



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

**POSTGRADO EN INGENIERÍA AGRÍCOLA Y USO
INTEGRAL DEL AGUA**

**DESARROLLO DE UN SISTEMA MECATRONICO PARA EL
CONTROL DE LOS DOSIFICADORES DE SEMILLA,
FERTILIZANTE Y PESTICIDA DE UNA SEMBRADORA –
FERTILIZADORA**

TESIS



**DIRECCION GENERAL ACADEMICA
DIRECCION DE SERVICIOS ESCOLARES
DIRECCION DE EXAMENES PROFESIONALES**

**QUE COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE
DOCTOR EN INGENIERÍA AGRÍCOLA Y USO INTEGRAL DEL AGUA**

PRESENTA:

M. C. JULIO TORRES SANDOVAL



Chapingo, Texcoco, México, febrero del 2017

DESARROLLO DE UN SISTEMA MECATRONICO PARA EL CONTROL DE LOS
DOSIFICADORES DE SEMILLA, FERTILIZANTE Y PESTICIDA DE UNA SEMBRADORA
– FERTILIZADORA

Tesis realizada por Julio Torres Sandoval bajo la dirección del comité asesor indicado,
aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

Doctor en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua

DIRECTOR:



DR. EUGENIO ROMANCHIK KRIUCHKOVA

ASESOR:



DR. IRINEO L. LÓPEZ CRUZ

ASESOR



DR. GILBERTO DE JESÚS LÓPEZ CANSTENS

LECTOR EXTERNO:



DR. ALVARO MORELOS MORENO

DATOS BIOGRÁFICOS

M.C. Julio Torres Sandoval nació en Tlacotepec, municipio de Zacualpan de Amilpas Estado de Morelos, México. Realizó sus estudios de Licenciatura en el Departamento de Ingeniería Mecánica Agrícola de la Universidad Autónoma Chapingo (UACH). Obtuvo el grado de Maestro en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica en el Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CENIDET) con la investigación titulada “Diseño y Construcción de un Prototipo Automático para Preparar Composta”. Trabajó como investigador adscrito al Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) en el Centro Nacional de Estandarización de Maquinaria Agrícola (CENEMA), del 2001 a 2011, donde participó en el desarrollo de las normas mexicanas de prueba y evaluación de sembradoras-fertilizadoras con dosificador de tipo mecánico y neumático de semilla, aspersores tipo aguilón y de mochila, trilladoras de frijol y desgranadoras de maíz. Además, participó como responsable de calidad del laboratorio de pruebas del CENEMA y como auditor externo del Organismo de Certificación de Implementos y Maquinaria Agrícola (OCIMA).

DEDICATORIA

A mis padres Joel Torres Barreto y Piedad Sandoval Canales por darme la vida y ser un ejemplo de carácter y perseverancia.

A mis hermanos Clemente, Miriam y Liliana quienes han sido una fuente de motivación para seguir adelante.

A la familia Torres y Sandoval por todas las bonitas vivencias que con ellos he tenido.

A mis compañeros de doctorado Rosalinda, José Carlos, Mauricio y José Luis por tener una linda amistad, y a mis colegas de postgrado con quienes compartí momentos inolvidables.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Autónoma Chapingo (UACH), a la Dirección General de Investigación y al Posgrado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua (IAUIA), así como al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo económico y la formación que me permitieron obtener.

Al Dr. Eugenio Romanchik Kriuchkova por las enseñanzas y por brindarme su apoyo, consejos y la paciencia durante el desarrollo de esta investigación.

Al Dr. Irineo L. López Cruz por las enseñanzas brindadas durante el proceso de formación en el doctorado, así como sus observaciones y aportaciones en el desarrollo de esta investigación.

A los Dr. Gilberto De Jesús López Cansteñs y al Dr. Álvaro Morelos Moreno por las observaciones y aportaciones para la mejora de este trabajo.

Al Dr. Ramón Jiménez Regalado por permitirme trabajar en esta investigación en el Laboratorio de Pruebas del Centro Nacional de Estandarización de Maquinaria Agrícola (CENEMA) perteneciente al Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias.

A los trabajadores del taller del CENEMA en especial a Jaime López Martínez por el apoyo brindado durante la construcción.

A Mayra Luna por su paciencia y el apoyo brindado en la realización de los trámites en mi estancia en el postgrado.

DESARROLLO DE UN SISTEMA MECATRONICO PARA EL CONTROL DE LOS DOSIFICADORES DE SEMILLA, FERTILIZANTE Y PESTICIDA DE UNA SEMBRADORA – FERTILIZADORA
DEVELOPMENT OF A MECHATRONIC SYSTEM FOR THE CONTROL OF SEED, PESTICIDE AND FERTILIZER METERING MECHANISMS OF A SEEDER-FERTILIZER

Julio Torres Sandoval¹ y Eugenio Romanchik Kriuchkova²

RESUMEN

En las máquinas sembradoras-fertilizadoras, los elementos de mayor importancia que afecta la calidad de aplicación de los insumos son los dosificadores, los cuales para su accionamiento utilizan una rueda motriz y un sistema de transmisión por cadena o engranes, para las máquinas más utilizadas en el campo mexicano. Este tipo de accionamiento se ve afectado por las condiciones del suelo, cubierta vegetal y velocidad de avance de la máquina debido al deslizamiento de la rueda motriz o bloqueo del sistema de transmisión por residuos vegetales, afectando así el funcionamiento de los dosificadores. En algunos países este tipo de accionamiento ha sido reemplazado por sistemas electromecánicos (utilizan motores eléctricos para accionar los dosificadores) e hidráulicos (utilizan motores hidráulicos para accionar los dosificadores) que permiten eliminar esta desventaja. En el presente trabajo se desarrolló un sistema mecatrónico (SM) para el control de los dosificadores de semilla, fertilizante y pesticida de la máquina sembradora-fertilizadora Modelo LC-U-N del fabricante Sembradoras del Bajío S.A. de C.V.; además del desarrollo de la instrumentación y el equipo necesario para la realización de las pruebas de laboratorio de la máquina. El SM está basado en la plataforma de desarrollo Arduino como unidad de procesamiento y control, además de motores de corriente directa para accionar los dosificadores.

El SM permite el cambio continuo y en tiempo real de la dosis de aplicación de cada uno de los insumos (semilla, fertilizante y agroquímico), así como el control de la presión de vacío en la cámara de succión del sistema neumático. Los cambios de la dosis de aplicación se logran con el control de la frecuencia de rotación de los dosificadores, utilizando la técnica de modulación por ancho de pulso (PWM) y el diseño de controladores tipo Proporcional-Integral (PI) y Proporcional-Integral-Derivativo (PID).

Los controladores permiten alcanzar la dosis de aplicación deseada para cada uno de los insumos en un tiempo máximo de 2 s, alcanzando el estado estable en un tiempo máximo de 2.5 s, con errores de la variable de control (frecuencia de rotación) dentro del intervalo del $\pm 5\%$, a excepción del dosificador de pesticida que presenta errores dentro del $\pm 10\%$. Se logra obtener un desempeño aceptable para los controladores de cada uno de los dosificadores y del controlador de la presión de vacío del sistema neumático de semilla.

PALABRAS CLAVE: Microcontrolador, PWM, Control PI y PID, comunicación I2C, Dosificador.

¹ Tesista

² Director

ABSTRACT

In seeder-fertilizer machines, the most important elements that affect the quality of application of seeds or fertilizers are the metering mechanisms, which for their drive use a drive wheel and a transmission system by chain or gears, for the machines most used in The Mexican countryside. This type of drive is affected by the soil conditions, vegetation cover and speed of the machine due to sliding of the drive wheel or blowing of the transmission system by plant residues, thus affecting the operation of the metering mechanisms. In some countries, this type of drive has been replaced by electromechanical systems (using electric motors to power the feeders) and hydraulic (using hydraulic motors to drive the feeders) to eliminate this disadvantage.

In the present work, a mechatronic system (MS) was developed for the control of seed, fertilizer and pesticide metering mechanisms of the seeder-fertilizer machine Model LC-U-N from the manufacturer Sembradoras del Bajío S.A. de C.V.; in addition, the necessary instruments and equipment for conducting laboratory tests on the machine were developed.

The MS is based on the Arduino development platform as a processing and control unit, and on direct current motors to drive the meter. The MS allows continuous and real-time change of the application rate of each of the inputs (seed, fertilizer and agrochemical), as well as the control of the vacuum pressure in the suction chamber of the pneumatic system.

The changes in the application dose are achieved by controlling the frequency of rotation of the dispensers using the Pulse Width Modulation (PWM) technique and the Proportional-Integral (PI) and Proportional-Integral-Derivative (PID). The controllers allow reaching the desired application dose for each of the inputs in a maximum time of 2 seconds, reaching the steady state in a maximum time of 2.5 seconds, with errors of the control variable (frequency of rotation) within the interval of $\pm 5\%$, except for the pesticide meter which presents errors within $\pm 10\%$.

Acceptable performance is obtained for the controllers of each of the metering mechanisms and of the vacuum pressure controller of the pneumatic seed system.

KEYWORDS: Microcontroller, PWM, PI and PID control, I2C communication, metering mechanism.

¹ Thesis author

² Thesis advisor

CONTENIDO

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

1.1	INTRODUCCIÓN	1
1.2	ANTECEDENTES	3
1.2.1	SISTEMAS DE APLICACIÓN VARIABLE DE INSUMOS	5
1.2.2	SEBRADORAS-FERTILIZADORAS	6
1.2.3	SENSORES CONTADORES DE SEMILLA	10
1.2.4	SISTEMA DE COPIADO Y ESTABILIZACIÓN EN LOS CUERPOS DE SIEMBRA.	12
1.2.5	BANDERILLERO SATELITAL	12
1.3	MODELOS	13
1.3.1	MODELO DEL MOTOR DE CORRIENTE CONTINUA (CC)	13
1.3.2	FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA DEL MOTOR DE CC	15
1.3.3	VARIABLES DE ESTADOS DEL MODELO DEL MOTOR DE CD	16
1.3.4	MODELO DÍNAMICO DE LA TRAYECTORIA DE LA SEMILLA	17
1.3.5	MODELO PARA ESTIMAR LA PRESIÓN DE VACÍO ÓPTIMA EN LA SEMBRADORA	20
1.3.6	MODELO PARA OBTENER EL FLUJO MASÍCO DEL RODILLO RANURADO	21
	21	
1.4	OBJETIVOS	22
1.4.1	OBJETIVO GENERAL	22
1.4.2	OBJETIVOS PARTICULARES	22

1.5	HIPÓTESIS	22
1.6	COMPONENTES ELECTRÓNICOS Y DE CONTROL UTILIZADOS	23
1.6.1	SENSORES	23
1.6.2	ACTUADORES	33
1.7	REFERENCIAS	35
CAPÍTULO 2. DISEÑO ELECTRÓNICO E INSTRUMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE CONTROL DE LOS DOSIFICADORES PARA UNA SEMBRADORA-FERTILIZADORA		
2.1	RESUMEN	37
2.2	INTRODUCCIÓN	38
2.3	MATERIALES Y MÉTODOS	42
2.3.1	SEMBRADORA-FERTILIZADORA	42
2.3.2	DISEÑO DE LOS CIRCUITOS ELECTRÓNICO DE SM	44
2.3.3	MÉTODO DE PRUEBA	44
2.4	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	45
2.4.1	DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE LOS ELEMENTOS MECÁNICOS DEL SM DE LA MÁQUINA	45
2.4.2	SISTEMA MECATRÓNICO (SM)	46
2.4.3	DISEÑO ELECTRÓNICO	52
2.4.4	RESULTADOS DE LAS PRUEBAS EN LABORATORIO	67
2.5	CONCLUSIONES	71
2.6	REFERENCIAS	73

CAPÍTULO 3. SISTEMA MECATRÓNICO PARA CONTROLAR EL DOSIFICADOR DE SEMILLA Y PRESIÓN DE VACÍO DE UNA SEMBRADORA-FERTILIZADORA

3.1	RESUMEN	75
3.2	INTRODUCCIÓN	76
3.3	MATERIALES Y MÉTODOS	78
3.3.1	SEMBRADORA-FERTILIZADORA SELECCIONADA	78
3.3.2	SUBSISTEMA MECÁNICO	79
3.3.3	SUBSISTEMA ELECTRÓNICO	80
3.3.4	SUBSISTEMA DE CONTROL	81
3.3.5	MÉTODO DE SINTONIZACIÓN DEL DOSIFICADOR DE SEMILLA	83
3.3.6	MÉTODO DE SINTONIZACIÓN DEL CONTROLADOR DE LA PVCS	86
3.3.7	PROGRAMACIÓN DEL ALGORITMO DE CONTROL DEL SM	87
3.3.8	MÓDULO MAESTRO	87
3.3.9	ECUACIONES DE CÁLCULO	91
3.3.10	EVALUACIÓN DEL SISTEMA MECATRÓNICO MEDIANTE PRUEBAS DE LABORATORIO	93
3.4	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	94
3.5	CONCLUSIONES	102
3.6	REFERENCIAS	103

CAPÍTULO 4. SISTEMA MECATRÓNICO PARA EL CONTROL DE LOS DOSIFICADORES DE FERTILIZANTE Y PESTICIDA GRANULADOS DE UNA SEMBRADORA-FERTILIZADORA

4.1 RESUMEN ----- 105

4.2 INTRODUCCIÓN----- 106

4.3 MATERIALES Y MÉTODOS----- 108

4.3.1 DESCRIPCIÓN DE LA SEMBRADORA-FERTILIZADORA. ----- 108

4.3.2 SUBSISTEMA MECÁNICO. ----- 109

4.3.3 SUBSISTEMA ELECTRÓNICO ----- 109

4.3.4 SUBSISTEMA DE CONTROL ----- 110

4.3.5 PROGRAMACIÓN Y FUNCIONAMIENTO DEL SM ----- 113

4.3.6 EVALUACIÓN DEL SISTEMA MECATRÓNICO MEDIANTE PRUEBAS DE LABORATORIO ----- 118

4.4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN ----- 119

1.1 CONCLUSIONES ----- 127

4.5 REFERENCIAS----- 127

CAPÍTULO 5. PRUEBAS DE UNA SEMBRADORA-FERTILIZADORA CON UN SISTEMA MECATRÓNICO ADAPTADO PARA EL CONTROL DE LOS DOSIFICADORES

5.1 RESUMEN ----- 130

5.2 INTRODUCCIÓN----- 131

5.3 MATERIALES Y MÉTODOS----- 133

5.3.1 DESCRIPCIÓN DE LA SEMBRADORA-FERTILIZADORA ORIGINAL -----	133
5.3.2 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA MECATRÓNICO -----	135
5.3.3 CONDICIONES DE OPERACIÓN DE LA SEMBRADORA-FERTILIZADORA PARA LA PRUEBA-----	138
5.3.4 MATERIAL DE PRUEBA -----	140
5.3.5 INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN UTILIZADOS-----	140
5.3.6 ÍNDICES O MEDIDAS DE DESEMPEÑO DEL SISTEMA -----	140
5.4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN -----	143
5.4.1 DOSIFICADOR DE SEMILLA -----	143
5.4.2 DOSIFICADOR DE FERTILIZANTE-----	147
5.4.3 DOSIFICADOR DE PESTICIDA-----	149
5.5 CONCLUSIONES -----	151
5.6 LITERATURA CITADA-----	152
CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	
6.1 CONCLUSIONES -----	154
6.2 RECOMENDACIONES -----	155

ÍNDICE DE TABLAS

CAPÍTULO 1.

Tabla 1. Requerimientos de energía de los motores eléctricos de las sembradoras.----	10
Tabla 2. Características del codificador incremental.-----	23
Tabla 3. Características del sensor de presión MPX 4115A. -----	24
Tabla 4. Características del sensor de corriente ACS712. -----	27
Tabla 5. Características del sensor de voltaje. -----	30
Tabla 6. Características de la celda de carga de 5kg.-----	32
Tabla 7. Características del motor EMG49. -----	34
Tabla 8. Características del motor de la aspiradora.-----	35

CAPÍTULO 2.

Tabla 9. Especificaciones de diseño para el dispositivo. -----	43
--	----

CAPÍTULO 3.

Tabla 10. Método de sintonización de Ziegler-Nichols: Formulas para respuesta en frecuencia (Katsuhiko, 2013). -----	85
Tabla 11. Ecuaciones de la función de transferencia de la planta y del controlador para el dosificador. -----	97
Tabla 12. Valores de las constantes utilizadas en el control del dosificador de semilla. 98	
Tabla 13. Valores de las constantes utilizadas en el control de la PVCS. -----	98

CAPÍTULO 4.

Tabla 14. Ecuaciones de la función de transferencia de la planta, de los controladores y valores obtenidos de las constantes del controlador para cada uno de los dosificadores.

----- 122

Tabla 15. Resultados de la prueba del dosificador de fertilizante y pesticida. ----- 124

Tabla 16. Resultados del comportamiento de la entrega del dosificador de fertilizante y pesticida por segundo. ----- 126

CAPÍTULO 5.

Tabla 17. Condiciones de la prueba del dosificador de semilla. ----- 139

Tabla 18. Condiciones de la prueba del dosificador de fertilizante y pesticida.----- 140

Tabla 19. Resultados de la prueba de uniformidad de distribución de la semilla. ----- 145

Tabla 20. Fertilizante dosificado por cada giro de la barra dosificadora (g rev^{-1}).----- 148

Tabla 21. Uniformidad de entrega o dosificación del dosificador de fertilizante. ----- 149

Tabla 22. Cantidad de pesticida dosificado por cada giro del rodillo acanalado (g rev^{-1}).

----- 150

Tabla 23. Índices de desempeño del dosificador de pesticida (g rev^{-1}). ----- 151

ÍNDICE DE FIGURAS

CAPÍTULO 1.

Figura 1. Las tres etapas de la agricultura de precisión.-----	4
Figura 2. Accionamiento de los dosificadores de la sembradora por un sistema de transmisión mecánico. -----	7
Figura 3. Circuito del sistema de la sembradora ION Agrometal – Verion Inteligente. ---	8
Figura 4. Esquema de siembra sin compensación en curva (izquierda) y con compensación en curva (derecha).-----	9
Figura 5. Dosificador multihíbrido y delibery. -----	9
Figura 6. Sistema delivery de semilla. -----	10
Figura 7. Sensor de radiofrecuencia.-----	12
Figura 8. Esquema electro-mecánico de un motor de corriente directa. -----	13
Figura 9. Representación de la función de transferencia del motor.-----	15
Figura 10. Diagrama de la trayectoria de la caída de la semilla y representación de variables.-----	19
Figura 11. Dosificador de pesticida granulado de la sembradora-fertilizadora.-----	21
Figura 12. Sensor de presión absoluta MPX4115A. -----	25
Figura 13. Vista del sensor de corriente ASC712 y su conexión. -----	29
Figura 14. Vista del sensor de corriente ASC712 y su conexión. -----	29
Figura 15. Sensor de voltaje y potenciómetro utilizado en la calibración.-----	31
Figura 16. Estimación de la ecuación de calibración y comparación del voltaje medido de los sensores con el multímetro.-----	31

Figura 17. Estimación de la ecuación de calibración y comparación de la masa medida por la celda con las pesas calibradas. -----33

CAPÍTULO 2.

Figura 18. Sembradora-fertilizadora y motores fijados a los dosificadores. -----45

Figura 19. Diagrama y esquema del sistema diseñado. -----47

Figura 20. Menú de opciones de trabajo programadas en el módulo maestro (Arduino MEGA).-----48

Figura 21. Transmisión de información en el SM en modo de aplicación de insumos.--50

Figura 22. Transmisión de información en el SM en modo de funcionamiento de pruebas.
-----52

Figura 23. Módulo del circuito maestro. -----53

Figura 24. Módulo de control de los dosificadores.-----56

Figura 25. Módulo de control del sistema neumático. -----58

Figura 26. Módulo de control de los dosificadores.-----60

Figura 27. Módulo de control de la banda transportadora. -----61

Figura 28. Banda transportadora. -----62

Figura 29. Módulo de la báscula de 5 kg.-----63

Figura 30. Módulo de la celda de carga de 5 kg. -----63

Figura 31. Módulo de control de la banda transportadora. -----65

Figura 32. Módulo contador de semilla. -----66

Figura 33. Módulo contador de semilla. -----66

Figura 34. Comportamiento del control realizado por el SM. -----71

CAPÍTULO 3.

Figura 35. Sembradora-fertilizadora Modelo LC-U-N utilizada en la investigación. -----	79
Figura 36. Esquema del circuito electrónico y lógica de control. -----	81
Figura 37. Diagrama de bloques en lazo cerrado de los controladores.-----	82
Figura 38. Respuesta de la variable frecuencia de rotación del dosificador a diferentes anchos de pulso de la señal PWM, con la tolva de semilla al 50% de su capacidad. ---	95
Figura 39. Respuesta del sistema motor-mecanismo dosificador y presión de vacío a la señal de excitación PWM.-----	96
Figura 40. Desempeño del controlador PI y PID del dosificador de semilla. -----	100
Figura 41. Desempeño del controlador PID del controlador de la PVCS.-----	101
Figura 42. Masa y número de semillas entregadas en las repeticiones a diferentes frecuencias de rotación del dosificador. -----	102

CAPÍTULO 4.

Figura 43. Fijación de los motores de CD a los dosificadores.-----	110
Figura 44. Esquema del circuito electrónico y lógica de control. -----	112
Figura 45. Algoritmo de control de los dosificadores.-----	118
Figura 46. Respuesta del sistema motor-mecanismos dosificadores a diferentes anchos de pulso de la señal PWM.-----	120
Figura 47. Respuesta del sistema motor-mecanismos dosificadores a la señal de excitación PWM. -----	123
Figura 48. Desempeño del control PID de la variable frecuencia de rotación de los dosificadores. -----	125
Figura 49. Comportamiento de la caída de fertilizante y pesticida. -----	127

CAPÍTULO 5.

Figura 50. Diagrama del sistema de transmisión original y modificado de los dosificadores.-----	134
Figura 51. Sistema mecatrónico diseñado para la sembradora-fertilizadora. -----	136
Figura 52. Dosificadores de la sembradora.-----	139

CAPÍTULO 1

1.1 INTRODUCCIÓN

En la maquinaria agrícola, cada vez es más frecuente la aplicación de la electrónica, control, informática y tecnología de la información y comunicación, que traen mejoras significativas en su funcionamiento, seguridad y facilidad de operación, facilitando la identificación de fallos o necesidades de mantenimiento, entre otras funciones que permite aprovecharla de mejor manera. En el caso de las sembradoras-fertilizadoras, algunas de las aplicaciones tecnológicas que han permitido mejorar su funcionamiento, son las siguientes: a) el uso de unidades visuales permiten observar la información relevante del funcionamiento de la sembradora, como lo es: la superficie sembrada, densidad de siembra, conteo del número de semillas sembradas, velocidad de avance, nivel de insumos en las tolvas; b) detección de fallos, como: atascamiento de insumos en los tubos de descarga, detección de un nivel bajo de insumo en las tolvas, pérdida de presión en el sistema neumático, irregularidades de la caída de semilla a través del tubo de descarga, bloqueo de la rueda motriz o del sistema de transmisión; c) sistema de dosificación variable, que permite el cambio continuo y en tiempo real de la dosis de aplicación de los insumos de acuerdo a los requerimientos agronómicos en cada área del terreno de cultivo; d) Indicadores visuales o de audio para indicar fallos o la ejecución de funciones; e) Medidores de flujo másico o contadores electrónicos de semilla, que permite estimar la cantidad de los insumos aplicados; f) controladores que permiten la independencia en cada cuerpo de la sembradora-fertilizadora; g) sistema electrónico para el control de profundidad de siembra basado en sistemas neumáticos o hidráulicos; h)

marcador electrónico satelital que permite identificar la trayectoria que debe seguir la máquina, para mantener una distancia uniforme entre líneas de siembra.

Un ejemplo de las máquinas con mayores avances tecnológicos, son las utilizadas en la agricultura de precisión (AP) tales como las de dosificación variable. En ellas, se hace uso de la tecnología de posicionamiento global (GPS), dispositivos de detección y almacenamiento de la información referente a la variabilidad interparcelaria, sistemas de información geográfica, modelos de ayuda para la toma de decisiones, tecnologías capaces de controlar automáticamente los equipos agrícolas (mecatrónicos) de forma que se pueda modificar en continuo y en tiempo real las condiciones de regulación de los mismos (IDEA, 2010).

La AP basada en el tratamiento diferencial del cultivo de acuerdo a los requerimientos agronómicos del mismo en cada región del terreno, tiene ventajas significativas con respecto a la agricultura convencional basada en tratamientos agronómicos uniformes, tales como la optimización de los recursos, reducción en la pérdida de insumos y de la contaminación ambiental, así como facilitar la agricultura sustentable.

En México a pesar de las ventajas de la AP, no se ha implementado a nivel productivo ni para investigación. Lo anterior, puede deberse principalmente a los elevados costos de adquisición de la maquinaria requerida para su aplicación. Por tal motivo, en el presente trabajo se desarrolló un sistema mecatrónico (SM) para el control de los dosificadores de semilla, fertilizante y pesticida de la máquina sembradora-fertilizadora Modelo LC-U-N del fabricante Sembradoras del Bajío S.A. de C.V. Además, se desarrolló la instrumentación y equipo necesario para realizar pruebas de laboratorio de la máquina, con el fin de caracterizar su desempeño. El SM desarrollado, permite mejorar el desempeño de la máquina para la aplicación de insumos en campo, y puede utilizarse en una sembradora-

fertilizadora de dosificación variable como un sistema capaz de realizar los ajustes en continuo y en tiempo real de la dosis de aplicación de insumos.

1.2 ANTECEDENTES

A partir de la década de los 70's, se comenzó a perfilar una nueva forma de hacer agricultura con los estudios sobre automatización de máquinas agrícolas. Posterior a ello, a finales de la década de los 80's y comienzos de los 90's, con la liberación del sistema de posicionamiento global por satélite para uso civil, se desarrollaron equipos inteligentes que permitieron el manejo localizado de las prácticas agrícolas, con una mayor eficiencia de aplicación de insumos. Lo que por consecuencia redujo el impacto ambiental y la disminución de los costos de producción de alimentos (Chartuni *et al* 2007).

La tecnología de AP no consiste solamente en medir la variabilidad existente en el área, sino también en la adopción de prácticas administrativas que se realicen en función de esa variabilidad. De acuerdo con Robert (1999), no es una novedad la observación de la existencia de variabilidad en las propiedades o factores determinantes de la producción en los agroecosistemas. Lo que es diferente, en realidad, es la posibilidad de identificar, cuantificar y mapear esa variabilidad. Más aun, es posible georreferenciar y aplicar los insumos con dosis variables en puntos o áreas de coordenadas geográficas conocidas.

De esta forma, se definen las prácticas agrícolas orientadas a sustituir la recomendación habitual de insumos con base en valores promedio, como ocurre en la agricultura tradicional, por una práctica más precisa, con manejo localizado y que considera las variaciones del rendimiento en toda el área.

Los agentes involucrados en el desarrollo y adopción de las prácticas de AP suelen dividir este conjunto de tecnologías en tres etapas diferentes (Figura 1):

1. Recolección de datos.
2. Procesamiento e interpretación de la información.
3. Aplicación de insumos.

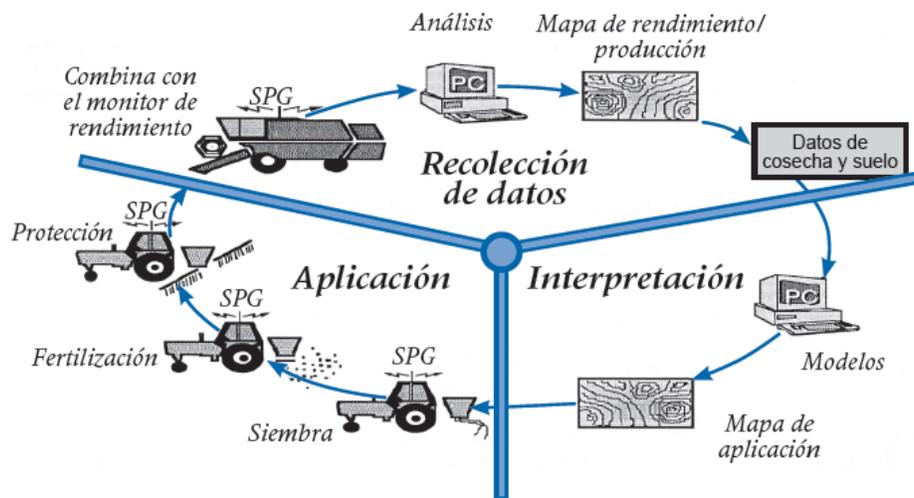


Figura 1. Las tres etapas de la agricultura de precisión.

La aplicación del concepto de AP puede iniciar, por ejemplo, a partir de la cosecha con el mapa de rendimiento o del conocimiento de la variabilidad del suelo representada en los mapas respectivos.

El estudio de variabilidad del suelo y de la planta permite establecer tendencias de rendimiento en una misma área y, a lo largo del tiempo, según variaciones climáticas y modificaciones del suelo. Cuando el rendimiento o la fertilidad de un lote no varían, es probable que el incentivo para adoptar las técnicas de AP sea escaso con respecto a la optimización de la producción, no así desde el punto de vista de la gestión de la empresa agropecuaria. Sin embargo, si se detecta una elevada variación de productividad, la adopción de esas técnicas puede ser beneficiosa, pues reduce las distorsiones comprobadas normalmente en el área de producción.

Las prácticas de manejo localizado no se basan solamente en mapas de productividad o de fertilidad del suelo. La toma de decisiones en AP puede realizarse a partir de una base de datos, registrada en un mapa, o de información obtenida en el instante en que se llevará a cabo determinada acción, utilizando para ello la información obtenida por sensores “en tiempo real”.

1.2.1 SISTEMAS DE APLICACIÓN VARIABLE DE INSUMOS

Un aspecto importante del desarrollo de la AP es el desarrollo de hardware y software necesario para variar la tasa de aplicación de insumos agrícolas como semillas, herbicidas, productos para el control de plagas y enfermedades, agua, fertilizantes, entre otros.

Los sistemas de dosificación variable comercialmente disponibles son principalmente de dos tipos, de acuerdo a su principio de operación para obtener la tasa de aplicación deseada:

1. Los que requieren un sistema de ubicación georreferenciada (GPS/DGPS) y una unidad de comando que almacena el plan de aplicación (mapa de aplicación) de la tasa de aplicación deseada para cada ubicación en el terreno.
2. Los sistemas que utilizan sensores y que no requieren de un sistema de ubicación georreferenciada pero que incluye una unidad de comando dinámica que especifica la aplicación a través de un análisis de tiempo real de las mediciones que van efectuando los sensores ya sea en el cultivo o en el suelo, para cada ubicación en el terreno.

1.2.2 SEMBRADORAS-FERTILIZADORAS

1.2.2.1 Sistemas de potencia para accionar a los dosificadores

En las sembradoras unitarias se han dado cambios importantes, primordialmente en los sistemas de dosificación de semilla y fertilizante. Los cambios han tenido como objetivo principal el control de la dosificación o la dosificación variable aplicado como parte de la tecnología de la agricultura de precisión. Se pueden identificar tres tipos de sistemas de potencia y control de la dosificación de semilla y fertilizante, que son: el sistema mecánico, hidráulico y electromecánico.

Sistema de accionamiento mecánico

En las máquinas sembradoras el sistema más utilizado para accionar los dosificadores de semilla y fertilizantes es a través de un sistema de transmisión mecánico por cadenas, o cadenas y engranes. Para ajustar o variar la dosis de siembra, fertilización y aplicación de pesticidas sólidos se realiza por el intercambio de catarinas o engranes a través del número de dientes, y para lograr una dosificación variable se realiza con él uso de una caja de cambios. El sistema de transmisión es accionado por una rueda motriz, que acciona a los dosificadores, este sistema se muestra en la Figura 2.

Sistema de accionamiento hidráulico.

Esta forma de accionamiento cuenta con un sistema hidráulico para accionar los dosificadores de siembra, fertilización y aplicación de pesticidas sólidos. El sistema cuenta con un motor hidráulico independiente para cada insumo y el ajuste de la dosis de aplicación se realiza desde una unidad de control por instrucciones del operador o a través de mapas en los cuales se indica la dosificación de insumos.



Figura 2. Accionamiento de los dosificadores de la sembradora por un sistema de transmisión mecánico.

Un ejemplo de la aplicación de este sistema, se presenta en la sembradora ION Agrometal-Verion que varía la dosis de aplicación por medio de un monitor digital y un motor hidráulico independiente para cada insumo (semilla y fertilizante en la línea y al costado), Figura 3; **Error! No se encuentra el origen de la referencia..** La medición de la velocidad se realiza con un sensor ubicado en la rueda. También posee un GPS que ubica la máquina en cada lugar del lote logrando hacer los cambios de dosificación en tiempo real (Bragachini *et al* 2010).

Sistema de accionamiento electromecánico

El sistema de accionamiento electromecánico utiliza un sistema electrónico para el accionamiento y control de los dosificadores de la sembradora. Cuenta con motores eléctricos independientes para cada dosificador de semilla, fertilizante y pesticida, dando independencia a cada cuerpo de la máquina para realizar la siembra o fertilización del surco o hilera deseada.

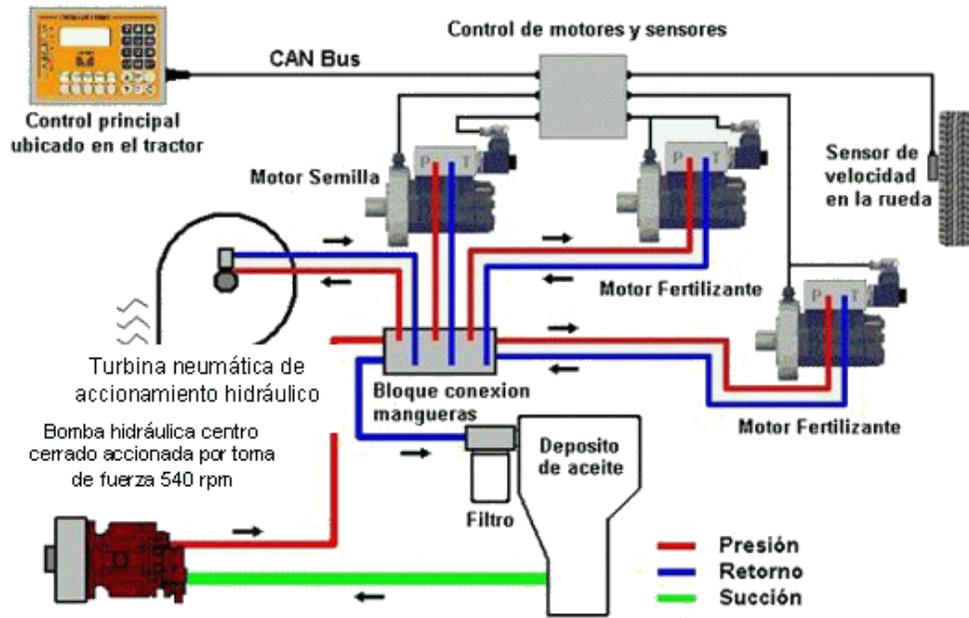


Figura 3. Circuito del sistema de la sembradora ION Agrometal – Verion Inteligente.

La utilización de motores eléctricos permite que cada cuerpo de siembra tenga un mando independiente posibilitando el corte por sección, impidiendo el solapamiento de la siembra que duplica el costo de semillas y que puede provocar disminuciones de rendimiento por sobrepoblación. También permite la compensación de siembra en caso de trabajar en curvas, manteniendo el espaciamiento entre semillas consistente desde el surco interno hasta en la parte exterior del radio de giro (Figura 4).

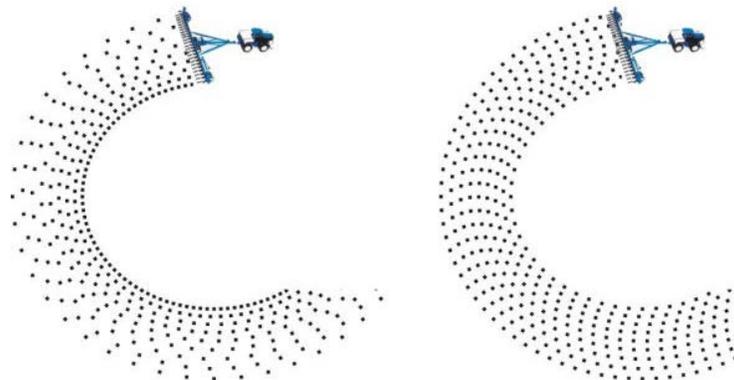


Figura 4. Esquema de siembra sin compensación en curva (izquierda) y con compensación en curva (derecha).

1.2.2.2 Aplicaciones tecnológicas en los dosificadores

Tecnología de dosificadores multihíbridos, en la cual cada cuerpo de siembra posee dos distribuidores de semillas y tolvas independientes que descargan la semilla por un mismo tubo de salida, lo que permite sembrar dos híbridos diferentes en la misma línea de siembra (Figura 5). Este concepto fue desarrollado por Precision Planting y por Kinze (Vélez *et al*, 2014).



a) Dosificador multihíbrido.



b) dosificador delibery.

Figura 5. Dosificador multihíbrido y delibery.

El dosificador “delibery” es un componente que traslada la semilla desde el momento que es tirado por el disco semillero hasta el fondo del surco mediante un sistema de transporte mecánico, lo que evita la caída libre que se produce con un tubo de bajada convencional. Los sistemas que existen en forma comercial son provistos por dos marcas, John Deere y Precicison Planting (Vélez *et al*, 2014), como se muestra en la Figura 6.



Figura 6. Sistema delivery de semilla.

En general los motores eléctricos que accionan a los dosificadores, utilizan un alternador hidráulico que genera la energía para accionarlos. A excepción de John Deere que desarrolló los motores para que funcionen con la serie de tractores de alto poder eléctrico de 48 Volt. En la Tabla 1 se muestran los requerimientos de los motores eléctricos utilizados en las sembradoras de diferentes marcas (Vélez *et al* 2014).

Tabla 1. Requerimientos de energía de los motores eléctricos de las sembradoras.

	Volt	Ampere	Potencia (W)
Graham	12	3	36
Horsch	12	4.6	55.2
Ag Leader	12	2.5	30
Kinza	24	3.5	84
Precision Planting	12	1.1	13.2
Hohn Deere	48	1	48
Mase	24	0.79	18.96

Fuente: Vélez *et al* 2014.

1.2.3 SENSORES CONTADORES DE SEMILLA

Los sensores utilizados en el conteo de semilla pueden ser de tipo óptico, sensores de radiofrecuencia y sensores con cámaras de alta velocidad.

1.2.3.1 Sensor óptico

Los sensores ópticos están basados en un sensor sensible a la luz (fototransistor), y en un emisor (fotodiodo). El fotodiodo emite la luz (generalmente infrarroja) la cual es recibida por el fototransistor, provocando que este último entre en conducción (voltaje cero) y cuando el haz de luz no llega al fototransistor al ser interrumpida por algún objeto, también se interrumpe la conducción, regresando a la condición de conducción cuando la luz nuevamente incide sobre el fototransistor.

Los contadores de semilla ópticos presentan muchas limitaciones: son afectados por material diferente a las semillas como terrones, residuos vegetales, pedazos de semilla, por lo que deben ser colocados a la mitad del tubo de caída de la semilla; no distingue entre una semilla o semillas múltiples; tienen problemas con la suciedad y requieren mantenimiento constante. Sensor de radiofrecuencia.

1.2.3.2 Sensor de radiofrecuencia.

Este tipo de sensores son utilizados por sembradoras de la marca John Deere, Agrometal, Crucianelli, Apache, Schiarre y otras.

Las ondas de alta frecuencia de este sensor proveen un sensado tridimensional de las semillas y estimar su masa, de acuerdo con el fabricante John Deere, son capaces de detectar semillas múltiples, además no les afecta el paso de la tierra y el rastrojo, por lo cual es posible montar el sensor en el extremo inferior del tubo de descarga, cercano a la posición de caída de la semilla, permitiendo establecer con mayor precisión la posición de caída de la semilla y la cantidad de la misma (Figura 7).



a) Sensor de radiofrecuencia

b) Colocación del sensor en la sembradora

Figura 7. Sensor de radiofrecuencia.

1.2.4 SISTEMA DE COPIADO Y ESTABILIZACIÓN EN LOS CUERPOS DE SIEMBRA.

Permite mantener la carga constante sobre el suelo del cuerpo de siembra mediante sistemas neumohidráulicos, hidráulicos o neumáticos durante la labor de siembra.

Vélez *et al* (2012), comparó el desempeño en la siembra del sistema de copiado neumático con respecto al sistema de resorte convencional, y encontró que en general el sistema de copiado neumático mejoró la calidad de siembra en cuanto a uniformidad de la profundidad y no tanto así en la uniformidad de distribución de la semilla en el surco. En cuanto al rendimiento, fue considerablemente superior el obtenido con la siembra utilizando el sistema neumático de copiado que el mecánico (resortes), mostrando una mejor respuesta a la calidad de siembra en los suelos con menores limitantes agronómicas o de mayor potencial de rendimiento.

1.2.5 BANDERILLERO SATELITAL

Los banderilleros satelitales basados en el GPS o DGPS, mediante el cual la maquinaria para siembra, aplicación de pesticidas o fertilizantes puede mantener una distancia uniforme entre hileras donde se aplican los insumos, así como presentar la trayectoria

que debe seguir la máquina para mantener el distanciamiento entre hileras o surcos en los cuales se distribuyen los insumos.

1.3 MODELOS

En esta sección se presentan algunos modelos de importancia para esta investigación.

1.3.1 MODELO DEL MOTOR DE CORRIENTE CONTINUA (CC)

El modelo del motor de corriente continua (CC) más utilizado, está basado en un sistema lineal con parámetros invariantes en el tiempo. La representación esquemática de un motor de CC se muestra en la Figura 8.

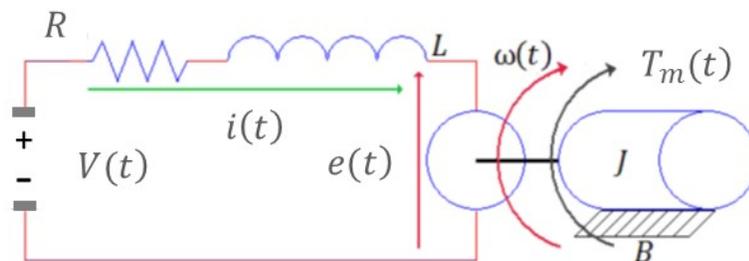


Figura 8. Esquema electro-mecánico de un motor de corriente directa.

La Ecuación 1 y Ecuación 2 relacionan la parte eléctrica del motor con la parte mecánica.

$$T_m(t) = K_t i(t) \quad \text{Ecuación 1}$$

Dónde: T_m : torque generado del motor (Nm); i : corriente de armadura (A); K_t : constante de fuerza electromotriz (Nm·A⁻¹); y t : es el tiempo en (s).

El voltaje generado está relacionado a la velocidad angular del eje del motor por:

$$e(t) = K_b \omega(t) = K_b \frac{d\theta(t)}{dt} \quad \text{Ecuación 2}$$

Dónde: e : voltaje generado (V); ω : velocidad angular del eje del motor (s⁻¹); K_b : constante de fuerza electromotriz. (V·rad⁻¹·s).

Considerando la parte izquierda de la Figura 8, circuito eléctrico del motor, y la ley de Kirchof de la suma de voltajes en cada elemento que conforma la malla se determina con la Ecuación 3; ahora basándonos en la porción derecha de la Figura 8, el diagrama de cuerpo libre de la parte mecánica del motor, y considerando las leyes de Newton en la suma de momento se obtiene la Ecuación 4.

$$V(t) = e(t) + Ri(t) + L \frac{di(t)}{dt} \quad \text{Ecuación 3}$$

Dónde: V : es el voltaje de alimentación (V); R : resistencia eléctrica (Ω); L : inductancia del motor (H).

$$T_m(t) = J \frac{d\omega(t)}{dt} + B\omega(t) + T_L(t) + T_f \quad \text{Ecuación 4}$$

Dónde J : es el momento de inercia del rotor ($\text{kg}\cdot\text{m}^2$), B : constante de viscosidad del motor ($\text{N}\cdot\text{m}\cdot\text{rad}^{-1}\cdot\text{s}$); T_L : Torque por perturbaciones ($\text{N}\cdot\text{m}$); T_f : Torque de fricción ($\text{N}\cdot\text{M}$).

Sustituyendo la Ecuación 2 Ecuación 1 en la Ecuación 3 y la Ecuación 1 Ecuación 1 en la Ecuación 4 se obtiene:

$$V(t) = K_b \omega(t) + Ri(t) + L \frac{di(t)}{dt}$$

$$T_m(t) = J \frac{d\omega(t)}{dt} + B\omega(t) + T_L(t) + T_f$$

Reacomodando términos se obtienen la Ecuación 5 y Ecuación 6, que representan las ecuaciones de las variables de estado del motor.

$$L \frac{di(t)}{dt} = V(t) - K_b \frac{d\theta(t)}{dt} - Ri(t) \quad \text{Ecuación 5}$$

$$J \frac{d^2\theta(t)}{dt^2} = K_t i(t) - B \frac{d\theta(t)}{dt} - T_L(t) - T_f(t) \quad \text{Ecuación 6}$$

En la Figura 9 se muestra el diagrama de bloques del motor de CC, el cual se deriva de las ecuaciones básicas del motor y de la aplicación de la transformada de Laplace.

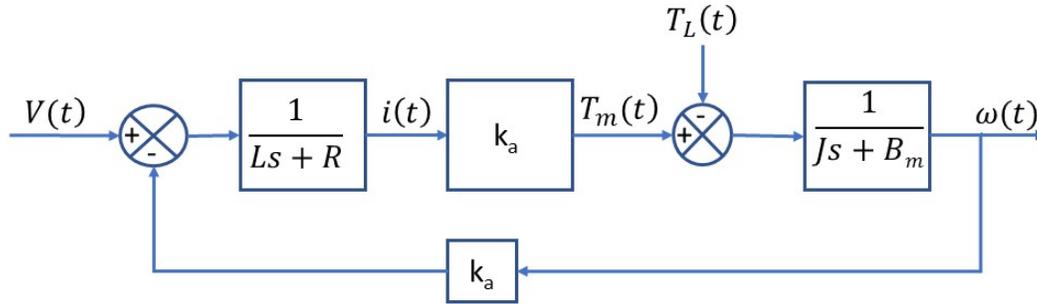


Figura 9. Representación de la función de transferencia del motor.

1.3.2 FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA DEL MOTOR DE CC

La función de transferencia del motor se puede obtener de la Ecuación 5 y Ecuación 6, para ello se hace una simplificación considerando las perturbaciones $T_L(t) = 0$ y la fricción $T_f(t) = 0$, por lo que tenemos:

$$L \frac{di(t)}{dt} = V(t) - K_b \frac{d\theta(t)}{dt} - Ri(t)$$

Pasando la ecuación del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia tenemos:

$$Lsi(s) = V(s) - K_b s\theta(s) - Ri(s) \Rightarrow i(s)(Ls + R) = V(s) - K_b s\theta(s)$$

$$i(s) = \frac{V(s) - K_b s\theta(s)}{Ls + R} \quad \text{Ecuación 7}$$

$$J \frac{d^2\theta(t)}{dt^2} = K_t i(t) - B \frac{d\theta(t)}{dt} - T_L(t) - T_f(t)$$

$$Js^2\theta(s) = K_t i(s) - Bs\theta(s) - T_L(s) - T_f(s) \Rightarrow$$

$$(Js^2 + Bs)\theta(s) = K_t i(s) - T_L(s) \quad \text{Ecuación 8}$$

Sustituyendo la Ecuación 7 en la Ecuación 8, tenemos:

$$(Js^2 + Bs)\theta(s) = K_t \left(\frac{V(s) - K_b s\theta(s)}{Ls + R} \right) \Rightarrow \frac{J}{K_t} (Ls + R)(Js^2 + Bs)\theta(s) = V(s) - K_b s\theta(s) \Rightarrow$$

$$V(s) = \frac{(Ls + R)(Js^2 + Bs)}{K_t} \theta(s) + K_b s\theta(s) \Rightarrow \frac{\theta(s)}{V(s)} = \left(\frac{s}{K_t} (Ls + R)(Js + B) + K_b s \right)$$

Finalmente, en la Ecuación 9 se representa la función de transferencia del motor considerando que no se tienen perturbaciones en el sistema.

$$G(s) = \frac{\theta(s)}{V(s)} = \frac{K_t}{s(Ls + R)(Js + B) + K_t K_b s} \quad \text{Ecuación 9}$$

Ahora considerando al sistema como un regulador con $V(t) = 0$, obtenemos la función de transferencia en la Ecuación 10 considerando las perturbaciones como entrada, la cual se obtiene como a continuación se muestra.

$$\begin{aligned} (Js^2 + Bs)\theta(s) &= K_t(s) \frac{V(s) - K_b s \theta(s)}{Ls + R} - T_L(s) \Rightarrow \\ (Js^2 + Bs)\theta(s) &= K_t(s) \frac{0 - K_b s \theta(s)}{Ls + R} - T_L(s) \Rightarrow \\ \left((Js^2 + Bs) + K_t(s) \frac{K_b s}{Ls + R} \right) \theta(s) &= -T_L(s) \end{aligned}$$

$$\frac{\theta(s)}{T_L(s)} = - \frac{Ls + R}{(Js^2 + Bs)(Ls + R) + K_t(s) K_b s} \quad \text{Ecuación 10}$$

Considerando el principio de superposición para sistemas lineales, tenemos que la función de transferencia del motor de CD puede representarse como se muestra en la Ecuación 11.

$$\begin{aligned} G_{MCD}(s) &= \frac{\theta(s)}{V(s)} + \frac{\theta(s)}{T_L(s)} \\ G_{MCD}(s) &= \frac{K_t}{s(Ls + R)(Js + B) + K_t K_b s} - \frac{Ls + R}{(Js^2 + Bs)(Ls + R) + K_t(s) K_b s} \quad \text{Ecuación 11} \end{aligned}$$

1.3.3 VARIABLES DE ESTADOS DEL MODELO DEL MOTOR DE CD

Despejando de las Ecuación 5 y Ecuación 6 la primera derivada de las variables de estado se obtienen las siguientes ecuaciones:

$$\frac{di(t)}{dt} = \frac{1}{L} V(t) - \frac{K_b}{L} \omega(t) - \frac{R}{L} i(t)$$

$$\frac{d^2\theta(t)}{dt^2} = \frac{1}{J} K_t i(t) - \frac{B}{J} \frac{d\theta(t)}{dt} - \frac{1}{J} T_L(t) - \frac{1}{J} T_f(t)$$

Simplificando el modelo al considerar que no se tiene fricción $T_f = 0$, la matriz de la variable de estados puede escribirse como se muestra en la Ecuación 12.

$$\begin{bmatrix} \frac{di(t)}{dt} \\ \frac{d\omega(t)}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & -\frac{K_b}{L} \\ \frac{K_t}{J} & -\frac{B}{J} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i(t) \\ \omega(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L} \\ 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V(t) & T_L(t) \end{bmatrix}$$

Ecuación 12

1.3.4 MODELO DÍNAMICO DE LA TRAYECTORIA DE LA SEMILLA

Los modelos existentes para determinar la dinámica de la semilla la mayoría son dirigidos a determinar la presión óptima de la presión, la forma de las celdas u orificios y ángulo de emisión de las semillas (Manuel, 2013).

Numerosos trabajos se han realizado con el fin de conocer la dinámica de la trayectoria de la semilla en sembradoras neumáticas fundamentalmente de presión negativa. Zhao *et al* (2010) estimó el desplazamiento horizontal y el tiempo de caída de las semillas (el modelo considera la gravedad y la fricción del aire), a través de análisis numéricos utilizando el software “computational fluid dynamics (CFD) Fluent (Fluent Inc, NH, USA)” y lo comparó con las mediciones realizadas con un sistema que implementa una cámara de alta velocidad, obteniendo errores relativos al <5,5% y 6,5% respectivamente. Utilizaron las ecuaciones de Navier-Stokes y las resolvieron con el modelo de turbulencia estándar k-ε. Lan *et al* (1999), plantean un modelo estático de la caída de la semilla considerando únicamente la fuerza de gravedad, su objetivo principal fue comparar los resultados obtenidos en la cinta engrasada con los obtenidos por mediciones de sensores optoelectrónicos, comparando el modelo con mediciones de tiempos y distancias.

De acuerdo con Manuel (2013), considerando un modelo dinámico donde la semilla se desplaza por un medio viscoso (aire) sin turbulencias y que no está sometida a movimientos de rotación, esto permite utilizar la fórmula de Stoke e ignorar las fuerzas de Magnus. También, se supone que: las semillas son esféricas, de cuerpo rígido, con un tamaño uniforme y las fuerzas externas actúan en el centro de gravedad; el disco sembrero mantiene una velocidad angular uniforme; cada celda lleva sólo una semilla. El modelo dinámico de la trayectoria de la semilla considerando la fuerza de gravedad y la fricción del aire, la cual se representa en la Figura 10. Las ecuaciones que describen el movimiento al descomponerlo en las dos componentes del eje X y Y como se representa en Ecuación 13 y Ecuación 16.

La Ecuación 13, representa el desplazamiento de la semilla en el eje X.

$$m \frac{d^2x(t)}{dt^2} + f \frac{dx(t)}{dt} = 0 \quad \text{Ecuación 13}$$

Dónde: m: masa de la semilla, g.

x(t): desplazamiento en la dirección del eje x, m

t: tiempo, s

f: coeficiente de fricción del aire, adimensional.

Donde el coeficiente de fricción puede ser determinado por la Ecuación 14 de Stoke.

$$f = 6\pi\mu R_{sem} \quad \text{Ecuación 14}$$

Dónde: R_{sem} : radio medio de la semilla, m.

μ : es la viscosidad del aire (17.6×10^{-6} Nsm⁻² a 10 ° C)

Para utiliza la Ecuación 14 de Stoke el flujo debe ser laminar con un valor inferior a 2000.

El número de Reynolds (R_e) se determina con la Ecuación 15.

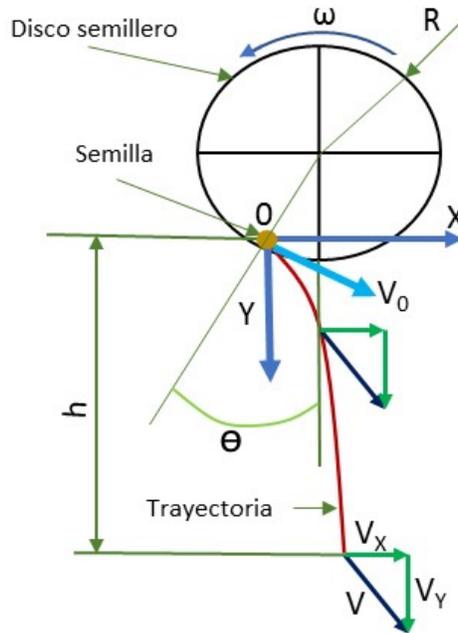


Figura 10. Diagrama de la trayectoria de la caída de la semilla y representación de variables.

$$R_e = \frac{2\rho R_{sem}V}{\mu}$$

Ecuación 15

Dónde: R_{sem} : radio de la semilla, m.

ρ : es la densidad del aire (1.29 kg m^{-3}).

V : la velocidad relativa de la semilla respecto del aire, ms^{-1} .

La Ecuación 16, representa el desplazamiento de la semilla en el eje Y.

$$m \frac{d^2y(t)}{dt^2} + f \frac{dy(t)}{dt} = mg$$

Ecuación 16

Dónde: $y(t)$: desplazamiento en la dirección del eje y, m

g : constante gravitacional, ms^{-2}

A partir de la Ecuación 13 se obtiene la Ecuación 17.

$$y(t) = m \frac{\dot{x}(0)}{f} \left(1 - e^{-\frac{f}{m}t}\right)$$

Ecuación 17

A partir de la Ecuación 16 se obtiene la Ecuación 18.

$$y(t) = -g \left(\frac{m}{f}\right)^2 t + g \left(\frac{m}{f}\right) t + g \left(\frac{m}{f}\right)^2 e^{-\frac{f}{m}t} + m \frac{\dot{y}(0)}{f} \left(1 - e^{-\frac{f}{m}t}\right) \quad \text{Ecuación 18}$$

1.3.5 MODELO PARA ESTIMAR LA PRESIÓN DE VACÍO ÓPTIMA EN LA SEMBRADORA

Karayel *et al* 2004, en un trabajo realizado para determinar un modelo que permitiera estimar la presión de vacío óptima en una sembradora neumática de precisión para semillas de maíz, algodón, soya, pepino, melón, sandía, cebolla y remolacha. Basado en sus propiedades físicas como la masa de mil semillas, área proyectada, esfericidad, densidad. Para el caso del maíz se determinó una presión de vacío óptima de 4kPa, obteniendo como resultado a la Ecuación 19, con valores de ji-cuadrado (χ^2) de 2.51×10^{-3} , el cuadrado medio del error de 2.74×10^{-2} y eficiencia del modelado de 0.99.

$$P_V = a + bm_{1000}^{0.27} + cP^{-0.02} - d\phi + e\rho \quad \text{Ecuación 19}$$

Dónde: P_V : presión de vacío, kPa.

m_{1000} : masa de mil semillas, g

P : área proyectada, mm².

ϕ : esfericidad de la semilla, %.

ρ : densidad de la semilla, kg·m⁻³.

coeficientes $a=1$, $b=0.72$, $c=2.09 \times 10^{-3}$, $d=0.01$ y $e=0.37 \times 10^{-3}$.

La esfericidad se determina con la Ecuación 20.

$$R_e = \frac{(LWE)^{1/3}}{L} * 100 \quad \text{Ecuación 20}$$

Dónde: L : longitud de la semilla, m.

W : ancho de la semilla, m.

E : espesor de la semilla, m.

1.3.6 MODELO PARA OBTENER EL FLUJO MASÍCO DEL RODILLO RANURADO

El dosificador de rodillo ranurado o cilindro acanalado en su superficie se maquinan pequeños canales a lo largo del eje o rodillo y distribuidos en su periferia como se observa en la Figura 11. Al girar el rodillo, en los canales entra el material y lo descarga por el tubo para que este sea depositado en el suelo.

Para determinar el flujo másico del material que descarga el rodillo se determina con la Ecuación 21.

$$\frac{dm(t)}{dt} = \eta V \rho \frac{d^2\theta}{dt^2} \quad \text{Ecuación 21}$$

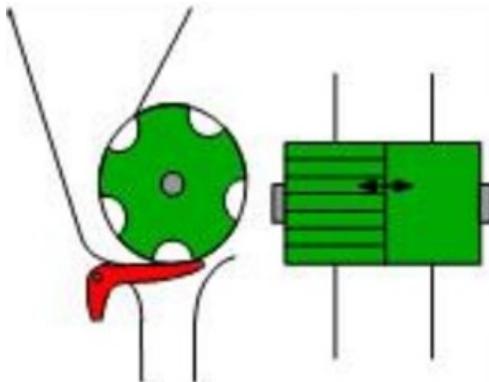
Dónde: $m(t)$: masa del material sólido, kg

η : coeficiente de llenado, adimensional.

V : volumen total de las ranuras o canales a lo largo del rodillo, m^3 .

ρ : densidad del material aplicado, $kg \cdot m^{-3}$.

El valor de η se determina experimentalmente y varía con respecto a la velocidad angular del rodillo, que de acuerdo a datos de Ortiz y Hernanz (1989) cuando se utiliza semilla su valor está dentro del intervalo de 0.6 a 0.85.



a) Esquema del rodillo acanalado.



b) Rodillo acanalado de la máquina.

Figura 11. Dosificador de pesticida granulado de la sembradora-fertilizadora.

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 OBJETIVO GENERAL

Desarrollar un sistema mecatrónico para el control de los dosificadores de semilla, fertilizante y agroquímico de una sembradora-fertilizadora, que permita el cambio continuo y en tiempo real de la dosis de aplicación, así como el desarrollo de equipo o instrumentos para caracterizar su desempeño al ser adaptado a la máquina.

1.4.2 OBJETIVOS PARTICULARES

1. Diseñar, construir y adaptar un sistema mecatrónico que permita el cambio continuo y en tiempo real de la dosis de aplicación de semilla, fertilizante y agroquímico en una sembradora-fertilizadora seleccionada.

2. Desarrollar un sistema mecatrónico basado en el uso de microcontroladores como unidad de procesamiento y control, para operar los dosificadores de la sembradora-fertilizadora.

3. Diseñar la electrónica, mecánica, la programación y el control del sistema mecatrónico, así como su integración para el logro de su funcionamiento como una unidad.

3. Desarrollar el equipo e instrumentos que permitan caracterizar el desempeño del sistema mecatrónico al adaptarse a la máquina, para la aplicación de los insumos.

4. Realizar pruebas y evaluación que permitan caracterizar el funcionamiento de la sembradora-fertilizadora y dispositivo electrónico en su conjunto.

1.5 HIPÓTESIS

El desarrollo de un sistema mecatrónico basado en microcontroladores como unidad de procesamiento y control, y motores de corriente directa como actuadores para accionar a los dosificadores de semilla, fertilizante y pesticida, permite lograr un cambio continuo y en tiempo real de la dosis de aplicación de cada insumo, reemplazando el sistema de

accionamiento tradicional de los dosificadores basados en una rueda motriz y sistemas de transmisión mecánica.

1.6 COMPONENTES ELECTRÓNICOS Y DE CONTROL UTILIZADOS

1.6.1 SENSORES

1.6.1.1 Codificador incremental YUMO E6B2-CWZ3E

Este codificador incremental genera 1024 pulsos por giro de su eje, además permite interpretar en qué sentido gira y a qué frecuencia de rotación. El codificador cuenta con tres líneas de salida o cables, dos de ellos (salida A y salida B) generan una señal cuadrada de 1024 pulsos por giro y la otra (salida Z) genera un pulso por giro del eje del codificador.

El codificador debe ser bien instalado, estando bien alineado con respecto al eje al cual se acopla y fijo para evitar vibraciones que lo dañen. Su alimentación debe estar dentro del rango de los 5 a 12 VCD para evitar daños a la electrónica del mismo. Las características más importantes del codificador se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2. Características del codificador incremental.

Parámetro	Valor o rango	Unidades
Resolución	1024	Pulso por giro
Voltaje de entrada	5 - 12	VCC
Máxima Velocidad de rotación	6000	rev·min ⁻¹
Carga radial admisible	5	N
La carga axial permisible	3	N
Longitud del cable	50	cm
Diámetro del eje	6	m

1.6.1.2 Sensor de Presión MPX4115

El sensor MPX4115A fue diseñado para la medir la presión absoluta o la altitud, y proporciona una señal de salida analógica compensada en temperatura. El sensor contiene un delgado diafragma que es presionado en mayor o menor grado por la presión

atmosférica. Un elemento piezoeléctrico, unido a lo largo del flanco del diafragma, sigue fielmente sus movimientos. Al hacer esto, su resistencia varía en proporción directa al movimiento, y éste a su vez a la presión barométrica. En otras palabras, el sensor se comporta como un potenciómetro.

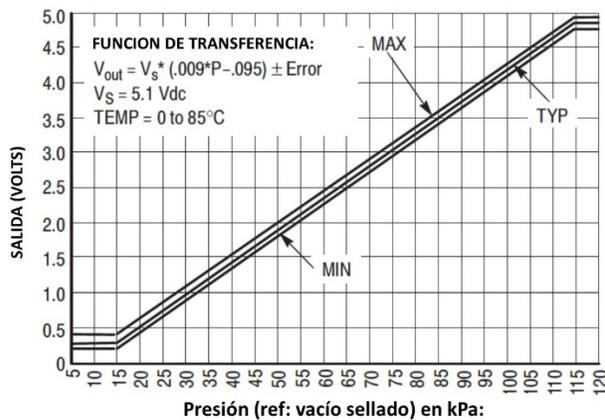
Cuando se aplica una tensión en los extremos del sensor, la tensión de salida resultante varía en relación directa con las variaciones de presión (Figura 12a). En este tipo de sensor de valor absoluto, el espacio debajo del diafragma está aislado del resto del entorno y evacuado a una presión de referencia Figura 12b. La tensión de salida es proporcional a la presión atmosférica absoluta, lo que lo hace idóneo para su empleo como barómetro. El sensor presenta las características más importantes mostradas en la Tabla 3.

Tabla 3. Características del sensor de presión MPX 4115A.

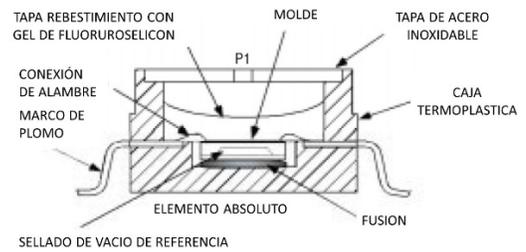
Parámetro	Valor o rango	Unidades
Rango de medición	15 – 115	KPa
Error máximo	± 1.5 %	Sobre 0 y 85°C
Voltaje de salida	0.2 to 4.8	Volts
Temperatura compensada	De –40° to +125	°C
Temperatura de operación	De –40° to +125	°C
Voltaje de alimentación	4.85 a 5.35, ideal 5.1	Volts
Corriente de alimentación	7 a 10	mAdc
Sensibilidad	45.9	mV·kPa ⁻¹
Tiempo de respuesta	1	ms

El MPX4115 es un sistema completo que integra la circuitería analógica de acondicionamiento de la señal, suministrando un voltaje directamente proporcional a la presión barométrica. Esta circuitería incluye la compensación de temperatura, dos amplificadores y una circuitería de desplazamiento que convierte la diferencia de potencial medido en una tensión referida a masa. Es decir, el sensor suministra una salida ya preparada para la entrada al conversor analógico/digital del microcontrolador (Arduino

Uno) y su consumo de corriente típico es de unos siete miliamperios. Sin embargo, debido a las variaciones de voltaje cuando son activados los motores de la sembradora, fue necesario utilizar un amplificador en configuración seguidor para obtener una señal más estable.



Presión absoluta con respecto al voltaje de salida



b) Vista transversal del sensor

Figura 12. Sensor de presión absoluta MPX4115A.

La ecuación de la función de transferencia para determinar el valor del voltaje de salida del sensor se determina con la Ecuación 22.

$$V_{out} = V_s (0.009P - 0.095) \mp (0.009 (EP)(FT) V_s) \quad \text{Ecuación 22}$$

Dónde: V_s : es el voltaje de alimentación el cual debe ser $V_s = 5.1 \pm 0.25 \text{ V}$.

V_{out} : voltaje de salida, V

EP: error en la presión medida, kPa.

FT: factor de temperatura con valor de uno para temperaturas de operación de 0 y 85°C.

P: presión de vacío, kPa.

Considerando que el sensor se trabajara en el rango de temperatura de 0 a 85°C, y despejando la presión de vacío de la Ecuación 22 se tiene que:

$$P = \frac{1}{0.09} \left(\frac{V_{out} \mp (0.009 (EP) V_s)}{V_s} + 0.095 \right)$$

Considerando un error de presión cero por ser pequeño ($\pm 0.5\%$) el cual puede despreciarse, la ecuación se simplifica a la Ecuación 23.

$$P = \frac{V_{out} + 0.095 V_s}{0.09 V_s} \quad \text{Ecuación 23}$$

Debido a que el valor de voltaje leído en el pin Vout del sensor MPX4115A por el arduino, es un valor digital ya que es transformado por el convertidor analógico digital (ADC) interno del arduino, por lo que para transformar ese valor digital nuevamente a un valor de voltaje en mV se utiliza la Ecuación 24.

$$V_{out} = \frac{5000 C_{adc}}{1023} \quad \text{Ecuación 24}$$

Dónde: V_s : es el voltaje de alimentación el cual debe ser $V_s = 5.1 \pm 0.25$ Vdc.

V_{out} : voltaje de salida, mV

C_{adc} : valor obtenido del ADC, adimensional.

Finalmente, al sustituir la Ecuación 24 en la Ecuación 23 se obtiene la Ecuación 25 que fue implementada en la programación del arduino para determinar la presión medida por el sensor MPX4115A.

$$P = \frac{5000 C_{adc} + 97.185 V_s}{9.207 V_s} \quad \text{Ecuación 25}$$

Como la presión de vacío en la cámara de la sembradora del dosificador de semilla a la cual se ajusta el sistema neumático de la sembradora, debe ser la presión diferencial entre el interior (presión dentro de la cámara) y el exterior (presión atmosférica) de la cámara para lo cual se utilizan dos sensores, uno para medir la presión atmosférica y otro

se coloca dentro de la cámara para medir la presión al interior de la misma y obteniendo la diferencia de las lecturas de los sensores se obtiene la presión diferencial Ecuación 26.

$$P_{\text{dif}} = P_{\text{atm}} - P_{\text{cam}} \quad \text{Ecuación 26}$$

Dónde: P_{dif} : presión diferencial o de vacío, Pa

P_{atm} : presión atmosférica, Pa

P_{cam} : presión al interior de la cámara, Pa

1.6.1.3 Sensor de corriente ACS712

El circuito integrado ACS712 de Allegro MicroSystems permite medir la cantidad de corriente que fluye a través de un circuito de corriente alterna (AC) o corriente directa (DC). El método de sensado es a través de un transductor de efecto hall que provee un voltaje de salida proporcional a la corriente que fluye en el circuito. El trayecto para la medida de corriente es por el interior del circuito integrado y se encuentra aislado del circuito de procesamiento.

Las características principales del sensor, el cual fue utilizado para la medición de la corriente se presentan en la Tabla 4.

Tabla 4. Características del sensor de corriente ACS712.

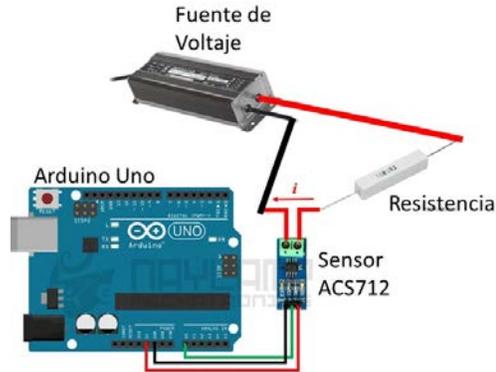
Parámetro	Valor o rango	Unidades
Rango de medición	±5	Amper de CD o CA
Error máximo	1.5	% a 25°C
No linealidad	1.5	%
Salida de voltaje en corriente cero	VCC x0.5	Volts, Bidireccional; IP = 0 A, TA = 25°C
Voltaje de alimentación	4.5 a 5.5	Volts
Sensibilidad	185	mV·A ⁻¹
Tiempo de respuesta	5	µs

Para utilizar los sensores ACS712 con rango de medición de $\pm 5A$ en el sistema mecatrónico fueron calibrados, para ello se hizo un circuito con una fuente de voltaje de 24VCD de 5 Ampes, y resistencias de potencia a 25 W de valor conocido, las cuales fueron conectadas en un extremo con la línea de voltaje de la fuente y por el otro a una terminal de la bornera del sensor ACS712 y de este mismo sensor de su otra terminal de la bornera hacia tierra como se muestra en la Figura 13b. El valor de la resistencia fue modificándose para obtener el flujo de corriente deseado a través del circuito, lo cual se hizo para cuatro sensores.

Es importante señalar que al conectar el módulo medidor de corriente debe tenerse cuidado en mantener la dirección de la conexión mostrada en la Figura 13b, para que las mediciones de corriente sean de un valor positivo. Además, al realizar la programación del arduino este debe permitir antes de realizar cualquier medición de flujo de corriente, medir el voltaje inicial de V_{out} cuando el flujo de corriente es nulo o cero, este valor de voltaje medido y transformado a un valor digital por el convertidor analógico digital del arduino como base cero de corriente (offset), a partir del cual cualquier medición de flujo de corriente deberá restarse a este valor (offset) y posteriormente realizarse el cálculo de la corriente con la ecuación estimada de la calibración del sensor.



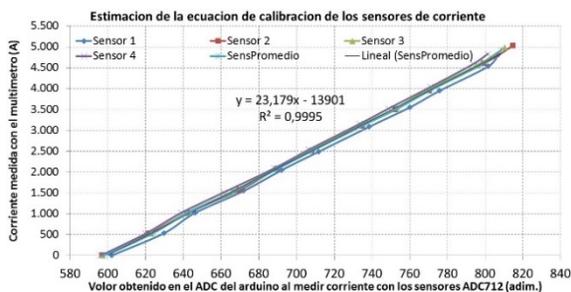
a) Sensor de corriente



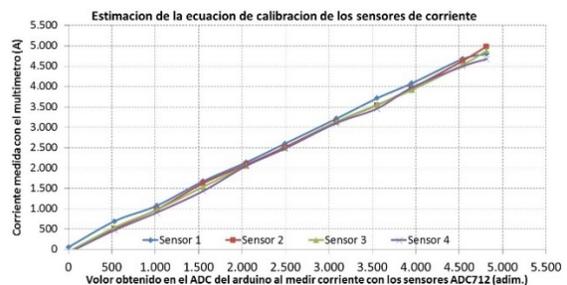
b) Conexión con el arduino uno.

Figura 13. Vista del sensor de corriente ACS712 y su conexión.

En la Figura 14a se muestra la ecuación estimada para la calibración de los sensores de corriente, la cual fue implementada en el arduino para convertir el valor de voltaje leído del pin Vout (x) del ACS712 transformado a un valor digital mediante el ADC del arduino y con la ecuación estimada de calibración en el valor de la corriente (y). En la Figura 14b se hace una comparación del valor de corriente medido con el multímetro y el valor de corriente calculado con el arduino al utilizar el sensor ACS712.



a) Estimación de la ecuación a utilizar por los sensores de voltaje.



b) Comparación de las mediciones realizadas con los sensores calibrados y el multímetro del CENEMA.

Figura 14. Vista del sensor de corriente ACS712 y su conexión.

Este sensor es afectado en sus mediciones, por los campos magnéticos generados por motores, transformadores o líneas de cableados, por lo que deben tomarse los cuidados necesarios para evitar errores en las mediciones.

1.6.1.4 Sensor de voltaje SHT-166.

El sensor de voltaje (Figura 15a) funciona con el principio de divisor de tensión resistivo, que permite reducir el valor real medido en un múltiplo de cinco veces su valor como salida del sensor. Lo que permite que el microcontrolador pueda medir voltajes máximos de 25V con este sensor, ya que sus pines analógicos no soportan valores superiores de voltajes a los 5V. Las características principales del sensor se presentan en la Tabla 5.

Tabla 5. Características del sensor de voltaje.

Parámetro	Valor o rango	Unidades
Rango de entrada de voltaje	0-25	VCD
Rango de detección de voltaje	0.02445V – 25V	VCD
Resolución analógica de Tensión	0.00489	VCD
Voltaje de salida del sensor	0-5	VCD

Para la calibración del sensor se utilizó una fuente de voltaje de 24VDC y un potenciómetro de 10 k Ω de 20 vueltas (Figura 15b), con el cual se varió el voltaje. Además las mediciones realizadas con el sensor-microcontrolador fueron comparadas con las mediciones realizadas por un multímetro digital calibrado.

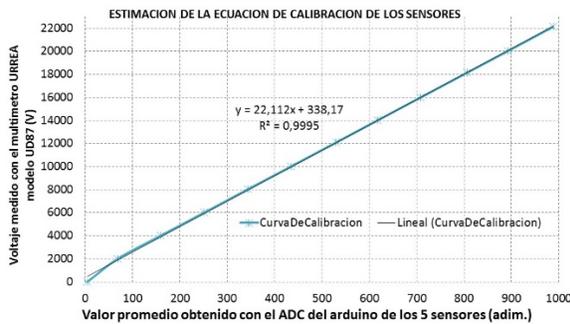


a) Sensor de voltaje

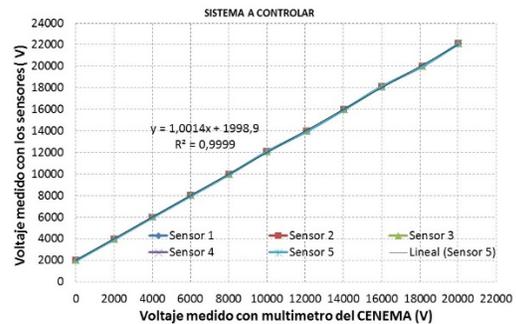
b) Potenciómetro de 10 kΩ.

Figura 15. Sensor de voltaje y potenciómetro utilizado en la calibración.

Primero se hizo la estimación de la ecuación de ajuste del sensor a implementarse en el microcontrolador, con base a las mediciones realizadas con el multímetro (Figura 16a). Posteriormente, se hizo una comparación entre las mediciones realizadas entre el sensor-microcontrolador y las realizadas con el multímetro (Figura 16b).



a) Estimación de la ecuación a utilizar por los sensores de voltaje.



b) Comparación de las mediciones realizadas con los sensores calibrados y el multímetro del CENEMA.

Figura 16. Estimación de la ecuación de calibración y comparación del voltaje medido de los sensores con el multímetro.

1.6.1.5 Celda de carga de 5kg.

La celda de carga es un módulo de detección de fuerza construida como una barra metálica. En su estructura se adhieren galgas extensiométricas o extensómetros en puntos estratégicos, que se deforman cuando es sometida a una fuerza o deformación, con lo que producirá una variación en su resistencia eléctrica.

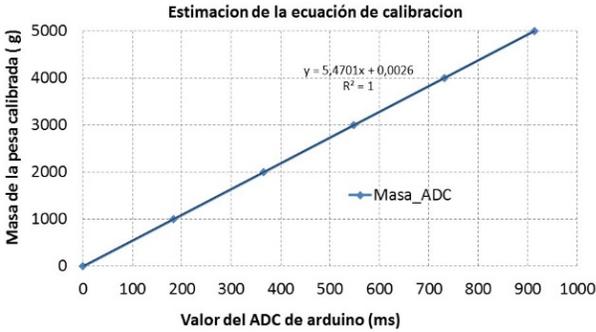
De esta manera, la carga que actúa sobre la celda se convierte en un voltaje que se mide con cuatro resistencias o capacitores conectados en una configuración conocida como puente de Wheatstone, para lo cual debe aplicarse una tensión constante conocida. El circuito puente Wheatstone se utiliza para medir con precisión la resistencia de la celda de carga, y en su salida entrega un voltaje muy bajo por lo que requiere ser amplificado. Para ello se utiliza el módulo HX711, el cual cuenta con un amplificador con una ganancia de 128, y un ADC de 24 bits lo que permite obtener lecturas bastante precisas y exactas de fuerza o masa medida por la celda.

En la Tabla 6, se muestran las características de la celda de carga utilizada para la medición de la masa descargada en los dosificadores de fertilizante y pesticida.

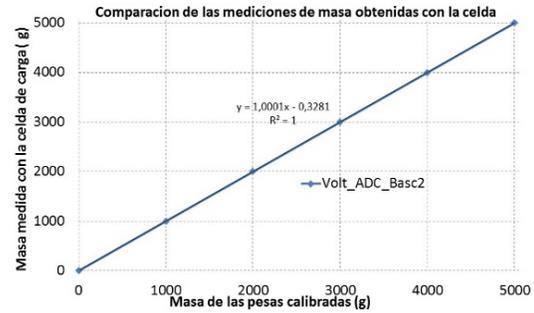
Tabla 6. Características de la celda de carga de 5kg.

Parámetro	Valor o rango	Unidades
Material de construcción	Aleación de aluminio	
Tipo de celda de carga	Strain Gauge	
Capacidad de medición	0 - 5	kg
Precisión	0.05	%
Razón de salida	1.0±0.15	mV·V ⁻¹
Voltaje de alimentación	5	VCD
No linealidad	0.05	% FS
Rango de temperatura compensada	-10 to ~+40	°C
Rango de temperatura de operación	-20 to ~+55	°C
Sobrecarga de seguridad	120	%
Sobrecarga última	150	%

La celda de carga se ajustó con base a las lecturas de los valores digitales obtenidos con el microcontrolador-HX711, al medir la masa de las pesas calibradas con valores conocidos de 1, 2, 3, 4 y 5kg. A partir de las lecturas se obtuvo la ecuación de ajuste que fue implementada en el microcontrolador (Figura 17a). Posteriormente se hizo una comparación de las mediciones de masa obtenidas con el microcontrolador y el valor indicado de la pesa calibrada obteniendo la gráfica mostrada en la Figura 17b.



a) Estimación de la ecuación a utilizar por la celda de carga.



b) Comparación de las mediciones realizadas con la celda y las pesas calibradas.

Figura 17. Estimación de la ecuación de calibración y comparación de la masa medida por la celda con las pesas calibradas.

La celda de carga, debido a que su principio de funcionamiento es resistivo puede ser afectada por las condiciones de temperatura y humedad, para lo cual presenta un circuito de compensación, por lo que debe utilizarse en el intervalo permisible o compensado. También, al instalarse debe quedar bien fija para lograr mediciones estables y con el menor error posible (precisión y exactitud).

1.6.2 ACTUADORES

1.6.2.1 Motorreductor EMG49.

El motorreductor EMG49 con una relación de transmisión de 49:1 entre el motor y la flecha de salida del reductor, que debe ser alimentado con un voltaje de 24VCD, está equipado con un codificador y un reductor de engranes de 49:1, utilizado principalmente para aplicaciones en robóticas. También incluye un condensador de supresión de ruido estándar a través de los devanados del motor. Sus características principales se muestran en la Tabla 7.

Tabla 7. Características del motor EMG49.

Parámetro	Valor o rango	Unidades
Voltaje de alimentación	24	VCD
Velocidad máxima	122	rpm
Corriente máxima	2,1	A
Torque máximo	1.568 (16)	Nm (Kg.cm ⁻¹)
Potencia	34,7	W
Corriente de paro	13	A
Pulsos por cada giro del encoder	980	Pulsos·rev

El codificador utiliza un sensor efecto hall que acepta voltajes de 3.5 a 20 VCD. Sus salidas son a colector abierto, por lo que es necesario colocar resistencias pull-ups en cada una de sus salidas (A y B), para generar los pulsos del codificador.

1.6.2.2 Motorreductor del dosificador de fertilizante.

El motorreductor que acciona al dosificador de fertilizante, utiliza un motor de 24VCD y cuenta con una potencia de 350W, la frecuencia de rotación en vacío del motor es de 6255 rev·min⁻¹, el reductor permite una reducción de 12 a 1.

1.6.2.3 Turbina.

La turbina fue desmontada de una aspiradora de la marca truper, la cual fue utilizada para generar el vacío en la cámara de succión del sistema neumático de semilla durante las pruebas de laboratorio. Esta turbina utiliza un motor de corriente alterna (CA) de 110-120VCA, sus características principales se muestran en la Tabla 8.

Tabla 8. Características del motor de la aspiradora.

Parámetro	Valor o rango	Unidades
Voltaje de alimentación	110-120	VCA
Potencia	122	rpm
Presión de aspiración	9,6 (1,4)	kPa (PSI)
Presión de salida	11,7 (1,7)	kPa (PSI)
Potencia	2200	W
Corriente	7	A
Frecuencia	60	Hz

La turbina utilizada, debe ser reemplazada por una turbina con características similares, pero con alimentación de corriente directa a 24 V, ya que la utilizada fue seleccionada únicamente para realizar las pruebas de laboratorio y para su uso en campo es necesario que la turbina sea alimentada por el circuito eléctrico del tractor.

1.7 REFERENCIAS

- [1] Bragachini M.; Méndez A.; Scaramuzza F; Vélez J. P. y Villarroel D. 2010. Manejo de cultivos por ambiente. Evolución de la dosificación variable en Argentina. Proyecto Agricultura de Precisión INTA. Manfredi, Pcia. de Córdoba, Argentina.
- [2] Bragachini M.; Méndez A.; Scaramuzza F; Vélez J. P. y Villarroel D. 2010. Determinación de Viabilidad Económica de la Tecnología de Dosis Variable de Insumos en Maíz. INTA Manfredi - Proyecto Agricultura de Precisión. Manfredi, Pcia. de Córdoba, Argentina.
- [3] Chartuni, E.; Carvalho, F. de A.; Marçal, D. y Ruz, E. (2007). Nuevas herramientas para mejorar la gestión tecnológica en la empresa agropecuaria. Agricultura de precisión. COMUNICA. Edición No. 1, Etapa II.
- [4] Lan Y., Kocher M. and Smith J. (1999). "Opto-electronic Sensor System for Laboratory Measurement of Planter Seed Spacing with Small Seeds". Biological Systems Engineering: Papers and Publications, vol. 162, pp. 119-128.
- [5] Manuel M. R. (2013). Modelo del planteo de una sembradora neumática. Mapa de siembra implementado con lógica reconfigurable utilizando técnicas de codiseño software/hardware. Tesis doctoral. Universidad de Córdoba. Córdoba, España.
- [6] Ortiz C. J. y Hernanz J. L. (1989). Técnica de la mecanización agraria. Ediciones Mindi-Prensa 3a. edición. Madrid España.
- [7] Robert, P. C. 1999. Precision Agriculture: An Information Revolution in Agriculture. Agricultural Outlook Forum 1999, St. Paul, MN. February 1999. ASA, CSSA, SSSA: Madison, WI.
- [8] Vélez, J.P.; Scaramuzza, F. y Villarroel, D. (2014). Sembradoras eléctricas. Una realidad en el mundo y en el campo argentino. INTA.

- [9] Vélez J.; Méndez A.; Villarroel D.; Scaramuzza F. y Bragachini M. (2013). Evaluación de sistema de copiado del terreno con carga constante neumático respecto al tradicional resorte convencional en paralelogramo de sembradora de grano grueso argentina. Red Agricultura de Precisión - INTA EEA Manfredi. Argentina.
- [10] Zhao Zhan, Li Yaoming, Chen Jin, Xu Lizhang (2010). Numerical analysis and laboratory testing of seed spacing uniformity performance for vacuum-cylinder precision seeder. Biosystems Engineering Vol. 106 (4) 344–351.
- [11] Freescale Semiconductor. Hoja de datos del sensor de presión MPX4115A.
<http://www.innoviris.be/fr/documents/mpx4115>.
- [12] Robot Electronics. Hoja de especificaciones técnicas del motorreductor EMG49.
http://www.moodle2.tfe.umu.se/pluginfile.php/41785/mod_resource/content/2/EMG49%20datasheet.pdf
- [13] Allegro MicroSystems. Hoja de especificaciones técnicas del sensor de corriente ACS712.
<https://www.allegromicro.com/~media/files/datasheets/acs712-datasheet.ashx>
- [14] AVIA Semiconductor. Hoja de especificaciones técnicas del módulo HX711.
https://cdn.sparkfun.com/datasheets/Sensors/ForceFlex/hx711_english.pdf
- [15] OMRON Corporation. Hoja de especificaciones técnicas del encoder E6B2-CWZ3E.
https://www.fa.omron.com.cn/data_pdf/cat/e6b2-c_ds_e_5_1_csm491.pdf?id=487
- [16] <http://www.agriculturadeprecision.org/gacetillas/2014/20140703Dosificadores-electricos.asp>
- [17] <http://profesionalagro.com/agrosector/afondo/sistemas-guiado/sistemas-guiado-GPS-GNSS.php>

CAPÍTULO 2

DISEÑO ELECTRÓNICO E INSTRUMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE CONTROL DE LOS DOSIFICADORES PARA UNA SEMBRADORA-FERTILIZADORA

Julio Torres Sandoval¹, Eugenio Romantchik Kriuchkova¹, Irineo L. López Cruz¹, Gilberto De J. López Canteñs¹.

¹Posgrado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua. Universidad Autónoma Chapingo. Km 38.5 Carretera México- Texcoco. C.P. 56230, Chapingo, Estado de México. Tel. (595) 95 2 15 51, Email: jultsmex@yahoo.com.mx.

2.1 RESUMEN

Las sembradoras-fertilizadoras utilizadas en la agricultura de precisión, emplean sistemas mecatrónicos para realizar el cambio continuo y en tiempo real de la dosis de aplicación de los insumos (semilla, fertilizante y pesticida), para aplicar las cantidades requeridas en cada área del terreno de cultivo de acuerdo a sus características, de tal manera que se pueda optimizar el aprovechamiento de los insumos en dependencia de factores como la fertilidad del suelo y disponibilidad de agua.

En este trabajo se presenta el diseño electrónico, construcción y evaluación de un sistema mecatrónico para el control de los dosificadores y del sistema neumático de una sembradora-fertilizadora, así como para la medición de variables que permiten caracterizar el desempeño de la máquina en laboratorio y campo. El diseño electrónico del SM está basado en microcontroladores, utilizando un elemento maestro (Arduino MEGA basado en ATmega2560) y múltiples componentes esclavos (ATmega328P) los cuales sostienen una comunicación bidireccional vía I2C. Esto le permitió funcionar como una unidad, con la ventaja de que cada microcontrolador realiza diferentes funciones al mismo tiempo. Además, cada microcontrolador cuenta con la electrónica requerida para realizar la función asignada, obteniendo así un módulo independiente. El SM consta de once módulos, donde el módulo maestro se encarga de controlar el funcionamiento

general del sistema y de recibir las instrucciones de operación del usuario; los módulos esclavos reciben del maestro la información necesaria para operar y controlan el funcionamiento de los dosificadores (semilla, fertilizante y pesticida), del sistema neumático y de la banda transportadora (utilizada en pruebas), permiten realizar mediciones de la velocidad de desplazamiento de la sembradora, nivel de las tolvas, masa del insumo tirado por los dosificadores y cantidad de semillas tiradas por el tubo de descarga, entre otras.

De manera general el desempeño en el control de los dosificadores y del sistema neumático permitió un cambio continuo y en tiempo real de la dosis de aplicación de insumos. Alcanzando el estado estacionario de las variables controladas incluyendo la velocidad de la banda transportadora, en 1 a 2 s en la mayoría de los casos. Excluyendo al controlador del sistema neumático que tarda hasta 4 s y el dosificador de pesticida que rebasa el error de control de $\pm 5\%$.

PALABRAS CLAVE: comunicación I2C, microcontrolador, PWM, control PID, dosificador.

2.2 INTRODUCCIÓN

A nivel mundial cada vez es más frecuente la mejora de la maquinaria agrícola mediante la integración de sistemas electrónicos, de control, informáticos y de teledetección. Esto significa diseños de sistemas cada vez más complejos, pero a la vez con ventajas significativas en su desempeño, facilitando la operación, el ajuste, la detección de fallos o la toma de decisiones al disponer de mayor información que permite realizar las actividades más adecuadas de acuerdo a las exigencias agronómicas del cultivo. Esto es conocido como tecnología de la agricultura de precisión (Bragachini *et al.*, 2004).

La Agricultura de Precisión (AP) es una disciplina que propugna, la adaptación de las técnicas de cultivo a las condiciones de cada punto del terreno, teniendo en cuenta además las necesidades de las plantas y la optimización de la utilización de insumos, para conseguir un cultivo rentable y racional en zonas pequeñas de una misma explotación agrícola (IDEA, 2010).

En cuanto a investigaciones realizadas al comparar la aplicación variable de insumos (una práctica de la AP) con respecto a la aplicación uniforme (práctica de la agricultura convencional), se tiene la siguiente situación: en maíz al realizar la aplicación variable de fertilizante nitrogenado se ha determinado que la rentabilidad es ligeramente superior a la aplicación uniforme (Maine *et al.*, 2009) y se han obtenido mejores resultados con un ahorro de insumos y un aumento de la producción (Bragachini *et al.*, 2010); con la aplicación variable de nitrógeno y fosforo en el cultivo de sorgo se han obtenido rendimientos significativamente mayores de 400 kg·ha⁻¹ y 338 kg·ha⁻¹ con respecto a la aplicación uniforme (Yang *et al.*, 2001); en el cultivo de trigo se obtuvieron mejores rendimientos con la aplicación variable de nitrógeno respecto a la uniforme (Bongiovanni, 2010). De acuerdo con las investigaciones que comparan la aplicación de insumos (semilla, fertilizante y pesticidas) a tasa variable con respecto a la aplicación uniforme, indican que la rentabilidad de los cultivos, se magnifica en cuanto mayor es la superficie y la variabilidad de los terrenos cultivados.

De acuerdo con Pierpaoli *et al.*, (2013) el mercado de la AP sigue siendo pequeño y en su etapa juvenil, y su limitada adopción se debe principalmente a la falta de recursos económicos, de habilidades y de competencia para implementarla y que para generalizarla entre los agricultores debe desarrollarse tecnología de bajo costo que le genere beneficios al agricultor.

En cuanto a las máquinas sembradoras-fertilizadoras empleadas en la AP, cuentan con sistemas mecatrónicos para accionar los dosificadores de semilla, fertilizante y pesticida con capacidad para realizar cambios continuos y en tiempo real de la dosis de aplicación, para ello utilizan como fuente de potencia el sistema hidráulico o eléctrico del tractor. Para el caso de las sembradoras-fertilizadoras que utilizan el sistema eléctrico del tractor, emplean motorreductores de 12, 24 o 48 VCD (volts de corriente directa) para accionar los dosificadores (Vélez *et al.*, 2014) y turbinas eléctricas de igual voltaje para generar la presión de vacío o positiva en los dosificadores de semilla. Los motores pueden accionar varios dosificadores de insumos a la vez o a uno sólo, de igual forma se realiza con la turbina.

Investigaciones realizadas por Mangesh *et al.*, (2015) y Bhagwatkar and Dhande (2013) hacen uso de la técnica PWM y control en lazo cerrado, controlan la velocidad de un motor de CD, incrementando o decrementando el ciclo de trabajo (duty cycle) de la señal PWM para alcanzar la velocidad deseada. Para ello el primero utilizó el microcontrolador ATmega328P y el segundo al AT-mega16. Moaid and Hashing (2013) realizaron el control de la velocidad de dos motores utilizando la técnica PWM y control en lazo cerrado, para ello utilizaron tres microcontroladores PIC16F877A en comunicación SPI (Serial Peripheral Interface), en el cual uno funciona como maestro y dos como esclavos. El maestro recibe las instrucciones de operación del usuario y las envía a los esclavos, estos últimos se encargan de controlar el funcionamiento de los motores. En estas investigaciones, ninguno implementa un control en lazo cerrado tipo PID, sino que únicamente incrementaron o disminuyeron el ancho de trabajo de la señal PWM, por lo que el control de la velocidad angular es lento.

Pretab *et al.*, (2014) utilizaron la interfaz entre Arduino UNO (basado en el microcontrolador ATmega328P) y LabView realizó el control de la velocidad de un motor de CD, utilizando la técnica PWM y control en lazo cerrado tipo PID. De la misma forma Petru and Mazen (2014) realizan el control de velocidad de un motorreductor que mueve a una banda transportadora. Deka *et al.* (2014) y Rabal and Mehta (2012), a diferencia de las investigaciones anteriores utilizan la interfaz entre un PIC16F877A y MATLAB/Simulink para controlar la velocidad del motor. El uso de la interfaz entre un microcontrolador con un programa como LabView o Matlab para controlar la velocidad de un motor, tiene la desventaja de ser más caro por la necesidad de adquirir los programas y el uso del computador.

En este trabajo se presenta el diseño electrónico, construcción y evaluación de un sistema mecatrónico (SM) desarrollado para controlar los dosificadores (semilla, fertilizante y pesticida granulado) y el sistema neumático de una sembradora-fertilizadora, así como la instrumentación necesaria para realizar mediciones de su velocidad de desplazamiento, nivel de los insumos en las tolvas y conteo de la semilla sembrada. Además que permita medir la cantidad de fertilizante y pesticida tirado por los dosificadores correspondientes y realizar el control del desplazamiento de una banda transportadora (para realizar la prueba con el estándar de la banda pegajosa descrito en ISO-7256/1).

El diseño electrónico del SM está basado en microcontroladores, utilizando un elemento maestro (Arduino MEGA basado en ATmega2560) y múltiples esclavos (ATmega328P) los cuales sostienen una comunicación bidireccional vía I2C. Cada microcontrolador cuenta con la electrónica requerida para realizar la función asignada, obteniendo así un módulo independiente.

Para realizar la labor de aplicación de insumos en campo el SM está constituido por ocho módulos y tres módulos más para realizar pruebas de laboratorio; los once módulos

funcionan como una unidad. El módulo maestro se encarga de controlar el funcionamiento general del sistema y de recibir las instrucciones de operación del usuario. Los siete módulos esclavos se encargan del control de los dosificadores, del sistema neumático, de la medición de la velocidad de desplazamiento de la sembradora, de la medición del nivel de insumos en las tolvas de la sembradora y del conteo de semilla en el tubo de descarga. Los módulos utilizados en las pruebas, controlan el desplazamiento de una banda transportadora y miden la masa de fertilizante y pesticida descargado por el dosificador correspondiente.

En el control de los dosificadores, para lograr la dosis deseada o requerida de aplicación de cada insumo, se realiza mediante el control de la velocidad angular de los dosificadores (disco semillero en el dosificador de semilla, barra-disco en el dosificador de fertilizante y rodillo ranurado en el dosificador de pesticida), para lo cual se utiliza la técnica modulación por ancho de pulso (PWM) y el control proporcional integral y diferencial (PID).

2.3 MATERIALES Y MÉTODOS

2.3.1 SEMBRADORA-FERTILIZADORA

El SM fue diseñado para adaptarse a la sembradora-fertilizadora modelo LC-U-N del fabricante Mexicano Sembradoras del Bajío S.A. de C.V. Las características más importantes de la máquina son las siguientes: 1) es una sembradora-fertilizadora diseñada para labranza de conservación; 2) utiliza un disco cortador dentado con diámetro de 0.435 m que a la vez funciona como rueda motriz; 3) presenta un sistema de transmisión por cadenas para dar accionamiento a los dosificadores; 4) la frecuencia de rotación máxima del disco cortador es de $146 \text{ rev}\cdot\text{min}^{-1}$, del disco semillero de $72 \text{ rev}\cdot\text{min}^{-1}$, de la barra-disco dosificador de $36 \text{ rev}\cdot\text{min}^{-1}$ y del rodillo ranurado de $145 \text{ rev}\cdot\text{min}^{-1}$

(considerando una velocidad de desplazamiento máxima de $12 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$); 4) la sembradora utiliza un dosificador de semilla de tipo neumático por presión de vacío. Las especificaciones de diseño que debe permitir el sistema mecatrónico, para el funcionamiento de la máquina una vez adaptado, se muestran en la Tabla 9.

Tabla 9. Especificaciones de diseño para el dispositivo.

Variable considerada	Seleccionados
Velocidad de avance de la sembradora	Máxima $12 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$
Distancia entre matas o semillas	4 a 40 cm
Dosis de fertilización	Máxima de $600 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$
Número de orificios del disco dosificador	10 a 150

Los motorreductores utilizados para controlar los dosificadores, son los siguientes: 1) en el dosificador de semilla se utilizó el motorreductor de la marca Currie Technologies, Modelo Electro Drive XYD-18A de 24 V de corriente directa (VCD), al cual se le fijó el codificador YUMO E6B2-CWZ3E de 1024 pulsos por revolución, la flecha del motorreductor se fijó a la flecha que acciona al disco semillero mediante una transmisión por cadena; 2) en el dosificador de fertilizante se utilizó un motorreductor de 350 W a 24 VCD y 500 rpm en vacío en la flecha del reductor, en la cual se acoplo la flecha que acciona al engranaje piñón-corona que mueve al dosificador de fertilizante (barra-disco), mediante una transmisión por cadenas, además en la flecha del motor fue fijado el codificador YUMO E6B2-CWZ3E; 3) en el dosificador de pesticida se utilizó al motorreductor EMG49 de 24 VCD, con una frecuencia de rotación en vacío de 160 rpm, torque máximo de 1.6 Nm y potencia de 34.7 W, el cual se acopló directamente a la flecha del dosificador de pesticida (rodillo ranurado).

2.3.2 DISEÑO DE LOS CIRCUITOS ELECTRÓNICO DE SM

El diseño del circuito electrónico del SM se realizó en el software proteus ver. 7.8 y la programación en Arduino ver. 1.0.5. Además, conforme se avanzó en la elaboración de los programas con su circuito electrónico correspondiente fue simulados su funcionamiento en Proteus, esto hasta que la complejidad del programa excedió la capacidad del software Proteus para realizar la simulación, por lo que fue necesario realizar la implementación de los circuitos y la programación de manera real en tarjetas protoboard hasta lograr el funcionamiento y diseño deseado.

2.3.3 MÉTODO DE PRUEBA

Después de diseñar y construir el SM se realizan pruebas en el laboratorio de la sembradora para caracterizar el desempeño de los módulos que llevan a cabo el control de los dosificadores, del sistema neumático y de la banda transportadora.

Para el caso del dosificador de fertilizante y pesticida se utilizó fertilizante urea comercial como material de prueba con un llenado en las tolvas del 80% de su volumen, ajuste de la salida del insumo (apertura de la compuerta de salida de fertilizante y palanca de posición del rodillo ranurado) en la posición que permite la máxima cantidad de descarga del insumo. En la prueba del dosificador de semilla se utilizó maíz plano medio con un disco semillero de 30 orificios, con un nivel de semilla en la tolva del 50% de su volumen y presión de vacío ajustada en la cámara de succión (PVCS) de 4kPa. El desempeño de los módulos de control de los dosificadores se caracterizó a diferentes frecuencias de rotación, de la siguiente forma: en el dosificador de semilla a 5, 21, 37, 53 y 70 $\text{rev}\cdot\text{min}^{-1}$; en el dosificador de fertilizante a 5, 12, 20, 27 y 35 $\text{rev}\cdot\text{min}^{-1}$; y en el dosificador de pesticida (10, 42, 75, 107 y 140 $\text{rev}\cdot\text{min}^{-1}$). Para cada frecuencia de rotación se realizaron cinco repeticiones. El desempeño del módulo para el control de la presión de vacío del

sistema neumático se realizó utilizando tres presiones y diferentes frecuencias de rotación del disco sembrero, como a continuación se indica: 2 kPa a 5 rev·min⁻¹; 3 kPa a 21, 37 y 53; y 5 kPa a 70 rev·min⁻¹. Además, la prueba se realizó con semilla en la tolva de la sembradora al 50% de su capacidad.

La caracterización del desempeño del módulo para el control de la velocidad de la banda transportadora se realizó para tres velocidades de 4, 6 y 8 km·h⁻¹.

2.4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

2.4.1 DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE LOS ELEMENTOS MECÁNICOS DEL SM DE LA MÁQUINA

En la Figura 18 se presentan las modificaciones de la sembradora al instalar los sensores y actuadores a los dosificadores.



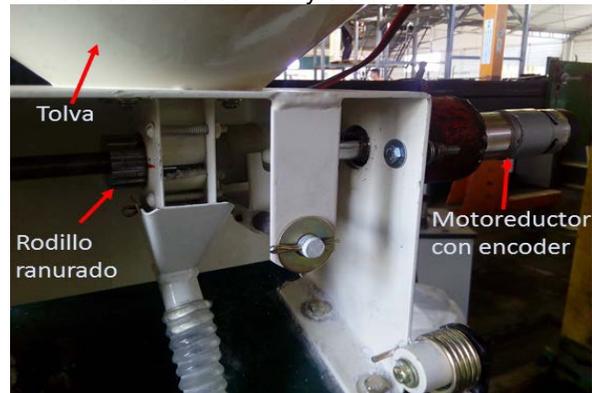
a. Sembradora-fertilizadora



b. Dosificador de semilla y sistema neumático.



c. Dosificador de fertilizante



d. Dosificador de pesticida

Figura 18. Sembradora-fertilizadora y motores fijados a los dosificadores.

2.4.2 SISTEMA MECATRÓNICO (SM)

A pesar de que el SM diseñado está constituido por diferentes módulos, este funciona como una unidad y dentro del cual pueden distinguirse las siguientes componentes (Figura 19a), que son: 1) Unidad de procesamiento y control, constituido por los microcontroladores maestro y esclavos; 2) Fuente de energía constituido por una batería de 24 o 36 VCD o terminal eléctrica de 110 a 120 VCA (se utiliza en pruebas); 3) Convertidor de voltaje, se utiliza para ajustar el voltaje y suministro de corriente de acuerdo a los requerimientos de cada elementos utilizados en el sistema; 4) Convertidor de potencia, se utiliza para suministrar el voltaje y corriente requeridos por los actuadores, y aislar la unidad de procesamiento de la unidad de potencia; 5) actuadores (cuatro motorreductores, un servomotor y una turbina); 6) sensores (cinco codificadores, dos sensores de presión, tres sensores ultrasónicos y dos celdas de carga); 7) unidad de visualización (display de cristal líquido de LCD16x4 y LCD16x2); 8) unidad de control del usuario (teclado hexadecimal); 9) unidad de almacenamiento (SD-CARD y la memoria EEPROM del microcontrolador).

El SM utiliza un control PID para los dosificadores, sistema neumático y banda transportadora, como se muestra en el diagrama del sistema de control (Figura 19b). En el diagrama se muestra el flujo de información entre el módulo maestro y los módulos esclavos.

El SM permite seleccionar cinco modos de funcionamiento para los esclavos a través del teclado hexadecimal, que son los siguientes: 1) modo cero, inactiva a todos los módulos y se consigue cuando se prende el sistema o cuando así lo selecciona el usuario; 2) el modo uno, permite al usuario introducir los valores requeridos de las variables utilizadas para la correcta ejecución de la aplicación de insumos en campo; 3) el modo dos, permite

ejecutar la aplicación de insumos en campo; 4) el modo tres, permite al usuario introducir los valores de las variables requeridas para realizar las prueba o calibración de la máquina; 5) el modo cuatro, permite realizar las pruebas de laboratorio o calibración de los dosificadores.

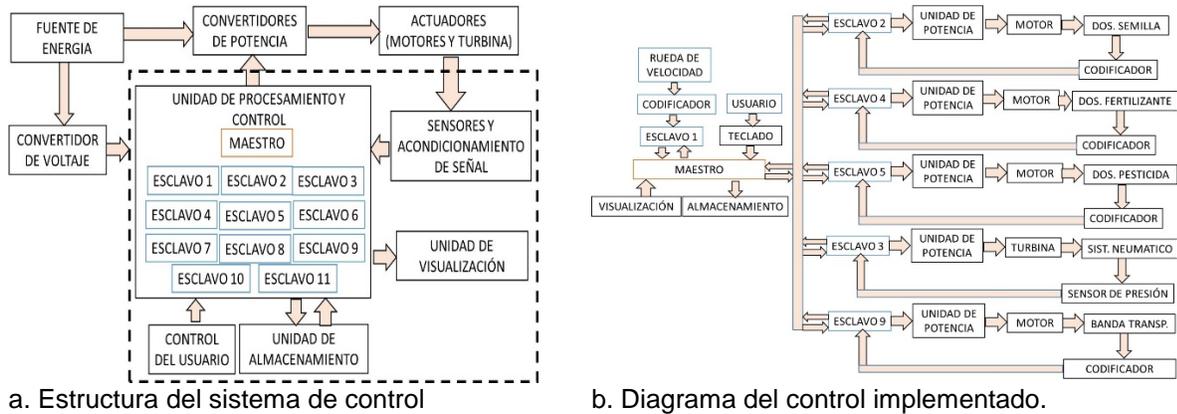


Figura 19. Diagrama y esquema del sistema diseñado.

En la Figura 20 se muestra un esquema que permite al usuario observar las diferentes opciones que pueden ser seleccionadas, a través del teclado hexadecimal, para operar al SM. Al iniciar su funcionamiento despliega un menú principal que permite seleccionar las siguientes opciones: el ajuste de funciones y la ejecución de funciones. Al seleccionar el ajuste, permite fijar los valores de las variables utilizadas al ejecutar las funciones programadas, como son: A) fijar la hora correcta en el reloj de tiempo real; B) fijar los valores de las variables requeridas para la aplicación de insumos en campo en dos modos de operación manual y automático; C) introducir los valores de las variables que permite medir el nivel de insumos en las tolvas.

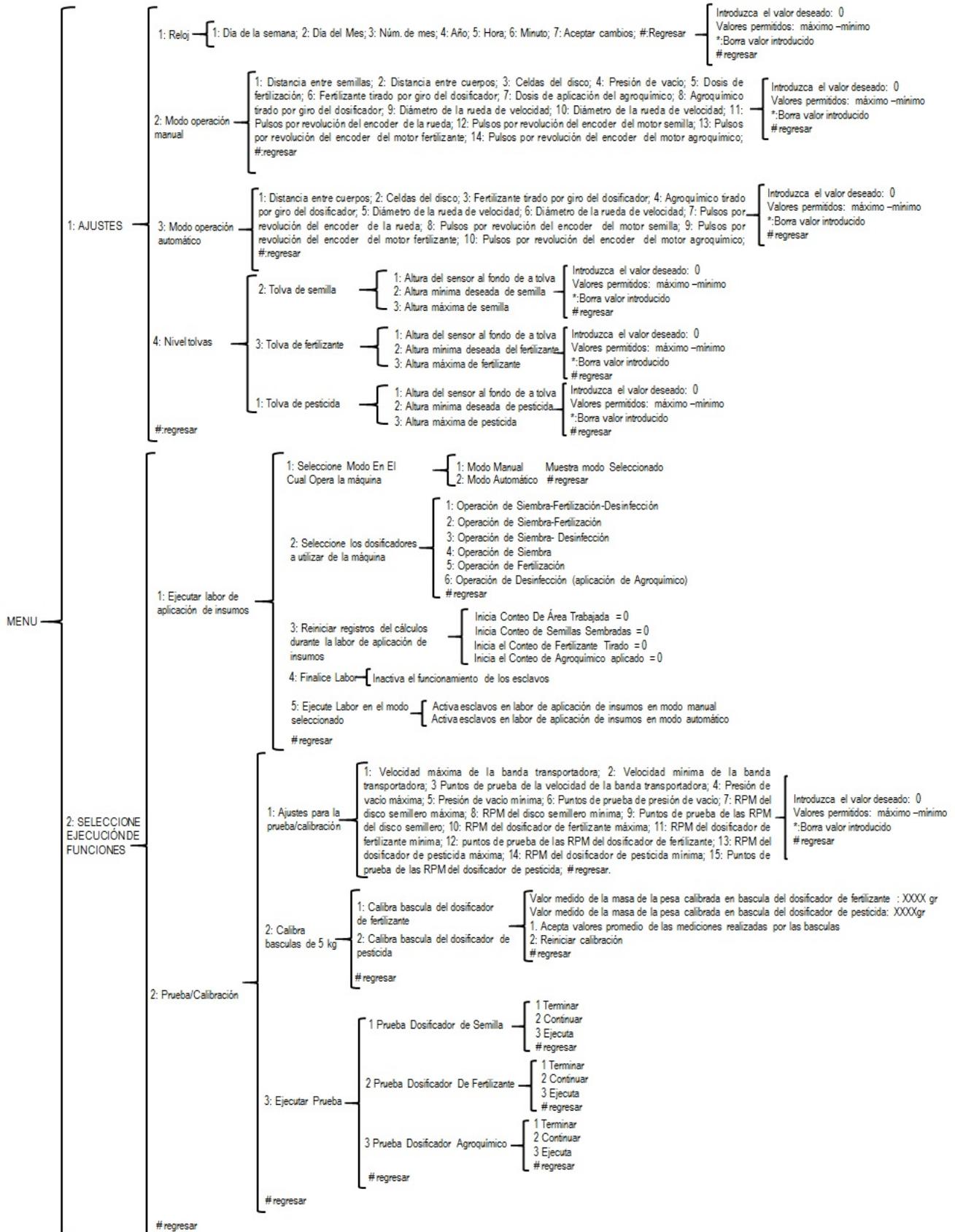


Figura 20. Menú de opciones de trabajo programadas en el módulo maestro (Arduino MEGA).

Al seleccionar la ejecución de funciones, permite seleccionar dos opciones: 1) aplicación de insumos; 2) ejecución de la prueba o calibración. En el primer caso permite seleccionar las siguientes opciones: A) modo de operación (automático o manual), actualmente el modo automático funciona igual que el modo manual debido a que no se tiene implementado la lectura de la ubicación de un GPS y los datos de las dosis de aplicación de los insumos de acuerdo a la posición de la máquina dentro del terreno de cultivo; B) permite seleccionar cual o cuales dosificadores se utilizaran; C) permite reiniciar los registros que almacenan información relevante acerca de la labor de aplicación en campo; D) inicia la aplicación de insumos o el funcionamiento de la máquina; E) Finaliza la aplicación.

Ejecución de la prueba o calibración, permite seleccionar las siguientes opciones: A) fijar los valores de las variables utilizadas en la prueba-calibración de la máquina; B) Permite realizar el ajuste o calibración de las basculas de 5 kg; C) permite seleccionar el dosificador que será probando.

En la Figura 21 se muestra la información que fluye entre los módulos cuando la aplicación de insumos esta activa. Además de la información que es fijada por el usuario para las variables utilizadas al ejecutar dicha labor, de acuerdo al esquema de la Figura 20, la cual es almacenada en la memoria EEPROM del microcontrolador ATmega2560 del Arduino. Este a su vez, envía la información requerida por los módulos esclavo para su adecuado funcionamiento, los cuales la reciben y almacenan en su memoria interna EEPROM (Figura 21).

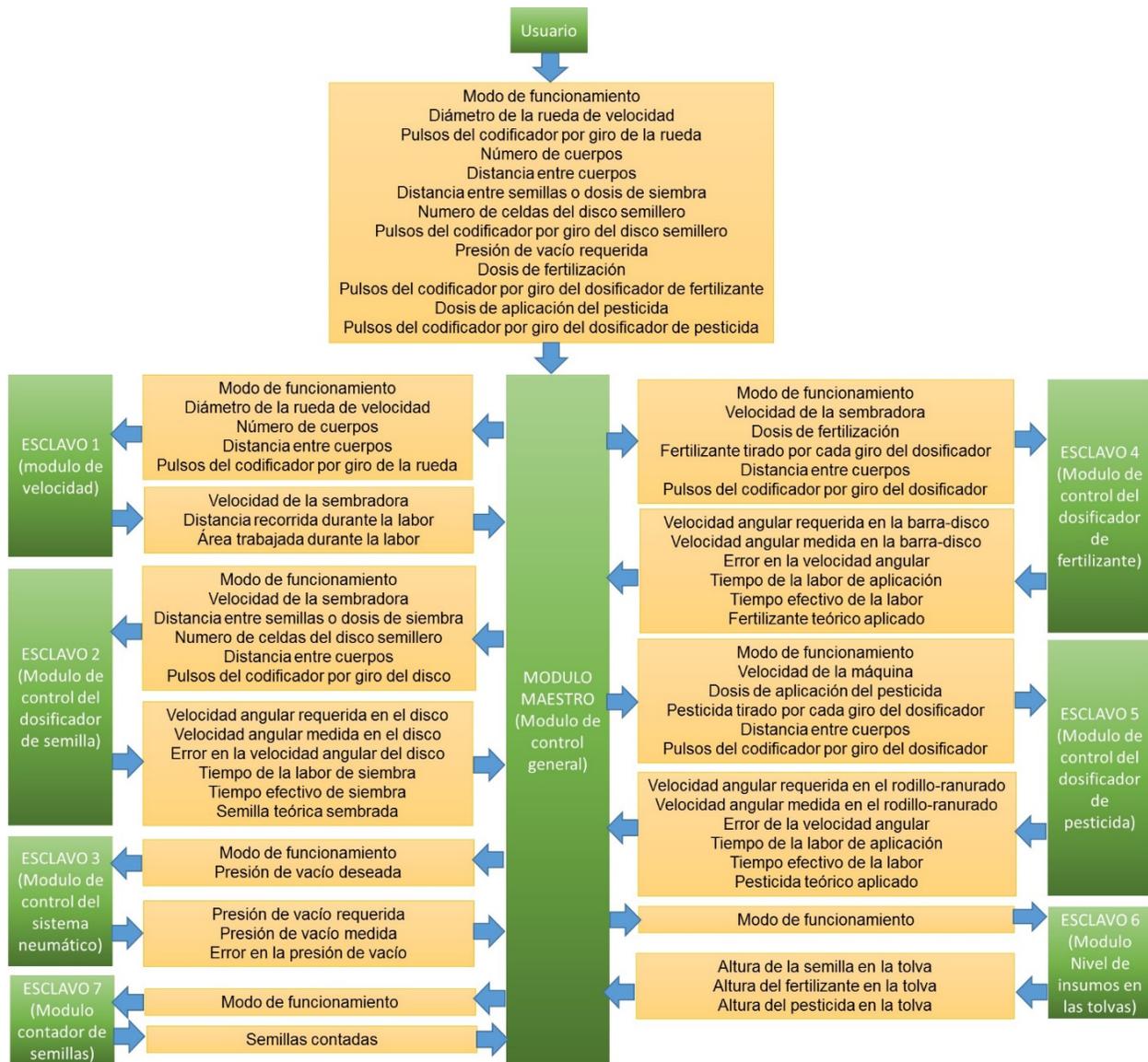


Figura 21. Transmisión de información en el SM en modo de aplicación de insumos.

Durante la aplicación de insumos, la información que recibe el módulo maestro de los módulos esclavo la almacena en la SDCARD. En modo automático las variables utilizadas por los módulos esclavos, durante la aplicación de insumos, son constantemente actualizadas, estas variables son: la velocidad de desplazamiento de la sembradora, distancia entre semillas, dosis de fertilización, dosis de aplicación de pesticidas y presión de vacío deseada.

La velocidad de desplazamiento de la sembradora la determina el módulo esclavo uno, mediante la frecuencia de pulsos enviado por un codificador fijado a una rueda que a su vez se fija a la sembradora, la cual gira libremente al tener contacto con el suelo cuando se desplaza la máquina. La medición de la velocidad la realiza seis veces por segundo, y envía una señal al módulo maestro, este último la identifica y actualiza la información de los módulos esclavo requerida para su operación (información que debe ser constantemente actualizada durante la aplicación de insumos) y solicita a los esclavos la información de su desempeño y la almacena en la memoria SDCARD de acuerdo a lo indicado en la Figura 21.

Cuando se implementa la función de pruebas o calibración del SM, el flujo de información entre los diferentes módulos se realiza de acuerdo a lo indicado en la Figura 22. En este modo de operación, el dosificador del insumo seleccionado se hace funcionar un número determinado de giros a una frecuencia de rotación definidos por el usuario; y se activa el módulo esclavo correspondiente para medir la masa del insumo en la descargada del dosificador o para controlar la velocidad de desplazamiento de la banda transportadora.

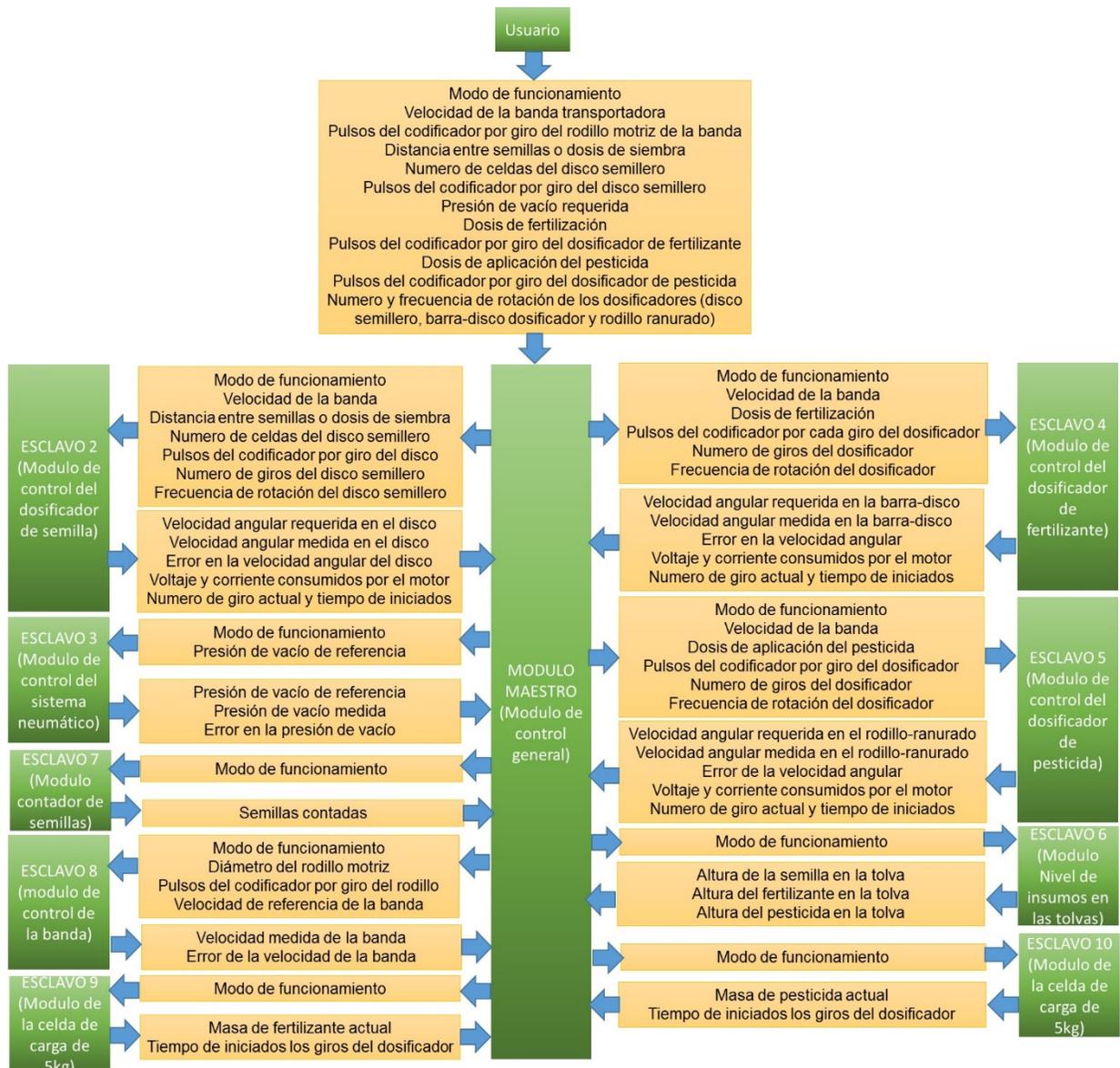


Figura 22. Transmisión de información en el SM en modo de funcionamiento de pruebas.

2.4.3 DISEÑO ELECTRÓNICO

2.4.3.1 Circuito electrónico del módulo maestro

El módulo maestro utiliza al Arduino MEGA basado en el microcontrolador ATmega2560 como unidad de procesamiento y control, además de los siguientes elementos: teclado matricial, pantalla de cristal líquido LCD20x4, adaptador para SD-CARD, reloj de tiempo

real DS1307 y las conexiones que permiten la comunicación con los módulos esclavo (Figura 23). En él se implementa el programa del menú de funciones del SM presentado en la Figura 20.

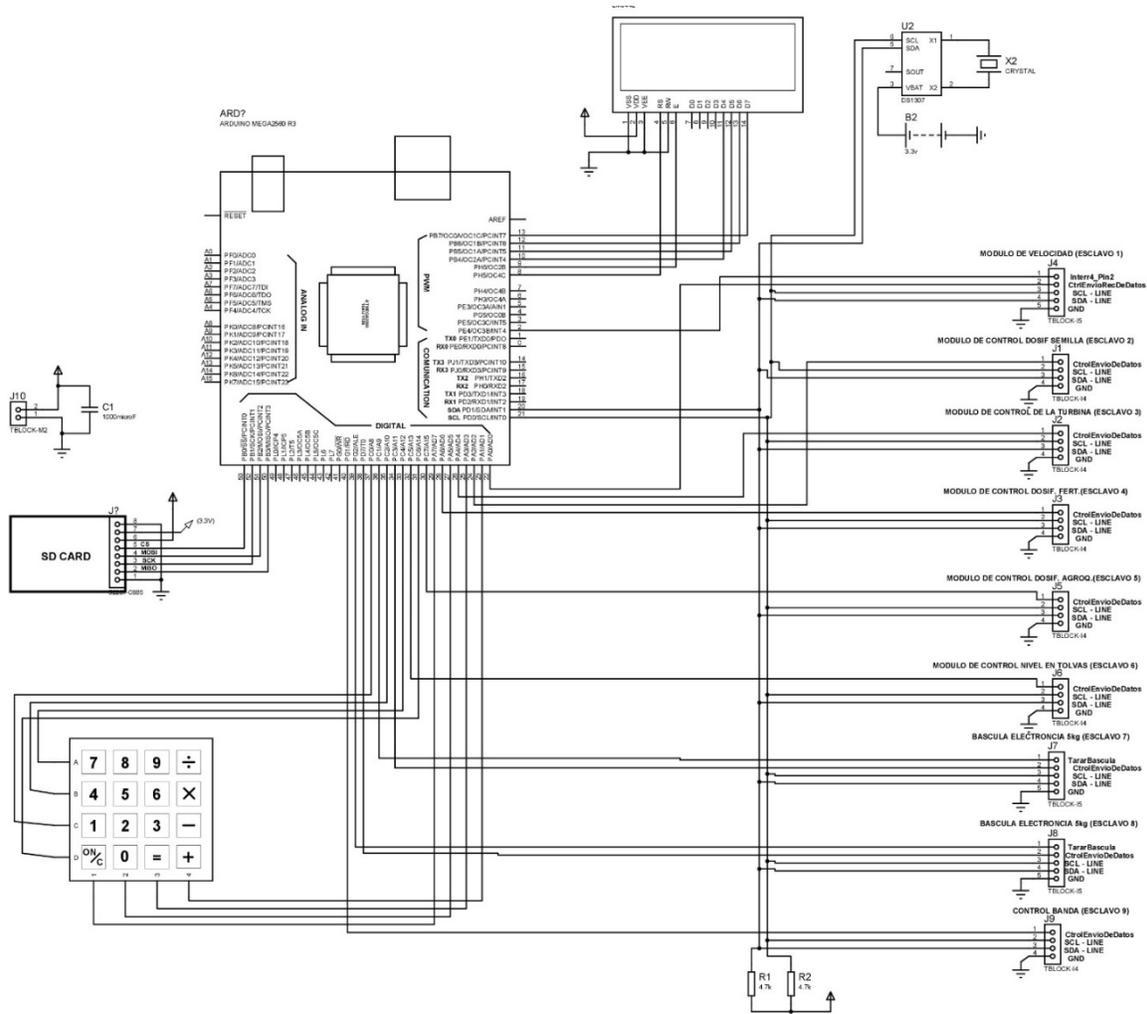


Figura 23. Módulo del circuito maestro.

Utiliza una interrupción externa en el pin 2 (interrupción 0) donde recibe la señal del módulo esclavo que le indica cuando se ha actualizado la velocidad de desplazamiento de la sembradora, momento en el cual actualiza la información de operación de los esclavos y recibe de ellos la información correspondiente a su funcionamiento. La

información la guarda en una memoria SDCARD y la relevante la muestra en la LCD20x4 y la envía vía comunicación serial USART (Rx-Tx).

2.4.3.2 Circuito electrónico de los módulos de control de los dosificadores

La Figura 24 muestra el diagrama electrónico de los módulos de control de los dosificadores. El cual cuenta con un microcontrolador ATmega328P como unidad de procesamiento y control, utiliza como unidad de potencia una fuente de alimentación de 24 a 36VCD, dos transistores de potencia MJ11032 con una configuración en paralelo para amplificar la señal PWM que alimenta al motorreductor, además se colocan dos sensores uno para medir voltaje (basado en un potenciómetro) y otro de corriente (ACS712) para determinar el consumo de potencia del motorreductor y un circuito para el acondicionamiento de la señal. Para conectar el motorreductor se utilizan optoacopladores para aislar la unidad de potencia de la unidad de procesamiento y control. Utiliza una pantalla de cristal líquido LCD20x4; conexiones para la fuente de alimentación de 5VCD y otra de 24 a 36VCD; así como las conexiones para el módulo maestro y computadora.

En los módulos de control de los dosificadores se configuran dos interrupciones externas pin 4 y 5 (interrupción 0 y 1) para detectar cambios por subida y bajada en la señal recibida (señal de 5 VCD). La señal recibida es generada por los codificadores, fijados a la flecha de los motorreductores, en sus dos líneas de salida A y B. El microcontrolador realiza el conteo de dos cambios por cada pulso recibido en las líneas de salida del codificador; por lo que, para los codificadores de 1024 pulsos generados en cada línea A y B, el microcontrolador cuenta 4096 cambios (dosificador de semilla y fertilizante) y para

el codificador de 245 pulsos el microcontrolador cuenta 980 cambios (dosificador de pesticida).

Se configura la interrupción externa pin-change del Pin 14 (PCINT0) del microcontrolador, para identificar el momento en el cual el módulo maestro inicia la comunicación con el módulo esclavo correspondiente.

Se configura el Timer 1 para obtener una mayor resolución de salida de la señal PWM en los pines 15 y 16 modificando el intervalo de valores del ancho de pulso de la señal (duty cycle) inicialmente de 0 a 255 cambiando de 0 a 1023, lo que permite realizar ajustes más pequeños de la velocidad angular de los dosificadores y con ello un control más preciso.

También se configura el Timer 2 para generar tiempos exactos de 16384 μ s, tiempo en el cual se realiza el conteo de cambios en la señal recibida por las líneas de salida A y B del codificador, lo cual permite determinar la frecuencia de giro o velocidad angular de las flechas de los motorreductores, y con ello de los dosificadores utilizando la relación de transmisión existente entre estos.

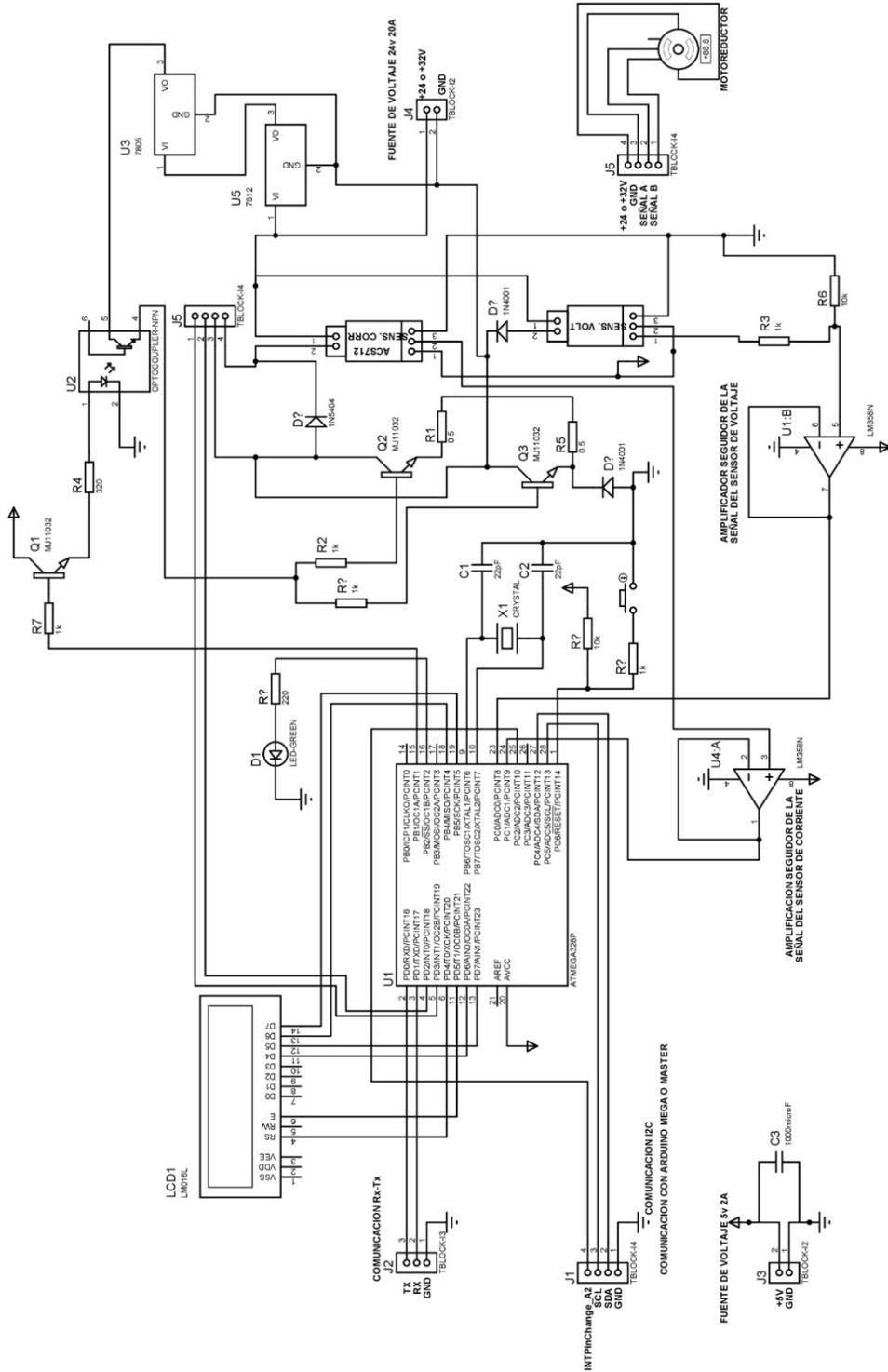


Figura 24. Módulo de control de los dosificadores.

2.4.3.3 Circuito electrónico del módulo de control del sistema neumático.

En la Figura 25 se muestra el diagrama electrónico del módulo de control del sistema neumático. Este módulo utiliza el microcontrolador ATmega328P y como unidad de potencia para realizar las pruebas se utilizó una turbina de 110 a 120 VCA, la cual debe ser reemplazada por una turbina alimentada con 24 a 36 VCD (de igual potencia, presión estática y flujo de aire) para su uso normal en la máquina. El encendido de la turbina se realiza con el uso de un relevador el cual es activado por un optoacoplador; y para controlar la presión de vacío en la cámara de succión, se utiliza un servomotor al cual se le acopla una compuerta, que permite ajustar la entrada de aire en la línea de succión del sistema neumático.

En el sistema neumático se instalan dos sensores de presión absoluta MPX4115, uno fijado al interior de la cámara de succión y otro al exterior de la misma, permitiendo obtener la presión de vacío de la cámara de succión al obtener la diferencia entre las dos medidas de los sensores. También utiliza una pantalla de cristal líquido LCD16x2, así como las conexiones para la fuente de alimentación de 5VCD, módulo maestro y computadora.

En este módulo también se configura la interrupción externa pin-change del Pin 14 (PCINT0) del microcontrolador, para identificar el momento en el cual el módulo maestro inicia la comunicación. Además, se configura el Timer 2 para generar tiempos exactos de 16384 μ s, tiempo en el cual se realizan mediciones de la presión atmosférica y presión al interior de la cámara de succión, estos valores son resultado de un promedio de mediciones que permiten determinar la presión de vacío.

2.4.3.4 Diagrama electrónico del módulo de velocidad

El módulo utilizado en la medición de la velocidad de desplazamiento de la sembradora-fertilizadora (Figura 26), utiliza al microcontrolador ATmega328P; para medir el desplazamiento de la sembradora-fertilizadora se utiliza el codificador YUMO E6B2-CWZ3E, el cual es fijado a una rueda que gira libremente al contacto con el suelo durante el desplazamiento de la máquina. Esto permite medir la distancia recorrida con base al número de giros de la rueda y pulsos generados por el codificador en un tiempo de 16438 μ s lo que permite determinar la velocidad de desplazamiento de la máquina. El módulo utiliza una LCD16x2 para presentar la velocidad medida; conexiones para la fuente de alimentación de 5 VCD; así como las conexiones para el módulo maestro y computadora. En este módulo, se configuran dos interrupciones externas pin 4 y 5 (interrupción 0 y 1) para detectar cambios por subida y bajada en las señales recibidas (señal de 5 volts) del codificador en sus líneas de salida A y B. En este caso el codificador genera 1024 pulsos en cada línea de salida A y B del codificador por giro de la rueda donde es fijado, y el microcontrolador cuenta 4096 cambios.

Se configura la interrupción externa pin-change del Pin 14 (PCINT0) del microcontrolador, para identificar el momento en el cual el módulo maestro inicia la comunicación I2C con

él esclavo. Además, se configura el Timer 2 para generar tiempos exactos de 16384 μ s, tiempo en el cual se realiza el conteo de cambios en la señal recibida a través de las líneas de salida A y B del codificador. Cada vez que se determina o actualiza la velocidad se envía una señal al módulo maestro a través del Pin 17.

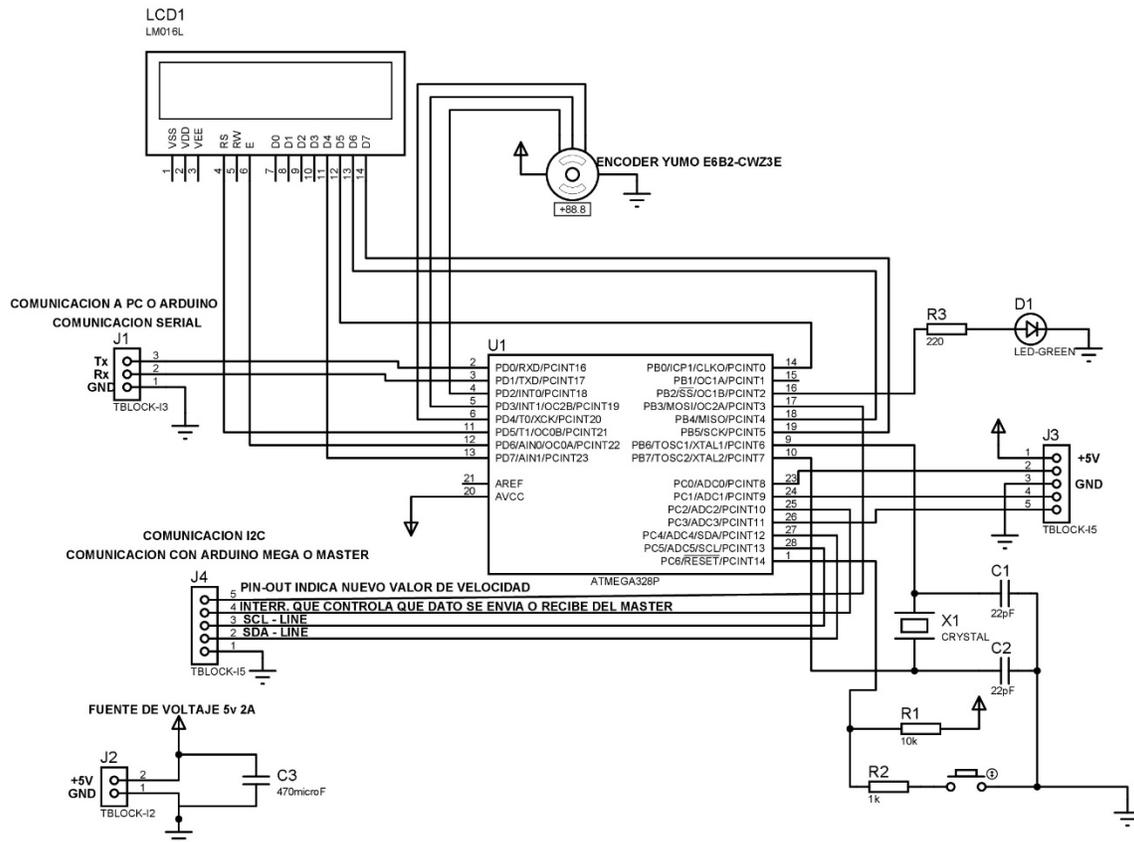


Figura 26. Módulo de control de los dosificadores.

2.4.3.5 Diagrama electrónico del módulo de control de la banda transportadora

Este módulo permite controlar la velocidad de desplazamiento de una banda transportadora (Figura 28). Para ello se utiliza un motorreductor de CD que acciona a la banda, permitiendo alcanzar una velocidad de referencia (fijada por el usuario) mediante una señal de alimentación PWM y control PID. Al motorreductor se le fija un codificador

YUMO E6B2-CWZ3E para determinar la velocidad de desplazamiento de la banda y con ello la señal de realimentación.

En la Figura 27 se muestra el diagrama electrónico del módulo de control de la banda transportadora. El módulo cuenta con: el microcontrolador ATmega328P el cual genera la señal PWM y realiza el control PID; unidad de potencia constituida por una fuente de alimentación de 90VCD, tres transistores de potencia MJ11032 con una configuración en paralelo para amplificar la señal PWM; para activar o desactivar los transistores de potencia, se utiliza un optoacoplador para aislar la unidad de potencia de la unidad de procesamiento y control; pantalla de cristal líquido LCD20x4; conexiones para la fuente de alimentación de 5VCD y 90 VCD; así como las conexiones al módulo maestro y computadora.

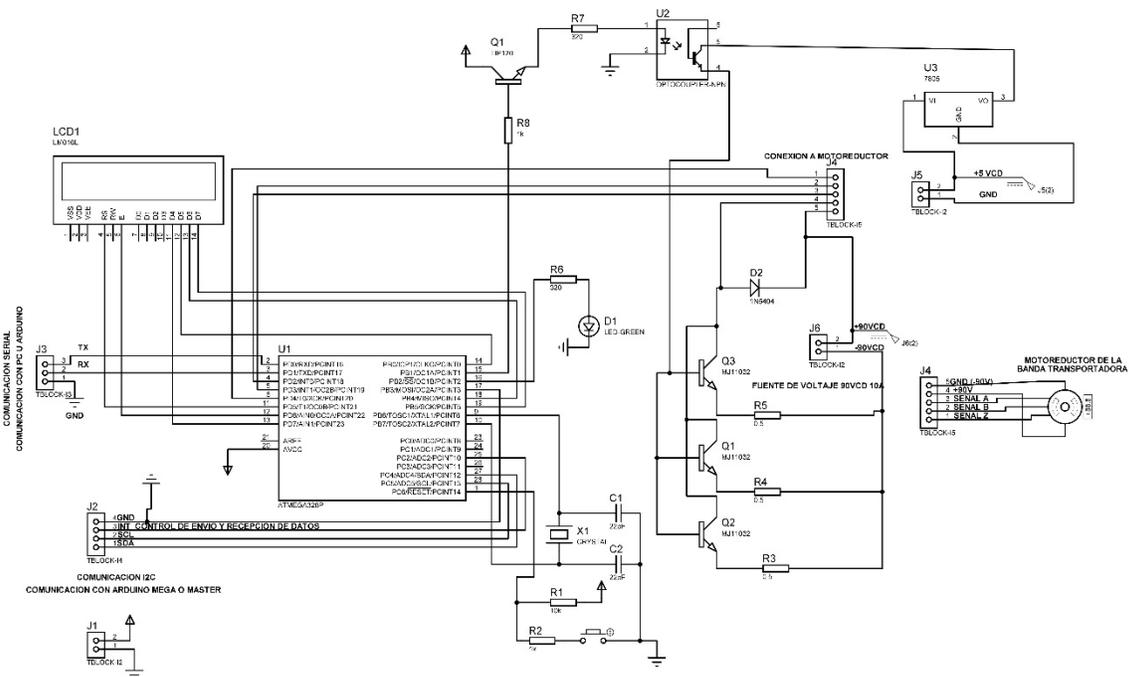
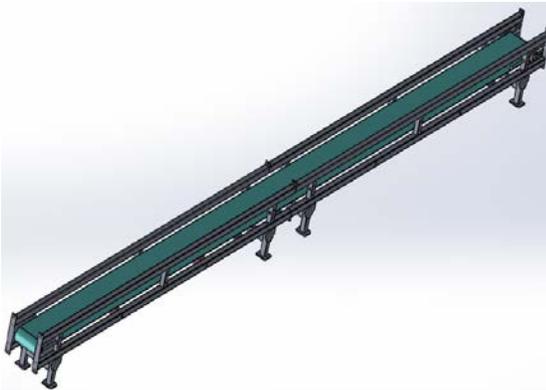


Figura 27. Módulo de control de la banda transportadora.

En este módulo, se configuran dos interrupciones externas pin 4 y 5 (interrupción 0 y 1) para detectar cambios por subida y bajada en las señales recibidas (señal de 5 volts) del

codificador en sus líneas de salida A y B. Como ya se ha indicado el codificador genera 1024 pulsos por giro en cada línea de salida y el microcontrolador cuenta 4096 cambios. Se configura la interrupción externa pin-change del Pin 14 (PCINT0) del microcontrolador, para identificar el momento en el cual el módulo maestro inicia la comunicación con este módulo esclavo.



a. Dibujo de la banda transportadora.



b. Banda transportadora construida.

Figura 28. Banda transportadora.

Además, se configura el Timer 2 para generar tiempos exactos de $16384 \mu\text{s}$, tiempo en el cual se realiza el conteo de cambios en la señal recibida a través de las líneas de salida A y B del codificador y con el diámetro del rodillo motriz se determinará la velocidad de desplazamiento de la banda. De la misma forma que para los módulos de control de los dosificadores, se configura el Timer1 para fijar el ancho de pulso (duty cycle) de la señal PWM en los pines 15 y 16 en el intervalo de 0 a 1023.

2.4.3.6 Diagrama electrónico del módulo de las celdas de carga de 5 kg.

Se utilizan dos módulos como los que se muestran en la Figura 29a y b, uno para medir la masa tirada por el dosificador de fertilizante y otro para el dosificador de pesticida. Esta medición se hace cuando se requiere determinar la cantidad de insumo tirado por cada giro del dosificador, lo cual se realiza durante la prueba o calibración de los dosificadores.

En la Figura 30 se muestra el diagrama electrónico del módulo para medir la masa de los insumos. El módulo cuenta con: un microcontrolador ATmega328P; celda de carga de 5 kg; acondicionamiento de señal utilizando el amplificador HX711; pantalla de cristal líquido LCD16x2; conexiones para la fuente de alimentación de 5VCD; así como las conexiones para el módulo maestro y computadora.



a. Báscula de 5 kg en calibración.



b. Bascula fijada para medir la masa de fertilizante.

Figura 29. Módulo de la báscula de 5 kg.

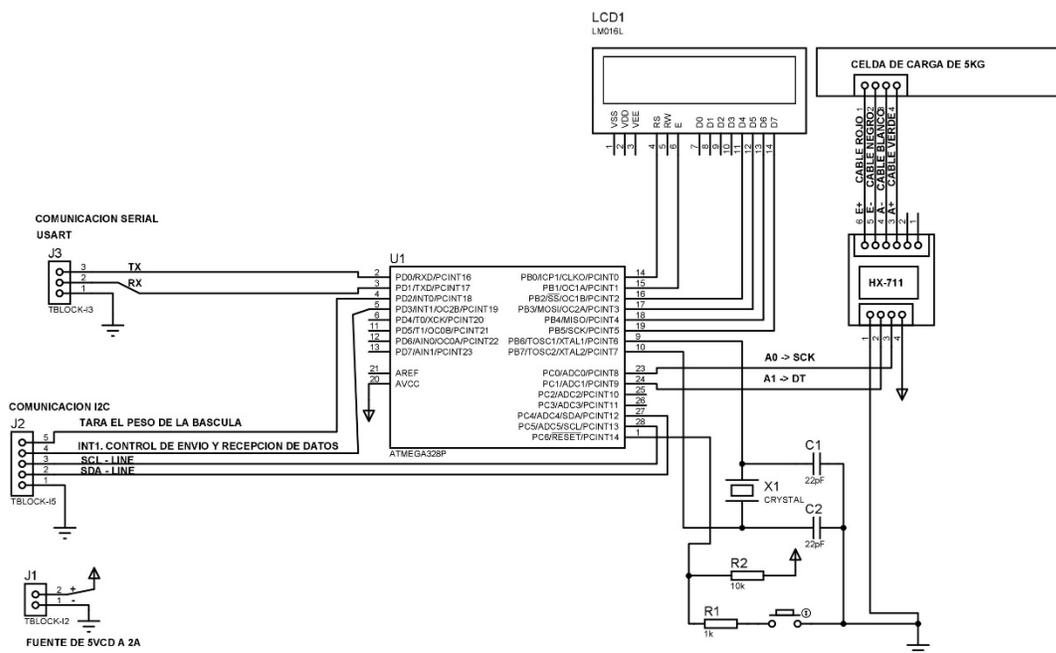


Figura 30. Módulo de la celda de carga de 5 kg.

Se configura la interrupción externa del Pin 4 (INT0) para realizar la tara de la báscula o puesta a cero de la medición actual, lo cual lo ejecuta el módulo maestro. Además de la interrupción del Pin 5 (INT0), para identificar el momento en el cual el módulo maestro inicia la comunicación.

2.4.3.7 Diagrama electrónico del módulo para determinar el nivel en las tolvas.

Este módulo, se utiliza para medir la altura del insumo dentro de las tolvas e identificar cuando se tiene material insuficiente en alguna de ellas, y es necesario realizar la recarga durante labor de aplicación de insumos.

En la Figura 31 se muestra el diagrama electrónico del módulo para medir la cantidad o altura del insumo en las tolvas. El módulo utiliza, lo siguiente: un microcontrolador ATmega328P; tres sensores SRF04; pantalla de cristal líquido LCD20x4; conexiones para la fuente de alimentación de 5VCD; así como las conexiones al módulo maestro y computadora.

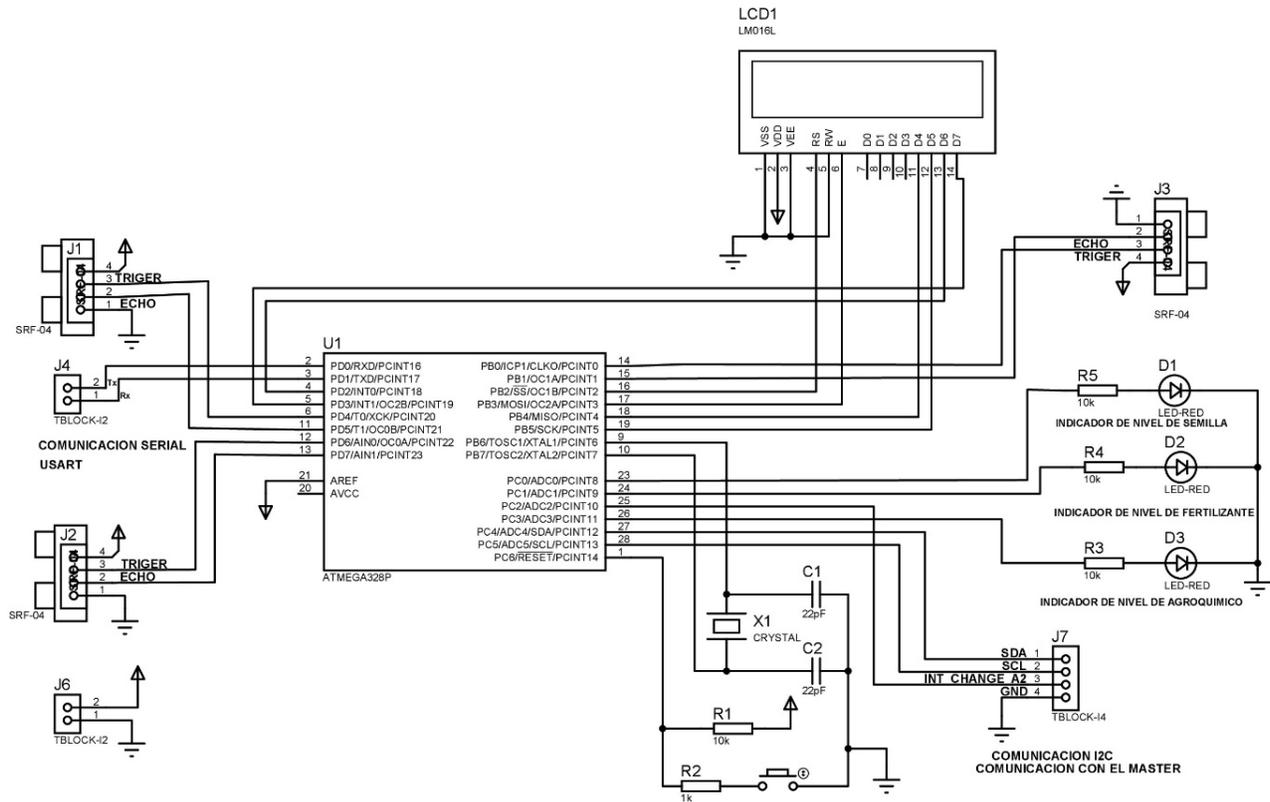


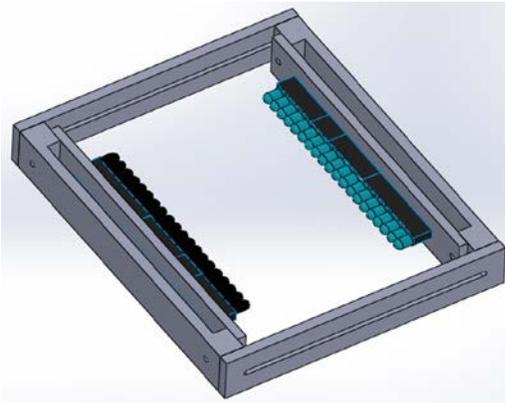
Figura 31. Módulo de control de la banda transportadora.

2.4.3.8 Diagrama electrónico del módulo contador de semilla.

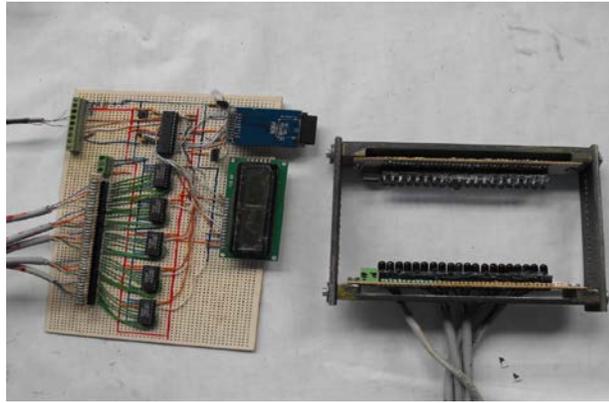
En la Figura 31 se muestra el diagrama electrónico del módulo contador de semilla. El módulo utiliza, lo siguiente: un microcontrolador ATmega328P; cinco expansores PCF8574 (Palacios *et al.*, 2004); 40 led's IR de radiación infrarroja (IR383); 40 fotodiodos (PT1302BC); pantalla de cristal líquido LCD16x2; adaptador SD-CARD; conexiones para la fuente de alimentación de 5VCD; así como conexiones al módulo maestro y computadora.

El módulo cuenta con un marco rectangular o cuadrado en el cual se colocan dos líneas de diodos led IR y en contraposición se colocan fotodiodos (sensibles a la radiación infrarroja) dispuestos de igual manera en arreglo lineal a una distancia ajustable de 0.05 a 0.1 m, como se observa en la Figura 32. Cada línea del expansor PCF-8574 (de sus 8

líneas de entrada/salida) se conecta a un fototransistor con una resistencia de 10 kΩ a tierra, en la Figura 31 sólo se representa la conexión de una línea en cada integrado PCF8574.



a. Marco y disposición de los leds y fotodiodos.



b. Tarjeta del módulo contador de semilla.

Figura 32. Módulo contador de semilla.

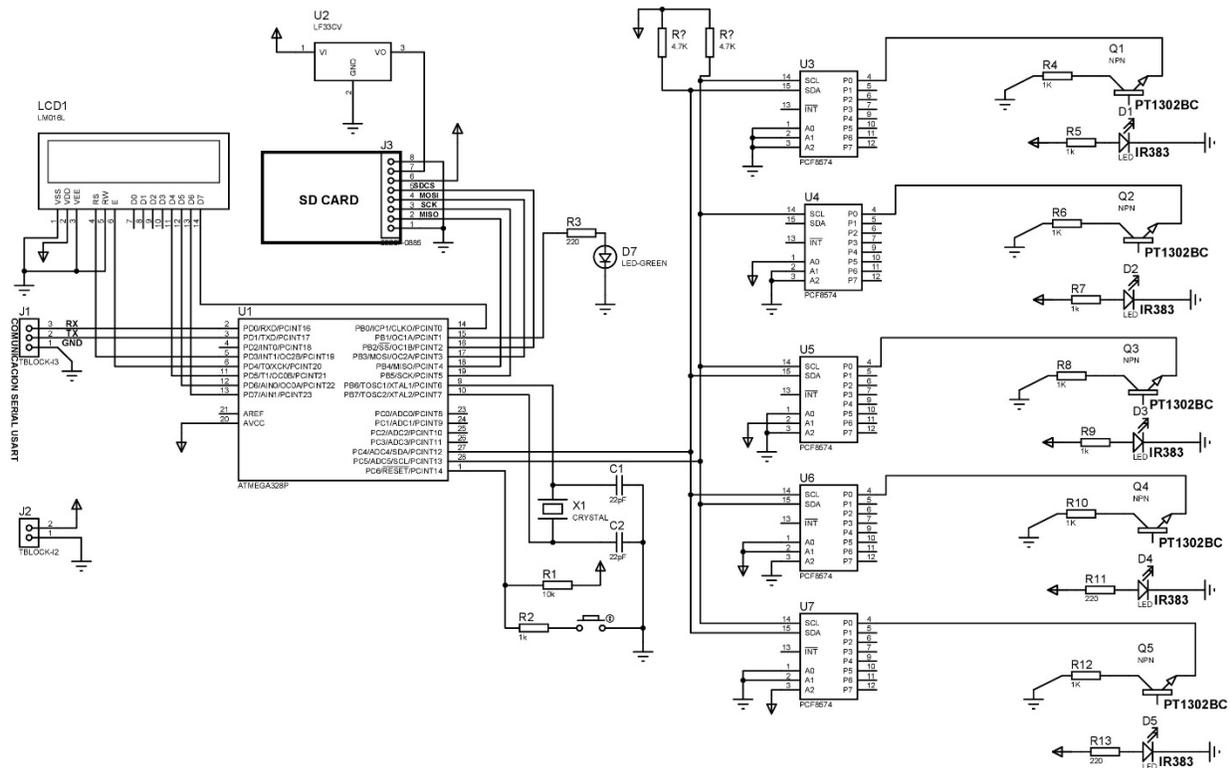


Figura 33. Módulo contador de semilla.

El funcionamiento del módulo para el conteo de semillas, es el siguiente: cuando no existe obstrucción entre algún fotodiodo y led IR el voltaje en la línea que une al fotodiodo con el expansor de pines PCF8574 es de 0 VCD, pero al haber una obstrucción entre el led IR y el fotodiodo la tensión se eleva a 5 VCD y cuando la obstrucción desaparece vuelve al valor de 0 VCD. Esto sucede durante la caída de la semilla proveniente del tubo de descarga de la sembradora, que atraviesa el marco en el cual se fijan los diodos y fotodiodos. El cambio de voltaje en alguna de las líneas de entrada de los expansores PCF8574 es leído por el microcontrolador ATmega328P mediante una comunicación I2C. El módulo registra el conteo de semillas y tiempo entre semillas y lo envía vía comunicación serial USART (que puede ser recibida por una computadora) y lo presenta en una LCD16x2.

A consecuencia de que la comunicación del microcontrolador ATmega328P con los expansores PCF8574 es vía I2C, este módulo no mantiene una comunicación I2C con el módulo maestro. Por lo anterior, cada vez que se identifica el paso de una semilla únicamente envía un pulso al módulo maestro, el cual lo identifica a través de una interrupción externa contabilizando el número pulsos y tiempo entre pulsos.

2.4.4 RESULTADOS DE LAS PRUEBAS EN LABORATORIO

Los módulos que controlan al dosificador de semilla y fertilizante, permiten alcanzar el estado estacionario en el control de la frecuencia de rotación de los dosificadores o dosis de aplicación de insumos (considerando el valor deseado o de referencia), con una rapidez aproximada de dos segundos, lo que puede considerarse en tiempo real (Figura 34a y Figura 34c). Lo anterior se experimentó para cinco frecuencias de rotación que

abarca el intervalo de operación de los dosificadores durante el trabajo en campo (incluyendo al valor máximo y mínimo).

El módulo que controla al dosificador de pesticida permite alcanzar la frecuencia de rotación de referencia en el dosificador o dosis de aplicación deseada en aproximadamente dos segundos, pero no logra alcanzar el estado estacionario de la frecuencia de rotación medida (Figura 34d) presentando oscilaciones que superan el $\pm 5\%$, ocasionados por las perturbaciones que provocan los cambios del torque requerido para mover el rodillo acanalado al dosificar el material de prueba. Este comportamiento se presentó en las cinco frecuencias de rotación de prueba, que abarcan el intervalo de operación del dosificador, con el cual se trabaja en campo (incluyendo al valor máximo y mínimo).

El módulo que controla la banda transportadora, permite alcanzar el estado estacionario de la velocidad de la banda (señal de control) con respecto a la velocidad de referencia en aproximadamente un segundo (Figura 34c). Este comportamiento se presentó en tres velocidades de prueba de la banda.

En general, al analizar los resultados obtenidos en las pruebas cuyos resultados se presentan en la Figura 34, se puede decir que, el diseño electrónico basado en microcontroladores permite controlar diferentes variables a la vez en una sembradora-fertilizadora, comparable a los sistemas utilizados en sembradoras-fertilizadoras de dosificación variable utilizadas en AP considerando la rapidez con la cual se alcanza la dosis de aplicación deseada (Tola *et al.*, 2008 y Sartori *et al.*, 2015).

El uso de los optoacopladores, para aislar la unidad de procesamiento y control de la unidad de potencia, permitió disminuir ruidos eléctricos y evitar sobrecargas que pudieran provocar mal funcionamiento o daños a los módulos del SM. Aunado a ello el uso de

disipadores de calor en la unidad de potencia permitió evitar sobrecalentamientos en los módulos del SM durante su uso.

El módulo que controla a la presión del sistema neumático, permite alcanzar el estado estacionario de la presión de vacío en la cámara de succión con respecto a la presión de referencia aproximadamente a los cuatro segundos (Figura 34b), esto cuando el disco semillero no está en movimiento. Cuando el disco semillero (con semilla en sus celdas) inicia el movimiento se presentan oscilaciones en la señal de control, debido a que las semillas obstruyen el paso del aire en las celdas del disco provocando un incremento en la presión de vacío, y el controlador PID (implementado en el módulo) incrementa la apertura de la compuerta en la línea de succión a través del servomotor reduciendo dicha presión. Lo anterior, el módulo lo realiza hasta que la señal de control alcanza amplitudes máximas casi uniformes, obteniendo una señal de control máxima casi constante que supera en una pequeña proporción el $\pm 5\%$ el valor de referencia. Este comportamiento se presentó en algunas de las presiones de vacío y frecuencias de rotación de prueba (Figura 34b).

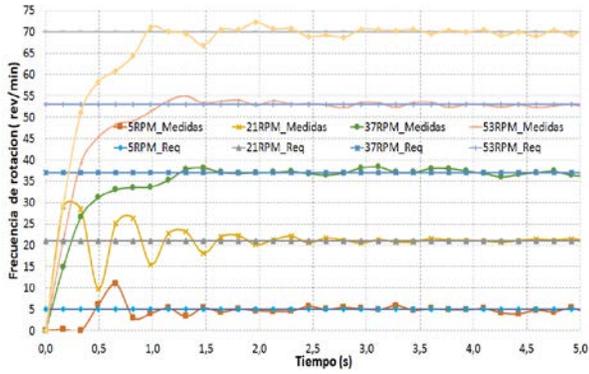
En el caso de los módulos utilizados para medir la masa de fertilizante y pesticida en el tubo de descarga de los dosificadores, los cuales utilizan una celda de carga de 5 kg para funcionar como una báscula, fueron verificadas con pesas calibradas en los valores de 1, 2, 3, 4 y 5 kg obteniendo una diferencia en el pesado del $\pm 0.05\%$. La Figura 34d muestra la gráfica que compara el valor de la masa de las pesas calibradas comparado con el valor medido por el módulo que utiliza la celda de carga. Estos módulos requieren ser verificados o ajustados en sus mediciones cuando se dejan de usar por un periodo prolongado, para ello se recomienda utilizar una pesa calibrada con el peso máximo de la capacidad de medida de la celda de carga. Al seleccionar calibrar la celda de carga en

el SM, debe colocarse la pesa sobre el lugar de pesado de la celda de carga y el módulo automáticamente se calibrará, para lo cual debe verificarse que la medición de la masa corresponda con la masa de la pesa.

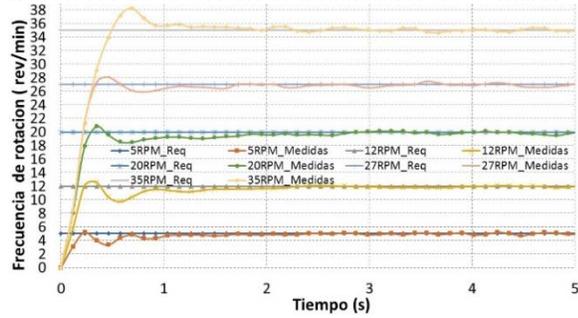
El módulo que funciona como contador electrónico de semilla, permite realizar un conteo de 2^{32} semillas; además de identificar dos semillas diferentes, que atraviesan el marco, con un intervalo de tiempo mínimo entre una y otra de 14 ms. Cuando el tiempo es menor, las contabiliza como una única semilla. Una desventaja del módulo, se debe a que contabiliza indistintamente fracciones de semilla u objetos (residuos vegetales o terrones) como semillas. En dosificadores de semilla donde el enrasador permite el paso de semillas múltiples por cada celda del disco semillero, el error al contabilizar la semilla tirada por el dosificador se magnifica. En la sembradora-fertilizadora probada a baja frecuencia de rotación del disco semillero, donde se logró ajustar el enrasador y verificar visualmente la reducción del paso de semillas múltiples por cada celda del disco, se lograron obtener errores promedio del 3 % para $5 \text{ rev}\cdot\text{min}^{-1}$ y del 5% para $25 \text{ rev}\cdot\text{min}^{-1}$.

Con base a los resultados obtenidos se demuestra que el diseño electrónico desarrollado del SM, basado en microcontroladores utilizando el protocolo de comunicación bidireccional, se vuelve una herramienta muy potente para controlar sistemas complejos ya que permite que múltiples microcontroladores funcionen como una unidad, con la ventaja de trabajar en paralelo y realizar diferentes funciones al mismo tiempo.

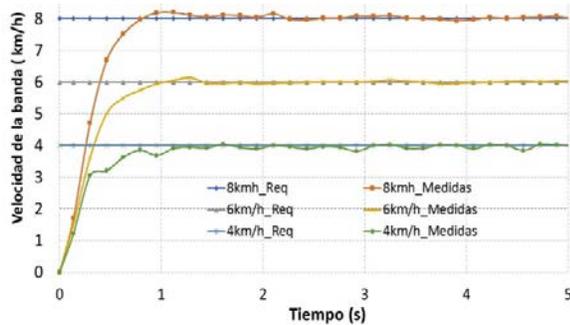
Aunado al diseño electrónico del SM y la implementación del control PID, permitió controlar los dosificadores de insumos (semilla, fertilizante y pesticida), sistema neumático y la banda transportadora, alcanzando el estado estacionario de la variable controlada en la mayoría de los casos en tiempo real.



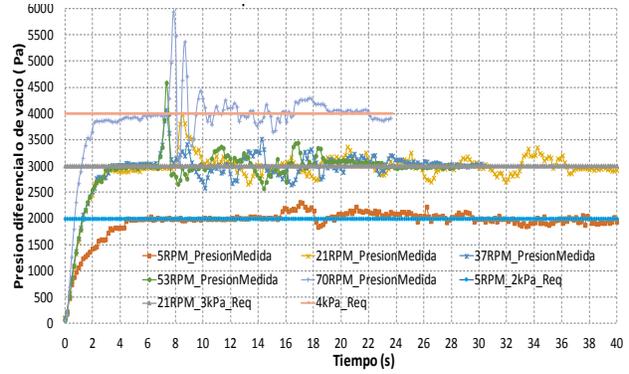
a. Control de la FR en el dosificador de semilla.



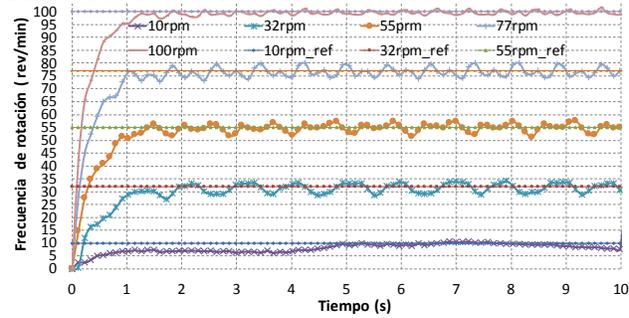
c. Dosificador de fertilizante.



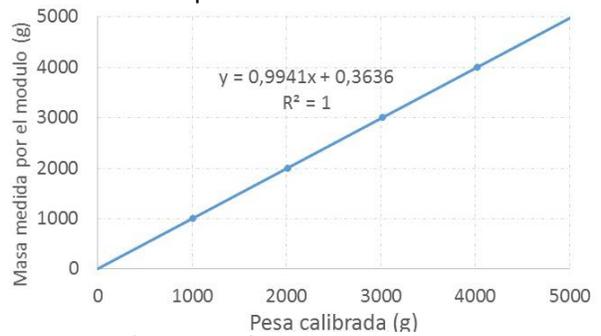
c. Banda transportadora



b. Control de la PVCS de 1.5 a 4kPa.



d. Dosificador de pesticida.



d. Verificación de la báscula de 5 kg.

Figura 34. Comportamiento del control realizado por el SM.

2.5 CONCLUSIONES

El diseño electrónico del SM basado en microcontroladores, utilizando un maestro y múltiples esclavos en comunicación bidireccional I2C, permite realizar el control de los dosificadores y sistema neumático de una sembradora-fertilizadora en tiempo real, además de permitir la medición de variables que permiten verificar el desempeño de la máquina durante la aplicación de insumos, medir el nivel de insumos en las tolvas y conteo de semillas descargadas.

El SM además del control de funciones o la medición de variables en una sembradora-fertilizadora para el trabajo en campo, permite incluir microcontroladores en configuración esclavo, los cuales permiten controlar equipos (como una banda transportadora) o instrumentos (para la medición de la masa en la descarga de los insumos) para la realización de pruebas de laboratorio y campo que permitan caracterizar el funcionamiento de algunos mecanismos de una sembradora-fertilizadora.

La implementación del control PID utilizando la técnica PWM, permitió alcanzar la dosis de aplicación de insumos (semilla, fertilizante y pesticida) de referencia y la velocidad de desplazamiento deseada de la banda, a través del control de la velocidad angular de motores de CD. Logrando alcanzar el estado estacionario de las variables de control para los dosificadores de semilla, fertilizante y de la banda en un intervalo de tiempo de 1 a 2 s.

Se logró controlar la presión de vacío en la cámara de succión a través del control PID de la posición angular de un servomotor, el cual ajusta el área de apertura de la línea de succión de la cámara del sistema neumático mediante una compuerta fijada al servomotor logrando alcanzar el estado estacionario de la variable de control con una rapidez de 2 a 4 s.

Se logra un diseño electrónico y construcción del SM, adecuado para su aplicación en sembradoras-fertilizadoras de dosificación variable utilizadas en AP. Aunque falta implementar nuevos módulos esclavo que permitan obtener lecturas de la posición de un GPS (de elevada exactitud) y la dosis de aplicación de los insumos en la posición respectiva, como lo realizan las máquinas de dosificación variable.

2.6 REFERENCIAS

- [1] Atmel Corporation (2016). ATMEGA328/P Datasheet, 8-bit AVR microcontroller. San José, California, USA. http://www.atmel.com/Images/Atmel-42735-8-bit-AVR-Microcontroller-ATmega328-328P_datasheet.pdf.
- [2] Atmel Corporation (2016). ATmega640/V-1280/V-1281/V-2560/V-2561/V Datasheet, 8-bit AVR microcontroller. San José, California, USA. http://www.atmel.com/Images/Atmel-2549-8-bit-AVR-Microcontroller-ATmega640-1280-1281-2560-2561_datasheet.pdf.
- [3] Bhagwatkar S. R. and Dhande A. P. (2013). Automatic Closed Loop Speed Control of DC Motor. International Journal of Science and Research (IJSR). Vol. 4 (5) 532-534.
- [4] Bongiovanni R., 2010. Fertilización del Trigo con Dosis Variable de Nitrógeno. INTA Manfredi, Argentina. <http://agrolluvia.com/wp-content/uploads/2010/06/Fertilizaci%C3%B3n-del-Trigo-con-Dosis-Variable-de-Nitr%C3%B3geno.pdf>
- [5] Bragachini Mario I; Méndez Andrés, Scaramuzza F., Vélez Juan Pablo y Villarroel Diego, 2010. Determinación de Viabilidad Económica de la Tecnología de Dosis Variable de Insumos en Maíz. INTA Manfredi - Proyecto Agricultura de Precisión. Manfredi, Pcia. de Córdoba, Argentina.
- [6] Deka J., Krishnat A. S., Akshay A. T. and Sandip M. T. (2014). An advanced approach to control DC motor speed using PID control in MATLAB Simulink. International Journal of Development in Engineering and Technology Vol. 2(5) 47-51.
- [7] Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDEA), 2010. Ahorro y eficiencia energética en la agricultura de precisión. Madrid, España.
- [8] International Standard for Organization (1984). ISO-7256/1 Sowing equipment - Test methods - Part 1: Single seed drills (precision drills). Switzerland: International Standard for Organization.
- [9] Joint Research Centre (JRC) of the European Commission; Monitoring Agriculture Resources (MARS) Unit H04; Zarco-Tejada Pablo J., Hubbard N. and Loudjani P. (2014). Precision agriculture: an opportunity for EU farmers - potential support with the cap 2014-2020. Policy Department B: Structural and Cohesion Policies European Parliament B-1047 Brussels.
- [10] Maine N., Lowenberg-DeBoer J., Nell W. T., Gudeta A. Z. (2009). Impact of variable-rate application of nitrogen on yield and profit: a case study from South Africa. Springer Science Business Media, LLC 2009.
- [11] Mangesh J N., Akhileshkumar K S. and Payal S. (2015). Closed loop speed control of dc motor using PWM. International Journal of Engineering Sciences & Research Technology 4(8): 807-817.
- [12] Moaid D. S., Hashim T. R. (2013) PIC 16F877A Microcontroller Based Multiple DC Motors Controller. Asian Transactions on Engineering. Vol. 03 (02) 7-17.
- [13] Palacios M. E.; Ramiro D. F. y López P. L. J. 2004. Microcontrolador PIC16F84 Desarrollo de Proyectos. 2da edición. Alfaomega. Mexico D. F. pp. 409-422.
- [14] Pierpaoli E., Carli G., Pignatti E., Canavari M. (2013). Drivers of Precision Agriculture Technologies Adoption: A Literature Review. Procedia Technology 8(2013) 61–69.

- [15] Pretab V., Neelam P. y Chandrakan K., 2014. Real time DC motor speed control using PID controller in LabView. International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering. Vol. 2(9) 12162-12167.
- [16] Sartori, M. J. R.; Di Raimo C.; Costa, C. R. R.; Montezuma, M. A. and Capello de Souza E. A., (2015). Study of an electromechanical system for solid fertilizer variable rate planting. African Journal of Agricultural. Vol. 11(3):159-165.
- [17] Tola, E.; Kataoka, T; Burce, M; Okamoto, H and Hata S., (2008). Granular Fertiliser Application Rate Control System with Integrated Output Volume Measurement. Biosystems Engineering Volume 101(4): 411–416.
- [18] Vélez, J.P.; Scaramuzza, F. y Villarroel, D. (2014). Sembradoras eléctricas. Una realidad en el mundo y en el campo argentino. INTA.
- [19] Yang C., Everitt J. H., Bradford J. M. (2001). Comparisons of uniform and variable rate nitrogen and phosphorus fertilizer applications for grain sorghum. American Society of Agricultural Engineers. Vol. 44(2): 201–209.
- [20] Página web de Arduino. <https://www.Arduino.cc/>.

CAPÍTULO 3

SISTEMA MECATRÓNICO PARA CONTROLAR EL DOSIFICADOR DE SEMILLA Y PRESIÓN DE VACÍO DE UNA SEMBRADORA-FERTILIZADORA

Julio Torres Sandoval^{1*}, Eugenio Romantchik Kriuchkova¹, Irineo L. López Cruz¹, Gilberto De J. López Canteñs¹

¹Posgrado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua. Universidad Autónoma Chapingo. Km 38.5 Carretera México-Texcoco. C.P. 56230, Chapingo, Estado de México. Tel. (595) 95 2 15 51, Email: jultsmex@yahoo.com.mx.

3.1 RESUMEN

El dosificador de semilla de una sembradora-fertilizadora, es uno de los componentes de mayor importancia que determinan la calidad de siembra. En México de manera general, este componente es accionado por un sistema de transmisión mecánico y una rueda motriz. Este sistema tiene el inconveniente de ser afectado en su funcionamiento por las condiciones del suelo, cubierta vegetal y velocidad de siembra; que provocan un deslizamiento de la rueda motriz o el boqueo del sistema de transmisión. Por lo anterior, en las sembradoras más desarrolladas tecnológicamente se utilizan sistemas mecatrónicos que eliminan estos problemas y permiten realizar cambios continuos y en tiempo real en la dosis de siembra. Por lo anterior en el presente trabajo se desarrolló un sistema mecatrónico para controlar el dosificador de semilla y de la presión de vacío, el cual se adaptó y probó en un cuerpo de una sembradora-fertilizadora unitaria. El sistema está basado en microcontroladores para el control, y un motor de corriente directa para accionar al dosificador. La dosis de aplicación se modificó con la frecuencia de rotación del disco semillero, utilizando la técnica de modulación por ancho de pulso y el control Proporcional-Integral-Derivativo. El sistema mecatrónico permitió alcanzar el estado estacionario de la variable de control a los 1.5 segundos y un error del $\pm 5\%$ en estado estacionario a frecuencias de rotación ≥ 21 rev/min, alcanzando hasta el $\pm 20\%$ a una frecuencia de 5 rev/min. En el caso del controlador de la presión de vacío el error fue del $\pm 10\%$.

PALABRAS CLAVE: Dosificador de semilla, microcontrolador, PWM, control PI y PID.

3.2 INTRODUCCIÓN

Las máquinas sembradoras usadas en México son de acople integral o semi-integral al tractor, utilizan una rueda motriz y sistema de transmisión por cadenas o engranes para accionar a los dosificadores, además emplean un sistema de dosificación de semilla mecánico o neumático.

Los factores que influyen en el desempeño de un sistema de dosificación neumático son la presión (positiva o negativa), el diámetro y forma de los orificios del disco semillero, y su velocidad angular (provocada por la velocidad de avance de la máquina), así como el tamaño y forma de la semilla (Barut and Özmerz, 2004).

En la sembradora los elementos que más influye en la calidad de siembra son los dosificadores de semilla (Zhai *et al.*, 2014), los cuales al ser accionados por una rueda motriz y un sistema de transmisión por cadenas o engranes, se ven afectados en su funcionamiento por las condiciones del suelo, cubierta vegetal y por la velocidad de avance de la sembradora; condiciones que provocan el deslizamiento de la rueda motriz o el bloqueo del sistema de transmisión por residuos vegetales que no permiten su movimiento adecuado. Los métodos modernos de accionamiento de los dosificadores hacen uso del sistema de potencia hidráulico o eléctrico del tractor. Estos últimos son sistemas mecatrónicos compuestos por una unidad de control, unidad electrónica y de potencia, sensores y actuadores (motores eléctricos) que permiten controlar el funcionamiento de los dosificadores (Bragachini *et al.*, 2010). Estos sistemas tienen la ventaja de no ser afectados por las condiciones del suelo o por la cubierta vegetal, además de permitir trabajar a altas velocidades de siembra, sin comprometer la calidad de distribución de la semilla (Yang *et al.*, 2015). También permiten realizar cambios de la dosis de siembra de forma continua y en tiempo real. Además, componentes como el sistema de posicionamiento global (GPS), dispositivos captadores capaces de detectar y almacenar la información referente a la variabilidad inter parcelaria, herramientas de gestión georreferenciada de la información parcelaria (sistemas de información geográfica) y modelos matemáticos de ayuda para la toma de decisiones son implementados en las máquinas de dosificación variable de semilla, que tienen su aplicación en la agricultura de precisión (IDEA, 2010).

Empresas como John Deere, CNH, Horsch, Presicion Planting, Ag Leader, entre otras, desarrollaron y actualmente comercializan a nivel mundial sembradoras de dosificación variable, que utilizan sistemas mecatrónicos para el accionamiento de los dosificadores de semilla.

Investigaciones realizadas por Yang *et al.* (2015) y Jianbo *et al.* (2014) han desarrollado sistemas de control de los dosificadores de semilla utilizando motores a pasos, sensor de velocidad de desplazamiento de la sembradora (codificador) y microcontroladores (AT89S51 y STM32F103VCT6) ejecutando un sistema de control en lazo abierto. Singh and Mane (2011) desarrolló un dosificador de semilla el cual utiliza un contador BCD (IC4510), un timer (IC4093), un sensor de proximidad, un relevador y un motor de CD y mediante la técnica de control ON/OFF da movimiento al dosificador y permite la caída de la semilla. En máquinas fertilizadoras y aspersoras se han realizado investigaciones para controlar la dosis de aplicación, que pueden servir de ayuda para hacerlo en las sembradoras. Por ejemplo, Guzmán *et al.* (2004), diseñaron un sistema para el control de la dosis de aplicación en un equipo de aspersión móvil, mediante el método de análisis de la respuesta a escalones en bucle abierto para estimar la función de transferencia (aproximándola a un sistema de primer orden con un retardo) como lo realizó Aströn and Wittenmark (1995) e implementa un sistema de control Proporcional, Integral y Diferencial (PID) utilizando el método de sintonización de Ziegler-Nichols. Cai *et al.* (2016) realizaron el control de la dosis de aplicación de químicos en un sistema de aspersión, con la diferencia de utilizar un método de control PID de dos fases para mejorar su desempeño y disminuir el error de control provocado por el comportamiento no lineal del sistema.

El cambio de la dosis de siembra, se logra mediante el control de la velocidad angular o frecuencia de rotación del disco semillero (FRDS). Una de las técnicas más utilizadas para modificar su magnitud, cuando los dosificadores son accionados por motores de corriente continua, es la modulación por ancho de pulso (PWM) que ha sido ampliamente aplicado en diferentes investigaciones como las realizadas por Wenbin *et al.* (2012) y Atul *et al.* (2012). Para ajustar su magnitud a un valor de referencia se utilizan diferentes técnicas de control en lazo cerrado Proporcional e Integral (PI) y PID, el cual ha sido

ampliamente estudiado en el control de motores de CD como lo realizó Basilio y Mateos (2002) y Pratap (2014).

En México a pesar de existir diferentes investigaciones enfocadas al diseño, la prueba y evaluación de los dosificadores de semilla de una sembradora, utilizando el método de accionamiento mecánico, no se tienen antecedentes de una investigación que haya permitido desarrollar un sistema mecatrónico para el control del dosificador de semilla, así como su aplicación en campo con fines de investigación o productivos. Por este motivo, en el presente trabajo se desarrolló un sistema mecatrónico (SM) para el control de la dosificación de semilla que permita cambios de forma continua y en tiempo real de la dosis de siembra, así como el control de la presión de vacío de la cámara de succión (PVCS) del sistema neumático, además de su adaptación a la sembradora-fertilizadora modelo LC-U-N del fabricante Mexicano Sembradoras del Bajío y su prueba en condiciones de laboratorio.

3.3 MATERIALES Y MÉTODOS

3.3.1 SEMBRADORA-FERTILIZADORA SELECCIONADA

La sembradora-fertilizadora Modelo LC-U-N, está diseñada para trabajar bajo condiciones de labranza de conservación y se comercializa con uno hasta ocho cuerpos. Cada cuerpo cuenta con un sistema de dosificación neumático de semilla, un mecanismo dosificador de fertilizante y un mecanismo dosificador de pesticida granulado (Figura 35a). La máquina utiliza un disco cortador dentado, que funciona como rueda motriz, y un sistema de transmisión por cadenas para el accionamiento de los dosificadores. La cámara de vacío del sistema neumático está constituida por el disco semillero, para este caso de 30 orificios con diámetro de 6 mm, y un recipiente o molde de plástico que al fijarse a la estructura de la sembradora crean una cámara cerrada con un disco semillero como tapa. En el interior se crea una presión de vacío mediante una turbina la cual es conectada con la cámara mediante una manguera (Figura 35). Considerando que de manera general las máquinas sembradoras se trabajan a velocidades máximas de 12 km/h, para la sembradora seleccionada, a esta velocidad el disco semillero giraría a una frecuencia de rotación máxima de 72 rev/min, con los diferentes ajustes recomendados por el fabricante y los componentes con los cuales fue entregada la máquina.



a) Cuerpo de la Sembradora-fertilizadora.



b) Vista del disco semillero y recipiente de plástico con la manguera.

Figura 35. Sembradora-fertilizadora Modelo LC-U-N utilizada en la investigación.

3.3.2 SUBSISTEMA MECÁNICO

Se reemplazó el sistema de accionamiento original del dosificador (transmisión mecánica), por un sistema electromecánico utilizando un motorreductor eléctrico de corriente directa (MRE), el cual a través de una transmisión por cadena acciona la flecha del dosificador (flecha donde se monta el disco semillero), con una reducción de 2.5 veces la frecuencia de rotación de la flecha del MRE con respecto al disco semillero. Se usó un MRE marca Currie Technologies, Modelo: Electro Drive XYD-18A, que se alimenta a 24 volts de corriente directa (CD), corriente nominal de 32Amperes, y frecuencia de rotación nominal al motor de 3600 rev/min. A la flecha de salida del MRE se fijó el codificador YUMO E6B2-CWZ3E de 1024 pulsos por revolución en sus líneas de salida A y B, el cual se alimenta de 5 a 15 VCD.

Para controlar la PVCS se adaptó una turbina, y entre estas dos se colocó un coplee en forma de "T" un extremo conectado a la línea de succión del sistema neumático (donde se fija la manguera de la turbina original de la sembradora-fertilizadora) y en el otro extremo se colocó una compuerta la cual se cierra o abre mediante un servomotor. El cierre o apertura de la válvula a través del servomotor, permite controlar la PVCS de la sembradora (Figura 36). Se usó el Servomotor TowerPro MG995 con Torque máximo de 15 Kg*cm y se adaptó la turbina de la aspiradora de la marca Truper de 6 galones con motor de 2.2 kW de 110 a 120 VCA. Para medir la presión de vacío se utilizaron dos

sensores de presión absoluta, uno de ellos se colocó al interior de la cámara y el otro al exterior de la misma, su rango de medición va de 15 a 115 kPa.

3.3.3 SUBSISTEMA ELECTRÓNICO

El SM está basado en la plataforma de desarrollo Arduino [21], de hardware y software libre. Utiliza la placa Arduino MEGA como unidad de control principal, basado en el microcontrolador Atmel2560. A esta placa se conectaron los siguientes elementos: pantalla de cristal líquido (LCD 20x4), reloj de tiempo real, memoria SD, teclado matricial; así como dos placas Arduino UNO en comunicación I2C, donde la placa Arduino Mega actúa como maestro y los Arduino Uno como esclavos. Lo anterior para el funcionamiento normal del sistema mecatrónico. Para la realización de las pruebas se conectó otro arduino uno para medir la masa de la semilla entregada por el dosificador (Figura 36).

Un Arduino uno se utilizó para controlar la frecuencia de rotación del dosificador o FRDS; al cual se conectaron los siguientes componentes: un LCD16x2, sensor de voltaje, sensor de corriente ACS712, codificador incremental, unidad de potencia y el Arduino Mega. Otro de los Arduino Uno se utiliza para medir la velocidad de avance de la sembradora, al cual se conectan los siguientes elementos: una LCD16x2, codificador YUMO E6B2-CWZ3E y el Arduino Mega. Se diseñó una unidad de potencia basada en opto-acopladores y transistores de potencia, que amplifica la señal de control PWM enviada por el microcontrolador al motor aislando eléctricamente estos dos elementos. En la Figura 36 se muestra la forma en la cual se conectan cada uno de los componentes electrónicos.

El arduino que controla la PVCS utiliza un módulo de potencia con un fototransistor y relevadores para controlar el encendido y apagado de la turbina, y otro módulo basado en un fototransistor y un transistor para alimentar al servomotor, y sensores para la medición de la presión de vacío al interior de la cámara de presión; los elementos conectados fueron los siguientes: una LCD16x2, dos sensores de presión MPX4115A, unidades de potencia y el Arduino Mega.

Al arduino uno incluido para la prueba, se le conecto lo siguiente: una LCD16x2, celda de carga de 5kg y Arduino Mega.

Para el funcionamiento del Sistema Mecatrónico es necesaria una fuente de potencia de corriente eléctrica de 110 a 120VCA, el cual se alimenta por un generador eléctrico

independiente (a gasolina o diésel) o accionado por el tractor. Para las pruebas se utilizó la línea domestica que cuenta con corriente eléctrica de 120VCA.

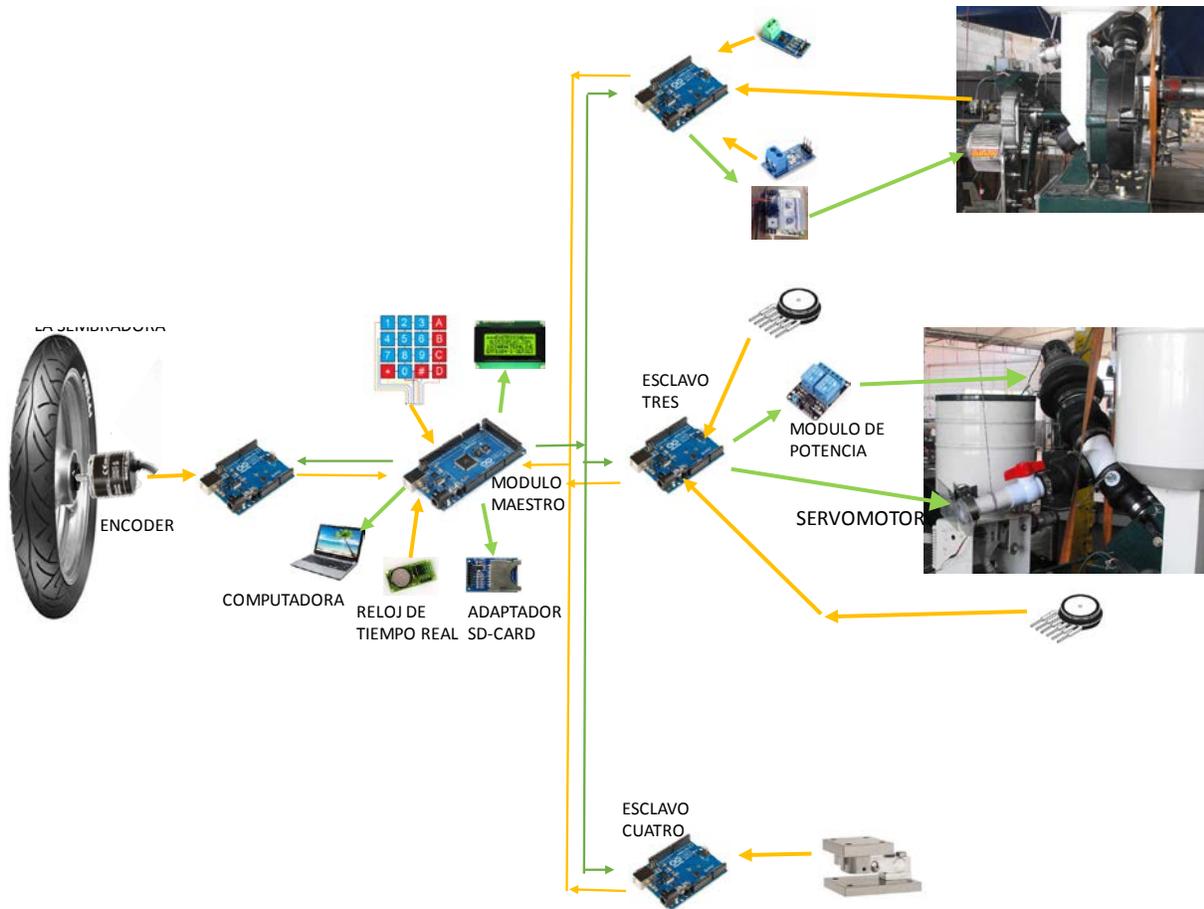


Figura 36. Esquema del circuito electrónico y lógica de control.

3.3.4 SUBSISTEMA DE CONTROL

El sistema de control del dosificador de semilla puede tratarse como un sistema de una entrada y una salida o SISO (single input, single output), el cual puede ser representado por el diagrama de bloques en lazo cerrado mostrado en la Figura 37. De igual manera, el sistema de control de la PVCS puede tratarse como un sistema SISO y ser representado con la misma figura.

El diagrama de bloques en lazo cerrado de la Figura 37, inicia con la variable de referencia como entrada, que para el controlador del dosificador de semilla es la FRDS requerida (determinada con la Ecuación 32) y para el controlador de la presión de vacío

es la presión de vacío deseada. La magnitud de las variables de entrada permite seleccionar los valores de las constantes k_p, k_i y k_d del controlador PID (Tabla 12 y Tabla 13), cuya función de transferencia es $G_c(s)$, y es obtenida por la Ecuación 28. Posteriormente se indica la entrada de las perturbaciones al sistema con $z(s)$ y la función de transferencia de la planta representada por $G_p(s)$; finalmente se obtiene la variable de salida $y(s)$ (Ecuación 27, que al ser realimentada y restada a la variable de referencia se obtiene el error de control $e(s)$ con el cual se determina el valor de la salida del controlador $u(s)$ representado por la Ecuación 29.

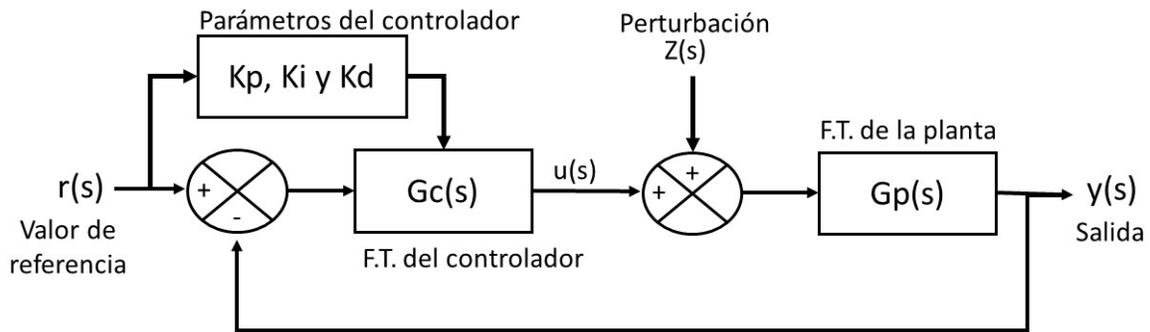


Figura 37. Diagrama de bloques en lazo cerrado de los controladores.

$$y(s) = \frac{G_p(s)G_c(s)}{1 + G_p(s)G_c(s)}r(s) + \frac{G_p(s)}{1 + G_p(s)G_c(s)}z(s) \quad \text{Ecuación 27}$$

El sistema de control del dosificador de semilla opera principalmente como servomecanismo ($z(s) = 0$) en algunos instantes, y en otros como regulador ($r(s) =$ constante o $r(s) = 0$) (Katsuhiko, 2003).

Su operación como servomecanismo se presenta en dos casos, regida por la Ecuación 27, los cuales son los siguientes: 1) al comenzar a sembrar al inicio de cada trayecto o líneas de siembra; 2) al realizan cambios en la dosis de siembra o distancia entre semillas. En el primer caso, se debe a la aceleración en el desplazamiento de la sembradora y con ello el cambio de velocidad, provocando una FRDS requerida cambiante; esto generalmente se presenta por un corto periodo de tiempo, hasta que el operador alcanza una velocidad de siembra constante o con variaciones pequeñas. El segundo caso, se presenta cuando se modifica la dosis de siembra o la distancia entre

semillas, lo que provoca cambios en la FRDS requerida. Este caso es menos frecuente, debido a que los cambios en la dosis de siembra escasamente se realizan en cada trayecto de siembra.

El mayor tiempo de operación del dosificador, su controlador funciona como regulador, debido a que, en la mayor parte de los trayectos durante la siembra, el operador trata de mantener una velocidad de avance constante. Las perturbaciones a las cuales está sujeto el sistema, son principalmente debidas a la fricción entre el disco semillero con la semilla y el cuerpo de la cámara de succión; perturbaciones originadas por las variaciones en la presión de vacío, nivel de semilla en la tolva y vibraciones del cuerpo de la sembradora durante su desplazamiento.

El controlador del dosificador de semilla se diseñó para operar como regulador, y para disminuir el error por el cambio de referencia (cuando el controlador requiere operar como servomecanismo). Se realizó la sintonización del controlador para diferentes puntos de prueba, considerando el intervalo completo de valores que puede tomar la referencia (5 a 70 rev/min), al operar el dosificador de semilla. Por lo que, dicho intervalo de valores de la referencia fue subdividido en intervalos de operación más pequeños; donde para cada uno de ellos, fueron seleccionados e implementados en el controlador diferentes valores de las constantes del control PID, con los cuales se obtuvo un mejor desempeño. En el caso del controlador de la PVCS, fue diseñado para operar como regulador; ya que, en este caso el operador debe introducir el valor deseado de la referencia (PVCS deseada), el cual no se modifica hasta que vuelva a introduzca un nuevo valor para dicha variable.

3.3.5 MÉTODO DE SINTONIZACIÓN DEL DOSIFICADOR DE SEMILLA

El procedimiento efectuado para la sintonización del controlador del dosificador de semilla consta de las siguientes etapas:

Paso 1. Identificación del sistema. Experimentalmente se identificó un modelo matemático en el dominio del tiempo, que relaciona el ancho de pulso de la señal PWM con la frecuencia de pulsos del codificador del motor (Figura 39a). Para ello se aplicaron diferentes valores del ancho de pulso (duty cycle) de la señal PWM (tomando como valor mínimo 50 y los valores al incrementarse gradualmente en 50 hasta tomar el valor máximo de 1023) que alimenta al motor-dosificador como entradas escalón y se

determinó el valor de la variable de salida (frecuencia de pulsos y FRDS). Cada valor del ancho de pulso aplicado, se mantuvo constante durante 12 segundos, y se midió la frecuencia de pulsos cada 16.384 ms. El valor de la frecuencia de pulsos considerada como respuesta al ancho de pulso aplicado de la señal PWM, fue el promedio de las mediciones obtenidas a partir de los 2 a los 12 segundos. Lo anterior se llevó a cabo bajo dos condiciones: a) motor-dosificador de semilla conectados con una transmisión por cadena, tolva al 50% de su capacidad y PVCS a 1.3 kPa (Figura 38a) con las mismas condiciones anteriores, pero a 3.9 kPa de presión (Figura 38b).

Paso 2. Caracterización de la respuesta del sistema (motor-dosificador) a una entrada escalón. Fue obtenida como el comportamiento promedio en 30 repeticiones, de la aplicación de una entrada escalón de la señal PWM (con valor de 1023) y su respuesta en frecuencia de pulsos del codificador, en el intervalo de tiempo de inicio de la aplicación de la entrada escalón (tiempo cero) a 1 segundo y realizando mediciones de la frecuencia de pulsos a intervalos regulares de 16.384 ms. Las condiciones bajo las cuales se realizó el ensayo para el dosificador fueron las descritas anteriormente (Paso 1) utilizando la PVCS de 1.3kPa (Figura 39b).

Paso 3. Generación de las funciones de transferencia de la planta del controlador. Utilizando los datos obtenidos en el paso 2, se determinaron las funciones de transferencia de las plantas mediante la herramienta “System Identification Tool” del System Identification Toolbox del ambiente de programación de Matlab.

$$G_c(s) = k_p + \frac{k_i}{s} + k_d s = \frac{k_i + k_p s + k_d s^2}{s} \quad \text{Ecuación 28}$$

En la Ecuación 29 muestra la expresión que permite determinar la señal de control (en el dominio del tiempo o de la frecuencia), mediante la reducción de la diferencia entre la referencia (valor deseado de la variable de control) y su valor actual.

$$u(t) = k_p e(t) + k_i \int_0^t e(\tau) d\tau + k_d \frac{de(t)}{dt} \quad \text{o} \quad \text{Ecuación 29}$$

$$u(s) = k_p e(s) + k_i \frac{e(s)}{s} + k_d e(s)s$$

Donde $u(t)$ es la señal de control, $e(t)$ es la diferencia entre el valor de referencia y el valor actual; k_p , k_i y k_d son las constantes del controlador proporcional, integral y derivativa respectivamente.

Paso 4. Selección de las constantes del controlador PID. Para el diseño del controlador PID, se usó la herramienta “pid tuner” del Control System Toolbox de Matlab, haciendo un llamado a esta herramienta en la ventana de comandos con la instrucción “pidtool”, para encontrar los valores de las constantes k_p , k_i y k_d del controlador PID. Otro método utilizado para estimar los valores de las constantes del control PID del dosificador de semilla, fue el uso del método de Ziegler-Nichols llamado “método de ganancia última” en el cual se determinó la ganancia crítica o última K_u y el periodo de la señal obtenida T_u al aplicar la ganancia ultima. Esto se realizó para cada frecuencia de prueba y su correspondiente PVCS con la cual se realizó la prueba de laboratorio. Para ello se inició con un valor de las constantes K_i y K_d de cero, y de la constante K_p con un valor bajo el cual se fue incrementando gradualmente hasta conseguir que la señal de control alcanzará la señal de referencia superándola y volviendo a caer por debajo de ella, tomando como valor de la ganancia ultima el valor de la ganancia proporcional que logro dichas oscilaciones y se determina el periodo de dichas oscilaciones el cual fue el valor de T_u . Posteriormente se tomaron los valores de cada constante del controlador PI o PID de acuerdo a lo indicado en la Tabla 10.

Tabla 10. Método de sintonización de Ziegler-Nichols: Formulas para respuesta en frecuencia (Katsuhiko, 2013).

Controlador	K	Ti	Kd	Tp
P	0.5 K_u			T_u
PI	0.4 K_u	0.8 T_u		1.4 T_u
PID	0.6 K_u	0.5 T_u	0.125 T_u	0.85 T_u

Los valores de las constantes del controlador PI y PID obtenidos con los dos métodos mencionados, se tomaron como valores semilla. Dichos valores fueron probados, y sirvieron como base para seleccionar nuevos valores de las constantes que fueron probados hasta conseguir un desempeño adecuado del controlador o en el momento en el cual no se conseguían mejoras en el mismo. Las constantes del controlador PI y PID seleccionadas, que se consideraron dieron mejores resultados fueron las que minimizaron el valor calculado de la integral del error (ISE) (Ecuación 30). El

procedimiento anterior se realizó para cinco puntos de prueba los cuales se tomaron a intervalos regulares en el intervalo de valores que puede tomar la FRDS (de 5 a 70 rev/min) para asegurar que el control sea el adecuado en cada punto, determinando tres intervalos en los cuales los valores de las constantes del controlador son diferentes. Para cada intervalo, en el caso del control del dosificador, fueron seleccionados tres valores para cada una de las constantes k_p , k_i y k_d , el primer grupo de ellos utilizados para obtener una respuesta de la señal de control que elimine rápidamente el error de control (considerando como variable de control la FRDS), cuando el error es mayor al 10%; el segundo grupo de valores se utiliza cuando el error está en un rango del 5 al 10% del valor de referencia; y el tercer grupo cuando el error es menor al 5% del valor de referencia.

$$ISE = \int_0^t e^2(t)dt$$

Ecuación 30

Donde ISE es la integral del cuadrado del error y $e(t)$ es el error entre el valor de referencia y valor medido.

Paso 5. Programación computacional de los algoritmos de control. Finalmente se programaron los algoritmos de control del sistema mecatrónico.

3.3.6 MÉTODO DE SINTONIZACIÓN DEL CONTROLADOR DE LA PVCS

El procedimiento para desarrollar el control de la PVCS fue el siguiente:

Paso 1. Identificación del sistema. Al igual que para el dosificador de semilla, experimentalmente se identificó un modelo matemático en el dominio del tiempo, que relaciona el ancho de pulso de la señal PWM enviada al servomotor con la PVCS medida. En este caso se consideró el valor del PWM que abre completamente la compuerta (valor mínimo igual a 1700) y el valor del PWM que cierra completamente la compuerta (valor máximo de 2350) tomando 10 puntos a intervalos regulares en los cuales se midió la presión de vacío iniciando con el valor de 1700 y terminando con el de 2350. Cada valor del ancho de pulso aplicado, se mantuvo constante durante 12 segundos, y se midió la presión de vacío obteniendo un promedio cada 16.384 ms. El valor de la presión de vacío considerada como respuesta al ancho de pulso aplicado de la señal PWM, fue el promedio de las mediciones obtenidas a partir de los 2 a los 12 segundos. Las mediciones

de la presión de vacío se realizaron bajo condiciones del disco semillero sin movimiento y su comportamiento se muestra en la Figura 39c.

Paso 2. Caracterización de la respuesta del sistema (motor-dosificador) a una entrada escalón. El procediendo fue similar al realizado para el dosificador de semilla, buscando alcanzar la presión de vacío máxima de operación (5kPa) en la cámara de succión se aplicó una entrada escalón de la señal PWM de 2209. El comportamiento obtenido fue el que se muestra en la Figura 39d.

Paso 3, Paso 4 y Paso 5. Generación de las funciones de transferencia de la planta del controlador.

Referidos a las mismas etapas indicadas para el dosificador de semilla. El procedimiento seguido fue similar al descrito para el dosificador de semilla en cada una de las etapas. Obteniendo dos intervalos que presentan diferentes valores de las constantes del controlador PID que permitieron el control de la presión de vacío de 1.5 kPa (presión mínima) a 5 kPa (considerada como la presión máxima de operación) en la cámara de succión.

3.3.7 PROGRAMACIÓN DEL ALGORITMO DE CONTROL DEL SM

La programación de los algoritmos de control del SM se realizó en lenguaje C++ con el software Arduino versión 1.0.5.

3.3.7.1 Esclavo uno (medición de velocidad de la sembradora)

El arduino uno (esclavo uno) determina la velocidad de avance de la sembradora (Ecuación 31), para ello se configuraron las interrupciones INT0 e INT1 para detectar los pulsos del codificador fijado en la rueda cuando gira (Figura 36). Además, se configuro la interrupción del Timer 1 para que el conteo de pulsos se realice en un tiempo exacto de 163.84 ms. Cada vez que se ejecuta una interrupción se determina la velocidad de avance de la sembradora y se envía su valor al módulo maestro (arduino mega) vía comunicación I2C.

3.3.8 MÓDULO MAESTRO

El arduino Mega controla el funcionamiento del SM y permite su interacción con el usuario a través de un teclado matricial y una pantalla de cristal líquido LCD20x4, elementos que

ayudan a que el usuario introduzca la información requerida para su funcionamiento. El funcionamiento del arduino Mega, inicia con la configuración e inicialización de cada uno de los dispositivos que le son conectados. En él se programaron tres modos de funcionamiento, que son: modo de inactividad, modo de siembra y modo de prueba-calibración. Inicialmente el SM está en modo inactivo en espera de que el usuario cambie el modo de operación; ya sea al modo siembra o de prueba-calibración. Cuando es seleccionado alguno de estos modos, activa a los esclavos correspondientes para realizar la función seleccionada y les envía los datos requeridos por cada esclavo. Cuando el modo de siembra está activo, el arduino mega espera la señal del esclavo uno que le indica cuando la velocidad de desplazamiento de la sembradora ha sido actualizada (señal recibida mediante la interrupción INT0) momento en el cual actualiza los datos de operación de los esclavos y extrae los datos importantes de la ejecución de la labor de siembra; además de verificar si el usuario ha actualizado los datos de operación o ha cambiado el estatus operativo, en caso afirmativo actualiza el estado operativo de los esclavos. Cuando el modo de operación seleccionado es para la realización de la prueba-calibración, espera la señal del esclavo uno (recibida cada 163.84 ms) y extrae de los esclavos (esclavos uno, dos, tres y cuatro) la información de las variables de importancia resultado de la ejecución de la actividad; esto lo realiza hasta que el esclavo que controla al dosificador se inactiva (cuando el número de giros del disco semillero indicados por el usuario se han completado) o el usuario seleccione el modo de inactividad a través del teclado matricial, momento en el cual el arduino mega inactiva a los demás esclavos. Cada vez que se actualizan los datos de operación (ya sea en modo de siembra o prueba-calibración), se muestra en la LCD (los de mayor importancia) y los envía a través de la comunicación Rx-Tx.

3.3.8.1 Esclavo dos

El arduino uno (esclavo dos) fue programado para controlar el funcionamiento del dosificador de semilla (Figura 36). Su operación inicia con la configuración e inicialización de cada uno de los dispositivos conectados a él, y espera a que el maestro le asigne el modo de funcionamiento. Cuando el modo de siembra está activo, recibe del maestro los datos necesarios para operar y le regresan los datos más importantes generados de la

labor de siembra, lo que se realiza cada intervalo de tiempo de 163.84ms. En el caso de que el modo de operación activo sea el de pruebas-calibración, espera recibir del maestro los datos requeridos para operar y le devuelve los datos de mayor importancia resultado de la actividad, esto se realiza cada 163.84 ms de tiempo hasta cumplir con la condición de paro. Cada vez que se actualizan los datos operativos recibidos desde el maestro, el esclavo verifica si no han ocurrido cambios en el modo de operación en caso afirmativo cambia su estatus al modo designado por el maestro. Cada vez que el esclavo envía datos al maestro, también los envía a través de la comunicación serial Rx-Tx.

Para determinar la frecuencia de rotación de la flecha del motor y con ello del disco semillero, en el esclavo dos se activan las interrupciones INT0 e INT1 para detectar los pulsos del codificador fijado en la flecha del motor, además de activar la interrupción del Timer 1 cada 163.84 ms tiempo en el cual se determina la frecuencia de rotación del DS. La secuencia de acciones realizadas por el microcontrolador, para controlar el movimiento angular del disco semillero se describe a continuación:

- 1) Recibe del módulo maestro (arduino mega) los datos iniciales de operación. Para el modo de operación en labor de siembra, son los siguientes: la velocidad de avance de la sembradora, los pulsos generados por el codificador en cada giro de la flecha del motor, la distancia entre semillas deseada, el número de orificios del disco semillero y la distancia entre surcos; y para el modo de prueba-calibración se incluyen, los siguientes: el número de giros a realizar por el disco semillero y la FRDS de prueba; 2) Determina la frecuencia de pulsos requerida en el codificador (Ecuación 32), la FRDS requerida (Ecuación 33) y el valor requerido del PWM a enviar al motor (Ecuación 39); 3) Espera a que se dé la interrupción del timer 1 del microcontrolador (efectuado cada 163.84 ms), y obtiene el valor de los pulsos contados en dicho tiempo (P_{cds}), así como la frecuencia de pulsos actual (Ecuación 34); 4) Determina FRDS actual (Ecuación 35) y estima el valor del PWM actual (Ecuación 39); 5) Determina el error de control del PWM enviado al motor (Ecuación 36), el error de la FRDS (Ecuación 37) y el error en por ciento de la FRDS (Ecuación 38); 6) Con los datos calculados de la FRDS requerida y el error de la FRDS en por ciento son seleccionados los valores de las constantes del controlador PID; 7) Con el error de la señal PWM obtenido y los valores de las constantes seleccionadas del controlador PID, se determina el valor del PWM (Ecuación 29) que se enviara el

microcontrolador al motor que acciona al DS; 8) Cuando los esclavos funcionan en modo de pruebas también miden el voltaje y la corriente de alimentación del motor, y calculan la potencia y el torque (Ecuación 40) exigido al motor; 9) Se reinicia en el punto número uno.

3.3.8.2 Módulo esclavo tres

El arduino uno (esclavo tres) se encarga de controlar la PVCS del sistema neumático de semilla, (Figura 36). Su funcionamiento inicia con la configuración e inicialización de cada uno de los dispositivos conectados a él, y espera a que el maestro le asigne el modo de funcionamiento; ya sea en modo activo (cuando el controlador del dosificador funciona en modo de siembra o pruebas-calibración) o inactivo; cuando se encuentra activo recibe del maestro PVCS de referencia que debe mantener al interior de la cámara de succión, para ello activa a la turbina y controla la apertura de la compuerta con el servomotor, el dato de la presión de referencia la recibe cada 163.84ms y a su vez envía al maestro el valor de la PVCS medida (calculada como un promedio de aproximadamente 100 mediciones de la presión) y el error de control. La presión de referencia o deseada es introducida por el usuario al maestro y este a su vez la envía al arduino uno esclavo tres. La secuencia de acciones realizadas por el microcontrolador (esclavo tres), para controlar la PVCS se describe a continuación:

- 1.- Recibe del módulo maestro (arduino mega) los datos de operación. Para el modo de operación activo recibe la presión de vacío de referencia o de control en la cámara de succión, a intervalos definidos de tiempo (163.84ms), y en modo inactivo espera la orden para cambiar a modo activo; 2) Con la presión de referencia determina el valor requerido de la señal PWM a enviar al servomotor (Ecuación 41); 3) Espera a que se dé la interrupción del timer uno del microcontrolador, la cual se realiza cada 163.84 ms de tiempo periodo en el cual realiza mediciones y cálculos del promedio de la presión de vacío. Al ejecutarse la interrupción se obtiene el valor final del promedio de la presión de vacío considerada como presión de vacío medida o actual, además con dicha presión se determina la señal PWM actual (Ecuación 41); 5) Se determina el error de control de la PVCS, el cual se obtiene como el valor de la diferencia entre la PVCS de referencia menos la PVCS actual o medida, así como el error de control en la señal PWM la cual se

obtiene con la diferencia de la señal PWM requerida y la señal PWM actual; 4) Con el valor de la PVCS requerida son seleccionados los valores de las constantes del controlador PID; 5) Con el error de control de la señal PWM y los valores de las constantes seleccionados del controlador PID, se determina el valor de ajuste de la señal PWM (Ecuación 29). El cual, es enviado por el microcontrolador al servomotor que ajusta la apertura de la compuerta en la línea de succión de la turbina; 6) Se reinicia en el punto uno.

3.3.8.3 Módulo Esclavo cuatro

El arduino uno (esclavo cuatro) es programado para medir la masa de la semilla entregada por el dosificador cada 0.163 segundos; esta medición es enviada al maestro vía comunicación I2C y únicamente se realiza cuando está en modo de operación de pruebas-calibración.

3.3.9 ECUACIONES DE CÁLCULO

$$v_s = \frac{3.6 \pi D P_{CR}}{T_{CR} P_{RR}} \quad \text{Ecuación 31}$$

Dónde: v_s es la velocidad de desplazamiento de la sembradora (km/h), D es el Diámetro de la rueda (m), T_{CR} es el tiempo en el cual se realizó conteo de pulsos provenientes del codificador fijado en la rueda (s), P_{CR} es el número de pulsos contados en el T_{CR} (pulsos) y P_{RR} son los pulsos contados por cada giro de la rueda donde se fija el codificador (pulsos/rev).

$$f_{rms} = \frac{P_{ms} v_s}{3.6 N_{cd} d_s} \quad \text{Ecuación 32}$$

Dónde: f_{rms} es la frecuencia requerida de pulsos en el motorreductor (pulsos/s), P_{ms} son los pulsos contados provenientes del codificador del motorreductor en un tiempo definido (adimensional), v_s es la velocidad de desplazamiento de la sembradora (Km/h), d_s es la distancia entre semillas de siembra (m) y N_{cd} es el número de celdas del disco semillero (Adim).

$$n_{rds} = \frac{60 f_{rms}}{P_{rm}} \quad \text{o} \quad n_{rds} = \frac{60 v_s}{3.6 N_{cd} d_s} \quad \text{Ecuación 33}$$

Dónde: n_{rds} es la FRDS requerida (rev/min), P_{rm} son los pulsos contados por cada giro del disco semillero (adimensional).

$$f_{mms} = \frac{P_{c ds}}{T_c} \quad \text{Ecuación 34}$$

Dónde: f_{rms} es la frecuencia de pulsos actual o medida en el codificador (pulsos/s), $P_{c ds}$ son los pulsos contados del codificador (pulsos/s), T_c es el Tiempo en el cual se cuentan los pulsos (s).

$$n_{mds} = \frac{60 f_{mms}}{P_{rm}} \quad \text{Ecuación 35}$$

Donde: n_{mds} es la FRDS actual (rev/min).

$$e_{ms} = W_{rms} - W_{mms} \quad \text{Ecuación 36}$$

Dónde: e_{ms} es el error en la señal PWM (adimensional), PWM_r es el ancho de pulso requerido de la señal PWM (adimensional) y PWM_m es el ancho de pulso estimado actual de la señal PWM (adimensional).

$$e_{frds} = n_{rds} - n_{mds} \quad \text{Ecuación 37}$$

Dónde: e_{frds} es el error en la FRDS (rev/min) y n_{mds} es la FRDS actual (rev/min).

$$e_{frds} = \frac{100(n_{rds} - n_{mds})}{n_{rds}} \quad \text{Ecuación 38}$$

Dónde: e_{frds} es el error en la FRDS (%).

$$PWM = 2 \times 10^{-6} f^2 + 0.044 f + 33.774 \quad \text{Ecuación 39}$$

Dónde: PWM es el ancho de pulsos requerido o medido de la señal PWM (adimensional) y f la frecuencia de pulsos requerida o medida, ambas para el motor que acciona al disco semillero.

$$V_{ef} = V_f \frac{D_c}{1023}, \quad P = V_{ef} I \quad \text{y} \quad T = \frac{P}{w} \quad \text{Ecuación 40}$$

Dónde: V_{ef} voltaje efectivo (V), P Potencia al motor (W), T Torque (Nm), w velocidad angular de la flecha del motor (s^{-1}), D_c ancho de pulsos enviado de la señal PWM (toma valores de 0 a 1023, adimensional), V_f voltaje medido en la línea que alimenta al motor (V) y I corriente de alimentación al motor (A).

$$PWM_{pv} = 4 \times 10^{-9} P_v^3 - 6 \times 10^{-5} P_v^2 + 0.3 P_v + 1656.7 \quad \text{Ecuación 41}$$

Dónde: PWM_{pv} es el ancho de pulsos requerido o medido de la señal PWM (adimensional) y P_v la PVCS requerida o medida (Pa), ambas para el servomotor que ajusta la compuerta de la línea de succión de la turbina.

3.3.10 EVALUACIÓN DEL SISTEMA MECATRÓNICO MEDIANTE PRUEBAS DE LABORATORIO

Las pruebas de laboratorio realizadas al dosificador se hicieron utilizando un cuerpo de la sembradora-fertilizadora Modelo LC-U-N, las cuales fueron efectuadas en el banco de pruebas de sembradoras del laboratorio del Centro Nacional de Estandarización de Maquinaria Agrícola (CENEMA), perteneciente al Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias (INIFAP). Como material de prueba se utilizó semilla de maíz, con las siguientes propiedades promedio: sus dimensiones con longitud de 12.5mm, ancho de 9.1mm y espesor de 4.8mm, densidad aparente de 791.3 kg/m³, masa de 1000 semillas de 388.4g, humedad del 4% y grano dañado de 0.85%. Para las pruebas se tomó como referencia la norma mexicana NMX-O-222-SCFI-2004 (SE, 2004).

Se hicieron dos pruebas, la primera fue la prueba de dosificación y la segunda fue para caracterizar el desempeño de los controladores del dosificador de semilla y del sistema neumático.

En la prueba de dosificación la principal medición fue la masa de semilla entregada por el dosificador en 10 giros del disco semillero. Para ello se utilizaron cinco FRDS, las cuales fueron las siguientes: 5 rev/min (utilizando una PVCS a 2kPa), 21 rev/min (utilizando una PVCS a 3 kPa), 37 rev/min (utilizando una PVCS a 3 kPa), 53 rev/min (utilizando una PVCS a 3 kPa) y 70 rev/min (utilizando una PVDS a 4 kPa); un disco semillero de 30 orificios; tolva con semilla al 50% de su capacidad. En cada FRDS se realizaron cinco repeticiones y por cada repetición se hizo dar 10 giros al disco semillero. En cada repetición y a intervalos regulares de 163.84 ms, se midieron las variables: la FRDS, el error de control, desplazamiento angular, voltaje y corriente de alimentación del motor. Además, se determinó el tiempo en el cual cae la primera semilla en cada repetición con un contador electrónico, así como la masa de las semillas entregadas por el dosificador a intervalos regulares de 163 ms. La PVCS utilizada en cada FRDS fue seleccionada con el fin de minimizar los huecos en los orificios (falta de semilla) o semillas múltiples (más de una semilla por cada orificio) durante el funcionamiento del disco semillero, la cual se introdujo como la presión de referencia o de control; y el engrasador

fue fijado en la posición que minimizara el paso de semillas múltiples en los orificios del disco semillero.

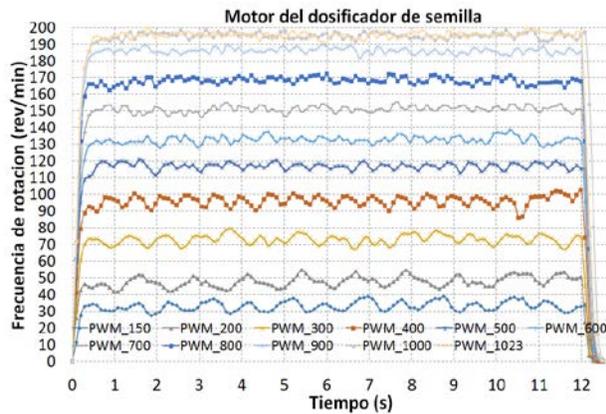
En la prueba del desempeño de los controladores, se realizó de la siguiente forma: para el controlador del dosificador de semilla se utilizaron cinco FRDS (5, 21, 37, 53 y 70 rev/min) y por cada una de ellas se aplicaron cinco PVCS (1.5, 2, 3, 4 y 5 kPa). Por cada combinación de FRDS y PVCS las principales variables registradas fueron la variable de control su valor de referencia y valor medido (valor actual), así como el error de control. Las mediciones de los sensores, para el caso del sensor de voltaje y corriente fueron ajustados con un multímetro digital (Modelo: UD87 de la compañía URREA Herramientas Profesionales, S.A. de C.V.) presentando una diferencia entre mediciones menor al $\pm 2\%$ respectivamente. Para el caso de la báscula electrónica se utilizaron pesas calibradas de uno, dos, tres, cuatro y cinco kilogramos para ajustarla, obteniendo una diferencia de medición menor al $\pm 0.05\%$.

3.4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

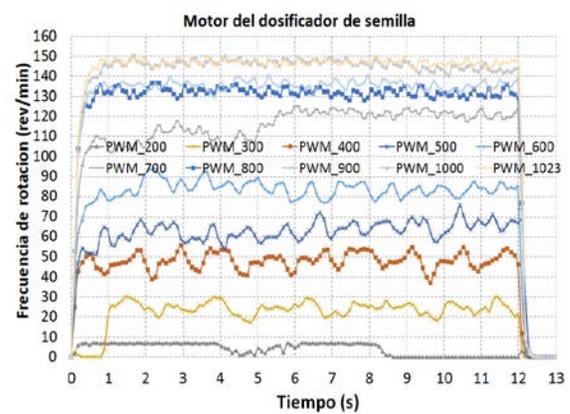
El suministro de voltaje como señal PWM para alimentar al motorreductor que acciona al dosificador de semilla (dando movimiento al disco semillero), aplicándolo como una entrada escalón y manteniéndolo constante, se obtienen las curvas mostradas en la Figura 38a y b. En cada valor del ancho de pulso de la señal PWM aplicada, presenta un comportamiento de la FRDS con variaciones, exhibido por una curva con oscilaciones. Estas oscilaciones o variaciones de la FRDS se deben a las perturbaciones en el sistema debidas a la fuerza de fricción del disco semillero con la cámara de succión, la semilla y elementos mecánicos. Las perturbaciones se incrementan con el aumento de la presión de vacío provocando mayores variaciones en la FRDS, al mantener la señal PWM constante; exhibido por el incremento de la amplitud de las oscilaciones y las subidas o bajadas repentinas de la magnitud de la FRDS en diferentes intervalos de tiempo, lo cual puede observarse al examinar y comparar las Figura 38a y b. También puede observarse que cambios del ancho de pulso de la señal PWM de igual magnitud, no provocan cambios de igual magnitud de la FRDS (lo que implica que existe un comportamiento no lineal entre ambas variables como lo muestra la Figura 39a lo que se magnifica con el incremento de la PVCS. Otro efecto de la variación de la PVDS es que con un mismo

ancho de pulso de la señal PWM se obtienen diferentes magnitudes de la FRDS, la cual decrece con el incremento de la PVCS (Figura 38a y b).

En la Figura 39a, se presenta la ecuación que aproxima la relación que existe entre la señal PWM y la respuesta en frecuencia de pulsos obtenida por los giros del disco semillero, generadas en el codificador fijado en el motor que acciona al disco semillero. Cada punto de la curva mostrada en la Figura 39a, se obtiene como un promedio de la frecuencia de pulsos determinado a partir de los datos graficados de cada una de las curvas mostrada en la Figura 38a, considerando los datos del segundo 2 al 10.



a) Utilizando la presión de vacío de 1.2 kPa



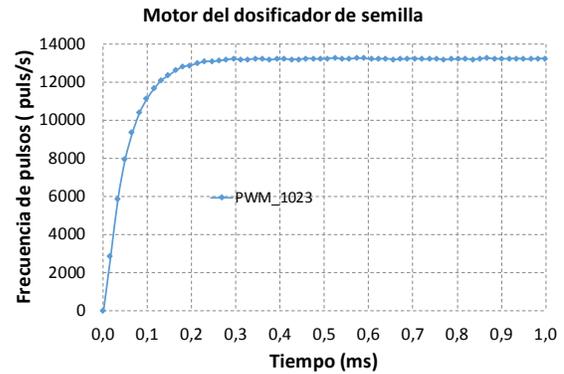
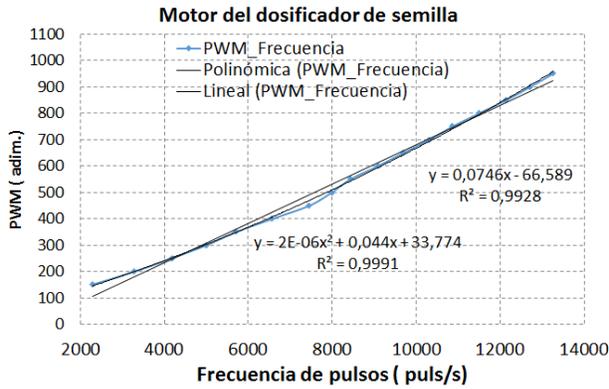
b) Utilizando la presión de vacío de 3.9 kPa

Figura 38. Respuesta de la variable frecuencia de rotación del dosificador a diferentes anchos de pulso de la señal PWM, con la tolva de semilla al 50% de su capacidad.

Para la identificación dinámica del proceso, se hizo mediante la obtención de la curva de reacción del sistema dosificador semilla a una entrada escalón de la señal PWM con magnitud de 1023, obteniendo la gráfica mostrada en la Figura 39b como un promedio de 30 repeticiones. Esta curva o sus datos permitieron estimar la función de transferencia de la planta, mostrados en la Tabla 11.

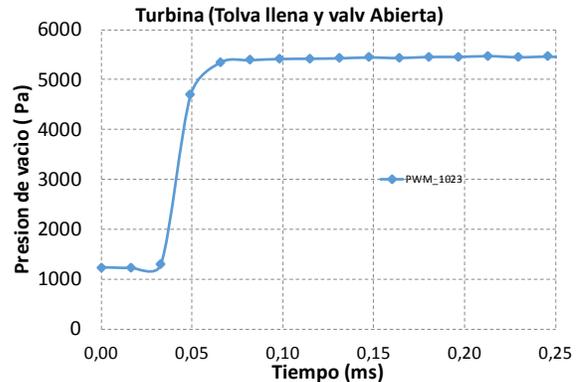
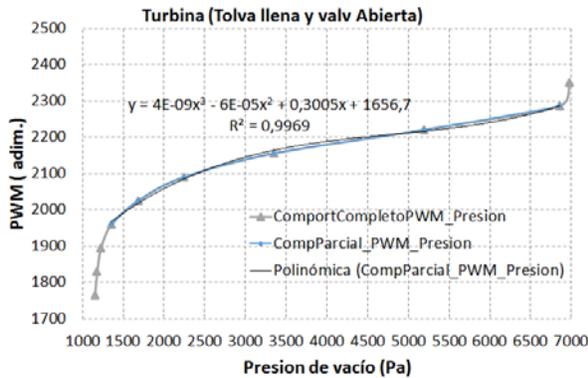
En el caso del sistema para controlar la PVCS de manera similar a lo realizado para el dosificador de semilla, se aplicaron diferentes anchos de pulso de la señal PWM al servomotor para controlar la apertura de la compuerta en la línea de succión de la turbina y se midió la PVCS, obteniendo el comportamiento que se muestra en la Figura 39c. Los datos de esta grafica se utilizaron para estimar la ecuación que relaciona a la señal PWM

y PVCS. Para identificar la dinámica del proceso, se determinó la curva de respuesta del sistema a una entrada escalón de la señal PWM con valor de 2209, obteniendo la gráfica mostrada en la Figura 39d; y a través de la cual se estimó la función de transferencia mostrada en la Tabla 11.



a) Frecuencia de pulsos en el codificador respecto a la variación del ancho de pulso de la señal PWM del dosificador.

b) Frecuencia de pulsos en el codificador respecto a la señal PWM con ancho de pulso de 1023 que alimenta al motorreductor.



c) PVCS al variar el ancho de pulso PWM con el que se alimenta el servomotor.

d) Valor utilizado del PWM de 2209 para obtener la presión máxima (5kPa) de vacío aproximada en la cámara de succión.

Figura 39. Respuesta del sistema motor-mecanismo dosificador y presión de vacío a la señal de excitación PWM.

Las funciones de transferencia estimadas de las plantas presentadas en la Tabla 11, representan una función de primer orden con un retardo. En la misma tabla se muestran las funciones de transferencia obtenidas con Matlab para cada controlador, donde el control PI es suficiente para los dos casos.

Tabla 11. Ecuaciones de la función de transferencia de la planta y del controlador para el dosificador.

Sistema	Función de transferencia	
	Planta	Controlador
Motorreductor con presión de vacío de 1.2 kPa	$G_p = \frac{0.0413}{s + 0.01519} e^{-0.416s}$	$G = \frac{0.19485s + 0.0201}{s}$
Motorreductor con presión de vacío de 3.9 kPa	$G_p = \frac{169.5}{s + 29.13} e^{-0.492s}$	$G_{cp} = \frac{0.443s + 0.2478}{s}$
Sistema neumático	$G_p = \frac{2.8204}{1 + 0.001s} e^{-4.7034s}$	$G_c = \frac{0.18s + 0.009}{s}$

En el caso del dosificador de semilla, debido a sus los requerimientos del sistema para funcionar como regulador para reducir los efectos de las perturbaciones en el desempeño del dosificador, además de los requerimientos de seguidor de trayectoria (por los cambios de velocidad de avance de la sembradora) en algunos lapsos de tiempo, lo que implica un funcionamiento como servomecanismo. Los criterios para seleccionar el mejor desempeño del controlador fueron el ISE, tiempo de levantamiento y el tiempo de asentamiento del sistema. El primer índice permite minimizar el error en la frecuencia de rotación requerida y el actual del disco semillero, reduciendo el error en el distanciamiento entre semillas (cm) y en la dosis de siembra final (semillas/ha), funcionamiento como regulador. Los otros dos criterios permiten dar una respuesta rápida debida a los cambios de la velocidad de desplazamiento de la sembradora o de la dosis de aplicación, lo que modifica la consigna del controlador y permite un funcionamiento como servomecanismo. Para lograr lo anterior, el rango completo de operación del dosificador y del controlador de la PVDS fue subdividido en intervalos para los cuales fueron seleccionados los valores de las constantes del controlador PI o PID que mejores resultados dieron los cuales se presentan en la Tabla 12 y Tabla 13.

Tabla 12. Valores de las constantes utilizadas en el control del dosificador de semilla.

Frecuencia de rotación (rev/min)	Error de control > 10 %			Error de control > 5% y < 10%			Error de control < 5%		
	k_p	k_i	k_d	k_p	k_i	k_d	k_p	k_i	k_d
0 a 10	2	5.7	0.01	1.2	5.2	0	1	3.9	0
> 10 a 30	1.6	16	0.01	1.6	16	0	1.6	16	0
> 30	0.01	7	0.01	0	7	0	0	7	0

Los valores de las constantes del controlador PI o PID inicialmente utilizados para seleccionar a los que finalmente fueron implementados en los controladores, se estimaron con Matlab y con el método del dominio de la frecuencia de Ziegler-Nichols. Para ello se evaluaron los índices de desempeño propuestos de los controladores y se tomaron los valores de las constantes que mejor desempeño dieron para cada intervalo de operación del dosificador de semilla y sistema neumático, los cuales fueron implementados en el programa final del arduino uno esclavo dos (Figura 36) y fueron empleados en la realización de las pruebas de laboratorio del dosificador.

Tabla 13. Valores de las constantes utilizadas en el control de la PVCS.

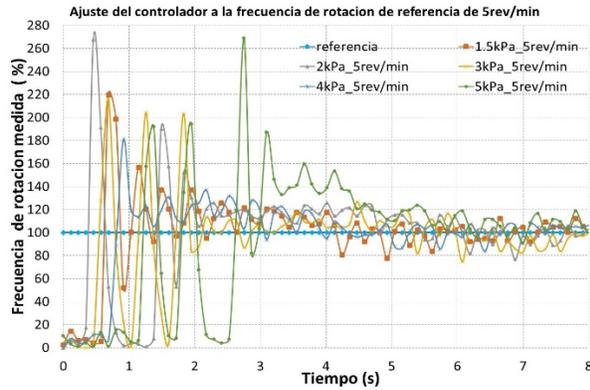
Presión de vacío deseada (kPa)	Valor de las constantes		
	k_p	k_i	k_d
0 a 4	0.05	0.2	0
> 4	0.05	0.15	0

Los resultados de la prueba de desempeño del controlador de semilla, son los siguientes: para una FRDS de referencia de 5 rev/min, el error de control se mantuvo dentro del intervalo del $\pm 20\%$ (± 1 rev/min) para las diferentes PVCS valor alcanzado en un tiempo aproximado de 3 segundos, con excepción de la PVCS de 5 kPa que requirió de un tiempo de 5 segundos (Figura 40a). Para las FRDS de referencia de 21, 53 y 70 rev/min,

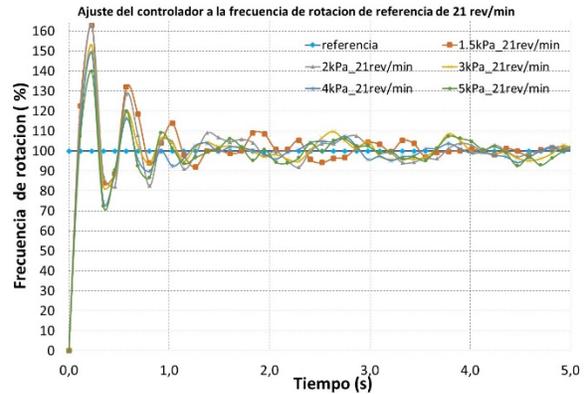
permitió alcanzar un error de control del $\pm 5\%$ en un tiempo de asentamiento de 3, 1.2 y 3 segundos respectivamente, para las PVCS probadas (Figura 40b, c y e). A la FRDS de referencia de 37 rev/min, permitió alcanzar un error control aproximado del $\pm 10\%$ en un tiempo de 2.2 segundos, para las PVCS probadas (Figura 40d).

Disminuir el error de control de $\pm 20\%$ a una FRDS de 5 rev/min, es muy difícil hacerlo y en caso de lograrlo la mejora sería poco significativa, ya que el ancho de pulso de la señal PWM que vence la resistencia que opone el disco semillero al movimiento, provoca una FRDS superior a las 5 rev/min (Figura 38a y b). Esto ocasiona que el controlador constantemente incremente o disminuya drásticamente la magnitud del ancho de pulso de la señal PWM, para aproximarse a la FRDS de referencia; por ello se toma como la mínima para operar al disco semillero.

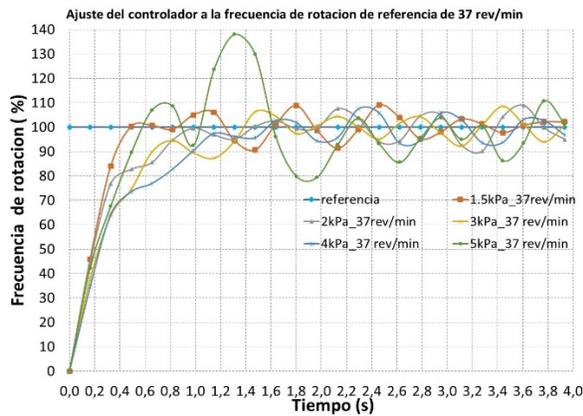
Los resultados de la prueba del desempeño del controlador del sistema neumático, fueron los siguientes: para todas las PVDS se logró un error del $\pm 5\%$ en estado estacionario con un tiempo de asentamiento de 2 a 4 segundos, con excepción a la PVCS de 1.5kPa que requirió de 6 segundos (Figura 41); sin embargo cuando el disco semillero se encuentra en movimiento el error de control se incrementa manteniéndose dentro de un intervalo aproximado del $\pm 10\%$ y el tiempo para alcanzarlo después de iniciar el movimiento del disco semillero es en un tiempo aproximado de 4 segundos (Figura 41). En cada una de las gráficas de la Figura 41, el inicio del movimiento del disco semillero puede distinguirse por los picos más elevados (perturbaciones) de cada una de las curvas graficadas.



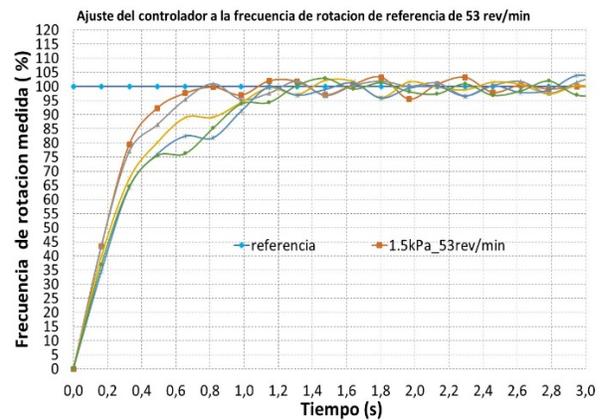
a) Utilizando la FRDS de 5 rev/min



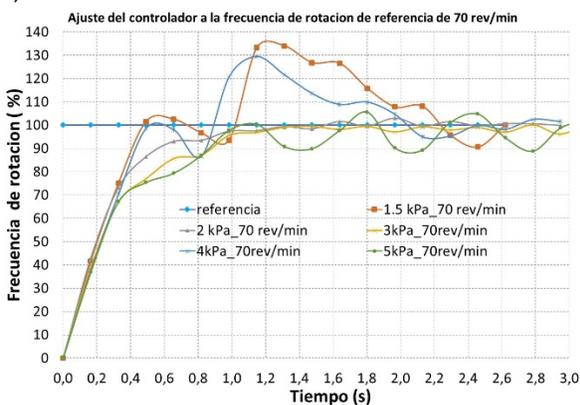
b) Utilizando la FRDS de 21 rev/min



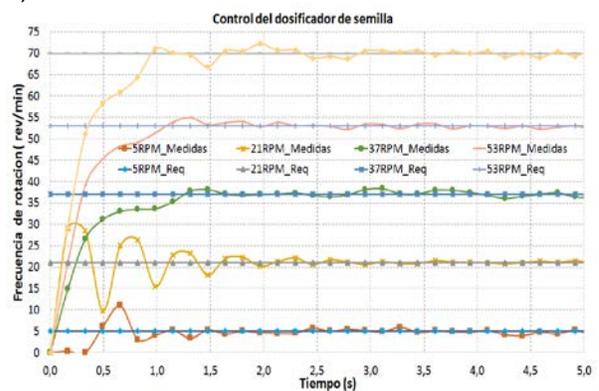
c) Utilizando la FRDS de 37 rev/min



d) Utilizando la FRDS de 53 rev/min



e) Utilizando la FRDS de 70 rev/min

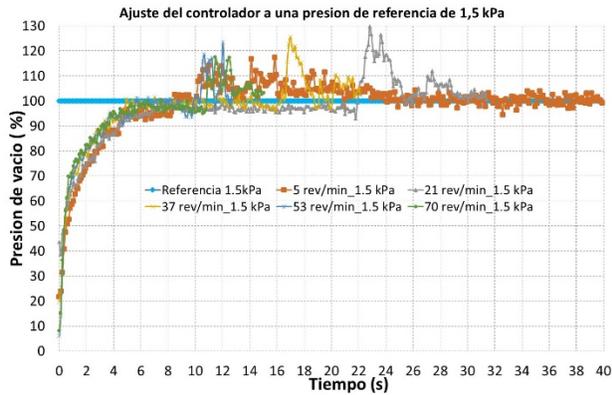


f) Utilizando las diferentes FRDS

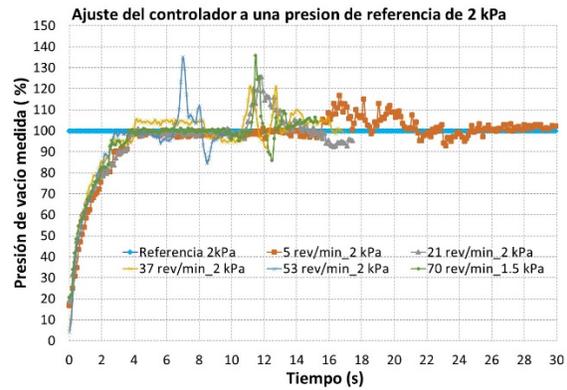
Figura 40. Desempeño del controlador PI y PID del dosificador de semilla.

En el caso de los resultados de la prueba de dosificación, los resultados del desempeño del controlador del dosificador de semilla se logró alcanzar un error del $\pm 5\%$ con un tiempo de asentamiento de 2 segundos (Figura 40f). Con excepción de la FRDS de

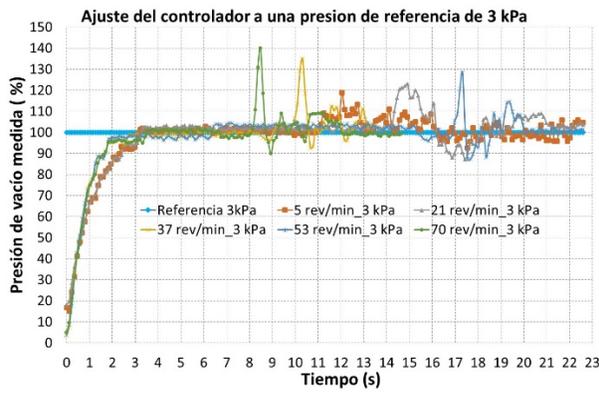
prueba de 5rev/min. Para el caso del controlador del sistema neumático se obtuvieron resultados similares a los mencionados anteriormente (Figura 41d).



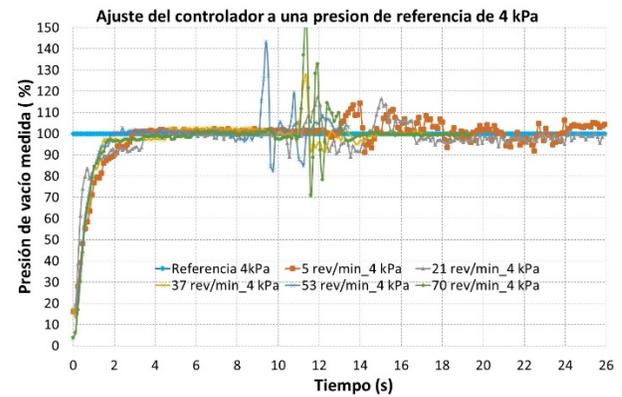
a) PVCS de 1.5 kPa como el 100%.



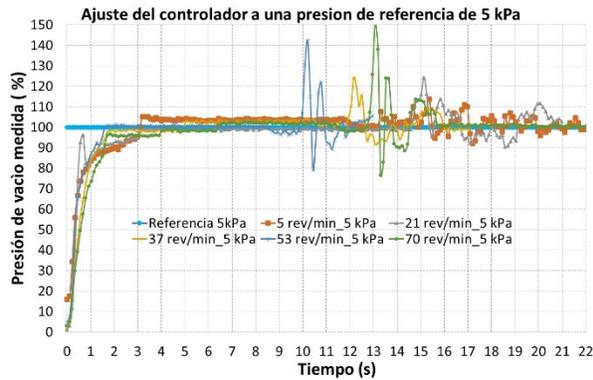
b) PVCS de 2 kPa como el 100%.



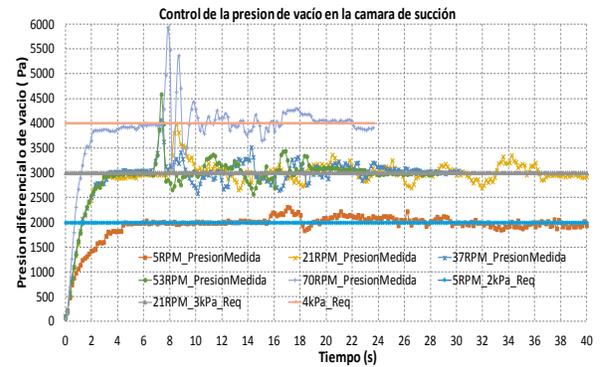
a) PVCS de 3 kPa como el 100%.



b) PVCS de 4 kPa como el 100%.



a) PVCS de 5 kPa como el 100%.



b) PVCS de 1.5 a 4 kPa

Figura 41. Desempeño del controlador PID del controlador de la PVCS.

En la prueba de dosificación, el mayor requerimiento de potencia para el MRE del dosificador de semilla se registró a la frecuencia de rotación de 70 rev/min a una presión

de vacío de 4 kPa, las mediciones y cálculos fueron obtenidos al dar 10 giros al disco semillero en cinco repeticiones con las condiciones mencionadas. El ancho de pulso promedio de la señal PWM fue de 910.2, voltaje efectivo de 16.8V y corriente de 8.86 A. Alcanzando una exigencia al motor de 148.5W y torque de 8.1 Nm.

Al determinar la irregularidad de entrega del dosificador en cuanto a la masa de las semillas entre repeticiones y por cambio de velocidad en todas las FRDS probadas (Figura 42), conforme a la norma mexicana NMX-O-222-SCFI-2004, su valor fue inferior al 5%, lo que implica que el dosificador de semilla presenta un buen desempeño en esos puntos de acuerdo a la prueba de dosificación en banco.

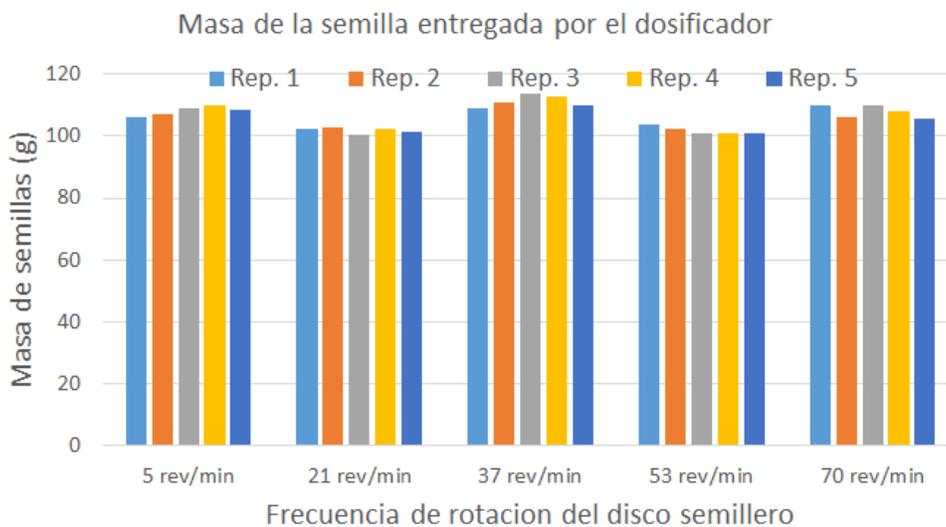


Figura 42. Masa y número de semillas entregadas en las repeticiones a diferentes frecuencias de rotación del dosificador.

3.5 CONCLUSIONES

El desempeño del controlador del dosificador es adecuado para realizar cambios en la dosis de aplicación de forma continua y en tiempo real; permitiendo alcanzar un error del $\pm 5\%$, para FRDS con un tiempo de 21, 53 y 70 rev/min, con un tiempo de asentamiento máximo de 3 segundos. Para el caso de la FRDS mínima recomendada de 5rev/min el error de control se mantuvo dentro del $\pm 20\%$.

El controlador del sistema neumático, permite ajustar la PVCS de referencia (en el intervalo de 2 a 5 kPa) con un error de control dentro del $\pm 10\%$, cuando la FRDS es de 5 a 70 rev/min, en un tiempo de 2 a 4 segundos.

El dosificador de semilla permite cumplir con las especificaciones de calidad establecidas en la NMX-O-222-SCFI-2004 de la irregularidad de entrega de la máquina (4.33) e irregularidad de entrega por cambio de velocidad de la máquina (4.3.5), de acuerdo a la prueba de dosificación en banco.

3.6 REFERENCIAS

- [1] Alfaro R., V. M. (2003). Métodos de sintonización de controladores PID que operan como servomecanismos. *Revista Ingeniería*, San José, Costa Rica, Vol. 13(1-2):13-29.
- [2] Alfaro R., V. M. (2002). Métodos de sintonización de controladores PID que operan como reguladores. *Revista Ingeniería*, San José, Costa Rica, Vol. 12(1-2):21-36.
- [3] Anaya P. M. E.; Benítez B. V. H.; Pacheco R. J. H. y Montaña V. F. (2014). Diseño de controladores P, PI y PID para el comportamiento dinámico de un servo-sistema hidráulico, basado en desarrollo experimental. *UNISON-EPISTEMUS* 16:13-21.
- [4] Atul, K. D.; Nibbedita, C.; Sashi S. and Vinod Yadu, 2012. PWM Based Automatic Closed Loop Speed Control of DC Motor. *International Journal of Engineering Trends and Technology*. Vol. 3(2):110-112.
- [5] Barut Z. B. And Özmerz A., 2004. Effect of Different Operating Parameters on Seed Holding in the Single Seed Metering Unit of a Pneumatic Planter. *Turk J Agric For* 28:435-441.
- [6] Basilio J. C. and Matos S. R., 2002. Design of PI and PID controllers with transient performance specification. *IEEE Transactions on Education*, Vol. 45, No. 4: 364-370.
- [7] Bragachini M.; Méndez A.; Scaramuzza F; Vélez J. P. y Villarroel D. 2010. Manejo de cultivos por ambiente. Evolución de la dosificación variable en Argentina. Proyecto Agricultura de Precisión INTA. Manfredi, Pcia. de Córdoba, Argentina.
- [8] Cai X., Walgenbach M., Doerpmond M., Schulze L. P. and Sun Y. , 2016. Closed-Loop Control of Chemical Injection Rate for a Direct Nozzle Injection System. *Sensors* 16(1), 127.
- [9] Guzmán J. L., Medina R., Rodríguez F., Sánchez-Hermosilla J., Berengel M., 2004. Pressure control of a mobile spraying system. *Spanish Journal of Agricultural Research* 2(2): 181-190.
- [10] Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDEA), 2010. Ahorro y eficiencia energética en la agricultura de precisión. Madrid, España.
- [11] Jianbo, Z.; Junfang, X.; Yong, Z.; Shun, Z., 2014. Design and experimental study of the control system for precision seed-metering device. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering* Vol. 7 No.3: 13-18.
- [12] Katsuhiko Ogata (2003). *Ingeniería de control moderna*. 4ta edición. PEARSON, Prentice hall. Pp. 837.
- [13] Li, Yang; Xiantao, He; Tao, Cui; Dongxing, Zhang; Song, Shi; Rui Zhang; Mantao Wang, (2015). Development of mechatronic driving system for seed meters equipped on conventional precision corn planter. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering* Vol. 8 No.4: 1-9.
- [14] Pillajo A. C. y Hincapié R., (2015). Algoritmo genético para sintonización de PID basado en la integral del error absoluto. Universidad Politécnica Salesiana.

- [15] Pratap V., Neelam P., Chandrakant K. (2014). Real Time DC Motor Speed Control using PID Controller in LabVIEW. International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering. Vol. 3, Issue 9: (12162-12167).
- [16] Secretaria de Economía (SE), 2004. Tractores, implementos agrícolas - sembradora neumática de precisión - especificaciones y método de prueba NMX-O-222-SCFI-2004, México.
- [17] Singh T. P. and Mane D. M. 2011. Development and laboratory performance of an electronically controlled metering mechanism for okra seed. Agricultural mechanization, Asia, Africa and Latin America, Vol. 42 No. 2: 63 – 69.
- [18] Wenbin, Y.; Dada W.; Pengfei, J.; Weiguo, L., (2002). The PWM speed regulation of DC motor based on intelligent control. Systems Engineering Procedia 3:259 – 267.
- [19] Atmel Corporation (2016). ATMEGA328/P Datasheet, 8-bit AVR microcontroller. San José, California, USA. http://www.atmel.com/Images/Atmel-42735-8-bit-AVR-Microcontroller-ATmega328-328P_datasheet.pdf.
- [20] Atmel Corporation (2016). ATmega640/V-1280/V-1281/V-2560/V-2561/V Datasheet, 8-bit AVR microcontroller. San José, California, USA. http://www.atmel.com/Images/Atmel-2549-8-bit-AVR-Microcontroller-ATmega640-1280-1281-2560-2561_datasheet.pdf.
- [21] Página web de Arduino. <https://www.arduino.cc/>.

CAPÍTULO 4

SISTEMA MECATRÓNICO PARA EL CONTROL DE LOS DOSIFICADORES DE FERTILIZANTE Y PESTICIDA GRANULADOS DE UNA SEMBRADORA-FERTILIZADORA

Julio Torres Sandoval¹, Eugenio Romantchik Kriuchkova¹, Irineo L. López Cruz¹, Gilberto De J. López Canteñs¹.

¹Posgrado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua. Universidad Autónoma Chapingo. Km 38.5 Carretera México- Texcoco. C.P. 56230, Chapingo, Estado de México. Tel. (595) 95 2 15 51, Email: jultsmex@yahoo.com.mx.

4.1 RESUMEN

Las máquinas de dosificación variable hacen uso de sistemas mecatrónicos para el accionamiento y control de los dosificadores, reemplazando los sistemas mecánicos tradicionales constituidos por una rueda motriz, transmisión por cadenas y engranes. Los sistemas mecatrónicos permiten un cambio continuo y en tiempo real de la dosis de aplicación. En este trabajo se desarrolló un sistema mecatrónico para el control de los dosificadores de fertilizante y pesticida granulado, el cual fue adaptado a una sembradora-fertilizadora.

El sistema está basado en microcontroladores como unidad de procesamiento y control, además de motores de corriente directa con codificadores para accionar a los dosificadores. Los cambios de la dosis de aplicación se logran con el control de la frecuencia de rotación de los dosificadores, utilizando la técnica de modulación por ancho de pulso y el control Proporcional-Integral-Derivativo o Proporcional-Integral.

El desempeño del sistema mecatrónico, para controlar la frecuencia de rotación del dosificador de fertilizante permite un tiempo de levantamiento menor a un segundo,

sobreelongación máxima del 14% y tiempo de asentamiento de 2 a 3 segundos en frecuencias que van de 5 a 35 rev/min; para el caso del dosificador de pesticida, el tiempo de levantamiento fue menor a un segundo o tiempo en el cual alcanzo la dosis de aplicación deseada, a pesar de que la señal de control rebasa el $\pm 5\%$ del error en el estado estacionario la dosificación del pesticida fue excelente con una irregularidad de entrega menor al 3%, para el intervalo de frecuencias de rotación del dosificador de 10 a 140 rev/min.

PALABRAS CLAVE: Microcontrolador, PWM, Control PID, Dosificadores de fertilizante y agroquímico.

4.2 INTRODUCCIÓN

La agricultura de precisión (AP) es definida como el “manejo de la variabilidad espacial y temporal a nivel inter parcelario para mejorar el retorno económico y reducir el impacto ambiental” (Fountas *et al.*, 2003). Su aplicación permite optimizar el uso de los recursos, disminuir el impacto ambiental negativo, incrementar la rentabilidad de los cultivos y facilitar el logro de la sustentabilidad de la actividad agrícola.

La AP hace uso de las tecnologías como los sistemas de posicionamiento global (GPS), dispositivos de detección y almacenamiento de la información referente a la variabilidad interparcelaria, sistemas de información geográfica, modelos de ayuda para la toma de decisiones, tecnologías capaces de controlar automáticamente los equipos agrícolas (mecatrónicos) de forma que se pueda modificar en continuo y en tiempo real las condiciones de regulación de los mismos (IDEA, 2010). Una de las áreas de mayor interés en la AP es la aplicación de insumos a tasa variable, concepto promisorio no incorporado

con suficiente rapidez a las prácticas productivas de la agricultura moderna (Robert, 2002; Reyes et al., 2011).

Los equipos utilizados en la aplicación a tasa variable de fertilizante y pesticida en línea, hacen uso de sistemas hidráulicos o electromecánicos para su accionamiento. Uno de ellos, utiliza el sistema hidráulico del tractor y los actuadores principales son motores hidráulicos para el accionamiento de los dosificadores. El otro, utiliza como fuente de potencia al sistema eléctrico del tractor y los actuadores principales son motores de corriente directa (CD) para el accionamiento de los dosificadores, (Bragachini *et al.*, 2010). Este último presenta mayores ventajas, debido a su menor costo y mantenimiento, además de ser más rápido para alcanzar la dosis de aplicación deseada.

El cambio de la dosis de aplicación de los insumos, se logra mediante la variación de la velocidad angular o frecuencia de giro de los dosificadores. Una de las técnicas más utilizadas para modificar dicha variable, cuando los dosificadores son accionados por motores de corriente continua, es la modulación por ancho de pulso (PWM) (Wenbin *et al.*, 2012; Atul *et al.*, 2012; Sartori *et al.*, 2015). Para gobernar su magnitud se utilizan técnicas de control en lazo abierto, mediante el uso de motores a pasos (Yang *et al.*, 2015; Jianbo *et al.*, 2104); o en lazo cerrado, mediante servomotores o motores de CD, con técnicas de control clásico PI o PID (Basilio y Mateos, 2002; Saranya y Pamela, 2012; Pratap, 2014).

W. Bolton (2006) define a un sistema mecatrónico de la siguiente forma: “no como una unión entre sistemas eléctricos y mecánicos y es más que un simple sistema de control; es una integración completa de todo lo anterior”. El estudio de los sistemas mecatrónicos pueden ser divididos en las siguientes áreas clave: 1) Modelado de sistemas físicos; 2)

Sensores y actuadores; 3) sistemas y señales; 4) computadores y sistemas lógicos; 5) software y adquisición de datos, (Bishop, 2002).

Debido a que en México la aplicación de la AP es escasa o nula tanto a nivel de investigación como productivo, a pesar de los beneficios que permite alcanzar; por ello, el objetivo de esta investigación fue el desarrolló (diseño, construcción y prueba) de un sistema mecatrónico (SM) para el control de la dosificación de fertilizante y pesticida de forma continua y en tiempo real, adaptable a una sembradoras-fertilizadoras.

4.3 MATERIALES Y MÉTODOS

4.3.1 DESCRIPCIÓN DE LA SEMBRADORA-FERTILIZADORA.

La sembradora-fertilizadora utilizada en esta investigación fue diseñada para trabajar bajo condiciones de labranza de conservación, se comercializa con uno o hasta ocho cuerpos, cada cuerpo cuenta con un sistema de dosificación neumático de semilla, un dosificador de fertilizante y pesticidas sólidos. Utiliza un disco cortador dentado, que funciona como rueda motriz, transmisión por cadenas y engranes para accionar a los dosificadores, en el caso del dosificador de fertilizante la transmisión por cadenas y engranes mueven a un piñón y este a su vez a la corona, sobre la cual se fija una barra ubicada al interior de la tolva (Figura 44). Considerando la velocidad operativa de las máquinas para la aplicación de insumos, con velocidad máxima de 12 km/h, a esta velocidad y con los ajustes de la máquina seleccionada para esta investigación, el disco cortador giraría a una frecuencia de rotación máxima de 146 rev/min, la barra-disco dosificadora de fertilizante a 35 rev/min, y el rodillo ranurado para la dosificación de pesticida a 144 rev/min; estos datos fueron considerados como especificaciones de diseño y para realizar las pruebas del sistema mecatrónico.

4.3.2 SUBSISTEMA MECÁNICO.

El SM se adaptó a un cuerpo de la sembradora-fertilizadora. Para accionar el dosificador de pesticida granulado se usó el motorreductor EMG49, de 24 volts de corriente directa (VCD), con una frecuencia de rotación en vacío de 160 rev/min, torque máximo de 1.6 Nm y potencia de 34.7 W. Con un codificador integrado de 245 pulsos por giro de la flecha en cada línea de salida A y B. La flecha del motor es acoplada directamente al dosificador de pesticida (Figura 43b).

Para accionar el dosificador de fertilizante se usó un motorreductor de 350W a 24 VCD, con dos flechas de salida, una de ellas proveniente del reductor y la otra directa del motor. La flecha con reducción alcanza una frecuencia de rotación en vacío de 500 rev/min, y la flecha sin reducción de 6255 rev/min; en esta última se fijó el codificador YUMO E6B2-CWZ3E de 1024 pulsos por revolución en sus líneas de salida A y B, el cual se alimenta entre 5 a 15 VCD. La flecha de salida con reducción acciona un engranaje piñón-corona, mediante una transmisión por cadena entre la flecha del piñón y la flecha del motorreductor, en la corona está fija la barra-disco que da movimiento al fertilizante (Figura 43a y Figura 44).

4.3.3 SUBSISTEMA ELECTRÓNICO

El SM está basado en la plataforma de desarrollo Arduino “open source”, de hardware y software libre. Utiliza la placa Arduino MEGA (Atmel Corporation, 2016a) como unidad de control principal, basada en el microcontrolador Atmel2560. A esta placa se conectaron los siguientes elementos: pantalla de cristal líquido (LCD 20x4), reloj de tiempo real, memoria SD, teclado matricial; y tres placas Arduino UNO (Atmel Corporation, 2016b) en comunicación I2C (Inter-Integrated Circuit), donde la placa Arduino Mega actúa como maestro y los Arduino Uno como esclavos. Para la realización de las pruebas de

laboratorio fueron conectados otros dos arduino uno, para medir la masa del material de prueba entregada por los dosificadores (Figura 44).

Un Arduino-Uno se usó para controlar el dosificador de fertilizante y otro para el de pesticida. En cada uno se conectaron los siguientes elementos: sensor de voltaje, sensor de corriente, codificador incremental, unidad de potencia y el Arduino Mega. Otro Arduino Uno se utilizó para medir la velocidad de avance de la sembradora, al cual se conectó un codificador YUMO E6B2-CWZ3E y el Arduino Mega. Se diseñó una unidad de potencia basada en opto-acopladores y transistores de potencia, que amplifican la señal de control PWM enviada por los microcontroladores a los motores aislándolos de las altas tensiones. El SM se alimenta con el sistema eléctrico del tractor a un voltaje de 24 VCD.



a) Fijación del motor al dosificador de fertilizante.



b) Fijación del motor al dosificador de pesticida.

Figura 43. Fijación de los motores de CD a los dosificadores.

4.3.4 SUBSISTEMA DE CONTROL

El proceso seguido para el desarrollo del sistema de control de los dosificadores, fue el siguiente:

Paso 1. Experimentalmente se identificó la ecuación que relaciona el ancho de pulso (duty cycle) de la señal PWM con la frecuencia de pulsos del codificador, esto por separado por cada dosificador. Para ello, se aplicaron diferentes entradas escalón del ancho de pulso (tomando el valor mínimo de 50 y los valores al ir incrementando en 50 hasta el valor máximo de 1023) y se midió la frecuencia de pulsos obtenida del codificador del motor; con cada ancho de pulso seleccionado se hizo funcionar el motor-dosificador en un tiempo de 10 segundos, tomando mediciones de la frecuencia de pulsos cada 98.304 ms. El valor de la frecuencia considerada como respuesta al ancho de pulso aplicado de la señal PWM, fue el promedio de las mediciones obtenidas a partir de los 2 a los 10 segundos. Para el caso del dosificador de fertilizante, el ensayo se realizó con el motor acoplado al dosificador con la tolva vacía. En el dosificador de agroquímico se efectuó bajo tres condiciones, la primera únicamente con el motor, la segunda con el motor acoplado al dosificador de pesticida con la tolva vacía, y la tercera igual que el caso anterior, pero con la tolva llena del material de prueba y compuerta completamente abierta.

Paso 2. Caracterización de la respuesta del sistema a una entrada escalón. Fue obtenida como el comportamiento promedio en 30 repeticiones, de la aplicación de una entrada escalón de la señal PWM (con valor de 1023) y su respuesta en frecuencia de pulsos del codificador, en el intervalo de tiempo del inicio de la aplicación de la entrada escalón (tiempo cero) a los 1.5 segundos y realizando mediciones de la frecuencia de pulsos a intervalos regulares de 16.384 ms. Las condiciones bajo las cuales se realizaron los ensayos para el dosificador de fertilizante y agroquímico fueron las descritas en el Paso 1.

Paso 3. Generación de la función de transferencia de la planta. Utilizando los datos obtenidos en el paso 2, se determinó la función de transferencia de la planta mediante la herramienta “System Identification Tool” del System Identification Toolbox del ambiente de programación de Matlab, haciendo un llamado a esta herramienta desde la ventana de comandos con la instrucción “ident”.

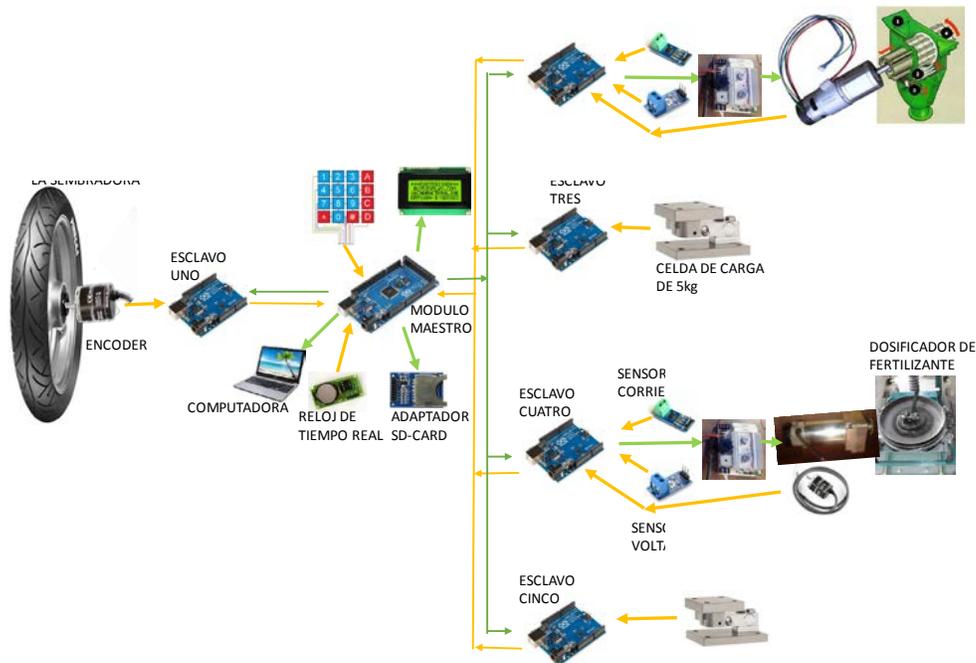


Figura 44. Esquema del circuito electrónico y lógica de control.

Paso 4. Sintonización del controlador PID. Con la función de transferencia de la planta, se utilizó la herramienta “pid tuner” del Control System Toolbox de Matlab, haciendo un llamado a esta herramienta en la ventana de comandos con la instrucción “pidtool”, para encontrar los valores de las constantes k_p , k_i y k_d del controlador PID. También se determinaron las constantes del controlador PID utilizando la Ecuación 42, la cual representa la función de transferencia del controlador PID ($G_c(s)$), y la función de transferencia de la planta estimada ($G_p(s)$), obteniendo con ellas la función de

transferencia en lazo cerrado del sistema del controlador (Ecuación 43), Alfaro *et al* (2002 y 2003) y Anaya *et al* (2014).

$$G_c(s) = k_p + \frac{k_i}{s} + k_d s = \frac{k_i + k_p s + k_d s^2}{s} \quad \text{Ecuación 42}$$

$$G_{lc}(s) = \frac{G_p(s)G_c(s)}{1 + G_p(s)G_c(s)} \quad \text{Ecuación 43}$$

Donde $G_{lc}(s)$ es la función de transferencia en lazo cerrado, $G_p(s)$ la función de transferencia de planta y $G_c(s)$ la del controlador.

En la Ecuación 44 muestra la expresión que permite determinar la señal de control, mediante la reducción de la diferencia entre la referencia (frecuencia de pulsos requeridos) y el valor medido (frecuencia de pulsos medidos) de la variable de control en el sistema.

$$u(t) = k_p e(t) + k_i \int_0^t e(\tau) d\tau + k_d \frac{de(t)}{dt} \quad \text{Ecuación 44}$$

Donde $u(t)$ es la señal de control, $e(t)$ es el error entre el valor de referencia y el valor actual k_p , k_i y k_d son las constantes del controlador proporcional, integral y derivativo respectivamente.

Paso 5. Finalmente se programaron los algoritmos de control del sistema mecatrónico. El algoritmo de control programado en el arduino uno que controla al dosificador de fertilizante y pesticida es el presentado en la Figura 45, donde $u(t)$ se determina con la Ecuación 44, para PWM_r y PWM_m se determina con la Ecuación 45 para el dosificador de fertilizante y con la Ecuación 46 para el dosificador de pesticida.

4.3.5 PROGRAMACIÓN Y FUNCIONAMIENTO DEL SM

La programación del SM se realizó en lenguaje C++ con el software Arduino [22].

El arduino uno (esclavo uno) determina la velocidad de avance de la sembradora (v_s), (Figura 44), para ello se configuraron las interrupciones INT0 e INT1 para detectar los pulsos del codificador al girar la rueda, además se configuro la interrupción del Timer 1 para que el conteo de pulsos lo realice en un tiempo exacto de 163.84 ms, así como la determinación de la velocidad y el envío de una señal a través del pin digital 8 al maestro (arduino mega), que la detecta mediante una interrupción en el PIN 2 (INT0), y obtiene el valor de la velocidad vía comunicación I2C.

El arduino Mega controla el funcionamiento del SM, su funcionamiento inicia con la configuración e inicialización de cada uno de los dispositivos que le son conectados. En él se programaron tres modos de funcionamiento, que son: modo de inactividad, modo de aplicación de insumos y modo de prueba-calibración. Cuando se enciende el SM inicia en modo inactivo, en espera de que el usuario cambie el modo de operación; ya sea al modo de aplicación o de prueba-calibración. Cuando es seleccionado alguno de estos modos, activa los esclavos correspondientes para ejecutar el modo de operación seleccionado, y envía los datos requeridos por cada esclavo para su funcionamiento. Cuando el modo de aplicación de insumos está activo, el arduino mega espera la señal del esclavo uno que le indica que la velocidad de desplazamiento de la sembradora ha sido actualizada, momento en el cual actualiza cada uno de los datos de operación de los esclavos y extrae de ellos vía I2C los datos que caracterizan el desempeño de los dosificadores; además de verificar y actualizar los datos de operación introducido por el usuario o cambiar el modo de operación.

Cuando el SM opera en modo de pruebas-calibración, el usuario introduce la frecuencia de rotación a la cual deben girar los dosificadores y el número de giros que deben realizar. Una vez activo, el arduino mega controla la frecuencia de rotación de los dosificadores

con la magnitud seleccionada y los detiene cuando han realizado los giros elegidos por el usuario, recibiendo los datos de importancia de cada uno de los esclavos cada 163.84 ms vía comunicación I2C.

El arduino uno (esclavo dos) fue programado para controlar el funcionamiento del dosificador de fertilizante y arduino uno (esclavo cuatro) del dosificador de pesticida, (Figura 44). Su funcionamiento inicia con la configuración e inicialización de cada uno de los dispositivos conectados a él, y espera a que el maestro le asigne el modo de funcionamiento; ya sea en modo de aplicación, de prueba-calibración o de inactividad; para cada modo operativo recibe del maestro los datos requeridos para ejecutarlos e implementa el algoritmo de control de los dosificadores (Figura 45). Cuando el modo de aplicación está activo, espera que el maestro actualice los datos de la operación y le envía los datos de mayor importancia de la labor de aplicación, lo que se realiza cada 163.84ms. En el caso en el cual el modo de operación activo sea el de pruebas-calibración, espera a recibir del maestro los datos operativos actualizados y le regresa los datos de mayor importancia resultado de la actividad, esto lo realiza hasta cumplir con la condición de paro.

El algoritmo implementado en los esclavos que controlan los dosificadores se presenta en la Figura 45, el cual inicia con los datos de entrada enviados por el maestro, que son: la velocidad de avance de la sembradora (v_s), los pulsos generados por el codificador en cada giro de la flecha del motor (P_{em}), la cantidad de material entregado en cada giro del dosificador (q), la dosis de aplicación deseada (Q) y distancia entre surcos (d_{sur}), y para cuando funciona en modo de pruebas-calibración también envía el número de giros a dar en el dosificador y la frecuencia de rotación a la cual los debe realizar. En los esclavos se configuran las interrupciones INT0 e INT1 para detectar los pulsos del codificador

fijado en la flecha del motor, además de la interrupción del Timer 1 para que el conteo de pulsos (P_{cm}) lo realice en un tiempo exacto de 163.84 ms (T_{cm}). Con los datos recibidos y el conteo de pulsos se determina la frecuencia de rotación requerida (f_r) y frecuencia de pulsos generada por el codificador del motor (f_m); posteriormente con la frecuencia de pulsos requerida se estima el ancho de pulso requerido (PWM_r) y con la frecuencia de pulsos medida se determina el ancho de pulsos medido (PWM_m). El ancho de pulsos requerido o medido para el caso del dosificador de fertilizante se determina con la Ecuación 45; y para el dosificador de pesticida con la Ecuación 46.

$$PWM = 3 \times 10^{-12} f^3 - 2 \times 10^{-7} f^2 + 0.012 f - 14.4 \quad \text{Ecuación 45}$$

Donde PWM es el ancho de pulsos requerido o medido de la señal PWM (adimensional) y f la frecuencia de pulsos requerida o medida, ambas en el motor que acciona al dosificador de fertilizante.

$$PWM = 0.00005 f^2 - 0.0733 * f + 83.668 \quad \text{si } f < 1800 \quad \text{Ecuación 46}$$

$$PWM = 0.6255 * f - 745.26 \quad \text{si } 1800 < f < 2450$$

$$PWM = 0.7276 f^2 + 948.6 \quad \text{si } f > 2450$$

Donde PWM es el ancho de pulsos requerido o medido de la señal PWM (adimensional) y f la frecuencia de pulsos requerida o medida, ambas en el motor que acciona al dosificador pesticida.

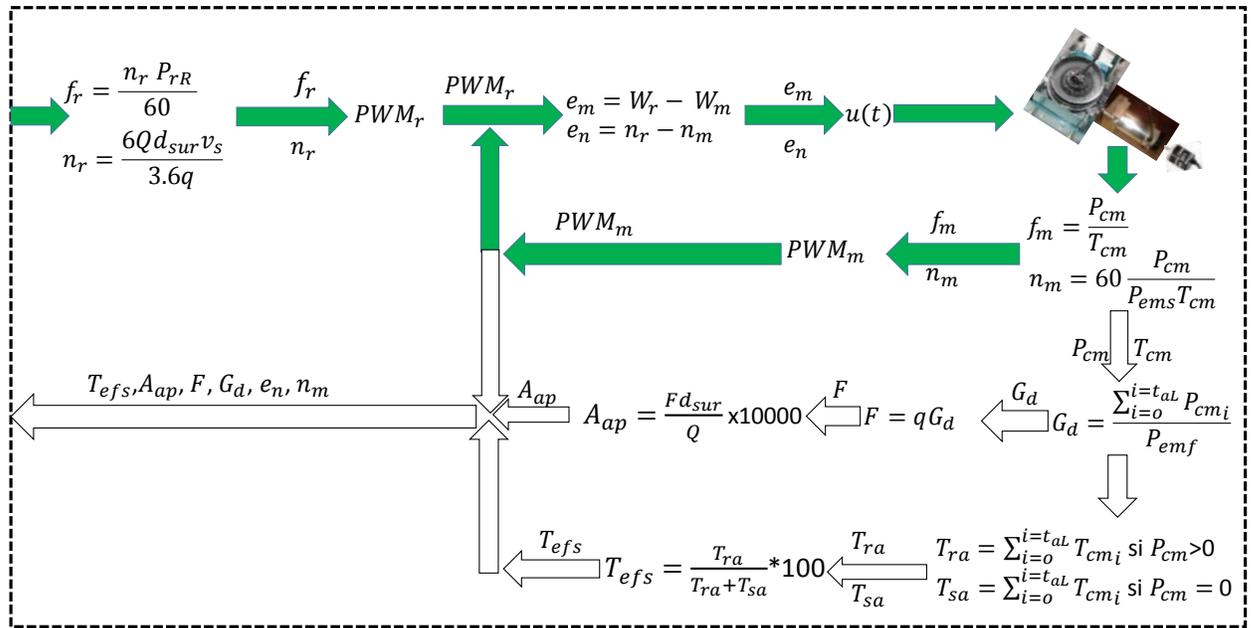
La diferencia entre el ancho de pulsos requerido (PWM_r) y ancho de pulsos medido (PWM_m) corresponde al valor del error (e_m) utilizado por la Ecuación 44, que permite obtener la señal de control (u_t) del dosificador (ancho de pulso de la señal PWM) con la cual se alimenta al motor del dosificador correspondiente. Además, se realiza el cálculo del área en la cual se ha aplicado el insumo (A_{ap}) en m^2 , cantidad teórica aplicada del

insumo (F) en gramos, tiempo efectivo de trabajo del dosificador (T_{efs}) en porciento. Los datos de importancia del desempeño del control del dosificador y correspondientes al trabajo realizado durante la labor de aplicación del insumo o pruebas son enviados al maestro, datos como tiempo efectivo de trabajo del dosificador (T_{efs}), área cubierta durante la aplicación (A_{ap}), masa teórica aplicada (F), frecuencia de rotación medida en el dosificador (n_m) y el error de control (e_n). Cuando los esclavos funcionan en modo de pruebas también miden el voltaje y la corriente de alimentación del motor, y calculan la potencia y el torque (Ecuación 47) exigido al motor.

$$V_{ef} = V_f \frac{D_c}{1023}, \quad P = V_{ef} I \quad \text{y} \quad T = \frac{P}{w} \quad \text{Ecuación 47}$$

Donde: V_{ef} voltaje efectivo (V), P Potencia al motor (W), T Torque (Nm), w velocidad angular de la flecha del motor (rad s^{-1}), D_c ancho de pulsos de la señal PWM enviado (toma valores de 0 a 1023, adimensional), V_f voltaje medido en la línea que alimenta al motor (V) y I corriente de alimentación al motor (A).

Una vez implementado la programación y el algoritmo de control en cada uno de los Arduino, se realizaron pruebas para determinar el desempeño del control PID utilizando diferentes valores de las constantes, tomando como base los estimados con la herramienta PID Tuner de Matlab. Para cada una de las constantes k_p , k_i y k_d fueron seleccionados tres valores, el primer grupo de ellos utilizados para obtener una respuesta de la señal de control que elimine rápidamente el error, cuando el error es mayor al 10%; el segundo grupo de valores se utiliza cuando el error está en un rango del 5 al 10% del valor de referencia; y el tercer grupo cuando el error es menor al 5% del valor de referencia.



Nomenclatura utilizada: n_{int} : Número de interrupciones desde que inicio la labor de siembra hasta el momento actual (adimensional), G_d : Giros dados por el disco semillero, t_{al} : Tiempo contado desde que inicio la labor (s), $\sum_{i=0}^{i=t_{al}} P_{cm_i}$: Pulsos totales contados en el tiempo desde que inicio la labor (pulsos), P_{cm} : Pulsos contados en el encoder del motor (adimensional), $\sum_{i=0}^{i=t_{al}} P_{cm_i}$: Pulsos totales contados en el motor desde el inicio de la labor (adimensional), G_d : Giros del dosificador (adimensional), F_t : fertilizante teórico aplicado durante la labor (adimensional), T_{ra} : Tiempo real de aplicación (s), T_{ss} : Tiempo sin aplicación (s).

Figura 45. Algoritmo de control de los dosificadores.

4.3.6 EVALUACIÓN DEL SISTEMA MECATRÓNICO MEDIANTE PRUEBAS DE LABORATORIO

Las pruebas se hicieron utilizando un cuerpo de una sembradora-fertilizadora, en el banco de pruebas de sembradoras del laboratorio del Centro Nacional de Estandarización de Maquinaria Agrícola (CENEMA), que pertenece al Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias (INIFAP). El material de prueba utilizado fue fertilizante urea comercial (46-0-0), para el dosificador de fertilizante y pesticida, tomando como base lo descrito por la norma mexicana NMX-O-222-SCFI-2004 (Secretaría de Economía, 2004) y evitar la manipulación de productos tóxicos para el caso del dosificador de pesticida. Las propiedades promedio del material de prueba,

fueron las siguientes: densidad aparente de 766.8 kg/m^3 , coeficiente de fricción estático de 30° , tamaño del grano menor a 5 mm y humedad 0.22%.

En la prueba de cada dosificador; se utilizaron cinco frecuencias de rotación para el dosificador de fertilizante (barra dosificadora) 5, 12, 20, 27 y 35 rev/min; y cinco para el dosificador de pesticida (rodillo ranurado) 10, 32, 55, 77 y 100 rev/min. La apertura de la compuerta que regula la salida del material de la tolva se colocó en la posición media (50%) y la tolva fue puesta a un nivel de llenado del 80% de su capacidad con el material de prueba en ambos casos. En cada frecuencia de rotación se realizaron cuatro repeticiones y por cada repetición se hizo girar 20 veces la barra dosificadora y 30 veces al rodillo ranurado. En cada repetición se midió la frecuencia de rotación del dosificador, el error de control, el número de giros, voltaje y corriente de alimentación del motor a intervalos regulares de 114.688 ms, además se midió la cantidad de material de prueba entregado por cada dosificador a intervalos regulares de 645 ms para el dosificador de agroquímico y 715 ms para el de fertilizante.

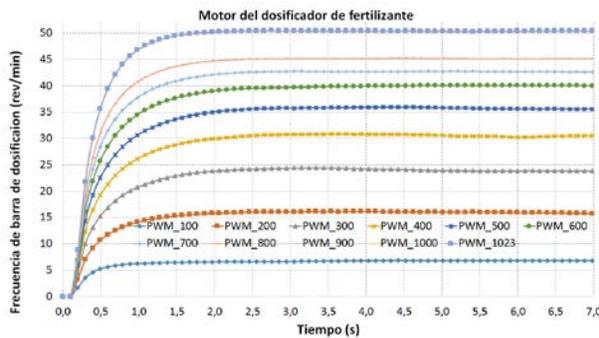
El sensor de voltaje y corriente fueron verificados con un multímetro digital (Modelo: UD87 de la compañía URREA Herramientas Profesionales, S.A. de C.V.) presentando diferencias en las mediciones menores al $\pm 2\%$ en ambos casos. La celda de carga se verificó con pesas calibradas de uno, dos, tres, cuatro y cinco kilogramos obteniendo una diferencia en la medición menor al $\pm 0.05\%$.

4.4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

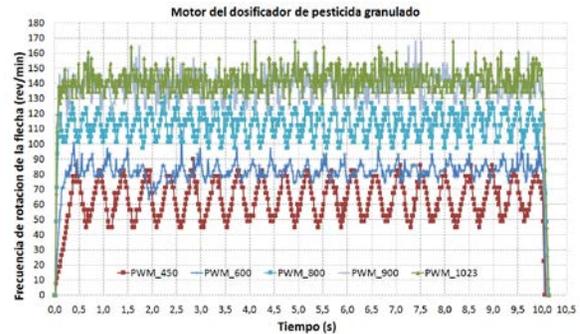
La adaptación del sistema mecatrónico consistió principalmente en la fijación de los motores al cuerpo de la sembradora para accionar los dosificadores; y el sistema

electrónico y de control permitió un funcionamiento conjunto de cada uno de los componentes que integran al SM.

Al aplicar diferentes entradas escalón del ancho de pulso de la señal PWM al sistema (motor-mecanismo dosificador con tolva vacía) se obtuvo un comportamiento en la frecuencia de rotación para el dosificador de fertilizante, que se muestra en la Figura 46a, y para el dosificador de pesticida en la Figura 46b. En el caso del dosificador de fertilizante se presenta un comportamiento lineal mientras que para el dosificador de pesticida el comportamiento es no lineal. Esta no linealidad puede deberse a que la carga ejercida por el material de prueba sobre el rodillo sólo se aplica en una cara o porción de la superficie del rodillo, así como al flujo del mismo durante la descarga y a las propiedades físicas del material.



a) Señal PWM vs frecuencia de rotación del dosificador.



b) Señal PWM vs frecuencia de rotación del dosificador.

Figura 46. Respuesta del sistema motor-mecanismos dosificadores a diferentes anchos de pulso de la señal PWM.

El motor del dosificador de fertilizante permite obtener una mayor precisión y mejor ajuste al controlar la frecuencia de rotación, comparado con el motor del dosificador de pesticida; esto debido al comportamiento lineal y a que el ancho de pulso (duty cycle) de la señal PWM que permitió vencer la fuerza de resistencia al movimiento en el dosificador fue de 25, pudiendo utilizar los valores en el intervalo de 25 a 1023 para modificar la frecuencia

de rotación del dosificador (Figura 46a; Figura 47b). Sin embargo, para el caso del dosificador de pesticida el ancho de pulso de la señal PWM que permitió vencer la fuerza de resistencia al movimiento fue de 450 y en el intervalo de 850 a 1023 casi no hubo variación en la frecuencia de rotación, consiguiendo utilizar únicamente los valores en el intervalo de 450 a 850 (Figura 46b; Figura 47c).

Las funciones de transferencia identificadas para dar cuenta del comportamiento de la planta para el dosificador de fertilizante y agroquímico se presentan en la Tabla 14. Las estimaciones de las constantes k_p , k_i y k_d del controlador PID resultado de la sintonización se muestran en la Tabla 14. Estos valores fueron implementados en el algoritmo de control (Figura 45) programado en los Arduino uno encargados del control de los dosificadores.

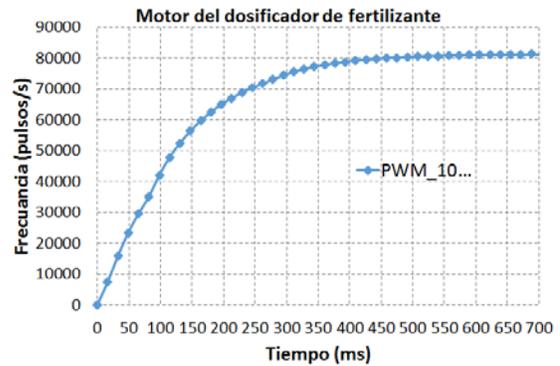
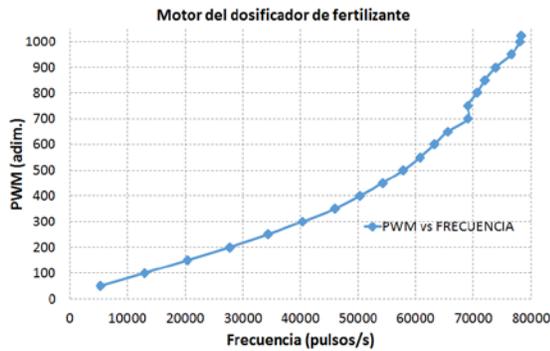
Al determinar la irregularidad de entrega entre repeticiones de los dosificadores, conforme a la norma mexicana NMX-O-222-SCFI-2004, se encontró que el dosificador de fertilizante presenta una irregularidad superior máxima del 15% mientras que para el dosificador de pesticida fue menor al 3%. Lo que indica una elevada irregularidad de entrega del dosificador de fertilizante al utilizar la misma frecuencia de rotación.

Tabla 14. Ecuaciones de la función de transferencia de la planta, de los controladores y valores obtenidos de las constantes del controlador para cada uno de los dosificadores.

Sistema	Función de transferencia		Valores seleccionados de las constantes PID
	Planta	Controlador	
Motorreductor EM49	$Gp = \frac{13.73s + 8809}{s^2 + 188.1s + 3503}$	$Gp = \frac{0.00215s^2 + 0.3292s + 12.6}{s}$	Error > 10% Kp=0.329, Ki=12, Kd=0.05
Motor-Dosificador Pesticida con la tolva vacía	$Gp = \frac{72.07s + 52070}{s^2 + 675s + 23340}$	$Gp = \frac{0.2118s + 25.82}{s}$	5-10% de Error Kp=0.9, Ki=4, Kd=0.01 Error < 5% Kp=0.9, Ki=4, Kd=0
Motor-Dosificador Pesticida con la tolva llena	$Gp = \frac{70.76s + 108.5}{s^2 + 38.67s + 56.04}$	$Gp = \frac{0.000789s^2 + 0.117s + 4.341}{s}$	
Motor-Dosificador de fertilizante con la tolva vacía	$Gp = \frac{663.3s + 19440}{s^2 + 36.01s + 244.1}$	$Gp = \frac{0.000789s^2 + 0.117s + 4.341}{s}$	Error > 10% Kp=0.709, Ki=6.778, Kd=0.01 5-10% de Error Kp=0.26, Ki=1.32, Kd=0.01 Error < 5% Kp=0.26, Ki=1.32, Kd=0

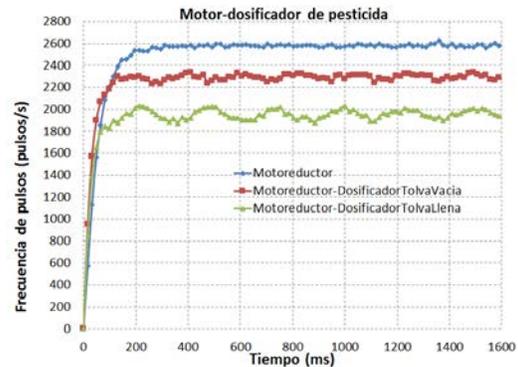
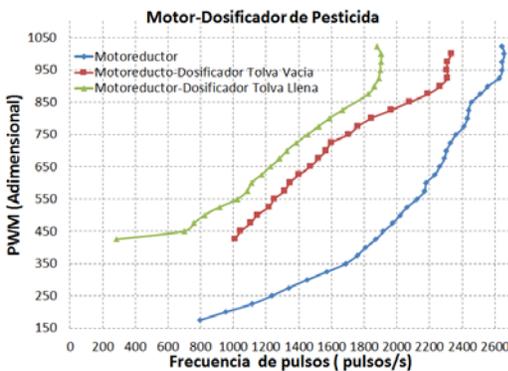
Los resultados promedio de las repeticiones, en la prueba del dosificador de fertilizante se muestran en la Tabla 15, donde se obtuvo un error en el desplazamiento angular programado con respecto al medido del -0.84% en su valor máximo, esto en 20 giros del dosificador. Esto implica que el efecto debido al error de desplazamiento del dosificador (desplazamiento angular teórico respecto del real a diferentes frecuencias de rotación programadas) en la variación de la cantidad de fertilizante entregado (dosis de aplicación) es baja; lo que permite aseverar que la masa del material entregada en cada giro del dosificador es afectada por el cambio en la magnitud de la frecuencia de rotación del dosificador. Este comportamiento es indeseable, ya que cuando se ajusta una máquina

para la aplicación de fertilizante, no se espera que la dosis de aplicación cambie con la modificación de la velocidad de avance de la máquina para máquinas con rueda motriz y sistema de transmisión mecánica.



a) Frecuencia de pulsos en el codificador respecto a la variación de la señal PWM del dosificador de fertilizante.

b) Frecuencia de pulsos en el codificador respecto a la señal PWM con ancho de pulso de 1023 del dosificador de fertilizante.



c) Frecuencia de pulsos del codificador respecto a la señal PWM del dosificador de agroquímico.

d) Frecuencia de pulsos en el codificador respecto a la señal PWM con ancho de pulso de 1023 del dosificador de pesticida.

Figura 47. Respuesta del sistema motor-mecanismos dosificadores a la señal de excitación PWM.

En la Tabla 15 se muestran los resultados de la cantidad promedio de material de prueba tirado por cada giro del dosificador de pesticida, además del error promedio de las repeticiones del desplazamiento angular en 30 giros, donde su obtuvo un máximo de 4.92 % a 10 rev/min.

El desempeño del controlador PID para regular la frecuencia de rotación del dosificador, en el caso del dosificador de fertilizante: permite un tiempo de levantamiento menor a un segundo, sobreelongación máxima del 14 % y tiempo de asentamiento entre los 1.5 a 2 segundos para frecuencias que van de 5 a 35 rev/min (Figura 48a); en el caso del dosificador de pesticida, permite un tiempo de levantamiento menor a un segundo, en este caso el sobrepaso no está bien definido pero se podría decir que lo alcanza en menos de 1.5 segundos, el estado estacionario con un error de la variable de control del $\pm 5\%$ únicamente la alcanza para la frecuencia de rotación de 100 rev/min del rodillo ranurado y para el caso de las frecuencias de rotación de 10 a 77 rev/min lo supera (Figura 47b).

Tabla 15. Resultados de la prueba del dosificador de fertilizante y pesticida.

Dosificador de fertilizante				Dosificador de pesticida			
FRP	FRM	E	ME	FRP	FRM	E	ME
5	5.04	-0.84	93.35	10	9.51	4.92	2.88
12	12.01	-0.10	106.30	32	31.58	1.31	2.91
20	19.92	0.37	142.04	55	54.85	0.28	2.86
27	26.96	0.14	153.87	77	76.72	0.36	2.90
35	34.96	0.11	169.93	100	99.67	0.33	3.00

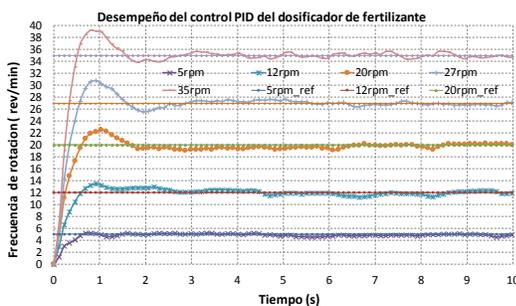
*Frecuencia de rotación programada (FRP), rev/min; Frecuencia de rotación medida (FRM), rev/min; Error (E), %; y Masa entregada por giro del dosificador (ME) g.

Tola *et al* (2008) obtuvo para un sistema de dosificación variable, al utilizar como dosificador de fertilizante granulado un rodillo dosificador estriado accionado por un motor de 12VCD, errores de la dosificación objetivo en el intervalo del $\pm 5\%$, y un tiempo de

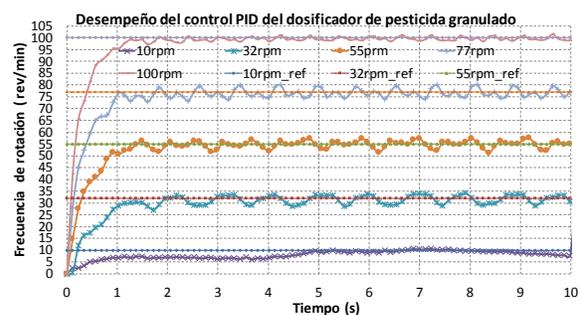
respuesta del sistema de control para ajustar la dosificación de aplicación en el intervalo de 0,95 - 1,90 segundos.

Considerando el error de desplazamiento angular el cual está directamente relacionado con la dosis de aplicación de los dosificadores (fertilizante y pesticida) obtenidos en esta investigación, podría decirse que están dentro del valor del $\pm 5\%$ del error de la dosis de aplicación objetivo; y que el tiempo de respuesta de los dosificadores para realizar los cambios en la dosis de aplicación son muy similares a los reportados.

Santori et al (2015), encontró que, para un dosificador helicoidal movido por un motor de 12VCD, a bajas frecuencias de rotación del dosificador el error en la dosis de fertilización objetivo se incrementaba conforme se disminuye la frecuencia de rotación, al obtener un error de 8.3% a 4rev/min, de 5.5% a 12 rev/min y 3.5 a 20 rev/min y <1.5% a 24 rev/min; este comportamiento también fue observado principalmente en el dosificador de pesticida, en el error del control de la frecuencia de rotación y del desplazamiento angular.



a) Dosificador de fertilizante



b) Dosificador de pesticida

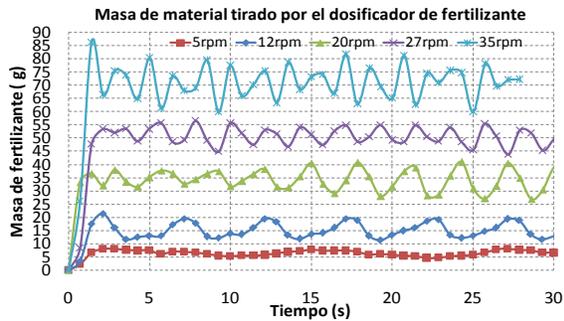
Figura 48. Desempeño del control PID de la variable frecuencia de rotación de los dosificadores.

Debido a que no se tiene referencia en la determinación del comportamiento de la entrega del insumo por los dosificadores, a intervalos de tiempo pequeños como los que fueron medidos en esta investigación (en intervalos de tiempo de 0.753 para el dosificador de

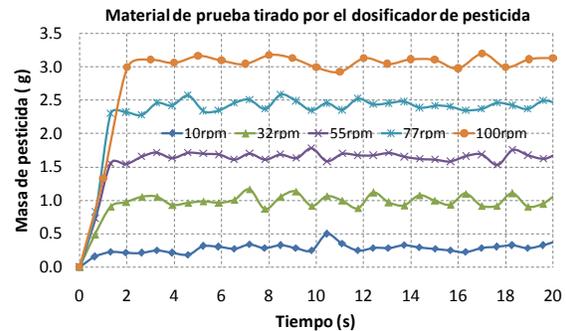
fertilizante y de 0.653 s para el dosificador de pesticida), ya que en todos los casos consultados realizan la determinación de la dosis de aplicación acumulada. Por ello, el análisis únicamente se basa en la desviación estándar y el coeficiente de variación. Los resultados para el dosificador de fertilizante se muestran en la Tabla 16 y Figura 49a, donde se observa que la entrega es irregular (no uniforme), basado en los valores elevados obtenidos del coeficiente de variación; y para el caso del dosificador de pesticida, de acuerdo a los resultados obtenidos en la Tabla 16 y Figura 49b, la entrega de material de prueba por el dosificador es más uniforme conforme se incrementa el valor de la frecuencia de rotación del dosificador, teniendo los mejores resultados de 55 a 100 rev/min. Este resultado contrasta con el error de control de la frecuencia de rotación y desplazamiento angular, comparado con el dosificador de fertilizante.

Tabla 16. Resultados del comportamiento de la entrega del dosificador de fertilizante y pesticida por segundo.

	Dosificador de fertilizante					Dosificador de pesticida				
	5	12	20	27	35	10	32	55	77	100
Frecuencia de rotación de prueba (rev/min)										
Promedio (g/s)	8,61	21,25	47,60	48,96	99,47	0,45	1,51	2,53	3,69	4,69
Desviación estándar	1,46	4,11	6,54	5,57	8,74	0,064	0,15	0,08	0,11	0,11
Coeficiente de variación (%)	16,93	19,33	13,78	11,37	12,28	14,06	9,65	3,12	3,07	2,38



a) Masa del material tirado cada 715 ms.



a) Masa del material tirado cada 653 ms.

Figura 49. Comportamiento de la caída de fertilizante y pesticida.

1.1 CONCLUSIONES

El desempeño del controlador del dosificador de fertilizante y del dosificador de agroquímico es adecuado para realizar cambios en la dosis de aplicación de forma continua y en tiempo real; con un tiempo de estabilización de la frecuencia de rotación entre 1.5 y 2 segundos, con un error de desplazamiento angular del dosificador menor al $\pm 0.84\%$ para el dosificador de fertilizante; y con un tiempo máximo de 1.5 segundos para alcanzarla la dosis de aplicación, con un error en el desplazamiento angular menor al $\pm 1.5\%$, irregularidad de entrega menor al 5% para frecuencias de rotación de 10 a 140 rev/min en el caso del dosificador de pesticida.

De manera general el SM desarrollado, cumple con los requerimientos para su aplicación en la máquina.

4.5 REFERENCIAS

- [1] Alfaro R., V. M. (2003). Métodos de sintonización de controladores PID que operan como servomecanismos. Revista Ingeniería, San José, Costa Rica, Vol. 13(1-2):13-29.
- [2] Alfaro R., V. M. (2002). Métodos de sintonización de controladores PID que operan como reguladores. Revista Ingeniería, San José, Costa Rica, Vol. 12(1-2):21-36.
- [3] Anaya P. M. E.; Benítez B. V. H.; Pacheco R. J. H. y Montaña V. F. (2014). Diseño de controladores P, PI y PID para el comportamiento dinámico de un servo-sistema hidráulico, basado en desarrollo experimental. UNISON-EPISTEMUS 16:13-21.

- [4] Atul, K. D.; Nibbedita, C.; Sashi S. and Vinod Y., 2012. PWM Based Automatic Closed Loop Speed Control of DC Motor. *International Journal of Engineering Trends and Technology*. Vol. 3(2):110-112.
- [5] Basilio J. C. and Matos S. R., 2002. Design of PI and PID controllers with transient performance specification. *IEEE Transactions on Education*, Vol. 45, No. 4: 364-370.
- [6] Bishop H. R. (2010). *The mechatronics hand book*. The Instrumentation, Systems, and Automation Society (ISA). The University of Texas at Austin Austin, Texas, USA. pp. 18–25.
- [7] Bolton, W. (2006). *Mechatronics: Electrical Control Systems in Mechanical and Electrical Engineering*, 3rd Ed, Addison-Wesley Longman, Harlow, England. Pp. 1.
- [8] Bragachini M.; Méndez A.; Scaramuzza F; Vélez J. P. y Villarroel D. 2010. Manejo de cultivos por ambiente. Evolución de la dosificación variable en Argentina. Proyecto Agricultura de Precisión INTA. Manfredi, Pcia. de Córdoba, Argentina.
- [9] Fountas, S.; Søren, M. P. and Simon, B., 2003. ICT in Precision Agriculture – diffusion of technology. Institute of Agricultural Sciences, The Royal Veterinary and Agricultural University, Denmark.
- [10] Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDEA), 2010. Ahorro y eficiencia energética en la agricultura de precisión. Madrid, España. pp. 12-17.
- [11] Jianbo, Z.; Junfang, X.; Yong, Z.; Shun, Z., 2014. Design and experimental study of the control system for precision seed-metering device. **International Journal of Agricultural and Biological Engineering** Vol. 7 (3): 13-18.
- [12] Pratap V., Neelam P., Chandrakant K. (2014). Real Time DC Motor Speed Control using PID Controller in LabVIEW. *International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering*. Vol. 3, Issue 9: (12162-12167).
- [13] Reyes A. J. F.; Berrios A. D. F.; Ortega B. R. A.; Wilson D. E. y Flores J. F., 2011. Calibración estática de un sistema de control automático de tasa variable de fertilizante. Santiago, Chillán, Chile. *Agrociencias* 46: 51-62.
- [14] Saranya M. and Pamela D. (2012). A real time IMC tuned PID controller for DC motor. *International Journal of Recent Technology and Engineering*. Vol. 1 (1):2277-3878.
- [15] Sartori, M. J. R.; Di Raimo C.; Costa, C. R. R.; Montezuma, M. A. and Capello de Souza E. A., (2015). Study of an electromechanical system for solid fertilizer variable rate planting. *African Journal of Agricultural*. Vol. 11(3):159-165.
- [16] Secretaria de Economía, 2004. Tractores, implementos agrícolas - sembradora neumática de precisión - especificaciones y método de prueba NMX-O-222-SCFI-2004, México.
- [17] Tola, E.; Kataoka, T; Burce, M; Okamoto, H and Hata S., (2008). Granular Fertiliser Application Rate Control System with Integrated Output Volume Measurement. *Biosystems Engineering* Volume 101(4): 411–416.
- [18] Wenbin, Y.; Dada W.; Pengfei, J.; Weiguo, L., (2012). The PWM speed regulation of DC motor based on intelligent control. *Systems Engineering Procedia* 3:259 – 267.
- [19] Yang, Li; Xiantao, He; Cui, Tao; Dongxing, Zhang; Song, Shi; Rui Zhang; Mantao Wang, (2015). Development of mechatronic driving system for seed meters equipped on conventional precision corn planter. **International Journal of Agricultural and Biological Engineering** Vol. 8 No.4:1-9.

- [20] Atmel Corporation (2016)a. ATMEGA328/P Datasheet, 8-bit AVR microcontroller. San José, California, USA. http://www.atmel.com/Images/Atmel-42735-8-bit-AVR-Microcontroller-ATmega328-328P_datasheet.pdf.
- [21] Atmel Corporation (2016) b. ATmega640/V-1280/V-1281/V-2560/V-2561/V Datasheet, 8-bit AVR microcontroller. San José, California, USA. http://www.atmel.com/Images/Atmel-2549-8-bit-AVR-Microcontroller-ATmega640-1280-1281-2560-2561_datasheet.pdf.
- [22] Página web de Arduino. <https://www.arduino.cc/>.

CAPÍTULO 5

PRUEBAS DE UNA SEMBRADORA-FERTILIZADORA CON UN SISTEMA MECATRÓNICO ADAPTADO PARA EL CONTROL DE LOS DOSIFICADORES

Julio Torres Sandoval¹, Eugenio Romantchik Kriuchkova¹, Irineo L. López Cruz¹, Gilberto De J. López Canteñs¹.

¹Posgrado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua. Universidad Autónoma Chapingo. Km 38.5 Carretera México- Texcoco. C.P. 56230, Chapingo, Estado de México. Tel. (595) 95 2 15 51, Email: jultsmex@yahoo.com.mx.

5.1 RESUMEN

Las máquinas sembradoras-fertilizadoras utilizadas en el campo mexicano hacen uso de sistemas mecánicos para el accionamiento de los dosificadores, sin embargo en países desarrollados estos sistemas están reemplazándose por sistemas mecatrónicos aplicados en máquinas de dosificación variable. Los sistemas mecatrónicos tienen la ventaja, de que su desempeño no se afecta por las condiciones del suelo y cubierta vegetal, además de la facilidad para realizar los cambios de la dosis de aplicación de insumos, al permitir realizarlos de manera continua y en tiempo real; sin embargo, tienen la desventaja de su elevado costo de adquisición. En este trabajo se presentan los resultados de prueba de laboratorio, de un sistema mecatrónico desarrollado con hardware y software libre de bajo costo, y adaptado a la sembradora-fertilizadora Modelo LC-U-N del fabricante Sembradoras del Bajío. El dosificador de semilla se probó bajo el estándar de la banda engrasada con semilla de maíz. Los resultados muestran buena calidad de distribución de la semilla a frecuencias de rotación del disco semillero de 5 a 21 rev min⁻¹, al obtener índices de calidad de alimentación $\geq 90\%$, pérdida de semilla y de multiplicidad inferiores al 6%, y precisión $< 18\%$. Los dosificadores de fertilizante y pesticida fueron probados con base a la norma mexicana NMX-O-222-SCFI-2004, con

fertilizante comercial UREA, al utilizar cinco frecuencias de rotación en el intervalo de 5 a 36rev min⁻¹ y de 10 a 140rev min⁻¹ respectivamente con diferentes aperturas de la compuerta de salida. Conforme a los resultados obtenidos, para el caso del dosificador de fertilizante se obtuvo una dosis de aplicación de 3 a 562kg ha⁻¹ con el mejor desempeño al utilizar aperturas de la compuerta ≤ 50%; mientras que el dosificador de pesticida presento un excelente desempeño, con el cual se obtuvo una dosis de aplicación de 0.004 a 16.4 kg ha⁻¹.

Palabras clave: Dosificadores, sistemas mecatrónicos, pruebas de desempeño, calidad de la dosificación, cámara de succión.

5.2 INTRODUCCIÓN

Las máquinas sembradoras-fertilizadoras actuales, principalmente las de dosificación variable utilizadas en agricultura de precisión, han reemplazado los sistemas mecánicos (basados en una rueda motriz y transmisión por cadenas y engranes), por sistemas mecatrónicos para accionar los dosificadores. Estos sistemas permiten realizar la aplicación variable de los insumos; y son capaces de realizar cambios en la dosis de aplicación en tiempo real y de forma continua, además de no verse afectados por las condiciones del suelo lo que permite trabajar a mayores velocidades de aplicación en campo. En México, no se ha realizado investigación para desarrollar este tipo de sistemas mecatrónicos, ni se tiene antecedente de su aplicación en el campo mexicano.

En el presente trabajo se realizó la prueba de laboratorio para caracterizar el desempeño de un cuerpo de la sembradora-fertilizadora modelo LC-U-N del fabricante mexicano Sembradoras del Bajío S. A. de C. V., a la cual se le adaptó un sistema mecatrónico (SM)

desarrollado en la Universidad Autónoma Chapingo, para controlar el funcionamiento de los dosificadores.

Li *et al.* (2015) realizaron pruebas de campo con un SM para el control del dosificador neumático de semilla a velocidades de siembra en el intervalo de 9 a 12 km h⁻¹ con semilla de maíz, con el que obtuvieron un índice de calidad de alimentación mínimo del 89.93% e índices de pérdida de semilla y precisión máximos de 5.08% y 18.92% respectivamente. Jiajia *et al.* (2014) en el laboratorio experimentaron con la presión negativa en un sistema neumático de dosificación, con semilla de colza y diferentes frecuencias de rotación (FR) del disco semillero (DS). Los resultados obtenidos indican que por cada presión de vacío probada la calidad de distribución de la semilla disminuía al incrementar la FR del DS, y que con el incremento de la presión de vacío se lograba trabajar con mayores FR del DS con un desempeño aceptable del dosificador. De igual modo Jiambo *et al.* (2014), en pruebas de campo obtuvieron un comportamiento similar con la variación de la velocidad de siembra al utilizar semilla de haba y un DS de 20 orificios. Los resultados que obtuvieron indican una reducción en la calidad de distribución de la semilla con el incremento de la velocidad de siembra (reflejado en un incremento de la FR del DS), al modificar la velocidad de 1 m s⁻¹ a 2 m s⁻¹ el índice de calidad de alimentación paso de 85.83 a 80.8 y el índice de falla de 5 a 10.83%.

Sartori *et al.* (2015) encontraron que para un dosificar de fertilizante de tipo helicoidal, el error entre los valores objetivo y real de la dosis de aplicación de fertilización, disminuía conforme se incrementaba la frecuencia de rotación del dosificador, con errores de 8.3% a 4 rev min⁻¹ y <1.5% a 24 rev min⁻¹. Reyes *et al.* (2011), identificaron una variación en la dosis de aplicación del fertilizante (en kg ha⁻¹) por el cambio de la frecuencia de rotación del dosificador (rev min⁻¹); además con el dosificador calibrado, encontraron errores

máximos del 7% entre la dosis de aplicación objetivo y la dosis real. Forouzanmehr and Loghavi (2012) realizaron pruebas de campo para investigar los efectos del tipo de fertilizante (urea y súper fosfato triple), al variar la velocidad de avance de la máquina y la dosis, concluyeron que tanto la velocidad de avance como la dosis de aplicación tuvieron un efecto significativo sobre la precisión (porcentaje de desviación entre las dosis reales y objetivo), mientras que el tipo de fertilizante no tuvo un efecto significativo. Garcia *et al.* (2014) a través del control del flujo másico del dosificador accionado por un motorreductor de CD; obtuvieron como resultado de prueba de banco un CV que va del 6.32 al 13.18%; también hace referencia a otros trabajos realizados, que a continuación se mencionan: Garcia *et al.* (2012), con un dosificador helicoidal accionado por un motor de CD obtuvieron un CV de aproximadamente el 20%; Camacho *et al.* (2009), en condiciones similares, obtuvieron un CV de alrededor del 32%.

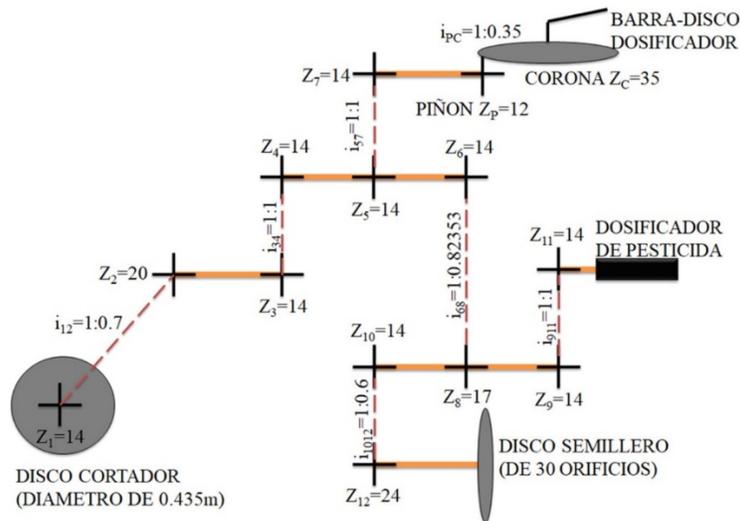
5.3 MATERIALES Y MÉTODOS

5.3.1 DESCRIPCIÓN DE LA SEMBRADORA-FERTILIZADORA ORIGINAL

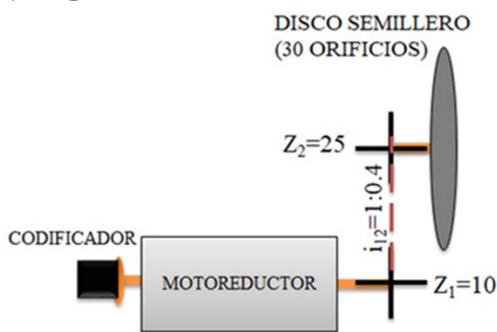
La sembradora-fertilizadora es una máquina diseñada para trabajar bajo condiciones de labranza de conservación y utiliza un sistema de distribución de semilla neumático por presión de vacío. Cada cuerpo presenta un dosificador de semilla, fertilizante y pesticida; los cuales originalmente se accionan por un disco cortador, que funciona como rueda motriz, y un sistema de transmisión mecánico por cadenas y engranes (en la Figura 50a, se muestra un esquema del sistema de transmisión). Esta forma de accionamiento se reemplazó al adaptar el SM diseñado.

Para accionar al dosificador de semilla (Figura 51 y 52d), se utilizó un motor de 24 VCD, de la marca Currie Technologies, Modelo Electro Drive XYD-18a; un codificador Modelo E6B2-CWZ3E del fabricante Yumo Corporation; y una transmisión por cadenas y

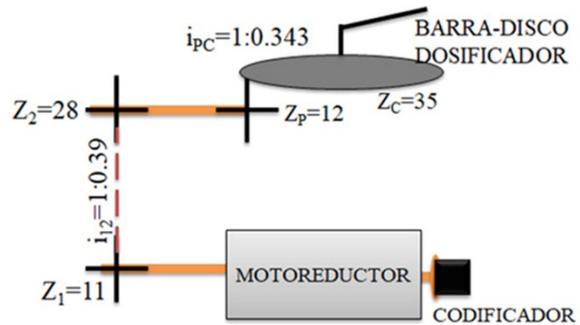
engranes. Para generar la presión de vacío en la cámara de succión (Figura 52d), el sistema usa una turbina con motor eléctrico de 110 a 120 volts de corriente alterna (VCA) de 2.2 kW (la misma turbina utilizada en las aspiradoras de la marca Truper™ de 6 galones) y compuerta accionada por un servomotor (modelo TowerPro MG995), al utilizar un control PID (proporcional, integral y derivativo) para ajustar la presión de vacío. En el accionamiento, el dosificador de fertilizante (Figura 50c y 51), utiliza un motorreductor de 24 VCD a 350W; un codificador Modelo E6B2-CWZ3E; y una transmisión por cadenas y engranes.



a) Diagrama del sistema de transmisión mecánico.



b) Dosificador de semilla.



c) Dosificador de fertilizante.

Figura 50. Diagrama del sistema de transmisión original y modificado de los dosificadores.

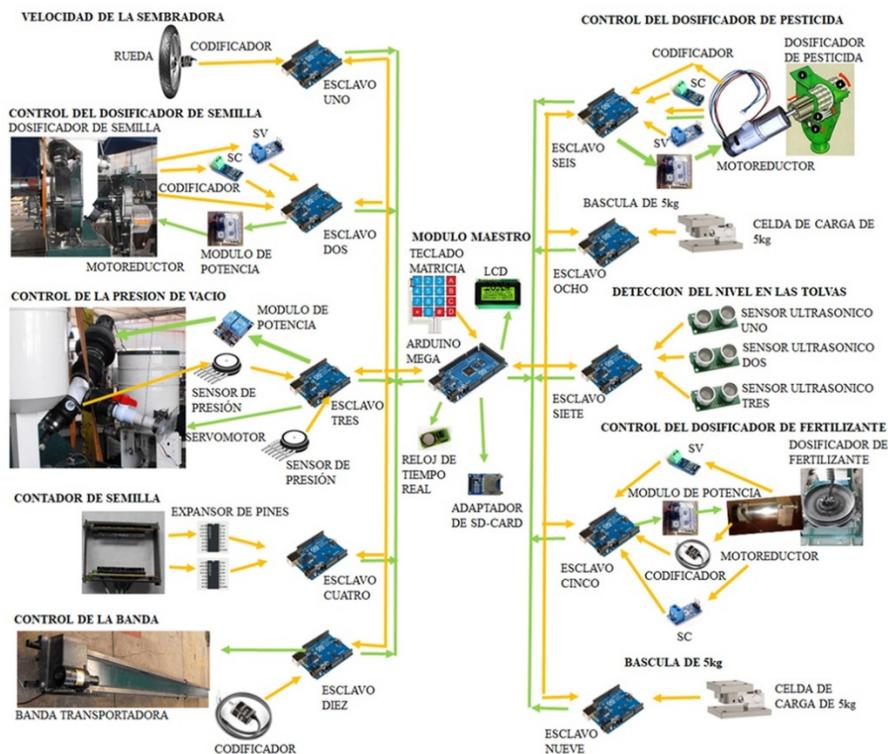
Para el accionamiento del dosificador de pesticida se utilizó el motorreductor de 24 VCD modelo EMG49 distribuido por Robotshop, el cual cuenta con un codificador integrado de 980 pulsos por giro, la adaptación de la flecha del motorreductor se acoplo directamente a la flecha del dosificador como se muestra en las Figura 51 y 52c.

5.3.2 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA MECATRÓNICO

El SM hace uso de los siguientes conceptos: el aplicado por Moaid and Hashim (2013), quienes utilizan un maestro y múltiples esclavos (basado en microcontroladores), para controlar la velocidad de dos motores de CD; de la técnica modulación por ancho de pulso para modificar la velocidad o frecuencia de rotación de la flecha del motor (Wenbin *et al.*, 2012; Atul *et al.*, 2012); y del control PID para alcanzar y mantener el valor deseado de la variable controlada (Basilio y Matos, 2002; Saranya y Pamela, 2012), para la implementación de este control algunos autores hacen uso de microcontroladores en conjunto con software como LabView (Pratap *et al.*, 2014; Petru and Mazen, 2014) o Matlab/Simulink (Allam *et al.*, 2016; Kulkarni *et al.*, 2017) en los que se implementó los algoritmos de control. En esta investigación se utilizó la plataforma de desarrollo arduino de hardware y software libre con licencia de código abierto, basada en placas con microcontroladores; en los que se implementó directamente los algoritmos de control, esto permitió prescindir de procesadores o software adicionales para el procesamiento. El SM (Figura 51), consta de lo siguiente: un módulo maestro, basado en la placa arduino mega que utiliza al microcontrolador Atmega2560 (Atmel Corporation, 2016a); y nueve módulos esclavos, basados en el arduino uno que utiliza el microcontrolador Atmega328P (Atmel Corporation, 2016b). Cada módulo del SM funciona como una unidad de procesamiento y control.

A continuación, se describe de manera breve el funcionamiento de cada módulo:

El módulo maestro: se encarga de controlar el funcionamiento general del SM y con ello de los módulos esclavos a través del protocolo de comunicación I2C (Inter Integrated Circuit). Para la aplicación de insumos en campo el usuario debe introducir al SM, a través del módulo maestro con la ayuda de un teclado matricial y una pantalla LCD16x4, la siguiente información: distancia entre semillas deseada, número de celdas del DS, presión de vacío en la cámara de succión (PVCS), cantidad de fertilizante tirado por cada giro del dosificador, cantidad de pesticida tirado por cada giro del dosificador, distancia entre surcos y diámetro de la rueda de velocidad. Para la realización de las pruebas, el usuario debe especificar la siguiente información: número de giros de prueba del DS y su FR, PVCS, velocidad de la banda, número de giros de la barra-disco dosificadora y su FR, número de giros de prueba del rodillo ranurado y su FR.



SV: Sensor de voltaje; SC: Sensor de corriente.

Figura 51. Sistema mecatrónico diseñado para la sembradora-fertilizadora.

Los módulos esclavos realizan las siguientes funciones: 1) Módulo esclavo 1: utiliza un arduino uno y un codificador modelo E6B2-CWZ3E; este último, se fija a una rueda que al desplazarse junto con la sembradora permite medir la velocidad de desplazamiento de la sembradora-fertilizadora. 2) Módulo esclavo 2: consta de un arduino uno, codificador incremental modelo E6B2-CWZ3E, módulo de potencia y un motorreductor; se encarga de controlar la FR del DS, toma como base la velocidad de desplazamiento de la sembradora y la distancia de siembra deseada, a través de la implementación de un control PID. 3) Módulo esclavo 3: consta con los mismos elementos que el módulo esclavo 2 y se encarga de controlar la frecuencia de rotación del dosificador de fertilizante, toma como base la velocidad de desplazamiento de la máquina y la dosis de aplicación deseada, mediante el control PID. 4) Módulo esclavo 4: utiliza los mismos elementos y realiza las mismas funciones que el módulo esclavo 3, pero aplicado al dosificador de pesticida. 5) Módulo esclavo 5. Consta de un arduino uno, dos sensores de presión (Modelo MPX4115A del fabricante Freescale Semiconductor, inc.), una unidad de potencia, una turbina eléctrica y el servomotor modelo MG995; este módulo se encarga de controlar la PVCS mediante un control proporcional integral (PI), toma como referencia la presión de vacío deseada. 6) Módulo esclavo 6: se encarga de medir el nivel de los insumos en cada una de las tolvas de la sembradora-fertilizadora; utiliza un arduino uno y tres sensores ultrasónicos SRF04. 7) Módulo esclavo 7: Mediante un sensor opto-electrónico, realiza el conteo del número de semillas sembradas durante la labor en campo y determina el tiempo de caída entre semillas; para ello utiliza un arreglo de diodos led de radiación infrarroja (IR383) y fotodiodos (PT1302BC). 8) y 9) Módulos esclavo 8 y 9: mediante una estructura (Figura 51), en la cual se ha fijado una celda de carga de 5 kg, mide la masa de fertilizante y pesticida tirado por el dosificador

correspondiente; 10) Módulos esclavo 10: consta de un arduino uno, codificador incremental modelo E6B2-CWZ3E, módulo de potencia y un motorreductor; en el cual se implementa un control PID para controlar la velocidad de desplazamiento de la banda al tomar como referencia la velocidad deseada.

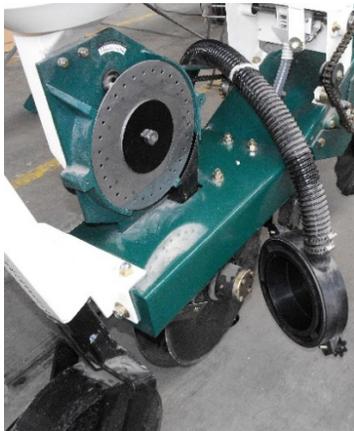
5.3.3 CONDICIONES DE OPERACIÓN DE LA SEMBRADORA-FERTILIZADORA PARA LA PRUEBA

La prueba se realizó en el laboratorio del Centro Nacional de Estandarización de Maquinaria Agrícola (CENEMA), perteneciente al Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), ubicado en el “Campo Experimental el Horno” en Chapingo, Mpio. De Texcoco, México, Méx.

La prueba para caracterizar el desempeño del dosificador de semilla se realizó con el estándar de la banda engrasada, con base a la norma ISO 7256/1–1984 y la metodología propuesta por Kachman y Smith (1995) y aplicada en otros trabajos (Jianbo *et al.*, 2014; Jiangtao *et al.*, 2015; Li *et al.*, 2015). En la prueba del dosificador de fertilizante y pesticida se realizó conforme a la norma mexicana NMX-O-222-SCFI-2004 (SE, 2004).

Al considerar que las sembradoras-fertilizadoras se trabajan con velocidades de avance máximas de 12 km h^{-1} , con el sistema de accionamiento original de la máquina Figura 50a, se alcanzarían las siguientes FR: disco cortador de 150 rev min^{-1} , DS de 72 rev min^{-1} , barra dosificadora de fertilizante de 35 rev min^{-1} y rodillo ranurado del dosificador de pesticida de 144 rev min^{-1} . Por lo anterior se busca caracterizar el desempeño de los dosificadores en el rango completo de operación. El dosificador de semilla se probó con cinco FR, cada una de ellas con cinco presiones de vacío y cinco repeticiones, como se indica en el Tabla 17. En el caso del dosificador de fertilizante y pesticida la prueba se

realizó con cinco FR, cada una de ellas a cuatro aperturas en la compuerta de salida de la tolva y cinco repeticiones, como se indica en el Tabla 18.



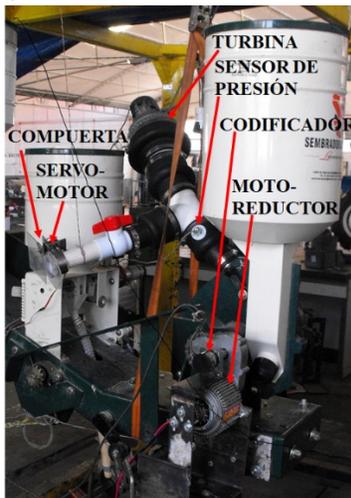
a) Dosificador de semilla.



b) Dosificador de fertilizante.



c) Dosificador de agroquímico.



d) Dosificador de semilla.



e) Perilla de ajuste de salida del fertilizante.



f) Palanca de ajuste de la salida del pesticida.

Figura 52. Dosificadores de la sembradora.

Tabla 17. Condiciones de la prueba del dosificador de semilla.

Dosificador	FR (rev min ⁻¹)	PV (kPa)	VB (km h ⁻¹)	Repeticiones
Semilla	5 y 21	1.5, 2, 3, 4 y 5	4	5
	21 y 37	1.5, 2, 3, 4 y 5	6	5
	53 y 70	1.5, 2, 3, 4 y 5	7	5

FR: Frecuencia de rotación, PV: presión de vacío, VB: velocidad de la banda.

Tabla 18. Condiciones de la prueba del dosificador de fertilizante y pesticida.

Dosificador	FR (rev min ⁻¹)	AC (%)	Repeticiones	GD
Fertilizante	5, 12, 21, 27 y 35	25, 50, 75, 100	5	20
Agroquímico	10, 12, 21, 27 y 35	25, 50, 75, 100	5	30

FR: Frecuencia de rotación, AC: Apertura de la compuerta, GD: giros del dosificador.

5.3.4 MATERIAL DE PRUEBA

En la prueba del dosificador de semilla se utilizó maíz, con las siguientes propiedades promedio: sus dimensiones con longitud de 12.5 mm, ancho de 9.1mm y espesor de 4.8mm, densidad aparente de 791.3 kg m⁻³, masa de 1000 semillas de 388.4g, humedad del 4% y grano dañado de 0.85%. Para el dosificador de fertilizante y pesticida se utilizó como material de prueba fertilizante comercial urea (46-0-0) con las siguientes propiedades promedio, que fueron: densidad aparente de 766.8 kg m⁻³, coeficiente de fricción estático de 30°, tamaño del grano menor a 5 mm y humedad 0.22 %.

5.3.5 INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN UTILIZADOS

Se utilizaron dos celdas de carga ajustadas con pesas calibradas de uno, dos, tres, cuatro y cinco kilogramos al obtener una diferencia de medición menor al $\pm 0.05\%$. Un sensor de presión absoluta con errores de medición menores al 1.5% al utilizarse dentro del rango de operación especificado, el cual se mantuvo durante la prueba de la sembradora-fertilizadora.

5.3.6 ÍNDICES O MEDIDAS DE DESEMPEÑO DEL SISTEMA

La determinación de los índices para estimar la calidad de la dosificación de la semilla se hizo con las ecuaciones de la Ecuación 48 a la Ecuación 56 (Li *et al*, 2015).

5.3.6.1 Índice de multiplicidad (ISM)

$$ISM = \frac{100n_1}{N} \quad \text{Ecuación 48}$$

donde, n_1 : es el número de distanciamientos con semillas múltiples (adimensional); N: es el número total de distanciamientos medidos entre semillas (adimensional) y ISM en %.

$$n_1 = \sum_0^N n_i \quad \text{donde } (n_i = \frac{d_{si}}{x_{ref}} \varepsilon \{0; 0.5\}) \quad \text{Ecuación 49}$$

donde, d_{si} : es el distanciamiento actual considerado (m); x_{ref} : es el espaciamiento entre semillas teórico o ajustado (m); y n_i es el distanciamiento que está dentro del intervalo de 0 a 0.5 del valor de x_{ref} (m).

5.3.6.2 Índice de calidad de alimentación (ICA)

$$ICA = \frac{100n_2}{N} \quad \text{Ecuación 50}$$

donde, n_2 es el número de distancias entre semillas adecuadas y ICA es adimensional.

$$n_2 = \sum_0^N n_i \quad \text{donde } (n_i = \frac{d_{si}}{x_{ref}} \varepsilon \{0.5; 1.5\}) \quad \text{Ecuación 51}$$

5.3.6.3 Índice de fallos o pérdida de semillas (ISF)

$$ISF = \frac{100n_3}{N} \quad \text{Ecuación 52}$$

donde, n_3 : es el número de distanciamientos con semillas faltantes.

$$n_3 = \sum_0^N n_i \quad \text{donde } (n_i = \frac{d_{si}}{x_{ref}} \varepsilon \{1.5; \infty\}) \quad \text{Ecuación 53}$$

5.3.6.4 Precisión (P)

$$P = \frac{100\sigma_2}{x_{ref}}$$

Ecuación 54

donde, σ_2 es la desviación estándar obtenida con las medidas del espaciamiento entre semillas que están dentro el intervalo de 0.5 a 1.5 del valor de referencia ($\sigma_2(d_{si}), para todo d_{si} \in \{0.5x_{ref}; 1.5x_{ref}\}$) y P está en %.

Para evaluar la calidad de la dosificación de fertilizante y pesticida, se usó el coeficiente de variación (CV), la Irregularidad de entrega de la máquina y la Irregularidad de entrega por cambio de velocidad (Mayans *et al.*, 2009 y SE, 2004).

5.3.6.5 Irregularidad de entrega de la máquina (G_e)

$$G_e = \frac{100(D_{max} - D_{min})}{D_{prom}}$$

Ecuación 55

donde, G_e : es la irregularidad de entrega de la máquina (%); D_{max} : es la masa del insumo máxima de las muestras (g) y D_{min} : es la masa del insumo mínima de las muestras (g) , obtenidas en las repeticiones diferentes repeticiones.

5.3.6.6 Irregularidad por cambio de velocidad (V_{dv})

$$V_{dv} = \frac{100(G_{prom} - G_{mv})}{G_{prom}}$$

Ecuación 56

donde, V_{dv} : es la irregularidad de entrega por cambio velocidad (%); G_{prom} : es la masa del insumo promedio obtenida de las muestras colectadas a diferentes FR (g); G_{mv} : es la masa promedio del insumo obtenida de las muestras colectadas a una misma FR (g).

Para determinar los parámetros operativos de la sembradora-fertilizadora se utilizan las Ecuación 57 y Ecuación 58.

5.3.6.7 Dosis de aplicación de fertilizante o pesticida (Q)

$$Q = \frac{3.6q_t n_{di}}{6d_s v_s} \quad \text{Ecuación 57}$$

donde, Q : Dosis por hectárea (kg ha^{-1}), n_{di} : FR del dosificador del insumo (rev min^{-1} equivalente a $\pi/30 \text{ rad/s}^{-1}$); q_t : Cantidad de fertilizante que tira el dosificador en un giro (g rev^{-1}); d_s : Distancia entre surcos (m); y v_s : Velocidad de avance de la sembradora (km h^{-1}).

5.3.6.8 Distancia entre semillas ajustado o teórico (d_{es})

$$d_{es} = \frac{60v_s}{3.6 n_{ds} C_d} \quad \text{Ecuación 58}$$

donde, n_{ds} : FR del DS (rev min^{-1}); C_d : Número de celdas del DS (adimensional); d_{es} : Distancia o espaciamiento entre semillas (m); v_s : Velocidad de avance de la sembradora (km h^{-1}).

5.4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.4.1 DOSIFICADOR DE SEMILLA

Los resultados del desempeño del dosificador de semilla se muestran en el Tabla 19. Debido a que en México en la norma NMX-O-222-SCFI-2004, aplicable a sembradoras-fertilizadoras neumáticas, no se establece el método ni las especificaciones de calidad para la prueba del estándar de la banda engrasada, es necesario considerar estándares internacionales para definir cuando el desempeño del dosificador de semilla es adecuado. Li *et al.* (2015) indicaron que los valores mínimos permisibles para los índices de calidad de distribución de la semilla, establecidos en la China National Standard of Test Method (CHNS) para la prueba de la banda engrasada, son los siguientes: calidad de alimentación $\geq 85\%$, falla o pérdida de semillas $< 5\%$ y precisión $\leq 29\%$.

De acuerdo con el Tabla 19, los mejores resultados se obtuvieron a bajas FR del DS en 5 y 21 rev min⁻¹, en los que se logró alcanzar en la mayoría de los casos los siguientes índices: calidad de alimentación superior al 90%, índice de falla menor al 5% y precisión en todos los casos $\leq 17.8\%$; esto indica un buen desempeño del dosificador de semilla al considerar los estándares de calidad de CHNS. Sin embargo, a FR del DS mayores o iguales a 37 rev min⁻¹ el desempeño del dosificador de semilla fue deficiente donde se superan los índices de calidad de alimentación (menor al 85%) y de falla (mayor al 5%), donde la precisión cumple con valores menores al 29%.

Los resultados obtenidos de la prueba siguen la misma tendencia obtenida por Jiajia *et al.* (2014) y Jiambo *et al.* (2014) donde el índice de calidad de alimentación disminuye y el de falla crece, conforme se incrementa la frecuencia de rotación del disco semillero. Aunque el ajuste de la presión de vacío permite mejorar el desempeño del dosificador al incrementar la FR del DS. Los primeros autores mencionados, lograron cumplir con los estándares de la CHNS a bajas frecuencias de rotación del DS ≤ 30 rev min⁻¹. Sin embargo, el segundo trabajo, los autores no lo lograron; lo cual pueda deberse al tipo y propiedades de la semilla utilizada (haba).

La tendencia en la mayoría de los casos, acerca del índice de multiplicidad y el índice de falla es que, uno se incrementa y el otro disminuye con el incremento de la PVCS (Tabla 19).

Al determinar la tendencia del error de control de la FR del DS, se obtuvo que su tendencia es decreciente conforme aumenta la magnitud de referencia de la FR del DS; aunado a ello, a ciertas PVCS con FR del DS elevadas se logra obtener un índice de falla aceptables, pero el índice de multiplicidad es elevado por lo que es necesario la mejora del diseño del enrazador o limitador de semilla; ya que con disminuir el valor del índice

de multiplicidad se incrementaría el índice de calidad de alimentación, lo que logra un desempeño aceptable en la FR del DS $\geq 37 \text{ rev min}^{-1}$, al considerar que la precisión se logra en todas las FR del DS.

Un problema que se presentó al realizar la prueba, es que a FR del DS $\geq 37 \text{ rev min}^{-1}$ no se logró un ajuste adecuado del enrazador. Esto debido, a que al girar el DS un ligero contacto entre enrazador con la semilla (adherida a la celda), se desprendía con facilidad al dejar huecos o celdas sin semilla; y cuando el enrazador se alejaba de la trayectoria que sigue la semilla al girar el DS, se incrementaban las celdas con semillas múltiples (dos o más semillas).

De acuerdo con los resultados obtenidos, con el dosificador de semilla se puede ajustar un distanciamiento entre semillas de 2.6 cm a 133 cm (0.026m a 1.33m), al realizar la siembra a velocidades de 1 a 12 km h^{-1} , lo que permitiría cumplir con los índices de calidad de distribución de la semilla establecidos en la CHNS al realizar la selección adecuada de la PVCS y del ajuste del enrazador.

Tabla 19. Resultados de la prueba de uniformidad de distribución de la semilla.

Vel. Banda (km h^{-1})	FR (rev min^{-1})	PV (kPa)	DR (mm)	ICA (%)	ISF (%)	ISM (%)	Precision (%)
4	5	1.5	444.4	96.4	3.6	0.0	8.7
		2.0	444.4	98.1	1.9	0.0	7.5
		3.0	444.4	90.8	1.5	7.7	10.7
		4.0	444.4	81.8	0.0	18.2	7.8
		5.0	444.4	80.0	3.6	16.4	8.5

Vel. Banda (km h ⁻¹)	FR (rev min ⁻¹)	PV (kPa)	DR (mm)	ICA (%)	ISF (%)	ISM (%)	Precision (%)
4	21	1.5	105.8	88.1	8.1	3.8	17.1
		2.0	105.8	90.2	5.5	4.3	17.5
		3.0	105.8	78.7	4.5	16.9	16.7
		4.0	105.8	90.9	6.1	3.0	16.7
		5.0	105.8	90.7	2.9	6.4	17.8
6	37	1.5	90.1	74.5	16.8	8.7	20.3
		2.0	90.1	83.6	9.1	7.3	16.5
		3.0	90.1	75.8	13.3	10.9	23.7
		4.0	90.1	80.2	2.1	17.7	16.5
		5.0	90.1	72.0	9.5	18.5	24.5
7	53	1.5	75.8	59.1	25.7	15.2	23.2
		2.0	73.1	62.9	26.9	10.3	24.1
		3.0	71.9	73.5	16.4	10.1	23.5
		4.0	71.3	76.5	12.0	11.5	21.6
		5.0	71.4	60.0	20.5	19.5	25.7
7	70	1.5	72.7	55.2	32.0	12.7	21.7
		2.0	68.5	56.2	30.9	12.9	30.3
		3.0	73.0	62.7	13.6	23.7	24.9
		4.0	75.1	77.6	7.7	14.8	20.5
		5.0	74.4	72.9	4.3	22.7	22.0

FR: Frecuencia de rotación; PVCS: Presión de vacío en la cámara de succión; DR: Distancia de referencia (ajustada entre semillas); ISM: Índice de Semilla múltiple; ICA: Índice de calidad de alimentación; ISF: Índice de semilla faltante o pérdida de semilla.

5.4.2 DOSIFICADOR DE FERTILIZANTE

La uniformidad de aplicación o de dosificación de fertilizante en campo, por el cambio de velocidad de avance de la máquina (reflejado en el cambio de la FR del dosificador), considera una velocidad máxima de 12 km h⁻¹ (FR del dosificador máxima de 35 rev min⁻¹) y apertura en la compuerta de salida del fertilizante máxima del 50%, la cantidad de fertilizante tirado por cada giro del dosificador es uniforme (Tabla 20). Esto se manifiesta por los valores máximos obtenidos del CV del 6.5% e irregularidad de entrega por cambio de velocidad del 8.4%. Sin embargo, para aperturas de 75 y 100 %, la variación de la velocidad de avance de la máquina, afecta la cantidad de fertilizante tirado por cada giro del dosificador o la dosis de aplicación, lo que se refleja en un CV e irregularidad de entrega grandes.

El efecto provocado por el cambio de velocidad de avance de la máquina en la variación de la dosificación de fertilizante (masa de fertilizante por giro del dosificador) es significativo, cuando se trabaja con aperturas en la compuerta de salida del fertilizante del 75% o superiores, implica que durante la aplicación en campo la máquina debe trabajarse a una velocidad de avance constante y su calibración debe realizarse a esa velocidad. En caso contrario, habrá diferencias significativas entre la dosis de aplicación real y la dosis objetivo (deseada).

Cuando la sembradora-fertilizadora se trabaja con aperturas de la compuerta de salida de fertilizante máximas del 50%, el efecto por el cambio de la velocidad de avance de la máquina sobre la dosis de aplicación de fertilizante no es considerable.

En cuanto a la uniformidad de entrega del dosificador entre repeticiones (consistencia en la dosificación de la máquina), al mantener las mismas condiciones de operación o de ajuste de la máquina mantiene una adecuada uniformidad (Tabla 21). Lo anterior se

refleja con el CV en el cual se mantuvo por debajo del 5.7%, y la irregularidad de entrega se mantuvo en la mayoría de los casos por debajo del 10 %.

Tabla 20. Fertilizante dosificado por cada giro de la barra dosificadora (g rev⁻¹).

FRDF (rev min ⁻¹)	Apertura de la compuerta (%)			
	25	50	75	100
5	108.6	141.8	142.7	180.2
12	104.2	147.7	157.8	194.4
20	97.7	155.6	167.8	208.0
27	102.2	164.4	192.7	223.5
35	95.6	164.4	228.4	262.6
Promedio (g rev ⁻¹)	101.6	154.8	177.9	213.7
CV (%)	5.1	6.5	18.9	14.8
IEPCV (%)	6.8	8.4	28.4	22.9

FRDF: Frecuencia de rotación del dosificador de fertilizante, IEPCV: Irregularidad de entrega por cambio de velocidad, DS: Desviación estándar, CV: Coeficiente de variación.

En el trabajo realizado por Forouzanmehr y Loghavi (2012), con una máquina de dosificación variable que utiliza un SM para accionar los dosificadores de fertilizante, encontraron que la velocidad de avance de la máquina (reflejada en la FR del dosificador) tuvo un efecto significativo sobre la dosis de aplicación real, resultados similares se obtuvieron en este trabajo cuando se utilizan aperturas de la compuerta de salida de fertilizante del 70% o superiores. Al evaluar la uniformidad de entrega del dosificador de fertilizante, Reyes *et al.* (2011) obtuvo un CV máximo de 3.74 %; Garcia *et al.* (2014), obtuvo un CV en el intervalo de 6.32 a 13 %; Garcia *et al.* (2012), obtuvo un CV aproximado al 20%; Camacho *et al.* (2009), obtuvo un CV de alrededor del 32%; KIM *et*

al. (2008), obtuvieron un CV de alrededor del 12%. Estos valores superaron en la mayoría de los casos los CV obtenidos en esta investigación, donde el máximo fue de 5.7%.

Tabla 21. Uniformidad de entrega o dosificación del dosificador de fertilizante.

AP (%)	Índice	Frecuencia de rotación (rev min ⁻¹)				
		5	12	20	27	35
25	CV (%)	0.8	1.8	1.4	1.5	5.7
	IEM (%)	2.1	4.4	3.3	3.5	12.3
50	CV (%)	2.6	1.8	3.0	4.7	4.0
	IEM (%)	6.9	4.6	7.5	11.0	10.3
75	CV (%)	1.7	4.1	3.6	3.8	2.6
	IEM (%)	4.5	11.0	8.3	9.3	6.6
100	CV (%)	1.6	1.3	1.1	0.6	4.2
	IEM (%)	3.8	3.6	3.0	1.5	9.6

AP: Apertura de la compuerta, CV: coeficiente de variación de las muestras, IEM: Irregularidad de entrega de la máquina.

De acuerdo con los resultados obtenidos del dosificador con el SM adaptado, al utilizar una apertura máxima de la compuerta de salida del 50% (con distancia de aplicación entre líneas o cuerpos de 0.8 m y velocidad de avance máxima de 12 km h⁻¹), permitiría obtener una dosis de aplicación máxima de 402 kg ha⁻¹; y cuando la apertura máxima de la compuerta es de 100%, se obtendría una dosis de aplicación máxima de 562 kg ha⁻¹.

5.4.3 DOSIFICADOR DE PESTICIDA

La uniformidad de la dosificación por cambio de velocidad de la máquina reflejado en el cambio de la FR del dosificador de pesticida, muestra una adecuada uniformidad de

entrega en las diferentes posiciones de apertura de la palanca, reflejado en un CV máximo de 5 % e irregularidad de entrega máxima de 6.5% (Tabla 22).

Tabla 22. Cantidad de pesticida dosificado por cada giro del rodillo acanalado (g rev^{-1}).

FR (rev min^{-1})	Apertura de la compuerta (%)			
	25	50	75	100
10	1.14	2.66	4.27	5.88
42	1.16	2.83	4.48	6.04
75	1.15	2.74	4.55	6.41
107	1.15	2.90	4.71	6.50
140	1.13	2.93	4.73	6.63
Promedio (g rev^{-1})	1.15	2.81	4.55	6.29
CV (%)	0.96	3.95	4.13	5.02
IEPCV (%)	1.4	5.5	6.1	6.5

IEPCV: Irregularidad de entrega por cambio de velocidad, DS: Desviación estándar, CV: Coeficiente de variación.

De acuerdo a los resultados obtenidos con el SM, se logra obtener una adecuada uniformidad de entrega del dosificador entre repeticiones (Tabla 23), reflejado en un CV máximo de 4.2% e irregularidad de entrega de la máquina en la mayoría de los casos menor al 5%.

Con los resultados obtenidos se puede decir que el efecto de la velocidad de avance de la máquina sobre la dosis de aplicación de pesticida es bajo y que la uniformidad de entrega entre repeticiones o consistencia de entrega del dosificador es adecuada.

Al Considerar la apertura máxima de la compuerta de salida del pesticida, a una velocidad máxima de avance de 12 km h⁻¹ con ancho entre surcos de 0.8m, se lograría obtener una dosis de aplicación máxima de 16.4 kg.

Tabla 23. Índices de desempeño del dosificador de pesticida (g rev⁻¹).

FR (rev min ⁻¹)	Índice	Posición de apertura de la palanca (%)			
		25	50	75	100
10	CV (%)	1.4	0.4	1.7	1.3
	IEM (%)	3.4	1.0	3.3	3.4
42	CV (%)	1.3	1.3	0.6	0.4
	IEM (%)	3.2	3.0	1.5	0.9
72	CV (%)	2.0	0.8	1.1	1.4
	IEM (%)	4.7	1.9	2.8	3.4
107	CV (%)	3.4	0.9	0.5	0.7
	IEM (%)	8.3	2.3	1.4	2.1
140	CV (%)	4.2	2.0	0.4	0.9
	IEM (%)	11.2	5.1	1.1	2.2

FR: frecuencia de rotación, CV: coeficiente de variación de las muestras, IEM: Irregularidad de entrega de la máquina.

5.5 CONCLUSIONES

El sistema mecatrónico desarrollado utiliza software y hardware libre, lo que reduce su costo, además permite sustituir con éxito el funcionamiento del sistema mecánico original para el accionamiento de los dosificadores de la sembradora-fertilizadora; tiene como ventajas comparativas la facilidad para realizar los cambios de la dosis de aplicación de

insumos, los cambios de la dosis de aplicación se pueden realizar en tiempo real y de manera continua, y su desempeño no se ve afectado por las condiciones del suelo.

El dosificador de semilla presentó un excelente desempeño a bajas frecuencias de rotación del disco semillero ($\leq 21 \text{ rev min}^{-1}$), con lo cual permite ajustes de la distancia entre semillas de 0.026m a 1.33m a velocidades de siembra de 1 a 12 km h^{-1} y ancho de surco de 0.8m. El dosificador de fertilizante logra un buen desempeño en cuanto a la consistencia de la dosificación con un coeficiente de variación máximo del 5.7%; además, se identificó una dependencia de la dosis de aplicación del insumo (en kg ha^{-1}) y la velocidad angular del dosificador (rev min^{-1}), la cual toma relevancia cuando la apertura de la compuerta de salida de fertilizante supera el 50%. En cuanto al dosificador de pesticida, se logra obtener un excelente desempeño en la calidad de la dosificación con un coeficiente de variación máximo del 5.02 %, lo que supera el desempeño de otros diseños.

5.6 LITERATURA CITADA

- [23] Allam, T., M. Raju, and K. S. Sundeeep. 2016. Design of PID controller for DC Motor Speed Control Using Arduino Microcontroller. IRJET. 3: 791-794.
- [24] Atmel Corporation. 2016a. ATMEGA328/P Datasheet, AVR microcontroller. San José, California, USA. http://www.atmel.com/Images/Atmel-42735-8-bit-AVR-Microcontroller-ATmega328-328P_datasheet.pdf. Nov. 2017.
- [25] Atmel Corporation. 2016b. ATmega640/V-1280/V-1281/V-2560/V-2561/V Datasheet, AVR microcontroller. San José, California, USA. http://www.atmel.com/Images/Atmel-2549-8-bit-AVR-Microcontroller-ATmega640-1280-1281-2560-2561_datasheet.pdf. Nov. 2017.
- [26] Atul, K. D., C. Nibbedita, S. Sashi, and Y. Vinod. 2012. PWM Based Automatic Closed Loop Speed Control of DC Motor. Int. J. of Eng. Trends Technology. 3:110-112.
- [27] Basilio, J. C., and S. R. Matos. 2002. Design of PI and PID controllers with transient performance specification. IEEE Trans. Educ. 45:364-370.
- [28] Forouzanmehr, E. and M. Loghavi. 2012. Design, development and field evaluation of a map-based variable rate granular fertilizer application control system. Agric Eng Int: CIGR Journal. 14:255-261.

- [29] Garcia A., P., N. L. Cappelli, and C. K. Umezu. 2014. Electrically driven fertilizer applicator controlled by fuzzy logic. *Eng. Agríc., Jaboticabal.* 34:510-522.
- [30] Garcia A. P., N. L. Cappelli and C. K. Umezu. 2012. Auger-type granular fertilizer distributor: mathematical model and dynamic simulation. *Eng. Agríc., Jaboticabal.* 32:151-163.
- [31] Jianbo, Z., X. Junfang, Z. Yong, and Z. Shun. 2014. Design and experimental study of the control system for precision seed-metering device. *IJABE.* 7:13-18.
- [32] Jiangtao, Qi, J. Honglei, L. Yang, Y. Haibo, L. Xinhui, Y. Lan, F. Xianzhen and Y. Yang. 2015. Design and test of fault monitoring system for corn precision planter. **IJABE.** 8:13-19.
- [33] Jiajia, Y., L. Yitao, C. Jinling, Y. Song and L. Qingxi. 2014. Simulation analysis and match experiment on negative and positive pressures of pneumatic precision metering device for rapeseed. *Int. J. Agric. & Biol. Eng.* 7:1-12.
- [34] Kachman, S. D., and J. A. Smith 1994. Alternative measures of accuracy in plant spacing for planters using single seed metering. *Transactions of the ASAE.* 38:379-387.
- [35] Kulkarni, V. V., V. A. Kulkarni, and R. Talele (2017). PID Controller based DC Motor Speed Control. *IJRITCC.* 5:35-38.
- [36] Li, Y., H. Xiantao, C. Tao, Z. Dongxing, S. Song, Z. Rui, and W. Mantao. 2015. Development of mechatronic driving system for seed meters equipped on conventional precision corn planter. **IJABE .** 8:1-9.
- [37] Mayans C., P., J. R. Soca C., G. López C. y E. Romantchik K. 2009. Prueba de dosificación de la sembradora de amaranto (*Amaranthus hypochondriacus* L.). *Revista de ciencias Técnicas Agropecuarias.* 18:16-21.
- [38] Pratap V., P. Neelam, and K. Chandrakant. 2014. Real Time DC Motor Speed Control using PID Controller in LabView. *IJAREEIE.* 3:12162-12167.
- [39] Petru, L., and G. Mazen. 2014. PWM Control of a DC motor used to drive a conveyor belt. *Procedia Engineering.* 100:299-304.
- [40] Reyes A., J. F., D. F. Berrios A., R. A. Ortega B., E. Wilson D., y F. Flores J. 2011. Calibración estática de un sistema de control automático de tasa variable de fertilizante. *Agrociencia.* 46:51-62.
- [41] Saranya, M. and D. Pamela. 2012. A real time IMC tuned PID controller for DC motor. *IJRTE.* 1:2277-3878.
- [42] SE (Secretaría de Economía). 2004. Tractores, implementos agrícolas - sembradora neumática de precisión - especificaciones y método de prueba NMX-O-222-SCFI-2004, México.
- [43] Wenbin, Y., W. Dada, J. Pengfei, and L. Weiguo. 2012. The PWM speed regulation of DC motor based on intelligent control. *Systems Engineering Procedia.* 3:259 – 267.

CAPÍTULO 6

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 CONCLUSIONES

El desarrollo de un sistema mecatrónico basado en microcontroladores, utilizando un maestro y múltiples esclavos en comunicación bidireccional I2C, permite ejecutar acciones en paralelo (realizar diferentes funciones al mismo tiempo) y tiempo real funcionando como una unidad de procesamiento y control.

Con el SM desarrollado se logra el control de los dosificadores de semilla, fertilizante y pesticida granulado con capacidad de modificar la dosis de aplicación de cada insumo en tiempo real y de manera continua, cumpliendo con los requerimientos necesarios para su aplicación en máquinas de dosificación variable. Además, el SM permitir instrumentar y controlar una banda transportadora para caracterizar el desempeño de la máquina durante su funcionamiento o al realizar pruebas de laboratorio.

El SM permite eliminar las desventajas de los sistemas de accionamiento de los dosificadores que de manera general se utilizan en las máquinas sembradoras-fertilizadoras utilizadas en el campo mexicano, que usan una rueda motriz y un sistema de transmisión por cadena o engranes. Desventajas como el deslizamiento de la rueda motriz, provocadas por las condiciones del suelo, cubierta vegetal y la velocidad de avance de la máquina; o el bloqueo del sistema de transmisión por residuos vegetales limitando su movimiento, afectando así, negativamente el desempeño de los dosificadores y con ello la calidad de la aplicación de los insumos. Con ello también, el SM permite trabajar en las parcelas de cultivo a mayores velocidades de avance de la máquina utilizada en la aplicación de insumos sin que su calidad se vea comprometida.

Se logra el diseño electrónico, mecánico, la programación y el control que permite hacer funcionar al Sistema Mecatrónico como una unidad adaptable a la sembradora-fertilizadora Modelo LC-U-N del fabricante Sembradoras del Bajío S.A. de C.V.

Los controladores de los dosificadores permiten alcanzar la dosis de aplicación deseada para cada uno de los insumos en un tiempo máximo de 2 s, alcanzando el estado estacionario en la mayoría de los casos en un tiempo máximo de 2.5 s, con errores de la variable de control dentro del intervalo del $\pm 5\%$, a excepción del dosificador de pesticida que presenta errores dentro del $\pm 10\%$ pero con mejor uniformidad de dosificación del insumo.

De acuerdo con las pruebas de laboratorio que fueron realizadas a la máquina sembradora-fertilizadora con el Sistema Mecatrónico adaptado, en los cuales la norma mexicana NMX-O-222-SCFI-2004 presenta alguna especificación de calidad establecida, los resultados obtenidos cumplieron con dichas especificaciones.

6.2 RECOMENDACIONES

Para mejorar el control de los dosificadores, principalmente de la velocidad angular del dosificador de pesticida que presento mayores problemas, debido a su comportamiento no lineal es necesario implementar métodos de sintonización de los controladores PID como son: los métodos inteligentes (redes neuronales, lógica difusa, algoritmos genéticos, entre otros), control por impedancia y método de estabilidad de Lyapunov. A pesar de que esto implica reemplazar o combinar el uso de los microcontroladores con unidades de procesamiento más potentes (computadores, procesadores y FPGA, entre otros).

Considerando las pruebas que se realizaron en el laboratorio el SM cumple con los requerimientos de trabajo para su uso en campo, por lo que se recomienda integrar al SM otros dos módulos esclavos. Uno de ellos, para obtener la posición precisa de la máquina cuando se desplaza en el terreno de cultivo y obtener los datos de la dosis de aplicación de los insumos a aplicar en la posición en la cual se encuentra la máquina. Además de ello, se recomienda adaptar un sistema de control automático para ajustar la apertura de la compuerta de la salida del fertilizante y la posición del rodillo ranurado del dosificador de pesticida, así como el control de la profundidad de siembra y de un sistema de transporte de semilla en la descarga que permitan suavizar su caída al suelo reduciendo el rebote.

Para evaluar de manera más adecuada el desempeño del SM con la sembradora-fertilizadora es necesario realizar las pruebas completas de laboratorio y campo de acuerdo a lo establecido en la norma mexicana NMX-O-222-SCFI-2004.