



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE ELECTROTECNIA Y COMPUTACIÓN

INFORME DE TRABAJO MONOGRÁFICO

**AUTOMATIZACIÓN DEL PROCESO DE PESADO PARA UNA EMPACADORA
DE CEREALES, CLASE XII SEGÚN NORMA OIML R 51-1, Y RANGO DE 0 KG
A 2 KG.**

Presentado por: Br. Lener Osmar Torres Hernández

Tutor: MSc. Alejandro Alberto Méndez Talavera

Asesor: Yamil Odell Jiménez López
Director Técnico
METROCAL S.A

Junio 4, 2018

DEDICATORIA

Dedico esta obra a todos aquellos que me han ayudado a alcanzar esta meta. A mis **Padres**, quienes con su amor y sacrificio me han dado la oportunidad de estudiar y realizarme como ingeniero.

A mi **Maestro y a mi Asesor**, quienes con sus conocimientos, consejos y experiencia me han formado como íntegro ingeniero. Además, agradezco la paciencia que han tenido para con mi persona en el transcurso de este proyecto.

A mis **Compañeros** de clases, con quienes compartí grandes experiencias como estudiante.

RESUMEN

En grandes empresas que exportan productos tales como café, cereales, es común encontrar máquinas empacadoras y selladoras automáticas. Sin embargo, para las pequeñas empresas, de este mismo rubro, en Nicaragua, se les dificulta adquirir una de estas máquinas por tener un precio muy elevado, de igual forma cuentan con funciones que no son necesarias para algunas de estas pymes, por lo tanto, resulta una inversión muy alta adquirir este tipo de máquinas y, además, el pago de funciones que no están dentro de las necesidades del cliente.

Es por esta razón que se asumió el reto de desarrollar, siguiendo los métodos y técnicas apropiadas, un prototipo de máquina de pesado automático que cuente con las funcionalidades básicas de una máquina de pesado automático comercial, que permita a las pymes pesar sus productos de forma automática conforme a sus requerimientos, demanda de producción y a un bajo costo.

El resultado del trabajo monográfico es un prototipo máquina de pesado automático para cereales, clase XII según norma OIML R51-1, y rango de 0kg a 2kg. Para la etapa de acondicionamiento y procesamiento de señal se utiliza el frente analógico AD7730, el cual fue diseñado para sistemas de pesado. Este circuito integrado permite conectar la señal de salida de la celda de carga directamente a sus entradas y el resultado de la conversión analógica – digital es extraído por un microcontrolador por medio del protocolo de comunicación SPI.

En este informe se presentan los resultados del trabajo realizado, así como el diseño e implementación del prototipo, los mismos son presentados de forma tal que puedan ser fácilmente utilizados por aquellos interesados en este campo.

El resultado de este trabajo monográfico debe contribuir al despertar del interés en aplicar la tecnología y métodos apropiados para desarrollar equipos destinados a resolver problemas de la sociedad nicaragüense, principalmente aquellos

frecuentes en las pymes de nuestro país las cuales no disponen de los recursos requeridos para adquirir dichos equipos en el extranjero.

ABSTRACT

Automatic packing and sealing machines are common to find in large export companies of coffee, cereals, etc. However, for the small companies of this same item that are emerging in Nicaragua, it is difficult for them to obtain one of these machines because they have a very high price, in addition they have functions that are not necessary for some of these SMEs, therefore, it is a very high investment and the underutilization of these.

It is for this reason that the challenge of carrying out a literature review about these systems was assumed, and thus, developing, following the appropriate methods and techniques, a prototype of automatic weighing machine that has the basic functionalities of a packing and sealing machine. commercial, which allows SMEs to weigh their products automatically according to their requirements, demand for production and at an affordable price.

The result of the monographic work is an automatic weighing machine for cereals, class XII according to OIML R51-1 standard, and range from 0 kg to 2 kg. For the conditioning and signal processing stage, the analog front end AD7730 is used, which was designed and dedicated for weighing systems. This integrated circuit allows to connect the output signal of the load cell directly to its inputs and extract the result of the analog-digital conversion by connecting this device to a microcontroller by means of the SPI communication protocol.

In this report the results of the work carried out for the design and implementation of the prototype are presented, in such a way that they can be easily used by those interested in this field.

This will contribute significantly to develop our own machines and meet the needs of those SMEs that want to automate the process of weighing their products, in addition to having national technical support and encourage different government organizations to support the development of technology in the country.

INDICE

INTRODUCCIÓN.....	14
OBJETIVOS	17
Objetivo general	17
Objetivos específicos.....	17
JUSTIFICACIÓN	18
CAPÍTULO I: MARCO TEÓRICO	20
1.1 Módulo de pesaje	20
1.1.1 Recomendaciones OIML R51-1	21
1.1.2 Celda de Carga	22
1.2 Acondicionamiento y Procesamiento de Señal.....	27
1.2.1 Principio de funcionamiento del convertidor analógico – digital con arquitectura Sigma Delta.....	29
1.3 Tecnología del Controlador	32
1.4 Etapa de dosificación y Potencia	33
CAPÍTULO II: DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE LA MÁQUINA DE PESADO AUTOMÁTICO.....	36
2 PROTOTIPO DE MÁQUINA DE PESADO AUTOMÁTICO.....	36
2.1 Determinación de componentes electrónicos	37
2.2 Determinación de celda de carga	37
2.3 Etapa de Acondicionamiento, Adquisición y Procesamiento	39
2.3.1 Frente Analógico AD7730	40
2.3.2 Lectura de los valores por default del AD7730.....	53
2.3.3 Configuración de los Registros del AD7730	54
2.4 Microcontrolador	56

2.5	Driver de potencia.....	58
2.5.1	Simulación del circuito de potencia	60
2.6	Funcionamiento de la máquina de pesado automático.....	64
2.7	Fuente de Alimentación	65
2.7.1	Simulación de la Fuente de Alimentación.....	68
2.8	Diseño y construcción de los circuitos Impresos	68
2.9	Costo del prototipo de Máquina de pesado automático.....	79
	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	81
	BIBLIOGRAFÍA.....	83
	ANEXOS	85
A-	Procedimiento para el uso de la Máquina de pesado Automático	85
B.	Tablas	87
C.	Programa para leer valores por default del AD7730	92

LISTA DE FIGURAS

Capítulo I

	Página
Figura 1. 1: Diagrama de bloques del sistema de pesaje automático. (Captura de Pantalla)	20
Figura 1. 2: Módulo de pesaje.	20
Figura 1. 3: Forma Física de Celda de Carga Piezoeléctrica. Tomado de: http://www.directindustry.es/fabricante-industrial/celda-carga-piezoelctrica-106850.html	23
Figura 1. 4: Forma Física de Celda de Carga Capacitiva. Tomado de: http://www.tecsisloadcell.com/sale-4213704-small-compact-tank-s-type-load-cells-capacitive-load-cell-with-high-accuracy.html	23
Figura 1. 5: Forma Física de Celda de Carga de Compresión. Tomado de: https://mx.omega.com/pptst/LCGD.html	24
Figura 1. 6: Forma Física de Celda de Carga de Compresión – Tensión. Tomada de: https://mx.omega.com/pptst/LCFD.html	24
Figura 1. 7: Forma Física de Celda de Carga de Viga en S: Tomado de: https://mx.omega.com/pptst/LC101.html	24
Figura 1. 8: Forma Física de Celda de Carga de Flexión de Viga. Tomado de: https://mx.omega.com/pptst/LC501.html	25
Figura 1. 9: Forma Física de la Celda de Carga de Plataforma y punto único. Tomada de: https://mx.omega.com/pptst/LCHD.html	25
Figura 1. 10: Celda de Carga Deflexión de viga. Tomado de: https://learn.sparkfun.com/tutorials/getting-started-with-load-cells	26
Figura 1. 11: Estabilidad a lo largo del tiempo de la celda de carga	27
Figura 1. 12: ADC Arquitectura, aplicaciones, resolución y velocidad de muestreo. Tomada de: http://www.analog.com/en/analog-dialogue/articles/the-right-adc-architecture.html	29
Figura 1. 13: Diagrama en bloque del convertidor Sigma – Delta. Tomado de: http://www.ti.com/lit/an/slyt423a/slyt423a.pdf	30

Figura 1. 14: Conceptos fundamentales usados en Σ - Δ : oversampling, noise shaping, filtro digital y decimation. Tomado de: http://www.analog.com/en/analog-dialogue/articles/the-right-adc-architecture.html	30
Figura 1. 15: Diagrama en bloque del convertidor Sigma – Delta. Tomado de: http://www.ti.com/lit/an/slyt423a/slyt423a.pdf	31
Figura 1. 16: Algoritmo de un filtro promedio. Tomado de: http://www.analog.com/en/analog-dialogue/articles/a-reference-design-for-weigh-scales.html	32

Capítulo II

Figura 2. 1: Sistema de pesado automático implementado. (Captura de Pantalla)	36
Figura 2. 2:Celda de Carga Deflexión de viga. Tomado de: https://learn.sparkfun.com/tutorials/getting-started-with-load-cells	37
Figura 2. 3: Modelo interno de la celda de carga. Tomado de: http://ww1.microchip.com/downloads/en/appnotes/01030a.pdf	38
Figura 2. 4: Respuesta de La Celda de Carga a diferentes valores de peso. (Captura de Pantalla)	38
Figura 2. 5: Diagrama Funcional del AD7730. Tomado de: http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD7730_7730L.pdf	40
Figura 2. 6: Diagrama de conexión del AD7730 con microcontrolador. (Captura de pantalla).....	44
Figura 2. 7: Técnica ratiometric AD7730 más celda de Carga. (Captura de pantalla)	45
Figura 2. 8: Valores de Ganancia para cada uno de los voltajes de entrada. Tomada de: http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD7730_7730L.pdf	46
Figura 2. 9: Plataforma Fijada sobre celda de Carga. (Captura de Pantalla)	47
Figura 2. 10: Respuesta en frecuencia del filtro de la primera etapa. Tomada de: http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD7730_7730L.pdf	48

Figura 2. 11: Registros del AD7730. Tomado de: http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD7730_7730L.pdf	50
Figura 2. 12: Asignación de números para acceder a un determinado registro. (Captura de Pantalla)	50
Figura 2. 13: Algoritmo para leer los registros del AD7730. Tomado de: http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD7730_7730L.pdf	52
Figura 2. 14: Algoritmo para escribir en los registros del AD7730. Tomado de: http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD7730_7730L.pdf	53
Figura 2. 15: Diagrama de bloques de la etapa de potencia (Captura de Pantalla).....	58
Figura 2. 16: Diagrama de Funcional del TCA785. Tomado de: http://www.farnell.com/datasheets/1836360.pdf	59
Figura 2. 17: Diagrama de conexión de Filtro RC paso bajo. Tomado de: http://ww1.microchip.com/downloads/en/AppNotes/00538c.pdf	59
Figura 2. 18: Diagrama de conexión de MOC3020 más Triac. Tomado de: https://www.fairchildsemi.com/application-notes/AN/AN-3003.pdf	60
Figura 2. 19: Esquemático del circuito controlador de fase. (Captura de pantalla).....	61
Figura 2. 20: Esquemático del circuito controlador de fase. (Captura de pantalla).....	61
Figura 2. 21: Filtro pasivo pasa-bajos y buffer. (Captura de pantalla)	62
Figura 2. 22: Resultados simulación de TCA-785 y potencia. (Captura de pantalla).....	63
Figura 2. 23: Máquina de Estado Finito del Sistema de Pesado Automático. (Captura de pantalla).....	64
Figura 2. 24: Diagrama en Bloques de la Fuente DC. (Captura de pantalla)	65
Figura 2. 25: Esquemático de la Fuente DC. (Captura de pantalla)	68
Figura 2. 26 : Distribución de circuitos según norma IPC-2221A	69
Figura 2.27: Geometría física para ejemplificar el retorno de señal según su frecuencia. Tomado de Archambeault (2008)	71
Figura 2. 28: Distribución de GND según IPC-2221A.	72

Figura 2. 29: Layout de Vías y Bottom de PCB de Control. (Captura de Pantalla)	73
Figura 2. 30: Layout PCB de Control. (Captura de Pantalla).....	74
Figura 2. 31: Tarjeta de procesamiento y control.....	75
Figura 2. 32: Esquemático del Circuito de Control. (Captura de Pantalla)	75
Figura 2. 33: Layout de vías y vista inferior del Circuito de Potencia. (Captura de Pantalla).....	76
Figura 2. 34: Layout del Circuito de Potencia. (Captura de Pantalla)	76
Figura 2. 35: Esquemático del Circuito de Potencia. (Captura de Pantalla)	77
Figura 2. 36: Tarjeta de Potencia ensamblada. (Captura de Pantalla)	77
Figura 2. 37. Panel de Control de la máquina de pesado automático	78
Figura 2. 38 : Estructura Metálica de la máquina de pesado automático. (Captura de Pantalla).....	78
Figura 2. 39: Alimentador vibratorio ensamblado a la Máquina de pesado automático. (Captura de Pantalla)	78

INDICE DE TABLAS

Capítulo I

Tabla 1. 1 : Clase de exactitud, Intervalo de escala de verificación, Número de Intervalos de escala de verificación y capacidad mínima en relación a la clase de exactitud de un instrumento. Tomado de: https://www.oiml.org/en/files/pdf_r/r051-1-e06.pdf	21
--	----

Capítulo II

Tabla 2. 1: Características de Celda de Carga	37
Tabla 2. 2: Rangos de SF del AD7730	49
Tabla 2. 3: Registros por Default del AD7730.....	53
Tabla 2. 4: Ruido de Salida vs rango de entrada y velocidad de actualización (CHP=1) Típico Ruido RMS de salida en nV. Tomada de: http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD7730_7730L.pdf	55
Tabla 2. 5: Requerimientos necesarios que debe poseer el controlador.....	56
Tabla 2. 6: Características PIC18F4550	57
Tabla 2. 7: Requerimientos de la Fuente Lineal.....	66
Tabla 2. 8: Costos de elaboración del prototipo de máquina de pesado automático.....	79
Tabla 2. 9: Asignación de pines PIC18F4550	91

Anexos

Tabla 1: Descripción de los bits del Registro Comunicación.....	87
Tabla 2: Descripción de los bits del Registro Estado	87
Tabla 3: Descripción de los bits del Registro Modo	88
Tabla 4: Descripción de los bits del Registro del Filtro.....	89
Tabla 5: Descripción de la asignación de pines del AD7730.....	90

Introducción

En Nicaragua existen micros y pequeñas empresas dedicadas a la venta de granos básicos y sus derivados entre los que destacan frijoles, arroz, cereales, pinolillo. Los procesos de pesado y empackado son realizados manualmente usando balanzas estáticas, provocando un impacto negativo tanto en el cumplimiento de las normas de higiene como en la productividad y, por ende, en la competitividad de las empresas. Los problemas mencionados, y otros no tangibles, se podrían evitar si se utilizara un sistema que permita el pesado y empackado automático de los productos. En el país no existen empresas que se dediquen al diseño, construcción y venta de este tipo de máquinas o que las importen y distribuyan en el mercado nacional. A una micro o pequeña empresa importar una máquina, con las características mencionadas, le demanda una gran inversión, sin incluir los costos futuros de mantenimiento y soporte técnico.

Una alternativa a la importación es el diseño y construcción de este tipo de máquinas en el país lo cual permitiría establecer los requerimientos necesarios acorde a la necesidad del cliente, además contar con mantenimiento y soporte técnico nacional y obtener una máquina a un precio accesible.

Se presenta en este documento el diseño e implementación de una máquina de pesado automático clase XII, según la clasificación de la OIML1 R 51-1, con un rango de 0kg a 2kg. Una celda de carga genera un voltaje (mV), proporcional al peso del producto proveniente de una tolva, el cual va a la entrada del AFE AD7730, el cual incorpora un convertidor analógico - digital sigma-delta de 24 bits. El flujo del producto hacia la celda de carga es controlado mediante un vibrador electromagnético cuya operación es gobernada por un microcontrolador. La salida del ADC es procesada por el microcontrolador el cual ajusta la frecuencia del vibrador, mediante la variación del ángulo de disparo de un triac usando un

¹ Organization International of Legal Metrology

controlador de fase AC, hasta hacerla cero en el momento que el peso es igual al valor establecido por el usuario. De igual forma, el microcontrolador es el encargado de que el peso del producto sea presentado en un display de cristal líquido.

El microcontrolador se comunica con el AFE, por medio del protocolo de comunicación SPI. El sistema propuesto integra una interface humano máquina que le permitirá al usuario seleccionar entre las diferentes opciones que ofrece el sistema, calibración, selección de producto, peso requerido, número de bolsas, entre otras. El producto es embolsado de manera semiautomática, una vez se haya alcanzado el peso seleccionado, el usuario podrá vaciar el producto en la bolsa presionando un pedal eléctrico incorporado en la máquina.

Con la automatización del proceso de pesado los principales beneficios son: disminución del tiempo de pesado del producto e incremento de la exactitud en la medición. Como se mencionó anteriormente, las celdas de carga entregan valores de voltaje muy bajos (en el orden de milivoltios), lo que impone grandes retos para lograr la resolución requerida. Para la implementación del sistema de pesado se utiliza el AD7730, el cual, además de contar con entradas para conectar directamente la salida de la celda de carga, cuenta con todas las funciones necesarias para garantizar las especificaciones de la máquina entre las cuales destacan la eliminación del offset del sistema (tara) y el filtrado que garantiza la resolución libre de ruido determinada a partir de los requerimientos. El AD7730 hace posible el diseño e implementación de balanzas de alta precisión y bajo costo.

Para garantizar la inmunidad del sistema a las variaciones de voltaje en la fuente de alimentación los voltajes de referencia del AD7730 y el voltaje aplicado a la celda de carga se conectan haciendo uso de la técnica radiométrica.

Con el desarrollo de la máquina prototipo propuesta, se estaría contribuyendo al desarrollo tecnológico del país y sería una muestra de las competencias y el carácter emprendedor de los graduados de la carrera de ingeniería Electrónica de la Universidad Nacional de Ingeniería.

Objetivos

Objetivo general

- Automatizar el proceso de pesado para una empacadora de cereales, clase XII según norma OIML R 51-1, y rango de 0 kg a 2 kg.

Objetivos específicos

- Realizar, a partir de los requerimientos, el diseño de alto nivel del sistema.
- Determinar las tecnologías apropiadas para la implementación de los subsistemas de adquisición de datos, dosificación, HMI y control.
- Diseñar los subsistemas de adquisición de datos, dosificación, HMI y control.
- Verificar mediante simulación, la efectividad de los subsistemas.
- Diseñar y ejecutar los experimentos pertinentes para verificar la eficacia de los subsistemas.
- Diseñar, construir y probar los circuitos impresos de los subsistemas
- Verificar experimentalmente la efectividad del sistema.

Justificación

Algunas de las pequeñas empresas de Nicaragua como cereales Doña Cenaida que se dedican a la venta de productos empacados tales como cereales y café realizan el proceso de pesado y empacado de forma manual lo cual limita la productividad y compromete la confiabilidad del producto.

El prototipo de la máquina de pesado automático desarrollada en el trabajo monográfico, clase XII de acuerdo con la OIML R51-1, contribuirá al incremento de la productividad y a mejorar la confiabilidad del producto y por ende al cumplimiento de las normas y estándares que deben ser cumplidos para el pesado y calidad de este tipo de producto. Tendrá un impacto en la credibilidad, tanto nacional como internacional, de las pequeñas empresas dedicadas a la venta de productos embolsados tales como cereales, café, pinol.

Entre las características más importantes del prototipo desarrollado destacan el bajo costo de la misma, la posibilidad de implementarla de acuerdo con los requerimientos particulares del cliente y la garantía del soporte técnico, al ser la máquina desarrollada en el país.

Los usuarios potenciales de este tipo de máquina empacadora son, entre otros, las pequeñas y medianas empresas que no cuentan con suficiente capital para adquirir una máquina, de prestaciones similares, en el extranjero.

En el ámbito académico los estudiantes de electrónica de las universidades del país contarían con información que podría ser de ayuda para reforzar sus conocimientos y habilidades sobre los diferentes temas relacionados con el hardware y el software de la solución implementada. Los resultados obtenidos pueden ser tomados como punto de partida para futuras mejoras y así brindar servicio a niveles industriales en el llenado y sellado de bolsas de leche, agua, jugos, entre otros.

El haber diseñado e implementado el prototipo de una máquina de pesado automático debe tener un impacto en la sociedad nicaragüense, en la cual se inserta nuestra universidad, en cuanto a desarrollar un nuevo paradigma relacionado con nuestra capacidad como país para crear tecnología, efectiva, eficiente y de bajo costo, que ayude a resolver los problemas que enfrentan las pequeñas empresas.

CAPÍTULO I: MARCO TEÓRICO

En este trabajo monográfico se desarrolló un prototipo de una máquina de pesado automático con rango de 0kg a 2kg y con una resolución de 0.1 g. En la figura 1.1, se muestra el diagrama de bloques del sistema. En este capítulo se describen los aspectos teóricos, y tecnológicos, relacionados con cada uno de los subsistemas.

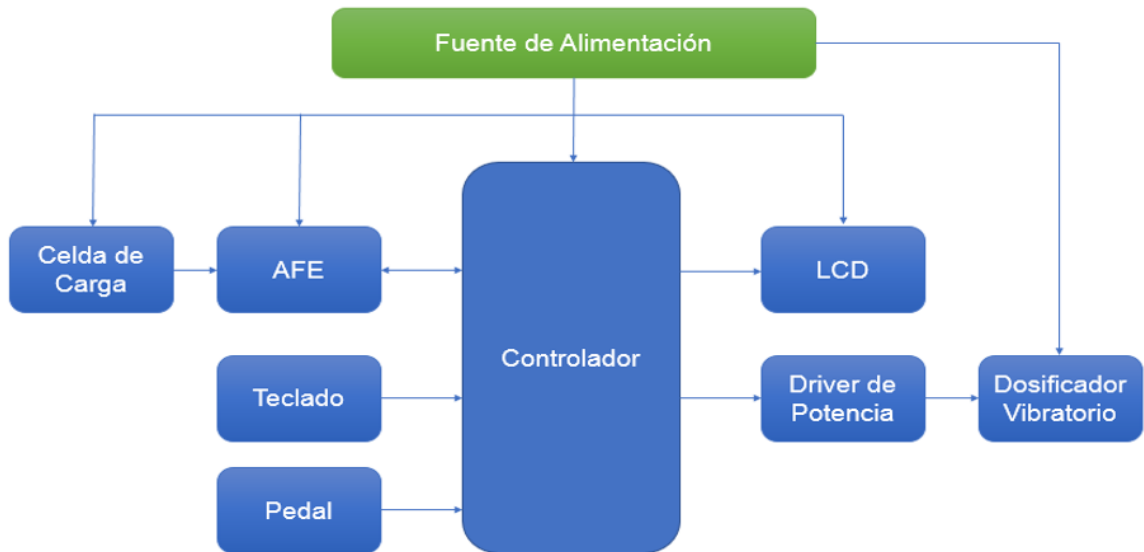


Figura 1. 1: Diagrama de bloques del sistema de pesaje automático. (Captura de Pantalla)

1.1 Módulo de pesaje

La figura 1.2 muestra los bloques que conforman el módulo de pesaje. La celda de carga es un elemento primordial en el sistema y debe cumplir con las recomendaciones de la OIML R51 – 1. A continuación, se presentan las partes fundamentales, relacionadas con dicha recomendación.



Figura 1. 2: Módulo de pesaje.

1.1.1 Recomendaciones OIML R51-1

Las máquinas empacadoras para uso comercial deben cumplir ciertas características metrológicas para su debida certificación. La organización encargada de velar por el cumplimiento de estas características es la Organización Internacional de Metrología Legal (OIML, por sus siglas en ingles). Dicha organización pone a disposición de los interesados una serie de publicaciones, las cuales están divididas en cuatro categorías, siendo la de principal interés para este trabajo monográfico la denominada OIML R. “Esta categoría presenta regulaciones modelos que establecen las características metrológicas requeridas para ciertos instrumentos de medición, además de especificar los métodos y equipos para verificar su conformidad” (International Organization of Legal Metrology [OIML], 2006, p.4).

La máquina prototipo desarrollada fue diseñada para realizar automáticamente el proceso de pesaje, por lo tanto, se hizo uso del documento OIML R 51-1. Aunque hay varios parámetros definidos en la OIML R 51-1, el énfasis principal del trabajo propuesto es en la resolución del sistema.

Las características metrológicas, respecto a la exactitud, de las diferentes clases según (OIML, 2006, p. 19) son mostradas en la tabla 1.1.

Tabla 1. 1 : Clase de exactitud, Intervalo de escala de verificación, Número de Intervalos de escala de verificación y capacidad mínima en relación a la clase de exactitud de un instrumento. Tomado de: https://www.oiml.org/en/files/pdf_r/r051-1-e06.pdf

Clase de Exactitud		Intervalo de escala de verificación, e	Número de Intervalo de escala de verificación $n = \text{Max} / e$	
			Mínimo	Máximo
XI	Y(I)	$0.001 \text{ g} \leq e$	50 000	–
XII	Y(II)	$0.001 \text{ g} \leq e \leq 0.05 \text{ g}$	100	100 000
		$0.1 \text{ g} \leq e$	5 000	100 000
XIII	Y(a)	$0.1 \text{ g} \leq e \leq 2 \text{ g}$	100	10 000
		$5 \text{ g} \leq e$	500	10 000
XIII	Y(b)	$5 \text{ g} \leq e$	100	1 000

La máquina prototipo fue diseñada para satisfacer los requerimientos de la clase de exactitud XII, específicamente para tener una resolución de 0.1 g, que corresponde al intervalo de escala de verificación e , el cual debe ser mayor o igual a 0.1 g, según la tabla 1.1. Para lograr la resolución indicada, el ADC, siguiente bloque en el módulo de pesaje, debe garantizar el número de cuentas internas requeridas y las mismas son determinadas mediante la ecuación 1. Considerando que el peso máximo para el cual está diseñada la máquina es de 2kg y que la resolución es de 0.1 g, se calcula que el número de cuentas internas que debe poseer el ADC es de 20,000 cuentas. Como se aprecia en la tabla 1, el valor obtenido se encuentra en el rango establecido por la OIML. Cabe mencionar que el número de cuentas es un valor fundamental para determinar el valor de otros parámetros que inciden en minimizar los efectos del ruido en la precisión y exactitud del sistema de pesado automático.

$$n = \frac{\text{Max}}{e} = \frac{2,000\text{g}}{0.1\text{g}} = 20,000 \text{ Cuentas} \quad (\text{Ec. 1})$$

1.1.2 Celda de Carga

Es un sensor que genera una señal eléctrica de voltaje proporcional al peso sobre este. El mercado, principalmente el internacional, ofrece un sin número de celdas de cargas las cuales funcionan bajo diferentes principios físicos y entre ellas se encuentran las piezoeléctricas, capacitivas y celdas de cargas basadas en galgas extensiométricas. A continuación, se explicará brevemente cada una de ellas:

Celdas de Carga piezoeléctricas: “este tipo de celdas de carga basan su funcionamiento en la fuerza aplicada sobre cristales polarizados, que, al ejercer presión sobre ellos, se deforman y producen una señal eléctrica”. (Bellini, 2009, p. 3). En la figura 1.3 se muestra el aspecto físico de esta celda de carga.



Figura 1. 3: Forma Física de Celda de Carga Piezoeléctrica. Tomado de: <http://www.directindustry.es/fabricante-industrial/celda-carga-piezoelctrica-106850.html>

Celda de Carga Capacitiva: Bellini (2009) establece que este tipo de celda de carga se basa en la modificación de la capacidad de un capacitor por presencia de objetos sólidos. El elemento capacitivo es parte de un circuito que es excitado de manera continua por una señal senoidal de referencia. Un cambio en la capacidad, produce un desplazamiento de fase entre la señal de referencia y una señal obtenida a partir del elemento capacitivo. En la figura 1.4, se muestra el aspecto físico de esta celda de carga.



Figura 1. 4: Forma Física de Celda de Carga Capacitiva. Tomado de: <http://www.tecsisloadcell.com/sale-4213704-small-compact-tank-s-type-load-cells-capacitive-load-cell-with-high-accuracy.html>

Celdas de Carga basadas en galgas extensiométricas: este tipo de celda de carga está basada en el arreglo puente de Wheatstone, el cual consta de cuatro elementos resistivos, que, al colocar un peso sobre ellos, este se desbalancea y produce una salida en milivoltios correspondiente al peso. Entre las principales celdas de cargas basadas en galgas extensiométricas tenemos:

- **Celdas de carga de compresión:** tienen un diseño de botón integral. Son ideales para montarse en situaciones en las que el espacio está restringido.

Ofrecen excelente estabilidad a largo plazo. En la figura 1.5, podemos observar este tipo de celda de carga.



Figura 1. 5: Forma Física de Celda de Carga de Compresión. Tomado de: <https://mx.omega.com/pptst/LCGD.html>

- **Celdas de carga compresión - Tensión:** se pueden usar para aplicaciones en las que la carga puede pasar de tensión a compresión o viceversa. Son ideales para entornos con espacio restringido. Los extremos roscados permiten una instalación fácil. En la figura 1.6, podemos observar este tipo de celda de carga.



Figura 1. 6: Forma Física de Celda de Carga de Compresión – Tensión. Tomada de: <https://mx.omega.com/pptst/LCFD.html>

- **Celdas de carga de viga en S:** se usan en aplicaciones de varias celdas de carga, medición de peso de tanque y control industrial y de proceso. Vienen con construcción de bajo perfil para integración en áreas restringidas. En la figura 1.7, podemos observar este tipo de celda de carga.



Figura 1. 7: Forma Física de Celda de Carga de Viga en S: Tomado de: <https://mx.omega.com/pptst/LC101.html>

- **Celdas de carga de flexión de viga:** se usan en aplicaciones de varias celdas de carga, medición de peso de tanque y control industrial y de proceso. Vienen con construcción de bajo perfil para integración en áreas restringidas. En la figura 1.8, podemos observar este tipo de celda de carga.



Figura 1. 8: Forma Física de Celda de Carga de Flexión de Viga. Tomado de: <https://mx.omega.com/pptst/LC501.html>

- **Celda de carga de plataforma y punto único:** se usan para sistemas de medición de peso comerciales e industriales. Proporcionan lecturas precisas independientemente de la posición de la carga en la plataforma. En la figura 1.9, se muestra el aspecto físico de esta celda de carga.



Figura 1. 9: Forma Física de la Celda de Carga de Plataforma y punto único. Tomada de: <https://mx.omega.com/pptst/LCHD.html>

HBM (n.d) y Kester (2005), establecen que los sensores más usados para este tipo de aplicaciones son las celdas de carga basadas en galgas extensiométricas en configuración puente de Wheatstone. Dentro de las cuales tenemos: compresión, compresión y tensión, tipo s, flexión de viga y de un solo punto” (Bellini, 2009, p.4). Sin embargo, HBM (n.d) plantea que la más usadas para este tipo de aplicaciones es la celda deflexión de viga, mostrada en la figura 1.10, ya que son comunes en el mercado, de fácil instalación y cableado, robustas y poseen compensación de temperatura que permiten eliminar errores en la medición.

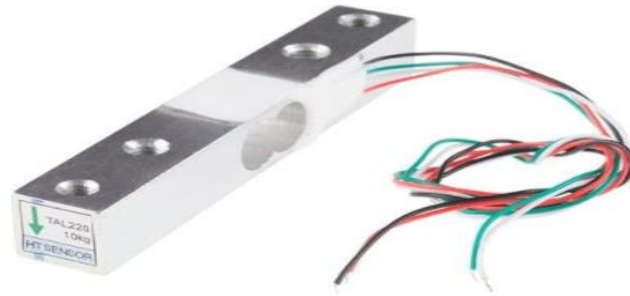


Figura 1. 10: Celda de Carga Deflexión de viga. Tomado de: <https://learn.sparkfun.com/tutorials/getting-started-with-load-cells>

Los principales parámetros que deben ser considerados para determinar la celda de carga apropiada, para una aplicación dada, son la sensibilidad, el error total, y el corrimiento (drift).

1. **Sensibilidad:** Slaterry & Nie (2005) definen la sensibilidad como:

La relación entre la salida de carga completa y la tensión de excitación, es de $2 \text{ mV} / \text{V}$. Con una sensibilidad de $2 \text{ mV} / \text{V}$ y una excitación de 5 V , la tensión de salida a escala completa es de 10 mV . A menudo, para usar la porción más lineal del tramo de la celda de carga, solo se usarían aproximadamente dos tercios de este rango. La tensión de salida a escala completa sería, por lo tanto, de aproximadamente 6 mV . El reto planteado es medir pequeños cambios de señal dentro de este rango de 6 mV de escala completa de tal manera que se obtenga el rendimiento más alto posible, lo que no es una tarea fácil en los entornos industriales en los que normalmente se utilizaran balanzas. (p.1)

2. **Error total:** Slaterry & Nie (2005) definen el erro total como:

La relación entre el error de salida y la salida nominal. Una báscula de peso típica tiene una especificación de error total de aproximadamente $0,02\%$. Es una especificación muy importante, ya que limita la precisión que se puede alcanzar con un circuito de acondicionamiento de señal ideal. Por lo tanto, determina la elección de la resolución del convertidor A / D, así como el diseño del circuito de amplificación y el filtro. (p.1)

3. **Corrimiento** (drift): Slaterry & Nie (2005) explican el corrimiento de la siguiente forma:

Las celdas de carga también derivan con el tiempo. La Figura 1.11 muestra una característica de deriva de la celda de carga real, medida durante un período de 24 horas. La temperatura fue esencialmente constante durante el período de medición, por lo que la deriva no está relacionada con la temperatura. El resultado mostrado (número de bits modificados, medidos con un ADC de 24 bits) muestra una deriva total de 125 LSB, o aproximadamente 7.5 ppm.

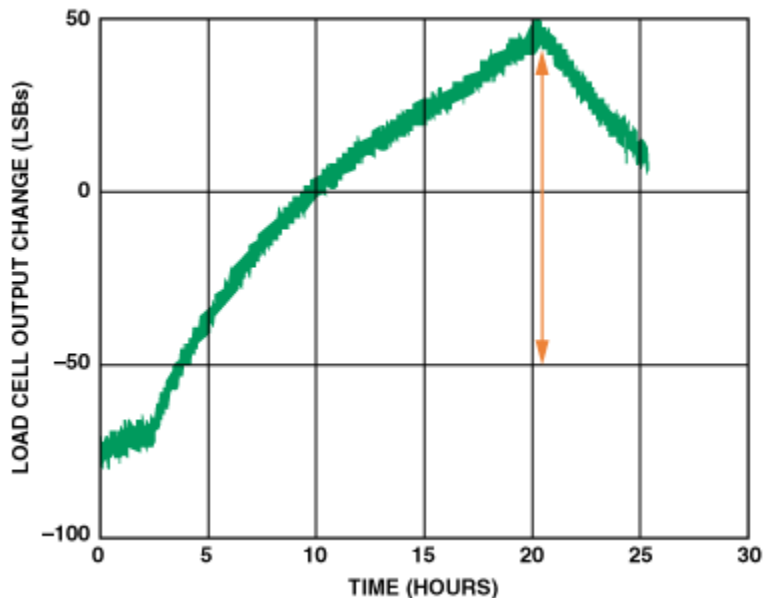


Figura 1. 11: Estabilidad a lo largo del tiempo de la celda de carga. Tomado de : <http://www.analog.com/en/analog-dialogue/articles/a-reference-design-for-weigh-scales.html>

1.2 Acondicionamiento y Procesamiento de Señal

El cumplimiento de las recomendaciones dadas por la OIML R51-1, presentadas en la tabla 1.1, requiere de una etapa de acondicionamiento de señal para su debido procesamiento. Existen diferentes alternativas para el diseño e implementación de dicha etapa, sin embargo, considerando que las celdas de carga generan un voltaje de salida muy bajo (milivoltios), se debe utilizar la

tecnología apropiada como plantea Kester (2005) “para satisfacer los requerimientos de nivel de ruido y valor de deriva.”

En la alternativa convencional se utilizan amplificadores de instrumentación, el filtrado correspondiente y posterior uso de microcontroladores para el procesamiento de los datos obtenidos. Sin embargo, debido a los bajos niveles de voltaje en la salida de la celda de carga, en el orden de los milivoltios, se requiere de un diseño muy cuidadoso para minimizar los efectos del ruido en la precisión y exactitud en los resultados de las mediciones. En la actualidad, los fabricantes de circuitos integrados ofrecen los denominados “frentes analógicos” (AFE, por sus siglas en inglés) los cuales incorporan todas las funciones requeridas para la adquisición y acondicionamiento de señales tales como amplificación y filtrado. La salida del sensor es conectada directamente a las entradas de dichos circuitos requiriendo de una cantidad de componentes externos prácticamente nula para obtener una señal que cumple con los niveles y formato requeridos para ser utilizados efectivamente por el tercer bloque del módulo de pesaje, el controlador. La utilización de este tipo de integrados permite garantizar mayor precisión, exactitud, y confiabilidad en el sistema desarrollado. Debemos agregar que el tamaño, peso, y costo de los sistemas desarrollados disminuyen.

Una de las funciones que brindan los AFEs es la conversión de la señal analógica a una señal digital y para ello incorporan un ADC. Existen diferentes arquitecturas para el convertidor analógico-digital y entre ellas destacan la de aproximaciones sucesivas, sigma – delta y pipeline. Analog Devices (2005), uno de los mayores fabricantes de este tipo de ADCs, realizó un estudio comparativo de las arquitecturas mencionadas considerando diferentes áreas de aplicación y, tal como se muestra en la figura 1.12, para las mediciones industriales predomina la arquitectura sigma – delta, ya que a pesar de tener una baja frecuencia de muestreo posee una alta resolución. El corazón de dicha arquitectura es el modulador sigma - delta, el cual, además de digitalizar la señal analógica generada por el sensor, desplaza el ruido de cuantización a frecuencias mayores, fuera de la banda de interés facilitando su remoción. Algunos convertidores sigma

– delta, también posee un filtro pasa bajo digital que se encarga de remover el ruido de cuantización, lo que lo hace idóneo para aplicaciones donde se tienen señales de muy bajas frecuencias.

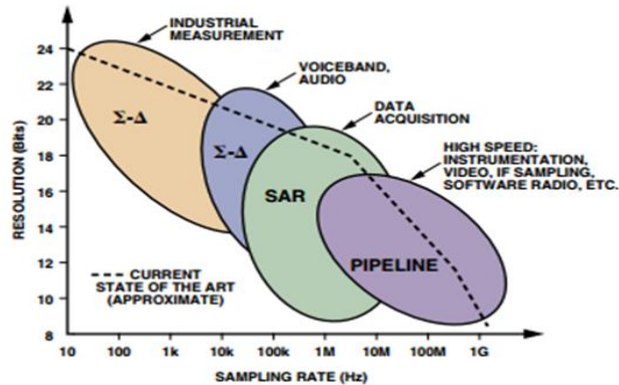


Figura 1. 12: ADC Arquitectura, aplicaciones, resolución y velocidad de muestreo.
Tomada de: <http://www.analog.com/en/analog-dialogue/articles/the-right-adc-architecture.html>

Considerando que la arquitectura sigma-delta representa la mejor alternativa para garantizar una buena resolución y gran exactitud en las mediciones industriales a continuación, son presentados los aspectos fundamentales de esta.

1.2.1 Principio de funcionamiento del convertidor analógico – digital con arquitectura Sigma Delta

La teoría de los convertidores sigma – delta ha sido conocida desde hace de 50 años, se originó en los laboratorios Bell en los 1950s, y su implementación en un circuito integrado se dio a finales de los 1980s. Hoy en día son usados en muchas aplicaciones donde un costo bajo, ancho de banda bajo y alta resolución son requeridos, como es el caso de este proyecto monográfico.

Para entender cómo trabaja un convertidor sigma – delta se deben comprender los siguientes conceptos: sobre muestreo (oversampling), formación del ruido (noise shaping). En la figura 1.13 se muestra el diagrama en bloque de un convertidor sigma – delta y a continuación se explicará cada uno de estos conceptos.

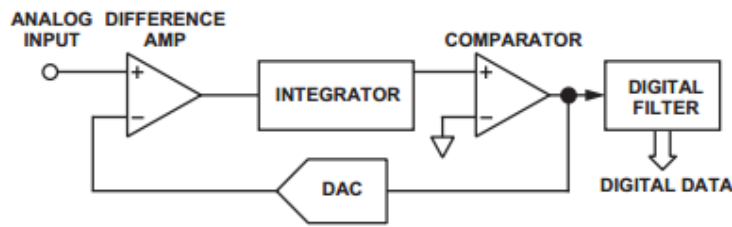


Figura 1. 13: Diagrama en bloque del convertidor Sigma – Delta. Tomado de: <http://www.ti.com/lit/an/slyt423a/slyt423a.pdf>

1.2.1.1 Sobre muestreo y formación del filtro

El modulador sigma – delta es el corazón del ADC Σ - Δ . Este es el responsable de digitalizar la señal de entrada analógica y reducir el ruido a bajas frecuencias. En esta etapa, la arquitectura implementa una función llamada *formación de ruido* (noise shaping) cuya función principal es colocar el ruido de cuantización a frecuencias mayores, fuera de la banda de interés. La función formación de ruido es una de las principales razones por las cuales los convertidores sigma – delta están bien posicionados para aplicaciones de baja frecuencia y alta resolución. En la figura 1.14, se muestra los conceptos fundamentales sobre el funcionamiento de los convertidores Σ - Δ .

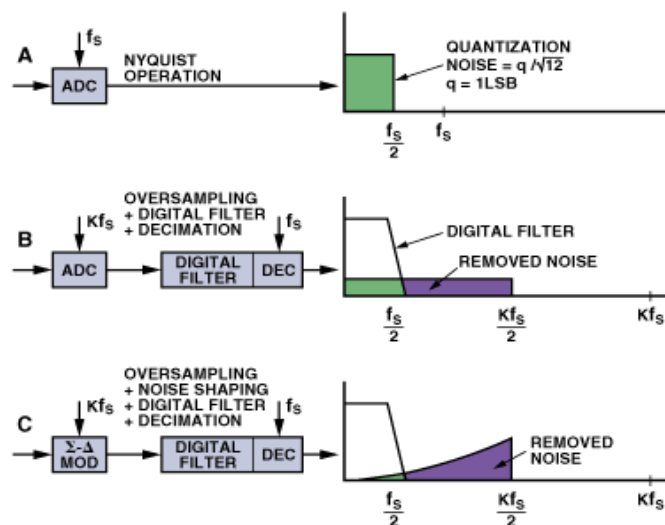


Figura 1. 14: Conceptos fundamentales usados en Σ - Δ : oversampling, noise shaping, filtro digital y decimation. Tomado de: <http://www.analog.com/en/analog-dialogue/articles/the-right-adc-architecture.html>

1.2.1.2 Filtro digital y decimador

Existen moduladores sigma – delta que a su salida poseen un filtro digital/decimador tal como se muestra en la figura 1.15.

El filtro digital implementa un filtro digital paso bajo a la salida del modulador para remover el ruido de cuantización desplazado a frecuencias fuera del ancho de banda de interés. Para esta función se implementa un filtro promedio, el cual toma una cantidad de muestras y calcula el promedio como se muestra en la figura 1.16. Esta es una de las técnicas más usadas en convertidores Σ - Δ . La mayoría de estos filtros implementan un filtro digital sinc3, el cual remueve todas las componentes con frecuencias mayores respecto a las frecuencias de interés.

En la figura 1.15 también se muestra otro filtro, el cual es denominado **decimador**, cuya función principal es tomar la señal de salida del filtro digital que es una versión digital de la señal de entrada, pero en alta frecuencia, y eliminar algunas muestras de dicha señal para disminuir la frecuencia de salida del dato de interés, como se muestra en la figura 1.15.

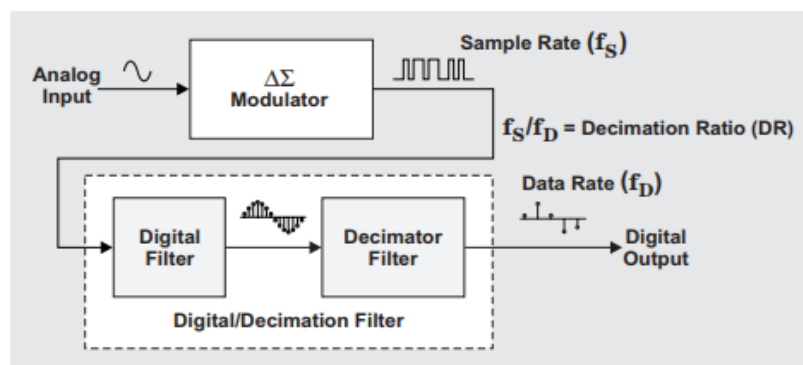


Figura 1. 15: Diagrama en bloque del convertidor Sigma – Delta. Tomado de: <http://www.ti.com/lit/an/slyt423a/slyt423a.pdf>

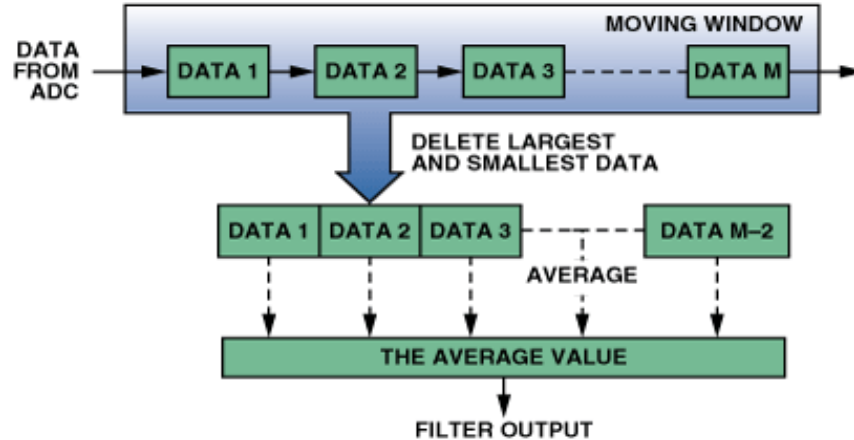


Figura 1. 16: Algoritmo de un filtro promedio. Tomado de: <http://www.analog.com/en/analog-dialogue/articles/a-reference-design-for-weigh-scales.html>

Dada las características de los ADC con estructura sigma-delta se seleccionará, en la fase de diseño, un AFE que incorpore ese tipo de ADC y que además cumpla con el número de cuentas determinadas mediante la ecuación 1.

1.3 Tecnología del Controlador

El controlador es uno de los componentes fundamentales del sistema y en el mercado, principalmente en el internacional, existen diferentes tecnologías que pueden ser utilizadas para su implementación. Entre las alternativas se encuentran los sistemas cableados usando componentes analógicos, digitales, o híbridos y los programables tales como: controlador de lógica programable (PLC, por sus siglas en Ingles), microcontroladores, arreglo de compuertas programable en campo (FPGA, por sus siglas en inglés).

Los controladores de lógica programable, aunque su implementación requiere menos tiempo, requieren de una inversión alta, comparada con la inversión requerida al usar microcontroladores, tanto en software como en hardware. Por

ejemplo, solamente el módulo analógico para celda de carga de un PLC tiene un precio de \$400 en el mercado internacional.

La implementación del sistema utilizando la tecnología de los FPGAs, requeriría de ciertos elementos de los cuales no se dispone en la Facultad de Electrotecnia y Computación de la Universidad Nacional de ingeniería, y tampoco en el país.

Con los microcontroladores es posible implementar las funciones requeridas ya que los mismos cuentan con los recursos necesarios y además su precio es relativamente bajo lo cual es un elemento importante para satisfacer uno de los requerimientos del sistema el cual es el bajo costo de desarrollo.

“Un microcontrolador es una computadora en un solo chip. Micro, sugiere que el dispositivo es pequeño, y controlador sugiere que es usado para aplicaciones de control” (Ibrahim Dogan, 2008, p.2).

En general, los microcontroladores cuentan con los recursos necesarios, para desarrollar este tipo de sistemas, tales como módulos de comunicación serial: I2C, SPI, puertos que pueden ser configurados como entradas y salidas, analógicas o digitales, memoria para el programa y datos, entre otros. Otro elemento importante relacionado con los microcontroladores es la disponibilidad en el mercado de compiladores tales como: MikroC y PIC C. Estos compiladores nos permiten explotar los recursos que disponen los microcontroladores. Además, se dispone en la web de compiladores como: Mikro C y PIC C, con sus versiones demo lo que facilita desarrollar un sistema a un precio bajo.

1.4 Etapa de dosificación y Potencia

La automatización del proceso de pesado, además de garantizar una medición bastante precisa del producto, tiene un impacto significativo en la productividad ya disminuye el tiempo requerido para el empaque, así como una mejora en la

higiene requerida en el proceso dado que el operario no está en contacto directo con el producto. Para dosificar el producto se necesita un alimentador vibratorio.

Un dosificador es un equipo que, por lo general, forma parte integral de una línea de producción y su función es entregar o suministrar de forma ágil la cantidad de material o insumo necesario para la realización de un sistema o proceso tecnológico. La dosificación se realiza con el objetivo de envasar un volumen exacto de sólidos o líquidos evitando faltantes o excedentes de material, ya que esto incurre en un aumento del costo del producto final, así como la insatisfacción de los usuarios. (Girón Juárez, 2010, p.21)

“Se distinguen tres clases de dosificadores los cuales son: de sólidos secos y sólidos en polvo, de líquidos y de gases” (Girón Juárez, 2010, p.21).

Para nuestro diseño se tomaron en cuenta sólo los dosificadores de sólidos secos y sólidos en polvo, ya que esta máquina está dedicada para cereales y estos pertenecen a sólidos en polvo.

Para embolsar sólidos existen los dosificadores volumétricos y gravimétricos. Siendo de principal interés para esta aplicación el dosificador gravimétrico, lo que nos permite establecer una cantidad o medida de producto a dosificar.

Existen dos tipos de dosificadores gravimétricos: dosificador gravimétrico por banda y dosificador gravimétrico por pérdida de peso. Siendo el de interés, para esta aplicación, el dosificador por pérdida de peso ya que este, a medida que descarga material, el sistema de pesaje decae y el controlador envía una señal a un controlador de fase para ajustar el ángulo de disparo de un TRIAC hasta hacer cero la señal de alimentación del alimentador vibratorio una vez se alcance el peso seleccionado por el usuario.

En aplicaciones industriales es común encontrar el uso de motores eléctricos controlados por variadores de velocidad para realizar la dosificación. La principal desventaja en el uso de esta técnica es su elevado costo. La principal característica de la máquina de pesado automático es su precio bajo, por lo tanto, se hará uso de un alimentador vibratorio electromagnético, el cual tiene un menor costo de mantenimiento, facilidad de instalación, entre otras ventajas.

Un alimentador vibratorio electromagnético es un equipo que al ser conectado a una alimentación AC comienza a vibrar a una frecuencia determinada permitiendo que el producto caiga en la plataforma de medición. La rapidez de suministro del producto a la plataforma depende de la frecuencia de vibración del alimentador la cual puede ser ajustada variando la energía que se entrega a este. Generalmente, al inicio se hace que el vibrador funcione a su frecuencia máxima, alta velocidad de entrega del producto, y se disminuye, continua o discretamente, hasta un valor cero cuando se ha obtenido el peso deseado. En ese momento el producto es embolsado y el proceso se repite.

Existen muchas formas para variar el nivel de vibración del alimentador electromagnético. Una de ellas es usar el circuito integrado “controlador de fase: TCA785 mediante el cual se puede controlar el ángulo de disparo de un TRIAC, ópticamente desacoplado, lo cual permite variar la cantidad de energía entregada a una carga dada. La forma mencionada se utilizó en el desarrollo del prototipo y los detalles serán mostrados en la etapa de diseño e implementación.

CAPÍTULO II: DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE LA MÁQUINA DE PESADO AUTOMÁTICO

En este capítulo son presentados aquellos aspectos relacionados con el diseño, implementación y resultados obtenidos en el desarrollo del prototipo de la máquina de pesado automático.

2 Prototipo de Máquina de pesado automático.

El sistema de pesado automático fue diseñado, e implementado, de forma tal que cumpla con parámetros tales como clase de exactitud, intervalo de verificación de escala y el número de intervalos de verificación de escala, establecidos por la OIML, los cuales fueron descritos en la sección 1.1. En la figura 2.1 se pueden apreciar los principales componentes del sistema de pesado automático.

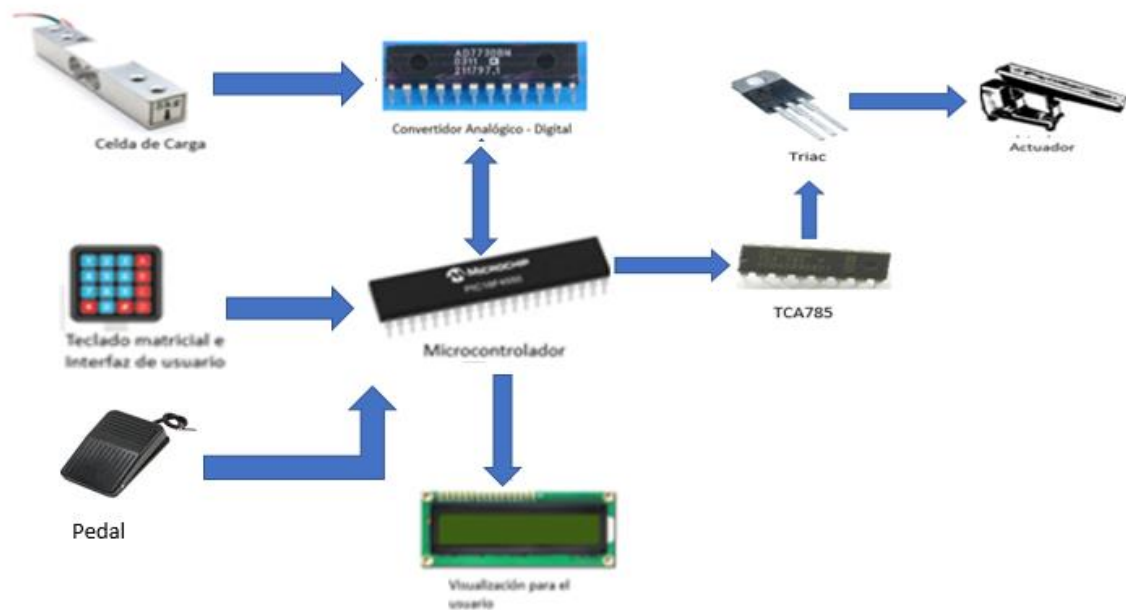


Figura 2. 1: Sistema de pesado automático implementado. (Captura de Pantalla)

2.1 Determinación de componentes electrónicos

En esta sección se describen los criterios tomados en consideración para la selección de cada uno de los componentes electrónicos utilizados en el desarrollo del prototipo del sistema de pesado automático, empezando con la celda de carga.

2.2 Determinación de celda de carga

Como se explicó en el marco teórico, existen muchos tipos de celdas de carga y para este trabajo se decidió utilizar la celda de carga basada en galgas extensiométrica tipo deflexión de viga, ya que HBM (n.d) y (Bellini, 2009), plantean que estas son comunes en el mercado, de fácil instalación y bajo costo, además cumple con las características necesarias para este trabajo, que se establecen en la tabla 2.1. En la figura 2.2, se muestra el aspecto físico de la celda de carga y en la figura 2.3 el modelo interno de la celda de carga.

Tabla 2. 1: Características de Celda de Carga

Característica técnica necesaria	
Sensibilidad	2 mV / V
Voltaje de Alimentación	5 Vdc
Rango de Sobrecarga	150% de la capacidad
Resistencia del puente	350 Ω
Repetibilidad	< 0.01% de capacidad
Costo inicial	Bajo
Costo de mantenimiento	Bajo
Conexión eléctrica	4 cables

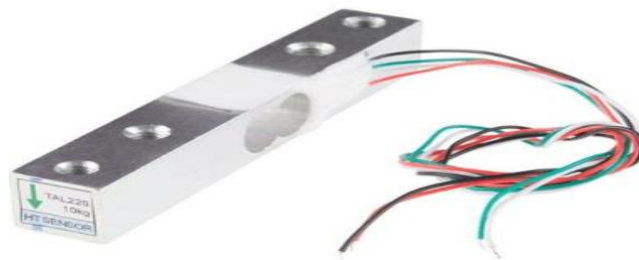


Figura 2. 2:Celda de Carga Deflexión de viga. Tomado de: <https://learn.sparkfun.com/tutorials/getting-started-with-load-cells>

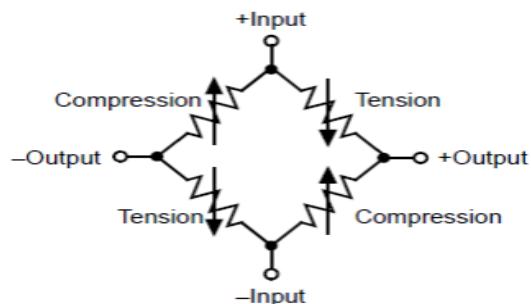


Figura 2. 3: Modelo interno de la celda de carga. Tomado de: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/appnotes/01030a.pdf>

La celda de carga será alimentada con 5V, de forma ratio métrica, y por consiguiente el rango de voltaje que se podrá obtener va desde 0mV, sin producto sobre la plataforma de medición, a 10mV, carga completa (2kg en el prototipo desarrollado). En la figura 2.4, se muestra la respuesta de la celda de carga para diferentes valores de carga.

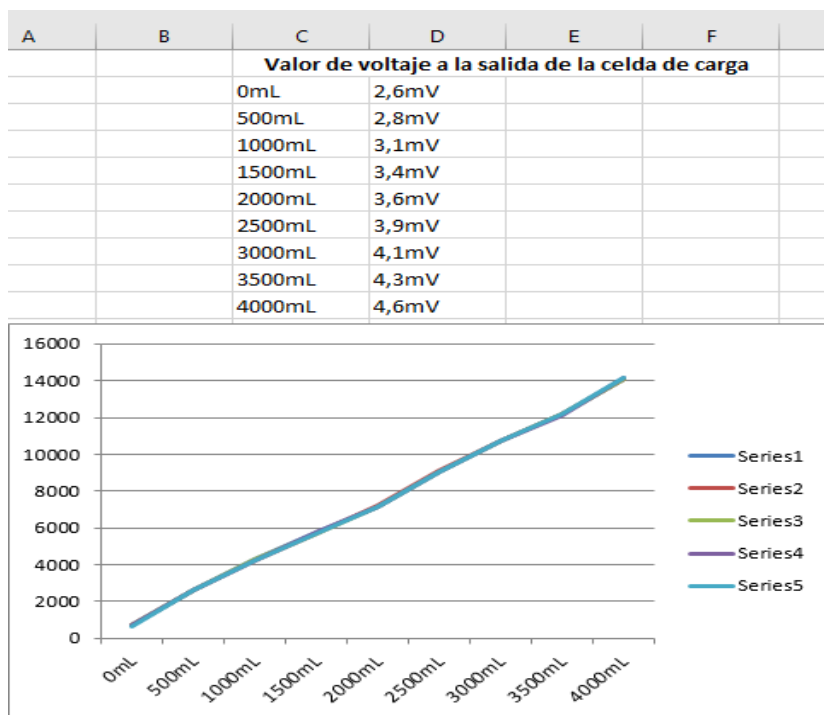


Figura 2. 4: Respuesta de la Celda de Carga a diferentes valores de peso. (Captura de Pantalla)

Debido a los valores bajos (mV) generados por la celda de carga, la adquisición y acondicionamiento será realizado mediante un Bridge Transducer ADC (Analog Front End) desarrollado específicamente para aplicaciones de pesado utilizando celdas de carga tipo puente.

2.3 Etapa de Acondicionamiento, Adquisición y Procesamiento

Uno de los requerimientos establecidos es que el sistema debe tener una resolución de 0.1 g y por lo tanto es necesario, desde el punto de vista del convertidor analógico digital, que el mismo posea un número de cuentas de al menos 20,000 como se determinó con la ecuación 1. Las celdas de carga utilizadas en este tipo aplicaciones entregan una salida en el orden de los milivoltios, lo cual requiere, para su efectiva y eficiente manipulación, del diseño e implementación de circuitos adicionales. En la actualidad, los diseñadores de circuitos integrados como Analog Devices ofrecen una variedad muy amplia de alternativas que facilitan, esto es relativo, el trabajo con este tipo de señales. Estos circuitos integrados son llamados Frentes Analógicos (AFE, por sus siglas en inglés) y cuentan, los de última generación, con los elementos necesarios para realizar las diferentes funciones de un sistema de medición. Para el trabajo desarrollado se seleccionó el AD7730 (Bridge Transducer), el cual es un AFE al cual puede ser conectada directamente la salida de la celda de carga y, con la configuración apropiada, obtener en su salida el valor digital del peso bajo medición. El dato generado por el AFE es enviado a un microcontrolador utilizando

el protocolo de comunicación SPI. En la figura 2.5, se muestra el diagrama funcional del AD7730.

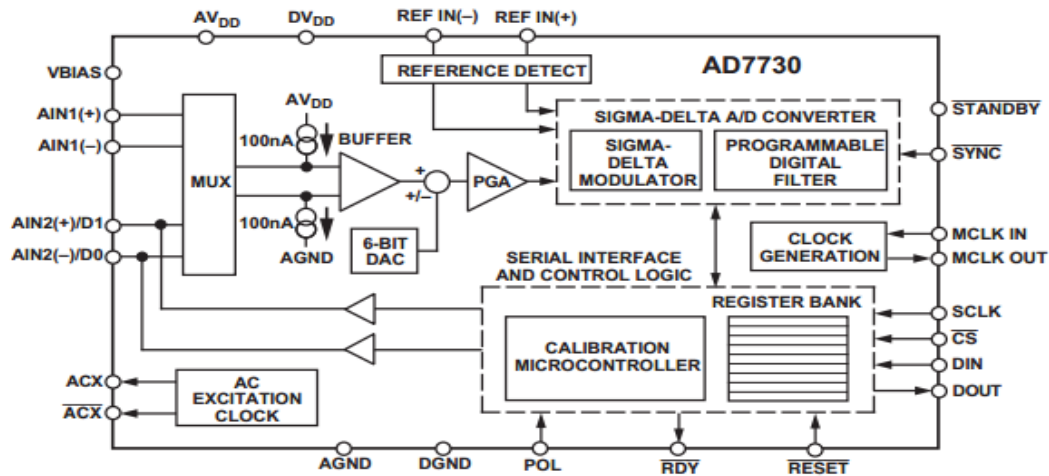


Figura 2. 5: Diagrama Funcional del AD7730. Tomado de: http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD7730_7730L.pdf

2.3.1 Frente Analógico AD7730

Para la conversión de la señal generada por la celda de carga se utilizó el AFE AD7730 el cual fue diseñado para ser utilizado en aplicaciones como balanzas y medición de presión.

El corazón del AD7730 es el modulador Sigma Delta de 24 bits. Este dispositivo acepta señales de bajo nivel directamente del sensor, en esta aplicación “la celda de carga.” Lo que nos indica que podemos conectar directamente la salida de la celda de carga al integrado. La señal de entrada es aplicada a un amplificador de ganancia programable basado en un modulador analógico. La salida del modulador es procesada por un filtro digital programable paso bajo, permitiendo ajustar la frecuencia de corte, velocidad de salida del dato y tiempo de establecimiento de este.

2.3.1.1 Análisis de Ruido del Sistema

Antes de configurar el AD7730 se realizó el análisis de ruido del sistema para determinar su afectación en la precisión y exactitud de la medición, además de conocer la capacidad del AFE para diferenciar entre la señal de interés y la señal de ruido.

Una de las técnicas más comunes para el análisis de ruido del sistema es la técnica del histograma, la cual consiste en conectar a cero voltios la entrada del AFE y recolectar un número de conversiones y determinar el ruido rms, el cual permite obtener un valor promedio de estas conversiones, comúnmente expresado en unidades de micro voltios. Esto con el objetivo de conocer el valor de ruido rms para el cual la resolución del sistema debe ser superior.

El proceso de pesado se realiza de forma dinámica por lo que no basta solo con conocer el nivel de ruido rms si no también el ruido pico a pico, el cual permite conocer los valores mínimos y máximos de ruido en el sistema en un intervalo de tiempo y evitar errores en la precisión y exactitud de la medición.

El número de cuentas, calculado con la ecuación 1, es de 20,000. Este valor permitirá calcular el nivel de ruido pico a pico del sistema como se muestra en la ecuación 2.

$$V_{\text{Picoa Pico}} = \frac{V_{\text{Full Scale}}}{\# \text{Cuentas}} = \frac{10 \text{ mV}}{20,000} = 0.5 \mu\text{V} \quad (\text{Ec. 2})$$

Una vez obtenido el nivel de voltaje de ruido pico a pico procedemos a calcular el nivel de voltaje de ruido rms como se muestra en la ecuación 3.

$$V_{\text{RMS}} = \frac{V_{\text{Picoa Pico}}}{6.6} = \frac{0.5 \mu\text{V}}{6.6} = 75 \text{ nV} \quad (\text{Ec. 3})$$

Los valores calculados con la ecuación 2 y 3 permitirán calcular la resolución libre de ruidos para el sistema de pesado automático. La resolución libre de ruido permite una lectura estable de la medición y libre de parpadeos en la LCD. La ecuación 4 permite determinar el número de bits libre de ruido para este trabajo.

$$\text{Resolución libre de ruido} = \frac{\log\left(\frac{V_{FullScale}}{V_{Pico\ a\ Pico}}\right)}{\log(2)} = \frac{\log\left(\frac{10\text{ mV}}{0.5\ \mu\text{V}}\right)}{\log(2)} = 14.3\ \text{bits} \quad (\text{Ec. 4})$$

Como se mencionó anteriormente, el sistema de pesado se realiza de forma dinámica es por ello por lo que se presta mayor importancia al ruido pico a pico, pero de igual forma se calcula la resolución efectiva la cual puede ser afectada por el ruido y hacer que los bits menos significativos cambien produciendo parpadeos en la pantalla LCD, esto por el comportamiento dinámico de la medición. En la ecuación 5, se calcula la resolución efectiva.

$$\text{Resolución Efectiva} = \frac{\log\left(\frac{V_{FullScale}}{V_{RMS}}\right)}{\log(2)} = \frac{\log\left(\frac{10\text{ mV}}{75\ \text{nV}}\right)}{\log(2)} = 17\ \text{bits} \quad (\text{Ec. 5})$$

2.3.1.2 Rangos de entrada del AD7730

El AD7730 tiene dos entradas analógicas diferenciales y acepta los siguientes rangos de voltaje unipolares: 0 – 10 mV, 0 – 20 mV, 0 – 40 mV y 0 – 80 mV y rangos bipolares: ± 10 mV, ± 20 mV, ± 40 mV y ± 80 mV.

La celda de carga que se usa en el sistema de pesado automático se alimenta con 5 V y tiene una sensibilidad de 2 mV/V. Por lo tanto, el rango de voltaje de trabajo es de 0 mV a 10 mV. Posteriormente se explicará cómo se configura este rango de voltaje al AD7730.

2.3.1.3 Numero de bits e implicaciones para datos libre de ruido

Una de las principales características del AD7730, es su alta resolución y en la hoja de datos especifica que posee hasta 230,000 cuentas pico a pico. Para

cumplir con el requerimiento de la resolución del sistema de 0.1 g, en la ecuación 1, se calculó el número de cuentas que debe poseer el convertidor analógico digital. El número de cuentas pico a pico garantizan una medición libre de flickers y un excelente desempeño del modulador sigma – delta.

2.3.1.4 Calibración y tara

Para acondicionar la celda de carga, en la máquina se debe colocar un recipiente, en la mayoría de los casos metálico, donde cae el producto. Este recipiente al fijarlo sobre la celda de carga produce una deformación en esta y por ende un voltaje distinto de cero a la salida de la celda de carga. Como se explicó anteriormente al AD7730 se le debe asegurar un voltaje de 0 mV a 10 mV en la entrada del amplificador de ganancia programable, para eliminar este voltaje el AD7730 cuenta con un convertidor digital analógico de 6 bits para remover este voltaje y cuando no hay caído producto sobre la plataforma se pueda observar 0 g en el display de la máquina.

El rango de trabajo del sistema de pesado automático es de 0 mV a 10 mV, por lo tanto, debemos calibrar el sistema para que reconozca cuál es su cero y cuál es su peso máximo para linealizar la medición. El AD7730 posee auto calibración y calibración del sistema. Para este trabajo se usó calibración del sistema, ya que se necesita remover error de offset y error de ganancia. Más adelante se explicará cómo se realiza la calibración del sistema y como se configuran los registros asociados para configurar el AD7730.

2.3.1.5 Comunicación con el microcontrolador

El AD7730 cuenta con un módulo de comunicación serial, compatible con el protocolo de comunicación SPI, para comunicarse con el microcontrolador lo que permite leer o escribir en cada uno de sus registros. En la figura 2.6, se muestra el diagrama de conexión entre el microcontrolador y el AD7730.

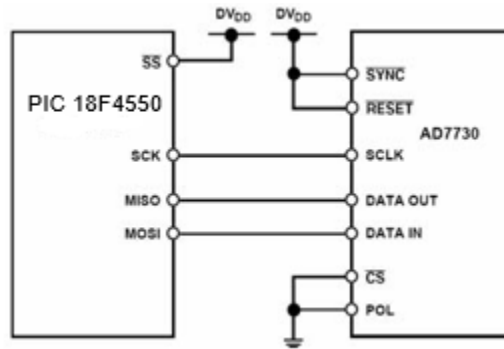


Figura 2. 6: Diagrama de conexión del AD7730 con microcontrolador. (Captura de pantalla)

El microcontrolador seleccionado para implementar el sistema de procesamiento y control del prototipo de la máquina de pesado automático deber contar con un módulo de comunicación serie (por ejemplo, MSSP) que permita la comunicación vía SPI.

2.3.1.6 Estabilidad en la medición

Muchos fabricantes recomiendan usar reguladores de voltaje de alta precisión para la alimentación del AD7730 y la celda de carga, esto para evitar que cambios de voltaje en la fuente dc afecten la medición. El AD7730 incorpora la técnica conocida como ratiometric, la cual consiste en alimentar el IC y la celda de carga con la misma fuente de voltaje lo cual garantiza que si hay una variación en el voltaje de alimentación, la misma se refleja tanto en el voltaje de referencia como en la celda carga, evitando errores en la medición. En la figura 2.7, se muestra la conexión del sistema usando la técnica ratiometric.

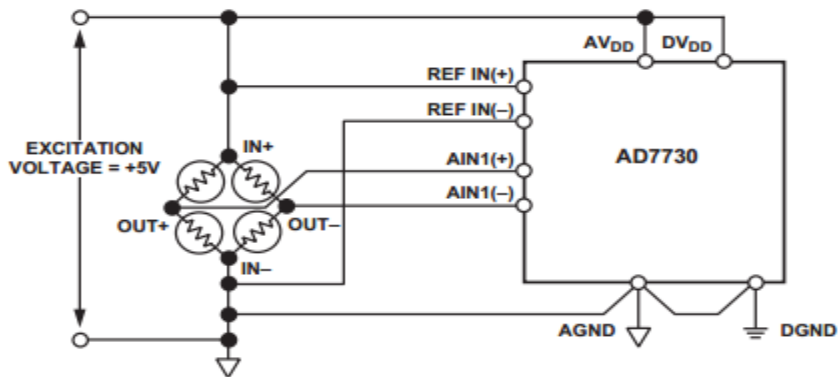


Figura 2. 7: Técnica ratiometric AD7730 más celda de Carga. (Captura de pantalla)

2.3.1.7 Entradas analógicas

El AD7730 tiene dos canales de entradas, un primer canal de entrada AIN1 y un segundo canal de entrada AIN2. Ambos canales de entradas son diferenciales, lo que permite poder manejar rangos de voltaje unipolares y bipolares. Para esta aplicación se configuraron los bits del registro modo correspondientes para seleccionar el canal de entrada AIN1, rango de voltaje unipolar de 0 a 10 mV.

2.3.1.8 Amplificador de Ganancia Programable

El amplificador de ganancia programable del AD77730 puede manejar rangos de voltaje unipolares y bipolares. La selección del valor de ganancia para el amplificador está ligado al voltaje de referencia, para esta aplicación el valor de ganancia corresponde a 250 para un rango de entrada de 0 mV a 10 mV. En la hoja de datos del AD7730 especifica que si se usa un voltaje de referencia de 5 V o 2.5 V, se utilizará este mismo valor de ganancia. Cabe mencionar que este valor es independiente del voltaje de referencia seleccionando. Los valores de ganancia para cada rango de entrada se muestran en la figura 2.8.

ANALOG INPUTS/REFERENCE INPUTS			
Normal-Mode 50 Hz Rejection ²	88	dB min	From 49 Hz to 51 Hz
Normal-Mode 60 Hz Rejection ²	88	dB min	From 59 Hz to 61 Hz
Common-Mode 50 Hz Rejection ²	120	dB min	From 49 Hz to 51 Hz
Common-Mode 60 Hz Rejection ²	120	dB min	From 59 Hz to 61 Hz
Analog Inputs			
Differential Input Voltage Ranges ¹¹			Assuming 2.5 V or 5 V Reference with HIREF Bit Set Appropriately
	0 to +10 or ±10	mV nom	Gain = 250
	0 to +20 or ±20	mV nom	Gain = 125
	0 to +40 or ±40	mV nom	Gain = 62.5
	0 to +80 or ±80	mV nom	Gain = 31.25

Figura 2. 8: Valores de Ganancia para cada uno de los voltajes de entrada. Tomada de: http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD7730_7730L.pdf

2.3.1.9 Convertidor Digital – Analógico

El AD7730 incorpora un convertidor digital-analógico de 6 bits cuyo objetivo es añadir o sustraer un voltaje de offset a la señal antes del amplificador de ganancia programable. Esto se debe a que cuando se le coloca una plataforma sobre la celda de carga el voltaje de salida ya no será cero, por lo tanto, se debe añadir o sustraer ese voltaje con ayuda del DAC. Una vez colocada la plataforma sobre la celda de carga, esta generó un voltaje a su salida de 0.5 mV, este valor no se le puede añadir o sustraer con el convertidor digital analógico, ya que la resolución del convertidor analógico digital para un voltaje de referencia de 5 V es de 2.5 mV. Este valor de offset es removido por la calibración del sistema.

En la figura 2.9, se muestra la celda de carga deflexión de viga con su plataforma donde caerá el producto a pesar.



Figura 2. 9: Plataforma Fijada sobre celda de Carga. (Captura de Pantalla)

2.3.1.10 Modulador Σ - Δ y Filtro Digital

El modulador sigma – delta es el corazón del AD7730 y su principal función es digitalizar la señal de entrada dentro del ancho de banda de interés y desplazar el ruido de cuantización producido por el mismo.

La salida del modulador alimenta directamente al filtro digital. Este consiste en dos etapas. El filtro de la primera etapa es un sinc3 pasa bajo y el de la segunda etapa es un filtro FIR paso bajo.

La función principal del filtro sinc3 de la primera etapa es remover el ruido de cuantización del modulador. La frecuencia de corte y velocidad de salida del filtro es configurada en el registro filtro, el cual será detallado más adelante. La respuesta de este tipo de filtros es similar a la de un filtro promedio. Este tipo de filtro es muy común y su principal función es atenuar el ruido de cuantización. En la figura 2.10, se muestra la respuesta en frecuencia del filtro sinc3.

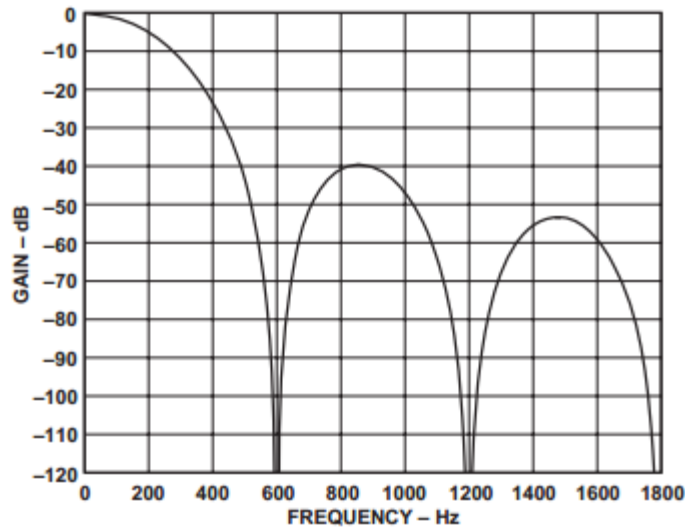


Figura 2. 10: Respuesta en frecuencia del filtro de la primera etapa. Tomada de: http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD7730_7730L.pdf

La primera etapa del filtro sinc3 paso bajo posee dos modos básicos de operación: modo chop y modo sin chop. Por las características requeridas del sistema a desarrollar para esta aplicación se trabaja con el modo chop, ya que con este modo de operación activo se remueve offset y deriva de offset a la entrada y salida del dispositivo.

Un aspecto importante del AFE, y del sistema, es la velocidad de salida del dato, cuyo valor es determinado en el análisis de ruido del sistema y luego solo es necesario configurar el registro apropiado en el AFE por medio del protocolo de comunicación SPI. Para calcular la velocidad de salida del dato usando el modo chop hacemos uso de la ecuación 6, que se encuentra en la hoja de datos del AD7730. En la tabla 2.4, se mostrará este valor, una vez realizado el análisis de ruido a la salida del AD7730.

$$Velocidad\ de\ salida = \frac{f_{CLK\ IN}}{16} * \frac{1}{3\ SF} \quad Ec. 6$$

Donde:

SF: es el decimal equivalente cargado del bit SF del registro filtro

$f_{CLK\ IN}$: 4.5192 MHz.

Tabla 2. 2: Rangos de SF del AD7730

CHOP	SKIP	SF RANGE	OUTPUT UPDATE RATE RANGE (4.9152 MHz Clock)
0	0	2048 a 150	150 Hz a 2.048 kHz
1	0	2048 a 75	150 Hz a 1.365 kHz
0	1	2048 a 40	150 Hz a 7.6 kHz
1	1	2048 a 20	50 Hz a 5.12 kHz

La segunda etapa del filtro tiene tres modos de operación: el primero equivale a un filtro FIR pasa bajo de 22 tap. Los 22 tap que corresponde al nivel de filtrado u orden del filtro, a mayor número de tap mejor filtrado. En este trabajo se hace uso de la segunda etapa de filtrado, cuya función principal es procesar la salida del primer filtro y garantizar una velocidad de salida del dato baja, eliminando el ruido de alta frecuencia y obteniendo una conversión libre de ruido.

Para calcular la frecuencia de corte de la segunda etapa del filtro se hizo uso de la ecuación 7, la cual es proporcionada por el fabricante en la hoja de datos del AD7730.

$$f_{-3dB} = 0.0395 * \frac{f_{CLK IN}}{16} * \frac{1}{3 * SF} \quad \text{Ec. 7}$$

El segundo modo de operación es el modo fast el cual se recomienda usar solo cuando se trabaja la celda de carga con corriente AC y el tercer modo es el skip con el cual solo se trabaja con la primera etapa del filtro directamente.

Para esta aplicación se utiliza las dos etapas de filtrado, ya que es necesario remover todo el ruido de cuantización y disminuir la velocidad de salida del dato para tener una medición exacta y estable.

2.3.1.11 Banco de registros del AD7730

El AD7730 es un dispositivo totalmente digital y posee trece registros, los cuales pueden ser accedidos por medio del protocolo de comunicación SPI. En la figura 2.11, se muestran los registros que posee en AD7730. A continuación, se explicará la función de cada registro:

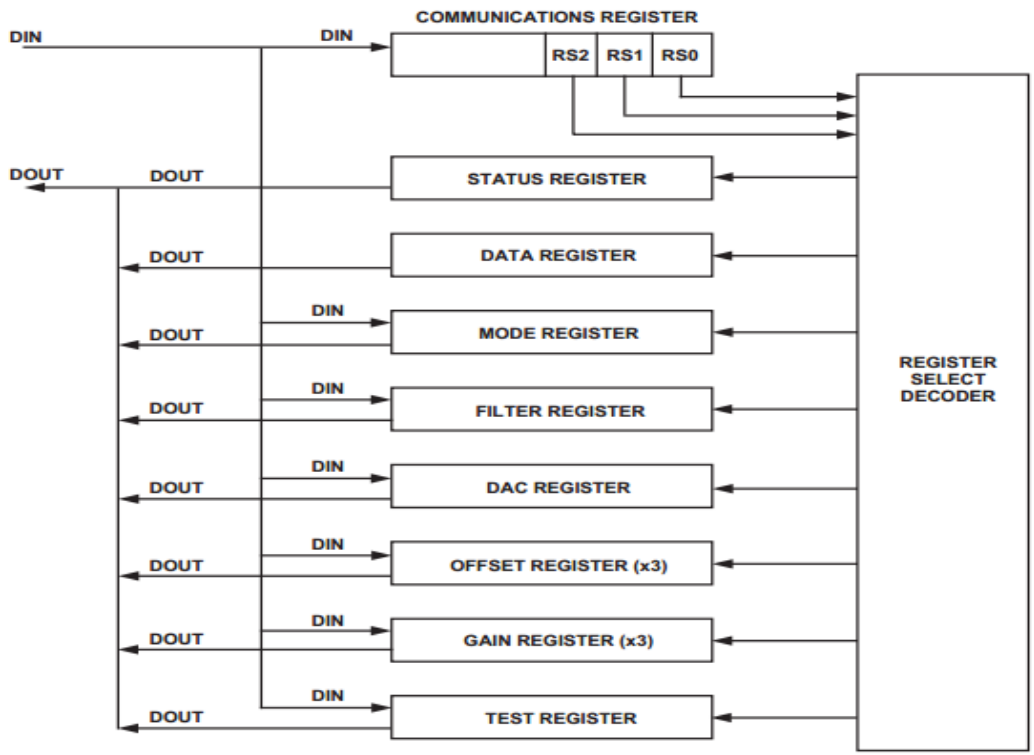


Figura 2. 11: Registros del AD7730. Tomado de: http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD7730_7730L.pdf

✓ **Registro de comunicación:** este es un registro de 8 bits y solamente es de escritura. Para ingresar a cada registro se debe iniciar con una operación de escritura al registro de comunicación. En el anexo C se muestra la tabla 1 donde se presentan los bits correspondientes al registro de comunicación y su descripción. En la figura 2.12, se muestra el número binario asignado a cada registro para ser accedido.

RS2	RS1	RS0	Register
0	0	0	Communications Register (Write Operation)
0	0	0	Status Register (Read Operation)
0	0	1	Data Register
0	1	0	Mode Register
0	1	1	Filter Register
1	0	0	DAC Register
1	0	1	Offset Register
1	1	0	Gain Register
1	1	1	Test Register

Figura 2. 12: Asignación de números para acceder a un determinado registro. (Captura de Pantalla)

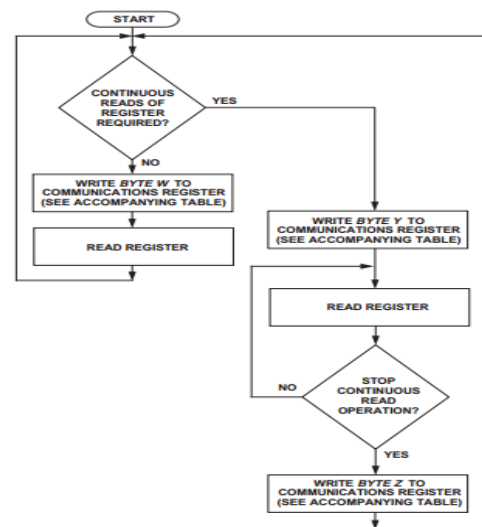
- ✓ **Registro Estado:** es un registro solo de lectura de 8 bits. Proporciona información sobre el estado de la conversión, calibración, operación standby y la validación del voltaje de referencia. En el anexo C, se presenta la tabla 2 con los bits correspondientes al registro estado y su función.
- ✓ **Registro de Datos:** este registro es de solamente lectura y contiene los resultados de la conversión del AD7730. Puede ser configurado para 16 o 24 bits.
- ✓ **Registro Modo:** este registro es de 16 bits y los datos pueden ser leídos o escritos. Con este registro se configura el modo de operación del AD7730, selección del rango de entrada, selección del canal a utilizar y el ancho de palabra del registro Dato. En el anexo C, se presenta la tabla 3 donde se detallan los bits que contiene este registro y su función.
- ✓ **Registro del Filtro:** este registro consta de 24 bits en los cuales se puede leer o escribir. Con este registro se determina la cantidad de promedios desempañados por el filtro y su modo de operación. En el anexo C, se presenta la tabla 4 donde se detallan los bits que contiene este registro y su función.
- ✓ **Registro DAC:** este registro consta de 8 bits sobre los cuales podemos leer o escribir. Este registro nos permite eliminar voltaje de tara. En el anexo C, se presenta la tabla 5 donde se detallan los bits que contiene este registro y su función.
- ✓ **Registro de Calibración Offset:** este registro contiene tres registros de calibración offset de 24 bits, sobre los cuales los datos pueden ser leídos o escritos. Los registros son independientes uno de otro. Cuando se realiza la rutina de calibración del registro offset, el valor obtenido es usado para escalar la palabra de salida. Dicho valor es sustraído de la palabra de salida.

- ✓ **Registro Gain:** este registro contiene tres registros de calibración gain de 24 bits, sobre los cuales los datos pueden ser leídos o escritos. Los registros son independientes uno de otro. Cuando se realiza la rutina de calibración del registro gain, el valor obtenido es usado para escalar la palabra de salida. Dicho valor es multiplicado a la palabra de salida.
- ✓ **Registro de Prueba:** este registro contiene 24 bits, sobre los cuales se puede escribir o leer. Se le advierte al usuario no cambiar es estado de este registro.

Para lograr el funcionamiento deseado del AD7730 es necesario configurarlo, lo cual se puede hacer desde un microcontrolador. De igual forma, para utilizar los datos generados por el AFE, es necesario leer los registros indicados. El AD7730 tiene los elementos necesarios para establecer comunicación con un microcontrolador mediante el protocolo SPI.

2.3.1.12 Algoritmos de escritura y lectura de los registros

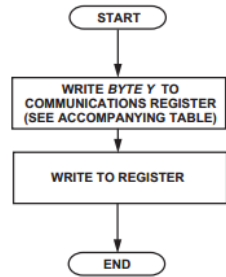
Para leer y escribir en los registros del AD7730 se hace uso de los algoritmos que se muestran en las figuras 2.13 y 2.14.



Register	Byte W (Hex)	Byte Y (Hex)	Byte Z (Hex)
Status Register	10	20	30
Data Register	11	21	30
Mode Register	12	22	30
Filter Register	13	N/A*	N/A*
DAC Register	14	N/A*	N/A*
Offset Register	15	N/A*	N/A*
Gain Register	16	N/A*	N/A*
Test Register	17	N/A*	N/A*

*N/A= Not Applicable. Continuous reads of these registers does not make sense as the register contents would remain the same since they are only changed by a write operation.

Figura 2. 13: Algoritmo para leer los registros del AD7730. Tomado de: http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD7730_7730L.pdf



Register	Byte Y (Hex)
Communications Register	00
Data Register	Read Only Register
Mode Register	02
Filter Register	03
DAC Register	04
Offset Register	05
Gain Register	06
Test Register	User is advised not to change contents of Test Register.

Figura 2. 14: Algoritmo para escribir en los registros del AD7730. Tomado de: http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD7730_7730L.pdf

2.3.2 Lectura de los valores por default del AD7730

Antes de configurar cada registro del AD7730, se realizó la lectura de los valores que traen por default y se mostraron en un LCD para corroborar el buen funcionamiento de este. En la tabla 2.3 se muestran los valores por defecto del AD7730.

Tabla 2. 3: Registros por Default del AD7730

Registro	Valor por Default
Estado	0xCX
Dato	0x000000
Mode	0x01B0
Filter	0x200010
DAC	0x20
Offset	0x800000
Gain	0x59AEE7
Test	0x000000

Uno de los principales retos para escribir el código del programa fue entender completamente el funcionamiento del AD7730 y cómo acceder a cada uno de sus registros, la simulación facilita corroborar cada uno de estos valores, pero en la suite ISIS de Proteus no se cuenta con él modelo del AD7730. De igual forma se buscó un modelo en la web para poder descargarlo en la librería de ISIS de Proteus, pero no se encontró.

Como se planteó en el marco teórico, el microcontrolador debe poseer un módulo de comunicación serial usando el protocolo SPI para comunicarse con el AD7730. Se hará uso del compilador MikroC Pro for PIC, ya que cuenta con librerías que facilitan la configuración de este protocolo de comunicación. Una de las desventajas fue que al usar la librería que ofrece MikroC para el protocolo de comunicación SPI solo podemos leer o escribir un byte a la vez y algunos de los registros del AD7730 contiene hasta 24 bits como es el caso del Registro Ganancia y Offset. En el anexo D, se muestra el programa en MikroC Pro for PIC para la lectura de los valores por defecto de los registros del AD7730.

Para corroborar el buen funcionamiento del programa escrito para verificar valores por defecto del AD7730 se siguió el siguiente protocolo:

1. Listar cada registro del AD7730 con su respectivo valor por default.
2. Verificación de la alimentación de los diferentes componentes
3. Verificación de la conexión entre el microcontrolador y el LCD
4. Verificación de la alimentación de los diferentes componentes
5. Aplicación del procedimiento establecido en la tabla 2.3

2.3.3 Configuración de los Registros del AD7730

Una vez corroborados los valores por defecto del AD7730 se procedió a calibrar el sistema para obtener los valores de offset y ganancia y poder obtener la palabra digital de salida acorde a los parámetros establecidos.

Mediante la ecuación 1, determinamos que el convertidor analógico digital debe poseer al menos 20,000 combinaciones posibles, además mediante la ecuación 3 se determinó que el ruido rms debe ser cercano a 75 nV. Estos valores permitirán determinar la velocidad de salida del dato y la frecuencia de corte del filtro digital para remover el ruido de cuantización generado a la salida del modulador. En la tabla 2.4, se detallan estos valores para un voltaje de entrada con un rango de 0 – 10 mV.

Tabla 2. 4: Ruido de Salida vs rango de entrada y velocidad de actualización (CHP=1)
 Típico Ruido RMS de salida en nV. Tomada de:
http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD7730_7730L.pdf

Output Data Rate	-3 dB Frequency	SF Word	Settling Time Normal Mode	Settling Time Fast Mode	Input Range = ±80 mV	Input Range = ±40 mV	Input Range = ±20 mV	Input Range = ±10 mV
50 Hz	1.97 Hz	2048	460 ms	60 ms	115	75	55	40
100 Hz	3.95 Hz	1024	230 ms	30 ms	155	105	75	60
150 Hz	5.92 Hz	683	153 ms	20 ms	200	135	95	70
200 Hz*	7.9 Hz	512	115 ms	15 ms	225	145	100	80
400 Hz	15.8 Hz	256	57.5 ms	7.5 ms	335	225	160	110

*Power-On Default

- ✓ **El primer paso** es escribir al registro filtro el número de promedios que va a desempeñar el filtro paso bajo, activar la segunda etapa del filtro que corresponde al filtro FIR de 22 taps, habilitar el modo chop para disminuir errores por deriva. El número a escribir a este registro es el 800010 HEX.
- ✓ **Segundo paso** escribir al registro dac para remover voltaje de tara; en este caso el voltaje de tara a remover es cero por lo tanto se escribirá en el registro dac el valor 20 HEX
- ✓ **Tercer paso** escribir al registro modo y seleccionar los bits para realizar calibración cero del sistema, seleccionar entrada unipolar, el canal de entrada a usar, el ancho de la palabra digital y el voltaje de referencia. Se escribirá el número D180 HEX.
- ✓ **Cuarto paso** escribir al registro modo y seleccionar los bits para realizar calibración full del sistema, seleccionar entrada unipolar, el canal de entrada a usar, el ancho de la palabra digital y el voltaje de referencia. Se escribirá el número F180 HEX.

La calibración del sistema se realiza en dos pasos, el primero es denominado **zero calibración** y se realiza sin peso sobre la plataforma y el AD7730 genera el coeficiente de offset. Como segundo paso se realiza la **calibración total del sistema**, en el cual se coloca el peso máximo y se genera el coeficiente GAIN,

con estos valores el AD7730 establece su punto cero y su punto máximo. La calibración del sistema ayuda a remover error de offset y ganancia.

Para obtener el valor de salida de la conversión se lee el **registro de dato**. Primero se deben habilitar los bits del registro modo correspondiente a:

- ✓ Modo de conversión continua
- ✓ Voltaje de entrada unipolar
- ✓ Tamaño de palabra 16 bits
- ✓ Voltaje de referencia 5 Vdc
- ✓ Rango de voltaje de 0 a 10 mV
- ✓ Canal de entrada AIN1

Para obtener el valor de la conversión leemos el registro de dato, el cual es solo de lectura y el tamaño de la palabra de salida puede ser de 16 o 24 bits. Para este trabajo se configuró para 16 bit, ya que solo necesitamos 14.3 bits.

2.4 Microcontrolador

Para implementar el sistema de procesamiento y control apropiado se requiere que el microcontrolador cuente con los recursos listados en la tabla 2.5.

Tabla 2. 5: Requerimientos necesarios que debe poseer el controlador

Características	
Voltaje de Alimentación	5 VDC
Entradas digitales para teclado matricial	8
Entradas digitales para pedal y botón de start	2
Salidas digitales para LCD	6
Módulo MSSP_SPI	SPI
Módulo CCP_PWM	1

El controlador es uno de los componentes más importantes del sistema de pesado automático. Es el responsable de las siguientes funciones: adquisición e

interpretación de los datos enviados o leídos desde el AFE AD7730, aplicar las configuraciones realizadas por el usuario, mantener la interfaz de comunicación con el usuario (LCD), envía los comandos de control sobre la planta para lograr los objetivos deseados. Es por esto que se hace necesario escoger un microcontrolador que tenga un alto desempeño computacional, confiabilidad, basta memoria y todo esto a un precio asequible.

La familia de microcontroladores de MICROCHIP PIC18F2455/2550/4555/4550 cumple con dichos requerimientos. Se ha seleccionado el PIC18F4550 ya que cumple con el número de entradas y salidas necesarias (Chip de 40 pin con 5 puertos bidireccionales) para el sistema de pesado automático, posee suficiente memoria (32Kbytes) para implementar todo el software en un solo chip y por su bajo costo (típicamente \$4). Cabe destacar que este microcontrolador posee un módulo ADC con arquitectura de aproximaciones sucesivas con una resolución de 10 bits lo cual no es suficiente para garantizar la resolución deseada y la lectura estable en el LCD. En esta aplicación se necesitan 14.3 bit libres de ruido. En la tabla 2.6, se muestran otras características que posee el microcontrolador PIC18F4550 que lo hicieron el candidato idóneo para su uso en el sistema de pesado automático.

Tabla 2. 6: Características PIC18F4550

PIC18F4550	
Memoria de programa (Bytes)	32768
Memoria de programa (instrucciones)	16384
Memoria de datos (Bytes)	2048
EEPROM (Bytes)	256
Fuentes de interrupción	20
Puertos E/S	Puertos A, B, C, D, E
Timers	4
Módulos CCP	1
Módulo MSSP	1
Módulo USB	1
SPP	Si
Módulo ADC 10 bit	13 canales de entrada
Comparadores	2
Reinicios y retardos	POR, BOR, RESET Instruction, Stack Full, Stack Underflow (PWRT, OST), \overline{MCLR} , WDT

2.5 Driver de potencia

El sistema de pesado automático, para su funcionamiento efectivo, necesita regular periódicamente la energía entregada al vibrador electromagnético. En la figura 2.15, se muestra el diagrama en bloques de la etapa de potencia. A continuación, se explicará cómo contribuye cada bloque para lograr regular la cantidad de potencia al vibrador magnético.

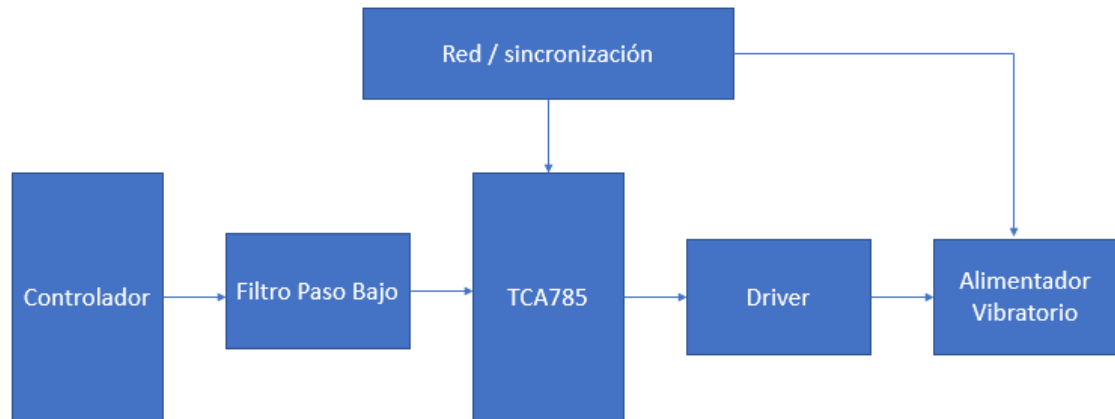


Figura 2. 15: Diagrama de bloques de la etapa de potencia (Captura de Pantalla)

Para lograr regular la cantidad de energía al vibrador magnético se usó el TCA785 en conjunto con un TRIAC. Este es un circuito integrado de control de fase desarrollado por Siemens y posterior al TCA 780 y TCA 780D. Debido a las características de las señales que es capaz de proporcionar, es ideal para controlar el disparo de los dispositivos de potencia como TRIAC, tiristores y transistores de potencia. Aunque su uso es muy variado y abarca un amplio número de aplicaciones dentro del mundo de la electrónica, sus características hacen de él un candidato inmejorable para formar parte del bloque de control y la parte de potencia, generando las señales requeridas en función de la señal de control en su pin de entrada. Este circuito integrado está orientado para controlar Tiristores, Triacs y transistores, además de tener adjunto un circuito cruce por cero. Los pulsos de disparo pueden ser cambiados de fase en un rango de 0° a 180° . Sus principales aplicaciones incluyen circuitos convertidores, controladores AC y controladores de corriente de tres fases.

El circuito integrado TCA785, contiene internamente las siguientes partes: detector de cruce por cero; integrador; comparador y circuito monoestable de salida como se muestra en la figura 2.16. Es importante indicar además que este circuito tiene dos salidas para controlar el ángulo de disparo en cada uno de los semi-ciclos de la señal alterna.

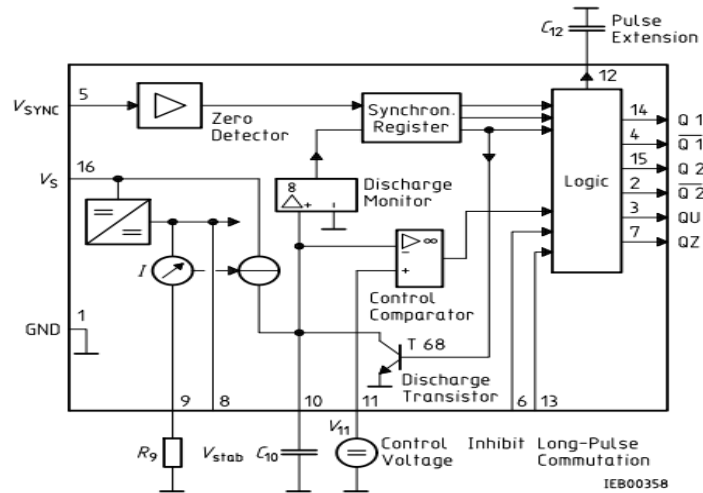


Figura 2. 16: Diagrama de Funcional del TCA785. Tomado de: <http://www.farnell.com/datasheets/1836360.pdf>

Como se explicó anteriormente, el TCA785 posee dos salidas que permiten controlar el ángulo de disparo de una señal alterna. Estas salidas se desplazan gracias a la rampa que es comparada con el voltaje de control que viene de la salida PWM generada por el microcontrolador que luego pasa por un filtro pasa bajo para eliminar las componentes de alta frecuencia y tener un voltaje constante. En la figura 2.17, se muestra el filtro pasa bajo seguido por un seguidor común para acoplar impedancias.

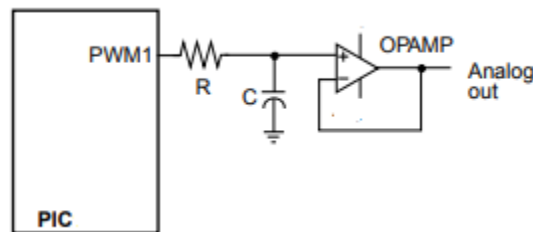


Figura 2. 17: Diagrama de conexión de Filtro RC paso bajo. Tomado de: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/AppNotes/00538c.pdf>

Estas dos salidas se encargan de desplazar el ángulo de disparo de la señal alterna por medio de un TRIAC, el cual está aislado del circuito de control por medio de un optoacoplador como se muestra en la figura 2.18.

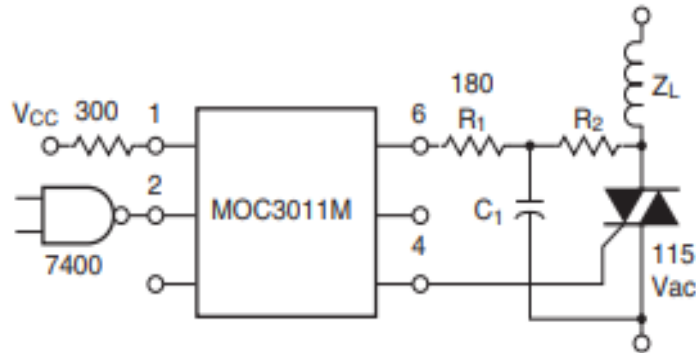


Figura 2. 18: Diagrama de conexión de MOC3020 más Triac. Tomado de: <https://www.fairchildsemi.com/application-notes/AN/AN-3003.pdf>

2.5.1 Simulación del circuito de potencia

La efectividad del circuito fue verificada mediante simulación para lo cual se utilizó la suite ISIS ROTEUS. En la figura 2.19 y 2.20, se muestra el esquema del circuito que se tomó como referencia proporcionado por la hoja de datos del fabricante. Cabe señalar que los TRIAC son sensibles a las sobretensiones, a las sobre corrientes y, en general, a cualquier forma de transitorios de alta/baja frecuencia, tanto en su magnitud como en su velocidad de variación. La aparición de sobretensiones en los bornes del TRIAC puede ocasionar, entre otras consecuencias, la puesta en conducción indeseada del mismo e incluso su destrucción. Para esto se utiliza una red de Snubber para amortiguar la oscilación transitoria vistas desde el TRIAC.

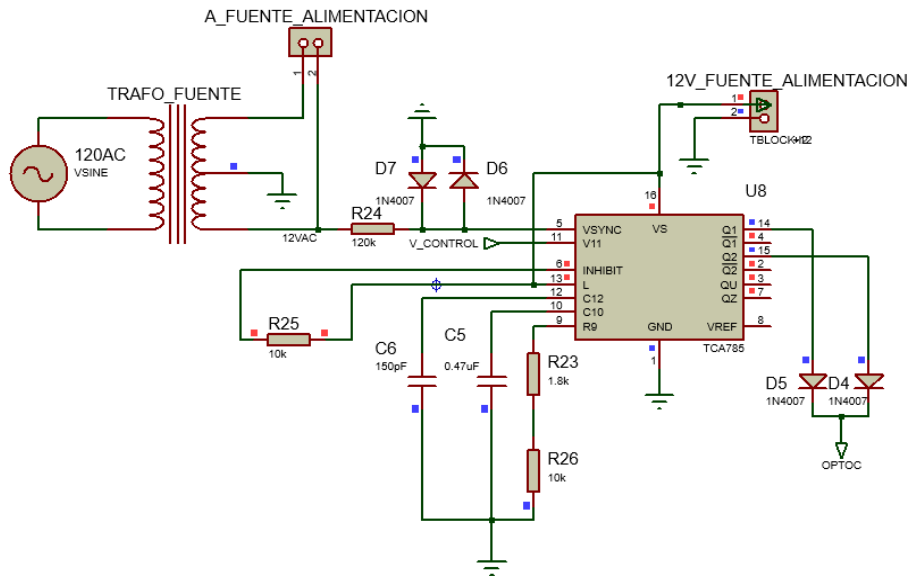


Figura 2. 19: Esquemático del circuito controlador de fase. (Captura de pantalla).

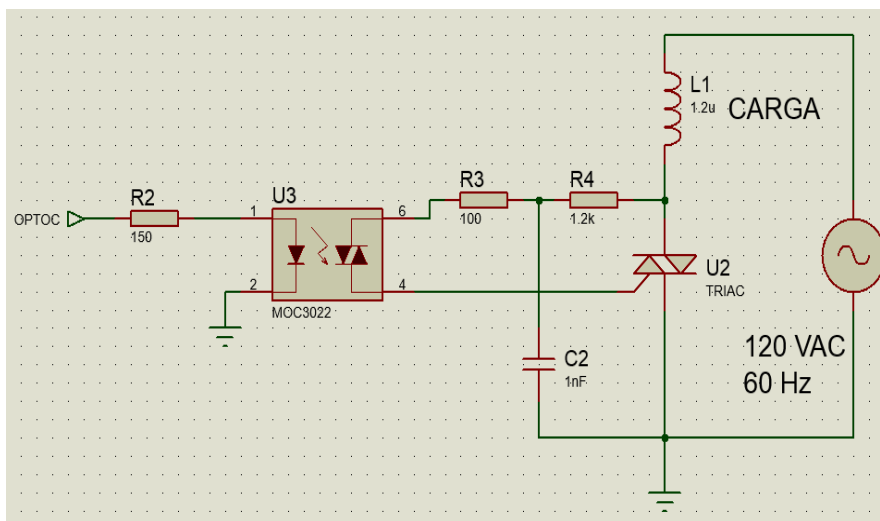


Figura 2. 20: Esquemático del circuito controlador de fase. (Captura de pantalla).

El controlador es implementado con el microcontrolador PIC18F4550 el cual tiene un módulo CCP y podemos obtener una salida PWM en el pin RC2, a una frecuencia de 5kHz para usar los 10 bit, ya que si disminuimos la frecuencia de la señal PWM aumenta la resolución y el 18f4550 nos permite una resolución de 10 bit. La señal PWM ingresa a un filtro pasa-bajos el cual tiene la función de convertir el voltaje de modulación por ancho de pulsos de alta frecuencia (5kHz) a un voltaje compatible para la operación del TCA-785. Siguiendo esta directriz, se

establecerá la frecuencia de corte del filtro pasa-bajos en 350Hz, ya que queremos recuperar la componente DC y eso implica eliminar las señales de alta frecuencia.

$$f_{PWM} = 5kHz$$

$$f_c \approx 350Hz$$

Conociendo la frecuencia de operación del filtro procederemos a calcular los valores de los componentes pasivos. Por conveniencia se usó un capacitor de 0.1μF.

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC} \quad \text{Ec. 8}$$

Sustituyendo los valores de f_c y C se procede a calcular R

$$R = \frac{1}{2\pi C f_c}$$

$$R = \frac{1}{2\pi(0.1 * 10^{-6})(300Hz)}$$

$$R = 4,547.28\Omega$$

Ya que no existe un valor comercial de 4.5 k-ohm, se incorporó una resistencia de 4.8 k-ohm en su lugar. A la salida del filtro paso bajo se conecta un buffer, implementado con un opamp, para acoplar impedancias y evitar caídas de voltaje a la entrada del pin 5 del TCA785 como se muestra en la figura 2.21.

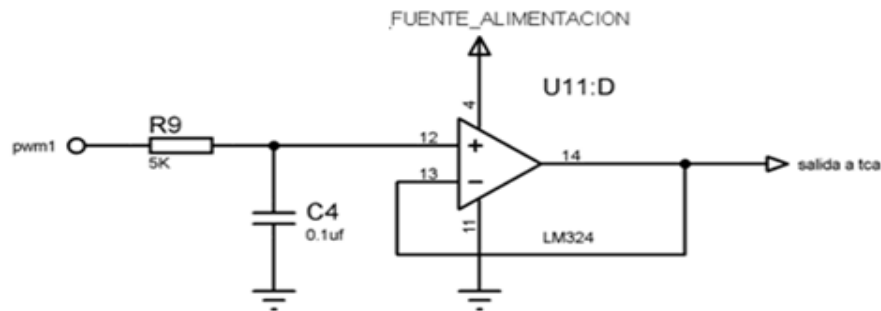


Figura 2. 21: Filtro pasivo pasa-bajos y buffer. (Captura de pantalla)

El voltaje de sincronización se obtiene desde el secundario de un transformador de 10V/1A conectado a un resistor de 10 k Ω . Un detector de cruce por cero evalúa el cero y lo transfiere al registro de sincronización.

En la figura 2.22, se muestran las gráficas obtenidas a partir del circuito de potencia, la señal tipo rampa generada por el TCA-785 (leyenda rosada), el pulso generado en la salida Q1(leyenda verde), pulso de salida generado por ambas salidas del TCA. Observe que debido a la utilización de dos diodos se eliminan la fase negativa de la señal y por último se aprecia el nivel de voltaje que le llega a la carga (leyenda amarilla). Con estas graficas podemos apreciar cómo se varía la energía que le llega a la carga, la cual irá disminuyendo cuanto más se acerque al peso configurado por el usuario.

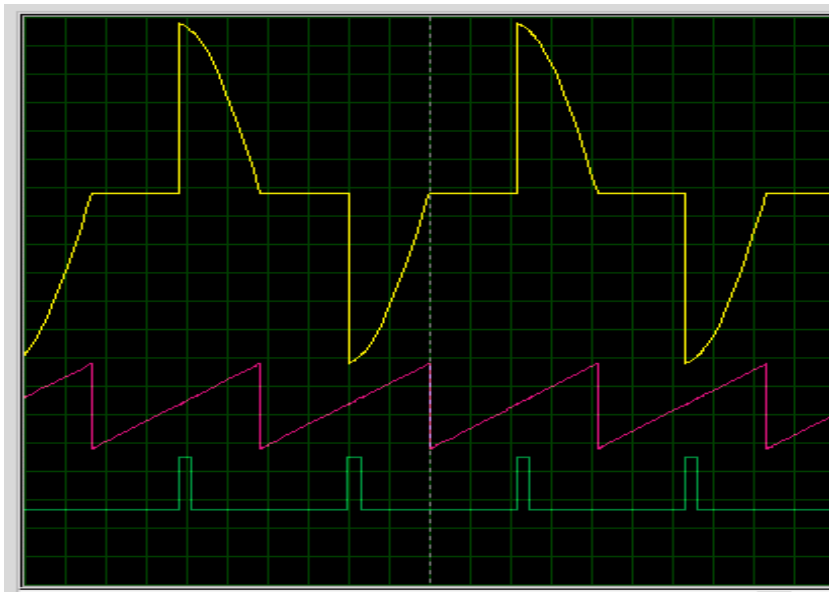


Figura 2. 22: Resultados simulación de TCA-785 y potencia. (Captura de pantalla)

2.6 Funcionamiento de la máquina de pesado automático

En la figura 2.23, se puede apreciar el diagrama de estado del sistema de pesado automático, en primer lugar, el microcontrolador PIC18F4550 ejecuta su programa y solicita al usuario ingresar su contraseña para poder entrar al menú principal, una vez que ingresó su contraseña correctamente, se prosigue al menú de configuración, en el cual el cliente podrá elegir entre calibrar el sistema o ir al menú de selección. Si elige calibrar el sistema, se procederá a realizar dicha acción y luego retorna al menú configurar. Si el usuario elige seleccionar, el sistema mostrará una pantalla donde el usuario podrá seleccionar el tipo de producto a pesar, luego de seleccionar el tipo de producto podrá seleccionar la cantidad de producto a pesar y pasará al menú para ingresar el número de bolsas a llenar. Una vez ingresado el número de bolsas a llenar, el cliente debe presionar el botón start para iniciar el proceso de llenado. Cuando se cumpla con el número de bolsas, el sistema regresa a la pantalla inicial. En el anexo F, se muestra el programa completo para la máquina de pesado automático.

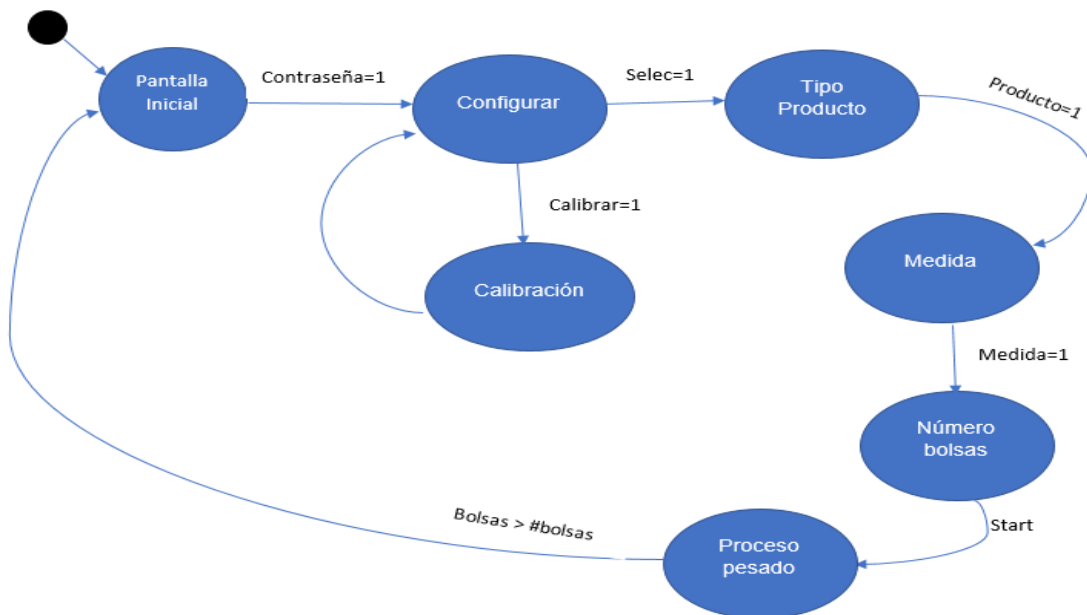


Figura 2. 23: Máquina de Estado Finito del Sistema de Pesado Automático. (Captura de pantalla)

2.7 Fuente de Alimentación

La alimentación de los diferentes subsistemas se logró mediante una fuente lineal que genera los voltajes requeridos: 5V, +12V y -12V, etc. En la figura 2.24, se muestra las diferentes etapas para el desarrollo de una fuente lineal. A continuación, se explicará cada una de estas etapas.

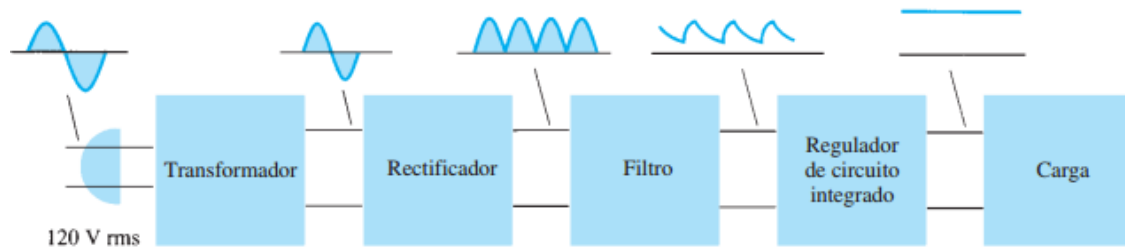


Figura 2. 24: Diagrama en Bloques de la Fuente DC. (Captura de pantalla)

El voltaje AC para la alimentación comercial nicaragüense es de 120V rms, se conecta a un transformador, el cual reduce el nivel de tensión a un valor más tratable. Un rectificador de diodos proporciona entonces un voltaje rectificado de onda completa, el cual en principio se pasa por un filtro de capacitor sencillo para producir un voltaje DC. Este voltaje DC resultante casi siempre presenta algún rizo o variación de voltaje de AC. Un circuito regulador puede utilizar esta entrada DC para proporcionar un voltaje DC que no solo tenga mucho menos voltaje de rizo, sino también que permanezca con el mismo valor DC aun cuando el voltaje DC de entrada varié un poco, o que la carga conectada al voltaje DC de salida cambie. Esta regulación de voltaje normalmente se obtiene con uno de varios circuitos integrados reguladores de voltaje de gran uso. En la Tabla x.y, se muestran las características de la fuente lineal para el sistema de pesado automático.

Tabla 2. 7: Requerimientos de la Fuente Lineal

Requerimientos	
Voltaje de Alimentación V_A	+5V
Voltaje de Alimentación V_B	+12V
Voltaje de Alimentación V_C	-12V
Corriente de Salida I_0	1A
Temperatura	< 80°C

Según los requerimientos, se han seleccionado los regulador 7805C, 7812 y 7912 para garantizar los voltajes requeridos el desarrollo de la fuente de alimentación.

Determinando los valores de componentes:

El voltaje de salida depende del voltaje de entrada y del número de espiras del primario y secundario, como la formula general lo plantea:

$$V_1 = V_2 \left(\frac{N_1}{N_2} \right) \rightarrow \frac{N_1}{N_2} = \frac{V_1}{V_2} \quad \text{Ec. 9}$$

Por el primario y el secundario circulan corrientes distintas. La relación depende también del número de espiras, pero en sentido contrario:

$$I_2 = I_1 \left(\frac{N_1}{N_2} \right) \quad \text{Ec. 10}$$

Esto nos sirve para conocer la corriente que deberá soportar el fusible que se conectó a la entrada del transformador. Por ejemplo, si se tiene un transformador de 24V y 3A, usando la ecuación 2.4 se tiene:

$$\frac{N_1}{N_2} = \frac{120}{24} = 5$$

$$I_2 = I_1 (5)$$

$$I_1 = \frac{3A}{5} = 0.6A$$

Para asegurar que el fusible no saltará cuando no debe, se tomará un valor mayor al calculado, al menos un 30% mayor.

Luego se pasa a la etapa de rectificación en la cual se utilizará un rectificador tipo puente.

$$V_{max} = 24V\sqrt{2} - 1.4V \quad \text{Ec. 11}$$

$$V_{max} = 32.54V$$

El factor sugerido de rizado es del 5%.

$$f_r = \frac{V_{rrms}}{V_{DC}} * 100 \quad \text{Ec. 11}$$

$$V_{rrms} = \frac{5}{100} * V_{DC}$$

$$V_{rrms} = 0.05 * 24V = 1.2V$$

Con esto se puede calcular el valor de capacitancia necesaria para garantizar que el rizado no supere el 5%.

$$V_{rms} = \frac{2.4I_{cd}}{C} \quad (\text{Ec. 2. 1})$$

$$C = \frac{2.4I_{DC}}{V_{rms}} = \frac{2.4 * 1500}{1.2}$$

$$C = 3000\mu F$$

Si se desea reducir aún más el rizado se puede aumentar el valor de C. Aunque este presenta un inconveniente y es que entre más grande sea C, mayor será la corriente demandada por conducto de los diodos de rectificación. (Boylestad, 2009). La fuente está protegida contra cortocircuitos, gracias a un fusible, el cual interrumpirá la línea viva en caso de que se dé un cortocircuito.

2.7.1 Simulación de la Fuente de Alimentación

Después de haber calculado los diferentes valores de voltaje y corriente. Se procede a comprobar el circuito en el simulador ISIS de PROTEUS, como se muestra en la figura 2.25.

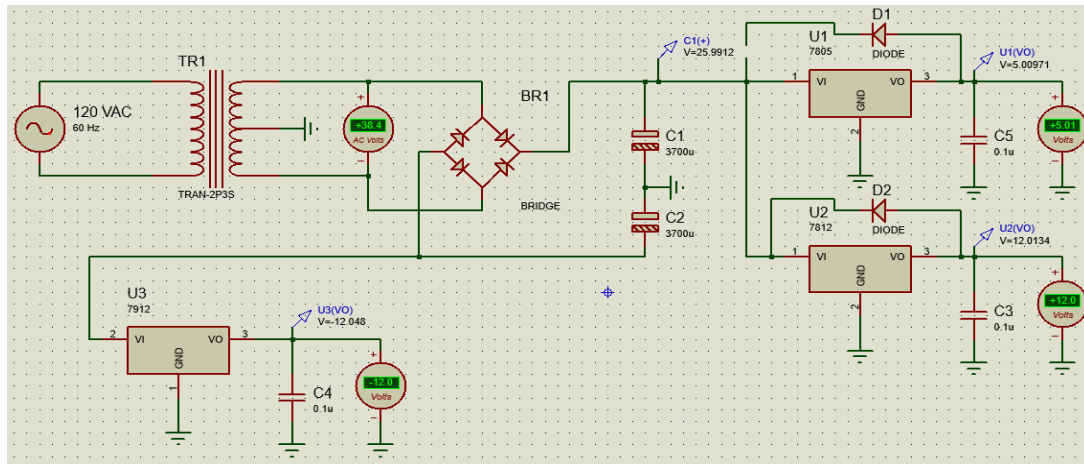


Figura 2. 25: Esquemático de la Fuente DC. (Captura de pantalla)

2.8 Diseño y construcción de los circuitos Impresos

Para el diseño de las PCB del sistema de pesado automático se utilizó el software Eagle. Este software cuenta en su librería con cada uno de los dispositivos electrónicos que conforman la máquina de pesado automático. Uno de los componentes fundamentales para la máquina de pesado es el AD7730, cuyo modelo esquemático se encuentra disponible en la librería de Eagle, en el caso de Ares de Proteus, no cuenta con el esquemático, al igual que en el software multisim.

Una ventaja de Eagle es que se pueden realizar librerías personalizadas a partir de los esquemáticos disponibles en la librería que trae por defecto, esto es de mucha ayuda, ya que en algunos casos los pads que traen los integrados en la librería por defecto, dan problemas al momento de perforar con broca, ya que es muy poco cobre alrededor del pad y la zona para taladrar es muy pequeña, es por

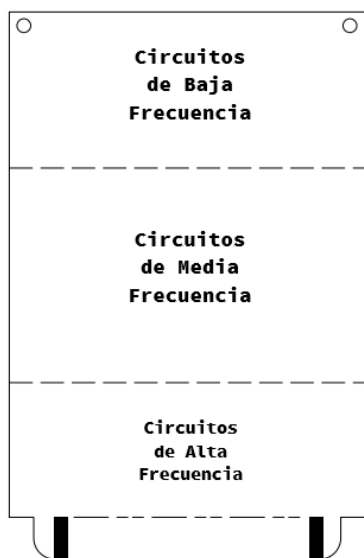
ello que se realizó una librería personalizada para evitar estos problemas al momento de realizar el perforación de la PCB y ensamble de componentes.

A lo largo del desarrollo de este prototipo de máquina de pesado automático se produjeron diversos problemas en la implementación de los circuitos electrónicos, por mencionar algunos: error en la lectura de la celda de carga, caídas repentinas de la comunicación SPI, reinicio del microcontrolador sin justificación aparente, entre otros.

Al realizar la búsqueda de fallas, se llegó a la conclusión que eran producidos por una mala distribución de la tierra en el circuito, así como una mala distribución de los componentes electrónicos, mezclando componentes eléctricamente muy ruidosos, con componentes sensibles al ruido eléctrico.

Para superar estos problemas en la implementación de los circuitos impresos se tomó en consideración la norma sobre el diseño estándar de circuitos impresos, IPC-2221A, así como algunas recomendaciones de diseño del especialista en diseño de PCB y control de EMI/CEM, el Dr. Bruce Archambeault.

En equipos complejos, se llega a clasificar las tierras por su funcionalidad como: tierra digital, tierra analógica, tierra de potencia, chasis, armario o caja metálica. Para el sistema de pesado automático desarrollaron dos circuitos impresos



diferentes, uno para los circuitos digitales y otro para los circuitos de potencia, esto para evitar que señales ruidosas contaminen la integridad de la señal de medición, por tanto, se ha dividido la tierra del sistema en tierra digital y tierra analógica, las cuales se unen en un único punto en la pista de alimentación, tal y como lo recomienda Archambeault (2008). Asimismo, internamente los componentes de cada pista han sido distribuidos según su velocidad de operación como lo indica la norma IPC-2221A (2003) en la figura 2.26.

Figura 2. 26 : Distribución de circuitos según norma IPC-2221A

Se sabe que para el diseñador electrónico la tierra es la referencia de voltaje del circuito o camino de retorno de las corrientes, una mala distribución de la tierra en la pista analógica o digital generará problemas al momento del retorno de las corrientes.

La publicación del año 2013 de la Revista Española de Electrónica, existente tres tipos de distribuciones de tierra:

- Tierra centralizada con conexión en serie: la conexión en serie es la más problemática desde el punto de vista de la CEM y para circuitos de alta frecuencia puede alcanzar valores de interferencia de hasta 300 mVpp, lo que puede ser perjudicial en la integridad de la señal de circuitos que operen en ese rango, tal y como es el caso del sensor implementado en este proyecto. Este tipo de conexión solo debe ser usado para circuitos de baja frecuencia y de bajos valores de corriente. El efecto más nocivo de CEM es el conocido como efecto de acoplamiento por impedancias comunes.
- Tierra centralizada con conexión en paralelo o estrella: elimina los problemas de acoplamiento por impedancia común en el circuito de masa. Las tensiones de los diferentes puntos de masa no se ven afectadas por los demás circuitos. Este tipo de conexión es el más deseado para bajas frecuencias, pero es algo engorroso de llevar a cabo, es aconsejable en equipos con muchos puntos de tierra por conectar, no es bueno para alta frecuencia y se recomienda encarecidamente que la longitud de las pistas no exceda $1/20$ de la longitud de onda de la señal.
- Tierra distribuida o multipunto: se usa a altas frecuencias para minimizar al máximo la impedancia de tierra, se usa un plano de tierra alrededor de los componentes electrónicos y en muy alta frecuencia se recomienda que la longitud entre la conexión del integrado y el plano de tierra sea menor de 2cm.

Debido a las características y frecuencia de operación del sistema de pesado automático se trabajó con un plano de tierra, o tierra distribuida.

Archambeault (2008) explica en su artículo que la corriente siempre va a seguir el camino de menor impedancia, a frecuencias bajas esto quiere decir el trayecto con menor resistencia, y a frecuencias altas quiere decir el trayecto de menor inductancia.

Usando la figura 2.27, Archambeault (2008) explica que a baja frecuencia el retorno de la corriente se realizará de manera directa a través del plano de tierra ya que es el que presenta menor resistencia. Pero en alta frecuencia, el camino de menor inductancia es el de la traza de cobre y el retorno de la señal será por debajo de esta traza. Confinando así a las señales digitales ruidosas de alta frecuencia a las trazas de cobre y separando el camino de retorno de las señales de baja frecuencia, típicamente analógicas, al plano de tierra.

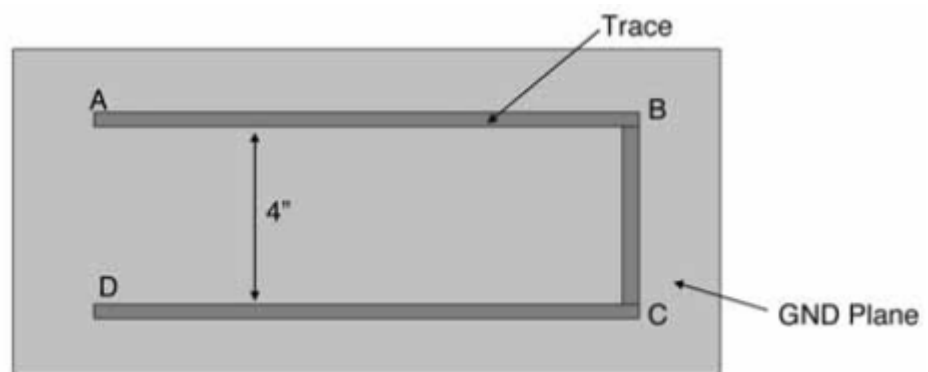


Figura 2.27: Geometría física para ejemplificar el retorno de señal según su frecuencia. Tomado de Archambeault (2008)

Archambeault (2008) recomienda el uso de tierra distribuida ya que la frecuencia donde la inductancia comienza a dominar por sobre la resistencia es muy baja, típicamente en los valores más bajos en el rango de los kHz.

En la figura 2.28, se muestra el tipo de diseño de tierra multipunto o plano de tierra como el más preferido, según la norma IPC-2221A (2003).

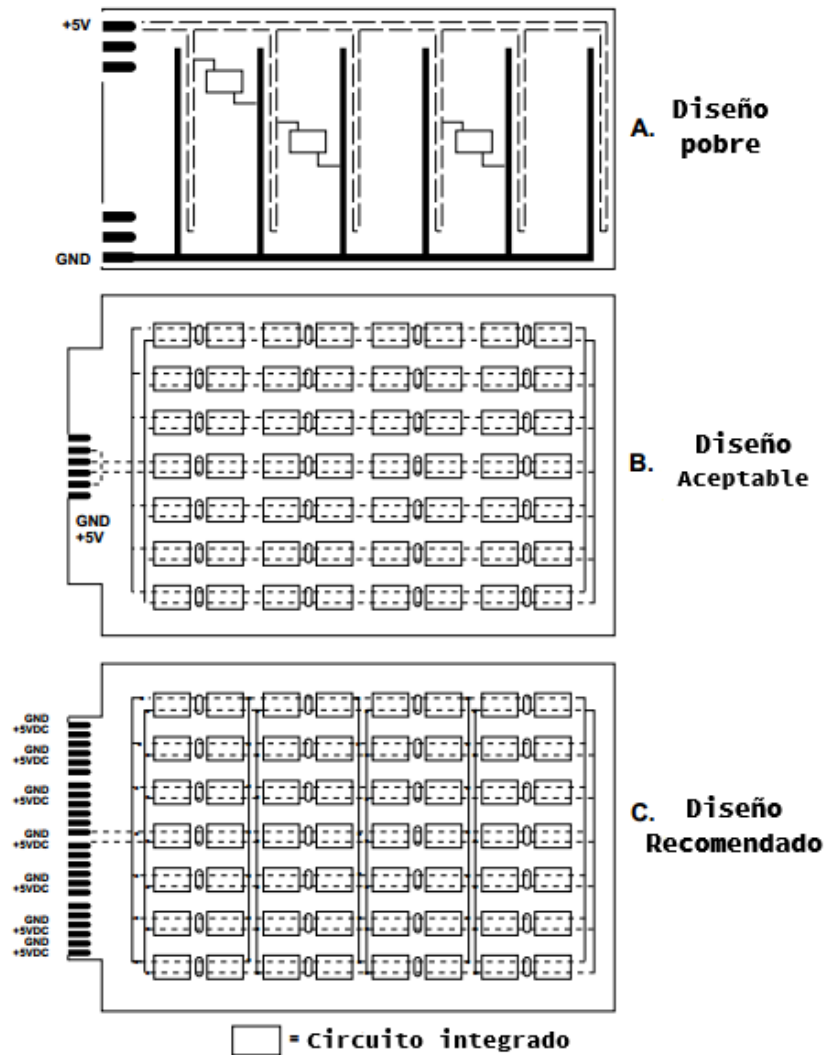


Figura 2. 28: Distribución de GND según IPC-2221A.

Tomado de IPC-2221A (2003).

Además de las consideraciones tomadas anteriormente, también se implementaron las siguientes recomendaciones presentes en la norma IPC-2221A (2003):

- Uso de capacitores de acople, colocados lo más próximo a la alimentación de los integrados.
- Implementación de los filtros recomendados en la hoja de datos de los sensores.

- Conexión de tierra física al chasis de la máquina de pesado automático para reducir interferencia electromagnética del exterior.

En las figuras 2.29, 2.30,2.3, 2.32, 2.33, 2.34, 2.35 y 2.36, se muestra el diseño terminado de las pistas del sistema de pesado automático con el software Eagle y en las figuras 2.37,2.38 y 2.39, se muestra el prototipo final de la máquina de pesado automático.

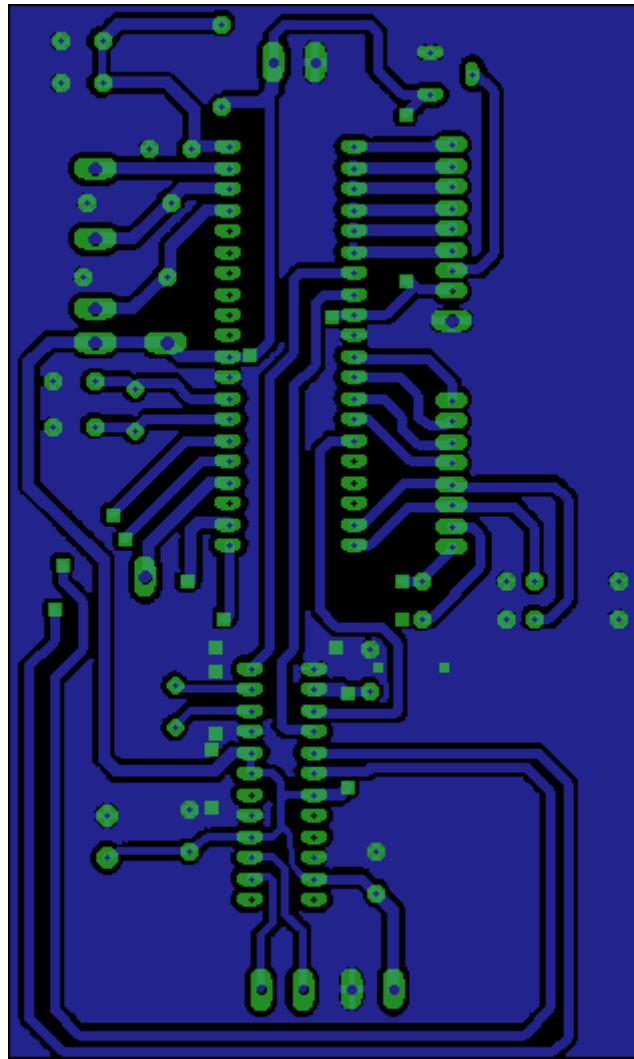


Figura 2. 29: Layout de Vías y Bottom de PCB de Control. (Captura de Pantalla)

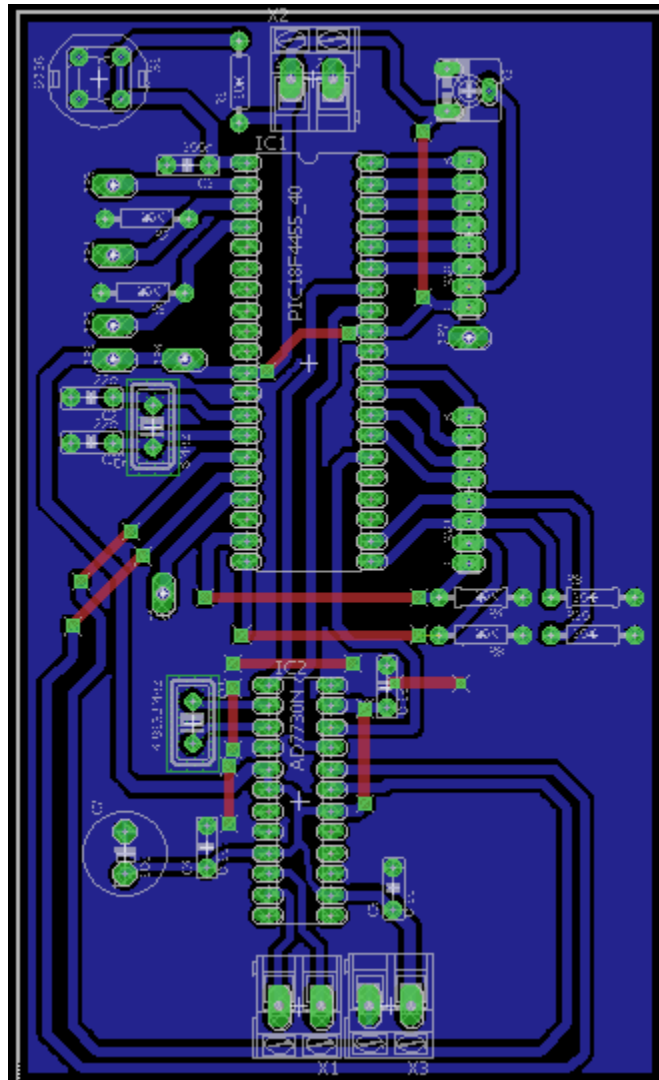


Figura 2. 30: Layout PCB de Control. (Captura de Pantalla)

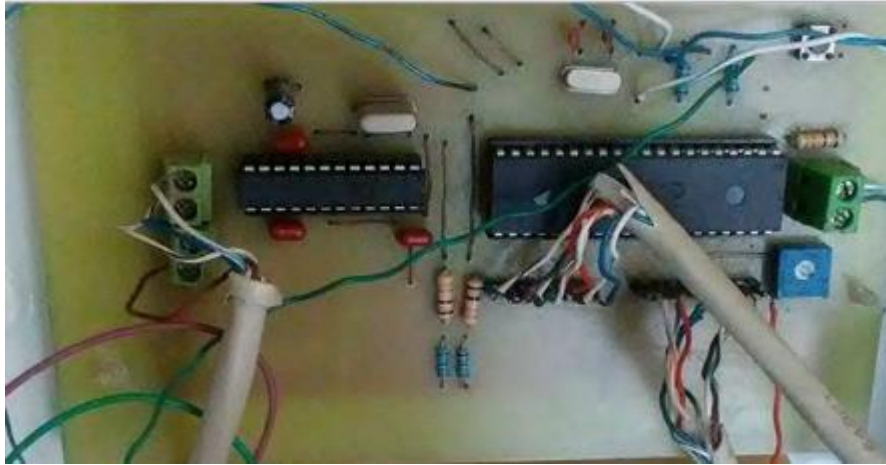


Figura 2. 31: Tarjeta de procesamiento y control

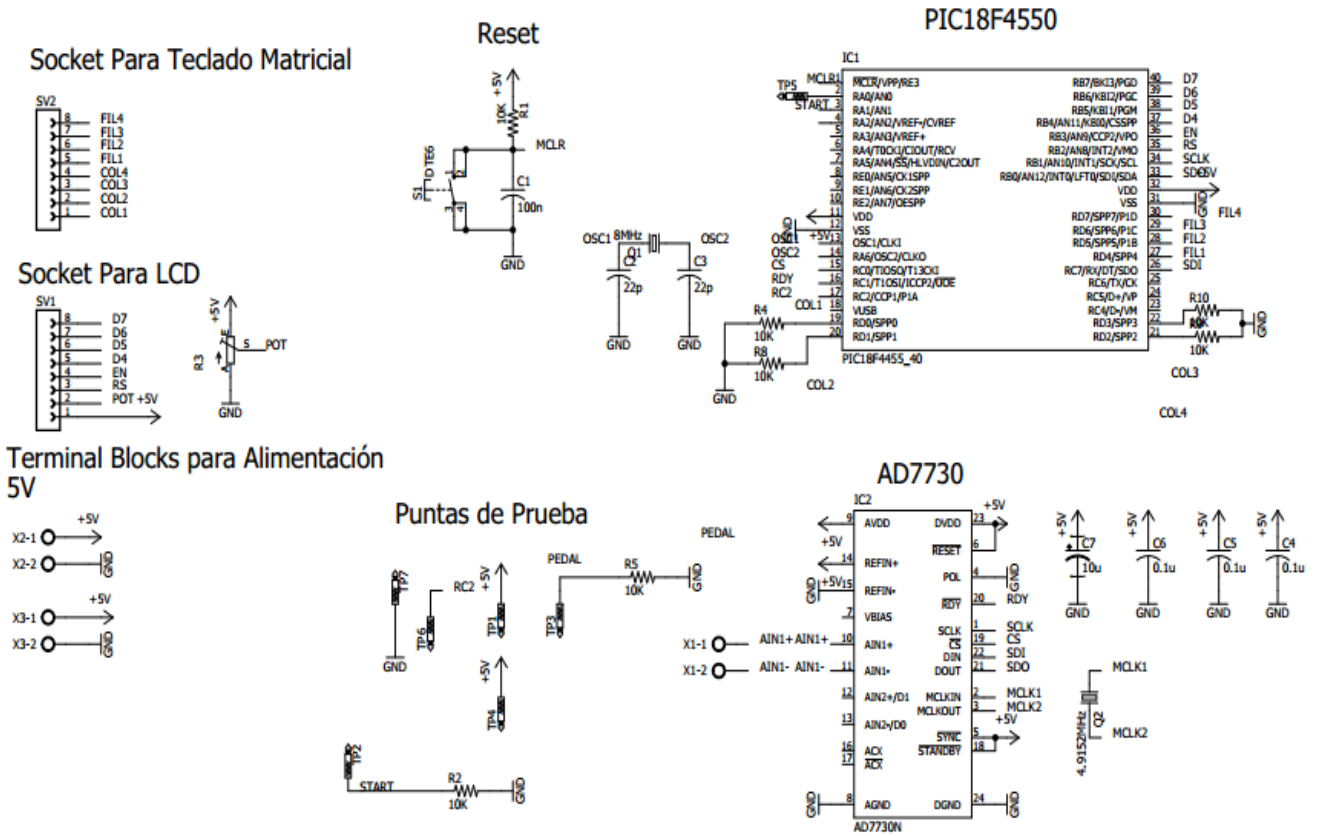


Figura 2. 32: Esquemático del Circuito de Control. (Captura de Pantalla)

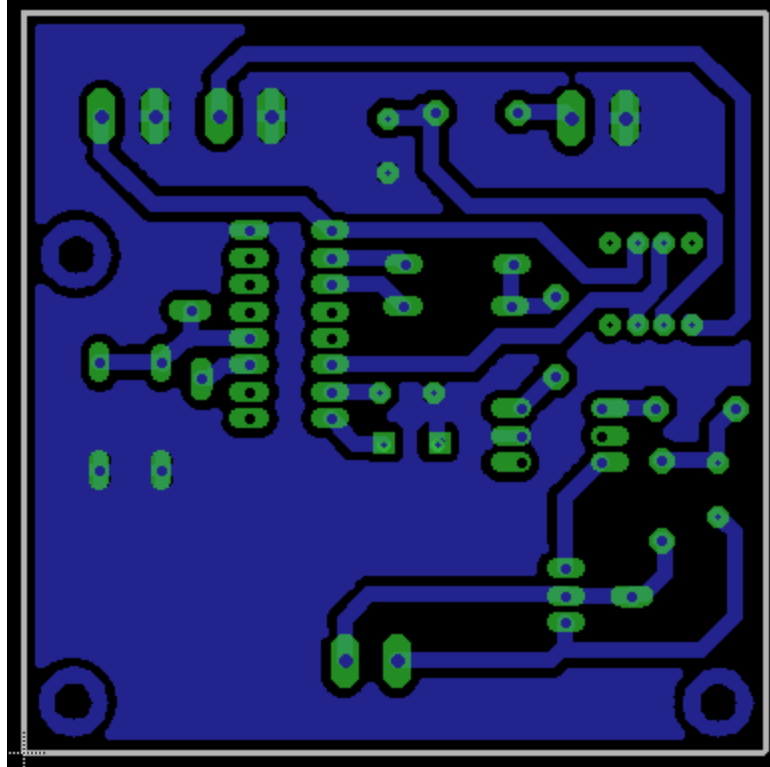


Figura 2. 33: Layout de vías y vista inferior del Circuito de Potencia. (Captura de Pantalla)

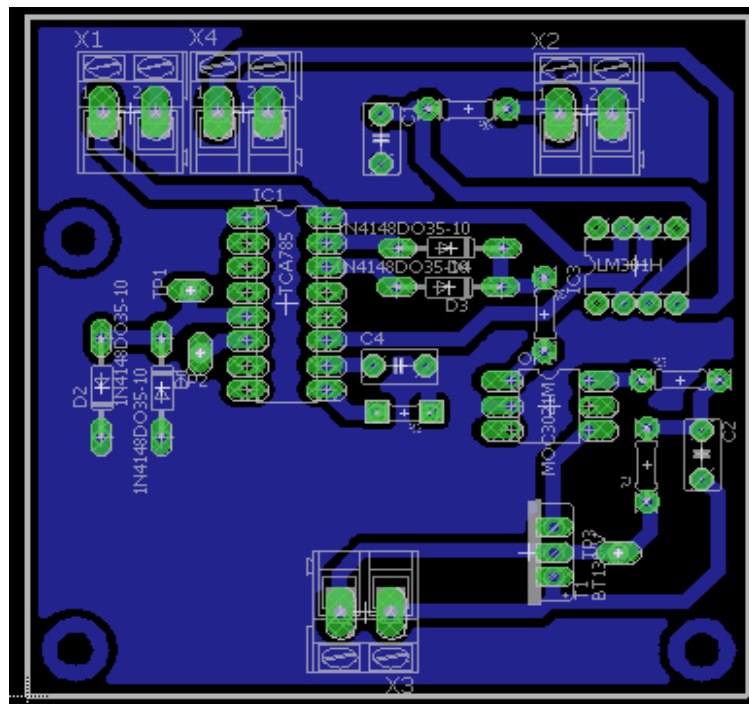


Figura 2. 34: Layout del Circuito de Potencia. (Captura de Pantalla)

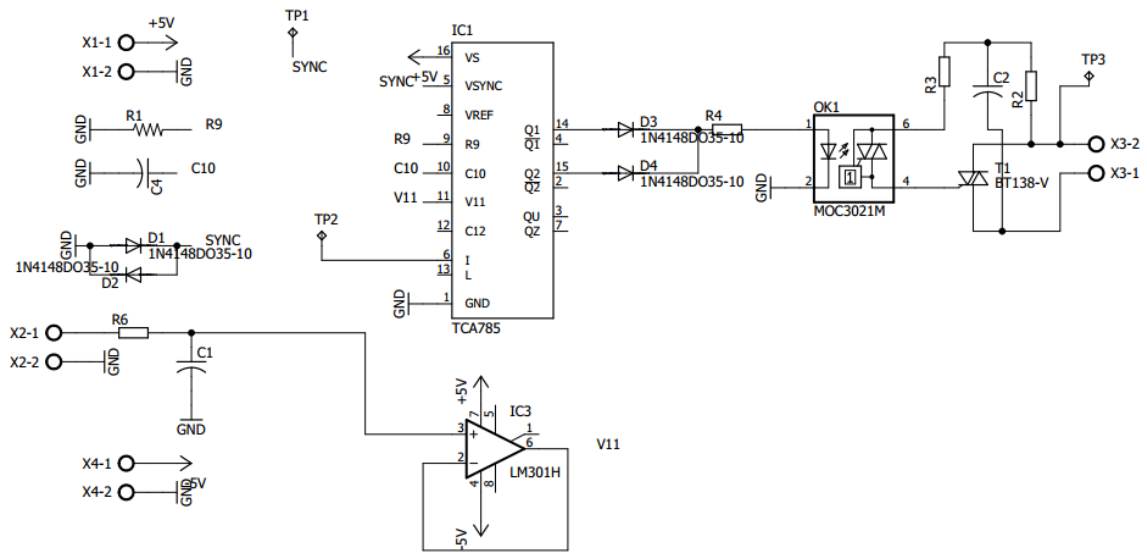


Figura 2. 35: Esquemático del Circuito de Potencia. (Captura de Pantalla)



Figura 2. 36: Tarjeta de Potencia ensamblada. (Captura de Pantalla)



Figura 2. 37. Panel de Control de la máquina de pesado automático



Figura 2. 39 : Estructura Metálica de la máquina de pesado automático. (Captura de Pantalla)



Figura 2. 38: Alimentador vibratorio ensamblado a la Máquina de pesado automático. (Captura de Pantalla)

2.9 Costo del prototipo de Máquina de pesado automático

Los componentes principales que se utilizaron para la implementación de este prototipo de máquina de pesado fueron importados, debido a que no se encuentran disponibles en el país. Por otra parte, los componentes básicos como resistores, capacitores y circuitos integrados comunes como reguladores de voltaje, fueron adquiridos en el mercado nacional. En la tabla 2.8 se muestra el costo de cada componente, en dólares y en córdobas en el caso de los componentes importados, y sólo en córdobas para los componentes que se compraron en Nicaragua. La tasa de cambio del dólar que se usó fue de treinta y un córdobas y veinticinco centavos (C\$ 31.25). Al hacer la conversión, empleando la tasa de cambio especificada, el equipo desarrollado tiene un costo de un mil quince dólares (\$ 1,015.00).

Tabla 2. 8: Costos de elaboración del prototipo de máquina de pesado automático.

Cantidad	Artículo	Precio Unitario [\$]	Precio Unitario [C\$]	Importe [C\$]
Compras en línea				
1	AD7730	\$23	C\$718.75	C\$718.75
1	Cristal de Cuarzo	\$1	C\$31.25	C\$31.25
Compras en el país				
1	Regulador de voltaje LM7805		C\$20.00	C\$20.00
1	Regulador de voltaje LM7812		C\$20.00	C\$20.00
1	Regulador de voltaje LM7912		C\$20.00	C\$20.00
1	Transformador tap central		C\$500.00	C\$500.00
1	Rectificador tipo puente		C\$60.00	C\$60.00
2	Capacitor electrolítico de 3300 uF		C\$30.00	C\$60.00
1	Cap. electrolítico de 0.33 uF		C\$10.00	C\$10.00
5	Capa. electrolítico de 0.1 uF		C\$10.00	C\$50.00
2	Cap. electrolítico de 10 uF		C\$10.00	C\$20.00
2	Cap. cerámico de 10 nF		C\$10.00	C\$20.00
10	Resistencias 1/4 W de diferentes valores		C\$3.00	C\$30.00
1	Push Button		C\$4.00	C\$4.00
1	Interruptor		C\$20.00	C\$20.00
1	Barrel Jack		C\$19.00	C\$19.00
1	Base de 40 pines		C\$30.00	C\$30.00
1	Base de 24 pines		C\$30.00	C\$30.00

1	Base de 8 pines		C\$20.00	C\$20.00
2	Base de 4 pines		C\$15.00	C\$30.00
1	LCD 4x20		C\$300.00	C\$300.00
4	Tarjeta de Fibra de Vidrio		C\$80.00	C\$320.00
4	Impresión para PCB		C\$30.00	C\$120.00
1	Paquete de 40 Pin Headers Hembra		C\$15.00	C\$15.00
1	Paquete de 40 Pin Headers Macho		C\$15.00	C\$15.00
1	PIC18F4550		C\$300.00	C\$300.00
1	Cristal de cuarzo 8 MHz		C\$100.00	C\$100.00
1	Celda de carga		C\$2,200.00	C\$2,200.00
1	Feeder		C\$6,000.00	C\$6,000.00
1	Tolva		C\$14,062.5	C\$14,062.5
1	Gabinete metálico		C\$3,000.00	C\$3,000.00
Mano de Obra				C\$3,593.25
TOTAL				C\$31,718.75

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

En base a los objetivos que fueron propuestos durante la fase inicial de este proyecto y los resultados obtenidos, se enuncian las siguientes conclusiones:

- ❖ Se diseñó e implementó el prototipo de una máquina de pesado automático clase XII según norma OILM R 51-1.
- ❖ El funcionamiento del sistema es satisfactorio, lo que se demostró cuando el usuario, al hacer uso de la interface para configurar el sistema, este no tuvo problema alguno.
- ❖ Cuando el usuario dio la orden de iniciar el proceso, el sistema desarrolló las configuraciones realizadas por el usuario.
- ❖ No se logró disminuir el error obtenido debido a ajustes en la salida del PWM.
- ❖ Con este prototipo se ha demostrado que es posible desarrollar una máquina comercial nacional con prestaciones similares a una máquina comercial traída de los Estados Unidos y a un precio al menos de la mitad, puesta en Nicaragua, y además con la ventaja de contar con el soporte técnico nacional.

Recomendaciones:

El sistema de pesado automático desarrollado cuenta con una gran capacidad de control, diversas funciones automáticas y de comunicación, pero es necesario implementar algunas mejoras y adquirir ciertos conocimientos con el objetivo de obtener un mayor rendimiento e incrementar las prestaciones del sistema. Es por tal razón que se hacen las siguientes recomendaciones dirigidas dos grupos de interés:

A las pymes que usen el sistema:

1. Leer previamente el manual de calibración y uso de la máquina de pesado automático.
2. Establecer la estructura que va fijada con la celda de carga para eliminar peso de tara en caso de aumentar las capacidades de pesado en dicha máquina.

A los estudiantes de Ingeniería Electrónica:

1. Implementar un sistema de alarmas que advierta al usuario sobre alguna falla en los actuadores, circuitería electrónica o estructura.
2. Desarrollar un sistema de medición de nivel de la tolva, con el fin de aumentar la autonomía del sistema de pesado automático.
3. Agregar al sistema de pesado automático un sistema de respaldo eléctrico que suministre la electricidad necesaria a la incubadora, en caso de que falle la alimentación comercial.
4. Desarrollar un sistema para conectarse a PC y el cliente pueda exportar histórico en Excel y contar con respaldo de información del proceso.

BIBLIOGRAFÍA

- Analog Device (2012). Bridge transducer ADC: AD7730. Recuperado de http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD7730_7730L.pdf.
- Bellini, B. (2009). Sensores de presión utilizados en las plataformas de fuerza aplicadas al estudio de la posturografía. Recuperado de <http://www.nib.fmed.edu.uy/Seminario%202009/Monografias%20seminario%20009/Bellini-Celdas%20de%20carga%20para%20plataforma.pdf>.
- Chopra, N., Kham, A., & Goyal, K. (n.d). SUVIDHA: Micro – Packaging Station.
- Dahikar, P. B., & Patle, K. S. (2013). Design of an embedded platform for digital weighing system to enhance measuring. International Journal of Innovative Research in Computer and communication Engineering. 1(8), 1-7. Recuperado de www.ijrcce.com/upload/2013/october/29Design.pdf.
- Forouzanmehr, E., Loghavi, M. (2012). Design, development and field evaluation of a map-based variable rate granular fertilizer application control system. CIGR Journal, 14(4), 255-261. Recuperado de <http://www.cigrjournal.org/index.php/Ejournal/article/view/1977/1691>.
- Gaikwad, K. D., & Dahikar, P. B. (2013). Design and development of novel weighing scale system. International Journal of Engineering Research & Technology. 2(5). 1-4. Recuperado de <file:///F:/Downloads/V2I5-IJERTV2IS50657.pdf>.
- Girón, P. (2010). Construcción y evaluación de una máquina dosificadora de micorrizas. Recuperado de <http://www.chapingo.mx/dima/contenido/tesis2010/tesisgiron.pdf>.
- García, E. M. (n.d). Diseño y construcción del sistema de dosificación. Recuperado de <http://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/1902/5/04%20Diseno%20construccion%20dosificadores.pdf>.
- Harb, A. M. (2013). Enhancing the performance of dynamic weighing system using kalman filter. Recuperado de <http://library.iugaza.edu.ps/thesis/112429.pdf>.
- Hand, J., Kester, W., Looney, M., & Reeder, R. (2005). Which adc architecture is right for your application?. Analog Dialogue: A forum for the exchange

of circuits, systems, and software for real-word signal processing. 39(2), 11-18. Recuperado de <http://www.analog.com/library/analogDialogue/cd/vol39n2.pdf#page=11>.

HBM (n.d). Recuperado de <http://www.hbm.com/es/menu/productos/celulas-de-carga/clases-de-precision-oiml-que-celula-de-carga-es-la-correcta-para-cada-aplicacion/>.

International Organization of Legal Metrology. (2010). Automatic catchweighing instruments (2006 ed.). Recuperado de https://www.oiml.org/en/files/pdf_r/r051-1-e06.pdf.

Kester, W. (2005). *The data conversion handbook*. Burlington, MA: Elsevier.

McGlinchey, D. (2008). *Bulk solids handling: equipment selection and operation*. Australia, Oxford.

Siemens. (n.d). Phase control IC: TCA785. Recuperado de <http://www.farnell.com/datasheets/1836360.pdf>.

Manescu, M., & Cristea, L. (2008). Intelligent vibrating dosing system using automation through microcontroller. Recuperado de <http://wseas.us/e-library/conferences/2008/rhodes/isgav/isgav22.pdf>.

ANEXOS

A- Procedimiento para el uso de la Máquina de pesado Automático

Protocolo para iniciar un ciclo de pesado automático exitoso:

1. Ubicar la máquina de pesado automático cerca de la alimentación comercial, en un lugar libre de humedad.
2. Golpear la tolva con un pequeño martillo, removiendo polvo o toda clase de suciedad. No usar ningún agente químico para evitar la contaminación del área de almacenamiento del producto.
3. Llenar la tolva con el producto.
4. Conectar la máquina de pesado automático a la alimentación comercial (120 VAC).
5. Activar el interruptor de encendido/apagado de la máquina de pesado automático como se observa en la figura A.1.
6. Ingresar contraseña mediante el teclado como se observa en la figura A.2.
7. Seleccionar calibración, si es por primera vez que trabajará la máquina de pesado automático.
8. Seleccionar el producto a pesar.
9. Seleccionar la medida a pesar
10. Ingresar el número de bolsas a llenar por medio del teclado.
11. Presionar el pulsador de iniciar pesado como se observa en la figura A.3.
12. Una vez se completa el número de bolsas configurado, el sistema nos enviará a la pantalla inicial de ingresar contraseña.



A. 1: Interruptor ON/OFF



A. 3: Pulsador para Iniciar Proceso de Pesado

B. Tablas

Tabla 1: Descripción de los bits del Registro Comunicación

Ubicación del Bit	Mnemotécnico	Descripción
CR7	WEN	Bit para habilitar escritura
CR6	ZERO	Un cero debe ser escrito en este bit para asegurar el correcto funcionamiento del AD7730
CR5, CR4	RW1, RW0	Bits para selección de lectura o escritura
CR3	ZERO	Un cero debe ser escrito en este bit para asegurar el correcto funcionamiento del AD7730
CR2 – CR0	RS2 – RS1	Bits para selección del registro a escribir o leer

Tabla 2: Descripción de los bits del Registro Estado

Ubicación del Bit	Mnemotécnico	Descripción
SR7	RDY	Bit Ready. Este bit proporciona el estado de RDY.
SR6	STDY	Bit steady. Este bit es actualizado cuando el filtro escribe un resultado al registro de datos.
SR5	STBY	Bit Standby. Este bit indica cuando el AD7730 está en modo standby o en modo normal.
SR4	NOREF	Este bit indica cuando no hay voltaje de referencia, además cuando el voltaje de referencia está por debajo de 0.3 V
SR3 - SR0	MS3 – MS0	Estos bits son de uso del fabricante.

Tabla 3: Descripción de los bits del Registro Modo

Ubicación del Bit	Mnemotécnico	Descripción
MR15 – MR13	MD2 – MD0	Bits de Modo. Estos tres bits determinan el modo de operación del AD7730. Los modos son independientes. <ul style="list-style-type: none"> - Sync Mode - Modo de conversión continua - Modo una sola conversión - Modo standby - Calibración Interna escala cero - Calibración interna escala completa - Calibración del sistema escala cero - Calibración del sistema escala completa
MR12	B/U	Bit unipolar/Bipolar. Con este bit seleccionamos el tipo de entrada con la que trabajará el AD7730.
MR11	DEN	Bit para habilitar salidas digitales. Este bit determina si las entradas del canal dos serán entradas analógicas o digitales.
MR10 – MR9	D1 – D0	Bit para salida digital. Si el canal dos es determinado como salida digital con estos bits se determinan salidas digitales
MR8	WL	Bit para determinar el ancho de la palabra digital de salida.
MR7	HIREF	Bit de referencia en alto. Con este bit se determina si el voltaje de referencia es 5 V o 2.5 V
MR6	ZERO	Un cero debe ser escrito en este bit para asegurar el buen funcionamiento del AD7730
MR5 – MR4	RN1 – RN0	Bits para el rango de entrada. Con estos bits se selecciona el rango de entrada analógico para el canal seleccionado
MR3	CLKDIS	Bit para deshabilitar el reloj Principal
MR2	BO	Bit para monitorear el consumo de corriente a la entrada
MR1 – MR0	CH1 – CH0	Bit para selección de canal. Con estos bits seleccionamos el canal de entrada analógico a ser convertido y calibrado.

Tabla 4: Descripción de los bits del Registro del Filtro

Ubicación del Bit	Mnemotécnico	Descripción
FR23 – FR12	SF11 – SF0	Bit para seleccionar el filtro SINC3. El AD7730 contiene dos filtros: un filtro SINC3 y un Filtro FIR de 22 taps. Con estos bits también determinamos la cantidad de promedio que desempeña el filtro SINC3.
FR11 – FR10	ZERO	Un cero debe ser escrito en estos bits para asegurar el buen funcionamiento del AD7730.
FR9	SKIP	Con este bit desactivamos la segunda etapa de filtrado del AD7730 que equivale al Filtro FIR.
FR8	FAST	Con estos bits se habilita el modo Rápido, el cual se usa cuando se tiene celdas de cargas alimentadas con corriente AC.
FR7 – FR6	ZERO	Un zero debe ser escrito en estos bits para el buen funcionamiento del AD7730.
FR5	AC	Bit para excitación AC
FR4	CHP	Bit para habilitar el modo CHOP.
FR3 – FR0	DL3 – DL0	Bits para seleccionar retardo. Estos bits se usan cuando se trabaja con AC

Tabla 5: Descripción de la asignación de pines del AD7730

PIN	Mnemotécnico	Descripción
1	SCLK	Reloj serial. Entrada lógica Schmitt trigger. Un reloj serial externo es aplicado a esta entrada para transferir el dato serial para o desde el AD7730. Este reloj serial puede ser un reloj continuo con todos los datos transmitidos en un tren de pulsos continuo.
2	MCLK IN	Señal de Reloj Maestro para el dispositivo. Este puede proveer en la forma de un cristal de cuarzo o un reloj externo. El AD7730 es especificado con una entrada de frecuencia del reloj de 4.9152 MHz.
3	MCLK OUT	Cuando el reloj maestro es un cristal de cuarzo es conectado entre MCLK IN y MCLK OUT.
4	POL	Reloj de polaridad. Este determina la polaridad del reloj serial.
5	SYNC	Entrada lógica que permite la sincronización del filtro digital y el modulador analógico cuando se tiene varios AD7730.
6	RESET	Entrada lógica. La entrada se activa en bajo y reset la lógica de control, filtro digital, modulador analógico y todos los registros del chip.
8	AGND	Punto de referencia a 0 V de la circuitería analógica.
9	AVDD	Fuente de voltaje analógica positiva.
10	AIN1 (+)	Canal 1 de entrada analógica. Entrada diferencial positiva
11	AIN1 (-)	Canal 1 de entrada analógica. Entrada diferencial negativa
14	REF IN (+)	Entrada de referencia. Terminal positiva del voltaje de referencia diferencial del AD7730
15	REF IN (-)	Entrada de referencia. Terminal negativa del voltaje de referencia diferencial del AD7730
18	STANDBY	Entrada lógica. Colocando a 0 V este pin apagamos la circuitería digital y analógica, reduciendo consumo de corriente hasta 5 μ A.
19	CS	Selección del chip. Con una activación de 0 V seleccionamos el AD7730.
20	RDY	Salida lógica. Usada como una salida de estado en modo conversión y modo calibración.
21	DOUT	Salida del dato serial
22	DIN	Entrada del dato serial
23	DVDD	Fuente de voltaje Digital positiva
24	DGND	Fuente de voltaje Digital negativa

Tabla 2. 9: Asignación de pines PIC18F4550

Asignación de pines PIC18F4550			
PIN	Nombre	Tipo de dato	Descripción
1	RE3	Entrada	Botón de Reset (Master Clear) de PIC
2	RA0	N/C	N/C
3	RA1	N/C	N/C
4	RA2	N/C	N/C
5	RA3	N/C	N/C
6	RA4	N/C	N/C
7	RA5	N/C	N/C
8	RE0	N/C	N/C
9	RE1	N/C	N/C
10	RE2	N/C	N/C
11	VDD	Entrada	VDD +5V Alimentación
12	VSS	Entrada	GND alimentación
13	OSC1	Entrada	Oscilador
14	RA6/OSC2	Entrada	Oscilador
15	RC0	N/C	N/C
16	RC1	N/C	N/C
17	RC2	Salida	PWM1 salida de control TCA
18	VUSB	Entrada	N/C
19	RD0	N/C	N/C
20	RD1	Entrada	Teclado Matricial
21	RD2	Entrada	Teclado Matricial
22	RC3	N/C	N/C
23	RC4	N/C	N/C
24	RC5	N/C	N/C
25	RC6	N/C	N/C
26	RC7	Entrada	SDO Comunicación SPI
27	RD4	Entrada	Teclado Matricial
28	RD5	Entrada	Teclado Matricial
29	RD6	Entrada	Teclado Matricial
30	RD7	Entrada	Teclado Matricial
31	VSS	Entrada	GND Alimentación
32	VDD	Entrada	VDD +5V Alimentación
33	RB0	Salida	SDI Comunicación SPI
34	RB1	Salida	SCK Comunicación SPI
35	RB2	Salida	LCD bit RS
36	RB3	Salida	LCD bit EN
37	RB4	Salida	LCD bit D4
38	RB5	Salida	LCD bit D5
39	RB6	Salida	LCD bit D6
40	RB7	Salida	LCD bit D7

C. Programa para leer valores por default del AD7730

```
/*  
* Nombre del proyecto:  
  Testing AD7730 V 1.0  
* Copyright:  
  (c) Lener Torres, 2014  
* Historial:  
  21082014: Inicio;  
* Description:  
  Este archivo es para verificar los registros de configuracion del PIC y  
  la recepción de un mensaje usando spi.  
* Test configuration:  
  MCU:      PIC18F4550  
  Oscillator:  HS 8.000 MHz  
  Módulos:   nones  
  SW:       mikroC PRO for PIC  
  
* NOTAS:  
  -  
*/  
/* =====*/  
#define STATUS 0x10  
#define DATA  0x11  
#define MODE   0x12  
#define FILTER 0x13  
#define DAC    0x14  
#define OFFSET 0x15  
#define GAIN   0x16
```

```

#define TEST 0x17

// Lcd module connections

sbit LCD_RS at LATD2_bit;

sbit LCD_EN at LATD3_bit;

sbit LCD_D4 at LATD4_bit;

sbit LCD_D5 at LATD5_bit;

sbit LCD_D6 at LATD6_bit;

sbit LCD_D7 at LATD7_bit;

sbit LCD_RS_Direction at TRISD2_bit;

sbit LCD_EN_Direction at TRISD3_bit;

sbit LCD_D4_Direction at TRISD4_bit;

sbit LCD_D5_Direction at TRISD5_bit;

sbit LCD_D6_Direction at TRISD6_bit;

sbit LCD_D7_Direction at TRISD7_bit;

// End Lcd module connections

//Variables

unsigned short estado,dac,i;

char
txtstatus[8],txtdac[8],txtmode[16],txtfiltro[24],txtdato[24],txtofset[24],txtgain[24],txttest[24];

unsigned int mode;

unsigned long filtro,dato,ofset,gain,test;

//Function

void Debug_register(void) //Visualizar registros del PIC
{
    unsigned int Registro;

    char txt[8];

    Lcd_Cmd(_LCD_CLEAR); // Clear display

```

```
Lcd_Cmd(_LCD_CURSOR_OFF);    // Cursor off
Lcd_Out(1, 3, "INTCON");
Registro = INTCON;
shorttostr(Registro,txt);
Lcd_Out(2, 1,txt);           // Display Intcon
Delay_ms (1000);
```

```
Lcd_Cmd(_LCD_CLEAR);        // Clear display
Lcd_Cmd(_LCD_CURSOR_OFF);    // Cursor off
Lcd_Out(1, 3, "ADCON0");
Registro = ADCON0;
shorttostr(Registro,txt);
Lcd_Out(2, 1,txt);           // Display Adcon0
Delay_ms (1000);
```

```
Lcd_Cmd(_LCD_CLEAR);        // Clear display
Lcd_Cmd(_LCD_CURSOR_OFF);    // Cursor off
Lcd_Out(1, 3, "ADCON1");
Registro = ADCON1;
shorttostr(Registro,txt);
Lcd_Out(2, 1,txt);           // Display Adcon1
Delay_ms (1000);
```

```
Lcd_Cmd(_LCD_CLEAR);        // Clear display
Lcd_Cmd(_LCD_CURSOR_OFF);    // Cursor off
Lcd_Out(1, 3, "SSPCON1");
Registro = SSPCON1;
shorttostr(Registro,txt);
Lcd_Out(2, 1,txt);           // Display Sspcon1
```

```

Delay_ms (1000);

Lcd_Cmd(_LCD_CLEAR);      // Clear display
Lcd_Cmd(_LCD_CURSOR_OFF); // Cursor off
Lcd_Out(1, 3, "SSPSTAT");
Registro = SSPSTAT;
shorttostr(Registro,txt);
Lcd_Out(2, 1,txt);        // Display SSPSTAT
Delay_ms (1000);

Lcd_Cmd(_LCD_CLEAR);      // Clear display
Lcd_Cmd(_LCD_CURSOR_OFF); // Cursor off
Lcd_Out(1, 3, "SSPBUF");
Registro = SSPBUF;
shorttostr(Registro,txt);
Lcd_Out(2, 1,txt);        // Display SSPBUF
Delay_ms (1000);
}
/* =====*/
void Verificar_Status(void)
{
    spi1_Write(STATUS);
    estado=spi1_Read(SSPBUF);
    shorttostr(estado,txtstatus);
    Lcd_Out(1,1,"STATUS REGISTER");
    Lcd_Out(2,1,txtstatus);
    delay_ms(2000);
    Lcd_Cmd(_LCD_CLEAR);
}

```

```

void Verificar_DAC(void)
{
    spi1_Write(DAC);
    dac=spi1_Read(SSPBUF);
    shorttostr(dac,txtdac);
    Lcd_Out(1,1,"DAC REGISTER");
    Lcd_Out(2,1,txtdac);
    delay_ms(2000);
    Lcd_Cmd(_LCD_CLEAR);
}

```

```

void Verificar_MODE(void)
{
    mode=0;
    spi1_Write(MODE);
    mode=spi1_Read(SSPBUF);
    mode=mode<<8;
    mode=mode | spi1_Read(SSPBUF);
    inttostr(mode,txtmode);
    Lcd_Out(1,1,"MODE REGISTER");
    Lcd_Out(2,1,txtmode);
    delay_ms(2000);
    Lcd_Cmd(_LCD_CLEAR);
}

```

```

void Verificar_FILTER(void)
{

```



```

    filtro=0;
    spi1_Write(FILTER);
    filtro=spi1_Read(SSPBUF);
    filtro=filtro<<8;
    filtro=(filtro | spi1_Read(SSPBUF))<<8;
    filtro=filtro | spi1_Read(SSPBUF);
    longtostr(filtro,txtfiltro);
    Lcd_Out(1,1,"FILTER REGISTER");
    Lcd_Out(2,1,txtfiltro);
    delay_ms(2000);
    Lcd_Cmd(_LCD_CLEAR);
}

```

```

void Verificar_DATA(void)
{
    dato=0;
    spi1_Write(DATA);
    dato=spi1_Read(SSPBUF);
    dato=dato<<8;
    dato=(dato | spi1_Read(SSPBUF))<<8;
    dato=dato | spi1_Read(SSPBUF);
    longtostr(dato,txtdato);
    Lcd_Out(1,1,"DATA REGISTER");
    Lcd_Out(2,1,txtdato);
    delay_ms(2000);
    Lcd_Cmd(_LCD_CLEAR);
}

```

```

void Verificar_OFFSET(void)

```

```

{
  offset=0;
  spi1_Write(OFFSET);
  offset=spi1_Read(SSPBUF);
  offset=offset<<8;
  offset=(offset | spi1_Read(SSPBUF))<<8;
  offset=offset | spi1_Read(SSPBUF);
  longtostr(offset,txtoffset);
  Lcd_Out(1,1,"OFFSET REGISTER");
  Lcd_Out(2,1,txtoffset);
  delay_ms(2000);
  Lcd_Cmd(_LCD_CLEAR);
}

```

```

void Verificar_GAIN(void)

```

```

{
  gain=0;
  spi1_Write(GAIN);
  gain=spi1_Read(SSPBUF);
  gain=gain<<8;
  gain=(gain | spi1_Read(SSPBUF))<<8;
  gain=gain | spi1_Read(SSPBUF);
  longtostr(gain,txtgain);
  Lcd_Out(1,1,"GAIN REGISTER");
  Lcd_Out(2,1,txtgain);
  delay_ms(2000);
  Lcd_Cmd(_LCD_CLEAR);
}

```

```

void Verificar_TEST(void)
{
    test=0;
    spi1_Write(TEST);
    test=spi1_Read(SSPBUF);
    test=test<<8;
    test=(test | spi1_Read(SSPBUF))<<8;
    test=test | spi1_Read(SSPBUF);
    longtostr(test,txttest);
    Lcd_Out(1,1,"TEST REGISTER");
    Lcd_Out(2,1,txttest);
    delay_ms(2000);
    Lcd_Cmd(_LCD_CLEAR);
}

```

```

void main()
{
    PORTB.B1=0;           //CLEAR PIN RB1
    TRISB.B1=0;          //SCK MODE MASTER AS
    OUTPUT
    PORTB.B0=0;          //CLEAR PIN PIN RBO
    TRISB.B0=1;          //DIN PIN AS INPUT
    TRISC.B3=0;          //MODE MASTER
    PORTB.B7=0;          //CLEAR PIN RC7
    TRISC.B7=0;          //DOUT PIN AS OUTPUT
    ADCON1=0x0F;        // Todos las Entradas Set
    Digitales
    Lcd_Init();          // Initialize Lcd
    SPI1_Init_Advanced(_SPI_MASTER_OSC_DIV4, _SPI_DATA_SAMPLE_MIDDLE,
    _SPI_CLK_IDLE_LOW, _SPI_HIGH_2_LOW); // Initialize SPI MODULE

```

```
Lcd_Cmd(_LCD_CLEAR); // Clear display
Lcd_Cmd(_LCD_CURSOR_OFF); // Cursor off
Debug_register();
while(1)
{
    Verificar_Status();
    Verificar_DAC();
    Verificar_MODE();
    Verificar_FILTER();
    Verificar_DATA();
    Verificar_OFFSET();
    Verificar_GAIN();
    Verificar_TEST();
}
}
```