

Instituto Tecnológico de Costa Rica
Escuela de Ingeniería Electrónica



Computación Automotriz S.A
AutoCom

Optimización de sistemas de inyección de gasolina

**Informe de Proyecto de Graduación para optar por el título de Ingeniero en
Electrónica con el grado académico de Licenciatura**

Enrique Laurent Quirós

Cartago, Septiembre de 2007

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA
ESCUELA DE INGENIERIA ELECTRONICA
PROYECTO DE GRADUACIÓN
TRIBUNAL EVALUADOR

Proyecto de Graduación defendido ante el presente Tribunal Evaluador como requisito para optar por el título de Ingeniero en Electrónica con el grado académico de Licenciatura, del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

Miembros del Tribunal

Firma



Ing. Marvin Hernández Cisneros

Profesor lector

Firma



Ing. Sergio Morales Hernández

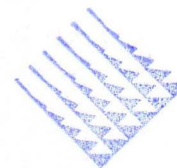
Profesor lector

Firma



Ing. William Marín Moreno

Profesor asesor



TEC

Instituto Tecnológico de Costa Rica
Escuela de Ingeniería Electrónica

Los miembros de este Tribunal dan fe de que el presente trabajo de graduación ha sido aprobado y cumple con las normas establecidas por la Escuela de Ingeniería Electrónica

Cartago, Septiembre 4 de 2007

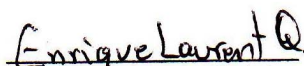
Declaración de autenticidad.

Declaro que el presente Proyecto de Graduación ha sido realizado enteramente por mi persona, utilizando y aplicando literatura referente al tema e introduciendo conocimientos propios.

En los casos en que he utilizado bibliografía, he procedido a indicar las fuentes mediante las respectivas citas bibliográficas.

En consecuencia, asumo la responsabilidad total por el trabajo de graduación realizado y por el contenido del correspondiente informe final.

Cartago, 4 de septiembre de 2007


Enrique Laurent Quirós
Céd: 1-1091-0317

Resumen

El proyecto se desarrolló en la empresa Computación Automotriz S.A también conocida como AutoCom, dedicada al afinamiento automotriz. Una de las áreas de servicio de la empresa es la optimización del sistema de inyección de gasolina, de donde surgió la necesidad del proyecto. El problema a solventar se basa en la puesta a punto del sistema de inyección de gasolina en vehículos que cuentan con computadoras que gobiernan el funcionamiento del sistema (ECU), pero estas computadoras no permiten el acceso a su programa haciendo imposible actualizarlo a las condiciones presentes del vehículo las cuales cambian debido al desgaste o modificaciones hechas sobre el mismo. Esta limitación reduce la efectividad del servicio brindado por AutoCom, ya que la puesta a punto de los vehículos con dicha restricción no puede lograrse a través de medios convencionales (a nivel de programación). AutoCom optó primeramente por implementar una solución analógica, pero esta presentó problemas en su calibración, además de hacer dependiente al usuario del servicio técnico de la empresa, limitando el mercado del producto. Por esta razón AutoCom aborda el problema desde una perspectiva digital implementando una interfaz para el usuario con un programa específico donde se puedan realizar las tareas de calibración del sistema. De esta manera se puede eliminar la interacción física con el dispositivo del sistema ampliando las fronteras mercantiles de AutoCom. Con este propósito, se enlaza el módulo al computador vía USB, debido a su auge. También, los criterios de diseño se orientaron en obtener un producto de relativo bajo costo y tamaño reducido para facilitar su instalación en el vehículo. Básicamente, el módulo reacciona a dos tipos de variación en las señales (frecuencia y tensión), de las que únicamente una determina su comportamiento. Además, presenta tres distintas señales de salida (PWM, frecuencia y ON-OFF) que cambian su comportamiento con base a la configuración del módulo hecha por el usuario. Adelante se especificarán los dispositivos, criterios de diseño, señales, medios de comunicación empleados e interfaz.

Palabras Clave: Comunicación USB; Microcontrolador; Sistema de inyección de gasolina; PWM; Convertidor Analógico-Digital; Unidad de control del motor (ECU); AutoCom; Generación de frecuencia; Filtros Pasivos; Regulación de tensión; Afinamiento; PIC18F2550; LM324; LM2903; L4947; Diodos; Diodo Zener.

Abstract

The project was developed in the company “Computación Automotriz S.A” also known as AutoCom that is dedicated to vehicular tuning. One of the service areas of this company is the Gasoline Injection System Optimization; here is where the necessity of the project appeared. The problem to fix is based from Gasoline Injection System Tuning in automobiles that have Engine Control Unit (ECU) to manage the operation of the system, but this ECU don't permit access to its software making impossible update the system to changing conditions in automobile that change because the erosion from use or modifications in it. This limitation reduces the affectivity of given service by AutoCom, because automobile tuning can't be done with this restriction by traditional means (software level). First of all, AutoCom chose to implement an analogical solution, but this solution had problems with its calibration, besides it make depending users of technical service given by the enterprise, limiting the market of this product. For this reason AutoCom tackles the problem from a digital perspective implementing an user interface with a specific software where users can do system calibration. In this way is possible eliminate the physical interaction with system hardware making wider the commercial frontiers of AutoCom. With this propose, the module is linked with the computer through a USB connection, because its rise in last years. Also, the design criteria were orientated to get a relatively cheap product with small size to make easier the installation in the automobile. Basically, the module reacts based on two kind of signals variations (frequency and voltage), but only one define its behavior. Besides, the module has three different kind of output signals (PWM, frequency and ON-OFF) that change their behavior depending of the user's configuration in the module. Forward, the details of devices, design criteria, signals, communication means used and interface.

Key Words: USB Communication; Microcontrollers; Gasoline Injection System; PWM; Analogical-Digital Converter; Engine Control Unit (ECU); AutoCom; Frequency Generation; Passive Filters; Voltage Regulation; Tuning; PIC18F2550; LM324; LM2903; Diodes; Zener Diodes.

Índice general

Resumen.....	3
Abstract.....	4
Capitulo 1: Introducción.....	11
1.1 Problema existente e importancia de su solución.....	11
1.2 Solución seleccionada.....	13
1.2.1 Requerimientos.....	13
1.2.2 ECU (Unidad de control):.....	15
1.2.3 Módulo para la puesta a punto:.....	16
1.2.4 PC:.....	16
1.2.5 Sistema de inyección de gasolina:.....	17
Capitulo 2: Meta y objetivos.....	18
2.1 Meta.....	18
2.2 Objetivo General.....	18
2.3 Objetivos Específicos.....	18
Capitulo 3: Marco Teórico.....	19
3.1 Motor de combustión interna de cuatro tiempos.....	19
3.2 Inyección de gasolina.....	20
3.3 Microcontroladores.....	22
3.4 Memoria no volátil.....	25
3.5 Comunicación serie.....	26
3.6 Regulación de tensión.....	29
3.7 Conversión análoga-digital.....	31
Capitulo 4: Procedimiento metodológico.....	34
4.1 Reconocimiento y definición del problema.....	34
4.2 Obtención y análisis de información.....	35
4.3 Evaluación de las alternativas y síntesis de una solución.....	36
4.4 Implementación de la solución.....	36
4.5 Reevaluación y rediseño.....	37
Capitulo 5: Descripción detallada de la solución.....	38
5.1 Análisis de soluciones y solución final.....	38
5.2 Descripción del dispositivo.....	41
5.2.1 Alimentación.....	42
5.2.2 Muestreo de señales.....	43
5.2.3 Lógica de control.....	46
5.2.4 Salidas del sistema.....	65
5.2.5 Conector USB.....	67
5.3 Descripción del programa.....	68
Capitulo 6: Análisis de resultados.....	72
6.1 Análisis.....	72
Capitulo 7: Conclusiones y recomendaciones.....	93
6.1 Conclusiones.....	93
6.2 Recomendaciones.....	94

Bibliografía y Referencias.....	95
Apéndices.....	97
Apéndice A.1 Glosario.....	97
Apéndice A.2 Información sobre la empresa.....	98
Apéndice A.3 Cálculos	98
Apéndice A.3.1 Cálculo de máxima resolución para la generación de frecuencia.....	98
Apéndice A.3.2 Cálculo de mínima frecuencia	98
Apéndice A.3.3 Cálculo de máximo periodo en la generación de frecuencia.....	99
Apéndice A.3.4 Cálculo de porcentajes de error.....	99
Apéndice A.3.6 Cálculo de la resolución porcentual del ciclo de trabajo para la señal de PWM.....	99
Apéndice A.3.7 Cálculo de la resolución para el convertidor analógico-digital.....	100
Apéndice A.3.8 Cálculo de la unidad temporal para la generación de frecuencia.....	100
Apéndice A.3.9 Cálculo de la frecuencia máxima con resolución de 1Hz.....	101
Apéndice A.3.10 Cálculo de valores teóricos máximos de frecuencia para cada modo de operación de la señal de PWM.....	102
Apéndice A.3.11 Cálculos para frecuencias de corte.....	103
Apéndice A.3.12 Análisis de armónicos para una señal cuadrada con valores oscilantes entre 0 y 5V.....	104
Apéndice A.4 Manual de Usuario.....	107
Apéndice A.5 Diagrama del circuito impreso.....	121

Índice de figuras

Curva característica de un termistor NTC.	12
Sistema simplificado de control de un automóvil con motor de inyección de gasolina.	13
Diagrama de la solución planteada.	15
Ciclo Otto de cuatro tiempos [2].	19
Un diagrama de un sistema de inyección de gasolina y encendido [5].	21
Conversión Análoga-Digital (4 bits) [18].	32
Diagrama esquemático del circuito para el módulo de afinamiento (Multisim).	41
Módulo de conversión analógica-digital del microcontrolador. Tomada de la sección 21 página 262 en la hoja de datos de microcontrolador [21].	45
Herramienta de desarrollo utilizada para depurar y programar el firmware en el microcontrolador [22].	47
Interconexión entre la herramienta de desarrollo y un dispositivo con capacidad ICSP™ [23].	47
Diagrama de flujo simplificado para el programa del microcontrolador.	48
Diagrama de flujo para la medición de frecuencia en el microcontrolador.	49
Diagrama de flujo para la generación de frecuencia en el microcontrolador.	51
Fragmento del firmware programado en el microcontrolador con PCH (Monitoreo).	53
Fragmento del firmware programado en el microcontrolador con PCH (Establecimiento de condición para seguimiento porcentual de tensión de entrada).	54
Fragmento del firmware programado en el microcontrolador con PCH (Seguimiento porcentual de tensión de entrada).	55
Fragmento del firmware programado en el microcontrolador con PCH (Estructura para acceder a las condiciones y datos respectivos).	56
Diagrama de bloques para el TIMER3 en el PIC18F2550 en modalidad 16-bit. (Tomado de la hoja de datos del microcontrolador [21] utilizado sección 14.1 pág. 138).	57
Fragmento del firmware programado en el microcontrolador con PCH (Configuración de los temporizadores 0 y 3).	57
Fragmento del firmware programado en el microcontrolador con PCH (Interrupción del temporizador 3).	57
Ejemplo de protocolo USB de solicitud de información del anfitrión al dispositivo. [26]	59
Ejemplo de protocolo USB de envío de información del anfitrión al dispositivo. [26]	59
Diagrama de estados USB en el dispositivo. [24]	60
Esquema del descriptor CDC para emulación Serie. (Basado en el documento de Microchip “Migración de aplicaciones USB a RS-232 con un mínimo impacto en el Programa de la PC” [25]).	62
Diagrama esquemático para la configuración de reloj en el microcontrolador (Tomado de las hojas de datos del microcontrolador [21], sección 2.2 pág. 24).	67
Diagrama de flujo para el establecimiento del enlace con el módulo.	68
Diagrama de flujo para la desconexión con el módulo.	69
Diagrama de flujo para envío de datos al módulo.	69
Diagrama de flujo para solicitar información al módulo.	69
Diagrama de flujo para recepción de datos del módulo.	69

Diagrama de flujo para almacenar datos en el computador.....	70
Diagrama de flujo para la carga de datos del computador a la interfaz.....	70
Diagrama de flujo para procesamiento periódico de datos en el programa.....	71
Salida de PWM (1) para la entrada de tensión (2) en el sistema para el caso menor que 1V en la tabla 4.....	74
Salida de frecuencia (1) para la entrada de tensión (2) en el sistema para el caso menor que 1V en la tabla 4.....	74
Salida de PWM (1) para la entrada de tensión (2) en el sistema para el caso mayor que 3.5V en la tabla 4.....	75
Salida de frecuencia (1) para la entrada de tensión (2) en el sistema para el caso mayor que 3.5V en la tabla 4.....	76
Salida de PWM (1) para la entrada de tensión (2) en el sistema para el caso Menor que 2V en la tabla 4.....	76
Salidas de PWM (1) y frecuencia (2) para tensiones de entrada entre 1V y 2V (caso Menor que 2V en la tabla 4).....	77
Señales de PWM (1) y frecuencia (2) para el estado por defecto del sistema.....	78
Señales de PWM (1) y tensión en la entrada (2) para el estado por defecto del sistema.....	78
Efecto de la medición del módulo sobre un sensor térmico (termo resistencia) cuando este esta conectado al microcontrolador (señal de 1 sensor (Ch2) y entrada al microcontrolador (Ch1)).	79
Efecto de la medición del módulo sobre un sensor térmico (termo resistencia) cuando este esta desconectado al microcontrolador (señal de 1 sensor (Ch2) y entrada al microcontrolador (Ch1)).	79
Salida de frecuencia (1) para la entrada de frecuencia (2) en el sistema para el caso Menor que 400Hz en la tabla 6.....	81
Salida de PWM (1) para la entrada de frecuencia (2) en el sistema para el caso Menor que 400Hz en la tabla 6.....	81
Entrada de tensión CD (1) en el instante de medición de la entrada de frecuencia (2) en el sistema para el caso Menor que 5KHz en la tabla 6.....	82
Salida de PWM (1) para la entrada de frecuencia (2) en el sistema para el caso Menor que 5KHz en la tabla 6.....	82
Salida de frecuencia (1) para la entrada de frecuencia (2) en el sistema para el caso Menor que 5KHz en la tabla 6.....	83
Señal senoidal a medir por el módulo a 1V/Div.....	83
Efecto de la medición del módulo sobre una señal senoidal (canal 1 señal senoidal a 1V/Div, canal 2 entrada al microcontrolador).....	84
Señal senoidal a medir por el módulo a 100mV/Div.....	84
Efecto de la medición del módulo sobre una señal senoidal (canal 1 señal senoidal a 1V/Div, canal 2 entrada al microcontrolador).....	85
Salida de frecuencia para un valor de 10000Hz introducido en el módulo.....	86
Salida de frecuencia para un valor de 9976Hz introducido en el módulo.....	86
Salida de frecuencia para un valor de 9925Hz introducido en el módulo.....	87
Salida de frecuencia para un valor de 1413Hz introducido en el módulo.....	87
Salida de frecuencia para un valor de 1412Hz introducido en el módulo.....	88
Salida de PWM con 25% de ciclo de trabajo y un periodo de 255 en modo x16.....	88

Salida de PWM con 25% de ciclo de trabajo y un periodo de 255 en modo x4.....	89
Salida de PWM con 25% de ciclo de trabajo y un periodo de 255 en modo x1.....	89
Salida de PWM con 25% de ciclo de trabajo y un periodo de 99 en modo x4.....	90
Salida de PWM con 25% de ciclo de trabajo y un periodo de 100 en modo x4.....	90
Señales de alimentación (1) y reset (2) del regulador L4947.	91
Ilustración de la manera empleada para generar frecuencia en el microcontrolador (Paint)..	101
Filtro pasivo paso bajo de primer orden (Multisim).	103
Forma de onda hasta el armónico 3 de la serie de Fourier para la señal cuadrada (Microsoft Office Excel).....	104
Forma de onda hasta el armónico 11 de la serie de Fourier para la señal cuadrada (Microsoft Office Excel).....	105
Forma de onda hasta el armónico 15 de la serie de Fourier para la señal cuadrada (Microsoft Office Excel).....	105
Cuadro de diálogo de Windows XP SP2 para la instalación de nuevo Dispositivo.	107
Cuadro de diálogo de instalación de nuevo dispositivo.....	108
Cuadro de diálogo para instalación del Driver del módulo.	109
Instalación del driver para el módulo de afinamiento.....	109
Finalización de la instalación del módulo de afinamiento.....	110
Diagrama de conexión del módulo de afinamiento y monitoreo.....	110
Ventana al iniciar el programa para configuración y monitorio del módulo.....	111
Efecto sobre el programa de cambiar el número de condiciones a establecer.....	112
Uso del botón de captura de valores monitoreados.	113
Opción para almacenar datos de la interfaz principal.....	114
Conexión con el módulo.....	114
Cuadro de diálogo para abrir puerto de comunicación.	115
Cuadro de diálogo par abrir puerto de comunicación (selección).	115
Mensaje de detección de incomunicación con el módulo.....	115
Muestra de datos cargados desde el módulo.....	116
Interfaz inicial del recuadro de velocidad.....	116
Introducción manual de datos para los factores de conversión (modelo de sensor y factor corrector).....	117
Cuadro de diálogo para el cálculo automático del factor de corrección (selección de velocidad).....	117
Cuadro de diálogo para el cálculo automático del factor de corrección (Aceleración).....	117
Resultado del cálculo de factor de frecuencia-velocidad.....	118
Guardando factores de conversión.....	118
Edición de factores de conversión.	119
Entrando a la configuración de la frecuencia del PWM.	119
Cuadro de diálogo para la configuración de la frecuencia del PWM.	120
Parte inferior del circuito impreso.	121
Parte superior del circuito impreso.	121
Distribución y etiquetas para los componentes del circuito impreso (Parte superior).....	122

Índice de tablas

Descripción para la numeración en la figura 5 [5].....	22
Tabla comparativa de ventajas y desventajas sobre las tentativas de solución anteriores.....	38
Formato de la trama de datos almacenada en la memoria no volátil.	64
Condiciones para el establecimiento de las salidas del sistema con base en las entradas para el caso del medición de tensión.	72
Rangos de operación para las condiciones de la tabla 4.	73
Condiciones para el establecimiento de las salidas del sistema con base en las entradas para el caso de la medición de frecuencia.	80
Rangos de operación para las condiciones de la tabla 6.	80
Costos de los materiales utilizados en la implementación del prototipo.	92

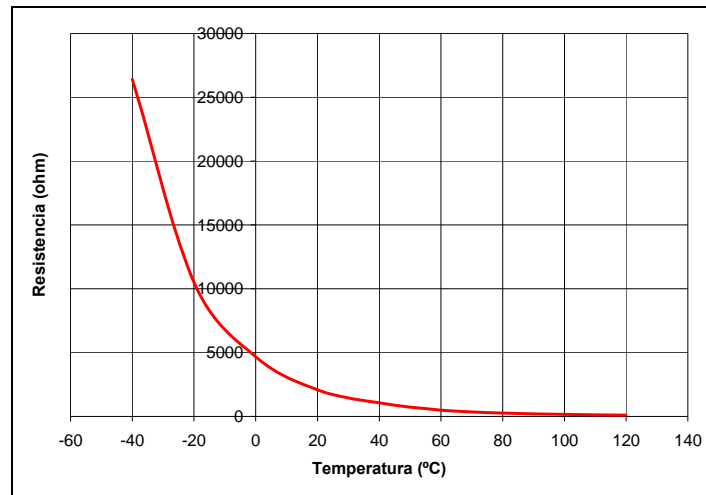
Capítulo 1: Introducción

A continuación se presenta el contexto en el cual yace el problema y porqué su solución representa un avance de interés para la empresa. Además, se hace referencia a los requerimientos, planteados por la entidad comercial en conjunto con un diagrama de flujo de dicha solución.

1.1 Problema existente e importancia de su solución

La computación y la electrónica cada día tienen un auge mayor en el mercado automovilístico. Por esta razón, el servicio de puesta a punto debe actualizarse a los requerimientos que las nuevas tecnologías traen. AutoCom ha respondido a esto, pero en su afán de brindar un servicio de óptima calidad se ha encontrado con limitaciones en los sistemas de control de vehículos como *Toyota Corolla*, *Nissan Sentra* y *Subaru Impreza*. Los sistemas de control de estos vehículos impiden el acceso a su programación haciendo imposible actualizar o modificar los parámetros para efectuar la puesta a punto de los automotores.

En primera instancia, AutoCom procedió a interceptar las señales de los sensores (sin interferir con la medición del sistema de control existente) con un sistema analógico el cual debe de calibrarse de forma manual utilizando potenciómetros. Aunque resulta funcional, comercialmente no es conveniente debido a que su calibración necesita de apoyo técnico presencial, puesto que es imprescindible entrar en contacto físico con el dispositivo instalado, restringiendo el mercado a los clientes cercanos a las instalaciones de AutoCom. Otro punto que dificulta la puesta a punto de los vehículos con un sistema analógico se da en los casos en que se utilizan sensores de temperatura diseñados para aplicaciones de esta índole (automotrices). Tales sensores presentan curvas características con comportamiento no lineal (ver figura 1), donde es especialmente difícil lograr una calibración adecuada, de manera manual, para ciertos rangos de comportamiento del sensor (lo que depende del sensor en cuestión). Esto se evidencia en la figura 1 en donde a partir de 60 °C el cambio en la resistencia se va reduciendo considerablemente respecto al cambio en la temperatura.

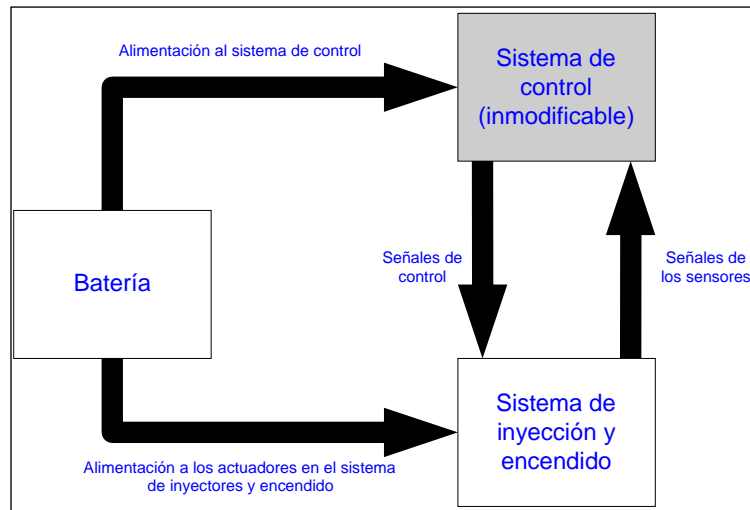


(Microsoft Office Excel)

Figura 1. Curva característica de un termistor NTC.

Entre los beneficios que se podrán obtener al solventar dicha situación están:

- Dar un servicio preciso y versátil de puesta a punto, a los vehículos en los cuales su sistema de control de inyección de gasolina no permite alteraciones.
- Obtener un producto adaptable para la puesta a punto o afinamiento del sistema de inyección de gasolina, en los vehículos en los cuales dicho sistema de control no permite hacer modificaciones en su programa.
- Alargar la vida útil de dichos vehículos optimizando los sistemas ya mencionados.
- Disminuir las emanaciones nocivas provocadas por una mala combustión, al no existir un afinamiento del control en el motor.
- La empresa podrá obtener una ventaja competitiva en el mercado de la computación automotriz.
- La empresa podrá expandir su mercado a clientes lejanos a su centro de servicio.



(Microsoft Office Visio)

Figura 2. Sistema simplificado de control de un automóvil con motor de inyección de gasolina.

En la figura 2, se representa de manera muy general la interacción entre los sistemas de mando, mecánico y energético. Es importante resaltar que existen fluctuaciones en la alimentación cuando el mecanismo del vehículo entra en funcionamiento, por lo tanto, es necesario crear una interfase adecuada entre cada bloque funcional.

1.2 Solución seleccionada

1.2.1 Requerimientos

Con el propósito de contar con criterios para desarrollar una solución y basándose en las experiencias previas en sistemas automovilísticos surgidas del quehacer en la empresa, se hace una lista con las especificaciones requeridas para el sistema a desarrollar.

- Debe contar con una fuente de alimentación eléctrica estable.
- Los códigos fuente y datos resultantes del desarrollo del proyecto serán confidenciales.
- Crear al menos dos módulos para la calibración de distintos procesos.
- Crear un prototipo funcionando correctamente en un circuito impreso.
- Precisión y exactitud en la toma de datos de los sensores a utilizar (hasta 10mV en la señal de tensión y hasta 10Khz en la señal de frecuencia).
- Deben existir al menos cuatro estados de control en respuesta a la medición en el sensor.

- Dos salidas con encendido y apagado (por módulo).
- Una salida con modulación de ancho de pulso.
- Una salida con generación de frecuencia controlada.
- Debe existir una interfaz con el usuario.
- El sistema debe contar con una memoria de almacenamiento no volátil de datos en tiempo de ejecución, para responder a las mediciones del sensor (al menos a cuatro estados de control).
- Implementar una comunicación serie (RS 232 o USB) con una PC.
- En el computador se implementará el programa para configuración y monitoreo del sistema.
- El programa del computador debe ser amigable con el usuario.
- La herramienta resultante debe contar con un precio competitivo y facilidad de instalación.

Debido a las limitaciones de la solución analógica (el apoyo técnico presencial y la limitación mercantil que esto representa) AutoCom busca una solución al problema de puesta a punto en las marcas de vehículos que no permiten la modificación del programa en la unidad de control, tal que el usuario puede actualizar los parámetros para la puesta a punto de su vehículo o realizar una calibración personalizada, sin que esto involucre entrar en contacto físico con el dispositivo del sistema. De esta manera la solución podrá convertirse en un producto que servirá al usuario como herramienta para la calibración de su automotor y a la empresa (AutoCom) como impulsor de la apertura de su mercado a clientes que no se encuentren en las inmediaciones de su centro de servicio. Dado el propósito de replantear la solución, esta se reformula en una versión digital, con la finalidad de poner a punto los vehículos mediante un programa, el cual se proporcionará al usuario para que puede cargar datos preexistentes (obtenidos por AutoCom en afinamientos anteriores) o realizar una calibración personalizada, pero en esta ocasión sin interactuar de manera directa con el dispositivo del sistema. Para cumplir con tales requerimientos es necesario contar con una interfaz amigable con el usuario, dispositivos para interpretar las señales de los sensores, procesar la información de estos, leer y escribir la información sobre la calibración; también se necesitan componentes para generar una fuente de alimentación estable del sistema y tomar muestras de las señales de los sensores

sin interferir con el sistema de control preexistente (como se hizo en la solución anterior); además de medios para almacenar la información de calibración en tiempo real y luego utilizarla sobre el vehículo de tal forma que se puedan efectuar las correcciones necesarias sobre el sistema de inyección de gasolina de acuerdo a la pre-calibración del mismo (almacenada con anterioridad). En la figura 3 se presenta un diagrama esquemático para la solución planteada. A continuación se describirá cada bloque funcional.

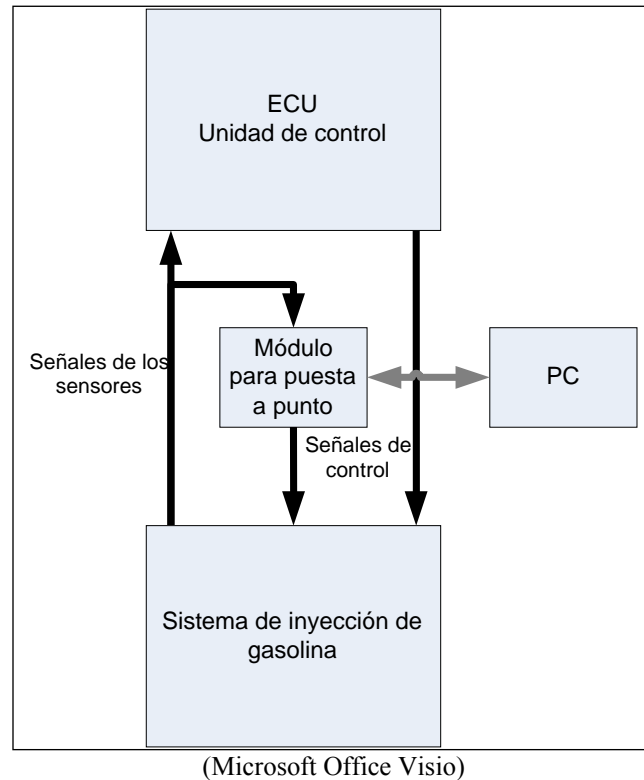


Figura 3. Diagrama de la solución planteada.

1.2.2 ECU (Unidad de control):

Corresponde al computador de control del motor. Esta recibe las señales de los sensores y actúa sobre los mecanismos relacionados con la operación del motor. En el caso específico del proyecto, el área que se interferirá es sólo aquella afín con el sistema de inyección. El problema yace precisamente aquí, pero solamente en las unidades de control que no permiten realizar modificaciones en su programa con el propósito de mejorar el rendimiento del motor.

1.2.3 Módulo para la puesta a punto:

Encargado de realizar las correcciones que no pueden hacerse a través de la unidad de control debido a las limitaciones ya mencionadas. Existen dos clases de módulos a implementar según los tipos de señales que recibirán. Un módulo interpretará una señal que corresponde a cambios de tensión entre 0 y 5V, mientras que el otro será capaz de interpretar variaciones de frecuencia entre 0 a 10KHz. Estos dos tipos de señales engloban una gama de sensores empleados en la electrónica del sistema de inyección de gasolina. Entre los sensores que presentan variación de tensión se encuentran:

- Medidor de flujo de aire
- Sensor de temperatura del refrigerante
- Sensor de temperatura del aire
- Sensor de temperatura del aceite del motor
- Sensor de temperatura del aceite de la caja de cambios

Algunos de los sensores que cambian la frecuencia de la señal medida son:

- Medidor de velocidad del vehículo
- Medidor de revoluciones del motor
- Otros modelos de medidores de flujo de aire

Además, este módulo debe interactuar con un computador de tal forma que pueda brindar información sobre el estado del sensor al usuario y este pueda establecer los datos de calibración necesarios para el funcionamiento requerido de dicho módulo, almacenándolos y posibilitando la interacción entre el dispositivo insertado y el sistema de inyección. De esta manera, la respuesta ante las señales recibidas que debe de presentar el sistema de inyección puede ser establecida mediante programación directamente por el usuario, a través de información de calibraciones anteriores suministrada por AutoCom (datos aún no existentes, los mismos serán recopilados con el avance en el uso de la herramienta) o configuraciones especiales establecidas por AutoCom según lo requiera el caso.

1.2.4 PC:

Debe contar con un programa amigable con el usuario para hacer posible el establecimiento y monitoreo de los datos en el módulo para el afinamiento del vehículo, además de una interfaz

con el módulo para establecer comunicación con él. Mediante el computador se determinan los puntos en donde el módulo de puesta a punto efectuará el ajuste sobre el sistema de inyección. De esta forma se pueden corregir situaciones precisas, dejando de lado los estados de funcionamiento en los cuales no es necesario realizar algún ajuste.

1.2.5 Sistema de inyección de gasolina:

Formado por la estructura mecánica, los sensores y actuadores que hacen posible el funcionamiento de dicho sistema.

Capítulo 2: Meta y objetivos

2.1 Meta

Ampliar el mercado de la empresa logrando poner a punto el sistema de inyección de gasolina de vehículos cuyos sistemas de control limitan el acceso a su programa de configuración.

2.2 Objetivo General

Obtener un producto versátil que pueda usarse como una herramienta de afinamiento (en el sistema de inyección de gasolina) en aquellos vehículos que tienen limitaciones en sus sistemas de control.

2.3 Objetivos Específicos

1. Obtener los dispositivos electrónicos programables que cumplan con los requerimientos técnicos y de costos establecidos.
2. Establecer un sistema de medición que no interfiera con las señales de los sistemas de control ya existentes.
3. Generar una señal controlada de modulación de ancho de pulso con base a los puntos de control de cada caso.
4. Generar una señal con frecuencia variable controlada de hasta 10KHz con base a los puntos de control de cada caso.
5. Generar una señal controlada de modulación de ancho de pulso con frecuencia variable hasta 10KHz con base a los puntos de control de cada caso.
6. Generar señales digitales para encendido y apagado de dispositivos con base a los puntos de control de cada caso.
7. Mantener un suministro de energía constante independiente de las fluctuaciones que puedan ocurrir por el funcionamiento normal del sistema vehicular.
8. Almacenar información en tiempo real en dispositivos de almacenamiento no volátil.
9. Establecer una comunicación en tiempo real módulo-ordenador.
10. Desarrollar la programación necesario para establecer una interfaz con el usuario de tal manera que se pueda configurar el sistema, monitorearlo y obtener datos de él.
11. Diseñar los prototipos de los módulos de control en circuito impreso.
12. Proporcionar la documentación necesaria para dar seguimiento al proyecto.

Capítulo 3: Marco Teórico

3.1 Motor de combustión interna de cuatro tiempos

Para contextualizar el proyecto en el marco del problema es necesario introducir al funcionamiento de un motor de gasolina.

El motor de gasolina o también conocido como de ciclo Otto¹ se base en la combustión de la mezcla de gasolina y aire. Se fundamenta en la ignición de chispa y puede constar de dos o cuatro tiempos en su operación.

El ciclo consta de las siguientes fases: Admisión, compresión, expansión y escape como se muestra en la figura 4 para el motor de cuatro tiempos. En el motor de dos tiempos este ciclo se realiza en dos movimientos del pistón.

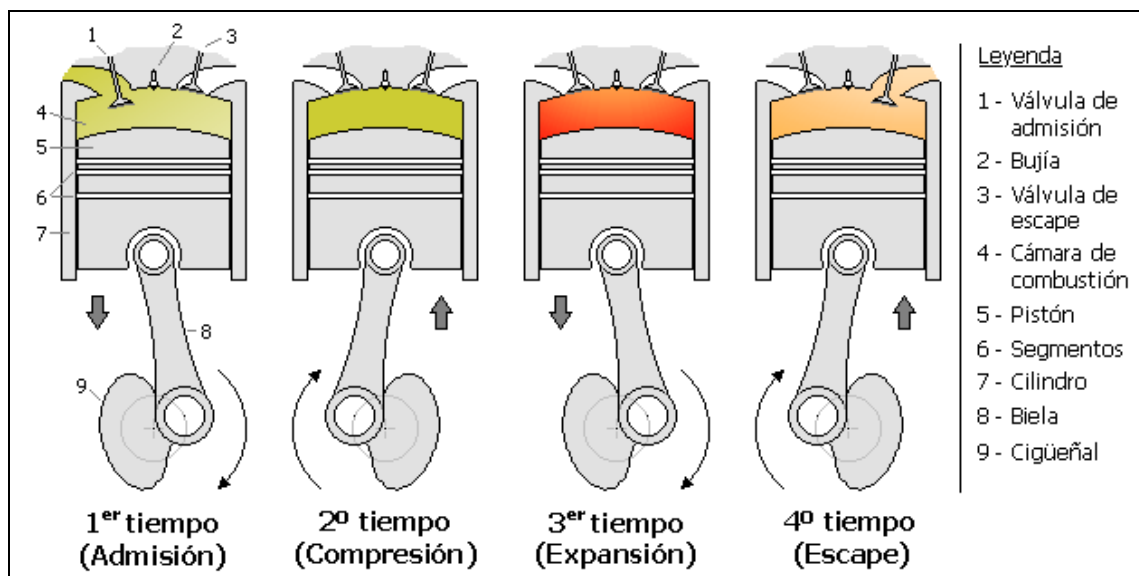


Figura 4. Ciclo Otto de cuatro tiempos [2].

En la etapa de *admisión* el pistón aspira la mezcla de aire combustible al cilindro, realizando un movimiento descendente hasta el PMI (Punto Muerto Inferior) con la válvula de admisión abierta, mientras que la válvula de escape esta cerrada. Durante la *compresión*, las válvulas permanecen cerradas y el pistón se desplaza hacia el PMS (Punto Muerto Superior) comprimiendo la mezcla de aire combustible. En la *expansión*, la bujía genera una chispa

¹ En memoria de Nicolás Augusto Otto quién en 1876 construyó el motor de combustión interna de cuatro tiempos. [1].

haciendo la combustión de la mezcla, con lo que la misma se expande rápidamente debido a un aumento acelerado de la temperatura, produciendo que el pistón se desplace de nuevo al PMI (es en la única fase donde se realiza trabajo). Luego de esto se produce el *escape* de los gases producidos por la combustión, gracias a la acción conjunta de la válvula de escape (ahora abierta) y el movimiento del pistón hacia el PMS quedando listo para comenzar un nuevo ciclo. Un aspecto importante para que el trabajo en el motor se realice, es la presión en los cilindros, que usualmente tienen relaciones de 1:8 o 1:10 (esto es que la mezcla se comprime 8 o 10 veces), pero se puede incrementar a 1:12 para mejorar la eficiencia utilizando combustibles con mayor octanaje. [2]

3.2 Inyección de gasolina

Para comprender parte de la importancia que tiene un sistema de inyección de gasolina es necesario comprender como se realiza la mezcla de aire/combustible.

Teóricamente la relación ideal entre aire y gasolina es de 14.7:1, lo que quiere decir que por 14.7Kg de aire se necesitan 1Kg de gasolina o dicho en otras palabras por 1 litro de gasolina se necesitan aproximadamente 10000 litros de aire. Esta relación es indispensable para lograr un consumo mínimo en los motores de combustión interna.

Para caracterizar la diferencia de la mezcla de aire/combustible real con el valor teórico (14.7:1) se utiliza la relación (4.1).

$$\lambda = \frac{\text{Volumen de aire aspirado}}{\text{Volumen de aire teóricamente necesario}} \quad (4.1)$$

Donde λ (lambda) se conoce como coeficiente de aire. Para valores de λ entre 0.85 y 0.95, se obtiene una mezcla rica en combustible y la máxima potencia del motor. Con valores de entre 1.1 y 1.2 para λ , se da un máximo en el consumo de combustible, para la etapa de ralentí², el λ óptimo es 1 y para que exista una buena capacidad de respuesta los valores de λ deben de ubicarse en el rango de 0.75 a 0.85.

Para lograr que la mezcla sea útil para la operación del motor se han desarrollado distintos sistemas como los carburados, de inyección de gasolina mecánicos y de inyección de gasolina

² Número de revoluciones por minuto mínimo a que se ajusta un motor para mantener su funcionamiento de manera estable aunque no se este accionando el acelerador [4].

electrónicos. Los dos primeros sistemas no mejoran de manera significativa el rendimiento del motor ya que carecen de algún medio para ajustarse a las exigencias cambiantes de los vehículos. El último sistema mencionado (en el que se centrará la atención) posee medios de regulación que le permiten gobernar la operación del motor en cada instante de funcionamiento.

Al ser el sistema de inyección electrónico un sistema regulado reduce el consumo de gasolina, debido a que mantiene el coeficiente de aire en un punto adecuado para cada régimen³ del motor y las condiciones de encendido. La potencia se favorece también debido a que se da un mejor llenado de los cilindros. Además las aceleraciones (recordar la capacidad de respuesta) no se retrasan debido a que el sistema se puede adecuar a dichas condiciones, lo cual mejora de igual forma el encendido del vehículo. Otra mejora significativa que introduce un sistema de esta índole, es la disminución en las emanaciones nocivas, debido a la disminución de hidrocarburos excedentes del proceso de combustión mediante este control.[3]

En los sistemas de inyección existe una variedad de sensores y actuadores con los cuales se realiza el control en los vehículos.

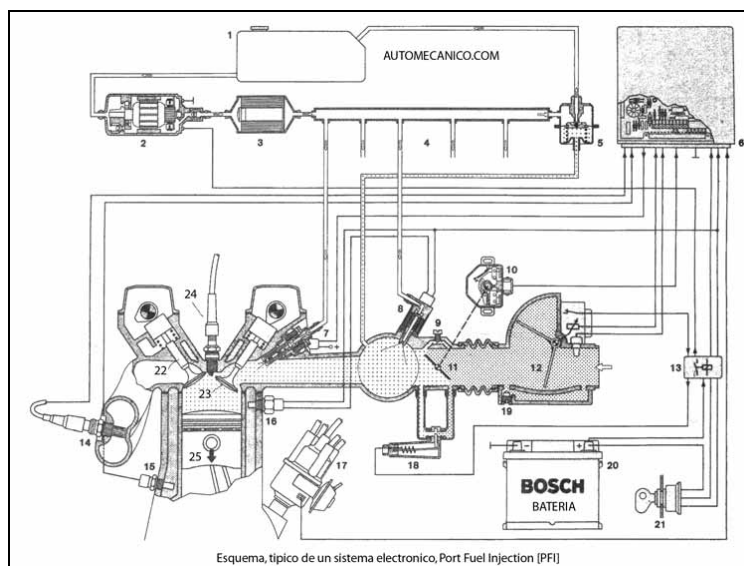


Figura 5. Un diagrama de un sistema de inyección de gasolina y encendido [5].

³ Revoluciones por minuto a las que gira el eje [4].

Tabla 1. Descripción para la numeración en la figura 5 [5].

1] Tanque de gasolina	10] Switch de posición de la garganta	19] Tornillo regulador de mezcla
2] Bomba de gasolina	11] mariposa o papalote	20] Batería
3] Filtro de gasolina	12] Sensor del flujo de aire	21] Llave de encendido
4] Riel de inyectores	13] Relay combinación	22] Válvula de escape
5] Regulador de presión	14] Sensor de oxígeno [lambda, Ego]	23] Válvula de entrada
6] Unidad de control	15] Sensor de temperatura	24] Bujía
7] Inyector	16] Interruptor térmico de temperatura	25] Pistón
8] Inyector de encendido en frío	17] Distribuidor	
9] Tornillo de ajuste para relenti	18] Válvula auxiliar de aire	

En la figura 5 se puede observar un sistema de inyección de gasolina típico (cada sistema posee sus propias variantes) con la ubicación de sensores y actuadores en la sección de pistones y admisión de aire y gasolina. La tabla 1 contiene la descripción de los dispositivos que aparecen en la figura 5.

3.3 Microcontroladores

Tomando en cuenta las exigencias que la solución del problema requiere en cuanto a costos, dimensiones (no superior a 70cm²) y herramientas digitales (convertidores analógicos digital, PWM, almacenamiento de datos, manipulación de señales digitales ON-OFF y procesamiento de datos) resulta de importancia recalcar que los sistemas contenidos (como lo son los microcontroladores) cumplen con creces dichas exigencias. A continuación se hará una descripción básica de dichos dispositivos contenidos.

Un microcontrolador es un circuito con alta escala de integración, en donde se incorporan la mayor parte de los elementos orientados a gobernar uno o varios procesos.

Usualmente un microcontrolador esta conformado por los siguientes componentes:

- Procesador o UCP (Unidad Central de Proceso).
- Memoria RAM para contener datos.
- Memoria para el programa (ROM/PROM/EPROM).

- Líneas de E/S (entrada salida) para comunicarse con el exterior.
- Módulos para el control de periféricos (temporizadores, puertos serie y paralelo, convertidores análogo/digital, convertidores digital/análogo, entre otros).
- Dispositivos de sincronización del sistema.

Los microcontroladores son ampliamente utilizados a diario en distintas aplicaciones como pueden ser juguetes, hornos de microondas, frigoríficos, televisores, computadoras, impresoras, módems, sistemas de arranque de automóviles (en donde se pretende utilizar) y un gran número de aplicaciones que surgen cada día.

Existe una gran variedad de microcontroladores. Una de sus más importantes clasificaciones corresponda a su capacidad de procesamiento, de 4, 8, 16 o 32 bits. Aún así, con esta variedad los microcontroladores de 4 y 8 bits resultan suficientes para la mayoría de las aplicaciones, reservando los procesadores con capacidad superior para áreas como el procesamiento de imágenes, aplicaciones militares, comunicación, procesos industriales y control de dispositivos de almacenamiento masivo.

Uno de los sectores en donde los microcontroladores han tenido un desarrollado auge es en el mercado automovilístico, debido a su adaptación a las condiciones extremas como vibraciones, choques y ruido.

Actualmente los microcontroladores son fabricados con tecnología CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor), puesto que presenta un bajo consumo energético y una alta inmunidad al ruido. Su estructura lógica inicialmente fue basada en al arquitectura Von Neumann⁴, pero en los últimos años a tendido a desarrollarse de manera más amplia la arquitectura Harvard⁵, especialmente en la familia de microprocesadores de Microchip PIC.

Otro punto referente a los microcontroladores que es de suma relevancia lo constituyen los criterios a tomar en cuenta para la elección de los mismos. Entre estos criterios se encuentran: *Costos*. Es importante conocer la documentación existente y las herramientas de desarrollo tanto en programas (como simuladores, ensambladores y compiladores) y dispositivos (como emuladores y programadores).

⁴ La arquitectura Von Neumann consta de un único banco de memoria para programa y datos.

⁵ La arquitectura Harvard distribuye su banco de memoria en dos distintos sectores, programa y datos, los cuales poseen buses independientes.

Procesamiento de datos. Determinar la exigencia de procesamiento necesaria para la aplicación, con lleva en escoger la capacidad del microcontrolador de manejar operaciones relativamente complejas en un tiempo lo suficientemente reducido, de acuerdo con los requerimientos específicos.

Entrada salida. Realizar un diagrama de bloques facilita medir el requerimiento de señales de entrada y salida, tanto en su número como en su forma, de tal forma que se puedan elegir las características suficientes del dispositivo para el propósito por el cual se requiere.

Consumo. En los casos en que los sistemas realizan funciones de vital importancia y solo cuentan con una alimentación basada en baterías de baja potencia, resulta útil que los microcontroladores puedan entrar en un modo de operación de bajo consumo hasta que se requiera de sus servicios.

Memoria. La necesidad de memoria esta en función de la cantidad de información a procesar tanto en la ejecución del programa como en los datos que este requiera. Así, es indispensable dividir los requerimientos de memoria en volátil (RAM), no volátil (ROM, EPROM) y memoria no volátil modificable (EEPROM). La primera cubre los requerimientos de ejecución del programa almacenando variables y resultados de cálculos, la segunda almacena el programa en si y la tercera puede utilizarse para almacenar datos de calibración (como en es necesario en el caso presente) modificables, pero requeridos para funcionamiento.

Ancho de palabra. Es necesario escoger el menor ancho de palabra que cubra con los requerimientos, puesto que esto reduce los costos. Aún así, es importante que el ancho de palabra no dificulte el proceso de los datos. Considerando que el acceso a datos usualmente corresponde como mínimo a un byte, una elección apropiada puede ser un ancho de palabra de 8 bits, si el programa no requiere de alto procesamiento de datos, como en aplicaciones de procesamiento de imágenes.

Diseño de la placa. Tomando en cuenta que un microcontrolador cuenta con diversos sistemas contenidos (CAD, CDA, PWM, comunicación serie, dispositivos de almacenamiento, entre otros), la elección adecuada del mismo puede reducir la compra de componentes adicionales y por ende el espacio necesario para el diseño de la placa, traduciéndose en una disminución de costos en la construcción del circuito para su implementación. [6].

3.4 Memoria no volátil

Considerando que almacenar datos en el dispositivo es un punto vital en el desarrollo del proyecto, y además que los mismos deben permanecer inalterables ante la falta de energía, es importante introducir al tema de memorias de almacenamiento no volátil.

Las memorias no volátiles son dispositivos de almacenamiento los cuales pueden mantener la información por periodos de tiempo suficientemente largos (mayores a 40 años) como para considerarse permanentes, aunque se interrumpa el suministro de energía eléctrica.

Existen distintos medidos y tipos de memorias no volátiles como los son los dispositivos de almacenamiento óptico (CD, DVD) o magnético (Discos Duros), pero para la aplicación a que se refiere este proyecto la atención se centra en las memorias basadas en semiconductores (eléctricas). En esta clasificación de memorias no volátiles se pueden mencionar las siguientes:

ROM (Read-Only Memory). Son memorias de solo lectura, que por su conformación, solo se graban en una única ocasión desde su fabricación. [7]

PROM (Programmable Read-Only Memory). Estas memorias pueden ser programadas mediante un programador PROM, pero solo en una ocasión. La programación se realiza aplicando pulsos de 12V o 21V. [8]

EPROM (Erasable Programmable Read-Only Memory). Es un tipo de memoria formado por celdas FAMOS (Floating Gate Avalanche-Injection Metal-Oxide Semiconductor), las cuales son transistores de puerta flotante. Cada celda viene de fabrica sin carga, lo cual significa que cuando se lee la memoria solo se tendrá como resultado niveles lógicos altos (1's o en hexadecimal FF). Para lograr modificar este estado por defecto se utilizan programadores para realizar las combinaciones de unos y ceros necesarias para que correspondan a la información digital que se quiere almacenar en ellas. Para lograr modificar el estado de las compuertas (o cargarlas⁶) el programador aplica voltajes superiores a los normales (alrededor de 5V, que son utilizados en las operaciones habituales de dispositivos digitales). Una vez programada la memoria EPROM solo puede ser borrada al exponerse a luz ultravioleta⁷ ya que los fotones

⁶ Pasar a estado bajo o cero lógico.

⁷ Es de destacar que las memorias EPROM cuentan con una ventana (normalmente de vidrio transparente) en la parte superior del encapsulado por la cual el chip de silicio entra en contacto con la luz.

excitan a los electrones en las compuertas haciendo que estas se descarguen (retornen a su estado lógico alto o 1). [9]

EEPROM (Electrically-Erasable Programmable Read-Only Memory). Estas memorias pueden ser programadas, borradas y desprogramadas eléctricamente, sin necesidad de utilizar una luz ultravioleta como es el caso de las memorias EPROM. Estas memorias tienen un límite de grabación y borrado entre 100000 y 1000000 veces, pero esto puede variar dependientemente de la tecnología empleada para su confección. Estos dispositivos suelen comunicarse por medio de los siguientes protocolos de comunicación serie: I²C, SPI, Microwire (los mismos se detallarán más adelante). [10]

Flash. Son memorias basadas en la tecnología EEPROM, pero alcanzan velocidades mayores y tienen un costo menor por MB. Estas memorias permiten borrar y escribir sectores (por ejemplo bytes), a diferencia de las memorias EEPROM, que solo permiten estas acciones por cada bit. Por el momento existen dos tendencias tecnológicas para la fabricación de estas memorias: NOR y NAND. La tecnología NAND es más barata y rápida, pero carece de la fiabilidad de la NOR.

Un aspecto importante en cuanto a memorias reprogramables se refiere, es que estas pueden ser leídas de forma ilimitada, pero solo pueden ser borradas y programadas un número limitado de veces (de 100000 a 1000000). [11]

3.5 Comunicación serie

Existen diversos tipos de comunicación serie con distintos propósitos. Para este proyecto, es necesario conocer los posibles protocolos de comunicación serie a emplear para la comunicación de los módulos con el computador; y para leer y almacenar datos en una memoria serie (como la EEPROM).

Comunicación serie RS232 o TIA/EIA 232. Es una señal de interfaz referida a tierra no balanceada y unidireccional. Usualmente, se realiza de manera asincrónica mediante tramas de datos (por lo general de 8 bits) con codificación NRZ⁸. Aún así, puede ser una comunicación sincrónica si se utilizan líneas de reloj. La operación promedio se da a una velocidad

⁸ Codificación utilizada en transmisiones de baja velocidad. Envía los datos tal y cual los recibe. Por esto solo es posible transmitir a bajas velocidades [13].

aproximada de 20Kbps. Otras versiones de este protocolo como TIA/EIA 562 y el TIA/EIA 423 se utilizan para trabajar a tensiones menores y velocidades más altas que el 232, correspondientemente. Debido a las características típicas de las líneas de comunicación utilizadas para este protocolo (capacitancia de línea de 2500pF e impedancia de carga de $3K\Omega$ a $7K\Omega$), la distancia máxima no alcanza los 20 metros. La trama de datos es iniciada por un bit activo en bajo⁹ luego sigue una trama de datos. Cuando se utiliza algún bit de paridad este se ubica luego de la trama de datos como un uno lógico (si la cantidad de unos es impar) o un cero lógico (si no lo es). Esto es si se utiliza paridad par, de lo contrario la lógica es inversa. Al final de la comunicación se establece un bit (como uno lógico) de parada el cual indica que no hay comunicación en la línea. Cuando se efectúa nuevamente una comunicación se hace una transición de alto a bajo (niveles lógicos) [12].

USB. Es un estándar para bus serie que utiliza normalmente 4 líneas con las cuales establece la comunicación, dos para alimentación (V_{BUS} y GND) y dos para intercambiar datos (D- y D+). Además existen cuatro tipos diferente de transferencias de datos que se pueden establecer entre los dispositivos: de control (comandos de control y respuestas de estado), isocrónica (o isocronuos, garantiza velocidad, pero no la calidad de los datos como en una transmisión de audio o video), de interrupción (para dar servicio a los dispositivos que lo requieran en un determinado momento) y de volumen (o bulk, la cual se utiliza para grandes transferencias de datos como las de archivos). La tensión de bus (V_{BUS}), nominalmente, corresponde a 5V con una variación permitida de $\pm 25\%$, mientras que las tensiones en la línea de transmisión van desde 0V hasta 0.3V para los niveles lógicos bajos y de 2.8V a 3.6V para los niveles lógicos altos. La comunicación es realizada en una dirección a la vez (half duplex) mediante las terminales D- y D+, las cuales en los cables de comunicación van trenzadas entre si (twisted pair). Las dos líneas operan conjuntamente, de tal forma que una línea se transmite las señales de manera invertida a la otra, esto con el objetivo de reducir los perjuicios del ruido, causado por el efecto electromagnético de las líneas de comunicación largas. Las máximas tasas de transferencia de datos en los dispositivos USB son de 480Mbit/s en la versión 2.0 del USB.

⁹ Los drivers RS232 invierten la señal, por lo tanto el valor medido de un nivel lógico bajo se encontrará entre +3V y +15V, y el nivel de un nivel lógico alto estará entre -3V y -15V.

Para propiciar la veloz transmisión de los datos, se utiliza una codificación NRZI¹⁰ y un bit de relleno (stuffing bit) para los estados lógicos altos (establece un bit bajo cada 5 bits altos). Los puertos USB en los Host (anfitriones), normalmente pueden alimentar dispositivos USB que consuman 100mA o hasta un máximo de 500mA, cuando estos no cuentan con alimentación propia.

Ambos estándares (RS232 y USB) son dos opciones probables para implementar en el diseño de la comunicación PC-módulo. El RS232 posee la ventaja de ser sumamente simple y difundido (lo cual garantiza la obtención de medios para su desarrollo y un bajo costo), mientras el USB es un muy robusto y con tasas de transferencia de datos muy superiores. En la evolución del proyecto se determinará cual de las dos opciones se adecua de mejor manera a los requerimientos establecidos [14].

Los siguientes protocolos serie son utilizados para intercomunicar dispositivos como microcontroladores con memorias serie, específicamente con EEPROMs.

I²C (Inter-Integrated Circuit). Comunicación serie, la cual esta compuesta por tres líneas: SDA (datos), SCL (reloj), GND (referencia). Las líneas SDA y SCL necesitan resistencia de pull-up, ya que las señales salen a través de transistores con drenaje abierto. Los voltajes permitidos van desde 3.3V a 5V. Tiene un espacio de direcciones de 7 bits con 16 direcciones reservadas lo cual significa que puede tener hasta 112 nodos (dispositivos que se pueden conectar al bus). Las velocidades de transmisión eran de 10Kbits/s (modo de baja velocidad) a 100Kbits/s (modo estándar), pero la última revisión de este medio de comunicación serie resulto en velocidades desde 400Kbits/s (modo rápido) a 3.4Mbits/s (modo de alta velocidad) con, además, un direccionamiento de 10 bits. El I²C se emplea en periféricos en donde la simplicidad y bajo costo son más importantes que la velocidad. [15]

SPI (Serial Peripheral Interface). Este estándar de comunicación serie cuenta con cuatro líneas: SCLK (reloj), MISO (entrada de maestro, salida de esclavo), MOSI (salida de maestro, entrada de esclavo) y CS (habilitación del chip). Normalmente los datos entran a un periférico en el flanco bajo del reloj y salen en el alto, con un CS altivo en bajo. Para manejar un conjunto de periféricos en un solo bus, estos tienen la opción de entrar en un estado de alta

¹⁰ NRZI (Non-Return to Zero, Inverted). Codificación de los datos en que se realiza una conmutación de estado en la transmisión únicamente en presencia de ceros lógicos. Los unos lógicos no alteran los niveles en la transmisión.

impedancia (tercer estado) que hace que, prácticamente, se desacoplen del bus. La comunicación entre los dispositivos se realiza en ambas direcciones a la vez (full duplex). [16]

3.6 Regulación de tensión

Debido a que los módulos se encuentran en un sistema con un nivel de ruido alto, causado por las constantes conmutaciones de los actuadores (como los inyectores, las chispas, elementos giratorios como bombas entre otros) y las condiciones de encendido del vehículo es necesario disponer de una regulación de tensión para la fuente de alimentación de los circuitos en el módulo.

Por lo tanto es necesario conocer distintos factores que describen al proceso de regulación de tensión.

Regulación para carga. Este parámetro indica cuanto cambia la tensión en la carga al cambiar la corriente por la carga. La regulación de carga esta definida como:

$$\text{Regulación para carga} = \frac{V_{NL} - V_{FL}}{V_{FL}} \times 100\% \quad (4.2)$$

Donde:

V_{NL} = Tensión sin carga (cuando la corriente tiende a cero por la carga).

V_{FL} = Tensión a plena carga (cuando pasa por la carga la corriente máxima con la que se diseña el circuito).

Con lo anterior se puede deducir que cuanto menor sea la regulación de carga mejor opera el regulador.

Regulación de red. Sirve para determinar la variación de tensión en la carga ante los cambios de tensión en la línea. Se define:

$$\text{Regulación de red} = \frac{V_{HL} - V_{LL}}{V_{LL}} \times 100\% \quad (4.3)$$

Donde:

V_{HL} = Tensión en la carga para una tensión en la red máxima.

V_{LL} = Tensión en la carga para una tensión en la red mínima.

De aquí que se puede definir la tolerancia de la regulación ante los cambios en la red. Otra vez, a menor regulación de red mayor es la eficiencia del regulador.

Rechazo al rizado. Es la disminución del rizado de salida en la tensión con respecto al rizado en la entrada. Este valor se mide en decibeles como sigue:

$$\text{Rechazo al rizado (dB)} = 20 \times \log \left(\frac{\Delta V_{\text{sin regular}}}{\Delta V_{\text{regulado}}} \right) \quad (4.4)$$

Resistencia de salida. Es la resistencia de Thevenin de la fuente regulada. Esta se puede determinar utilizando la siguiente ecuación:

$$R_{TH} = \frac{V_{NL} - V_{FL}}{I_{FL}} \quad (4.5)$$

Donde I_{FL} es la corriente máxima permitida que entregará la fuente regulada a la carga con una tensión V_{FL} .

Así, se puede determinar la regulación para la carga empleando la resistencia de salida, con base a la siguiente ecuación:

$$\text{Regulación en la carga} = \frac{R_{TH}}{R_{L(\text{mín})}} \times 100\% \quad (4.6)$$

Donde $R_{L(\text{mín})}$ es la resistencia mínima para la carga.

Rendimiento. Esta característica es un parámetro valioso para comparar el desempeño de distintos diseños de reguladores de tensión.

$$\text{Rendimiento} = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\% \quad (4.7)$$

Con la ecuación (4.7) se puede medir el rendimiento de un regulador de tensión, mediante la potencia de entrada o que suministra la línea o red ($P_{in} = V_{in}I_{in}$) y la potencia que se emplea para alimentar la carga ($P_{out} = V_{out}I_{out}$). Un aspecto importante a resaltar en este punto es que esta no es la única característica deseada en los reguladores, ya que existen algunos de ellos que pueden provocar señales de ruido puesto que utilizan medios para transformar la tensión en los cuales realizan conmutaciones a frecuencias predeterminadas (como los reguladores conmutados de los cuales se hablará más adelante)

Los reguladores pueden clasificarse según la configuración de sus componentes en derivación y serie.

Reguladores en derivación. Son poco eficientes pues regulan tensión disipando la energía excedente a través de una resistencia, pero esta a su vez funciona como limitadora de corriente.

Reguladores en serie. Tienen una eficiencia de entre un 50% y un 70%, pero no cuentan con limitación de corriente por lo que requiere componentes adicionales.

Reguladores lineales integrados. Son reguladores serie con protección contra corto circuito y temperatura excesiva. Un aspecto de suma importancia es la tensión mínima excedente que debe de tener la tensión de red (entrada al regulador) con respecto a la tensión de salida a que fue diseñado, con el fin de mantener relativamente constante dicha tensión de salida (este aspecto se conoce como *dropout*). El *dropout* tiene valores típicos de 2V a 3V y valores considerados como de *bajo dropout* de 0.15V a 0.7V. Existen reguladores integrados fijos (LM78XX y LM79XX¹¹) y variables (LM317, LM337, LM338 y LM350).

Reguladores conmutados. Tienen rendimientos entre 85% y 95%. Utilizan modulación de ancho de pulso para obtener los niveles de tensión deseados. Estos reguladores utilizan bobinas para acumular energía en forma de corriente y capacitores para mantener la tensión. Pueden ser utilizados como elevadores o reductores de tensión, además de tener la capacidad de invertir la polaridad de la tensión de entrada. Debido a su naturaleza conmutativa introducen interferencias de radiofrecuencia de 10KHz a 100KHz (frecuencias de operación). Algunos ejemplos de esta categoría de reguladores son el LT1074 (es reductor o inversor), MAX631 y MAX633 [17].

3.7 Conversión análoga-digital¹²

En el proyecto es necesario muestrear señales analógicas, por lo tanto, para poder interpretar estas señales en un plano digital se hace fundamental convertir estas señales analógicas en señales digitales. El camino a seguir requiere de la utilización de ADC o convertidores análogo-digital. Con el fin de determinar que tipo de conversión es necesaria se definirán características propias de estos dispositivos como son la resolución y el error de cuantización, además de cómo interpretar los datos adquiridos.

¹¹ Donde XX puede ser 05, 06, 08, 10, 12, 15, 18 o 24 y representa la tensión de salida para la que fue diseñado el regulador.

¹² Referencia bibliográfica [18]

Resolución. Se define como el valor de tensión de entrada necesario para producir un cambio de 1 LSB (Less Significant Bit, bit menos significativo). La expresión matemática para la resolución esta dada como se muestra en la ecuación (4.8).

$$resolución = \frac{V_{i_{FS}}}{2^n - 1} \quad (4.8)$$

Donde $V_{i_{FS}}$ es la tensión que produce una salida digital con todos los bits en estado lógico alto (valor máximo de tensión) y n representa la cantidad de bits para realizar dicha transformación. Con lo anterior, se puede decir que la resolución establece el nivel mínimo de tensión a que es sensible el convertidor.

Para interpretar los datos obtenidos de la conversión se recurre a:

$$V_i = D \times resolución \quad (4.9)$$

donde D es el valor decimal del dato leído por el convertidor y V_i es el voltaje en la entrada del convertidor.

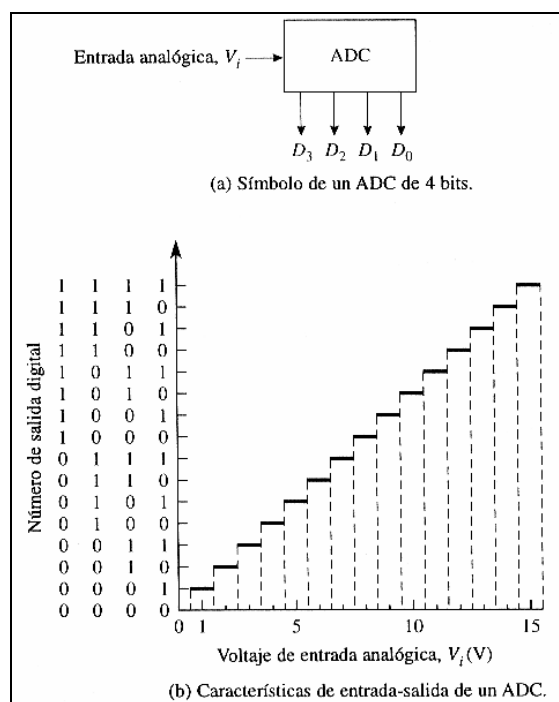


Figura 6. Conversión Análoga-Digital (4 bits) [18].

Error de cuantización. Como se puede ver en la figura 6b, la conversión analógica a digital se realiza con determinados escalones de tensión. Debido a esto los valores de tensión entre los escalones no son posibles de medir. Esta imposibilidad introduce un error que es equivalente a

$\pm\frac{1}{2}$ LSB. Por ejemplo si la tensión de entrada es 4.5V o 5.5V el valor leído será 0101 que equivale a 5V, dado que a través de la ecuación (4.8) se obtiene que la resolución es de 1V/LSB, entonces la incertidumbre queda en 0.5V por arriba o por debajo del valor leído o $\pm\frac{1}{2}$ LSB como se mencionó. Para disminuir el error de cuantización se puede aumentar los bits para conversión estrechando los escalones con lo que la tensión equivalente para 1 LSB disminuye. Con lo anterior se tiene:

$$\text{Error de cuantización} = \pm \frac{1}{2} LSB \quad (4.10)$$

Capítulo 4: Procedimiento metodológico

4.1 Reconocimiento y definición del problema

En su servicio de optimización de vehículos la empresa descubrió, en las fases de experimentación en el banco de dinamómetro y de laboratorio, la existencia de ciertos sistemas que no pueden ser actualizados debido a limitaciones de los dispositivos o programas impuestas por los fabricantes. Considerando que el afinamiento en vehículos modificados o con problemas de combustión (debido a algunos combustibles en el mercado) resulta de suma importancia para la empresa, fue de trascendental importancia solventar esta situación.

En primera instancia, se buscó encontrar una solución en el mercado con dispositivos que cumpliesen con funciones similares a las requeridas, pero estos dispositivos presentaron déficit en cuanto a precisión y control, además de tener un alto costo. Esto debido a que ningún dispositivo en el mercado cumplía de manera independiente con los requerimientos de la empresa, por lo que para cumplir con los requerimientos era necesario utilizar varios dispositivos, en detrimento de un precio competitivo y funciones no aprovechadas de dichos dispositivos para cumplir en conjunto con el requerimiento específico citado. Se puede decir que para cumplir con el servicio específico al cliente (en cuanto a los casos previamente especificados¹³) se recurría a emplear distintos dispositivos, utilizando solo algunas características de estos, por lo que se subutilizan, acrecentando los costos, tiempo y complejidad de instalación.

De manera alternativa, se implementó un sistema analógico, mejorando aspectos de costo y control, pero sin obtener aún un nivel de precisión adecuado y añadiendo complejidad de instalación en los vehículos, ya que cada caso requiere una calibración diferente, además de que las características de cada elemento analógico empleado, como la incertidumbre y temperatura, afectaban la precisión del sistema.

Por lo anterior, se optó por desarrollar una solución versátil, de bajo costo, fácil instalación en los vehículos y flexible (con aplicación variada); con la cual se pueda ofrecer al cliente una relación costo-beneficio favorable. Considerando la versatilidad de los dispositivos digitales y

¹³ Donde las unidades de control para el sistema de inyección de gasolina no pueden modificarse, con el propósito de poner a punto el vehículo.

su relativo bajo costo, se seleccionaron para formar parte de una solución con las características deseadas.

La solución, como ya se mencionó, se restringió a un costo máximo, puesto que debe contar con un precio competitivo (no superior a \$50). También cuenta con características que hacen de su montaje en el vehículo una tarea simple y sin complicaciones (hablando en cuanto a la intervención en el vehículo). Otro aspecto limitante (derivado del anterior), fue el tamaño de los módulos, el cual no excede ciertos límites definidos por el espacio que este ocupa en el vehículo (aproximado de 70cm²).

4.2 Obtención y análisis de información

Para obtener la información relevante al problema se recurrió a consultas con los expertos en la empresa, además de consultas bibliográficas, como manuales sobre sistemas de inyección de gasolina. Estos aspectos involucran la parte automotriz en cuanto al funcionamiento e interacción de los elementos en un sistema de inyección de gasolina. Para los aspectos meramente electrónicos e informáticos (programación en alto nivel), también se recurrió a reunir información de textos referentes a temas de conversión de analógica a digital y reguladores de tensión; principalmente, a través de Internet se recopiló información sobre los dispositivos programables (como microcontroladores) adecuados para la aplicación en sí. Estos dispositivos fueron juzgados en cuanto a su tamaño, herramientas de desarrollo disponibles, costo, cubrimiento de los requerimientos mínimos y en menor medida la velocidad (ya que usualmente esta se comprende en el orden de los mega hertz y el sistema por tener naturaleza mecánica se limita a velocidades de reacción menores comprendidas (en el orden de los ms). Además, para obtener información sobre dispositivos de almacenamiento de datos digitales en tiempo real y que su permanencia en el dispositivo sea independiente de la alimentación del mismo (memorias no volátiles), otra vez se utilizó la red para buscar los dispositivos idóneos, para dicha aplicación. El criterio para elegir estas memorias se estableció con base a su tamaño (físico), costo, capacidad de almacenamiento (igual o superior a 256 Bytes), compatibilidad con los demás dispositivos y su disponibilidad. Este requerimiento de almacenamiento de datos fue sustentado a través del microcontrolador, el cual cuenta con una

memoria EEPROM interna de 256 Bytes. Esto abarató costos y redujo el espacio físico de la tarjeta impresa.

Un elemento predominante en esta solución es su versatilidad, haciendo que no se limite a un ámbito reducido (por ejemplo la lectura de un único tipo de sensor).

4.3 Evaluación de las alternativas y síntesis de una solución

La solución surgió de la experiencia de los expertos (personas en la empresa) en el afinamiento automotriz. Esta se planteó de forma digital, puesto que los sistemas originales son digitales, el ruido afecta este tipo de sistemas en un grado mucho menor que a los sistemas analógicos, la versatilidad potencial de este tipo de sistemas y la simplicidad de instalación en un vehículo. Además, experiencias previas con sistemas estándar del mercado y analógicos no fueron satisfactorias.

Los criterios básicos para optar por una solución de esta índole son el costo, la versatilidad, el tamaño y la simplicidad de instalación.

La solución se verificó (en cuanto a funcionalidad) mediante pruebas de campo, de laboratorio y en el banco de dinamómetro, sin olvidar las simulaciones digitales realizadas al código fuente del microcontrolador con el propósito de corroborar temporización, funcionalidad y secuencia en la ejecución del mismo.

4.4 Implementación de la solución

La solución se desarrolló, en primera instancia, con una etapa de búsqueda y comparación de dispositivos, con los parámetros ya mencionados. Una vez establecidos los dispositivos y los medios presentes en la empresa se procedió a adquirir los recursos faltantes para implementar la solución planteada.

Para confirmar la validez de la solución se recurrió a realizar pruebas de campo, análisis en el banco de dinamómetro y laboratorio. Además de valorar la solución de acuerdo a su funcionalidad, también se valorará con base al costo-beneficio que el cliente obtiene, de aquí la importancia de que los recursos seleccionados no inflaran de manera desproporcionada el costo final (aproximadamente \$32.87).

Un aspecto de alta importancia en la implementación de esta solución es que los datos que se obtengan del proceso de implementación serán y son de uso exclusivo de la empresa, por lo tanto los detalles en cuanto a información específica obtenida del afinamiento de los vehículos se restringe al ámbito de la empresa. Para el manejo de los dispositivos se realizaron manuales de usuario y esquemas eléctricos. Además, de un informe escrito con los resultados obtenidos (en cuanto a funcionalidad), no así los datos de alguna calibración específica (los cuales varían en cada caso dependiendo del automotor y el propósito del afinamiento realizado como peculiaridades en los sensores). La solución se mantuvo de manera muy semejante a la planteada inicialmente, excepto que se paso del desarrollo de dos módulos separados (uno para monitorear frecuencia y otro para tensión) a un solo módulo en el que se puede seleccionar la medición requerido.

4.5 Reevaluación y rediseño

Dado el constante avance de los sistemas de control automovilísticos es necesario adaptar la solución a los posibles cambios que se presenten en los dispositivos y sistemas involucrados en el afinamiento de los vehículos. También se pueden hacer mejoras en la resolución de las señales obtenidas (específicamente la de frecuencia) si fuese necesario, adicionalmente, se puede optimizar la interfaz con el usuario incluyendo modos gráficos y análisis de la información obtenida.

A corto plazo, luego de finalizar el proyecto, se plantea un módulo extra, el cual se desarrollará con el propósito de gobernar los ajustes en la calibración de ciertos dispositivos en el control del automóvil, como respuesta de una pareja de señales de control, construyendo lo que se puede llamar como un “mapa tridimensional de ajuste”.

Capítulo 5: Descripción detallada de la solución

5.1 Análisis de soluciones y solución final

Como ya se ha mencionado, en la empresa han existido tentativas de solución para el problema del afinamiento del sistema de inyección de gasolina en los casos citados. A continuación se hace una tabla resumen de las ventajas y desventajas de las soluciones desarrolladas.

Tabla 2. Tabla comparativa de ventajas y desventajas sobre las tentativas de solución anteriores.

Alternativas del mercado	
Ventajas	Desventajas
Los dispositivos ya se encuentran desarrollados	Las características no son específicas para la implementación requerida.
	Requiere distintos dispositivos.
	Eleva el coste del servicio.
	Eleva la complejidad de instalación.
Solución analógica	
Ventajas	Desventajas
Bajo coste	Difícil calibración por la naturaleza de los dispositivos.
Diseño relativamente simple	Baja precisión.
	Eleva la complejidad de instalación.

Con los inconvenientes que cada solución presentó en su momento de implementación (ver tabla 2), las mismas se descartaron por no representar un servicio adecuado al cliente en cuanto a coste, precisión, instalación y versatilidad. Cada una de ellas requería de la intervención de un técnico calificado para poder realizar los ajustes en el sistema de inyección de gasolina con el fin de afinarlo. También el precio resultante al combinar dispositivos para lograr el efecto deseado es poco competitivo, sin dejar de lado que el tiempo de implementación es mayor. En cuanto a la alternativa analógica, resultó de bajo coste y simple diseño, pero su precisión no fue adecuada debido a la naturaleza de los componentes analógicos con tolerancias variables y dependencia de las condiciones ambientales (temperatura), además del inconveniente de que la calibración de dicho sistema se hace una tarea engorrosa.

Por otra parte, para llegar a una alternativa que condense las necesidades que surgen de dicho problema, se establecen como criterios la precisión, versatilidad, costo, tamaño (proyectado hacia la instalación en el vehículo), nivel de intervención del sistema (no debe alterar el funcionamiento del sistema original) y personalización por parte del usuario (cliente) disminuyendo la necesidad de asistencia técnica presencial especializada para realizar un afinamiento en el sistema de inyección de gasolina y ampliando el ámbito del servicio que brinda la empresa en este rubro. En cuanto a la precisión, se requirió que el sistema tuviese una resolución en la medición de tensión de al menos 10mV y en el muestreo de frecuencia de ser capaz de detectar frecuencias de hasta 10KHz. Con versatilidad se entiende que el dispositivo debe de ser adaptable a diferentes entornos en los cuales se requieran medición de magnitudes de tensión o frecuencia y salidas de encendido-apagado, frecuencia y/o PWM, además de ser programable. Para que la implementación del dispositivo fuese comercialmente aceptable se establece como límite \$50 como costo en componentes, chasis, circuito impreso para el prototipo inicial. Tomando en cuenta que el dispositivo debe ser de fácil instalación, el área máxima que ocupará en el vehículo no debe sobrepasar aproximadamente 70cm². El módulo interactúa en un entorno en el cual pueden existir dos distintos tipos de señales (como ya se ha dicho) para las cuales este debe ser transparente, o dicho de otra manera, el dispositivo no debe intervenir en las características originales de las señales. Como estrategia comercial para ampliar el alcance de la empresa y mejorar el servicio al cliente se desea que le módulo pueda ser programado por medio de un computador utilizando, preferiblemente, una conexión serie USB, debido a que este tipo de puertos es de uso generalizado en computadores portátiles, de esta manera el cliente puede afinar, de manera personalizada, el sistema de inyección de gasolina, optar por afinamientos preexistentes o recibir asistencia por parte de la empresa.

Con lo anterior, una alternativa digital fue la mejor opción para adecuar los requerimientos a un bajo costo, precisión adecuada, espacio reducido y versatilidad. Entre los dispositivos digitales, los microcontroladores (como sistemas contenidos) presentan las características necesarias.

Para el muestreo de señales variantes en frecuencia y mantener una alimentación adecuada al sistema, se emplean dispositivos especializados en aplicaciones automotrices, debido a las condiciones especiales en el funcionamiento de un vehículo (especialmente arranque).

5.2 Descripción del dispositivo

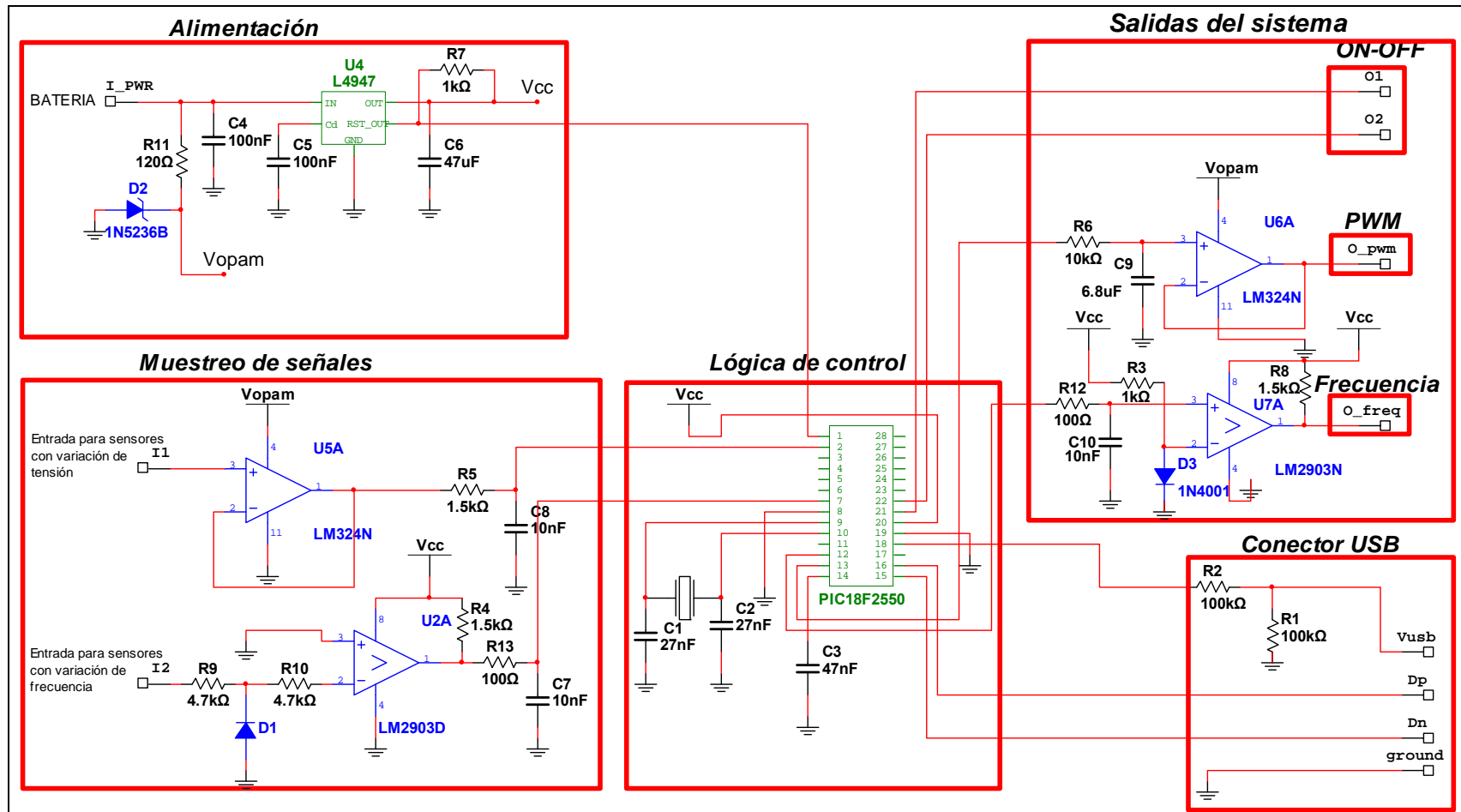


Figura 7. Diagrama esquemático del circuito para el módulo de afinamiento (Multisim).

En la figura 7 se muestra el diagrama esquemático del circuito diseñado. En esta sección se describe su funcionamiento y criterios de diseño para su implementación de manera seccionada. Además, se comentarán algunos conceptos importantes en la solución, necesarios en su desarrollo y puesta en marcha. El diseño final del circuito impreso se presenta en el Apéndice A.5. Dos de los aspectos más relevantes en el diseño del impreso fueron el tamaño requerido para los componentes (debía ser mínimo) y fabricación (una sola capa de sustrato), para emplear fabricantes locales.

5.2.1 Alimentación

Debido al entorno de la aplicación (un automotor), se hizo necesario emplear un regulador de tensión especializado para este tipo de medios. El regulador L4947 se especializa para este tipo de entornos con aplicaciones digitales. Éste supe 5V a 500mA con una desviación de 4% (4.8V a 5.2V) en un rango de temperatura desde -40 a 125°C. Además de estas características este regulador cuenta con protecciones contra picos de tensión de $\pm 80V$ con una duración de entre 5 y 10ms, también contra niveles de tensión de entrada de hasta 35V y -18V; estas especificaciones son especialmente importantes en las condiciones de encendido del vehículo, pero también en caso de falla en el sistema de generación y para compensar fluctuaciones en la alimentación debido a ruido introducido por el funcionamiento de los sistemas vehiculares. Otra función atractiva de este dispositivo es que cuenta con una salida de reinicio, la cual inhibe el funcionamiento de los dispositivos digitales (que cuenten con un sistema de reinicio) de tal forma que estén en línea solo cuando la alimentación se encuentra entre un rango de tensión determinado¹⁴. Para obtener más detalles referirse a [19] (ver figura 7, recuadro “Alimentación”).

También se empleó un diodo Zener de 7.5V como fuente secundaria para alimentar los amplificadores operacionales utilizados para agregar alta impedancia y mantener eléctricamente separados el medio del módulo. Debido a que el tipo de amplificador operacional empleado necesitan de aproximadamente 1V para polarizar sus transistores

¹⁴ $V_{RT(off)}$ corresponde al nivel en la tensión de salida en la que la terminal de reinicio se establece con un valor bajo (aproximadamente 0V) y se da a $V_o - 0.15V$. $V_{RT(on)}$ es el nivel de tensión en la salida con la que la terminal de reinicio se establece en alto (aproximadamente 5V) con un retraso programable desde 0 hasta 30ms y se da a $V_{RT(off)} + 0.05V$.

internos y resultaba trascendental mantener los niveles de tensión (hasta 5V), se recurrió al uso de esta fuente secundaria y a las configuraciones de seguimiento de tensión. La resistencia de 120Ω se utiliza tanto para protección como para asegurar la polarización del diodo Zener. El diodo Zener empleado es de 0.5W por lo que la corriente máxima que soporta es de aproximadamente 66.67mA. De esta forma, considerando una sobre tensión de 15V en operación normal (recordar que la fuente de tensión a utilizar es de 12V que provienen de la batería del automóvil) como criterio de diseño, la resistencia de 120Ω limita la corriente a 62.5mA y para una tensión de sub-operación de 10V la corriente se limita a aproximadamente 20.83mA que garantiza la operación normal del diodo. Es importante resaltar que la regulación de tensión para los amplificadores operacionales no es de gran importancia ya que la regulación especial se hace en la sección digital del circuito para mantener los niveles necesarios para la operación adecuada del microcontrolador y evitar errores, por ejemplo en el almacenamiento de datos en la memoria no volátil. En la sección analógica se permiten variaciones amplias en la tensión de alimentación de hasta 6V.

5.2.2 Muestreo de señales

Para el muestreo de señales se emplearon: un comparador especializado para aplicaciones automotrices¹⁵ (en la medición de la frecuencia) y el convertidor analógico-digital contenido en el microcontrolador (para la medición de tensión), separando la influencia del proceso de medición sobre la señal a medir con un amplificador LM324 en configuración seguidora de tensión. En cuanto al comparador, se eligió el LM2903 debido a su amplio margen de tensión operacional, que va desde los 2V hasta los 36V. Este comparador cuenta con una salida de colector abierto a través de la cual se puede controlar la corriente y el nivel de tensión en la misma, permitiendo medir distintos niveles de señales variantes en frecuencia adecuándolos a los requerimientos del microcontrolador, además de influir de manera despreciable en el comportamiento de las señales medidas ya que su corriente de sesgo o desvío es típicamente de $25\eta\text{A}$ ¹⁶. Las características de este comparador son de suma importancia, ya que estos sensores de frecuencia normalmente representan variables de velocidad, lo que implica

¹⁵ Además de el microcontrolador y la implementación de una rutina en el mismo.

¹⁶ Esto quiere decir que para su funcionamiento necesita muestras de señal sumamente pequeñas.

dispositivos giratorios y bobinas, que pueden resultar perjudiciales en un entorno digital. La configuración resistiva en conjunto con el diodo a tierra en la entrada inversora del comparador cumple la función de inhibidor de niveles de tensión negativos, permitiendo sólo niveles negativos no superiores a la tensión de polarización del diodo (V_D) de aproximadamente 0.6V. Se pueden obtener mayores detalles sobre este comparador consultando la referencia [20]. Para la señal con nivel de tensión variante se utilizó uno de los módulos A/D¹⁷ del microcontrolador (como se dijo anteriormente), éste consume 2 μ A como máximo y posee hasta 10 bits para conversión con referencias negativa y positiva configurables, pero para este caso en particular con una referencia negativa a tierra (0V) y positiva a la tensión de alimentación del sistema (5V), así se obtiene una resolución en la conversión de 4.88mV, la cual es suficiente para satisfacer el requerimiento de 10mV de resolución para las variaciones en los sensores de este tipo. Las entradas de muestreo se pueden observar en la figura 7, específicamente en el recuadro de “Muestreo de señales”. En la figura 8 se representa el módulo de conversión A/D del microcontrolador. La aplicación utilizó únicamente la entrada AN0 y las tensiones V_{REF-} y V_{REF+} se establecieron en 0V y 5V correspondientemente.

¹⁷ Entiéndase analógico-digital

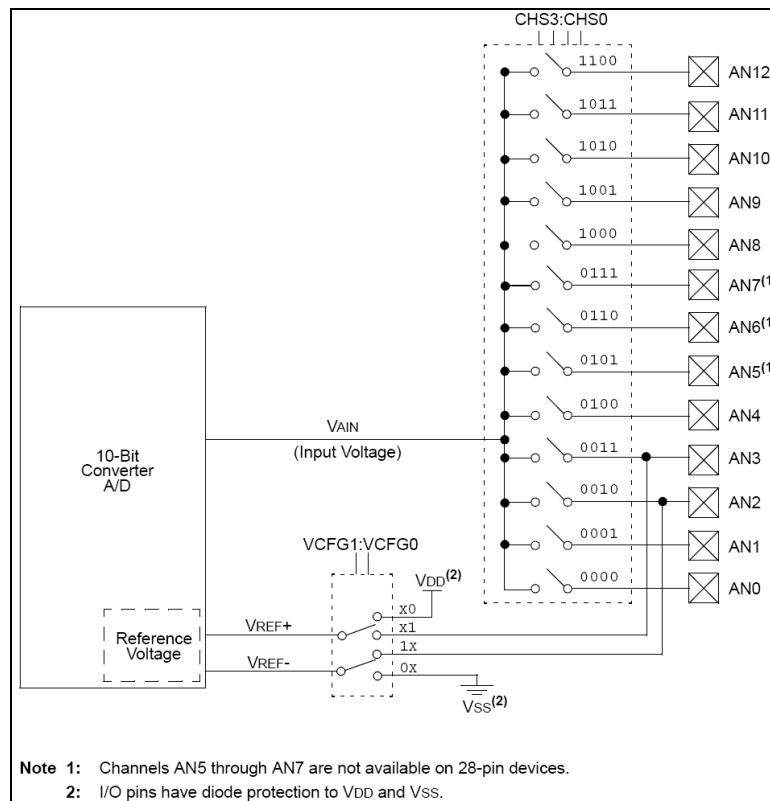


Figura 8. Módulo de conversión analógica-digital del microcontrolador. Tomada de la sección 21 página 262 en la hoja de datos de microcontrolador [21].

Entre las salidas de los amplificadores operacionales (seguidor y comparador) y el microcontrolador se insertaron filtros pasivos pasa bajas, con el propósito de eliminar interferencias de alta frecuencia debidas al funcionamiento del vehículo. En el seguidor de tensión se limitó la frecuencia hasta un máximo de aproximadamente 10.6KHz (ver cálculos en Apéndice A.3.11) previniendo algún cambio brusco en el muestreo de la señal del sensor variante en tensión pertinente a alguna medición válida; aún así cambios más rápidos que 94.247 μ s (periodo de frecuencia límite en este caso) serán inhibidos y considerados como ruido. En cuanto al comparador, se establece el límite de frecuencia en aproximadamente 159.15KHz, debido a que la señal que sale de este comparador es cuadrada y los flacos de la señal son empleados por el microcontrolador en la detección de frecuencia hasta 10KHz. Por lo anterior, para conservar la forma de onda con flacos definidos se permite el paso hasta el 15° armónico (ver Apéndice A.3.12) de la frecuencia máxima admitida (10KHz).

5.2.3 Lógica de control

Esta sección, básicamente, esta compuesta por el microcontrolador. En la aplicación se escogió el PIC18F2550 (de la familia de microcontroladores de Microchip) por sus características particulares, como son:

- Módulo para transferencias de datos serie vía USB¹⁸.
- Capacidad de retención de datos de larga duración (mayor de 40 años) a través de una memoria no volátil EEPROM interna (esto reduce el espacio necesario para la instalación, además de reducir drásticamente las posibles interferencias en la escritura y lectura de los datos, en comparación con el uso de una memoria externa).
- Módulos de captura, comparación y generación de ancho de pulso¹⁹ (CCP).
- Conversión analógica-digital (mencionada anteriormente).
- Temporizadores (de gran utilidad para la generación y monitoreo de frecuencia).
- Salidas digitales.
- Memoria flash para programación (32KB) y RAM (2KB) para el manejo de variables.

Para más información sobre el PIC18F2550 ver [21]

Para desarrollar el firmware se utilizaron las herramientas de Microchip en conjunto con el compilador en lenguaje C de CCS (Custom Computer Services Inc) PICC. De forma un poco más específica, se utilizó, para programar y depurar el firmware, la herramienta de desarrollo MPLAB[®] ICD (In-Circuit Debugger) 2 plus, la cual usa como medio de programación el sistema ICSP[™] (In-Circuit Serial Programming) que se especializa en descargar el programa a los dispositivos equipados con este sistema. Este sistema a través de 4 líneas, además de programar los dispositivos, también realiza la depuración del firmware en el circuito. El PICC (específicamente PCH para la familia PIC18), se escogió por sus herramientas (macros de firmware) para controlar el puerto USB usando emulación de un puerto COM, lo que facilita el desarrollo del programa para el control del módulo desde el computador. En la figura 9 se

¹⁸ Este protocolo de comunicación serie es preferido en la aplicación, dado que estos puertos presentan una gran difusión en el mercado de los equipos computacionales, haciendo así el módulo más apetecible y versátil para la clientela, además del desuso de los puertos DB9 en comunicación RS232 en los últimos años.

¹⁹ Este PWM puede tener distintas configuraciones de frecuencia, esto en dependencia con la frecuencia de funcionamiento del procesador en el microcontrolador, haciéndolo atractivo para la aplicación (ver objetivos específicos en sección 2.3)

muestra la herramienta de desarrollo utilizada. La interconexión entre el dispositivo y el programador se puede observar en la figura 10.

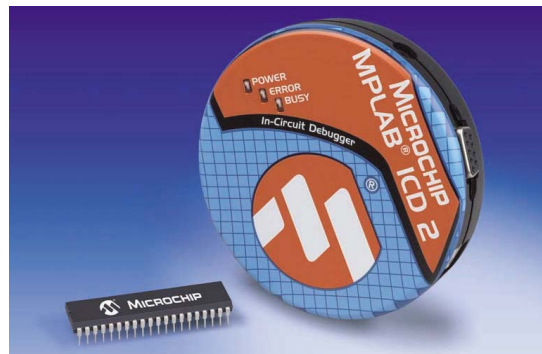


Figura 9. Herramienta de desarrollo utilizada para depurar y programar el firmware en el microcontrolador [22].

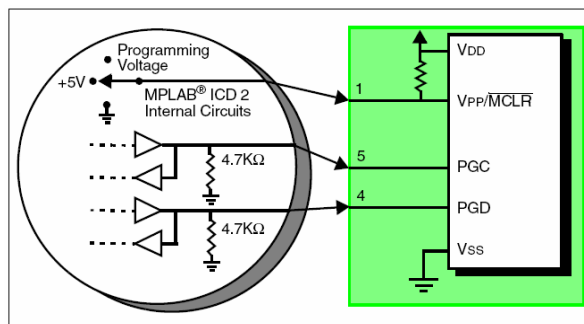
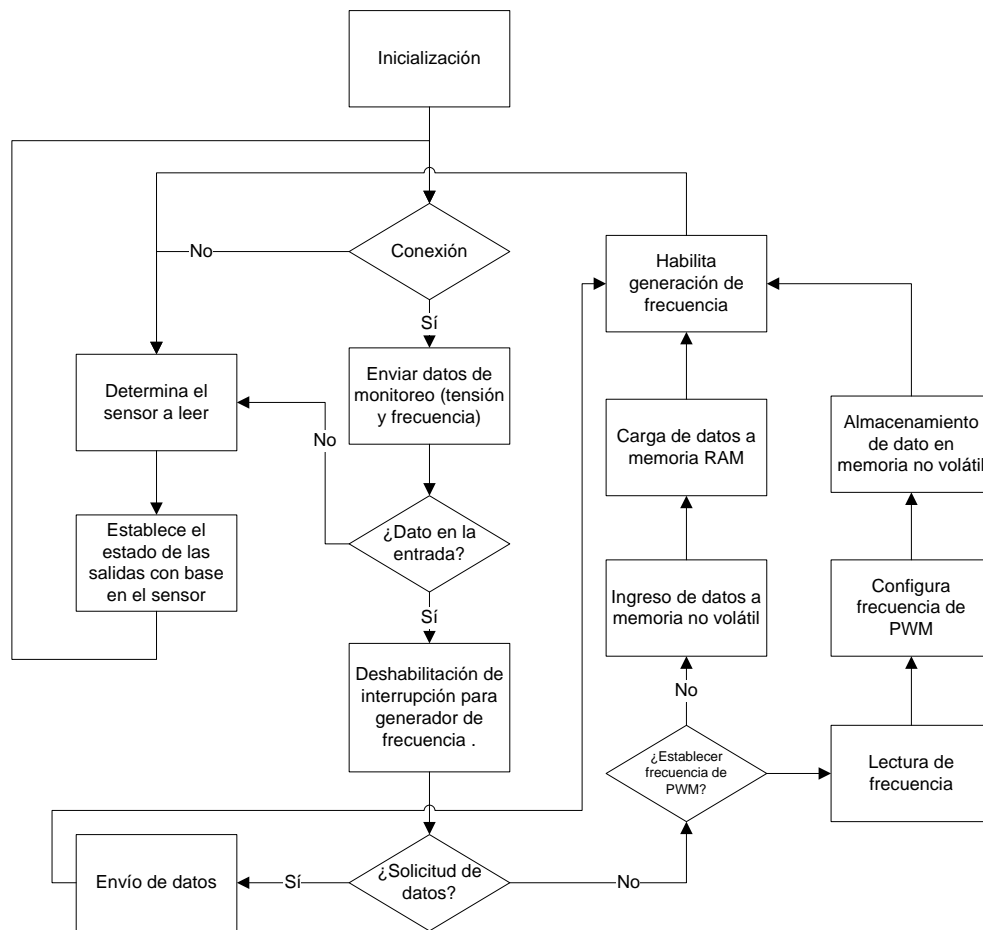


Figura 10. Interconexión entre la herramienta de desarrollo y un dispositivo con capacidad ICSP™ [23].

El firmware grabado en el microcontrolador consiste de tres secciones interdependientes. Estas secciones se pueden denominar como:

- Programa principal
- Monitor de frecuencia
- Generador de frecuencia.



(Microsoft Office Visio)

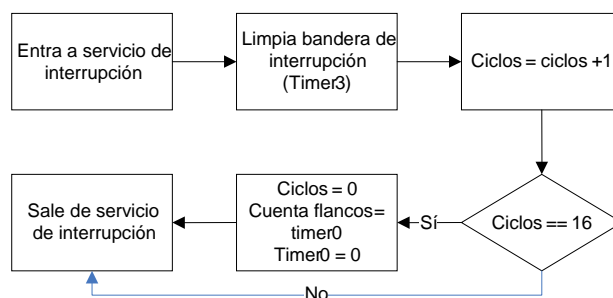
Figura 11. Diagrama de flujo simplificado para el programa del microcontrolador.

El programa principal se encarga de inicializar todos los módulos y registros necesarios en la aplicación, como el CCP (Capture/Compare/PWM) (Captura/Comparación/modulación de ancho de Pulso), los temporizadores, habilitación de interrupciones, SIE (Serial Interface Engine, para control de comunicación USB), dirección de los puertos de entrada/salida, ADC (Analogical Digital Converter o conversión analógica a digital) y configuración de fuentes y subfuentes de temporización para el sistema²⁰. Este programa administra las tareas básicas del sistema, como lo es: el mantenimiento y detección de conexión USB, establecimiento de salidas, almacenamiento en memoria y comunicación con el computador. En la figura 11 se representa, en diagrama de flujo, el programa principal del microcontrolador (firmware). Se

²⁰ En la operación del procesador, del módulo para USB y la medición de frecuencia.

puede notar la interacción el ordenador (conectado) y el funcionamiento normal (desconectado) con sus respectivos procedimientos y condiciones.

El programa principal se encarga de la administración del modo de funcionamiento del dispositivo. Los modos pueden ser de comunicación con el computador o chequeo de condiciones. Cuando el dispositivo se encuentra conectado envía (al computador) la información de la lectura de los sensores de manera periódica, adicionalmente si se detecta datos de entrada (enviados por el computador), determina la naturaleza de los mismos (establecimiento de condiciones, configuración de frecuencia para la modulación de ancho de pulso o solicitud de la información contenida en la memoria EEPROM) y realiza las acciones necesarias para completar la solicitud requerida. Cuando no hay datos en la entrada o no se ha establecido una conexión con el computador, el firmware del microcontrolador hace que este establezca las salidas con base en las condiciones escritas en la memoria EEPROM. Dos aspectos a resaltar sobre el funcionamiento del microcontrolador son: 1) mientras halla una conexión con el computador se estará intercambiando el modo de funcionamiento entre la comunicación y el chequeo de condiciones, 2) si la señal medida no entra en ningún rango de funcionamiento establecido en la memoria EEPROM las salidas permanecerán en un estado por defecto en el cual las salidas digitales y la salida de generación de frecuencia permanecerán en un nivel bajo (0V), mientras que la salida de PWM mantendrá un ciclo útil o de trabajo equivalente al nivel de tensión medido.



(Microsoft Office Visio)

Figura 12. Diagrama de flujo para la medición de frecuencia en el microcontrolador.

El monitor de frecuencia se implementó con un servicio a interrupción²¹ encargado de almacenar el valor del temporizador cero (timer0 en el microcontrolador) en una variable en

²¹ Específicamente el servicio a interrupción para el evento de desborde del temporizador 3 (timer3).

memoria RAM llamada “*cuenta flancos*” (ver figura 12). El timer0 usa como fuente de sincronización la frecuencia a medir (ver figura 7 recuadros “*Lógica de control*” y “*Muestreo de señales*”), el servicio a interrupción almacena su valor y luego reinicia la cuenta (timer0 = 0). Este dato (“*cuenta flancos*”) se emplea como medición de la frecuencia de entrada. “*Cuenta flancos*” es utilizado por el programa principal para comunicar al usuario el valor de frecuencia entrante (cuando hay conexión) y establecer la condición de operación del sistema, esto de acuerdo con los datos pre-grabados por el usuario en la memoria no volátil (EEPROM), siempre y cuando la programación por el usuario indica que la señal para determinar el estado de las salidas es la señal variante en frecuencia. Adelante se describe con mayor detalle el funcionamiento y uso de esta rutina. De la misma manera, la generación de frecuencia se realizó implementando otro servicio a interrupción, pero esta vez empleando un módulo CCP, ya que representó la mejor opción para obtener distintos valores de frecuencia (desde 0 hasta 10KHz según los requerimientos) con una precisión de $500\eta s^{22}$ (ver Apéndice A.3.1) y reiniciaba el contador en el instante de la interrupción, disminuyendo la pérdida de exactitud en comparación con la utilización, para el mismo propósito, de una instrucción que puede tardar varios ciclos de instrucción, sin tomar en cuenta los ciclos que ya se hayan perdido en el servicio a la rutina de interrupción (específicamente, almacenar registros de operación). En los casos de frecuencias menores a aproximadamente 30.5175Hz (ver apéndice A.3.2), que corresponde al valor de frecuencia mínimo anterior al desborde del temporizador (a 65536 cuentas puesto que tiene una capacidad de 16 bits) para generar los semiciclos bajo y alto en la señal, fue necesario el uso de un contador extra para determinar el tiempo excedente por cada semiciclo.

²² Esto corresponde al tiempo que tarda el contador en incrementarse en una cifra a 16MHz como frecuencia de operación escalado en dos (ver detalles en Apéndice A.3.8).

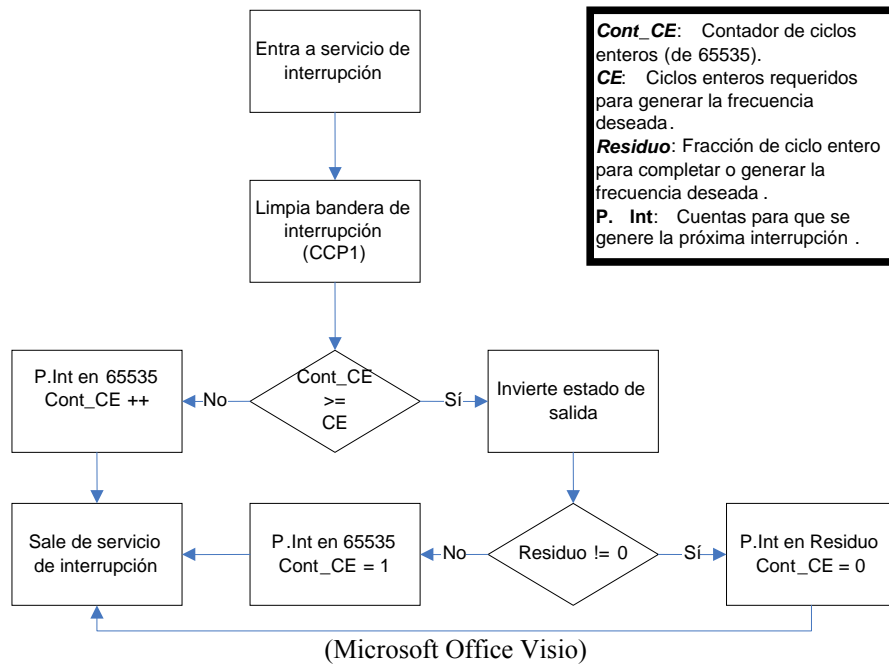


Figura 13. Diagrama de flujo para la generación de frecuencia en el microcontrolador.

En la figura 13 se muestra el diagrama de flujo del segmento de programa en donde se realizó la rutina para la generación de frecuencia. Esta rutina se encarga de determinar cuando se debe conmutar el estado de la salida de frecuencia, con base a los datos ingresados por el usuario y los rangos de la entrada a que es sensible el sistema, lo cual administra el programa principal. Es importante destacar que en todas las rutinas de interrupción utilizadas fue necesario establecer a cero (limpiar) la bandera de interrupción para evitar que el microcontrolador se estancara en el servicio a interrupción, ya que para entrar a servicio de interrupción específico, el microcontrolador verifica el estado de la bandera de interrupción en cuestión, si esta tiene un estado lógico alto realiza la rutina especificada. También es de suma importancia, para el buen desempeño de los servicios de interrupción, los procedimientos de entrada y salida de interrupción, en los cuales se almacenan y recuperan los valores de los registros utilizados por el programa antes de entrar a la rutina de interrupción con el fin de que se continúe con el funcionamiento normal luego de dar servicio a dichas rutinas.

A continuación se describe los bloques funcionales que se implementaron en el firmware del microcontrolador.

5.2.3.1 Conversión Analógica-Digital y PWM

En el microcontrolador se implementó una conversión analógica-digital con el propósito de medir la señal variante en nivel de tensión desde 0V hasta 5V y actuar sobre el sistema de acuerdo rangos²³ pre-programados en la memoria interna del microcontrolador (EEPROM), además de notificar al usuario el estado del sensor mediante el enlace USB, cuando este estuviese disponible (como se comentó anteriormente). Para la conversión se utilizaron 10 bits con referencias negativa y positiva de 0V y 5V (o por su defecto el voltaje de alimentación) respectivamente. La medición se realiza en tres tiempos diferentes, uno para monitorear y otros dos dependientes de las condiciones que se hallan establecido para el funcionamiento. Así, si se desea medir una señal de tensión, de tal forma que el sistema reaccione ante ella, se hará un monitoreo para establecer los rangos de funcionamiento; por otro lado si alguna condición establece que es necesario copiar la tensión de salida o un porcentaje de la misma, se realizará una medición adicional para corregir el valor de la salida periódicamente. En la figura 14 se presenta un fragmento del código escrito para el firmware, en el cual se envían las muestras de las señales medidas vía USB. La función “*usb_enumerated()*” se explicara más adelante, pero básicamente determina si es posible establecer comunicación entre el computador y el dispositivo; con “*set_adc_channel(0)*” se establece el canal A/D²⁴ ha leer, que en este caso es el primer canal del microcontrolador, luego con “*delay_us(10)*” se espera un lapso de aproximadamente 10µs para asegurar que el dato se estabilice en el módulo A/D. De seguido, se lee el canal seleccionado (con *read_adc()*) y se almacena en una variable ubicada en memoria RAM denominada “*volt*” para luego ser transmitida con “*usb_cdc_putc_fast()*” que envía los datos solo si el módulo USB se encuentra desocupado, inhibiendo posibles estancamientos en el programa. Aquí también se puede notar que se transmite la variable “*total_flancos*”, la cual corresponde a la medición de frecuencia del que se hablo anteriormente y se retomará para detallarla más adelante. La función “*printf*” se emplea para dar formato de manera eficaz a la transmisión de datos. Los retardos de 1ms y 20ms tienen la función de dar tiempo al módulo USB para finalizar tareas pendientes sin interrupciones por parte del programa principal.

²³ Hasta cuatro distintos rangos para esta aplicación, además del estado por defecto.

²⁴ Entiéndase Analógico/Digital

```

if (usb_enumerated()) {
    delay_ms(1);
    set_adc_channel(0);
    delay_us(10);
    volt = read_adc();
    printf(usb_cdc_putc_fast,"f/%lu/\rt/%lu/\r", total_flancos,volt);
    delay_ms(20);
}

```

Figura 14. Fragmento del firmware programado en el microcontrolador con PCH (Monitoreo)

Otro de los casos en que es necesario realizar una lectura de la señal analógica se ilustra en la figura 15. En esta ocasión la condición almacenada en memoria determina que se debe de establecer la salida de PWM en un porcentaje de la entrada (condición verdadera) o un valor absoluto (condición falsa) de tensión. Las condiciones almacenadas en la EEPROM se pasan a memoria RAM, para agilizar su manipulación por el microcontrolador, por medio de una estructura llamado “*condicion*”, con la cual se hace una instancia en forma de arreglo unidimensional de tamaño 4 llamado “*cond*” para acceder a los rangos de condición (ver figura 17) y la forma en la cual se deben de establecer las salidas para cada uno de ellos. Por último se escala la tensión de salida al ancho de pulso del módulo PWM (se usa el segundo módulo para PWM, anteriormente configurado, con la instrucción “*set_pwm2_duty()*”) para fijarlo, con base al porcentaje de la señal medida, porcentaje almacenado por el usuario para el rango específico. La variable “*condic*” es equivalente a la condición actual y obtiene su valor en una estructura lógica previa que determina el estado en que se encuentra la señal. Esta rutina sólo ocurre cuando existe algún cambio en la condición, de lo contrario (la señal no sale del rango de la condición) dicha rutina no volverá a efectuarse, esto para estabilizar la variable “*porc*” que determina el porcentaje de la entrada en la salida (representada como una señal de ancho de pulso). Si la condición no establece seguimiento, el sistema equipara el periodo establecido en el registro PR2 (dirección 0xfcb) con el valor deseado de ancho de pulso (desde 0 hasta 1023) y configura este en la señal para tal fin.

```

porc = *0xfcb;
porc += 1;
porc *= 4;
pwm_limit = porc-1;
if(cond[condic-1].S_S == 2){
    porc *= cond[condic -1].V;
    porc = 102300/porc;
    set_adc_channel(0);
    delay_us(10);
    volt = read_adc();
    volt = volt/porc;
    if(volt > pwm_limit){volt = pwm_limit;}
    set_pwm2_duty(volt);
}
else{
    porc /= 1023;
    PR2_R = porc*cond[condic -1].V;
    if(PR2_R > pwm_limit){PR2_R = pwm_limit;}
    set_pwm2_duty(PR2_R);
}

```

Figura 15. Fragmento del firmware programado en el microcontrolador con PCH (Establecimiento de condición para seguimiento porcentual de tensión de entrada)

Con el propósito de actualizar el ancho de pulso para la generación de un nivel de CD (corriente directa) que siga a la señal homóloga medida en el canal A/D en las condiciones que así lo establezcan, se ejecuta la rutina ilustrada en la figura 16. En esta rutina (como anteriormente se dijo) se esclarece si es necesario seguir la tensión de entrada de acuerdo a las condiciones establecidas, o si el sensor en cuestión se encuentra en un ámbito fuera de cualquier condición programada lo que fija el sistema en un estado por defecto en el cual copia la señal variante en tensión de la entrada. La variable “*out_rang*”, confirma o no, si la medición esta fuera de cualquier rango programado, mientras que la variable “*S_S*” de la estructura “*cond*” indica si se debe de seguir o no la entrada de tensión de forma porcentual.

Un detalle de suma importancia, para que estas rutinas de seguimiento de tensión operen de manera adecuada, es la conversión del dato en el módulo ADC a un valor equiparado al que se desea establecer como ancho de pulso en el PWM de tal forma que el nivel de tensión en corriente directa coincida con el porcentaje deseado. El módulo ADC opera con 10 bits, mientras que la configuración del ancho de pulso depende de la frecuencia de operación del módulo PWM. Así, el registro “*PR2*²⁵” determina el periodo de la señal. Este registro cuenta con 8 bits y se compara con el temporizador dos o “*timer2*²⁶”, el cual incrementa su valor en

²⁵ Registro de periodo del temporizador 2, su dirección en el microcontrolador es 0FCB en hexadecimal. Ver referencia [21] sección 15.4.1 “*PWM PERIOD*”.

²⁶ Temporizador de uso general, empleado particularmente en el microcontrolador para la generación de una señal PWM en conjunto con el “*CCP Module*”.

intervalos equivalentes a múltiplos (1, 4, 16) del ciclo de instrucción, según la configuración del mismo. Con lo anterior, para determinar el ancho de pulso requerido en la señal de PWM, se debe primero establecer cual es el ciclo de trabajo máximo (100%) conociendo el valor del registro “PR2”, luego se calcula el porcentaje de la lectura del ADC con respecto a su valor máximo (1023 equivalente a 5V), hecho esto, el último paso para establecer el valor del ciclo útil consiste en escalar el valor anterior con el porcentaje de la entrada medida de tensión que se desea este presente en la salida, determinado por el usuario de acuerdo al rango de funcionamiento (valores almacenados en la memoria EEPROM). La ecuación (5.1) resume lo ya dicho. El valor del registro “PR2” se escala al cuádruple debido a que el establecimiento del ciclo útil en el microcontrolador opera cuatro veces más rápido que la generación de frecuencia (directamente con la frecuencia de oscilación), además se adiciona la unidad para completar las cuentas desde cero (256 cuentas).

$$\text{Ciclo de trabajo} = \left(\% \text{ de seguimiento} \times \frac{\text{Valor}_{MAX_ADC}}{\text{Valor}_{ADC}} \times 4 \left[(PR2) + 1 \right] \right) - 1 \quad (5.1)$$

```

if((cond[condic-1].S_S == 2) || (out_rang)) {
    set_adc_channel(0);
    delay_us(10);
    volt = read_adc();
    if(!out_rang) {
        volt = volt/porc;
        enable_interrupts(INT_CCP1);
        //volt = ceil(volt*porc);
    }
    else {
        PR2_R = PR2;
        PR2_R += 1;
        volt *= 4;
        volt = ((float)volt/1023) * (PR2_R);
    }
    if(volt > pwm_limit) {volt = pwm_limit;}
    set_pwm2_duty(volt);
}

```

Figura 16. Fragmento del firmware programado en el microcontrolador con PCH (Seguimiento porcentual de tensión de entrada).


```

//estructura de condiciones
struct condicion {
    char source;           //Sensor a medir (T:tensión/F:frecuencia)
    int16 rang_inf;       //Valor inferior de la señal sensada
    int16 rang_sup;       //Valor superior de la señal sensada
    int ONOFF;            //Valor para las salidas digitales (hasta 8 bits)
    int8 S_S;             //Determina el formato del PWM (0:1:fijo/2:%entrada)
    int16 V;              //Valor para el PWM (% o duty según S_S)
    int32 F;              //Valor para la señal de frecuencia
};
struct condicion cond[4];

```

Figura 17. Fragmento del firmware programado en el microcontrolador con PCH (Estructura para acceder a las condiciones y datos respectivos).

5.2.3.2 Detección de frecuencia

Para la detección de frecuencia se emplearon dos temporizadores del microcontrolador. En detalle, se utilizaron el temporizador 0 (timer0) y el temporizador 3 (timer3). El primero está encargado de contar la cantidad de flancos (ya sean de subida o bajada, de acuerdo a la configuración del mismo) que presenta la señal variante en frecuencia, mientras que el segundo determina una ventana temporal en la que se leen estos flancos. Esto se logra configurando el timer0 de tal forma que utilice como fuente de sincronía la señal de frecuencia, incrementando su valor con cada flanco positivo de la señal, mientras que el timer3 utiliza el reloj del sistema escalado en 8 (ver figura 19) tomando el dato de frecuencia cada cierto ciclo temporal. La ventana temporal depende del ciclo de instrucción definido como $\frac{1}{4}$ de la frecuencia de operación del procesador en el microcontrolador. Tomando en cuenta este factor, se puede proseguir con la determinación de la duración en la ventana temporal. El timer3 puede ser incrementado con base a los siguientes factores del ciclo de instrucción 1, 2, 4 o 8, establecidos en un submódulo llamado Prescalar (ver figura 18), además cuenta con 16 bits, lo que le da la capacidad de realizar cuentas desde 0 hasta 65535. Así, llevando el timer3 a su cuenta máxima se pueden obtener intervalos equivalentes a 524280 ciclos de instrucción (65535×8), con una frecuencia de operación equivalente a 16Mhz (frecuencia utilizada) y pre-escalando a 8, el tiempo entre interrupciones para el temporizador es de 131.07 ms. Implementando un contador de interrupciones se puede obtener una ventana mayor. En la aplicación se usa un contador incrementado hasta 16, con el fin de obtener una ventana temporal aproximada a $2s^{27}$, logrando medir frecuencias de hasta 0.5Hz (ver figura 20). Con lo

²⁷ El valor exacto es 2.097s

anterior, cada 16 ciclos de interrupción del timer3 se lee el timer0 y se limpia su contenido (lo ponen en cero sus bits), este dato se almacena en una variable llamada “total_flancos” que equivale a la frecuencia de medición (haciendo la debida conversión).

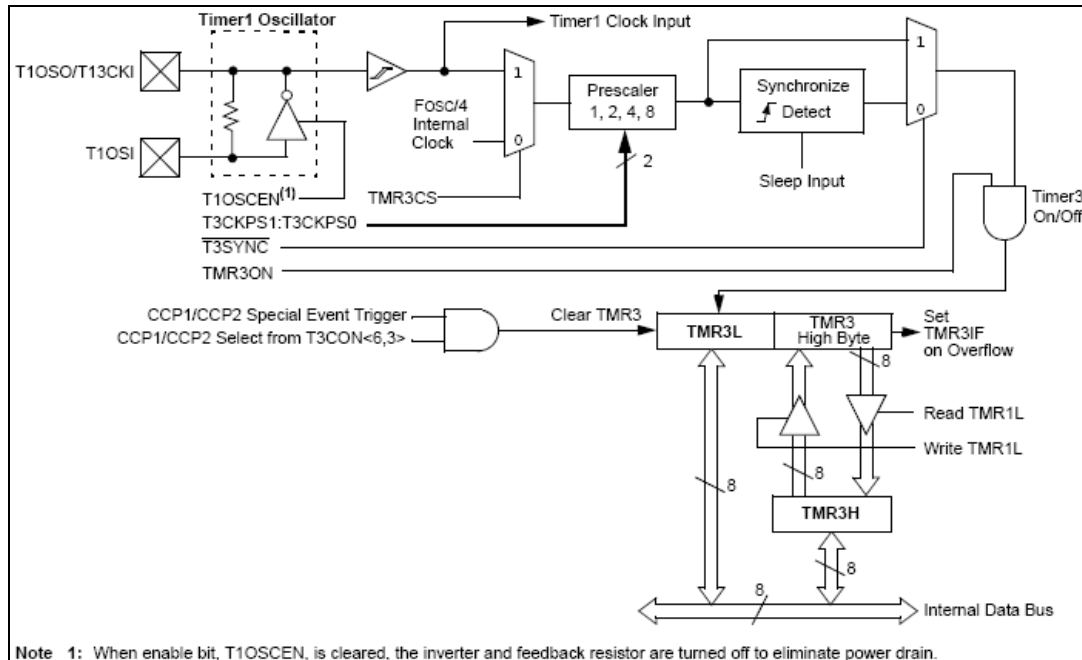


Figura 18. Diagrama de bloques para el TIMER3 en el PIC18F2550 en modalidad 16-bit. (Tomado de la hoja de datos del microcontrolador [21] utilizado sección 14.1 pág. 138)

```
//se incrementa en cada flanco positivo de la frecuencia externa
setup_timer_0(RTCC_EXT_L_TO_H|RTCC_DIV_1);
//se incrementa cada 8 ciclos de instrucción
setup_timer_b(T3_INTERNAL|T3_DIV_BY_8);
```

Figura 19. Fragmento del firmware programado en el microcontrolador con PCH (Configuración de los temporizadores 0 y 3).

```
#INT_TIMER3 high
void ventana()
{
    clear_interrupt(INT_TIMER3);
    cuenta_ventana++;
    if(cuenta_ventana == 16)//ventana de 2.097s (16*4*65536*8/16000000)
    {
        cuenta_ventana = 0;
        //El Timer0 se incrementa cada flanco de subida
        total_flancos = get_timer0();
        set_timer0(0);
    }
}
```

Figura 20. Fragmento del firmware programado en el microcontrolador con PCH (Interrupción del temporizador 3).

5.2.3.3 Establecimiento y detección de enlace USB

Para que sea posible interconectar el microcontrolador con un computador primero es necesario inicializar el módulo USB del mismo. Esto se realiza en modo CDC (communication device class) con emulación de puerto de comunicaciones serie (COM). Para ello se utilizan las funciones del PCH. En la inicialización se usa “*usb_cdc_init()*” que coloca los parámetros para la creación virtual en el computador de un puerto COM²⁸ e inicializa las variables de control en el microcontrolador²⁹. Es importante resaltar que los parámetro para el COM virtual no establecen la velocidad en que se transmiten los datos por el puerto USB, sino como se configurará este en el computador, sin olvidar que hasta este punto esos parámetros sólo se encuentran en un espacio de la memoria RAM del microcontrolador predefinido (1KB) para el uso del USB. Luego de esto se continúa con la inicialización, pero ahora del módulo USB con “*usb_init_cs()*”, generando un reinicio general del mismo procediendo por deshabilitar el dispositivo y las interrupciones del módulo USB junto con el transceiver USB, también se configuran como entradas los pines C4 y C5 del microcontrolador que corresponden a D- y D+ (líneas para la transmisión de datos por USB), la variable que determina el estado del USB se establece en desconectado y por último limpia la pila, las interfaces³⁰ e inicializa las variables de control.

Lo anterior se realiza únicamente con el propósito de preparar el dispositivo (Microcontrolador) para la conexión con el Anfitrión o Host (computador). El anfitrión envía al dispositivo tramas de datos, con el fin de configurarlo. Existen tramas tanto de salida (OUT) como de entrada (IN), ambas siempre toman como referencia al anfitrión. Para realizar las solicitudes de información, el anfitrión siempre es el encargado de administrarlas. De esta manera el computador envía identificadores (tokens) de entrada (para solicitar información) y de salida (para enviar información) al dispositivo. Estas transacciones las lleva a cabo mediante un “Hub”, quién maneja entre la velocidad del dispositivo y la del anfitrión, debido a las diferentes velocidades de funcionamiento (High-Speed para el anfitrión y Full-Speed para el microcontrolador). Para lograr esto, además del identificador, el anfitrión envía un paquete

²⁸ Taza de transferencia de bits, número de bits de parada, paridad, cantidad de bits transmitidos.

²⁹ Como: el puntero del buffer de transmisión, detección de transmisión de datos (vía CDC), buffer de transmisión libre.

³⁰ Interfaz: Manera en que el dispositivo se comunica con el anfitrión.

“*split*”, que funciona como divisor entre ambos medios. El “*split*” tiene dos distintos formatos, uno para indicar el comienzo de la transacción (“*SSPLIT*”) y otro para indicar el fin (“*CSPLIT*”). Los procesos de envío y solicitud de información se pueden observar en la figura 21 y figura 22 respectivamente. Así, para una solicitud de información, el anfitrión manda los paquetes “*ssplit*” e “*in token*” al hub (en 1), que envía el “*in token*” al dispositivo, éste contesta a la solicitud enviando la información, el hub lo recibe y envía un reconocimiento al dispositivo (“*ACK*” en 2). Un poco después el anfitrión solicita la información que anteriormente pidió, con los paquetes de datos “*csplit*” e “*in token*” el hub le responde con la información solicitada (en 3). Ver figura 21.

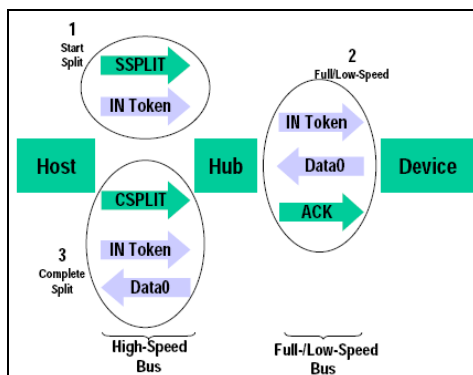


Figura 21. Ejemplo de protocolo USB de solicitud de información del anfitrión al dispositivo. [26]

De una manera semejante, para un envío de información, el anfitrión transfiere los paquetes “*ssplit*”, “*out token*” y la información a enviar (1). Luego el hub pasa el identificador y la información al dispositivo el cual confirma la recepción mediante un “*ACK*” (2). Esta confirmación es recibida por el anfitrión, cuando el mismo verifica la transacción (3). Ver figura 22.

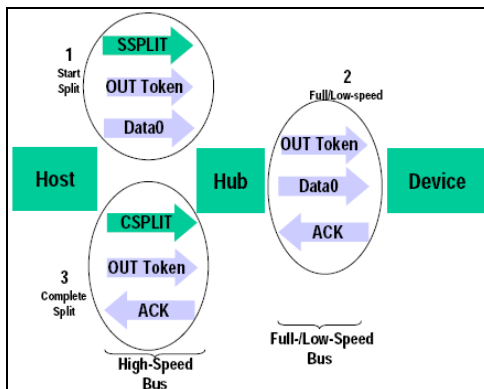


Figura 22. Ejemplo de protocolo USB de envío de información del anfitrión al dispositivo. [26]

Anteriormente se describió el proceso de intercambio de información del protocolo USB. Con el mismo se realizan las tareas de configuración e intercambio de datos necesarios al emular una comunicación serie. En la figura 23 se muestra el proceso por el cual se configura el dispositivo.

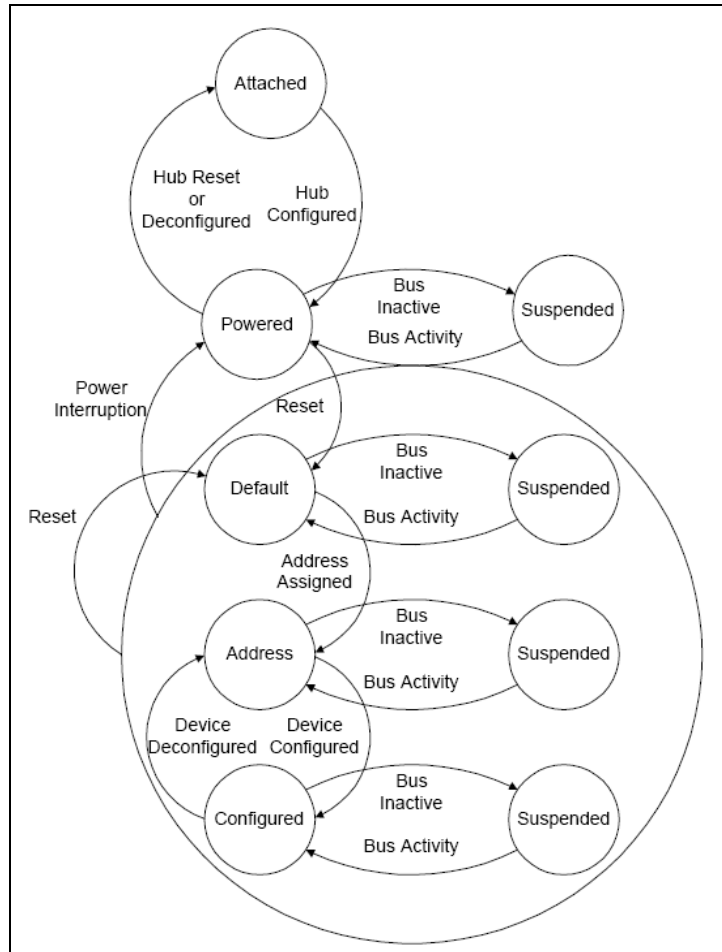


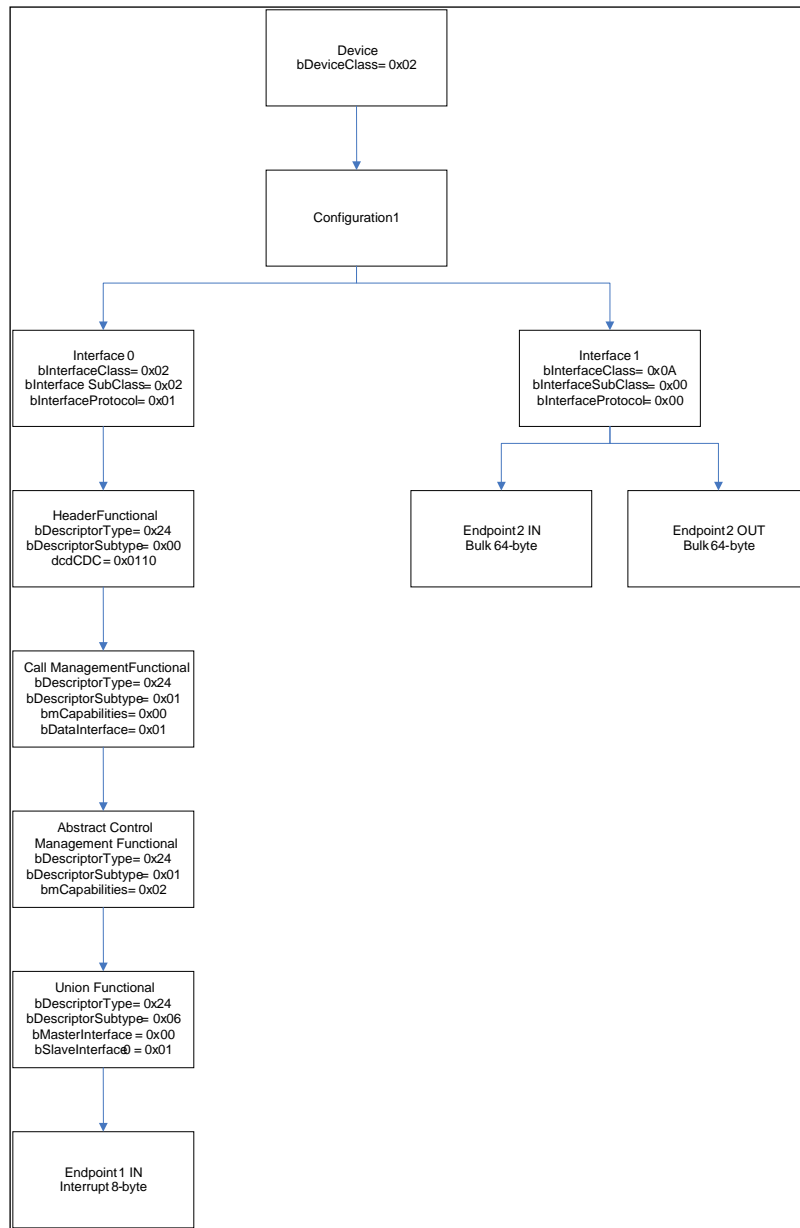
Figura 23. Diagrama de estados USB en el dispositivo. [24]

Como se puede observar el proceso de configuración da inicio cuando el dispositivo se une al puerto USB. El microcontrolador percibe esto mediante la asignación específica de un pin, el cual se conecta a la tensión USB (V_{usb}) como puede apreciarse en la sección “Conector USB” de la figura 7 (la configuración utilizada en la conexión al pin de medición es la sugerida en las hojas de datos del microcontrolador³¹). Al detectar esto, el microcontrolador establece su estado en unido y luego energizado con la función “*usb_task()*” que determina el estado de la

³¹ Sección 17.6.2, ver referencia [21].

conexión. Un aspecto a tomar en cuenta para la creación del firmware, es que se debe de estar ejecutando la función `“usb_task()”` de manera cíclica para mantener la conexión USB. También, cuando el microcontrolador se encuentra en el estado USB energizado, la función `“usb_task()”` lo prepara para pasar al siguiente estado (“Por defecto”). El microcontrolador sólo pasa al estado por defecto al recibir un “Reset” por parte del Anfitrión. En el siguiente estado (Direccionamiento) el anfitrión asigna una dirección específica al dispositivo y la hace saber a este. Para terminar la configuración el anfitrión solicita la información al dispositivo de su modo de funcionamiento (en éste caso un dispositivo CDC³² para emulación serie). Esta información es también llamada Descriptor. En la figura 24 se observa un diagrama esquemático del descriptor para este caso. En él se muestran una serie de códigos para la configuración de la emulación serie, los mismos pueden consultarse en las “Definiciones de clase USB para Dispositivos de comunicación” [27].

³² Communication Device Class.



(Microsoft Office Visio)

Figura 24. Esquema del descriptor CDC para emulación Serie. (Basado en el documento de Microchip “Migración de aplicaciones USB a RS-232 con un mínimo impacto en el Programa de la PC” [25]).

Como se puede observar existen dos interfaces, una para administrar el funcionamiento de dispositivo (interfaz 0) con transacciones de interrupción y la otra para la entrada y salida de datos (interfaz 1) con transacciones por demanda³³.

³³ Ver Capítulo 3 “Marco teórico”, sección 3.5, USB.

Un aspecto ha resaltar en este proceso es la transmisión de los identificadores de vendedor (VID) y producto (PID). Estos números son importantes ya que el anfitrión los emplea para determinar como debe de manejar el dispositivo (seleccionar el controlador). Para lograr una identificación satisfactoria el computador debe contar con un archivo “.inf”, el cual debe de instalarse en el sistema (ver “Manual de usuario” en Apéndice A.4) y contener los mismos números de identificación establecidos en el microcontrolador, además del controlador a utilizar (para emulación serie el “*usbser.sys*” que es parte de la instalación de WINDOWS).

Cuando el anfitrión termina la configuración del dispositivo se dice que el dispositivo fue “enumerado”. Esta enumeración es comunicada por el anfitrión al dispositivo. El firmware detecta esto con la función “*usb_enumerated()*”. Sólo después de terminar la enumeración se pueden realizar transacciones de datos en el dispositivo.

Por último, es necesario conocer si el anfitrión esta realizando una transferencia de datos de emulación serie. Esto se logra con “*usb_cdc_kbhit()*”. La recepción y transmisión de datos emulados se realiza con “*usb_cdc_getc()*” y “*usb_cdc_putc_fast()*” respectivamente.

5.2.3.4 Monitor de señales

El monitoreo de señales se realiza periódicamente, mientras exista una conexión entre el computador y el microcontrolador. La existencia de esta conexión, como ya se menciona, se determina mediante de la función “*usb_enumerated()*”. Si el dispositivo se mantiene enumerado³⁴ por el computador, el enviará de manera periódica los datos referentes a tensión y frecuencia.

5.2.3.5 Almacenamiento en memoria EEPROM

Debido a que una parte muy importante en el funcionamiento del dispositivo consiste en almacenar datos, se requirió del uso de la memoria interna no volátil del microcontrolador (EEPROM). Para escribir datos en la misma se hizo uso de la función “*write_eeprom()*”, que recibe como parámetros la dirección y un dato de 8 bits. La dirección puede tener valores entre 0 y 255 (tamaño de la memoria). La memoria tiene la limitación de solo escribir un byte por vez. Con lo anterior se hizo necesario subdividir los datos con tamaños mayores a un byte. Esto se logró con la función de PCH “*make8()*” que recibe dos parámetros, el dato multi-byte

³⁴ Enumerado se entiende por el instante a partir de que el computador reconoce al dispositivo.

y la posición del byte a extraer. De esta manera se almacenaron los datos recibidos del ordenador vía USB en la memoria no volátil. Los datos ha enviar se codifican en ASCII en tramas con el siguiente formato y tamaño:

Byte/Word/Word/Byte/Word/3Byte

En donde Byte corresponde a 8 bits y Word a 16 bits. Cada divisor se utilizó para facilitar la labor de reconocimiento de datos por parte del microcontrolador con la directiva “*strtok()*”, que separa una cadena de acuerdo a un delimitador predefinido (en este caso el carácter “/”). En tabla 3 se observa como se almacena una trama de información en memoria. Existe una trama para cada condición con las cuales opera el microcontrolador. Con base a los requerimientos del dispositivo, solo se han implementado de 1 a 4 condiciones. Esto puede ampliarse a futuro.

Tabla 3. Formato de la trama de datos almacenada en la memoria no volátil.

Tamaño	8 bit	16 bit		16 bit	8 bit	16 bit		24 bit
División	8	1	15	16	8	2	14	24
Descripción	Tipo de Sensor	M m	Límite inferior	Límite superior	ON- OFF	SOE	Ciclo útil	Periodo

El primer dato almacenado (primeros 8 bits) corresponde al tipo de sensor con el cual el microcontrolador determinará las respuestas respectivas a las condiciones, delimitadas por los diferentes rangos. Con esto, se asigna “T” para un sensor variante en tensión y “F” para uno variante en frecuencia, en codificación ASCII. Los límites a las condiciones se almacenan en los siguientes 32 bits, asignando 16 para cada una, pero de estos solo se emplean 15 bits ya que el valor máximo a medir es de 20970 para frecuencia (equivalente a 10KHz) y 1023 para tensión (equivalente a 5V), mientras que con 15 bits se pueden representar valores enteros positivos desde hasta 32767. Con esto, en el límite inferior (ubicado en una dirección menor) se almacena un bit que representa la condición de Mayor o menor (Mm). Este bit se utiliza para indicar al programa en el computador cual de los rangos presentar en la interfaz con el usuario, además del signo condicional a utilizar (ver diseño de la interfaz con el usuario en el manual de usuario). El dato ON-OFF establece cómo deben de comportarse las salidas digitales durante el rango. Luego, se almacena el dato que corresponde al ciclo útil de la señal de ancho de pulso (ciclo de trabajo) y la forma de generarla (SOE). El ciclo útil puede

utilizarse de dos formas distintas, como un valor porcentual o como el ciclo de trabajo a establecer en la señal de PWM durante el rango. Estas formas de empleo del ciclo útil dependen de SOE (seguir o establecer). Cuando SOE tiene un valor de 0 o 1 establece un valor de ancho de pulso en la salida PWM correspondiente al de ciclo útil. Si SOE tiene un valor de 2, la señal de PWM copia el valor del sensor de tensión y lo escala porcentualmente con base al valor almacenado en aquí. Este escalamiento puede ser, tanto positivo como negativo, aumentando o disminuyendo la salida con respecto a la entrada. Por último se almacena el valor del periodo para la generación de frecuencia. El periodo se carga en una serie de contadores (puesto que los contadores sólo cuentan 16 bits y el periodo tiene un valor que puede necesitar de hasta 24 bits). Con el sistema del microcontrolador operando a 16MHz y conociendo que el ciclo de instrucción es una cuarta parte de esta frecuencia, y además que cada cuenta tarda un ciclo de instrucción, se puede determinar un periodo máximo de aproximadamente 8.38s (ver Apéndice A.3.3).

5.2.4 Salidas del sistema

Las salidas del sistema se establecen obedeciendo los datos programados en la memoria para el rango en que se encuentre la variable medida. Si la variable no se encuentra en algún rango pre-establecido las salidas entran en un estado por defecto, donde las salidas ON-OFF y de frecuencia se deshabilitan (frecuencia en cero y ON-OFF a tierra) y la salida de PWM sigue la entrada de tensión (mantiene un ancho de pulso equivalente al nivel de tensión medido). Las salidas ON-OFF son salidas digitales que cambian de valor con base a los datos ingresados por el usuario. El PWM es una señal de modulación de ancho de pulso, la cual puede variar con respecto a la entrada de forma proporcional o conservar un valor fijo en respuesta a la programación³⁵ y la lectura de la variable escogida (tensión o frecuencia). Debido a que el medio al cual se conecten las salidas de frecuencia y PWM es incierto se procedió a realizar un acople de alta impedancia con un seguidor de tensión para la salida de modulación de pulso y un comparador para la salida de frecuencia (ver recuadro de “*Salidas del sistema*” en la figura 7). También se realizó un filtrado de frecuencias altas para ambas salidas. En el caso de la señal de PWM se decidió permitir el paso únicamente de la componente CD de la señal, para

³⁵ Entiéndase como los datos ingresados por el usuario en la memoria no volátil.

evitar fluctuaciones en la lectura de esta señal en sistemas que están diseñados para la lectura de señales analógicas (como ECU). Así, la frecuencia de corte para dicho filtro se configuró a 2.34Hz (tomar en cuenta que la frecuencia mínima para le PWM es de 976.5625Hz). Para el caso de frecuencia el filtrado se realizó con el fin de eliminar componentes de frecuencia superiores a los generados por la onda cuadrada de 10KHz, causados por la operación del microcontrolador el filtrado se realizó para frecuencias superiores a 159.15KHz (ver Apéndice A.3.12 para justificación). Esto se dio debido a la configuración seleccionada para la temporización del microcontrolador. Fue necesario la utilizando de multiplicadores de frecuencia para lograr establecer una comunicación “FULL SPEED” el SIE³⁶. A continuación se describe la configuración utilizada para la sincronía en el microcontrolador y su influencia en las salidas del sistema.

5.2.4.1 Temporización en el microcontrolador e influencia en las señales de salida.

En el desarrollo del prototipo se utilizó un cristal de 4MHz³⁷ como fuente de sincronización. De este cristal se obtuvo una frecuencia de 96MHz generada con un módulo PLL (Phase Locked Loop) cuya única entrada puede ser una señal de 4MHz, aunque con un divisor de frecuencia entre el cristal y este módulo puede recibir ciertos múltiplos de esta frecuencia. De la frecuencia de 96MHz se obtienen: la frecuencia para la operación del módulo USB y para el funcionamiento general del microcontrolador. La operación del módulo USB a FULL SPEED requiere de 48MHz por lo que se toma la frecuencia del divisor entre dos a la salida del PLL. Por otro lado, para la operación general del microcontrolador con el propósito de que las funciones implementadas (como la generación de frecuencia) funcionasen adecuadamente se selecciono de otro divisor una frecuencia de 16MHz (esto quiere decir que se dividió entre 6 la frecuencia de 96MHz). Para comprender con mayor detalle la configuración antes descrita se recomienda observar la figura 25, donde aparece el diagrama esquemático para la configuración de la fuente de sincronía para el funcionamiento del microcontrolador.

El uso de esta configuración de temporización, especialmente el uso del módulo PLL y los divisores de frecuencia, resulta en pequeñas oscilaciones en los niveles de tensión equivalentes

³⁶ El SIE administra la comunicación USB.

³⁷ Debido a su disponibilidad y factibilidad para la generación de otras frecuencias por medio del sistema de sincronización del microcontrolador.

a las frecuencias resultantes de las divisiones realizadas (4MHz, 16MHz y 48MHz). Debido a estas interferencias se utilizan filtros pasa bajas para las señales de salida de PWM (al final nivel de CD) y frecuencia.

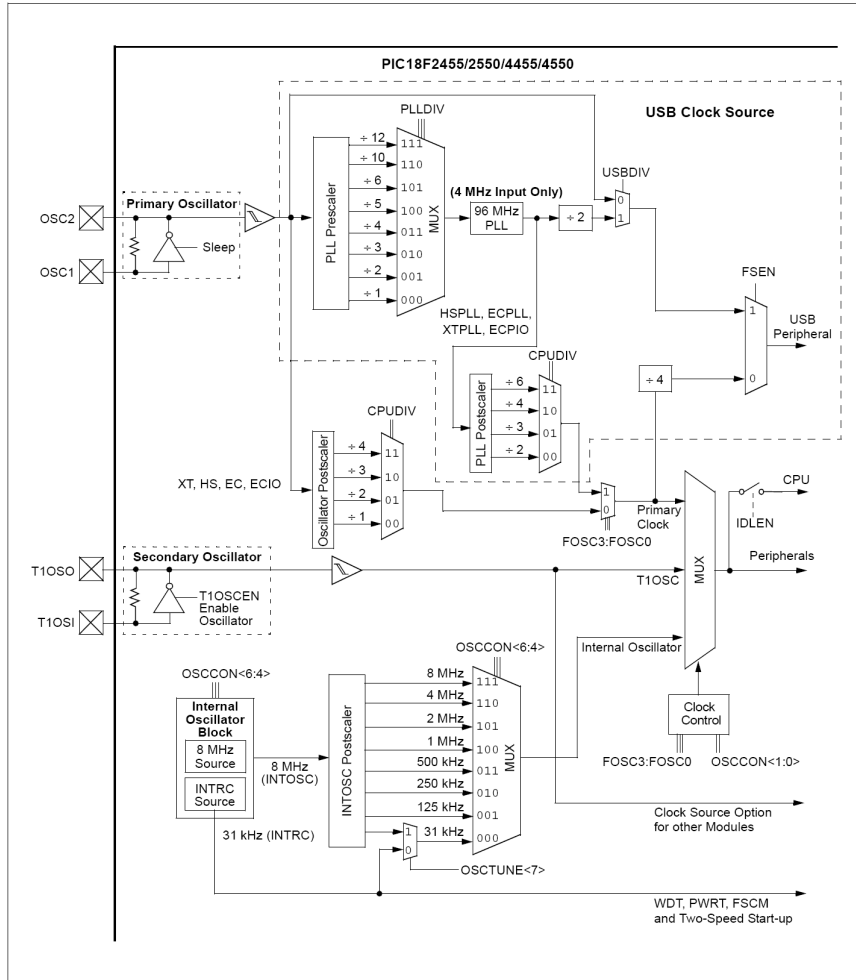


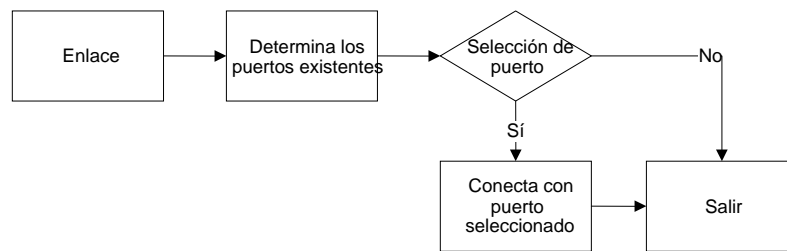
Figura 25. Diagrama esquemático para la configuración de reloj en el microcontrolador (Tomado de las hojas de datos del microcontrolador [21], sección 2.2 pág. 24).

5.2.5 Conector USB

El conector USB esta formado básicamente por 4 pines. El pin a tierra (GND), y el pin de tensión USB (Vusb) por el que los puertos USB alimentan los dispositivos que así lo necesiten. Las líneas D+ y D- se utilizan para el trasiego de información de una forma half-duplex. Estas líneas son complementarias y alambradas como un par trenzado para disminuir las interferencias por elementos ajenos a la comunicación.

5.3 Descripción del programa

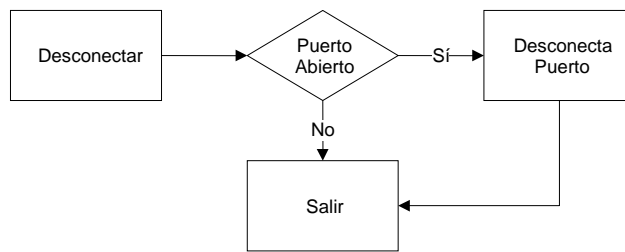
Como parte integral del proyecto, es necesario que exista un medio por el que se pueda establecer una interfaz con el módulo de tal manera que pueda comunicarse con el usuario. Como respuesta a esto se desarrolló una aplicación en Microsoft Visual Basic 6.0. Esta aplicación sirve al usuario para establecer la comunicación con el sistema, observar el estado de los sensores conectados, cargar la información que se encuentre en la memoria del dispositivo (si esta es válida), grabar nuevos datos en la memoria del dispositivo de acuerdo a rangos de operación elegidos por el usuario, definir cual sensor va a determinar la respuesta del sistema, configurar la frecuencia funcional del PWM, la forma en que se comportaran las salidas del sistema, guardar la información del dispositivo en el computador, cargar información del ordenar, guardar en el ordenador factores de conversión de frecuencia medida a velocidad del vehículo (si el sensor de variante en frecuencia corresponde a un sensor de velocidad), determinar los factores de conversión de frecuencia a velocidad y cargar del computador estos factores. Debido a que las aplicaciones creadas en Visual Basic solo reaccionan a eventos (no se realizan tareas de manera continua) se dividió el programa con base a estos eventos. A continuación se describe el funcionamiento del programa según los eventos que acontecen.



(Microsoft Office Visio)

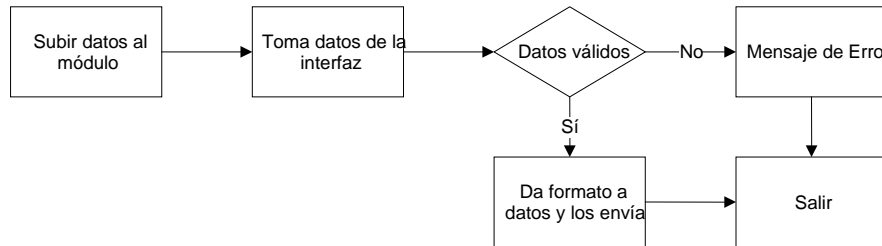
Figura 26. Diagrama de flujo para el establecimiento del enlace con el módulo.

En la figura 26 se describen los subprocesos a realizar para establecer un enlace serie con el dispositivo. Aquí el programa presenta al usuario los puertos de comunicaciones existentes, el usuario puede tanto cancelar la acción como elegir el puerto con el que pretende establecer un enlace con el dispositivo. Para el proceso inverso, sólo se verifica si hay algún puerto abierto y si es así se cierra (ver figura 27).



(Microsoft Office Visio)

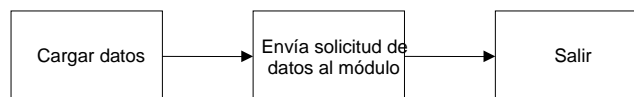
Figura 27. Diagrama de flujo para la desconexión con el módulo.



(Microsoft Office Visio)

Figura 28. Diagrama de flujo para envío de datos al módulo.

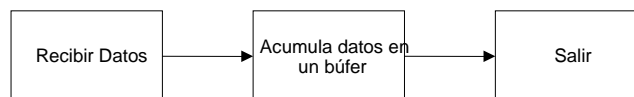
Al enviar datos al dispositivo se corrobora la validez de los mismo (es decir si tienen un formato adecuado y no existen contradicciones entre los rangos seleccionados), se les da formato (para ser interpretados adecuadamente por le módulo) y posteriormente se procede a su envío (en la figura 28 se puede observar el diagrama de flujo).



(Microsoft Office Visio)

Figura 29. Diagrama de flujo para solicitar información al módulo.

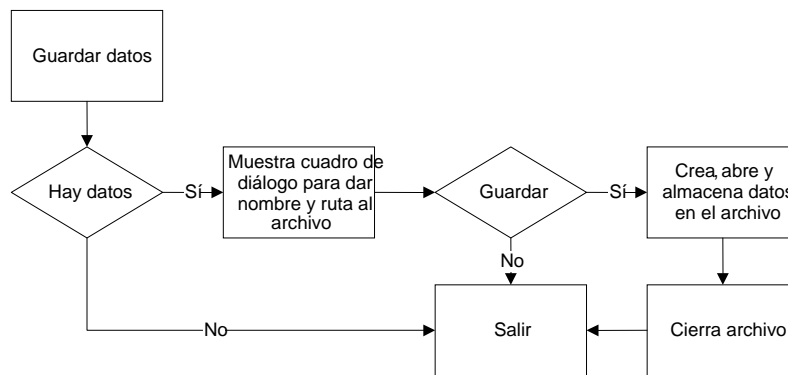
Cuando el usuario hace una solicitud de datos al módulo, esta se realiza como se muestra en la figura 29 enviando un dato que indica al módulo que debe de iniciar una transmisión de la información que posee en su memoria no volátil.



(Microsoft Office Visio)

Figura 30. Diagrama de flujo para recepción de datos del módulo.

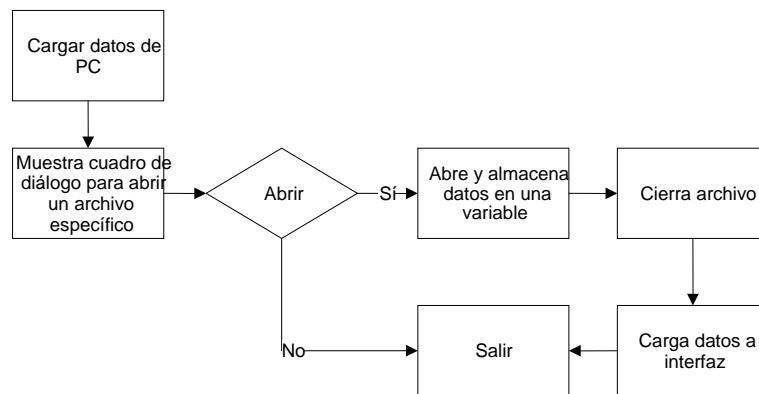
Los datos que son enviados por el módulo (tanto los de la solicitud anterior como los de monitoreo) son acumulados en una variable temporal para su posterior proceso (ver figura 30).



(Microsoft Office Visio)

Figura 31. Diagrama de flujo para almacenar datos en el computador.

Un proceso importante para guardar configuraciones anteriores en el computador es el almacenamiento de datos en archivos. Para lograrlo se diseñó una rutina como se muestra en la figura 31 en donde se verifica en primera instancia si existen datos para guardar y luego procede a mostrar la interfaz necesaria para elegir el nombre y ubicación del archivo si así se requiere.



(Microsoft Office Visio)

Figura 32. Diagrama de flujo para la carga de datos del computador a la interfaz.

Los archivos almacenados en el computador pueden ser cargados a la interfaz y al módulo abriéndolos desde el programa. Esto se hace como se muestra en la figura 32. Primero se muestra el cuadro de dialogo para que el usuario puede escoger el archivo específico, luego se procede a abrir el archivo almacenando los datos en una variable pre-establecida para tal fin, cierra el archivo y por último carga los datos a la interfaz. Estos dos últimos procesos (Guardar datos y Cargar datos a PC) se utilizan de una manera similar para guardar y cargar los datos de los factores de conversión de frecuencia a velocidad, la diferencia radica en los datos a guardar o cargar y a la interfaz que se van a cargar (donde se despliegan los factores).

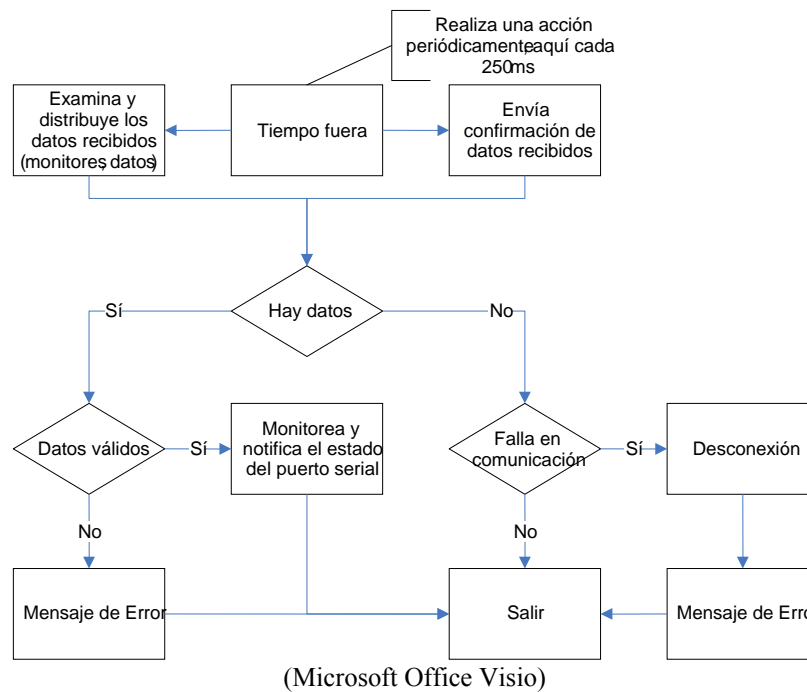


Figura 33. Diagrama de flujo para procesamiento periódico de datos en el programa.

El tratamiento de la información se realiza mediante la subrutina mostrada en la figura 33. Esta subrutina ocurre cada 250ms (establecidos con un temporizador al cargar la aplicación) y se encarga de identificar los datos recibidos del módulo así como enviar confirmaciones al módulo de esos datos. También se encarga de notificar la existencia de errores en la comunicación y si la comunicación se perdido, esperando hasta 10s por datos válidos, si no llega ninguno se cierra el puerto de comunicaciones y se notifica al usuario que la conexión se ha roto.

Un aspecto crucial en el funcionamiento del programa es el controlador o driver capaz de realizar la emulación de un puerto de comunicaciones serie. Este controlador viene incluido en los sistemas operativos Microsoft® Windows® desde la versión 98SE. Para que el dispositivo sea reconocido por el sistema operativo y se le asigne el controlador adecuado, se debe de recurrir un archivo de extensión “inf”, con el que el sistema operativo asocia el dispositivo con el controlador respectivo. En dicha asociación, son importantes hacer coincidir los números de producto (PID) y vendedor (VID) que se encuentran en el archivo de extensión “inf” y los que se registran en el firmware del dispositivo, transmitidos previo a la enumeración (más detalles en “Manual de usuario” Apéndice A.4).

Capítulo 6: Análisis de resultados

6.1 Análisis

Todas las gráficas adquiridas en los resultados fueron tomadas del osciloscopio digital “Tektronix TDS 340A” con ancho de banda de 100MHz. Además, se utilizaron las puntas para osciloscopio modelo HP-9060, que limitan el ancho de banda a 6MHz. A continuación se realiza el análisis de los resultados obtenidos.

Tabla 4. Condiciones para el establecimiento de las salidas del sistema con base en las entradas para el caso de medición de tensión.

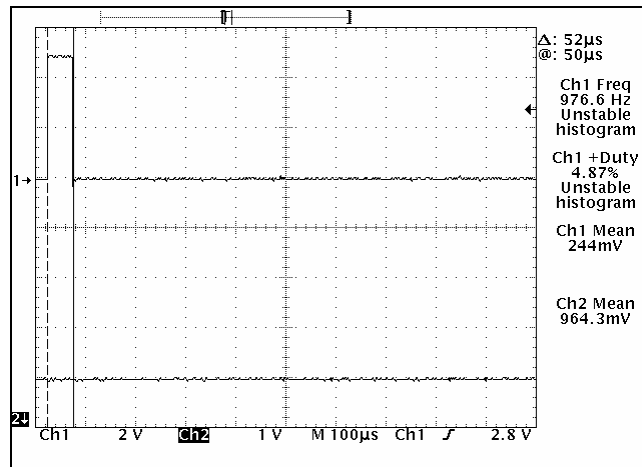
Condición		Salidas binarias (ON-OFF)	Tensión de salida	Referencia para la tensión de salida	Frecuencia en salida (Hz)
Mayor que	3.5V	10	-50%	Entrada	5000
Menor que	2.5V	01	5V	5V	10000
Menor que	2V	01	25%	5V	500
Menor que	1V	11	5%	5V	50

En la tabla 4 se presenta un ejemplo de los datos ingresados en el módulo. En la columna de condiciones se establecen los rangos para el valor de la señal medida donde deben realizarse acciones específicas en las salidas. En este caso la señal medida corresponde a nivel de tensión. Los límites para cada rango de funcionamiento dependen de las condiciones en rango superior o inferior según se elija mayor o menor que el valor límite (el digitado por el usuario). La formación de los rangos de operación también depende de los valores límite permitidos. Estos valores son de 0V como límite inferior y 5V como límite superior para el caso del ejemplo, pero el programa también tiene capacidad para medición de frecuencia y en tal caso los valores permitidos varían desde 0Hz hasta 10KHz (adelante se profundizara un poco en este caso). Además, es importante considerar la resolución del módulo (recuérdese que se trata de un sistema digital y los cambios que se pueden determinar en los valores son discretos) para definir la dimensión del paso mínimo tolerado por el microcontrolador. Este paso mínimo es de aproximadamente 5mV (ver Apéndice A.3.7), por lo tanto y para que no existan condiciones dobles en los límites de los rangos la separación entre rangos adyacentes debe de ser de 5mV. Con lo anterior los rangos de operación quedan como se muestra en la tabla 5.

Tabla 5. Rangos de operación para las condiciones de la tabla 4.

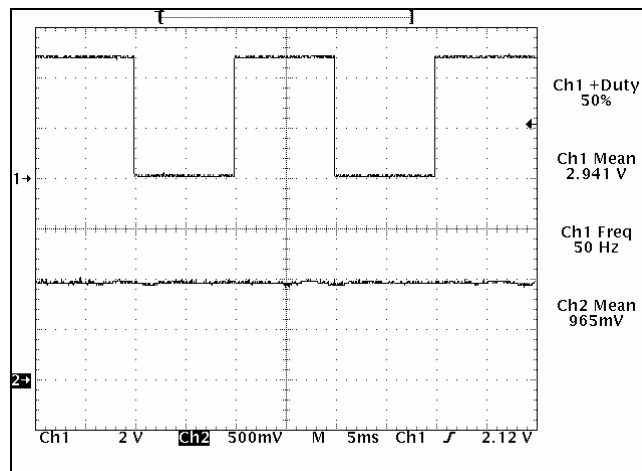
Condición		Rangos (V)
Mayor que	3.5V	[3.5, 5]
Menor que	2.5V	[1.995, 2.5]
Menor que	2V	[1.005, 2]
Menor que	1V	[0, 1]

Es importante notar que el rango [2.505V, 3.495V] no fue definido por el usuario. Por lo tanto este rango no será identificado como un rango operacional del módulo de tal manera que las salidas entrarán en un estado por defecto en el cual se hace el valor de la salida de PWM se hace equivaler a la entrada de la señal de tensión (tanto en el caso de medición de tensión como en la medición de frecuencia) mientras que el resto de salidas se establecen en 0V (incluyendo la de frecuencia). Adelante, en el análisis, se ahondará en el caso por defecto. En la columna de salidas binarias se determinan los valores para las salidas utilizadas para encendido y apagado. El propósito de estas salidas depende de la instalación de dispositivo pero pueden cumplir tareas tanto de monitoreo (por si solas o como código) como de activación de dispositivos, también es de destacar que para el prototipo de implementaron únicamente dos salidas, pero con pocas modificaciones de programación y en el dispositivo se puede expandir a ocho. La operación del PWM, en cada condición, depende de dos datos introducidos por el usuario en las columnas de “Tensión de salida” y “Referencia de tensión de salida”. De esta manera la forma y los valores permitidos para la tensión de salida dependen de la referencia de la misma. Así, cuando la referencia es la entrada los valores permitidos son porcentuales ya sea negativos como positivos y representan el decremento o incremento, respectivamente, de la señal de salida (PWM) con respecto a la señal de tensión medida en la entrada. Por otro lado cuando la referencia es de 5V existen dos casos que el usuario puede introducir los datos: por ciclo de trabajo (tanto por ciento) y por valor de tensión. En ambos casos se fija un valor para el ciclo de trabajo del PWM mientras la señal de entrada permanezca en el rango de operación en que tal valor es válido. En la columna de frecuencia de salida se establece el valor para la salida generadora de frecuencia, otra vez, mientras el rango de operación en que se establece sea validado por la entrada medida.



(Osciloscopio Tektronix TDS 340A)

Figura 34. Salida de PWM (1) para la entrada de tensión (2) en el sistema para el caso menor que 1V en la tabla 4.

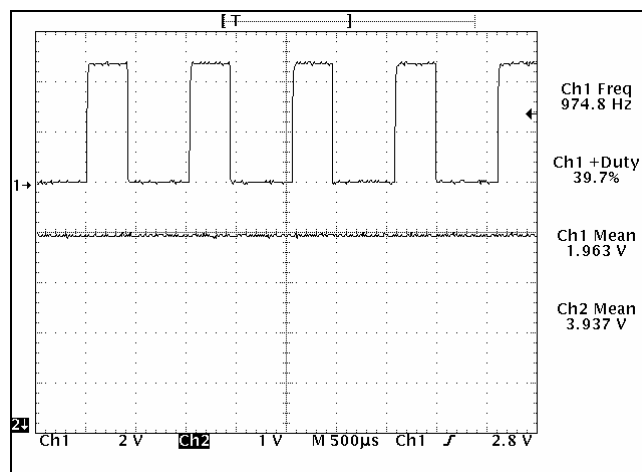


(Osciloscopio Tektronix TDS 340A)

Figura 35. Salida de frecuencia (1) para la entrada de tensión (2) en el sistema para el caso menor que 1V en la tabla 4.

En la figura 34 se ilustra la salida de PWM (canal 1) conjuntamente con la señal de tensión entrante al módulo (canal 2). Esta señal de tensión determina el rango de operación del sistema, como se muestra en la tabla 4. Tomando en cuenta que el valor (en este caso y según la lectura del osciloscopio) es de 0.9643V y la tabla 4, se nota que el rango de operación corresponde a la condición “Menor que 1V” y por lo tanto la salida para la señal de PWM debe de coincidir con un ciclo de trabajo de 5%, la salida de frecuencia con un valor de 50Hz (en la figura 35 se muestra tal caso) y ambas salidas binarias deben estar en estado alto (5V). El caso de PWM, como ya se mencionó, se representa en la figura 34. Aquí se puede observar que el ciclo de trabajo medido por el osciloscopio es de 4.87% (+Duty en la pantalla) lo cual

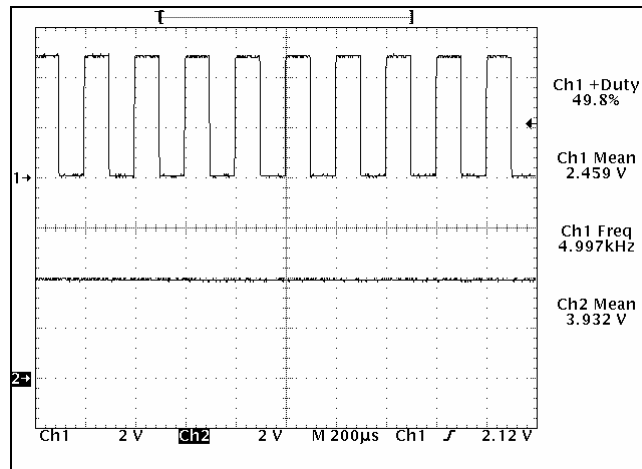
representa un error de 2.6% (ver cálculo del error en Apéndice A.3.4). Este error, aunque pequeño, puede deberse a pequeñas fluctuaciones en la sincronía de las señales medidas, señales de interferencia provenientes de la red eléctrica o la escala utilizada para la medición, lo cual altera levemente la lectura del osciloscopio.



(Osciloscopio Tektronix TDS 340A)

Figura 36. Salida de PWM (1) para la entrada de tensión (2) en el sistema para el caso mayor que 3.5V en la tabla 4.

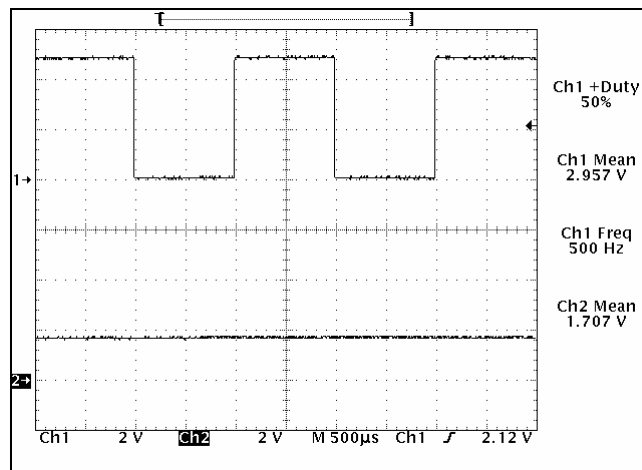
Para representar el comportamiento del módulo en un rango de operación en el cual se toma la referencia para generar la señal de PWM con base a un porcentaje de la señal de entrada, se adquirió la forma de onda mostrada en la figura 36. Otra vez, se compara este gráfico con los datos ingresados en la tabla 4. El nivel de tensión medido en la entrada (canal 2) es de 3.937V que corresponde a la condición “Mayor que 3.5V” en la cual el valor de la señal de PWM debe de permanecer en un valor 50% menor que el valor medido en la entrada. El nivel de tensión en corriente continua (Ch1 Mean) para la señal de PWM medida por el osciloscopio fue de 1.963V. Con el cociente de 0.4986, (ver cálculo en Apéndice A.3.5) obtenido entre el nivel de tensión en corriente continua de la señal de PWM y el valor en la entrada, se puede concluir que la señal de salida equivale a un 49.86% de la señal de entrada o que la señal de entrada fue disminuida en un 49.86% en la salida. Con esto se puede calcular un error de 0.28% (ver cálculo en Apéndice A.3.4) que representa una muy buena aproximación del valor esperado.



(Osciloscopio Tektronix TDS 340A)

Figura 37. Salida de frecuencia (1) para la entrada de tensión (2) en el sistema para el caso mayor que 3.5V en la tabla 4.

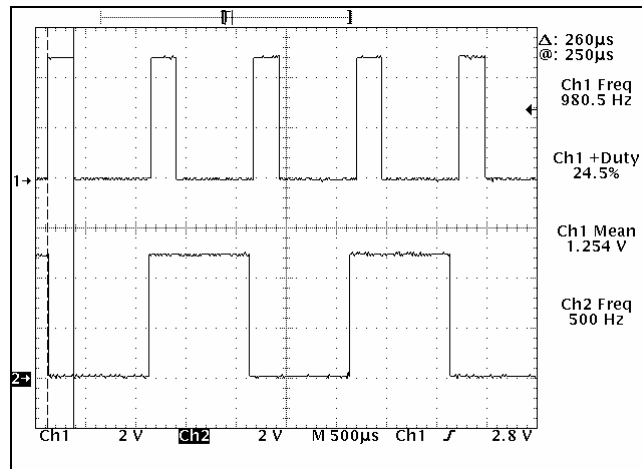
En la figura 37 se encuentran las señales para tensión en la entrada y frecuencia en la salida para el mismo caso. Se puede notar que el valor de la frecuencia es de 4.997KHz, mientras que el valor requerido por el sistema en el rango en cuestión según la tabla 4 es de 5KHz. La diferencia entre ambas señales es equivalente a 0.06%³⁸, un error que puede considerarse como despreciable en términos prácticos.



(Osciloscopio Tektronix TDS 340A)

Figura 38. Salida de PWM (1) para la entrada de tensión (2) en el sistema para el caso Menor que 2V en la tabla 4.

³⁸ En el apéndice A.3.5 se encuentra la formula utilizada para obtener dicho error y algunos casos de cálculo específicos.

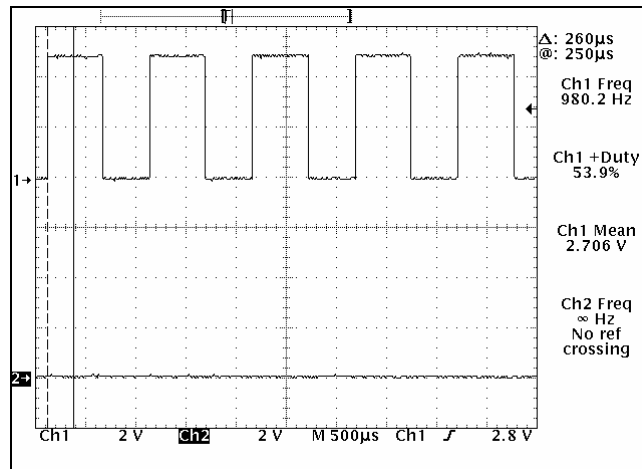


(Osciloscopio Tektronix TDS 340A)

Figura 39. Salidas de PWM (1) y frecuencia (2) para tensiones de entrada entre 1V y 2V (caso Menor que 2V en la tabla 4).

De nuevo, puede observarse como reacciona el módulo ante un nivel de tensión en la entrada, pero ahora en una condición diferente, menor que 2V (ver figura 38). En este caso se tomaron las señales de frecuencia y PWM para demostrar su coexistencia en el tiempo lo que puede apreciarse en la figura 39. En este caso, no se percibe error para la señal de frecuencia, de acuerdo con la captura de pantalla del osciloscopio y el valor que para tal condición. Por otra parte, para la señal de PWM se detecta una diferencia de 0.5% entre el valor que se desea establecer (25%) y el medido por el osciloscopio (24.5%), esto se traduce en un error de 2%³⁸. Esta desviación en la medición, dado su pequeño valor, puede atribuirse a interferencias ambientales que inciden en el osciloscopio de manera reducida, además de la escala de medición temporal utilizada y la resolución del microcontrolador (0.09775% por bit³⁹).

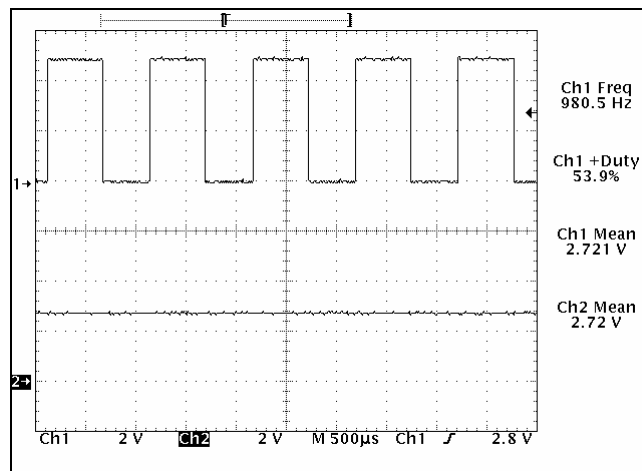
³⁹ Ver apéndice A.3.6



(Osciloscopio Tektronix TDS 340A)

Figura 40. Señales de PWM (1) y frecuencia (2) para el estado por defecto del sistema.

El sistema cuenta con un estado por defecto en caso de que el usuario no especifique condiciones de salida para un rango de valores del sensor en la entrada, ya sea si este corresponde a una señal variante en tensión o una señal variante en frecuencia. En la figura 40 se pueden observar las señales de salida para la modulación de ancho de pulso (PWM) y frecuencia, aquí se puede notar que la señal de frecuencia es nula mientras que la señal de PWM tiene un ciclo útil de 53.9% que representa un nivel de tensión de aproximadamente 2.706V.

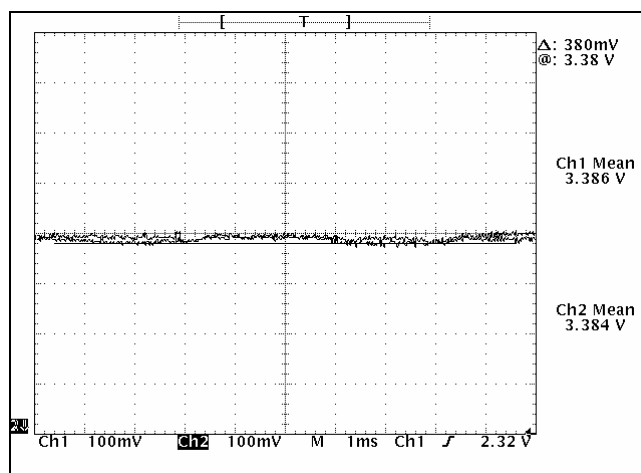


(Osciloscopio Tektronix TDS 340A)

Figura 41. Señales de PWM (1) y tensión en la entrada (2) para el estado por defecto del sistema.

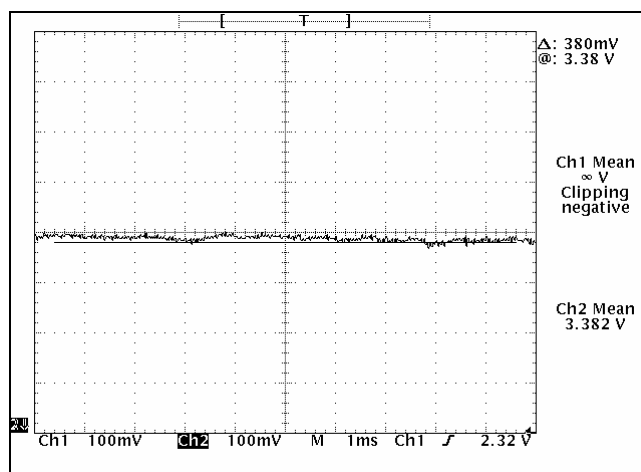
El caso de PWM se esclarece en la figura 41 en donde se observan las señales de PWM en la salida y la de la entrada para el sensor variante en tensión. El caso a resaltar en dicha gráfica es que las señales presentan niveles de tensión en corriente directa muy similares con 2.721V

para la señal de PWM y 2.72V para la señal del sensor variante en tensión, lo cual refleja el propósito del estado por defecto que es, sin más, emular el valor de la señal entrante para el sensor variante en tensión. Con el resto de las salidas en dicho estado el sistema procede a mantenerlas en cero voltios.



(Osciloscopio Tektronix TDS 340A)

Figura 42. Efecto de la medición del módulo sobre un sensor térmico (termo resistencia) cuando este está conectado al microcontrolador (señal de 1 sensor (Ch2) y entrada al microcontrolador (Ch1)).



(Osciloscopio Tektronix TDS 340A)

Figura 43. Efecto de la medición del módulo sobre un sensor térmico (termo resistencia) cuando este está desconectado al microcontrolador (señal de 1 sensor (Ch2) y entrada al microcontrolador (Ch1)).

El efecto de la conexión del módulo sobre una señal de tensión para realizar la medición requerida se muestra en la figura 42 y la figura 43. En la figura 42 aparecen las señales para la tensión de entrada al módulo desde el sensor (canal 2) y en el microcontrolador (canal 1) con niveles en corriente continua de 3.384V y 3.386V respectivamente. Es claro que la diferencia entre ambos valores es debida a pequeños ruidos ambientales, conexiones de medición y la

escala utilizada (100mV/div), ya que los nodos de medición son los mismos. Por otra parte, el caso de desconexión al módulo a esta misma señal, se ejemplariza en la figura 43, en donde se muestra la ausencia de la señal en el microcontrolador y la permanencia de la señal medida desde el sensor. Aquí se nota que la señal permanece con muy pocas alteraciones (~2mV), prácticamente despreciables considerando la escala de medición y el nivel de la señal (la diferencia representa aproximadamente un error de 0.06%).

Tabla 6. Condiciones para el establecimiento de las salidas del sistema con base en las entradas para el caso de la medición de frecuencia.

Condición		Salidas binarias (ON-OFF)	Tensión de salida	Referencia para la tensión de salida	Frecuencia de salida (Hz)
Mayor que	9500 Hz	10	2V	5V	5000
Menor que	8500 Hz	01	100%	5V	10000
Menor que	5000 Hz	01	25%	Entrada	500
Menor que	400 Hz	11	5%	5V	50

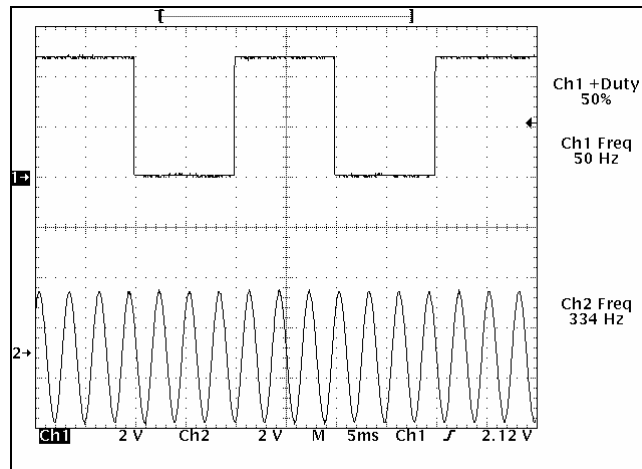
La tabla 6 representa las condiciones para el funcionamiento del módulo, pero en esta ocasión se ha establecido como parámetro a medir una señal variante en frecuencia. El funcionamiento es idéntico al caso de medición de tensión, pero el rango permitido llega hasta un valor de 10KHz. En la tabla 7 se encuentran los rangos de operación para este caso.

Tabla 7. Rangos de operación para las condiciones de la tabla 6.

Condición		Rangos (KHz)
Mayor que	9.5KHz	[9.5, 10]
Menor que	8.5KHz	[5.001, 8.5]
Menor que	5KHz	[0.401, 5]
Menor que	400Hz	[0, 0.4]

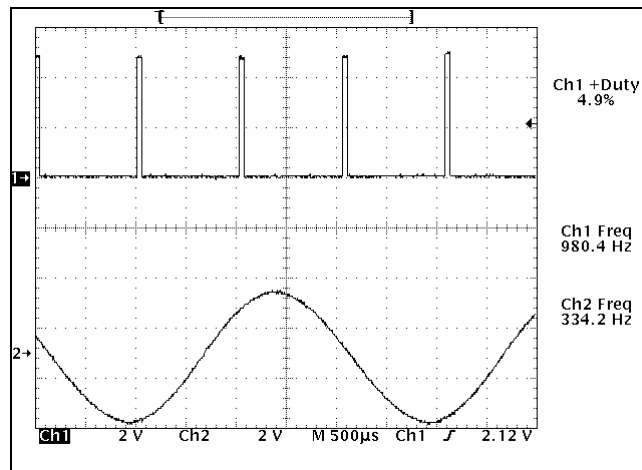
Otra diferencia con respecto al caso de medición de tensión, es que la resolución se estableció en 1Hz ya que la medición de frecuencia se realiza con variables enteras.

Para corroborar el funcionamiento del módulo en función de los datos ingresados se adquirieron gráficas para algunos de los casos de operación.



(Osciloscopio Tektronix TDS 340A)

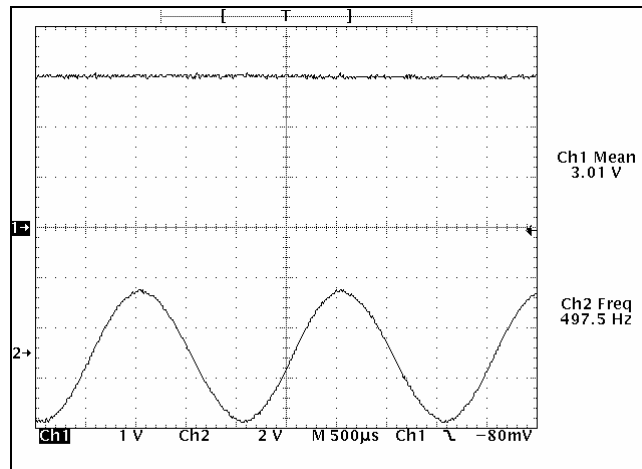
Figura 44. Salida de frecuencia (1) para la entrada de frecuencia (2) en el sistema para el caso Menor que 400Hz en la tabla 6.



(Osciloscopio Tektronix TDS 340A)

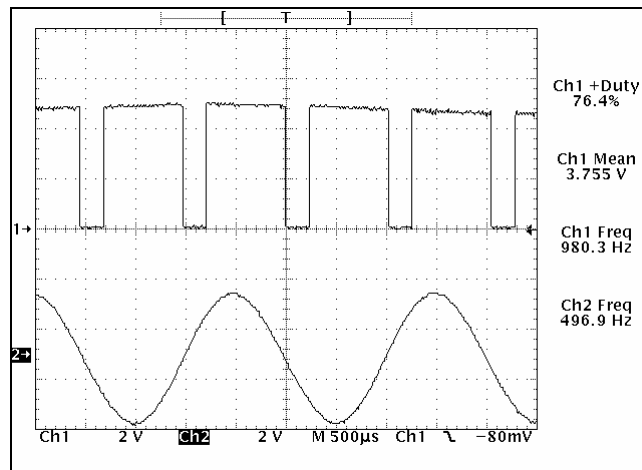
Figura 45. Salida de PWM (1) para la entrada de frecuencia (2) en el sistema para el caso Menor que 400Hz en la tabla 6.

En la figura 44 y la figura 45 se muestran las salidas de frecuencia y PWM para la condición Menor que 400Hz. En esta condición se requiere que la salida de frecuencia se establezca a 50Hz y la salida de PWM con un 5%. En la figura 44 se muestra la salida de frecuencia obtenida para el caso en cuestión. Es notorio que el error tiende a 0% o no se percibe por el osciloscopio. Por otro lado, en la figura 45 se observa la salida de PWM. El ciclo de trabajo es de 4.9% obteniendo un error de 2% con respecto al ciclo de trabajo esperado. Esto, nuevamente, puede justificarse debido a la escala empleada y la resolución del instrumento para medir un ancho de pulso de esta dimensión.



(Osciloscopio Tektronix TDS 340A)

Figura 46. Entrada de tensión CD (1) en el instante de medición de la entrada de frecuencia (2) en el sistema para el caso Menor que 5KHz en la tabla 6.

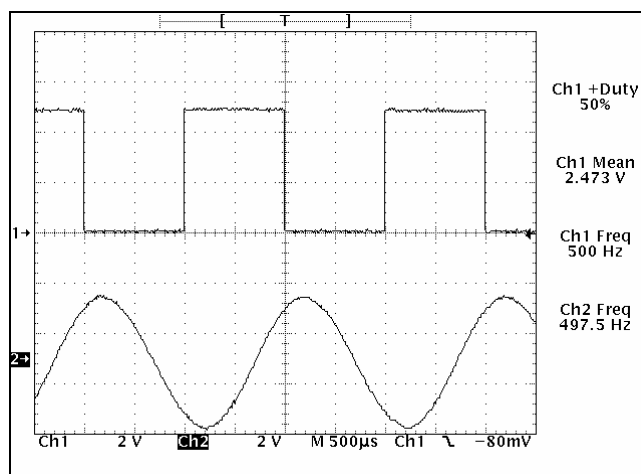


(Osciloscopio Tektronix TDS 340A)

Figura 47. Salida de PWM (1) para la entrada de frecuencia (2) en el sistema para el caso Menor que 5KHz en la tabla 6.

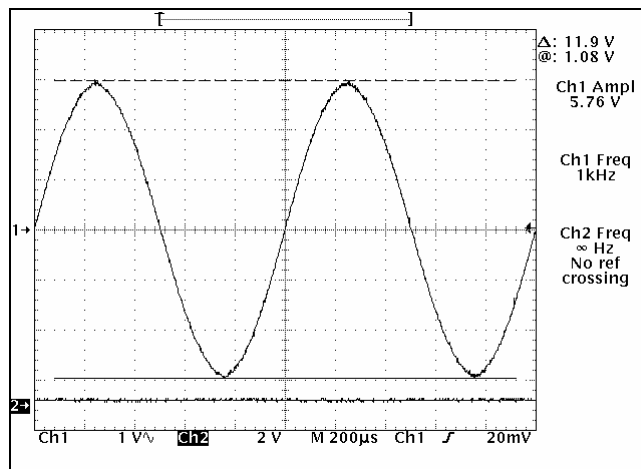
El comportamiento del sistema ante un incremento porcentual de la señal de tensión medida en la salida de PWM se puede observar en la figura 46 y la figura 47. En estas dos figuras el sistema se encuentra en la condición Menor que 5000Hz, pero solo se analizarán las señales de entrada de nivel de tensión y la salida de PWM. En la figura 46 se observa un nivel de tensión en la entrada de 3.01V, mientras que en la figura 47 se muestra la salida de PWM con un nivel de tensión en corriente continua de 3.755V. Para la condición en que entra la frecuencia medida se requiere que la salida de PWM tenga un nivel de corriente continua incrementado en 25% con respecto a la señal de tensión de entrada. De acuerdo a esto el nivel de tensión CD (corriente continua) en la salida PWM debe ser de 3.7625V. En la figura 47 se observa que el

nivel para esta señal medido por el osciloscopio es de 3.755V. El porcentaje de error de la señal obtenida es de aproximadamente 0.2% con lo que se puede decir que el valor obtenido, para efectos prácticos, es muy cercano al valor esperado. Con respecto a la salida de frecuencia en este caso se obtiene un valor de 500Hz que coincide con el valor establecido en el microcontrolador (ver figura 48).



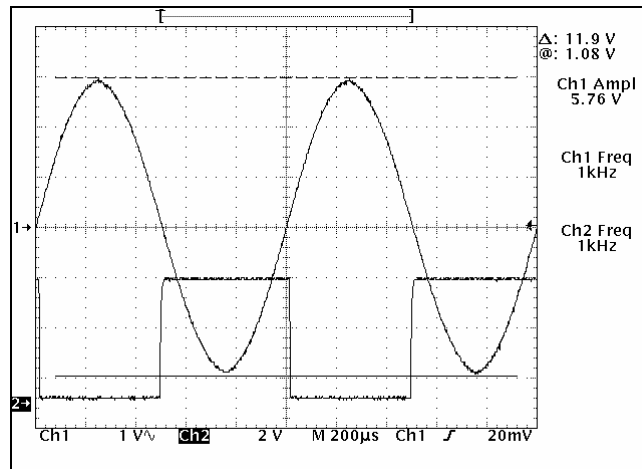
(Osciloscopio Tektronix TDS 340A)

Figura 48. Salida de frecuencia (1) para la entrada de frecuencia (2) en el sistema para el caso Menor que 5KHz en la tabla 6.



(Osciloscopio Tektronix TDS 340A)

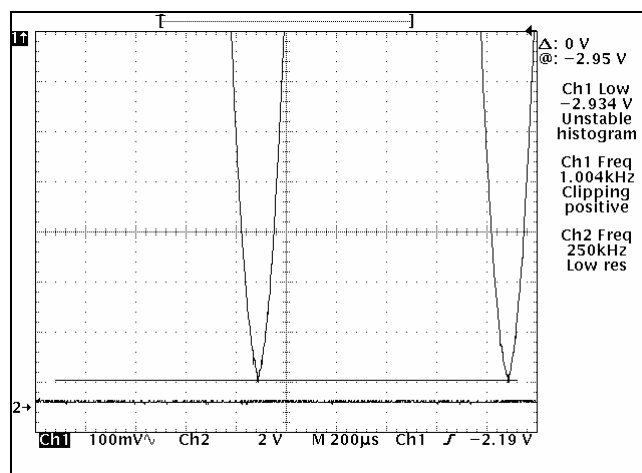
Figura 49. Señal senoidal a medir por el módulo a 1V/Div.



(Osciloscopio Tektronix TDS 340A)

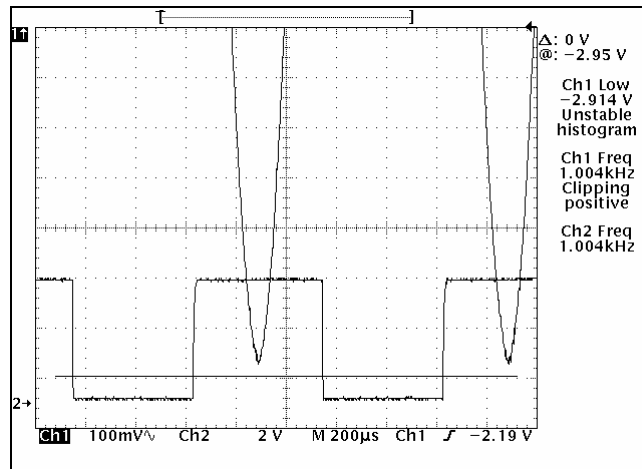
Figura 50. Efecto de la medición del módulo sobre una señal senoidal (canal 1 señal senoidal a 1V/Div, canal 2 entrada al microcontrolador).

El efecto que tiene el proceso de medida del módulo sobre la señal de frecuencia se observa en la figura 49 y la figura 50. En la figura 49 se muestra la señal a medir desconectada al módulo. Cuando se realiza la medición, no se percibe cambio aparente en la señal medida como puede apreciarse en la figura 50 en donde aparecen dicha señal y la señal entrante al microcontrolador. En este caso el cambio en la señal medida es prácticamente imperceptible por el osciloscopio a la escala seleccionada, aun así es necesario notar que el cambio en la frecuencia entre ambos casos es nulo de acuerdo a los datos adquiridos por el osciloscopio.



(Osciloscopio Tektronix TDS 340A)

Figura 51. Señal senoidal a medir por el módulo a 100mV/Div.

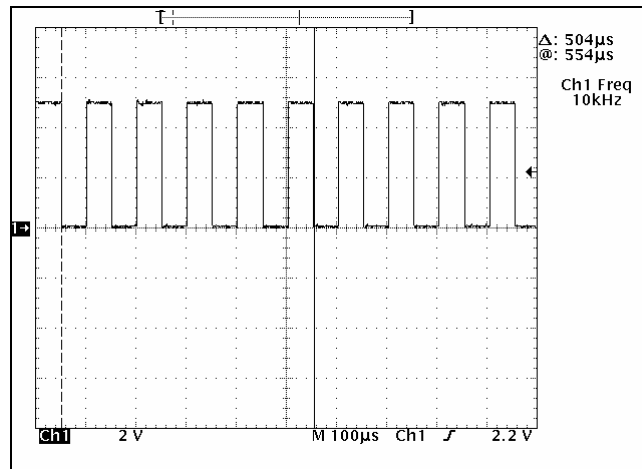


(Osciloscopio Tektronix TDS 340A)

Figura 52. Efecto de la medición del módulo sobre una señal senoidal (canal 1 señal senoidal a 1V/Div, canal 2 entrada al microcontrolador).

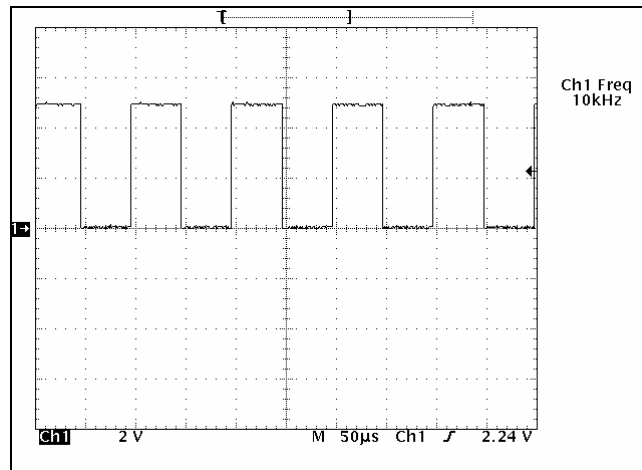
Para poder observar el cambio en la amplitud de la señal variante en frecuencia al conectarla al módulo fue necesario variar la escala de tensión de 1V/Div a 100mV/Div. Esto se representa en la figura 51 y la figura 52. En la primera figura se observa, otra vez, la señal a medir previa a la conexión, mientras que en la figura siguiente se presenta la misma señal, pero ahora conectada al módulo. De nuevo, con este cambio de escala, se observa que no se puede determinar un cambio en la frecuencia, contrariamente con el valor pico de la señal en el semiciclo negativo (la medición se realizó con este semiciclo debido a que el módulo solo utiliza este ciclo para la medición), que previo a la conexión tiene un valor de -2.934V y conectado de -2.914V. Con lo anterior se puede determinar que la conexión al módulo afecta la señal de entrada en aproximadamente 0.68%. A partir de esto se puede considerar que la interferencia del módulo es despreciable para la señal medida.

Dado que el módulo se basa en un sistema digital, existen ciertas limitaciones debido a la naturaleza discreta de los valores y datos en él. Para esclarecer, en alguna medida, dichas limitaciones se realizaron mediciones, estableciendo en el módulo valores límite para los que la resolución del microcontrolador a la frecuencia de operación utilizada (16MHz) es una restricción. Los casos para los que hay alteraciones significativas entre los valores esperados y los valores obtenidos son los de establecimiento de frecuencia en el módulo.



(Osciloscopio Tektronix TDS 340A)

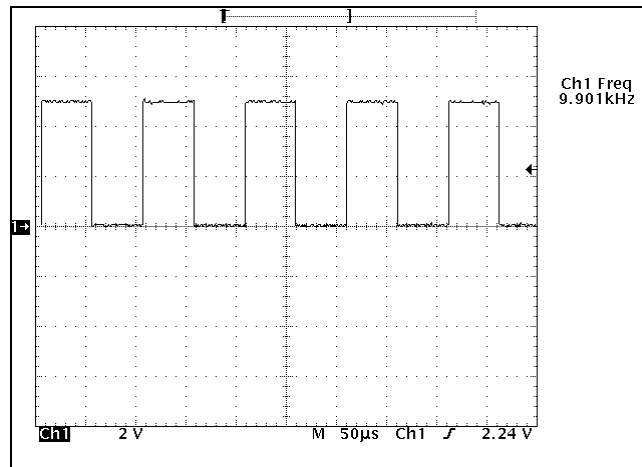
Figura 53. Salida de frecuencia para un valor de 10000Hz introducido en el módulo.



(Osciloscopio Tektronix TDS 340A)

Figura 54. Salida de frecuencia para un valor de 9976Hz introducido en el módulo.

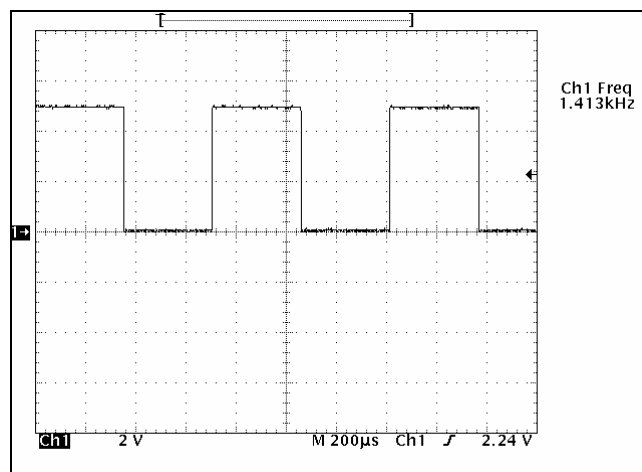
En la figura 53 se observa una señal de 10KHz en la salida de frecuencia. Lo mismo ocurre en la figura 54, pero la diferencia sustancial entre ambas señales es el valor esperado. En el primer caso el usuario espera obtener el valor que aparece en la gráfica (10KHz), pero en el segundo caso la entrada digitada por el usuario fue de 9976Hz.



(Osciloscopio Tektronix TDS 340A)

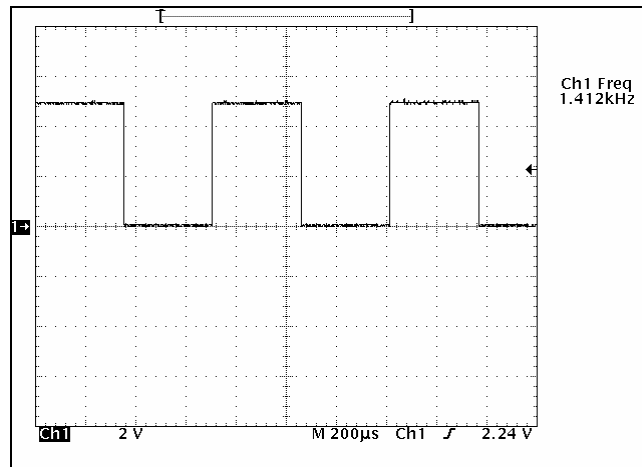
Figura 55. Salida de frecuencia para un valor de 9925Hz introducido en el módulo.

Por otra parte en la figura 55 se observa que la medición del osciloscopio fue de 9901Hz, no obstante la intención del usuario era la de obtener una señal de 9925Hz. Este comportamiento se debe a que la unidad temporal del microcontrolador para generar frecuencia es de 500ns a la frecuencia de operación empleada (ver Apéndice A.3.8). Esto significa que si los periodos de las señales establecidas no son múltiplos de ese valor su exactitud se verá afectada. De esta manera, la unidad temporal de microcontrolador afecta de forma más significativa a las frecuencias con mayor frecuencia y de manera menos apreciable las frecuencias bajas.



(Osciloscopio Tektronix TDS 340A)

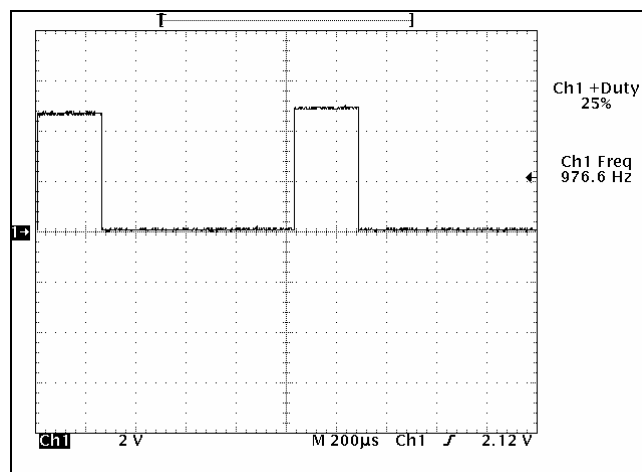
Figura 56. Salida de frecuencia para un valor de 1413Hz introducido en el módulo.



(Osciloscopio Tektronix TDS 340A)

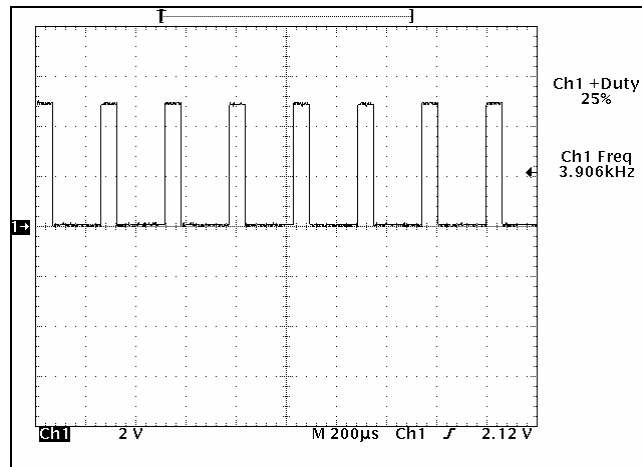
Figura 57. Salida de frecuencia para un valor de 1412Hz introducido en el módulo.

En un caso más concreto, el usuario puede establecer variaciones de frecuencia en la señal de salida de 1Hz para frecuencias inferiores a aproximadamente 1414Hz (ver cálculo en Apéndice A.3.9), como se nota en la figura 56 y la figura 57. En estas figuras el usuario, en primera instancia, especifica un valor de frecuencia de 1413Hz que es obtenido en la salida de frecuencia satisfactoriamente (ver figura 56), luego establece un valor de 1412Hz para esta misma característica y nuevamente, el resultado esperado es confirmado por la señal de frecuencia obtenida (ver figura 57).



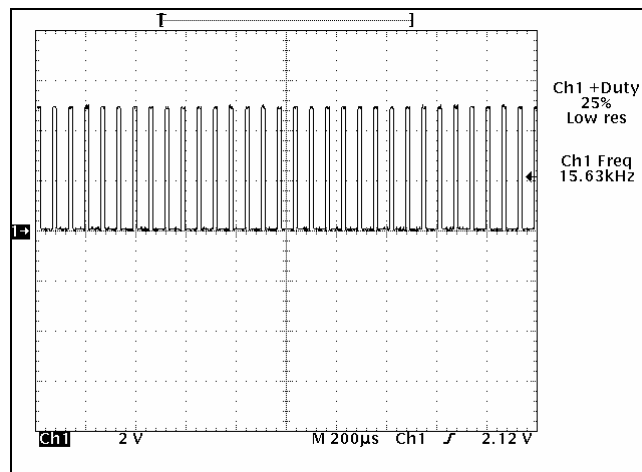
(Osciloscopio Tektronix TDS 340A)

Figura 58. Salida de PWM con 25% de ciclo de trabajo y un periodo de 255 en modo x16.



(Osciloscopio Tektronix TDS 340A)

Figura 59. Salida de PWM con 25% de ciclo de trabajo y un periodo de 255 en modo x4.



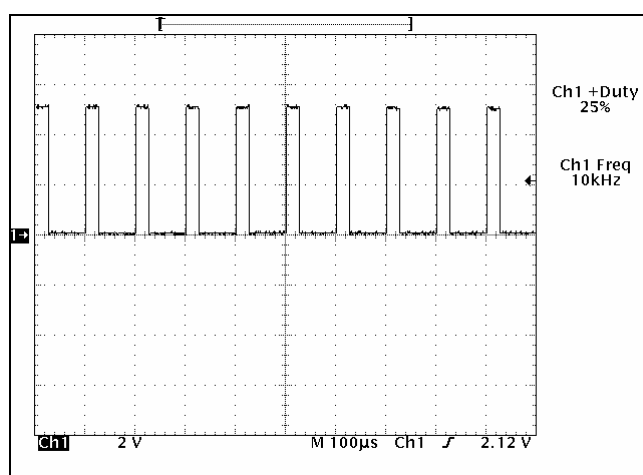
(Osciloscopio Tektronix TDS 340A)

Figura 60. Salida de PWM con 25% de ciclo de trabajo y un periodo de 255 en modo x1.

En cuanto a la señal de PWM, existe la opción de poder establecer la frecuencia de esta. En la figura 58, la figura 59 y la figura 60 se ejemplifican tres distintos casos de frecuencia para una señal de PWM con un ciclo de trabajo de 25%. En estos casos la variación se efectuó cambiando el factor del divisor de frecuencia existente en el microcontrolador para el contador que determina la unidad temporal para la señal de PWM. Los factores para esto son 1, 4 y 16. Estos factores dividen la frecuencia para un contador de 8 bits con el que se pueden hacer cuentas desde 0 hasta 255. Con los dos elementos anteriores se configura la frecuencia para la señal de PWM. De las figuras se obtienen los datos de frecuencia que el módulo generó, para x16 se obtuvo 976.6Hz, para x4 3.906kHz y para x1 15.63kHz. Los valores teóricos

correspondientes son 976.5625Hz, 3.90625KHz y 15.625KHz (ver Apéndice A.3.10). El error porcentual es de 0.004%, 0.006% y 0.032% respectivamente, esto demuestra un buen resultado en el establecimiento de los datos de frecuencia para la señal de PWM. Es importante mencionar que estos son los valores mínimos de frecuencia que se pueden obtener en cada factor divisor (registro cargado a 255).

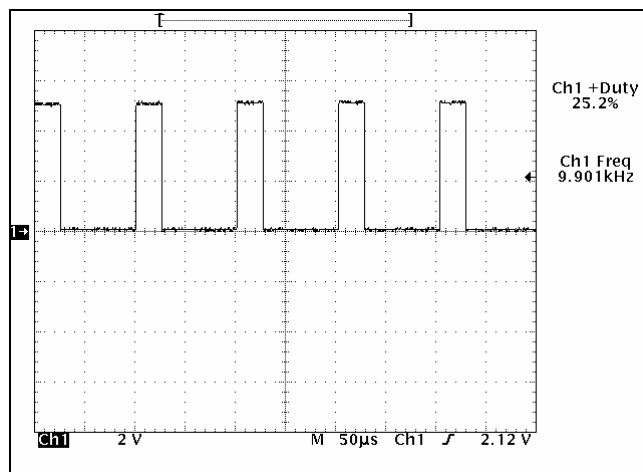
Otro aspecto a considerar en el establecimiento de la frecuencia para la señal de PWM es la resolución de la misma. La resolución varía de acuerdo al modo (divisor de frecuencia) que se está utilizando, además de la carga del registro (en este caso también llamado periodo).



(Osciloscopio Tektronix TDS 340A)

Figura 61. Salida de PWM con 25% de ciclo de trabajo y un periodo de 99 en modo x4.

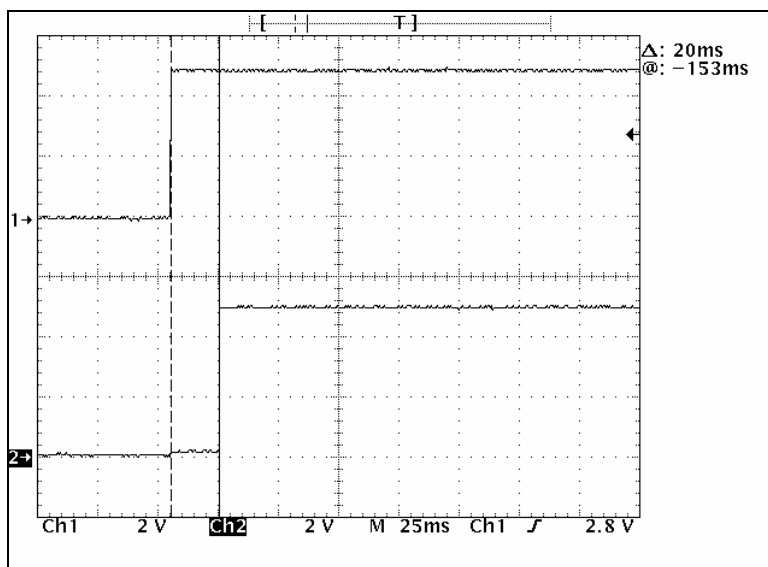
En la figura 61 se estableció un periodo de 99 en modo x4 que teóricamente corresponde a un valor de 10KHz lo cual es corroborado en dicha gráfica.



(Osciloscopio Tektronix TDS 340A)

Figura 62. Salida de PWM con 25% de ciclo de trabajo y un periodo de 100 en modo x4.

Colocando ahora 100 para el valor de periodo en el mismo modo del caso anterior se obtuvo la gráfica que se muestra en la figura 62. En esa figura se observa que el valor de frecuencia es de 9.901KHz. El valor teórico para esta salida de frecuencia es de 9.90099KHz, lo representa un error porcentual que tiende a cero. Para las dos figuras anteriores es de resaltar el salto de frecuencia que ocurre en la señal de salida con una diferencia en las señales establecidas en el microcontrolador de 1 bit. Esto se debe a que, a diferencia de la señal de frecuencia, la configuración de frecuencia para la señal de PWM se hace, además, con la utilización del divisor de frecuencia antes descrito y la unidad temporal corresponde a la duración del ciclo de instrucción (250ns para la configuración actual). Así, la unidad temporal para la frecuencia de la señal de PWM se escala por un factor igual al escogido para el divisor de frecuencia. Por lo tanto, para un escalamiento de 16 la unidad temporal será de 4µs, con 4 es de 1µs y la unidad, como ya se dijo, es de 250ns. Con base a lo anterior, una señal de PWM a 10KHz (como en la figura 61) tiene un periodo de 100µs, aumentando en una unidad temporal con un factor de 4 dicha señal, se obtiene un periodo de 101µs que equivale a una frecuencia de aproximadamente 9900.99Hz (ver figura 62). Esto permite al usuario realizar configuraciones de frecuencia para la señal de PWM en múltiplos de la unidad temporal correspondiente al modo del divisor de frecuencia que a su vez puede ser configurado por el usuario (ver Manual de usuario y sección 5.2.3 en la “Descripción detallada de la solución”).



(Osciloscopio Tektronix TDS 340A)

Figura 63. Señales de alimentación (1) y reset (2) del regulador L4947.

En la figura 63 se presentan las señales de encendido y reinicio del regulador L4947⁴⁰. Se puede apreciar la característica de encendido para este regulador, esta característica resulta de importancia para el desarrollo del proyecto ya que evita secuencias de inicio falsas puesto que el microcontrolador no operara hasta 20ms después de que la señal de salida del regulador aguardando a que esta se estabilice. En este punto, se puede recalcar que las mediciones anteriores no se realizaron sin intervenir⁴¹ la constancia de la fuente de alimentación, con el fin de corroborar que las distintas configuraciones del módulo permanecían inalterables, a menos que se realizará una configuración nueva.

Tabla 8. Costos de los materiales utilizados en la implementación del prototipo.

Material	Costo (\$)
PIC18F2550 (Microcontrolador)	10.00
LM4947 (Regulador)	3.46
LM2903 (Comparador)	0.50
LM324 (Amplificador Operacional)	0.80
Conector USB	0.81
Cristal	0.50
Capacitores, resistencias, diodos	5.80
Chasis	5.00
Impreso	6.00
TOTAL	32.87

Con la tabla 8 se pretende verificar que los costos de la implementación del prototipo no exceden el valor límite estipulado de \$50. En la tabla se hace un desglose del costo de los materiales principales en la implementación del prototipo arrojando como costo final de \$32.87. De esta manera se corrobora que el costo final del dispositivo no excede el límite mencionado. El tamaño final del módulo se puede observar en el apéndice A.5, donde se observa el diseño del impreso y la posición de los componentes empleados. Dicho tamaño es muy cercano a la propuesta al inicio de 70cm² (tiene un área de aproximadamente 70.15cm²). Un aspecto a resaltar del diseño del impreso es la limitación en la fabricación del mismo. Por este aspecto se tomaron las debidas precauciones en el grosor de las pistas (superior a 0.9mm) y su separación (superior a 0.5mm), además de utilizar solamente una capa de cobre. Estas restricciones surgen de experiencias previas de la empresa.

⁴⁰ Más detalles en referencia [19].

⁴¹ Algunas intervenciones superaron las 24 horas.

Capítulo 7: Conclusiones y recomendaciones

6.1 Conclusiones

1. El prototipo tiene un desarrollo de un 90%, en donde el 10% restante corresponde a la implementación del circuito impreso y pruebas de campo.
2. El aislamiento eléctrico con amplificadores operacionales demostró ser efectivo para el muestreo de las señales sin interferir significativamente en su forma o magnitud.
3. La configuración del módulo únicamente se logra utilizando un computador con conexión USB y el programa realizado en el proyecto para tal fin.
4. La configuración del módulo determina el comportamiento del mismo ante las señales medidas por este (tensión o frecuencia).
5. La resolución de la generación de frecuencia se ve afectada por el diferencial de tiempo mínimo que es de 500ns obteniendo cambios de frecuencia mayores a 1Hz para frecuencias superiores a 1414Hz y cambios menores para valores inferiores de frecuencia.
6. La resolución para la configuración de la frecuencia de la señal de PWM varía según el valor establecido como divisor de frecuencia. Este valor puede ser 1, 4 o 16. El diferencial de tiempo, con un divisor unitario, es de 250ns ; con un divisor de 4 es de $1\mu\text{s}$ y con un divisor de 16 es de $4\mu\text{s}$.
7. La resolución para el establecimiento del ancho de pulso de la señal de PWM depende del valor almacenado en el registro de periodo del microcontrolador (PR2), obteniendo la máxima resolución con un valor de 255 (valor máximo del registro), mientras que para valores inferiores también disminuye la resolución del ancho de pulso.
8. Para establecer un enlace serie con el microcontrolador 18F2550, impactando de forma mínima el programa del computador, es necesario asociar un controlador específico (el *usbser.sys* que se incluye en la instalación de WINDOWS) con un archivo “*.inf” y un programa específico en el microcontrolador. Con esto se logra emular un puerto de comunicaciones serie COM.
9. El regulador L4947 retarda el funcionamiento del microcontrolador hasta contar con una alimentación estable mediante una señal de reinicio.

6.2 Recomendaciones

1. Para obtener la mejor resolución en la configuración del ciclo de trabajo se deben utilizar periodos de 255 cuentas en la generación de PWM.
2. En caso de fallas en el sistema causados por un mal uso o lecturas inesperadas en las señales medidas es adecuado incluir un medio para el bloqueo del sistema implementando códigos de seguridad o error para notificar al usuario que debe ponerse en contacto con el fabricante o distribuidor del producto.
3. Diseñar una interfaz con el usuario más robusta que permita modos gráficos para la interpretación de las señales medidas en el módulo y guías paso a paso sobre la configuración del mismo.
4. Utilizar cristales de 48MHz para la temporización del microcontrolador con el propósito de evadir, en lo posible, el uso de los divisores de frecuencia internos del microcontrolador reduciendo las interferencias que pueden surgir al usarlos.
5. Utilizar amplificadores operacionales especializados para aplicaciones automotrices que reaccionan de mejor forma al entorno del vehículo en comparación con los amplificadores operacionales de propósito general.
6. Con el objetivo de disminuir los efectos del ruido en las salidas del sistema cuando estas se miden sin carga, utilizar configuraciones no inversoras con ganancias tendientes a la unidad en lugar de seguidores de tensión.
7. El tamaño del circuito impreso puede reducirse significativamente si para su implementación y diseño se usa una placa con doble capa de cobre (superior e inferior).
8. El servicio podrá ser más ágil creando un banco de datos con las configuraciones más comunes para el afinamiento de los vehículos en casos específicos.
9. Implementar bancos de datos para recorrer la información almacenada sobre configuraciones del módulo y los factores de conversión de frecuencia a velocidad de forma más eficiente.

Bibliografía y Referencias.

- [1] “AutoEnciclopedia” [en línea] “Otto, Nicolás Ausguto” <<http://www.autoenciclopedia.com/news.aspx?nid=1822>> [Consulta: 24 sep. 2006].
- [2] “WIKIPEDIA, La enciclopedia libre” [en línea] “Ciclo de cuatro tiempos”, 28 ago. 2006 <http://es.wikipedia.org/wiki/Ciclo_de_cuatro_tiempos> [Consulta: 24 sep. 2006].
- [3] BOSCH. (Alemania). Sistema combinado de encendido e inyección de gasolina con regulación Lambda Motronic: Instrucción Técnica. 2 ed. S.I. Departamento de Impresos Técnicos (KH/VDT), 1985.
- [4] “Auto City” [en línea] “Glosario” <<http://www.autocity.com/glosario/index.html?caracter=r>> [Consulta: 25 sep. 2006].
- [5] Enrique Celis. “Automecánico” [en línea] “PORT FUEL INJECTION”, junio 2006 <<http://www.automecanico.com/auto2003/pfi.html>> [Consulta: 26 sep. 2006].
- [6] Universidad Politécnica de Valencia [en línea] “COMPARATIVA DE MICROCONTROLADORES ACTUALES” <<http://server-die.alc.upv.es/asignaturas/LSED/2002-03/Micros/downloads/trabajo.pdf>> [Consulta: 02 oct. 2006].
- [7] “WIKIPEDIA, La enciclopedia libre” [en línea] “Memoria ROM”, 26 sep. 2006, <http://es.wikipedia.org/wiki/Memoria_ROM> [Consulta: 27 sep. 2006].
- [8] “WIKIPEDIA, La enciclopedia libre” [en línea] “Memoria PROM”, 31 ago. 2006 <http://es.wikipedia.org/wiki/Memoria_PROM> [Consulta: 27 sep. 2006].
- [9] “WIKIPEDIA, La enciclopedia libre” [en línea] “EPROM”, 6 ago. 2006 <<http://es.wikipedia.org/wiki/EPROM>> [Consulta: 27 sep. 2006].
- [10] “WIKIPEDIA, La enciclopedia libre” [en línea] “EEPROM”, 29 ago. 2006 <<http://es.wikipedia.org/wiki/EEPROM>> [Consulta: 27 sep. 2006].
- [11] “WIKIPEDIA, La enciclopedia libre” [en línea] “Memoria flash”, 23 sep. 2006 <http://es.wikipedia.org/wiki/Memoria_flash> [Consulta: 27 sep. 2006].
- [12] Leroy Davis. [en línea] “EIA-232 Bus”, 17 sep. 2006 <http://www.interfacebus.com/Design_Connector_RS232.html> [Consulta: 23 sep. 2006].
- [13] Leroy Davis. [en línea] “Encoding Dictionary, terms, and definitions”, 23 sep. 2006 <http://www.interfacebus.com/Definitions.html#NRZ_Encoding> [Consulta: 23 sep. 2006].
- [14] “WIKIPEDIA, The free Encyclopedias” [en línea] “Universal Serial Bus” 27 sep. 2006 <http://en.wikipedia.org/wiki/Universal_Serial_Bus> [Consulta: 27 sep. 2006].
- [15] “WIKIPEDIA, The free Encyclopedias” [en línea] “I²C” 20 sep. 2006 <<http://en.wikipedia.org/wiki/I%C2%B2C>> [Consulta: 7 oct. 2006].

- [16] “WIKIPEDIA, The free Encyclopedia” [en línea] “ Serial Peripheral Interface Bus ” 26 sep. 2006 <http://en.wikipedia.org/wiki/Serial_Peripheral_Interface_Bus> [Consulta: 7 oct. 2006].
- [17] Malvino, Albert Paul. Principios de Electrónica. 6 ed. Madrid: MacGraw-Hill, 2000. Páginas de la 991 a la 1038.
- [18] Coughlin, Robert F.; Driscoll, Frederick F. Amplificadores operacionales y circuitos integrados lineales. 5 ed. México: Prentice Hall, 1999. Páginas de la 402 a la 404.
- [19] “Digi-Key.com” [en línea]<<http://www.st.com/stonline/books/pdf/docs/1353.pdf>> [Consultada: 19 jun 2007].
- [20] “Digi-Key.com”[en línea]<<http://focus.ti.com/lit/ds/symlink/lm2903.pdf>> [Consultada: 19 jun 2007].
- [21] “Microchip” [en línea] <<http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/39632D.pdf>> [Consulta: 20 jun 2007]
- [22] “Microchip” [en línea] <<http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/51264B.pdf>> [Consulta: 20 jun 2007]
- [23] “Microchip” [en línea] <<http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/51331B.pdf>> [Consulta: 20 jun 2007]
- [24] Universal Serial Bus Specification [en línea]. 27 abr 2000/Revisión 2.0. “Chapter 9, USB Device Framework”, pág. 240. <<http://www.usb.org/developers/docs/>> [Consulta: 25 jun 2007]
- [25] Rawin Rojvanit, Microchip Technology Inc. Migrating Applications to USB from RS-232 UART with Minimal Impact on PC Software [en Línea]. “APPENDIX A: CDC DESCRIPTOR SCHEMA FOR SERIAL EMULATION”, pág. 12. <<http://ww1.microchip.com/downloads/en/AppNotes/00956b.pdf> > [Consulta: 25 jun 2007]
- [26] Universal Serial Bus Specification [en línea]. Revisión 2.0. “Chapter 8, Protocol Layer”, pág. 201-202. <<http://www.usb.org/developers/docs/>> [Consulta: 25 jun 2007]
- [27] Universal Serial Bus Class Definitions for Communication Devices [en línea]. 19 ene 1999/Versión 1.1. “4. Class-Specific Codes for Communication Devices”, pág. 28. <http://www.usb.org/developers/devclass_docs/usbcdc11.pdf> [Consulta: 25 jun 2007]

Apéndices

Apéndice A.1 Glosario

Admisión, etapa de. Etapa del ciclo Otto que permite el paso de la mezcla de aire combustible. La válvula de admisión se encuentra abierta y la de escape cerrada. El pistón se desplaza hasta el PMI.

Escape, etapa de. Etapa del ciclo Otto en donde se produce el escape de los gases residuales de la combustión. La válvula de escape permanece abierta y la de admisión permanece cerrada, mientras el pistón se desplaza hacia el PMS, en donde un nuevo ciclo comienza.

Expansión, etapa de. Etapa del ciclo Otto en que la bujía genera una chispa la cual hace la combustión de la mezcla haciendo que esta se expanda rápidamente debido al aumento de temperatura con lo que el pistón se desplaza hasta el PMI. En esta fase es el único momento en que se realiza trabajo.

Ciclo Otto. Ciclo del motor de combustión interna de cuatro tiempos (Admisión, compresión, expansión y escape).

Compresión, etapa de. Etapa del ciclo Otto que el cilindro disminuye su volumen mediante el movimiento del pistón hacia el PMS, comprimiendo la mezcla aire combustible.

PMI. Punto muerto inferior. Desplazamiento máximo del pistón en donde el volumen en el cilindro es máximo.

Coefficiente de aire. También conocido como λ (lambda). Se refiere a la relación entre el volumen de aire aspirado y el volumen de aire teóricamente necesario teóricamente para que la combustión sea óptima (aproximadamente 1000 litros de aire por litro de gasolina).

PMS. Punto muerto superior. Desplazamiento máximo del pistón en donde el volumen en el cilindro es mínimo.

Ralentí. Número de revoluciones por minuto a que se ajusta un motor para mantener su funcionamiento de manera estable sin que el acelerador este accionado.

Régimen. Revoluciones por minuto a las que gira el eje del motor.

Firmware. Programa que se descarga a un dispositivo programable.

Apéndice A.2 Información sobre la empresa

AUTOCOM desde 1997, es una empresa dedicada a brindar soluciones eficientes de computación automotriz mediante alta tecnología y personal calificado, manteniendo un alto interés en la satisfacción del cliente. Además la empresa tiene como visión llegar a ser los líderes en el servicio de computación automotriz en el mercado regional. Los valores que propulsan el crecimiento de la empresa son la innovación, calidad, compromiso, servicio, confianza y honestidad.

Apéndice A.3 Cálculos

Apéndice A.3.1 Cálculo de máxima resolución para la generación de frecuencia

$$\text{Resolución máx.} = \frac{4(\textit{prescalar})}{(\textit{frec}_{osc})}$$

con:

\textit{frec}_{osc} = Frecuencia de operación.

$\textit{prescalar}$ = Divisor de frecuencia para el contador.

Con un pre escalar de 1 y una frecuencia de operación de 16MHz:

$$\text{Resolución máx.} = \frac{4(1)}{(16MHz)} = 250ns$$

Para cada semiciclo.

Apéndice A.3.2 Cálculo de mínima frecuencia

$$\text{Frecuencia mín.} = \frac{(\textit{frec}_{osc})}{4(2)(\textit{prescalar})(\textit{cuenta máx.})}$$

con:

\textit{frec}_{osc} = Frecuencia de operación.

$\textit{prescalar}$ = Divisor de frecuencia para el contador.

$\textit{cuenta máx.}$ = Valor máximo al que llega el contador.

El factor 4 corresponde al divisor interno del microcontrolador y el factor 2 corresponde a los semiciclos en la generación de frecuencia. Con un contador de 16 bits y un valor máximo de pre-escala de 1 se tiene:

$$\text{Frecuencia mín.} = \frac{(16\text{MHz})}{4(2)(1)(2^{16})} = 30.51752$$

Apéndice A.3.3 Cálculo de máximo periodo en la generación de frecuencia.

$$\text{Periodo}_{\text{Máximo}} = (2\text{semiciclos})(2^{24}\text{ cuentas})\left(\frac{4}{16\text{Mhz}}\text{segundos por cuenta}\right) = 8.388608\text{s}$$

Apéndice A.3.4 Cálculo de porcentajes de error.

Ecuación general:

$$\%ERROR = \left| \frac{\text{Valor}_{\text{teórico}} - \text{Valor}_{\text{experimental}}}{\text{Valor}_{\text{teórico}}} \right| \times 100\%$$

Para ciclo de trabajo:

$$\%ERROR = \left| \frac{5\% - 4.87\%}{5\%} \right| \times 100\% = 2.6\%$$

Para nivel de tensión entrada-salida:

$$\%ERROR = \left| \frac{50\% - 49.86\%}{50\%} \right| \times 100\% = 0.28\%$$

Apéndice A.3.5 Cálculo de cociente $\text{PWM}_{\text{CD}}/V_{\text{entrada}}$.

$$\text{Cociente} = \frac{1.963\text{V}}{3.937\text{V}} = 0.4986$$

Apéndice A.3.6 Cálculo de la resolución porcentual del ciclo de trabajo para la señal de PWM.

Para el cálculo de la resolución se necesita tomar en cuenta el valor en bits que se establece en el periodo para la señal de PWM (esto es ampliado en la sección 5.2.3.1). Este periodo determina el máximo valor que puede alcanzar el PWM (100%) como sigue:

$$\text{Ciclo útil}_{\text{máximo en bits}} = 4(\text{periodo}_{\text{bits}} + 1) - 1$$

El periodo establecido fue de 255 (valor máximo ya que le registro para este fin es de 8 bits).
Por lo tanto:

$$\text{Ciclo útil}_{\text{máximo en bits}} = 4(255 + 1) - 1 = 1023$$

Con esto se puede calcular la resolución porcentual por bit para el ciclo de trabajo de la siguiente manera:

$$\text{Resolución porcentual} = \frac{100\%}{(\text{Ciclo útil}_{\text{máximo en bits}})}$$

Así, sustituyendo el ciclo útil máximo en bits utilizado se tiene:

$$\text{Resolución porcentual} = \frac{100\%}{(1023)} = 0.09775\%$$

Apéndice A.3.7 Cálculo de la resolución para el convertidor analógico-digital.

El convertidor cuenta con 10 bits, llegando así a lograr un valor de hasta 1023. Además usa como referencia 5V. Con esto la resolución se calcula como sigue:

$$\text{Resolución} = \frac{5V}{1023} = 4.887mV$$

Apéndice A.3.8 Cálculo de la unidad temporal para la generación de frecuencia.

Ecuación general:

$$\text{Unidad temporal} = 2 \left(\frac{4}{\text{frecuencia}_{\text{operación}}} \right)$$

La unidad temporal es determinada por el periodo de instrucción (segundo factor en la ecuación) con el que el microcontrolador realiza las cuentas internas para generar la frecuencia, y además un factor de 2, ya que para la generación de frecuencia se establece la duración de los semiciclos de la señal conmutando el estado de la señal de salida una vez cumplido cada intervalo temporal. En la figura a.3.1 se muestra como funciona dicha operación. $T_{\text{-semiciclo}}$ es igual a $T_{\text{+semiciclo}}$ y se establecen como el periodo en el cual el microcontrolador conmutará el estado de la salida para la generación de frecuencia.

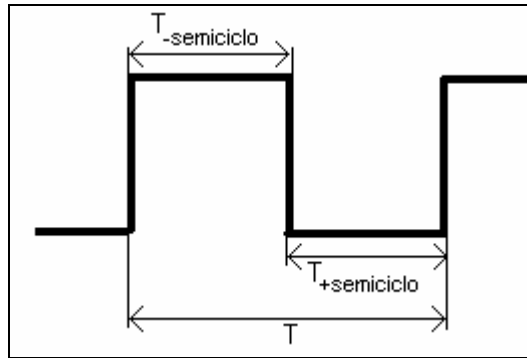


Figura A.3.1. Ilustración de la manera empleada para generar frecuencia en el microcontrolador (Paint).

Tomando en cuenta que el valor del periodo de conmutación solo se establece una vez ante el cambio un cambio de condición, el periodo de la señal (T) de salida será establecida por el doble del periodo de conmutación. Debido a esto es necesario duplicar el valor del periodo de instrucción en la ecuación para el cálculo de la unidad temporal.

Con una frecuencia de operación de 16MHz se tiene:

$$\text{Unidad temporal} = 2 \left(\frac{4}{16\text{MHz}} \right) = 500\eta s$$

Apéndice A.3.9 Cálculo de la frecuencia máxima con resolución de 1Hz.

La frecuencia máxima con resolución de 1Hz determina el valor superior para el que el usuario puede establecer valores de frecuencia con variaciones de por los menos 1Hz. Las frecuencias mayores a esta van perdiendo resolución. Para calcular esta resolución es necesario primero definir ciertas ecuaciones.

$$F_2 > F_1 \quad (\text{i})$$

$$F_2 > F_1 \quad (\text{ii})$$

$$F_2 - F_1 \leq 1\text{Hz} \quad (\text{iii})$$

$$\frac{1}{F_1} - \frac{1}{F_2} \geq \text{Unidad temporal} \quad (\text{iv})$$

De esta manera se puede calcular la frecuencia límite.

Resolviendo la ecuación (iii) para F_1 se obtiene:

$$F_1 = F_2 - 1 \quad (\text{v})$$

Sustituyendo (v) en (iv):

$$\frac{1}{F_2 - 1} - \frac{1}{F_2} \geq \text{Unidad temporal} \quad (\text{vi})$$

Despejando:

$$F_2^2 - F_2 - \frac{1}{\text{Unidad temporal}} \leq 0 \quad (\text{vii})$$

Completando cuadrados:

$$F_2^2 - F_2 + \frac{1}{4} \leq \frac{1}{\text{Unidad temporal}} + \frac{1}{4} \quad (\text{viii})$$

$$\left(F_2 - \frac{1}{2}\right)^2 \leq \frac{1}{\text{Unidad temporal}} + \frac{1}{4} \quad (\text{ix})$$

Despejando F_2 :

$$F_2 \leq \pm \sqrt{\left(\frac{1}{\text{Unidad temporal}} + \frac{1}{4}\right)} + \frac{1}{2} \quad (\text{x})$$

Finalmente, sustituyendo en (x) se obtiene:

$$F_2 \leq 1414.71\text{Hz} \quad (\text{xi})$$

Apéndice A.3.10 Cálculo de valores teóricos máximos de frecuencia para cada modo de operación de la señal de PWM.

La forma de la ecuación general es la siguiente:

$$frecuencia_{\text{PWM máx}} = \frac{frecuencia_{\text{operación}}}{4(\text{modo})(\text{periodo} + 1)}$$

El periodo máximo es de 255, la frecuencia de operación fue establecida en 16MHz.

Para un factor de 16 en modo:

$$frecuencia_{\text{PWM máx}} = \frac{16\text{MHz}}{4(16)(255 + 1)} = 976.5625\text{Hz}$$

Para x4:

$$frecuencia_{\text{PWM máx}} = \frac{16\text{MHz}}{4(4)(255 + 1)} = 3906.25\text{Hz}$$

Para x1:

$$frecuencia_{\text{PWM máx}} = \frac{16\text{MHz}}{4(1)(255+1)} = 15.625\text{KHz}$$

Apéndice A.3.11 Cálculos para frecuencias de corte.

En la figura a.3.2 se muestra una configuración básica para un filtro pasivo pasa bajas de primer orden.

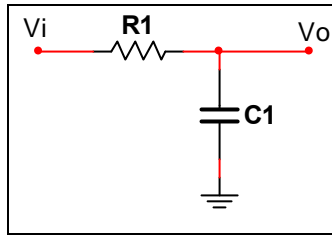


Figura A.3.2. Filtro pasivo paso bajo de primer orden (Multisim).

Para calcular la frecuencia de corte de dicho filtro se recurre a la siguiente ecuación:

$$f_{\text{corte}} = \frac{1}{2\pi R_1 C_1} \quad (\text{a})$$

A esta frecuencia la tensión de salida V_o es aproximadamente el 50% de la tensión V_i .

Para los valores utilizados en el módulo se tiene:

Filtro en la medición de tensión:

$$f_{\text{corte}} = \frac{1}{2\pi (1.5\text{K}\Omega)(10\text{nF})} = 10.61\text{KHz} \quad (\text{b})$$

Filtro en la medición de frecuencia y salida de frecuencia:

$$f_{\text{corte}} = \frac{1}{2\pi (100\Omega)(10\text{nF})} = 159.15\text{KHz} \quad (\text{c})$$

Filtro en la salida de PWM:

$$f_{\text{corte}} = \frac{1}{2\pi (10\text{K}\Omega)(6.8\mu\text{F})} = 2.34\text{Hz} \quad (\text{d})$$

Apéndice A.3.12 Análisis de armónicos para una señal cuadrada con valores oscilantes entre 0 y 5V.

El análisis de armónicos se realizará a través de series de Fourier para determinar la influencia de cada componente en la señal resultante. La fórmula general es:

$$f(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos(n\omega_0 t) + b_n \text{sen}(n\omega_0 t))$$

$$\omega_0 = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f_0$$

$$a_0 = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) dt$$

$$a_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cos(n\omega_0 t) dt$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \text{sen}(n\omega_0 t) dt$$

Con una señal cuadrada de 0 hasta A simétrica:

$$f(t) = \frac{A}{2} + \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \left(\frac{2A}{n\pi} \text{sen}(n\omega_0 t) \right)$$

Con A = 5 se tienen las siguientes gráficas para los armónicos 3, 7, 11 y 15:

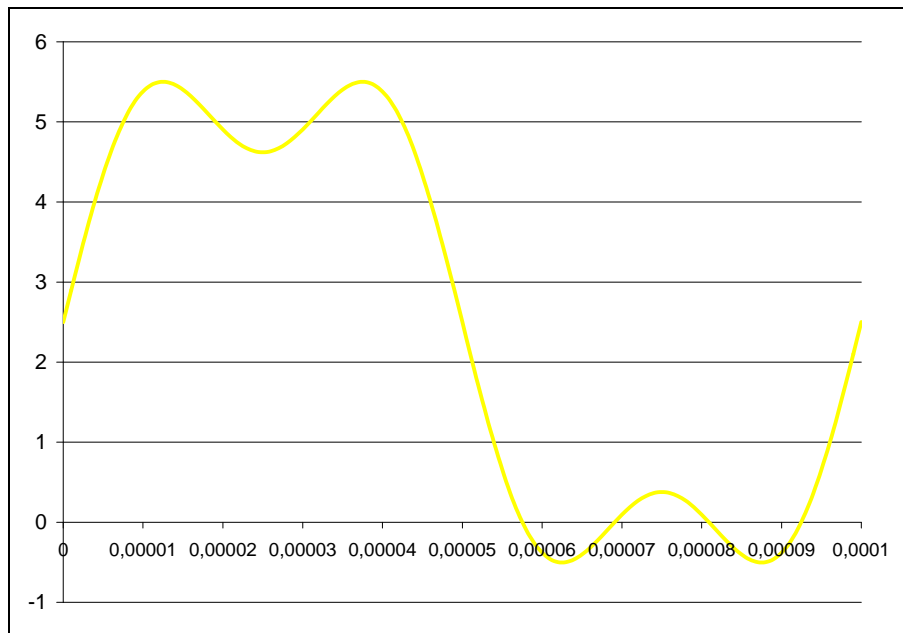


Figura A.3.3. Forma de onda hasta el armónico 3 de la serie de Fourier para la señal cuadrada (Microsoft Office Excel).

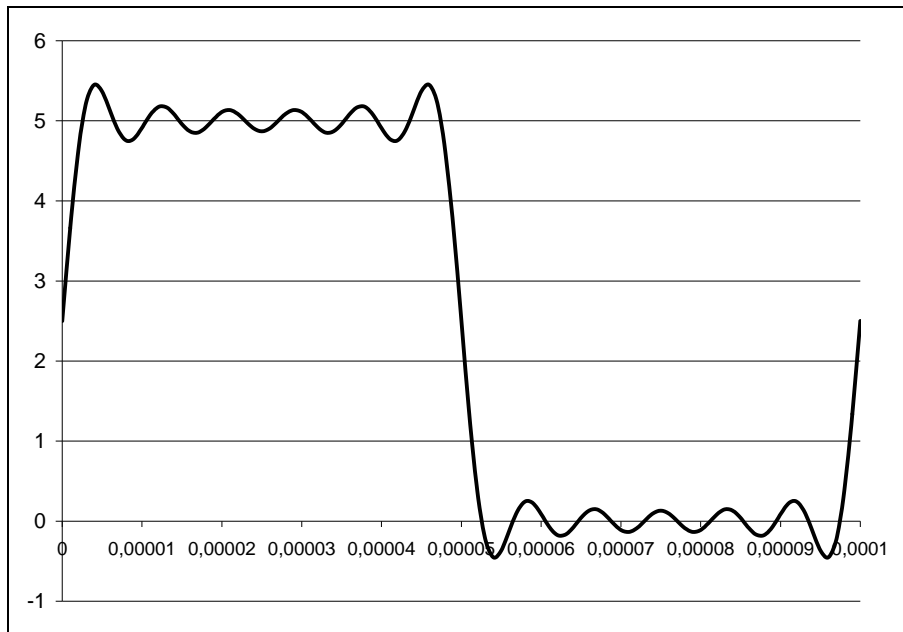


Figura A.3.4. Forma de onda hasta el armónico 11 de la serie de Fourier para la señal cuadrada (Microsoft Office Excel).

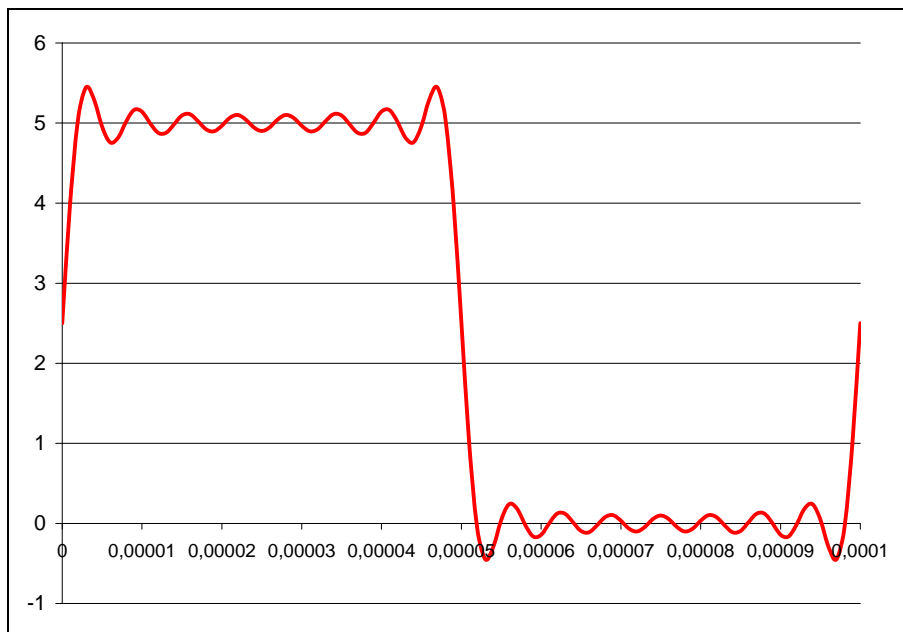


Figura A.3.5. Forma de onda hasta el armónico 15 de la serie de Fourier para la señal cuadrada (Microsoft Office Excel).

De las gráficas anteriores se puede concluir que al incluir mayor presencia de armónicos que conforman la señal cuadrada se obtiene una mejor aproximación para dicha señal. De esta manera, para determinar un límite en la aproximación de la señal cuadrada se determinó de forma experimental, que el sistema reacciona adecuadamente a la presencia hasta el armónico

15, atenuando el resto de las componentes armónicas y señales ajenas a la onda cuadrada mediante filtros pasivos de primer orden. Además de la razón ya mencionada, se eligen estos filtros por su bajo costo y poco espacio requerido en el circuito (recordar que uno de los requerimientos se refiere a los límites dimensionales del módulo).

Manual de usuario para el programa de monitorio y configuración del módulo de afinamiento del sistema de inyección de gasolina

Requisitos:

- Sistema operativo Microsoft Windows 98SE o superior.
- Puertos USB 1.1 o 2.0 con capacidad FULL SPEED.

Instalación.

Instalación de programa

Abra el archivo “Instalar.exe” del CD de instalación del programa para el módulo. Elija la carpeta donde desee instalar el programa. En escritorio aparecerá un acceso directo a la aplicación.

Instalación de Driver

Antes de conectar el módulo al computador cerciórese de que este se encuentra energizado. Conectado el módulo aparecerá la ventana que se muestra en la figura a.4.1, si el sistema operativo es Windows XP con Service Pack 2 (SP2) donde debe de elegir “No por el momento”, de lo contrario solo aparecerán los cuadros de dialogo mostrados en la figura a.4.2 y la figura a.4.3.

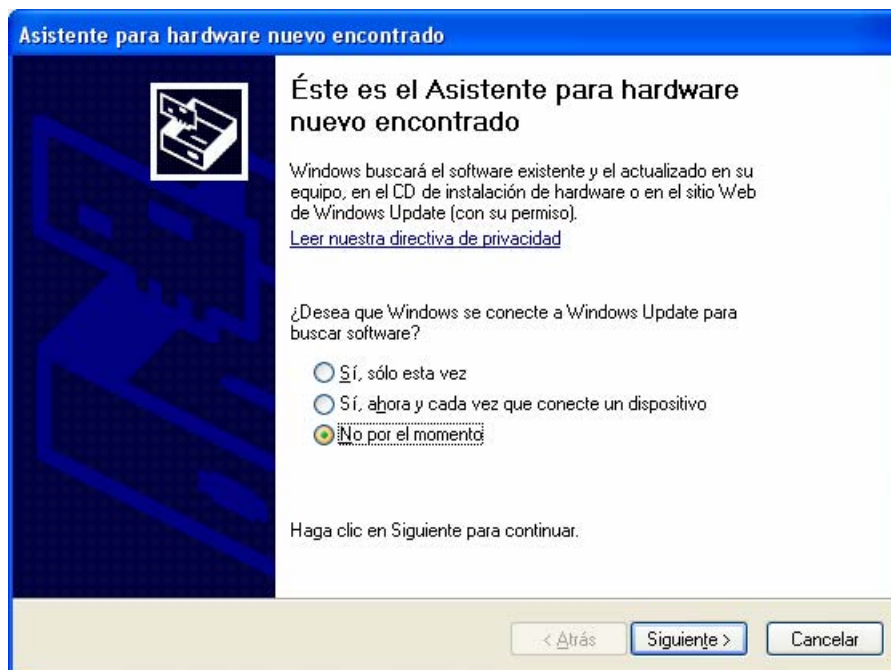


Figura A.4.1. Cuadro de diálogo de Windows XP SP2 para la instalación de nuevo Dispositivo.

Para continuar seleccione *Siguiente*, ahora se verá la ventana que se muestra en la figura a.4.2, aquí seleccione “*Instalar desde una lista o ubicación específica (avanzado)*” y oprima *Siguiente*.

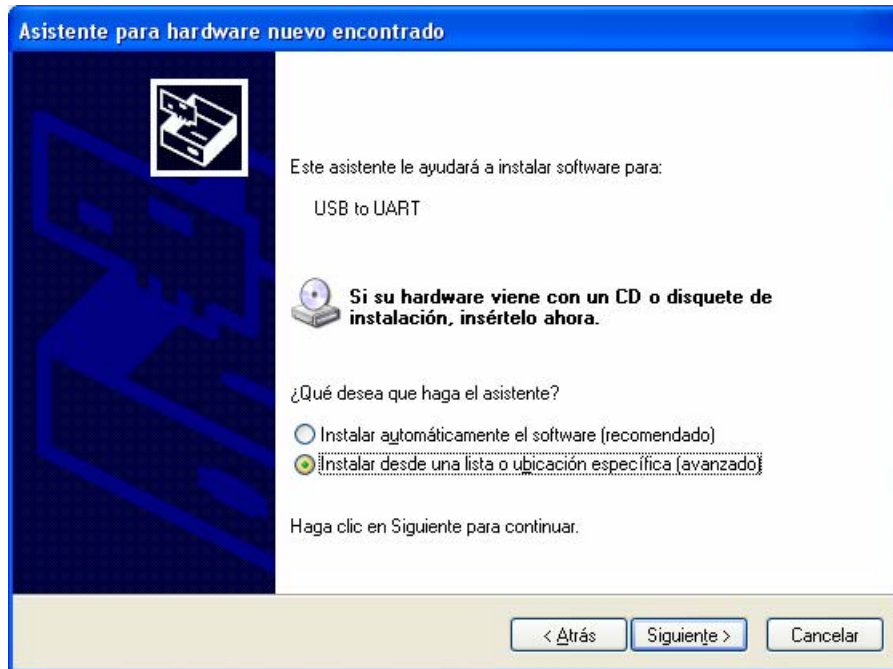


Figura A.4.2. Cuadro de diálogo de instalación de nuevo dispositivo.

Por último aparecerá el cuadro de diálogo que se muestra en la figura a.4.3, seleccione “*Buscar el controlador más adecuado en estas ubicaciones*”, habilite únicamente “*Incluir esta ubicación en la búsqueda:*” y digite la ubicación o haga clic en “*Examinar*” y ubique la carpeta: “*Carpeta de instalación/Afinamiento de Inyección\Driver*”, donde “*Carpeta de instalación*” es la ruta donde instaló el programa (en el caso de la figura a.4.3 “*C:\Archivos de programa*”), para proceder con la instalación del Driver haga clic en *Siguiente*.

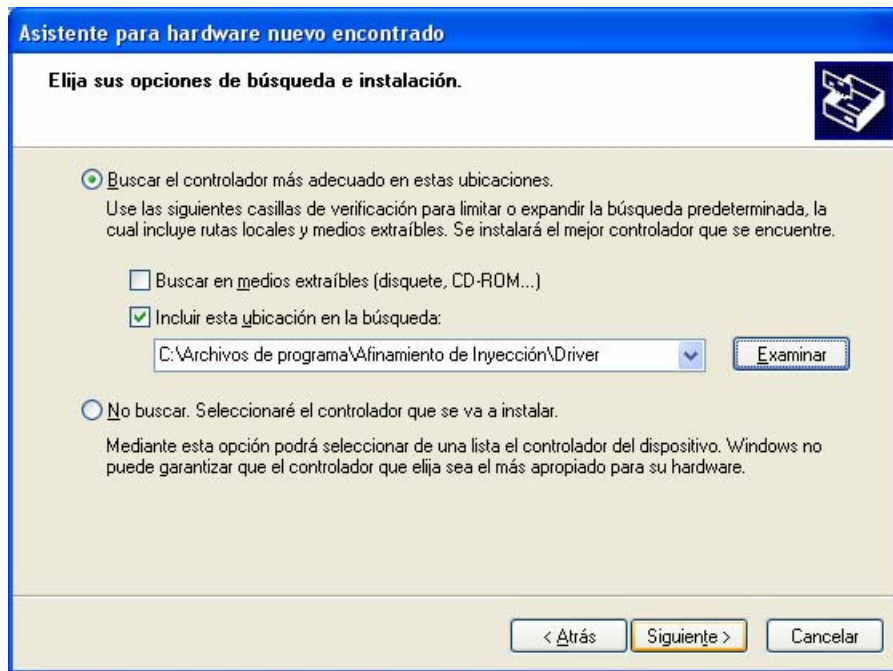


Figura A.4.3. Cuadro de diálogo para instalación del Driver del módulo.

Windows instalará el driver adecuado (ver figura a.4.4).



Figura A.4.4. Instalación del driver para el módulo de afinamiento.

Para finalizar la instalación del driver hacer clic en “Finalizar” (ver Figura A.4.5).



Figura A.4.5. Finalización de la instalación del módulo de afinamiento.

Conexión del módulo

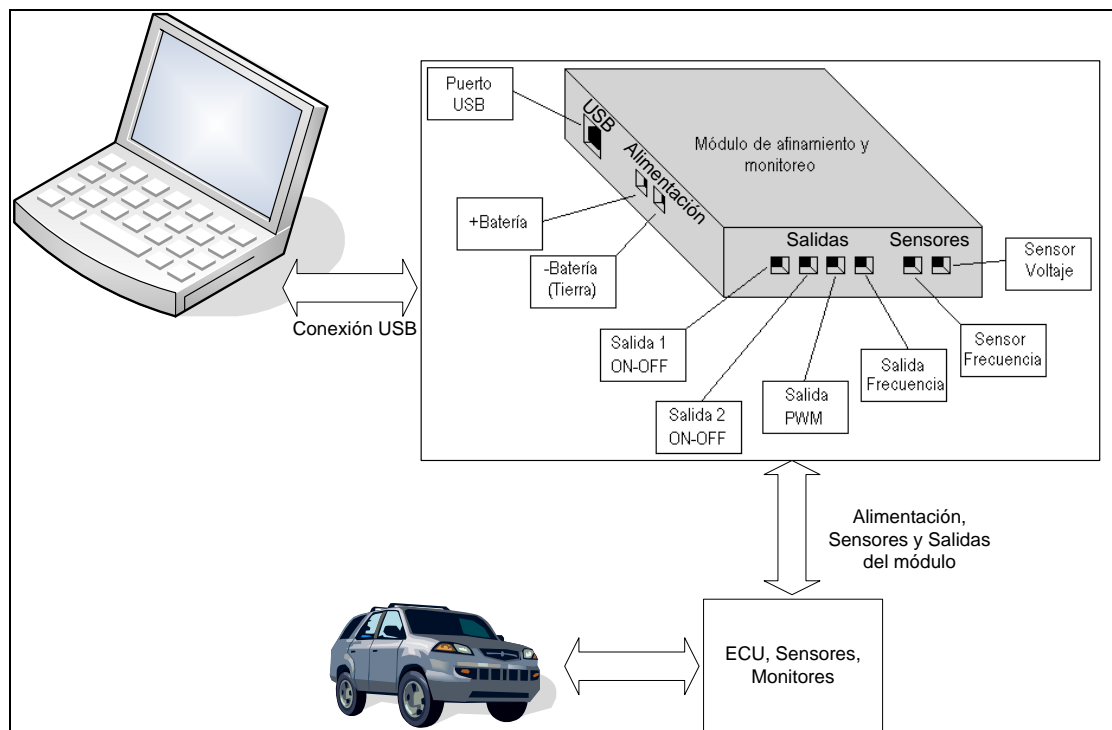


Figura A.4.6. Diagrama de conexión del módulo de afinamiento y monitoreo.

En la figura a.4.6 se observa la manera básica de conexión del módulo. Las salidas del módulo pueden variar su funcionamiento de acuerdo con la programación del usuario. Los sensores que pueden entrar al módulo son variantes en tensión desde 0V hasta 5V y en frecuencia desde 0Hz hasta 10KHz. El usuario puede observar el comportamiento de las entradas en el programa de interfaz en el computador. Todos los sensores, entradas y salidas del módulo deben tener un nodo común (Tierra). Para la alimentación del módulo este se conecta a la batería del vehículo, por lo que, en operación normal, el nivel de tensión de alimentación debe rondar los 12V. El enlace con el computador se establece con un cable USB. La instalación del módulo se mencionó anteriormente.

Instrucciones de uso.

Iniciación del programa.

Para inicializar el programa ejecute el archivo "...\Afinamiento de Inyección\Programa\Monitor.exe" del directorio de instalación. De seguido se abrirá una ventana como se muestra en la figura a.4.7.

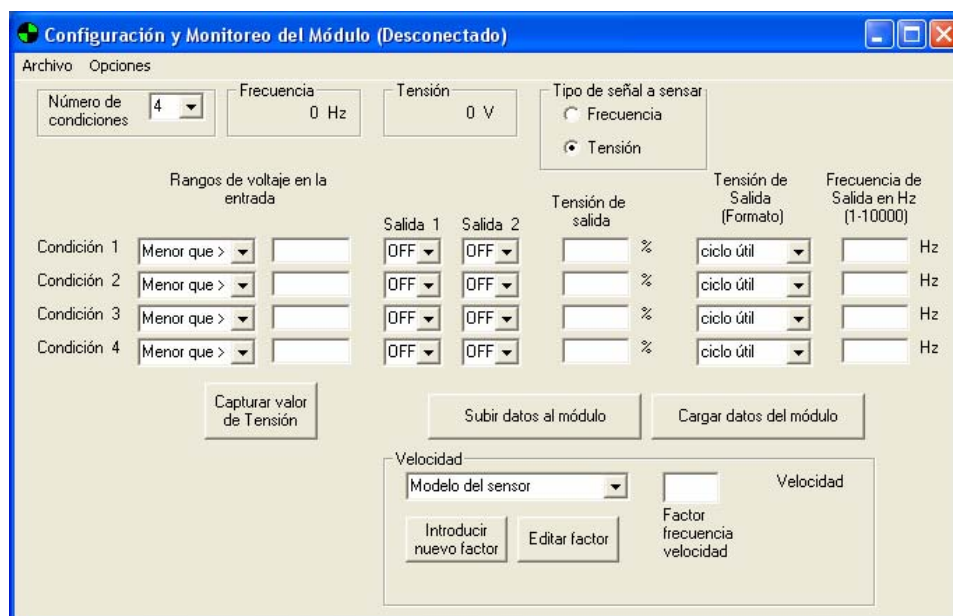


Figura A.4.7. Ventana al iniciar el programa para configuración y monitoreo del módulo.

Introducción de datos

El programa acepta hasta cuatro diferentes condiciones de la variable medida ya sea “Frecuencia” o “Tensión”. Para escoger el tipo de señal a medir haga *click* en la casilla deseada del área “*Tipo de señal a medir*”. Una vez seleccionada la señal a medir se procede a elegir el número de condiciones que se pretende introducir con un máximo de cuatro y un mínimo de una. Esto se hace seleccionando un número de 1 a 4 en el área “*Número de condiciones*”. Las condiciones no escogidas aparecen deshabilitadas y no podrán ser editadas, como se muestra en la figura a.4.8.

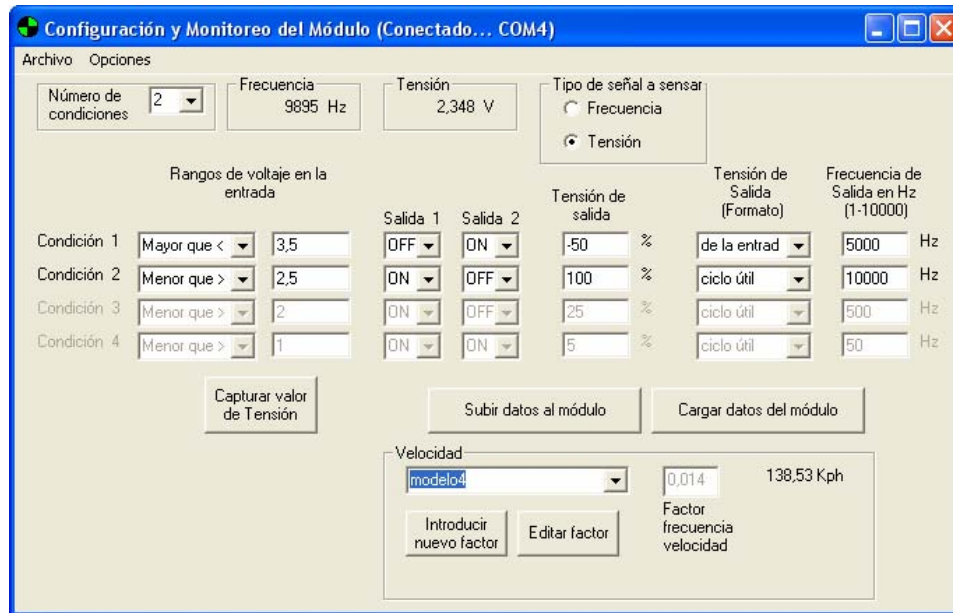


Figura A.4.8. Efecto sobre el programa de cambiar el número de condiciones a establecer.

Esta opción puede ser seleccionada aún después de que el resto de las casillas hayan sido llenadas. Los rangos de operación dependen unos de otros así como de los límites permitidos según la señal a medir. Los límites para tensión van desde 0V hasta 5V, mientras que para frecuencia desde 0Hz hasta 10KHz, valores fuera de estos rangos no serán permitidos por el programa. El programa ordena los rangos de menor a mayor y detecta traslapes comunicando al usuario que debe modificar los datos para que no existan ambigüedades en las salidas. Las condiciones “*mayor que*” o “*menor que*” de la primera columna determinan la dirección de los rangos. Las salidas 1 y 2 corresponden a salidas digitales donde “*OFF*” representa 0V y “*ON*” 5V. La “*Tensión de salida*” consiste en una salida de modulación de ancho de pulso que representa un nivel de corriente directa según el ancho de pulso. Esta señal de salida puede establecerse desde el programa de tres distintas maneras: por porcentaje de “*ciclo útil*”, por “*voltaje*” o por porcentaje “*de la entrada*”. Estas opciones pueden elegirse en la columna de “*Tensión de salida (formato)*” para cada condición. Cuando se elige porcentaje de ciclo útil los valores límite permitidos por el programa van de 0 hasta 100%, al elegir por “*voltaje*” van desde 0 a 5V y si se eligiera por porcentaje “*de la entrada*” los límites son determinados por el programa en cada rango, de tal manera que no se obtengan valores negativos, saturación (5V) o anulación (0V) en la salida a lo largo del rango específico, en tal caso el programa advierte al usuario si hay saturación o anulación en algún segmento del rango o envía un mensaje de

error si en la totalidad del rango sucede lo antes descrito. En la columna de “*Frecuencia de salida*” los límites para los datos a ingresar son idénticos a los establecidos en los rangos para los casos de frecuencia (0Hz a 10KHz), otros valores no serán permitidos por el programa. El botón “*Capturar valor de Tensión/frecuencia*” (según la elección de la señal a medir) captura el dato que se muestra en el monitor (de frecuencia o tensión de acuerdo al caso) y lo coloca en la casilla de rango que fuese previamente seleccionado por el usuario o en su defecto en la primera casilla (ver figura a.4.9). Cada vez que se oprime el botón, copia el dato en la siguiente casilla hasta llegar a la última, en donde vuelve nuevamente a la primera casilla (las casillas deben de estar habilitadas).

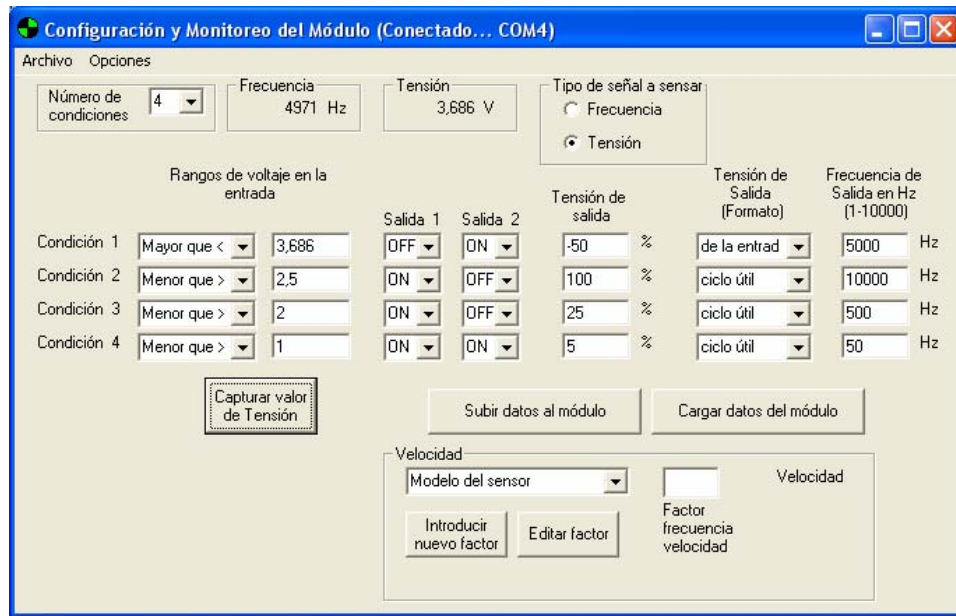


Figura A.4.9. Uso del botón de captura de valores monitoreados.

Guardar archivo de calibración

El almacenaje de los datos cargados en la interfaz principal (esto no incluye el área de velocidad que corresponde a los factores de conversión los cuales tienen un almacenamiento separado) y la frecuencia del PWM se realiza seleccionando “*Archivo/Guardar datos*” en el menú como se puede ver en la figura a.4.10. Al seleccionar la opción aparecerá el cuadro de diálogo estándar de Windows para guardar archivos. Luego se digita el nombre deseado y el lugar donde se desea guardar dicha configuración.

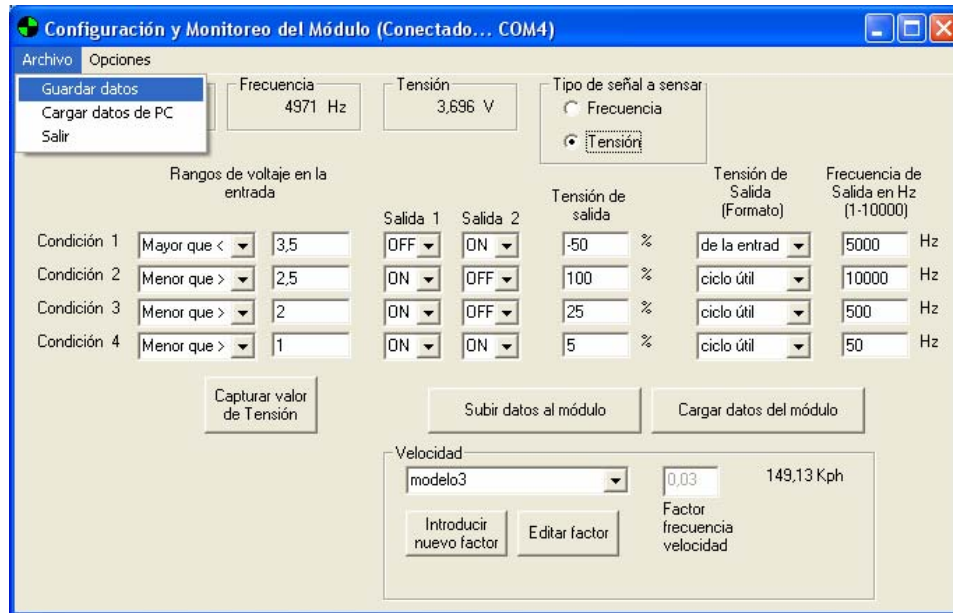


Figura A.4.10. Opción para almacenar datos de la interfaz principal.

Abrir archivo de calibración previa

Para cargar a la interfaz archivos correspondientes a calibraciones anteriores (creados por el programa) se selecciona “*Archivo/Cargar datos de PC*”, con lo que aparecerá el cuadro de diálogo estándar de Windows para abrir archivos, aquí se escoge el archivo a abrir y los datos se cargarán a la interfaz y a las variables para establecer la frecuencia del PWM.

Conexión y desconexión con el módulo

Para establecer comunicación entre el módulo y el computador se debe asegurar la conexión del módulo con el computador y seleccionar en el menú “*Opciones/Puerto de Comunicaciones/Conectar*” (figura a.4.11).

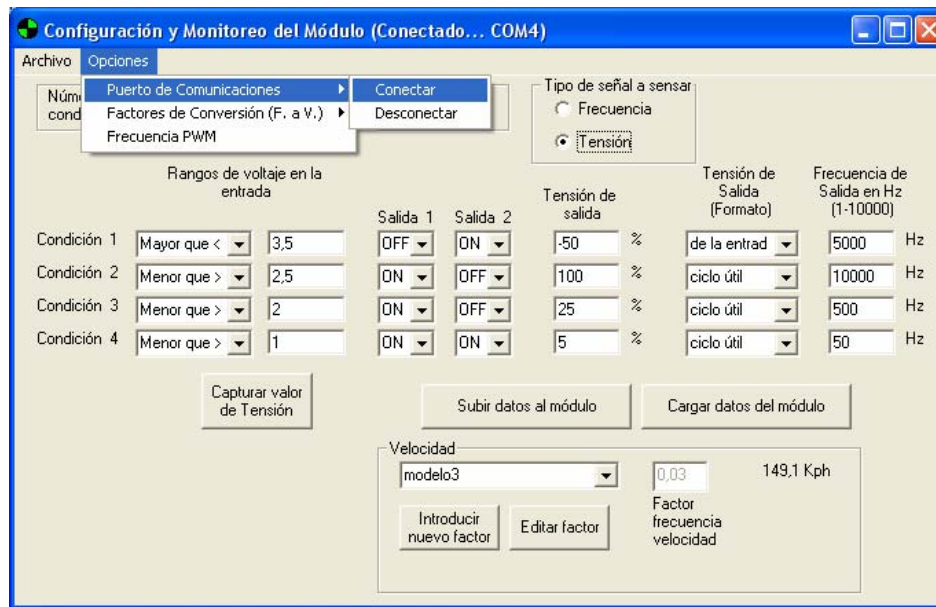


Figura A.4.11. Conexión con el módulo.

Al seleccionar esto, aparece una pequeña ventana en la cual aparecen los puertos disponibles para establecer una comunicación serie como se puede observar en la figura a.4.12.



Figura A.4.12. Cuadro de diálogo para abrir puerto de comunicación.

En el cuadro de dialogo se selecciona el puerto que se desee (ver figura a.4.13).



Figura A.4.13. Cuadro de diálogo par abrir puerto de comunicación (selección).

Si el programa no detecta datos entrantes del módulo, resultantes del monitoreo por un lapso de aproximadamente 10s el programa cierra el puerto y envía el mensaje que se observa en la figura a.4.14.



Figura A.4.14. Mensaje de detección de incomunicación con el módulo.

Toma y lectura de datos del módulo

Los datos que se encuentran en el módulo se cargan a la interfaz oprimiendo el botón “*Cargar datos del módulo*” mientras exista comunicación con el mismo. Los datos cargados en la interfaz se ven como se muestra en la figura a.4.15.

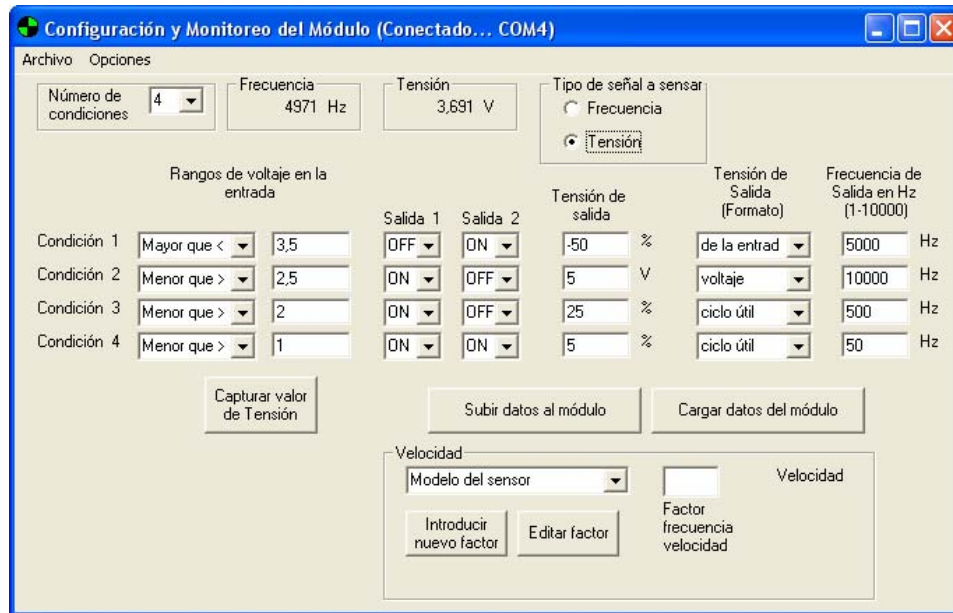


Figura A.4.15. Muestra de datos cargados desde el módulo.

Grabado de datos al módulo

Una vez con la interfaz completa se puede proceder a grabar los datos para la calibración del módulo, mientras exista comunicación entre la PC y el módulo. El grabado de los datos se hace oprimiendo el botón “*Subir datos al módulo*”, si los datos tiene un formato adecuado los enviara para su grabación de lo contrario el programa solicitará la corrección debida.

Factores de conversión

Los factores de conversión de frecuencia a velocidad son utilizados para hacer equivaler datos de frecuencia medidos a velocidad en Km/h. En la figura a.4.16 se muestra la interfaz para el recuadro de factores de conversión que se presenta al cargar el programa.

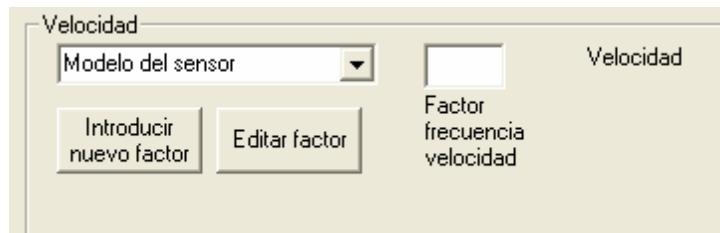


Figura A.4.16. Interfaz inicial del recuadro de velocidad.

Introducción manual de factores de conversión

Para introducir factores de conversión de frecuencia a velocidad manualmente (necesario para la primera vez que se use esta función si no hay archivos previos) se presiona el botón “*Introducir nuevo factor*” de la interfaz inicial (ver figura a.4.16), una vez presionado la interfaz cambia como se observa en la figura a.4.17. Aquí se

puede editar tanto el nombre o modelo del sensor así como el factor necesario para convertir la frecuencia que entrega el sensor a velocidad en Km/h.

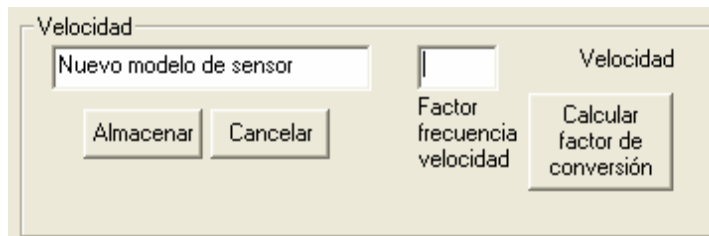


Figura A.4.17. Introducción manual de datos para los factores de conversión (modelo de sensor y factor corrector).

El factor de corrección puede ser calculado de manera automática presionando el botón "Calcular factor de conversión". Una vez presionado este botón se presenta el cuadro de diálogo "Factor de conversión frecuencia-velocidad" (ver Figura A.4.18). En este cuadro de diálogo se solicita elegir un valor de velocidad al que es necesario llevar el vehículo para realizar el cálculo.

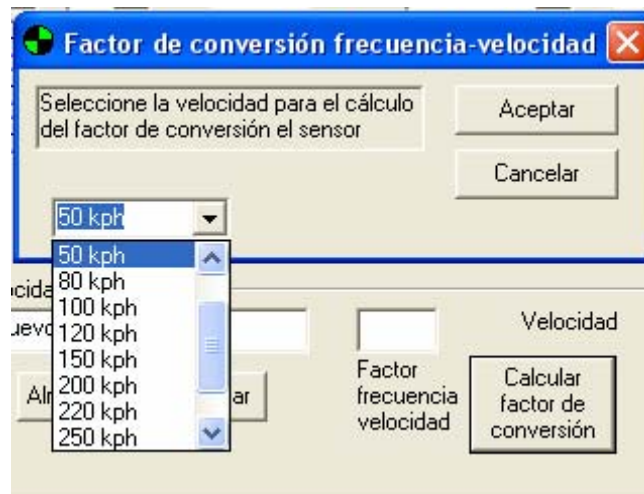


Figura A.4.18. Cuadro de diálogo para el cálculo automático del factor de corrección (selección de velocidad).

Seleccionada la velocidad se oprime el botón "Aceptar" mostrado en la figura a.4.19. Luego se solicita acelerar el vehículo hasta la velocidad seleccionada y se muestra la frecuencia medida. Alcanzada la velocidad, se oprime "Aceptar" y se presenta el factor en el recuadro "Factor frecuencia velocidad" (ver figura a.4.20).

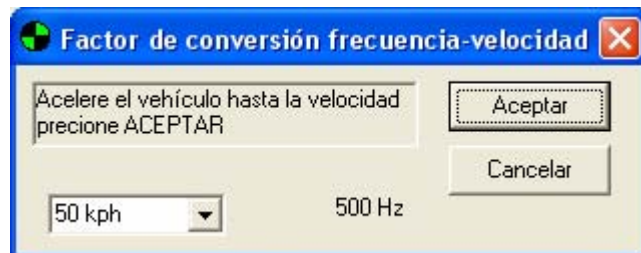


Figura A.4.19. Cuadro de diálogo para el cálculo automático del factor de corrección (Aceleración)

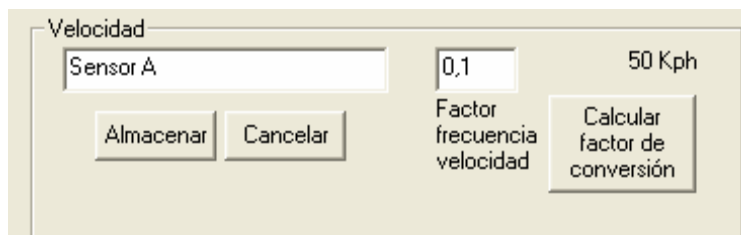


Figura A.4.20. Resultado del cálculo de factor de frecuencia-velocidad.

Almacenamiento y carga de factores de conversión

Puede almacenar o bien cargar archivos con factores de conversión ya editados. Para guardar datos sobre factores de conversión de frecuencia a velocidad seleccione en el menú “*Opciones/Factores de Conversión (F. a V.)/Guardar*” (ver figura a.4.21). Por otro lado para cargar un archivo con factores anteriores seleccione en el menú “*Opciones/Factores de Conversión (F. a V.)/Cargar*”. Los datos se toman y aparecen en el recuadro de *Velocidad*.

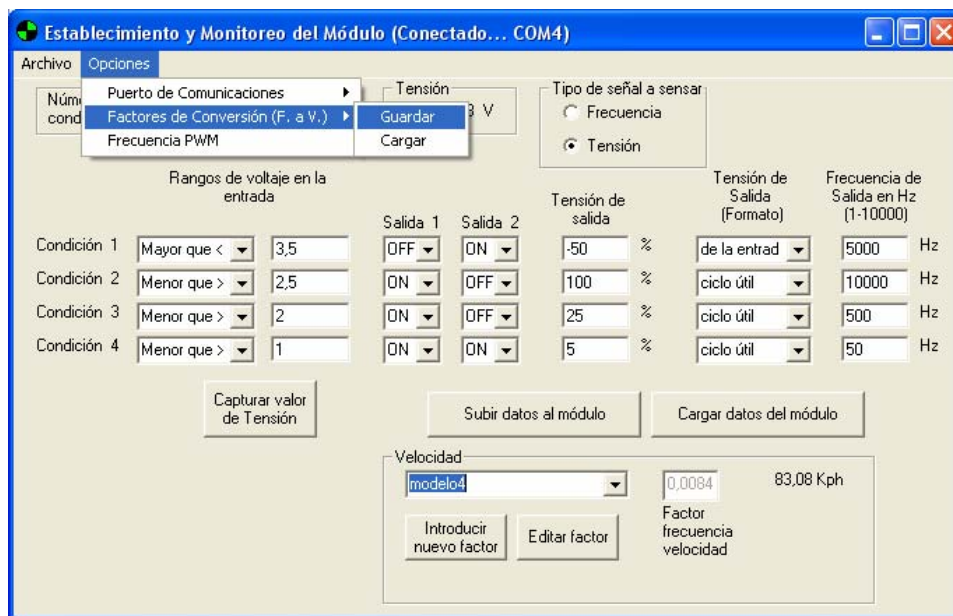


Figura A.4.21. Guardando factores de conversión.

Edición de factores de conversión

Una vez ingresados los factores de conversión, ya sea de manera manual o cargando un archivo con factores pre-existentes, se pueden modificar pulsando el botón “*Editar*” (ver figura a.4.16). En la edición de los factores de conversión se puede cambiar el nombre del modelo del sensor, su factor de conversión y hasta eliminar el factor en edición (ver figura a.4.22). Para editar un factor de conversión primeramente debe seleccionarse en el recuadro de “*Velocidad*” y luego pulsar el botón “*Editar*” como se dijo anteriormente.

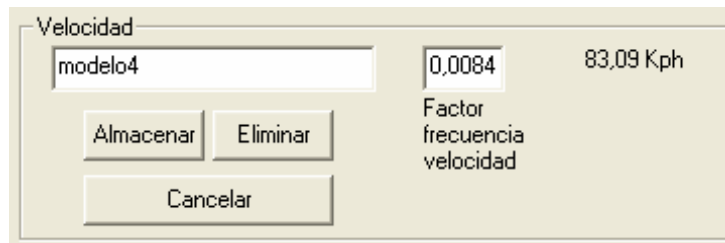


Figura A.4.22. Edición de factores de conversión.

Configuración de frecuencia de la modulación de ancho de pulso

Para configurar la frecuencia de la señal de modulación de ancho de pulso o PWM se debe seleccionar en el menú “Opciones/Frecuencia PWM” (ver figura a.4.23).

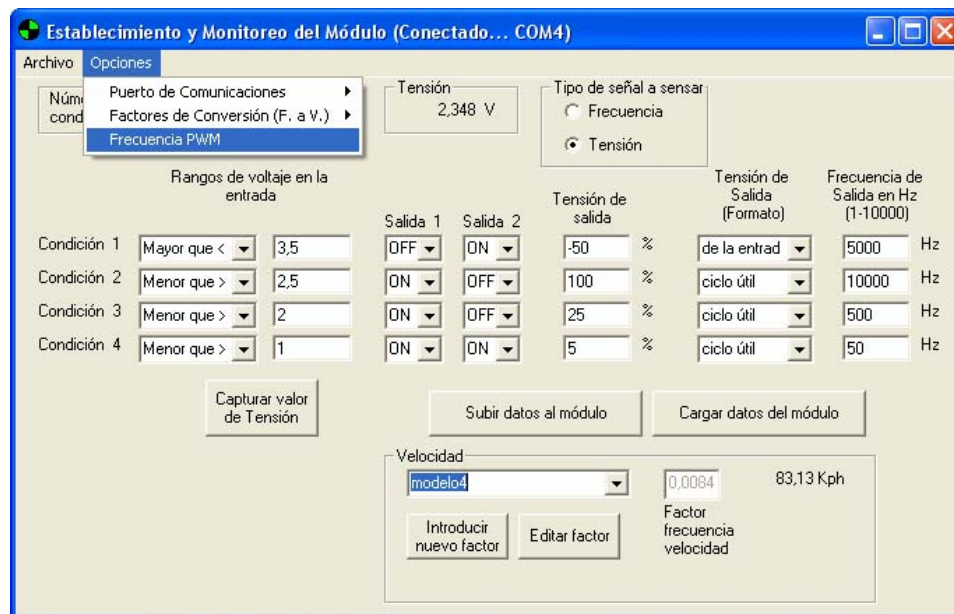


Figura A.4.23. Entrando a la configuración de la frecuencia del PWM.

Hecho esto aparecerá un cuadro de diálogo como el de la figura a.4.24. La “Frecuencia de operación” corresponde a la frecuencia con que el microprocesador del módulo opera. **Esta siempre será por defecto de 16MHz a menos que se modifique el código en el microcontrolador.** Es importante recalcar que el ciclo de instrucción corresponde a la cuarta parte de esta frecuencia y es con el cual se realizan los conteos descritos más adelante. El “Factor para el contador” corresponde al factor que multiplica la frecuencia con que el contador interno del microcontrolador en el módulo se incrementa. Este contador es empleado para generar la frecuencia del PWM por lo que el factor con que se incrementa incide directamente en el comportamiento del PWM. En la configuración del microcontrolador para este contador existen solo tres factores de conversión: “x1”, “x4”, “x16”. El “Periodo en bits” se refiere a las cuentas a las que el contador llegará para generar la frecuencia deseada. Su valor se halla en el rango de 0 a 255 bits que equivale a realizar un conteo que puede variar su valor máximo desde 1 hasta 256. Entre más tiempo tarde el contador en hacer una cuenta (*Factor de contador*) y más cuentas realice (*Periodo en bits*) menor será la frecuencia

resultante para la generación de la señal de PWM. Esto también aplica a la inversa, entre menos tiempo tarde el contador en hacer una cuenta (*Factor de contador*) y menos cuentas realice (*Periodo en bits*) mayor será la frecuencia obtenida.

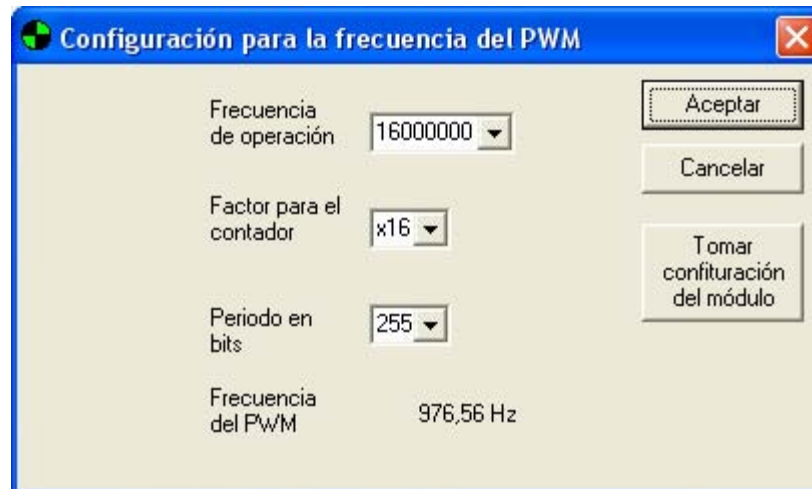


Figura A.4.24. Cuadro de diálogo para la configuración de la frecuencia del PWM.

La frecuencia resultante de la configuración se presenta en el extremo inferior del cuadro de diálogo. El programa utiliza la ecuación (1.1) para calcular dicha frecuencia.

$$Frecuencia_{PWM} = \frac{Frecuencia_{Operación}}{4 \left(Factor_{Contador} \times (Periodo_{Bits} + 1) \right)} \quad (1.1)$$

Apéndice A.5 Diagrama del circuito impreso.

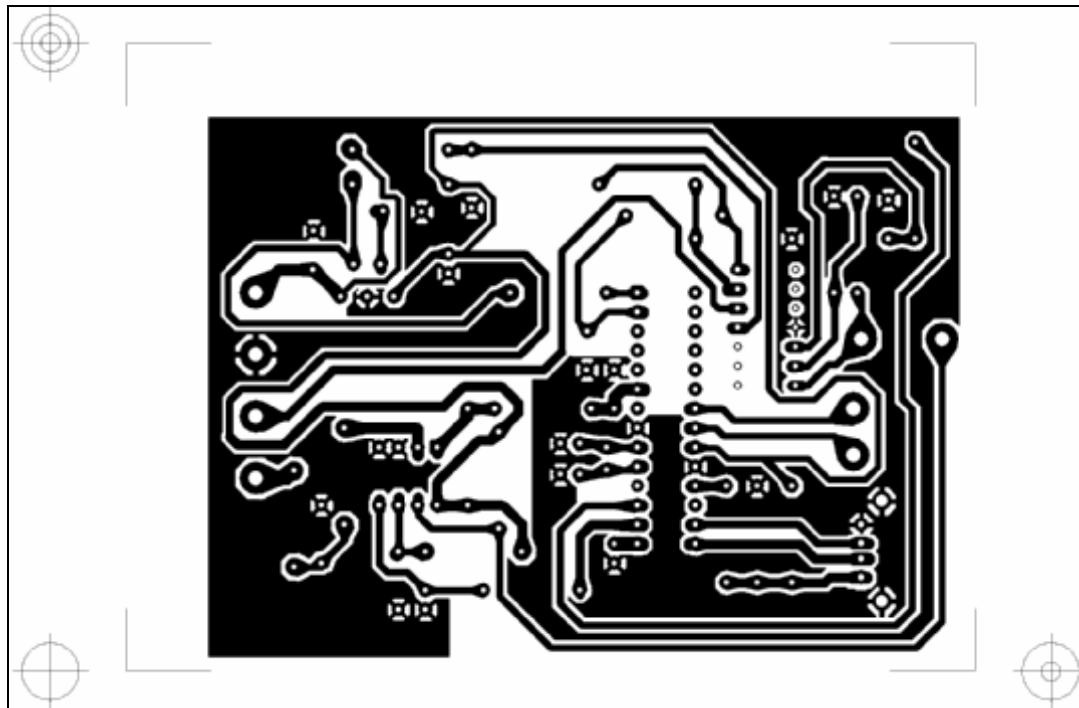


Figura A.5.1. Parte inferior del circuito impreso.

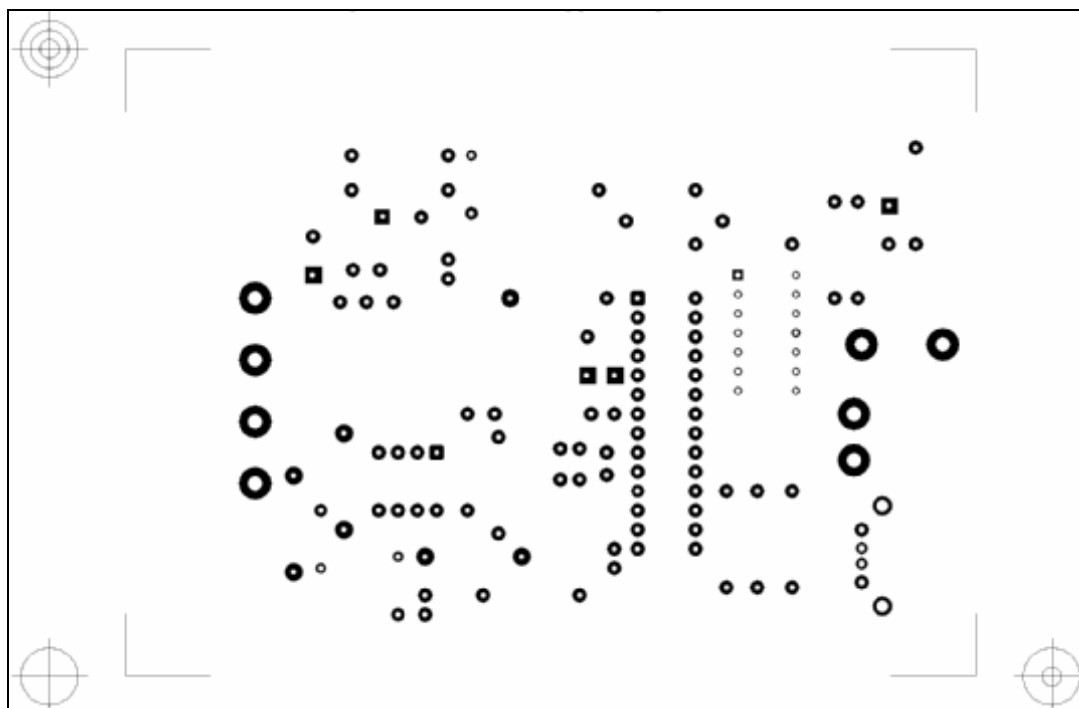


Figura A.5.2. Parte superior del circuito impreso.

