

---

# Contenido

---

Índice de Figuras .....	xi
Índice de Tablas .....	xv
Prefacio .....	xvii
<b>1. Introducción .....</b>	<b>1</b>
1.1. Antecedentes .....	1
1.2. Agrometeorología .....	2
1.3. <i>Dataloggers</i> .....	4
1.3.1. Diferencia entre <i>datalogging</i> y adquisición de datos. ....	5
1.4. Situación de la agrometeorología en México .....	6
1.5. Planteamiento del problema y propuesta de solución .....	7
1.6. Visión general del sistema .....	8
1.6.1. El <i>datalogger</i> . ....	9
1.6.2. El programa en la PC. ....	10
<b>2. Generalidades .....</b>	<b>11</b>
2.1. Adquisición de señales analógicas .....	11
2.1.1. Muestreo de señales. ....	11
2.1.2. Diseño de filtros analógicos. ....	14
2.1.3. Implementación de filtros analógicos activos. ....	17
2.1.4. Amplificadores operacionales. ....	19
2.1.5. El convertidor analógico/digital. ....	22
2.2. Adquisición de pulsos digitales .....	24
2.2.1. Rebote mecánico. ....	24
2.3. Memorias de almacenamiento .....	26
2.3.1. Memorias EEPROM. ....	26
2.4. Transmisión de información a una computadora personal .....	28
2.4.1. Estándar de comunicación RS-232. ....	28
2.4.2. El estándar USB. ....	32
2.5. El lenguaje de programación C# .....	36

<b>3.</b>	<b>Desarrollo del Hardware</b>	<b>39</b>
3.1.	El microcontrolador	40
3.1.1.	Características generales.	41
3.1.2.	La señal de reloj.	43
3.1.3.	Modos de ahorro de energía.	44
3.1.4.	Puertos de E/S e interrupciones externas.	45
3.1.5.	El convertidor analógico/digital.	46
3.1.6.	Unidad de transmisión/recepción síncrona/asíncrona (USART).	48
3.1.7.	El módulo I <sup>2</sup> C.	49
3.2.	Adquisición de datos	51
3.2.1.	Sensores.	51
3.2.2.	Caracterización de la señal de los sensores.	57
3.2.3.	Acondicionamiento de la señales de los sensores.	59
3.3.	El reloj en tiempo real	72
3.4.	Las memorias EEPROM	73
3.5.	El transceptor RS-232	74
3.6.	El transceptor USB	75
3.7.	La fuente de alimentación	76
3.8.	Botones e indicadores	77
3.9.	Integración del hardware	78
<b>4.</b>	<b>Desarrollo del Programa del Microcontrolador</b>	<b>83</b>
4.1.	Estructura del <i>firmware</i>	84
4.2.	Adquisición de datos	88
4.2.1.	Uso del reloj en tiempo real.	88
4.2.2.	Recepción de las señales del pluviómetro.	90
4.2.3.	Recepción de las señales de temperatura.	91
4.3.	Guardado de los datos	94
4.3.1.	Manejo de las memorias de registro de datos.	94
4.3.2.	Manejo del apuntador de memoria.	97
4.3.3.	Escritura de datos en página.	102
4.3.4.	Modos de manejo de la memoria.	104
4.4.	Envío de datos	105
4.5.	Funciones adicionales	106
4.5.1.	Inicio y paro de la operación del <i>datalogger</i> .	106
4.5.2.	Formateo de la memoria de registros.	107
4.5.3.	Establecer los parámetros de operación por defecto.	108
4.5.4.	Encender o apagar la opción de indicación de cada registro.	108
4.5.5.	Calibración de los sensores.	108
4.5.6.	Modo de prueba.	109

4.5.7.	Configuración del <i>datalogger</i> .	110
4.6.	Integración del <i>firmware</i>	111
<b>5.</b>	<b>Desarrollo del Software</b>	<b>113</b>
5.1.	Estructura general del programa	113
5.2.	El manejo de información	116
5.3.	La pantalla principal	118
5.3.1.	Graficado.	121
5.3.2.	Impresión.	121
5.3.3.	Exportación de la información.	121
5.4.	Comunicación con el <i>datalogger</i>	122
5.5.	Conexión con el <i>datalogger</i>	126
5.5.1.	Configuración.	127
5.5.2.	Importación de la información.	131
5.5.3.	Modo prueba.	137
5.5.4.	Calibración de sensores.	138
5.6.	Integración del programa	140
<b>6.</b>	<b>Pruebas</b>	<b>141</b>
6.1.	Precipitación pluvial	141
6.1.1.	Prueba de eventos.	141
6.2.	Pruebas de temperatura ambiente	143
6.2.1.	Primera prueba de 24 hrs.	146
6.2.2.	Prueba para determinar el <i>offset</i> .	151
6.2.3.	Segunda prueba de 24 horas.	154
6.3.	Prueba del consumo del <i>datalogger</i>	158
<b>7.</b>	<b>Resultados y Conclusiones</b>	<b>161</b>
7.1.	Resultados	161
7.2.	Conclusiones	162
	<b>Bibliografía</b>	<b>165</b>
	<b>Glosario</b>	<b>169</b>
	<b>Apéndice 1</b>	<b>173</b>
	<b>Apéndice 2</b>	<b>183</b>



---

# Índice de Figuras

---

## Capítulo 2

Fig. 2.1.	Efecto <i>aliasing</i> en el dominio de la frecuencia. . . . .	13
Fig. 2.2.	Uso de un filtro <i>antialiasing</i> . . . . .	13
Fig. 2.3.	Respuesta en magnitud de un filtro Butterworth. . . . .	15
Fig. 2.4.	Parámetros de diseño de un filtro. . . . .	15
Fig. 2.5.	Construcción gráfica para determinar los polos de un filtro Butterworth. . . . .	17
Fig. 2.7.	Topología Sallen-Key para un filtro de segundo orden. . . . .	19
Fig. 2.8.	Topología de Realimentación Múltiple para un filtro de segundo orden. . . . .	19
Fig. 2.9.	Circuito <i>buffer</i> . . . . .	20
Fig. 2.10.	Circuito amplificador no inversor. . . . .	21
Fig. 2.11.	Circuito amplificador inversor. . . . .	22
Fig. 2.12.	Diagrama de un convertidor de aproximaciones sucesivas. . . . .	23
Fig. 2.13.	Efecto de rebote en un interruptor mecánico. . . . .	24
Fig. 2.14.	Efecto de histéresis. . . . .	25
Fig. 2.15.	Circuito corrector del efecto rebote. . . . .	25
Fig. 2.16.	Diagrama interno de un FGMOSFET. . . . .	27
Fig. 2.17.	Diagrama de tiempo de la comunicación del RS-232. . . . .	29
Fig. 2.18.	Terminales del conector DB9. . . . .	32
Fig. 2.19.	Codificación NRZI. . . . .	33
Fig. 2.20.	Ejemplo de comunicación entre un anfitrión USB y un dispositivo. . . . .	35
Fig. 2.21.	Terminales de los conectores USB A y B. . . . .	36

## Capítulo 3

Fig. 3.1.	Diagrama de los elementos de hardware que compone al <i>datalogger</i> . . . . .	40
Fig. 3.2.	Diagrama de los elementos del microcontrolador usados. . . . .	43
Fig. 3.3.	Circuito básico del microcontrolador. . . . .	43

Fig. 3.4.	Diagrama de un puerto E/S del microcontrolador. ....	45
Fig. 3.5.	Ejemplo de conexión del <i>bus</i> I <sup>2</sup> C. ....	49
Fig. 3.6.	Diagrama de tiempo del protocolo I <sup>2</sup> C. ....	50
Fig. 3.7.	Curva representativa de calibración. ....	52
Fig. 3.8.	Fotografía de la sonda de temperatura 107 usada. ....	53
Fig. 3.9.	Estructura de la sonda de temperatura 107. ....	54
Fig. 3.10.	Fotografía del pluviómetro usado. ....	56
Fig. 3.11.	Gráfica de la resistencia del termistor respecto a su temperatura para la sonda 107. ....	58
Fig. 3.12.	Tensión de salida contra temperatura de la sonda 107. ...	58
Fig. 3.13.	Gráfica de la resolución de salida esperada. ....	61
Fig. 3.14.	Gráfica de la resolución de salida esperada sin <i>offset</i> . ....	62
Fig. 3.15.	Implementación del filtro Butterworth. ....	65
Fig. 3.16.	Simulación del filtro Butterworth. ....	66
Fig. 3.17.	Filtro pasivo LC. ....	68
Fig. 3.18.	Circuito de acondicionamiento de la señal de temperatura. ....	70
Fig. 3.19.	Circuito de acondicionamiento de la señal del pluviómetro ....	71
Fig. 3.20.	Diagrama de conexión del RTR DS1337. ....	73
Fig. 3.21.	Diagrama de conexión de las memorias EEPROM externas. ....	74
Fig. 3.22.	Diagrama de conexión del MAX3233. ....	75
Fig. 3.23.	Diagrama del transceptor USB. ....	76
Fig. 3.24.	Diagrama de la fuente de alimentación del <i>datalogger</i> . ....	77
Fig. 3.25.	Diagrama de conexión de los botones y el LED del <i>datalogger</i> . ....	78
Fig. 3.26.	Módulos de los circuitos del <i>datalogger</i> interconectados. ..	80
Fig. 3.27.	Diagrama del <i>datalogger</i> parte 1. ....	81
Fig. 3.28.	Diagrama del <i>datalogger</i> parte 2. ....	82

## Capítulo 4

Fig. 4.1.	Diagrama de operación del <i>datalogger</i> . ....	86
Fig. 4.2.	Diagrama de interrupciones del <i>datalogger</i> . ....	88
Fig. 4.3.	Diagrama del proceso de adquisición y registro de la temperatura ambiente. ....	93
Fig. 4.4.	Proceso de la adquisición de la temperatura ambiente. ...	95
Fig. 4.5.	Estructura del byte de dirección de las memorias 24LC1025. ....	96
Fig. 4.6.	Estructura de los bytes de dirección. ....	96
Fig. 4.7.	Proceso de escritura de múltiples bytes en memoria. ....	97
Fig. 4.8.	Proceso de lectura de múltiples bytes en memoria. ....	98
Fig. 4.9.	Estructura de la memoria de datos. ....	98

Fig. 4.10.	Estructura de la tabla del apuntador de fin de datos. . . . .	100
Fig. 4.11.	Estructura de una página de datos en memoria EEPROM. . . . .	103
Fig. 4.12.	Estructura de la cabecera de precipitación pluvial. . . . .	103
Fig. 4.13.	Estructura de un registro de precipitación pluvial. . . . .	103
Fig. 4.14.	Estructura de la cabecera de temperatura ambiente. . . . .	104
Fig. 4.15.	Estructura de un registro de temperatura ambiente. . . . .	104
Fig. 4.16.	Controles presentes en el <i>datalogger</i> . . . . .	107
Fig. 4.17.	Estructura del <i>firmware</i> . . . . .	111

## Capítulo 5

Fig. 5.1.	Operaciones sobre la información meteorológica . . . . .	114
Fig. 5.2.	Estructura del programa. . . . .	116
Fig. 5.3.	Estructura de las clases. . . . .	117
Fig. 5.4.	Pantalla principal del programa. . . . .	120
Fig. 5.5.	Muestra y opciones de una gráfica. . . . .	121
Fig. 5.6.	Vista preliminar de impresión. . . . .	122
Fig. 5.7.	Exportación a un archivo de texto. . . . .	123
Fig. 5.8.	Exportación a MS Excel. . . . .	124
Fig. 5.9.	Ventana para establecer una conexión con el <i>datalogger</i> . . . . .	126
Fig. 5.10.	Ventana de conexión con el <i>datalogger</i> . . . . .	128
Fig. 5.11.	Pestaña de configuración. . . . .	129
Fig. 5.12.	Pestaña de importación de información. . . . .	131
Fig. 5.13.	Proceso de envío de información. . . . .	133
Fig. 5.14.	Información de precipitación pluvial. . . . .	134
Fig. 5.15.	Información de temperatura ambiente. . . . .	134
Fig. 5.16.	Proceso de conversión de la temperatura ambiente. . . . .	136
Fig. 5.17.	Pestaña de modo de prueba. . . . .	138
Fig. 5.18.	Pantalla de calibración. . . . .	139

## Capítulo 6

Fig. 6.1.	Resultados de la prueba de eventos. . . . .	142
Fig. 6.2.	Diagrama del equipo de pruebas. . . . .	145
Fig. 6.3.	Implementación del equipo de pruebas. . . . .	146
Fig. 6.4.	Sensor LM35DZ. . . . .	146
Fig. 6.5.	Resultados de la primera prueba de 24hrs. . . . .	150
Fig. 6.6.	Gráfica resultante de la prueba de <i>offset</i> . . . . .	154
Fig. 6.7.	Resultados de la segunda prueba de 24hrs. . . . .	157





---

# Índice de Tablas

---

## Capítulo 2

Tabla 2.1.	Valores de tensión del <i>buffer</i> 74LVC1G17. ....	<b>25</b>
Tabla 2.2.	Valores de tensión del estándar RS-232. ....	<b>31</b>
Tabla 2.3.	Señales del estándar RS-232 en un conector DB9. ....	<b>32</b>
Tabla 2.4.	Terminales de los conectores del estándar USB. ....	<b>36</b>

## Capítulo 3

Tabla 3.1.	Distribución de los botones y el LED en las terminales del uC. ....	<b>78</b>
------------	---------------------------------------------------------------------	-----------

## Capítulo 4

Tabla 4.1.	Consumo energético de los componentes del <i>datalogger</i> . ..	<b>84</b>
Tabla 4.2.	Fomato de la fecha y hora del RTR (DS1337). ....	<b>89</b>
Tabla 4.3.	Opciones de los menús. ....	<b>90</b>
Tabla 4.4.	Estructura de los datos almacenados en la memoria EEPROM del microcontrolador. ....	<b>109</b>

## Capítulo 5

Tabla 5.1.	Funciones de los menús de la pantalla principal. ....	<b>118</b>
Tabla 5.2.	Comandos del <i>datalogger</i> . ....	<b>124</b>
Tabla 5.3.	Parámetros de configuración. ....	<b>130</b>
Tabla 5.4.	Valores por defecto de calibración. ....	<b>132</b>

## Capítulo 6

Tabla 6.1.	Eventos de volcado. ....	<b>142</b>
Tabla 6.2.	Características del LM35DZ. ....	<b>147</b>
Tabla 6.3.	Mediciones de la prueba 1. ....	<b>148</b>
Tabla 6.4.	Mediciones de calibración. ....	<b>152</b>
Tabla 6.5.	Mediciones de la prueba 2. ....	<b>155</b>