalentes	F1= Fv- F( $\omega$ 2r+g)	F2= %FP= (F1/Fv)100	F1= Fv- F( $\omega$ 2r+g)	F2= %FP= (F1/Fv)100
---------	-----------------------	-----------------------	-----------------------	------------------------------	------------------------	------------------------------	------------------------

Pulg. de agua	Milibares	N/m <sup>2</sup>	mN	F1mN	F2	F1mN	F2
1	2.5	248.35	3.0720277	7.262	236.392	7.352	239.322
2	5.0	496.69	6.1440553	10.334	168.196	10.424	169.661
3	7.5	745.04	9.216083	13.406	145.464	13.496	146.441
4	10	993.38	12.288111	16.478	134.098	16.568	134.830
5	12.5	1241.7	15.360138	19.55	127.278	19.640	127.864
6	15	1490.1	18.432166	22.622	122.732	22.712	123.220
7	17.5	1738.4	21.504194	25.694	119.485	25.784	119.903
8	20	1986.8	24.576221	28.766	117.049	28.856	117.415
9	22.5	2235.1	27.648249	31.838	115.155	31.928	115.480
10	25	2483.5	30.720277	34.91	113.639	35.000	113.932
11	27.5	2731.8	33.792304	37.982	112.399	38.072	112.666
12	30	2980.1	36.864332	41.054	111.366	41.144	111.610
13	32.5	3228.5	39.936359	44.126	110.492	44.216	110.717
14	35	3476.8	43.008387	47.198	109.742	47.288	109.952
15	37.5	3725.2	46.080415	50.27	109.093	50.360	109.288

**Cuadro 3. Fuerzas de vacío comparadas con la fuerza debida a la rotación del plato afectada por la masa de la semilla.**

Presión	Unidades equivalentes	Unidades equivalentes	Unidades equivalentes	F1= Fv- F( $\omega$ 2r+g)	F2= %FP= (F1/Fv)100	F1= Fv- F( $\omega$ 2r+g)	F2= %FP= (F1/Fv)100
Pulg. de agua	Milibares	N/m <sup>2</sup>	mN	F1mN	F2	F1mN	F2
1	2.5	248.35	3.0720277	7.982	259.829	8.042	261.782
2	5.0	496.69	6.1440553	11.054	179.915	11.114	180.891
3	7.5	745.04	9.216083	14.126	153.276	14.186	153.927
4	10	993.38	12.288111	17.198	139.957	17.258	140.446
5	12.5	1241.7	15.360138	20.270	131.966	20.330	132.356
6	15	1490.1	18.432166	23.342	126.638	23.402	126.964
7	17.5	1738.4	21.504194	26.414	122.833	26.474	123.112
8	20	1986.8	24.576221	29.486	119.979	29.546	120.223
9	22.5	2235.1	27.648249	32.558	117.759	32.618	117.976

10	25	2483.5	30.720277	35.630	115.983	35.690	116.178
11	27.5	2731.8	33.792304	38.702	114.530	38.762	114.707
12	30	2980.1	36.864332	41.774	113.319	41.834	113.482
13	32.5	3228.5	39.936359	44.846	112.295	44.906	112.445
14	35	3476.8	43.008387	47.918	111.416	47.978	111.556
15	37.5	3725.2	46.080415	50.990	110.655	51.050	110.785

**Cuadro 4. Fuerzas de vacío comparadas con la fuerza debida a la rotación del plato afectada por la masa de la semilla.**

Presión de vacío	Presión de vacío	Presión de vacío	Área	Fuerzas de succión	Fuerzas de succión
Pulgadas de agua	Milibares	Nm2	m2	Nw	mN
1	2.5	248.35	1.2E-05	0.0031	3.07209
2	5	496.7	1.2E-05	0.0061	6.14418
3	7.5	745.05	1.2E-05	0.0092	9.21627
4	10	993.4	1.2E-05	0.0123	12.2884
5	12.5	1241.75	1.2E-05	0.0154	15.3604
6	15	1490.1	1.2E-05	0.0184	18.4325
7	17.5	1738.45	1.2E-05	0.0215	21.5046
8 *	20	1986.8 *	1.2E-05	0.0246	24.5767 *
9	22.5	2235.15	1.2E-05	0.0276	27.6488
10	25	2483.5	1.2E-05	0.0307	30.7209
11	27.5	2731.85	1.2E-05	0.0338	33.793
12	30	2980.2	1.2E-05	0.0369	36.8651
13	32.5	3228.55	1.2E-05	0.0399	39.9372
14	35	3476.9	1.2E-05	0.043	43.0093
15	37.5	3725.25	1.2E-05	0.0461	46.0813

**Cuadro 5. Cálculo de las fuerzas de succión con diferentes presiones y área constante.**

**Nivel de succión requerido para pruebas de succión a condiciones máximas de prueba sin impacto.**

Velocidad Celda/min	Vel. Var.	rpm	Comb. engrane	NS 20 mbar	NS 18.75 mbar	NS 15 mbar	NS 12.5 mbar	NS 10 mbar	NS 7.5 mbar	NS 5 mbar	NS 2.5 mbar
250	20	25	(12/36)	100%	100%	96.66%	93.33%	86.66%	80%	0.00%	0.00%
250	20	25	(12/36)	100%	100%	96.66%	96.66%	96.66%	13.33%	0.00%	0.00%
250	20	25	(12/36)	100%	100%	100%	100%	93.33%	80%	0.00%	0.00%
360	29	36.25	(12/36)	100%	100%	100%	100%	93.33%	80%	0.00%	0.00%
360	29	36.25	(12/36)	100%	100%	100%	90%	93.33%	3.33%	0.00%	0.00%
360	29	36.25	(12/36)	100%	100%	100%	100%	93.33%	16.66%	13.33%	0.00%
470	38	43.75	(12/36)	100%	100%	100%	96.66%	63.33%	13.33%	0.00%	0.00%
470	38	43.75	(12/36)	100%	100%	100%	96.66%	86.66%	76.66%	6.66%	0.00%
470	38	43.75	(12/36)	100%	100%	96.66%	90%	83.33%	83.33%	43.33%	0.00%
580	46	47.5	(12/36)	100%	100%	93.33%	90%	66.66%	43.33%	0.00%	0.00%
580	46	47.5	(12/36)	100%	100%	100%	96.66%	86.66%	86.66%	6.66%	0.00%
580	46	47.5	(12/36)	100%	100%	96.66%	90%	76.66%	63.33%	10.00%	0.00%
690	52	65	(12/36)	100%	100%	100%	93.33%	70.00%	63.33%	26.66%	0.00%
690	52	65	(12/36)	100%	100%	96.66%	96.66%	96.66%	93.33%	30.00%	0.00%
690	52	65	(12/36)	100%	100%	100%	100%	70.00%	23.33%	16.66%	0.00%
800	35	43.75	(22/36)	100%	100%	96.66%	83.33%	83.33%	3.33%	0.00%	0.00%
800	35	43.75	(22/36)	100%	100%	96.66%	93.33%	66.66%	0.00%	0.00%	0.00%
800	35	43.75	(22/36)	100%	100%	100%	100%	93.33%	90.00%	83.33%	0.00%
925	40	50	(22/36)	100%	100%	93.33%	93.33%	93.33%	0.00%	0.00%	0.00%
925	40	50	(22/36)	100%	100%	96.66%	96.66%	96.66%	83.33%	10.00%	0.00%
925	40	50	(22/36)	100%	100%	100%	100%	100%	0.00%	0.00%	0.00%
1050	46	57.5	(22/36)	100%	100%	93.33%	90.00%	70.00%	53.33%	16.66%	0.00%
1050	46	57.5	(22/36)	100%	100%	96.66%	93.33%	70.00%	70.00%	70.00%	0.00%
1050	46	57.5	(22/36)	100%	100%	96.66%	90.00%	6.66%	6.66%	6.66%	0.00%
1175	51	63.75	(22/36)	100%	96.66%	93.33%	76.66%	60.00%	50.00%	10.00%	0.00%
1175	51	63.75	(22/36)	100%	96.66%	93.33%	86.66%	76.66%	40.00%	3.33%	0.00%
1175	51	63.75	(22/36)	100%	100%	90.00%	80.00%	53.33%	63.66%	13.33%	0.00%
1300	57	71.25	(22/36)	100%	93.33%	86.66%	83.33%	60.00%	46.66%	13.33%	0.00%
1300	57	71.25	(22/36)	100%	96.66%	93.33%	93.33%	90.00%	76.66%	13.33%	0.00%
1300	57	71.25	(22/36)	100%	96.66%	90.00%	83.33%	60.00%	50.00%	10.00%	0.00%

**Cuadro 6. Porcentaje de llenado de celdas sin impacto a diferentes velocidades y niveles de succión.**

RELACION DEL SISTEMA DE TRANSMISION DEL BANCO DE PRUEBAS SIN IMPACTO					
VARIADOR DE FREC	MOTOR RPM	REDUCTOR DE VELOC	FLECHA SECUND	TRANMISION RPM FINAL	REL ENGR
20	583.33	20: 1	29.17	25.00	12/36 D
29	845.83	20: 1	42.29	36.25	12/36 D
38	1108.33	20: 1	55.42	47.50	12/36 D
46	1341.66	20: 1	67.08	57.50	12/36 D
52	1516.66	20: 1	75.83	65.00	12/36 D
35	1020.83	20: 1	51.04	43.75	22/36 D
40	1166.66	20: 1	58.33	50.00	22/36 D
46	1341.66	20: 1	67.08	57.50	22/36 D
51	1487.5	20: 1	74.38	63.75	22/36 D
57	1662.5	20: 1	83.13	71.25	22/36 D

**Cuadro 7. Sistema motriz utilizado en banco de pruebas sin condiciones de impacto.**

VEL(KM/H)	VEL(M/MIN)	SEMILAS * METRO	CELDAS/MIN
4	66.67	4	266.7
4	66.67	5	333.3
4	66.67	6	400.0
4	66.67	7	466.7
4	66.67	8	533.3
5	83.33	4	333.3
5	83.33	5	416.7
5	83.33	6	500.0
5	83.33	7	583.3
5	83.33	8	666.7
6	100.00	4	400.0
6	100.00	5	500.0
6	100.00	6	600.0
6	100.00	7	700.0
6	100.00	8	800.0
7	116.67	4	466.7
7	116.67	5	583.3
7	116.67	6	700.0
7	116.67	7	816.7
7	116.67	8	933.3
8	133.33	4	533.3
8	133.33	5	666.7
8	133.33	6	800.0
8	133.33	7	933.3
8	133.33	8	1066.7

**Cuadro 8. Celdas por minuto generadas a las mínimas y máximas velocidades  
y densidades de siembra utilizadas en México.**

Fuente motriz de la dosificación de semilla		Reductor de la velocidad		Fuente motriz de la leva		Reductor de la leva	
1710 Rpm		22.22 : 1		1750 Rpm		25 : 1	
Velocidad c/min	Variador Hz	Frecuencia impacto de 15 Hz	Frecuencia impacto de 30 Hz	Engranajes Flecha p.	Rpm	Niveles de succión inch of water	Niveles de succión milibares
250	6.24	15	30	(12/24)	8.33	9	22.5
360	9	15	30		12	11	27.5
470	11.75	15	30		15.66	13	32.5
580	14.5	15	30		19.33	15	37.5
690	17.25	15	30		23		
800	20	15	30		26.66		
925	23.12	15	30		30.83		
1050	26.25	15	30		35		
1175	29.37	15	30		39.16		
1300	32.5	15	30		43.33		

Cuadro 9. Sistema motriz utilizado en banco de pruebas bajo condiciones de impacto.

Velocidad de Siembra	Porcentaje de llenado de celdas a una frecuencia de impacto de 8 golpes por minuto			
	Succión 22.5 mbares	27.5 mbares	32.5 mbares	37.5 mbares
250	91.89	99.19	89.58	103.3
360	96.38	94.36	85.55	101.02
470	87.1	111.6	82.9	92.95
580	82.46	100.9	81.29	89.21

<b>690</b>	69.95	95.08	78.08	82.36
<b>800</b>	66.5	84.52	75.65	79.91
<b>925</b>	58.58	63.17	72.58	79.5
<b>1050</b>	47.81	52.14	70.38	78.03
<b>1175</b>	38.18	51.51	63.77	77.93
<b>1300</b>	33.41	38.88	53.87	76.72

**Cuadro 10. Valores expresados en % de llenado de celda del dosificador neumático de semilla con todas las variables a una frecuencia de impacto de 8 golpes por minuto.**

<b>Velocidad de Siembra</b>	<b>Porcentaje de llenado de celdas a una frecuencia de impacto de 8 golpes por minuto</b>			
	<b>Succión 22.5 mbares</b>	<b>27.5 mbares</b>	<b>32.5 mbares</b>	<b>37.5 mbares</b>
<b>250</b>	83.61	90.51	76.86	98.85
<b>360</b>	87.30	88.07	84.69	105.46
<b>470</b>	77.03	85.97	82.79	105.29
<b>580</b>	74.18	84.68	88.71	97.74
<b>690</b>	70.29	83.39	84.27	93.46
<b>800</b>	62.13	77.64	83.05	87.24
<b>925</b>	53.50	71.46	81.38	81.61

<b>1050</b>	43.32	68.4	75.8	77.8
<b>1175</b>	35.19	60.76	62.19	75.01
<b>1300</b>	23.94	52.66	53.4	67.34

**Cuadro 11. Valores expresados en % de llenado de celda del dosificador neumático de semilla con todas las variables a una frecuencia de impacto de 16 golpes por minuto.**



# GRAFICAS DE RESULTADOS

**Gráfica 1. Fuerzas debido a la rotación del plato y a la gravedad afectada por la masa de la semilla.**

**Gráfica 2. Funcionamiento con curvas de respuesta de dosificador neumático de semilla a diferentes velocidades de siembra, niveles de succión y sin condiciones de impacto.**

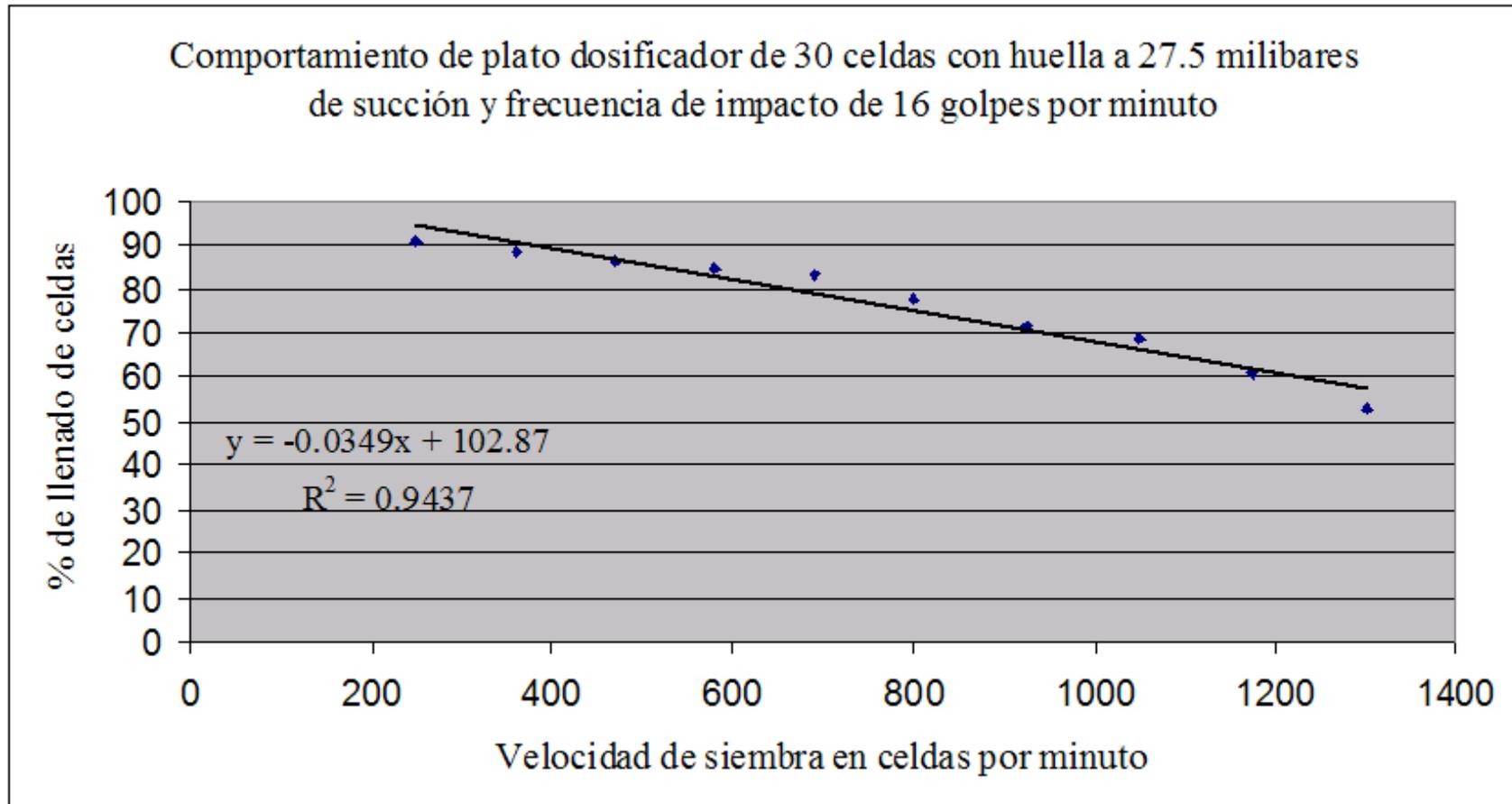


**Gráfica 4. Comportamiento de plato dosificador en valores de porcentaje de llenado de celda.**

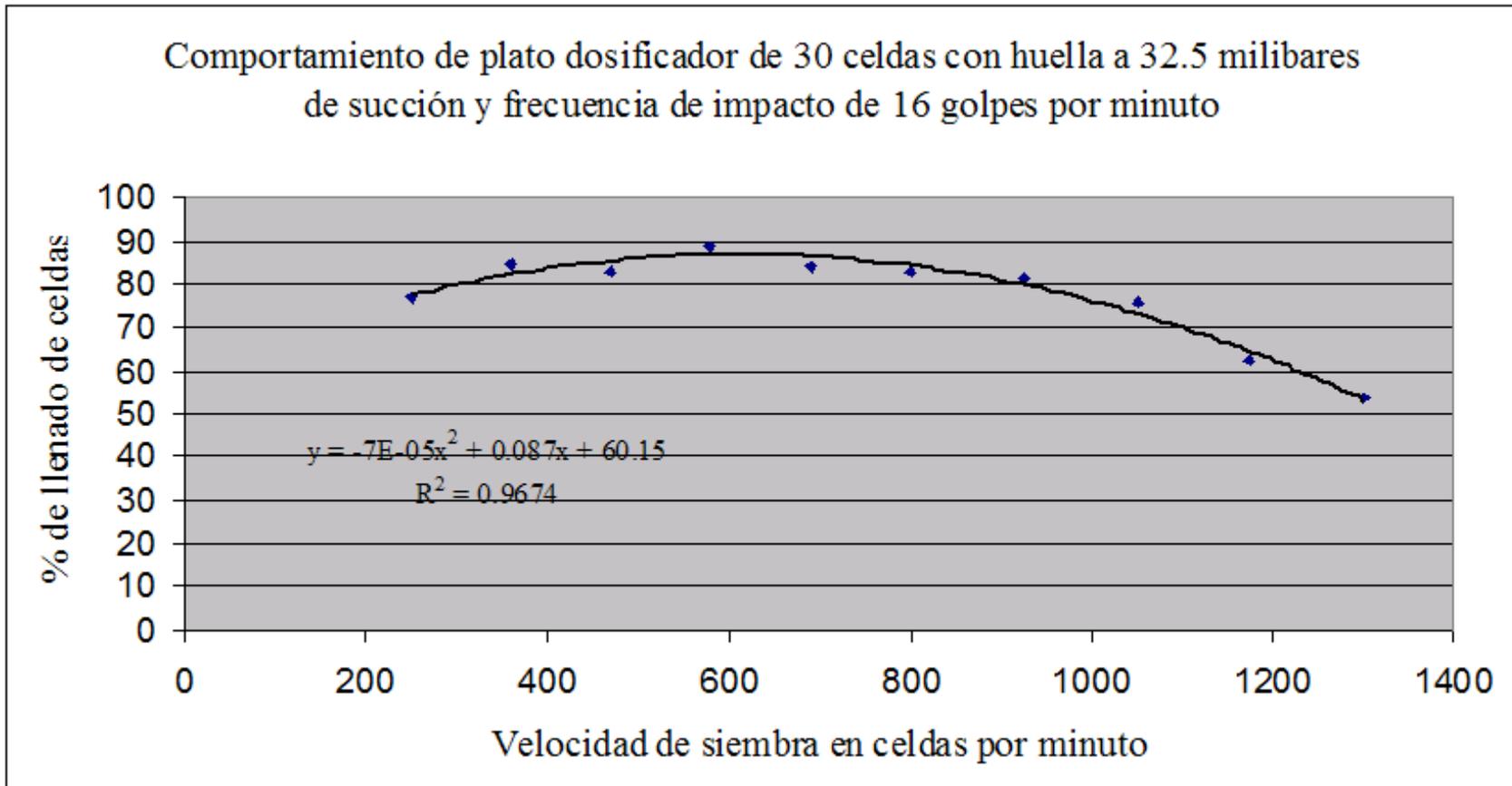
**Gráfica 5. Comportamiento de plato dosificador en valores de porcentaje de llenado de celda.**

**Gráfica 6. Comportamiento de plato dosificador en valores de porcentaje de llenado de celda.**

**Gráfica 7. Comportamiento de plato dosificador en valores de porcentaje de llenado de celda.**



Gráfica 8. Comportamiento de plato dosificador en valores de porcentaje de llenado de celda.



Gráfica 9. Comportamiento de plato dosificador en valores de porcentaje de llenado de celda.

**Gráfica 10. Comportamiento de plato dosificador en valores de porcentaje de llenado de celda.**

**Gráfica 11. Comportamiento de los factores en función de porcentaje de llenado de celdas sometidas a 15 Hz de frecuencia de impacto (8 impactos por minuto).**

**Gráfica 12. Comportamiento de los factores en función de porcentaje de llenado de celdas sometidas a 30 Hz de frecuencia de impacto (16 impactos por minuto).**

