

**UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA  
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS  
AGRÓNOMOS Y DE MONTES  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA RURAL**

**TESIS DOCTORAL**

**“INFLUENCIA DEL SUELO Y EL RIEGO EN LA  
PERCOLACIÓN DE LISÍMETROS MONOLÍTICOS  
DE SUELO INALTERADO”**

**DOCTORANDO:**

**Ing. Agr. Antonio MADUEÑO LUNA**

**DIRECTORES:**

**Dr. Ing. Agr. Juan AGÜERA VEGA**

**Dr. Félix MORENO LUCAS**

**Dr. Ing. Agr. Francisco PELEGRÍN SÁNCHEZ**

**CÓRDOBA, JULIO DE 2000**

ÍNDICE GENERAL.....	I
ÍNDICE DE FIGURAS.....	II
ÍNDICE DE FOTOGRAFÍAS.....	III
ÍNDICE DE TABLAS.....	IV
RESUMEN.....	V
ABSTRACT.....	VI
1. INTRODUCCIÓN, JUSTIFICACIÓN Y OBJETIVOS	
1.1. Introducción y Justificación.....	1
1.2. Objetivos.....	3
2. ANTECEDENTES	
2.1. Los lisímetros y su empleo en agricultura.....	5
2.2. Métodos y técnicas aplicados en la investigación con lisímetros.....	12
2.3. Sistemas de control y registro en lisímetros.....	16
2.4. Funciones de transferencia y modelos de higrograma unitario.....	18
2.5. Equipos electrónicos para la medida en campo.....	21
2.5.1. Sistemas para la medida de caudal en fluidos.....	21
2.5.2. Sistemas de adquisición y registro de información.....	23
2.5.3. Sistemas de control en agricultura.....	26
3. MATERIALES Y MÉTODOS	
3.1. Introducción.....	29
3.1.1. Método simplificado.....	30
3.1.2. Regresiones numéricas.....	32
3.1.2.1. Implementación de las funciones de caudal y de volumen.....	34
3.1.2.1.1. La función de caudal.....	34
3.1.2.1.2. la función de volumen.....	35
3.1.2.2. Regresión simplificada.....	35
3.1.2.3. Regresión Completa.....	35
3.1.3. La derivación numérica.....	35
3.1.3.1. Determinación de los parámetros K y n a partir de las propiedades de los momentos de primer y segundo orden de la función Gamma.....	36
3.2. Caudalímetro gravimétrico para pequeñas masas.....	37
3.2.1. Descripción mecánica del caudalímetro.....	40
3.2.1.1. El pie y el brazo soporte.....	40
3.2.2. Célula de carga, circuitos de registro y control de la válvula de descarga.....	42
3.2.2.1. Célula de carga para la medida del peso del líquido lixiviado.....	45
3.2.2.2. Depósito receptor de los fluidos percolados.....	49
3.2.2.3. La válvula de descarga, de presión nula, normalmente cerrada y de alimentación a 220 V...50	
3.2.2.3.1. Modo de operación.....	51
3.2.2.3.2. Esquema eléctrico del conexionado de la válvula de descarga.....	52
3.2.2.4. Acondicionador para la célula de carga.....	54
3.2.2.4.1. El amp. de instrumentación INA-114-AP.....	54

3.2.2.4.1.1. Ajuste de la ganancia.....	58
3.2.2.4.1.2. Características de ruido del amplificador.....	59
3.2.2.4.1.3. Ajuste del offset.....	59
3.2.2.5. Circuito de protección del registrador de datos ante tensiones superiores a 2.5 V.....	62
3.2.2.6. Circuito de protección del registrador de datos ante tensiones inferiores a 0 V.....	63
3.2.2.7. El registrador de datos.....	65
3.2.2.7.1. Entrada externa para la medida de tensión.....	66
3.2.2.7.2. Conexión del cable de comunicación y lanzamiento del registrador.....	68
3.2.2.7.3. Indicador de operación.....	69
3.2.2.8. Circuito de disparo de la válvula de descarga.....	70
3.2.2.9. Circuito temporizador para la apertura de la válvula de descarga.....	71
3.2.2.10. Circuito ondulator para la alimentación de la válvula de descarga.....	74
3.2.2.11. Circuito doblador de tensión y estabilizador.....	77
3.2.2.11.1. Características del circuito doblador.....	79
3.2.2.12. Circuito estabilizador para la alimentación de la célula de carga y de los circuitos analógicos.....	80
3.2.3. Protocolo de ajuste del caudalímetro.....	81
3.3. La parcela experimental.....	82
3.3.1. Localización y características edafológicas.....	82
3.3.2. Características climáticas de la zona.....	84
3.3.3. Lisímetros.....	85
3.4. El software de control y de tratamiento de la información de los caudalímetros.....	92
3.4.1. Box Car Pro v3.51.....	95
3.4.1.1. Lanzamiento del registrador.....	95
3.4.1.2. Lectura de los datos almacenados.....	99
3.4.1.3. Utilidades bajo MS-DOS: Logutil.....	101
3.4.2. Formato v1.0.....	102
3.4.3. Filtro v1.0.....	104
3.4.4. Lisímetro v5.0.....	106
3.4.5. Nash v1.0.....	108
3.4.6. Hunash v1.0.....	110
3.4.7. Convolución v1.0.....	111
3.4.8. Deconvolución v1.0.....	112
3.4.9. Método simplificado v1.0.....	113
3.4.10. Regresión Simplificada v1.0.....	114
3.4.11. Regresión completa v1.0.....	115
3.4.12. Subrutinas.....	116
3.4.12.2. Simpson v1.0.....	117
3.5. Descripción de los ensayos.....	118
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	
4.1. Los ensayos de campo.....	119
4.2. Discusión de los resultados.....	123
4.2.1. Validación del modelo de embalses en serie para lisímetros monolíticos.....	123

4.2.2. Comparación entre los dos isímetros.....	126
4.3. Desarrollo de un toma-muestras automatizado.....	128
4.3.1. Especificaciones electrónicas del nuevo registrador-Controlador.....	128
4.3.1.1. Esquema electrónico del toma-muestras.....	131
4.3.1.1.1. Max-186.....	132
4.3.1.1.2. 24LC256.....	133
4.3.1.1.3. 74HC595A.....	134
4.3.1.1.4. MAX-232-CPD.....	135
4.3.1.1.5. HEF-4060.....	136
4.3.2. Subrutinas de control desarrolladas en Visual Basic 5.0.....	142
4.3.2.1. Subrutina de escritura en las salidas.....	144
4.3.2.2. Subrutinas de lectura del Max-186.....	145
4.3.2.3. Rutina de enlace para puerto serie con protocolo RS-232-C del PIC16F84.....	147
4.3.3. Prototipo mecánico el toma-muestras.....	151
5 CONCLUSIONES	
5.1. Conclusiones.....	152
6. BIBLIOGRAFÍA.....	155
7. APÉNDICES	
7.1. Programas.....	163
7.2. Ensayos.....	200
7.2.1. Salidas de la aplicación BOX-CAR-PRO v3.51.....	200
7.2.2. Salidas de la aplicación Lisímetro v5.0.....	208
7.3. Calibración de los caudalímetros.....	224
7.3.1. Calibración realizada el 19/04/00 al caudalímetro de L1.....	227
7.3.2. Calibración realizada el 9/05/00 al caudalímetro de L1.....	229
7.3.3. Calibración realizada el 6/06/00 al caudalímetro de L1.....	231
7.3.4. Calibración realizada el 20/05/00 al caudalímetro de L2.....	233
7.3.5. Calibración realizada el 6/06/00 al caudalímetro de L2.....	235
7.4. Sistema de control para el motor paso a paso.....	237
7.4.1. Programa de evaluación en Visual Basic 5.0.....	238
7.5. Empleo de la Eeprom 24LC256.....	246
7.5.1. El programa de comunicación entre el P.C: y la Eeprom.....	246
7.5.2. Librería de enlace del microcontrolador con la Eeprom.....	248
7.6. Planos.....	252

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Organigrama del algoritmo de optimización numérica.....	33
Figura 2. Esquema general conjunto del medidor de caudal.....	39
Figura 3. Esquema mecánico del caudalímetro.....	41
Figura 4. Esquema de disposición de los componentes del caudalímetro.....	43
Figura 5. Características generales de la célula de carga.....	45
Figura 6. Conexión de la célula de carga.....	46
Figura 7. Modos de funcionamiento de la válvula de descarga.....	52
Figura 8. Esquema eléctrico de la conexión de la válvula de descarga.....	52
Figura 9. Diagrama interno del INA-114-AP.....	54
Figura 10. Encapsulado del INA-114-AP.....	56
Figura 11. Diagrama de conexión básico del INA-114-AP.....	57
Figura 12. Ajuste externo del offset del INA-114-AP.....	60
Figura 13. Esquema de la conexión de un puente completo al INA-114-AP.....	60
Figura 14. Masa virtual del INA-114-AP.....	61
Figura 15. Circuito de protección del registrador para entradas >2.5 V.....	62
Figura 16. Circuito de protección del registrador para entradas <0 V.....	64
Figura 17. Aspecto externo de los registradores de la serie H8 de ONSET COMPUTER CORPORATION.....	65
Figura 18. Error tiempo-Temperatura del registrador.....	66
Figura 19. Diagrama de pulsos de alimentación en el HOBO H08-002-02.....	67
Figura 20. Muestreo y retención en el HOBO H08-002-02.....	67
Figura 21. Diagrama de los pulsos de alimentación y muestreo en el HOBO H8-006-04.....	68
Figura 22. Aspecto de los conectores externos e indicador del registrador.....	68
Figura 23. Circuito de disparo de la válvula de descarga.....	70
Figura 24. Circuito electrónico interno del LM-555.....	71
Figura 25. Diagrama de bloques de un LM-555.....	71
Figura 26. Circuito temporizador de la válvula de descarga.....	72
Figura 27. Diagrama general del funcionamiento del circuito ondulator.....	74
Figura 28. Circuito ondulator con onda de salida rectangular.....	75
Figura 29. Esquema del convertidor-elevador DC-DC.....	78
Figura 30. Circuito estabilizador de alimentación con LM-7812.....	80
Figura 31. Situación de la finca experimental.....	82
Figura 32. Ubicación de los lisímetros en relación a las parcelas de ensayo (Cayuela, 1996).....	83
Figura 33. Detalles constructivos de los lisímetros.....	86
Figura 34. Lanzamiento del registrador.....	95
Figura 35. Pantalla de error en la comunicación vía serie.....	96
Figura 36. Pantalla para el test de la conexión Registrador-P.C.....	96
Figura 37. Pantalla para la configuración del lanzamiento.....	97
Figura 38. Menú de selección de los canales activos del registrador.....	98
Figura 39. Descarga de la configuración de trabajo en el registrador.....	99
Figura 40. Pantalla de los datos obtenidos por el caudalímetro en un ensayo de campo.....	99
Figura 41. Pantalla de los datos obtenidos, la fecha y hora del registro.....	100
Figura 42. Ventana de trabajo bajo MS-DOS del registrador.....	101
Figura 43. Pantalla para la exportación a fichero de texto.....	102
Figura 44. Fichero de datos con la extensión *.txt.....	103
Figura 45. Ejemplo de fichero *_1.txt con separador decimal por coma.....	104
Figura 46. Pantalla de trabajo de la aplicación Formato v1.0.....	104
Figura 47. Pantalla de trabajo de la aplicación Filtro v1.0.....	105
Figura 48. Pantalla de configuración de la aplicación Lisímetro v5.0.....	106
Figura 49. Pestaña de calibración de la aplicación Lisímetro v5.0.....	107
Figura 50. Pestaña de conversión para la aplicación Lisímetro v5.0.....	107
Figura 51. Pantalla de trabajo de la aplicación Nash v1.0.....	109
Figura 52. Pantalla de trabajo de la aplicación Hunash v1.0.....	110
Figura 53. Pantalla de trabajo de la aplicación Convolución v1.0.....	111
Figura 54. Pantalla de trabajo de la aplicación Deconvolución v1.0.....	112
Figura 55. Pantalla de trabajo de la aplicación Método Simplificado v1.0.....	113
Figura 56. Pantalla de trabajo de la aplicación Regresión Simplificada v1.0.....	114

Figura 57. Pantalla de trabajo de la aplicación Regresión completa v5.0.....	116
Figura 58. Pantalla de trabajo de la aplicación Gamma v1.0.....	116
Figura 59. Pantalla de trabajo de la aplicación Simpson v1.0.....	117
Figura 60. Salida gráfica del registrador empleando la aplicación BOX-CAR-PRO v3.51 para el ensayo Q19400-1.....	120
Figura 61. Integración mediante la aplicación Lisímetro v5.0 de la curva de caudal obtenida por el registrador y la aplicación BOX-CAR-PRO v3.51.....	121
Figura 62. Curva de caudal sistetizada con la aplicación Lisímetro v5.0.....	122
Figura 63. HUI de L1 y L2 obtenidos con la aplicación Regresión Completa v5.0.....	127
Figura 64. Pantalla de configuración general de la aplicación Toma-muestras v1.0.....	130
Figura 65. Pantalla de configuración del ensayo en la aplicación Toma-muestras v1.0.....	130
Figura 66. Pantalla de configuración del motor paso a paso en la aplicación Toma-muestras v1.0.....	131
Figura 67. Pantalla de configuración de la válvula de descarga en la aplicación Toma-muestras v1.0.....	132
Figura 68. Diagrama de bloques de la estructura interna de la EEPROM 24LC256.....	134
Figura 69. Diagrama lógico y de pines del 74HC595.....	134
Figura 70. Diagrama de pines e interno del MAX-232-CPD.....	135
Figura 71. Reloj de tiempo real implementado con un HEF-4060.....	136
Figura 72. El convertidor MAX-186 y la conexión de sus ocho entradas.....	137
Figura 73. Esquema de la conexión QSPI entre el MAX-186 y el PIC-16F84.....	139
Figura 74. Diagrama eléctrico de la conexión de la EEPROM 24LC256.....	139
Figura 75. Esquema eléctrico del circuito de Reloj-Calendaro con HEF-4060.....	140
Figura 76. Esquema eléctrico del control del motor paso a paso con un ULN2003 y dos pines del PIC16F84.....	141
Figura 77. Pantalla de trabajo de la aplicación PIX113b.....	142
Figura 78. Esquema de la mecánica del toma-muestras automatizado.....	151
Figura 79. Ensayo Q19400-1.....	200
Figura 80. Ensayo Q9500-1.....	200
Figura 81. Ensayo Q13500-1.....	201
Figura 82. Ensayo Q16500-1.....	201
Figura 83. Ensayo Q19500-1.....	202
Figura 84. Ensayo Q24500-1.....	202
Figura 85. Ensayo Q30500-1.....	203
Figura 86. Ensayo Q3600-1.....	203
Figura 87. Ensayo Q6600-1.....	204
Figura 88. Ensayo Q19600-1.....	204
Figura 89. Ensayo conjunto Q8700-1 y Q11700-1.....	205
Figura 90. Ensayo Q20500-2.....	205
Figura 91. Ensayo Q24500-2.....	206
Figura 92. Ensayo Q6600-2.....	206
Figura 93. Ensayo Q19600-2.....	207
Figura 94. Ensayo Q8700-2.....	207
Figura 95. Salida Peso-Tiempo para el ensayo Q19400-1.....	208
Figura 96. Caudal de salida para Q19400-1.....	208
Figura 97. Salida Peso-Tiempo para el ensayo Q9500-1.....	209
Figura 98. Caudal de salida para Q9500-1.....	209
Figura 99. Salida Peso-Tiempo para el ensayo Q13500-1.....	210
Figura 100. Caudal de salida para Q13500-1.....	210
Figura 101. Salida Peso-Tiempo para el ensayo Q16500-1.....	211
Figura 102. Caudal de salida para Q16500-1.....	211
Figura 103. Salida Peso-Tiempo para el ensayo Q19500-1.....	212
Figura 104. Caudal de salida para Q19500-1.....	212
Figura 105. Salida Peso-Tiempo para el ensayo Q24500-1.....	213
Figura 106. Caudal de salida para Q24500-1.....	213
Figura 107. Salida Peso-Tiempo para el ensayo Q30500-1.....	214
Figura 108. Caudal de salida para Q30500-1.....	214
Figura 109. Salida Peso-Tiempo para el ensayo Q3600-1.....	215
Figura 110. Caudal de salida para Q3600-1.....	215
Figura 111. Salida Peso-Tiempo para el ensayo Q6600-1.....	216

Figura 112. Caudal de salida para Q6600-1.....	216
Figura 113. Salida Peso-Tiempo para el ensayo Q19600-1.....	217
Figura 114. Caudal de salida para Q19600-1.....	217
Figura 115. Salida Peso-Tiempo para los ensayos Q8700-1 y Q11700-1.....	218
Figura 116. Caudal de salida para Q8700-1 y Q11700-1.....	218
Figura 117. Salida Peso-Tiempo para el ensayo Q20500-2.....	219
Figura 118. Caudal de salida para Q20500-2.....	219
Figura 119. Salida Peso-Tiempo para el ensayo Q24500-2.....	220
Figura 120. Caudal de salida para Q24500-2.....	220
Figura 121. Salida Peso-Tiempo para el ensayo Q6600-2.....	221
Figura 122. Caudal de salida para Q6600-2 .....	221
Figura 123. Salida Peso-Tiempo para el ensayo Q19600-2.....	222
Figura 124. Caudal de salida para Q19600-2.....	222
Figura 125. Salida Peso-Tiempo para el ensayo Q8700-2 y Q11700-2.....	223
Figura 126. Caudal de salida para Q8700-2 y Q11700-2.....	223
Figura 127. Datos registrados para la calibración del 19-4-00.....	227
Figura 128. Recta de ajuste de C19400.....	228
Figura 129. Datos registrados para la calibración del 9-5-00-1.....	229
Figura 130. Recta de ajuste de C9500.....	230
Figura 131. Datos registrados para la calibración del 6-6-00-1.....	231
Figura 132. Recta de ajuste de C6600-1.....	232
Figura 133. Datos registrados para la calibración del 20-5-00-2.....	233
Figura 134. Recta de ajuste de C20500-2.....	234
Figura 135. Datos registrados para la calibración del 6-6-00-2.....	235
Figura 136. Recta de ajuste de C6600-2.....	236
Figura 137. Conexión del SAA-1027 a un PAP.....	237
Figura 138. Esquema eléctrico del control del PAP por un P.C.....	239
Figura 139. Pantalla de control del PAP a través del P.C.....	240
Figura 140. Subrutina de retardo para el control de la velocidad de giro del PAP.....	240
Figura 141. Organigrama del programa para el control del PAP con P.C.....	241
Figuras 142 y 143. Niveles lógicos a la salida del P.C. para el control del PAP.....	244
Figura 144. Pantalla de trabajo de la aplicación Grabador v1.1.....	246

## Índice de fotografías

Foto 1. Detalle del pie-soporte metálico.....	42
Foto 2. Detalle del depósito para el fluido percolado y de la válvula de descarga.....	49
Foto 3. Imagen general de los lisímetros y cámara registro, L2 a la izquierda y L1 a la derecha.....	88
Fotos 4 y 5. L1 y L2 respectivamente.....	89
Fotos 6 y 7. Caudalímetros de L1 y L2 respectivamente.....	90
Fotos 8 y 9. Ordenador portátil y batería de alimentación de los caudalímetros.....	91
Foto 10. Protoboard con el prototipo electrónico del toma-muestras.....	129
Foto 11. Convertidor A/D de aproximaciones sucesivas de 12 bits y de 8 canales.....	132
Foto 12. Microcontrolador PIC16F84-10P en la tarjeta de ensayo.....	138
Foto 13. Imagen del grabador serie para microcontroladores PIC.....	143
Foto 14. Protoboard con ULN-2003 y motor PAP.....	245

## Índice de tablas

Tabla 1. Características Técnicas de la Célula de Carga.....	47
Tabla 2. Dimensiones en mm de las células de carga de la serie CTSR de MUTRONIC.....	48
Tabla 3. Especificaciones eléctricas del INA-114-AP a 25° C, $V_s=\pm 15$ V y $R_i=2$ K $\Omega$ .....	55
Tabla 4. Resultados obtenidos sobre el prototipo del elevador de tensión .....	79
Tabla 5. Valores medios de las principales características edafológicas de las parcelas A y B (Cayuela, 1996).....	84
Tabla 6. Ensayos efectuados en el lisímetro L1.....	119
Tabla 7. Ensayos efectuados en el lisímetro L2.....	119
Tabla 8. Datos de campo de los ensayos efectuados sobre L1.....	123
Tabla 9. Datos de campo de los ensayos efectuados sobre L2.....	124
Tabla 10. Resultados de los ajustes del modelo de embalses en serie .....	124
Tabla 11. Pesos de las tuercas y tornillos usados en la calibración de los caudalímetros.....	224
Tabla 12. Relación de los pesos empleados en las calibraciones.....	225
Tabla 13. Parámetros obtenidos con el ajuste por regresión de los cudalímetros .....	226
Tabla 14. Datos obtenidos de la calibración C19400-1.....	227
Tabla 15. Resumen del ajuste por mínimos cuadrados para la calibración C19400-1.....	228
Tabla 16. Datos obtenidos de la calibración C9500-1.....	229
Tabla 17. Resumen del ajuste por mínimos cuadrados para la calibración C9500-1.....	230
Tabla 18. Datos para la calibración C6600-1.....	231
Tabla 19. Resumen del ajuste por mínimos cuadrados para la calibración C6600-1.....	232
Tabla 20. Datos obtenidos de la calibración C20500-2.....	233
Tabla 21. Resumen del ajuste por mínimos cuadrados para la calibración C20500-2.....	234
Tabla 22. Datos obtenidos de la calibración C6600-2 .....	235
Tabla 23. Resumen del ajuste por mínimos cuadrados para la calibración C6600-2.....	236
Tablas 24 y 25. Secuencias para giro horario y antihorario de un PAP.....	243

## RESUMEN

La tecnología cada vez oferta un mayor número de posibilidades al investigador, mejorando las posibilidades a la hora de plantear un proceso de experimentación con un variado abanico de medios y equipos. Aún así a veces sucede que no existe el equipo específico para una aplicación concreta o bien el material disponible es difícil de localizar o es caro. Para estos casos la opción de desarrollos “**custom**” (soluciones a medida) resulta una vía atractiva.

La presente Tesis Doctoral, de marcado carácter experimental e instrumental, sigue esta última línea planteando el estudio de la evolución temporal del movimiento de agua confinada en un lisímetro de tipo monolito mediante el desarrollo de un equipo específico para la medida del agua que percola y el software de procesado y análisis de los datos. Así mismo se presenta un prototipo de toma-muestras para posterior análisis químico del agua recogida, basado en un circuito de registro y control y un motor paso/paso que controla el llenado de los recipientes que albergan las muestras.

El análisis de los datos de campo ha demostrado que el método seguido en este estudio, basado en la caracterización de la función de transferencia del sistema agua-suelo, así como los equipos desarrollados, se adaptan perfectamente al análisis del movimiento de agua y solutos en lisímetros de tipo monolito.

Del estudio se concluye como la variación textural entre suelos próximos puede influir de forma significativa en la evolución temporal del agua percolada.

## SUMMARY

The technology, at present, offers to the scientists a wide range of possibilities that can help them in the experimental work. Thus, the available equipment and devices have increased the possibilities of researchers to monitor the variables involved in the experiments. However, in many cases there are not equipment for specific measurements, and/or are of high cost. In these cases the development of specific tools are needed.

The present Doctoral Thesis deals with the development of an specific device to measure and record the drainage outflow in monolith lysimeters with undisturbed soil. We have studied the influence of the soil and irrigation in the characteristics of the drainage. At the same time, we have developed the appropriate software for the acquisition and analysis of data.

Several experiments were conducted to characterise the water movement and drainage of the mentioned lysimeters. The equipment and software developed, in this work, allowed us to monitor and analyse the behaviour and characteristics of drainage in the lysimeters under different amounts of water applied.

In this work, an automatic sampling device has been designed to collect samples of drainage water at different times during the drainage events. These samples can be used in the laboratory to determine the concentration of different solutes. The automatic sampling device comprises an electronic circuit that records the drainage flow rate and controls a step by step motor that fills the sample reservoirs.

The analysis of the experimental results showed that the approach used for the characterisation of the transfer function of the soil-water system and the developed equipment are very useful tools for the study of water and solute movement in monolith lysimeters.

From the results obtained in this study we can conclude that the behaviour of drainage is affected by textural discontinuity in the soil of the plot in which the lysimeters were installed.

# 1. INTRODUCCIÓN, JUSTIFICACIÓN Y OBJETIVOS

## **1.1. Introducción y Justificación**

La infiltración es el proceso mediante el cual el agua penetra desde la superficie del terreno hacia el suelo. En este proceso influyen una gran cantidad de factores, entre los que cabe destacar la condición de la superficie, las propiedades del suelo, la cubierta vegetal y la humedad inicial del mismo, Losada (1987).

Además la presencia y propiedades hidráulicas de los posibles horizontes del suelo condiciona el proceso completo. De otra parte los suelos no suelen presentar propiedades uniformes en toda su extensión y frecuentemente tampoco se mantienen a lo largo del tiempo.

La casuística de procesos de infiltración es tan rica que las posibilidades de disponer de un procedimiento de cálculo general son prácticamente nulas. No obstante el estudio experimental permite observar y describir el proceso, así como evaluar la influencia de las variables hidrofísicas implicadas: conductividad, difusividad, contenido de agua y potencial mátrico.

En general, durante el proceso de infiltración, pueden distinguirse diferentes zonas en un suelo, a efectos de contenido de humedad. En primer lugar encontramos una zona saturada, cerca de la superficie, después una zona de transmisión de flujo no saturado, una zona de mojado, donde la humedad crece con la profundidad y un frente de mojado, donde la variación de humedad es tan brusca que da apariencia de discontinuidad.

La evolución del estado hídrico de un suelo, entre dos aplicaciones sucesivas de agua da lugar a dos fases, una de infiltración a través del

horizonte superficial del suelo subsaturado y una posterior de redistribución en el interior del perfil.

El desnivel de energía entre el agua aplicada y el agua retenida por los poros proporciona la fuerza motriz necesaria para la infiltración. El incremento de potencial matricial del agua en el horizonte superficial del suelo, relativamente seco, crea un gradiente de potencial hidráulico que, a su vez, sostiene la humectación. La intensidad de flujo que penetra la superficie del suelo, o infiltración instantánea, el avance del frente de humectación y la distribución del agua en el espacio y en el tiempo dependen de las características intrínsecas del suelo, así como de su temperatura y contenido de agua previo.

Una forma de conocer y analizar el movimiento de agua en el suelo es mediante el empleo de lisímetros.

Uno de los estudios lisimétricos más antiguos se atribuye a Dalton (1802), quién determinó la cantidad de agua drenada en un lisímetro para establecer un balance hídrico. Kohnke et al. (1940), realizaron una cuidadosa revisión del empleo de lisímetros y discutieron el valor y limitaciones de las técnicas lisimétricas.

Con el uso de los lisímetros se busca obtener condiciones de campo mejores que las obtenidas a partir de las columnas de suelo de uso en laboratorio, por ello también se han empleado ampliamente para investigar la tendencia y el comportamiento de los solutos del suelo, siendo el estudio del lavado de nitratos una de las aplicaciones más relevante de estos dispositivos. Aún así, el sistema presenta ciertas limitaciones como el no ser barato ni de instalación simple, ofreciendo una reproducibilidad que debe probarse (Addiscott et al., 1990).

Otra dificultad que plantea el uso de lisímetros es la cuantificación de la cantidad de líquido que percola y de su análisis químico. La forma más simple consiste en medir el volumen total recogido después de cada episodio de drenaje y en la toma de muestras para conocer, mediante el citado análisis químico posterior, los solutos en disolución (Cayuela, 1996).

Pero la cuantificación de la evolución temporal del líquido percolado en un lisímetro requiere el empleo de un caudalímetro, dado que lo habitual es que estos dispositivos midan el caudal con presión en el líquido (Creus, 1983), resultan ineficaces para la medida de la percolación a presión atmosférica. Una posible alternativa es el uso de cangilones basculantes (Barfield et al. 1986; Ahmed et al. 1997) aunque estos dispositivos presentan limitaciones importantes en su puesta a punto, calibración y exactitud siendo además muy difícil la separación de muestras independientes para un posterior análisis.

Es por lo que resultaría de interés el disponer de los equipos apropiados y de un método exacto y rápido para evaluar el movimiento de agua y solutos en lisímetros.

## **1.2. Objetivos**

Mediante este trabajo pretendemos:

1. Diseño, realización, puesta a punto y comprobación en campo de un caudalímetro gravimétrico desarrollado para la medida del líquido percolado en lisímetros de tipo monolito.

2. Desarrollo de un conjunto de programas para el análisis de los datos de campo empleando el modelo de circulación de flujos de embalses serie (Chow et al. 1988 Cap. 8 y Viessman et al. 1989 Cap. 12).
  
3. A partir de la experiencia de campo con el equipo anterior y de los resultados del análisis de la información se procederá al diseño de los circuitos electrónicos y de las rutinas de comunicación con P.C., vía serie RS-232-C, de un toma-muestras automatizado.

## 2. ANTECEDENTES

## 2.1. Los lisímetros y su empleo en la agricultura

Según Joffe (1932), los primeros estudios con lisímetros a principios del siglo XIX, tuvieron como finalidad conocer la evolución del agua de lluvia en el suelo Dalton (1802). Muchos han sido los avances metodológicos y tecnológicos desde que De la Hire construyera el primer lisímetro en París en 1688 aunque aún en la actualidad siga planteándose la cuestión de cómo medir el movimiento natural del agua en un suelo no alterado.

El empleo de lisímetros en agricultura queda justificado al permitir la realización de una serie de ensayos relevantes como el establecimiento de balances hídricos y la investigación del comportamiento de los solutos del suelo.

Existen dos tipos básicos de lisímetros para la monitorización de los flujos de agua y solutos a través el suelo: los de pesada y los de drenaje. Los primeros (Owens, 1987) suelen resultar caros, complejos de construir y casi siempre fuerzan al uso de suelo alterado como relleno (Jemison y Fox, 1994; Martin et al., 1994) siendo su principal aplicación determinar la evapotranspiración del cultivo (Ritchie y Burnett, 1968; Howell et al., 1985).

Los lisímetros de drenaje son menos onerosos y facilitan la reproducibilidad de las medidas de los flujos de soluto y agua en perfiles de suelo no alterados usándose habitualmente en la medida del agua drenada y para determinar el movimiento de solutos a través del perfil (Jones et al., 1974; Reeder, 1986; Owens, 1987).

Dentro de este segundo tipo hay dos tipos de lisímetros: el tipo monolito, que contiene suelo inalterado y el tipo relleno, en el que el suelo se introduce en el lisímetro. El tipo relleno garantiza una buena homogeneidad, pero los estratos en el perfil se alteran.

La extracción de suelo inalterado para el relleno de lisímetros requiere un procedimiento cuidadoso en esta línea Kranz et al. (1988) propusieron una nueva metodología para la excavación de un metro cúbico de un monolito de suelo inalterado para investigaciones del transporte de solutos a través del perfil del suelo.

Igualmente (Marek et al., 1988) idearon otro sistema para la fabricación de lisímetros de pesada de suelo inalterado de  $9 \text{ m}^2 \times 2,3 \text{ m}$  de un peso conjunto de unas 45 Tn.

Winnik (1935), observó una permeabilidad mucho mayor en lisímetros de tipo relleno, respecto a los monolitos. Los lisímetros son bastante susceptibles a los efectos de la variabilidad espacial del suelo, por lo que este factor debe tenerse muy en cuenta en la decisión del lugar de instalación. También debe tenerse en cuenta que los flujos laterales que en condiciones naturales pueden producirse en el suelo no ocurren en los lisímetros de igual forma. Esto probablemente no es un gran problema en suelos ligeros, pero puede serlo en suelos arcillosos.

Admitiendo que el monolito contenido en el lisímetro está inalterado, la única diferencia entre este y el suelo del campo reside las condiciones del límite inferior, no quedando claro hasta que punto queda afectado el transporte de agua y solutos por dicho límite.

Esto plantea la cuestión de sí debe o no practicarse tensión en la base del suelo. El borde inferior del lisímetro está separado del suelo y normalmente expuesto a la presión atmosférica, lo que resulta una barrera hidráulica al flujo de agua, esto es debido a que la tensión superficial del agua en los capilares del suelo se ve afectada cuando existe una interfase suelo/aire en la base del lisímetro que rompe el continuum de agua.

Por ello para solucionar esta limitación, el límite inferior debe estar saturado con agua antes del que el drenaje pueda ocurrir. Para solventar el problema de la saturación se pueden emplear receptáculos cerámicos porosos para este límite inferior aunque para lisímetros de gran superficie, el uso de dispositivos de succión se hace impracticable y a menudo problemático. Por ello, la mayoría de estos lisímetros de mayor tamaño tienen un sistema de drenaje abierto a la presión atmosférica.

Este problema se ha tenido en cuenta desde hace al menos 50 años (Richards et al., 1939) y fue investigado con algún detalle por Colman (1946), quién demostró que la tensión mantenida en la base de una columna de suelo de 1,8 m, controlaba la cantidad de agua drenada, la velocidad de drenaje y el contenido de humedad del suelo.

Haines et al. (1982) encontraron que el flujo de agua resulta el doble o más cuando se aplica tensión, y que se producían diferencias sustanciales en las concentraciones iónicas. En particular, la concentración media de nitratos resultaba triple cuando no se aplicaba tensión respecto de cuando si se aplicaba. Los autores concluyeron que en flujo saturado resultaba más útil el sistema sin tensión, en tanto que para flujo insaturado es preferible practicar tensión en la base de los lisímetros.

Una característica limitante de todos los tipos de lisímetros es que retienen más humedad que la correspondiente a capacidad de campo, con el peligro de anaerobiosis y ocurrencia de desnitrificación (Colman, 1946; Maschhaupt, 1938, 1949).

Hanna et al. (1983), identificaron y recalcaron la importancia de determinar el movimiento de agua a través del perfil del suelo como vía para optimizar estrategias que incrementen la productividad del cultivo y para controlar el uso del agua y las pérdidas por lixiviado de nutrientes.

Por otra parte las medidas de campo de drenaje y lixiviado son indispensables para comprender la dinámica de los ciclos hidrológicos y de nutrientes de cualquier ecosistema.

El lixiviado en un lisímetro a través de una superficie porosa depende de dos condicionantes:

- 1) Discontinuidades mínimas en los caminos que sigue el agua en movimiento.
- 2) Las fuerzas conductoras que rigen el movimiento del agua.

La presencia de una conexión capilar entre la columna del suelo y la superficie del lisímetro es un imperativo para minimizar el encharcamiento, caminos preferenciales o puentes de flujo alrededor del lisímetro (Kung, 1993; Jemison y Fox, 1994).

Los lisímetros sin tensión en la base emplean sólo la gravedad como causa del movimiento del agua a través de los poros de la superficie porosa, por su parte los lisímetros con tensión en la base usan tanto la gravedad como el gradiente de potencial creado por la aplicación de succión a la superficie de la base porosa.

Los lisímetros sin tensión dependen de la formación de una zona de suelo saturado por encima de la plataforma porosa para que así pueda tener lugar el drenaje por flujo gravitacional. Esta condición rara vez se produce en la zona profunda de suelos bien drenados o moderadamente bien drenados lo que altera el contenido de agua y el potencial de agua del suelo en la zona radicular (Reeder, 1986).

El prerequisite de la saturación por encima de estos dispositivos de muestreo puede originar un drenaje de agua que rodee al lisímetro y produzca gradientes de potencial mátrico que originen un movimiento

de agua desde la zona saturada a la matriz insaturada del suelo circundante (Jemison y Fox, 1992).

Los lisímetros de tensión nula que presentan paredes laterales como continuación a la base porosa inferior (Reeder, 1986; Shipitalo y Edwards, 1993; Thompson y Sharft, 1994) pueden promover la aparición de un flujo descendente por la pared interior que fuerza un desecado en superficie (Thompson y Sharft, 1994) e impide las labores mecanizadas, la nascencia y el cultivo si esta pared se extiende por la superficie (Moyer et al., 1996).

Los lisímetros con tensión fija mejoran los patrones de flujo alrededor y a través de la base porosa en relación a los lisímetros sin tensión. Aún así las variaciones de potencial del agua ocurren en tiempos relativamente cortos y no son reproducibles con tensiómetros de tensión fija. La variación natural de los flujos de agua del suelo modifica la conductividad hidráulica en subsaturación lo que altera los flujos de drenaje.

Karnok y Kucharski (1982) describieron un lisímetro de tensión fija subterráneo desarrollado para el análisis de la zona radicular con el que analizar el crecimiento de raíces, la evapotranspiración y lixiviado a 33.3 Kpa.

Más recientemente, Dolan et al. (1993) hicieron uso de un microlisímetro con una tensión inferior a los 5 Kpa para determinar el efecto del nitrógeno en el lixiviado bajo un monocultivo de maíz en suelo arenoso.

Otras investigaciones se han llevado a cabo haciendo uso de tubos capilares muestreadores para obtener tensiones constantes obteniéndose resultados variables (Holder et al., 1991; Knutson y Selker, 1996).

Los lisímetros sin tensión en la base se han usado para estudios del lixiviado de agroquímicos y de movimiento de agua (Tyler y Thomas, 1977; Bergstrom, 1990; Bergstrom y Johansson, 1991; Shipitalo y Edwards, 1993; Jemison y Fox, 1994; Martin et al., 1994; Cabrera et al. 1995) en la recogida de coloides que transportan compuestos orgánicos y metales pesados (Thompson y Scharf, 1994) y en el rastreo del destino y del ciclo del N<sup>15</sup> (Moyer et al., 1996; Reeder, 1986).

Klocke et al. (1993), realizan una evaluación del uso de lisímetros como herramienta de medida de la percolación y características del agua centrándose en el lixiviado procedente de la zona radicular de los cultivos. Instalaron un total de 6 lisímetros en un cultivo de maíz en una localidad de Nebraska durante 1988 y 1989. Se trataba de lisímetros de tipo monolito rellenos de suelo inalterado empleándose para ello un método hidráulico de relleno. En el fondo se dispusieron extractores porosos de acero inoxidable lo que permitía la extracción vertical del lixiviado. Se midió el volumen lixiviado, el contenido de agua del suelo, la temperatura y la densidad volumétrica.

Los autores pusieron de manifiesto que la percolación variaba de un lisímetro a otro, lo que podía deberse a variaciones en las propiedades del suelo, pero dado que su comportamiento resultó parecido a lo largo del tiempo, concluyeron con que el uso de lisímetros puede ayudar a un mejor manejo del riego y para el control de la percolación de agua y solutos.

La comparación entre lisímetros con tensión en la base y sin ella se hace complicado debido a la diferente naturaleza de la acción que provoca el movimiento del agua en cada uno de los casos. En el primero se rige por la tensión matricial mientras que en el segundo lo hace por la fuerza de la gravedad.

Los lisímetros con tensión en la base y de cápsula porosa son apropiados para evaluar la naturaleza química del agua del suelo sometida a tensión. Estos lisímetros son ventajosos dado su bajo costo y su fácil instalación siendo los más útiles cuando se desea una fuente constante de suministro de agua del suelo (Parizek y Lane, 1970). Siendo apropiados para determinar la naturaleza química del agua no lo son para determinar la cantidad de agua en movimiento a través del perfil (Haines et al., 1982).

Los lisímetros de succión de cápsula porosa se usan extensamente para la extracción de agua del suelo para el control del transporte de solutos (Boll et al., 1990; Linden, 1977; Litaor, 1988; Grossman y Udluft, 1991), no estando claro como puede verse modificada la concentración de la muestra con los cambios de concentración de soluto del entorno o con la aplicación de succión en el lisímetro (Wu et al., 1995). En este sentido existen estudios que cuestionan la precisión y la representatividad de los lisímetros de succión para la medida de concentraciones en función de la profundidad (Hansen y Harris, 1975).

Warrick y Amoozegar-Fard (1977) simularon analíticamente el estado agua-suelo en las cercanías de un lisímetro de succión obteniendo una referencia del radio de influencia.

Van der Ploeg y Beese (1977), realizaron una simulación numérica del flujo de agua dentro de un lisímetro usando la ecuación de Richards para un flujo radial considerando una succión constante como condición de contorno para la cápsula porosa. Con estas condiciones obtiene que el radio de influencia de un lisímetro de succión se aproxima a 1 m.

Narasimham y Dreiss (1986) desarrollaron una simulación numérica considerando el lisímetro como un espacio finito en el cual la succión cambia con el tiempo, encontrando que tanto el volumen de agua

recogida como la zona de influencia eran función del volumen del lisímetro.

## **2.2. Métodos y técnicas aplicados en la investigación con lisímetros**

Mata et al. (1999) emplearon un lisímetro de pesada de grandes proporciones para ver el efecto que el riego deficitario puede tener sobre melocotoneros midiendo la evapotranspiración y contenido de agua el suelo. Durante los ensayos aplicaron una malla de polietileno sobre la superficie del lisímetro para evitar la evaporación superficial.

Con este trabajo demostraron que bajo condiciones deficitarias de riego los árboles reducen su transpiración pero la evaporación de suelo se incrementa por lo que sería una buena práctica reducir la frecuencia de riego afín de controlar la evaporación superficial.

Martínez et al. (1990), hicieron uso de un lisímetro de suelo alterado para cuantificar el efecto que un cultivo de raigrass durante el período entre cosechas de otoño e invierno en la cantidad y concentración de nitrato percolado.

La construcción del lisímetro tuvo lugar en 1968 consistía en un tanque de hormigón de 1 metro cúbico con cinco capas de suelo cada una de 20 cm de espesor. Pese a que se trataba de un lisímetro de suelo alterado los autores consideraron que un lapso de tiempo de 18 años permitiría que el suelo recuperara su estructura original.

Los ensayos realizados pusieron de manifiesto la importancia, desde un punto de vista ecológico, de este tipo de práctica dada la importante reducción del lixiviado de nitratos.

Martin et al. (1994), emplearon un lisímetro de suelo alterado para evaluar diferentes estrategias de manejo riegos a fin de minimizar el

lixiviado de nitratos en el cultivo de maíz. Para ello plantearon dos ensayos sobre lisímetros, en uno de ellos se siguió una estrategia de fertilización y riego convencionales y en el otro se aplicó una estrategia basada en aplicaciones puntuales de nitrógeno y agua en función de las necesidades diarias de las plantas.

El estudio mostraba:

- 1) La utilidad de los lisímetros para evaluar las aplicaciones de nitrógeno y el manejo del riego óptimos en relación al drenaje de agua y al lixiviado de nitrógeno.
- 2) Que el registro de los datos obtenidos a lo largo de los años permiten constatar que las mayores pérdidas de nitrógeno tienen lugar en el periodo de tiempo comprendido entre la recolección y la siguiente siembra.
- 3) Que la aplicación puntual de nitrógeno produce cantidades semejantes de grano aunque es de difícil implantación para ser usada por los agricultores.

Ahmad et al. (1991) analizaron un diseño de experimentos para denotar la importancia que tiene un buen sistema de drenaje para el cultivo de maíz pues un exceso de agua inhibe el intercambio de aire entre el suelo y la atmósfera con la consecuente deficiencia de oxígeno y con ello la respiración radicular y el transporte de nutrientes por las raíces de las plantas.

En los ensayos hicieron uso de un lisímetro forzando a que el nivel del agua en el interior del suelo de este estuviera siempre a una determinada cota para de esta forma inundar las raíces del maíz. Durante los ensayos se midieron varios parámetros (materia seca, altura de dosel y rendimiento) antes, durante y después de los

períodos con exceso de humedad aplicados. Los autores propusieron dos modelos de regresión para caracterizar el rendimiento de la producción de maíz en función de la duración de los periodos de exceso de humedad y en función de la altura de agua dentro de los lisímetros.

Gamble et al. (1990), hicieron uso de la teoría de colas para estimar el tiempo de permanencia del agua en el suelo dada la importancia que este factor presenta al influir sobre la composición química del suelo así como en el movimiento de contaminantes. Concretamente utilizaron tres tipos de colas diferentes para estimar la permanencia del agua de un lisímetro de tipo monolito y de suelo inalterado:

- 1) LIFO (último en entrar primero en salir).
- 2) FIFO (primero en entrar primero en salir)
- 3) Una combinación de las dos anteriores.

Para ajustar estos modelos se hizo uso de los datos obtenidos mensualmente a partir del lisímetro: precipitación, evapotranspiración, escorrentía y percolación. Obteniéndose que el modelo FIFO generaba tiempos de permanencia entre 3-11 meses, el LIFO entre 1-140 meses y el mixto entre 1-63 meses.

Por otra parte el modelo FIFO daba lugar al máximo tiempo de residencia para agua aportada en verano y los modelos LIFO y mixto para el agua aportada en invierno.

Abbaspour et al. (1999), investigaron, haciendo uso de los datos de campo procedentes de 36 lisímetros de suelo alterado rellenos con dos tipos de suelo arenoso, las consecuencias de emplear diferentes variables o una combinación de estas (altura de presión, contenido de agua, volumen acumulado) en la estimación de parámetros hidráulicos por modelización inversa. Para ello se propuso una serie de funciones objetivo realizadas en torno a parámetros condicionados es decir

parámetros asociados a un dominio en el cual una simulación estadística asegura que el 95 % de los valores están en dicho dominio considerando una distribución normal de las variables.

Brye et al. (1999), midieron el drenaje a través del suelo con 3 lisímetros diseñados para mantener en equilibrio entre la succión de estos y el potencial mátrico del suelo. Fueron instalados el primero en una pradera natural, el segundo en una parcela de no laboreo y fertilizada con nitrógeno y el tercero en una parcela ecológica a la que se aplican pases de chisel.

Los lisímetros permitían monitorizar el drenaje de forma continua a 1,4 m debajo de la superficie del suelo y a través de una malla de acero inoxidable de 0,2  $\mu\text{m}$  y de 0,19  $\text{m}^2$ . La succión se mantuvo de acuerdo al potencial mátrico del suelo circundante. Los drenajes fueron del 11, 31 y 44 % respectivamente.

Una necesidad cuando se evalúa desde el punto de vista de la investigación en el ámbito agronómico o medioambiental la naturaleza y cantidad de agua que percola, es si las muestras son representativas de la verdadera agua percolada a través del perfil del suelo.

En la actualidad existen muchas técnicas de muestreo de la solución del suelo, y todas ellas presentan alguna dificultad asociada con su uso, no existiendo un único método de muestreo que sea apropiado para todos los casos (Litaor, 1988).

Los lisímetros tipo “pan” (del inglés “pan lysimeter”), proporcionan un método de determinar la naturaleza y la cantidad de agua drenada a través del perfil del suelo (Joffe, 1932; Jordan 1968), siendo especialmente apropiados para suelos bien estructurados y de alto contenido en arcilla al ser capaces de interceptar flujos preferenciales (Barber y Brown, 1986; White, 1985). Aún así presentan una baja

eficiencia de recolección definida esta como el cociente entre el volumen de agua recogido por el lisímetro y el flujo de agua que abandona la zona radicular estimado mediante un balance hídrico (Rusell y Ewel, 1985), si bien se han realizado esfuerzos para mejorar este parámetro (Radulovich y Sollins, 1987).

Dentro de esta línea anterior Jemison et al. (1992) propusieron un método para la estimación de la eficiencia de recolección usando trazadores de bromuro.

### **2.3. Sistemas de control y registro en lisímetros**

Allen et al. (1990), diseñaron los circuitos electrónicos necesarios para la monitorización de un lisímetro de pesada. Constatando la limitación que impone la resolución de la célula de carga a la cadena de adquisición de datos.

Concretamente hicieron uso de un una base cuadrada sobre la que se soportaba el lisímetro, en esta base estaban dispuestas 4 células de carga cada una de 910 Kg y 3500 pasos/fondo de escala y 2 mV/V. Con ello cada célula de carga se hacía trabajar aproximadamente un 70 % de su valor nominal. Para el almacenamiento de los datos se emplearon un registrador (datalogger) modelo 21X de Campbell Scientific Inc. con 16 entradas diferenciales y 14 bits de resolución y un multiplexor analógico modelo AM32 que proporciona otros 32 canales diferenciales con lo que en teoría se podían constatar cambios en la masa del lisímetro del 0.0067 %. Como la célula de carga admitía sólo 3500 particiones la resolución real máxima que se obtuvo fue del 0.03 %.

Los autores constataron el problema de la estabilidad térmica y de la histéresis a la que se ven sometidos los circuitos de medida en este tipo de lisímetros pese al empleo de células de carga a puente

completo y compensadas en temperatura ya sugerido por otros autores (Hanks y Shawcroft, 1965; Black et al., 1968).

Phene et al. (1989), propusieron el uso de un lisímetro como sistema de control de riego en lazo cerrado para la medida de la evapotranspiración de un cultivo así como para programar el riego del propio lisímetro y de tres parcelas del alrededor con riego por goteo. El sistema era capaz de recargar automáticamente el lisímetro cuando las pérdidas por evapotranspiración eran de 1 mm (4 Kg).

Los autores incluyeron como novedad en el uso de lisímetros un nuevo concepto, el de control discreto de sistemas en lazo cerrado empleando como señal de error la pérdida de peso del lisímetro.

Marek et al. (1988) emplearon para la medida del peso una novedosa cadena de adquisición de datos compuesta por células de carga, un registrador CR-7X y un sistema de telecomunicación que permite enviar los datos a un ordenador remoto.

## 2.4. Funciones de transferencia y modelos de hidrograma unitario

En un sistema lineal invariante en el tiempo se define la función de transferencia (FT) del sistema como el cociente entre la transformada de Laplace de la salida  $C(s)$  y la transformada de Laplace de la entrada  $R(s)$  con todas las condiciones iniciales nulas.

Se designa por

$$G(s) = \frac{C(s)}{R(s)} \quad (1)$$

La FT es una característica de los elementos internos del sistema siendo por definición independiente de la entrada y relacionando entrada y salida pero sin proporcionar información alguna sobre la estructura física del sistema.

El concepto de FT es aplicable al estudio de sistemas hidrológicos siendo posible definir modelos hidrológicos sencillos definidos por estas funciones de transferencia conocidas en este caso como Hidrogramas Unitarios Instantáneos.

Ayuso (1990) aplicó el modelo conceptual de Nash (1957) de  $n$  embalses iguales en serie para pequeñas cuencas obteniendo una función de transferencia (HUI) que adopta la forma de la función de densidad de una Gamma.

Plate et al. (1988), desarrollaron un modelo para el cálculo de avenidas que emplea la subdivisión de la zona de captación en pequeñas elementos conectados entre sí para formar el modelo de la cuenca. El flujo procedente de cada elemento es calculado aplicando el modelo del hidrograma unitario. Los autores asumen el modelo de embalses serie de (Nash, 1957) definido por una función de densidad de una Gamma:

$$u(t) = \frac{t^{n-1}}{k^n \cdot \Gamma(n)} \cdot e^{-\frac{t}{k}} \quad (2)$$

Siendo:

K: Factor de escala.

n: Factor de forma de la distribución.

$\Gamma(n)$ : Función Gamma.

Los parámetros n y K de la distribución Gamma son encontrados a partir de del punto en el que esta función toma su máximo valor. Sean  $t_A$  y  $u_{max}$  los valores de este punto, entonces se puede escribir que:

$$t_A = (n-1) \cdot k \quad (3)$$

$$u_{max} = u(t = t_A) = \frac{(n-1)^{n-1}}{k \cdot \Gamma(n)} \cdot e^{-(n-1)} \quad (4)$$

Los autores hicieron uso para el tiempo  $t_A$  de una función empírica que depende de las características de la región y de la cuenca, concretamente de la relación de Lutz (1984) definida por la expresión

$$t_A = P_1 \cdot \left( \frac{L \cdot L_C}{I \cdot G^{1.5}} \right)^{0.26} \cdot e^{-0.016a} \cdot e^{0.004b} \quad (5)$$

Siendo:

$\alpha$ : % de área urbanizada por bosque de la cuenca.

$\beta$ : % de área cubierta por bosque de la cuenca.

$P_1$ : Factor que incluye todas las influencias no atribuibles a la topografía o al terreno.

IG: Pendiente media en la cueca.

L: Distancia del punto más alto a la salida de la cuenca

Lc: Distancia del punto más alto al centro de gravedad de la cuenca.

La aplicación de este método permite una rápida estimación de los parámetros  $k$  y  $n$  que definen el modelo de embalses en cascada.

Lin et al. (1996) aportaron un nuevo enfoque estocástico para describir el hidrograma unitario instantáneo del modelo de embalses lineales en serie, para lo cual consideran el coeficiente de almacenamiento  $K$  como una variable aleatoria.

La solución propuesta presenta la forma:

$$q_n(t) = \frac{1}{k \cdot (n-1)!} \cdot \left(\frac{t}{k}\right)^{n-1} \cdot e^{-\frac{t}{k}} \quad (6)$$

Siendo por tanto idéntica a la solución determinista aportada por Nash (1957) para valores enteros del parámetro de forma  $n$ .

## **2.5. Equipos electrónicos para la medida en campo.**

### **2.5.1. Sistemas para la medida de caudal en fluidos**

La medición de caudales tiene su importancia en el ámbito de la agricultura y en especial en el riego.

Existen varios métodos para medir el caudal según sea el tipo de fluido, la precisión deseada, el control requerido y el tipo de caudal volumétrico o másico (Creus, 1983).

Básicamente se pueden distinguir dos sistemas:

- 1) Aquellos en los que las medidas que se hacen con líquido confinado a presión.
- 2) Los que se realizan con lámina de aire y por ello a presión atmosférica.

Dentro del primer grupo existen dos grupos:

- 1) Los medidores volumétricos en los que la medida se efectúa principalmente con elementos que dan lugar a una presión diferencial al paso del fluido. Entre estos elementos se encuentran la placa-orificio o diafragma, la tobera y el tubo de Venturi.
- 2) Los medidores de caudal másico en los que este puede determinarse a partir de una medida volumétrica compensándola para las variaciones de la densidad del fluido o bien determinando directamente el caudal aprovechando características medibles de la masa del fluido como variaciones térmicas, conservación del momento angular del fluido o por presión diferencial.

En el segundo grupo, los sistemas de aforo modular para corrientes libres basan su funcionamiento en el hecho de que una corriente libre permanente, uniforme o gradualmente variada, puede quedar condicionada por transiciones singulares relativamente cortas donde se reduce la sección imponiéndose un movimiento bruscamente variado en el que se llega a alcanzar el régimen crítico (Losada, 1987). Aguas arriba, la corriente subcrítica no es afectada por pequeñas perturbaciones desde cola, pues las ondas que aquí puedan producirse quedan detenidas o arrastradas, por la corriente rápida producida en esa sección de control.

Bonta (1998), analizó la medida de flujos cargados de sedimentos un para ello propone una modificación al vertedero desarrollado por Johnson et al. (1966) para evitar que los sedimentos en suspensión introduzcan errores significativos en la medida del caudal.

Diversos autores han propuesto sistemas de tipo mecánico capaces de realizar la medida de caudal en corrientes libres procedentes de la escorrentía superficial (Barfield et al., 1986; Khan et al., 1997), se trata de aparatos de cangilón basculante cuya primer aplicación fue la medida continua de cantidad de lluvia (Cornish y Green, 1982).

Laguna (1989) empleó con pequeñas modificaciones el aparato descrito por Barfield et al. (1986) para realizar ensayos de erosión junto a un simulador de lluvia y una trampa de sedimentos registrando las medidas con la ayuda de un ordenador.

Yoder et al. (1998) desarrollaron un sistema un sistema libre de histéresis capaz de generar flujos variables en el tiempo para de esta forma simular diferentes modelos de hidrogramas de avenida. El equipo consta de una bomba eléctrica, una unidad de medida, un regulador de flujo y una unidad controlada por ordenador que actúa en el lazo de

realimentación cerrado que existe entre la unidad de medida y la de control del flujo.

### **2.5.2. Sistemas de adquisición y registro de información**

La medida y registro de magnitudes físicas exige un equipo compuesto por una cadena de adquisición en la que podemos encontrar los siguientes elementos:

- 1) Sensor de la magnitud física
- 2) Acondicionador de la señal para su posterior registro
- 3) Conversión analógico-digital (puede no existir)
- 4) Registro de los datos (analógicos o digitales)

En el ámbito agronómico encontramos diversas aplicaciones de interés:

Agüera (1986), puso a punto un penetrómetro de precisión para una profundidad de 80 cm y un ancho máximo de 2.4 m. El aparato se monta sobre el enganche tripuntal del tractor. Los sensores están constituidos por un captador extensométrico, que permite conocer la resistencia del suelo a la penetración y un transductor potenciométrico con el que se determina la posición de la punta. Los acondicionadores se basan en amplificadores en modo diferencial desarrollados en torno al circuito integrado LM-741. La conversión analógico-digital se encomienda a un convertidor de aproximaciones sucesivas de 8 canales y 8 bits modelo ADC-0808 y finalmente, para el registro de datos utiliza un enlace RS232-C a una velocidad máxima de 9600 baudios (Rodríguez et al., 1992) con un ordenador portátil que sirve para el almacenamiento y el control de las operaciones.

Valera (1997), desarrolló un sistema de medida del microrelieve superficial compuesto por un bastidor en acero inoxidable de aproximadamente 1 m<sup>2</sup> de sección útil de trabajo que porta dos sensores potenciométricos para la medida del desplazamiento en el plano horizontal y de un cabezal láser capaz de medir la distancia relativa del suelo a un plano de referencia. El autor emplea un convertidor analógico-digital de 12 bits sobre un fondo de escala de 4096 mV y con ello optimiza la cadena de medida al extraer las máximas prestaciones del cabezal láser. El registro de datos también se realiza en un ordenador portátil pero empleando un enlace con el puerto paralelo lo que acelera la transferencia de información. El control del proceso se realiza a través de un programa desarrollado en lenguaje C.

Salas (1993), realizó una caracterización energética de operaciones mecanizadas bajo distintos sistemas de manejo de suelo y residuos empleando para ello un equipo desarrollado por (Cubero, 1986; Illanes, 1990) y mejorado posteriormente por Gil et al. (1991) y Gil et al. (1992). El sistema aportaba varias novedades:

- 1) Un sistema de captura que comprende los sensores necesarios.
- 2) Un sistema de acondicionamiento y transmisión de los datos que incluye un registrador primario (datalogger) que realiza la conversión analógico-digital conectado por una parte a los sensores y por la otra a un modem que a su vez se conecta a un equipo emisor-receptor.
- 3) Un sistema de almacenamiento y análisis consistente en un ordenador portátil en el que se almacenan los datos y en el que se realiza un primer análisis de los mismos.

La gran ventaja de este sistema reside por una parte en el control a distancia del equipo de registro primario a través de las ordenes enviadas vía modem desde el ordenador y por otra, en que el análisis primario y el

control del sistema lo puede realizar otra persona distinta al operario del tractor.

Madueño (1994), empleando el equipo de medida anterior, aportó un sistema para la medida del par torsor de las ruedas motrices de un tractor. El equipo empleaba un anillo de torsión dotado de galgas extensométricas configuradas para la medida de momento torsor, su alimentación era autónoma y los datos se enviaban por telemetría de corta distancia ensayándose para ello dos procedimientos:

- 1) Uso de un transmisor capacitivo y modulación PDM (Pulsos de duración variable).
- 2) Empleo de infrarrojos con portadora modulada a través de un convertidor tensión-frecuencia con una resolución equivalente a 13 bits.

El sistema aportaba la ventaja de la inmunidad frente a señales radioléctricas que pudieran generar interferencias, en especial aquellas procedentes del sistema eléctrico del tractor.

Para la adquisición de datos se han desarrollado unos dispositivos específicos denominados registradores (Data acquisition (DAQ) o Datalogger), constituidos por una cadena autónoma adquisición de datos controlada por microcontrolador, siendo su empleo frecuente en el ámbito industrial y agronómico.

Peltier et al. (1999) monitorizaron el rendimiento de un cultivo de tomate midiendo de forma continua el caudal másico obtenido en el proceso de la recolección. Simultáneamente determinaron en tiempo real el posicionamiento de la máquina recolectora mediante un sistema de GPS. El conjunto de la información quedaba almacenado en un

registrador para su análisis posterior. Mediante este procedimiento es posible conocer trazar planos con el rendimiento puntual.

### **2.5.3. Sistemas de control en agricultura**

Existen dos sistemas básicos para el control de procesos (Franklin et al., 1991):

1) Sistemas de control en lazo abierto en los que la salida del sistema depende de la señal de entrada, pero el sistema no comprueba si la señal real de salida es igual a la señal deseada, lo que significa que el sistema es incapaz de corregir los errores a la salida. En la práctica, sólo se puede utilizar si la relación entre la entrada y la salida es conocida y no se presentan perturbaciones de ningún tipo.

Aplicaciones con este tipo de control se han realizado con éxito para sistemas de posicionamiento controlados con motores del tipo paso a paso (Angulo et al., 1999).

King et al. (1999), desarrollaron un sistema digital de control en lazo abierto para implementar la aplicación automatizada de agua y productos químicos mediante dos sistemas de riego uno con pivot central y otro de desplazamiento lineal permitiendo la aplicación de dosis variables de agua y productos químicos para valorar beneficios potenciales sobre la explotación.

2) Sistemas de control en lazo cerrado en los que el sistema de control comprueba la señal de salida y decide si el nivel de la señal de salida corresponde al de la señal deseada, o si el nivel de la señal real a de

ser modificado para conseguir el objetivo fijado, este procedimiento se conoce como realimentación.

Este tipo de sistemas ha evolucionado pasando desde equipos en los que comparación la realiza un operario humano, a sistemas mecánicos y finalmente a sistemas electrónicos: Analógico, digital u ordenador.

Llanos (1993) desarrolló un sistema analógico de control eficaz, fiable y económico que permite la automatización de forma autoprogramada de sistemas de riego localizado bajo presión en función de la demanda evaporativa del aire medida en un evaporímetro de cubeta clase A, dotando además al sistema de un equipo de registro continuo de evaporación.

El uso de microcontroladores permite el desarrollo de aplicaciones específicas por el propio investigador. En la actualidad es fácil obtener a costo razonable todas las herramientas de desarrollo, programación, simulación y emulación necesarias, siendo dos las principales arquitecturas de los microcontroladores actuales:

- 1) CISC: Dispositivos con un juego de instrucciones complejo. Disponen de más de 80 instrucciones máquina en su repertorio, algunas de las cuales son muy sofisticadas y potentes, requiriendo muchos ciclos para su ejecución, (destaca la familia 8031 de INTEL).
- 2) RISC: Dispositivos con un juego de instrucciones reducido. En estos procesadores el juego de instrucciones es muy reducido y las instrucciones son simples y, generalmente, se ejecutan en un solo ciclo de instrucción.

Agüera et al. (1992), desarrollaron un sistema, que por medio de un microcontrolador (INTEL 8031) en el que se había memorizado el plano de isoconsumo del motor de un tractor, aconsejaba al tractorista sobre la relación de transmisión eficaz, de manera que el motor generase la misma potencia pero con un consumo menor y conservando siempre una reserva de potencia de al menos el 20 %.

Martín et al. (1995) realizaron la automatización integral de una piscifactoría compuesta de varios estanques. Se controlaban tres parámetros temperatura del agua, oxígeno disuelto en el agua y alimentación de los peces. Para este último aspecto se disponía de dispensadores "bajo demanda" que soltaban grano cada vez que lo pedía el pez al presionar una varilla. Los módulos que informan sobre la situación de cada estanque fueron implementados con microcontroladores (MICROCHIP PIC16C84). Los módulos de salida que gobiernan los efectores de regulación de oxígeno y dispensación de alimento, también fueron construidos con microcontroladores. El módulo que adapta el formato RS-485 al formato RS-232-C nuevamente se realizó con el mismo microcontrolador.

Tait et al. (1995), desarrollaron un sistema integral de registro y control para el estudio de los procesos de drenaje del suelo y contenido químico del agua percolada. Para ello emplearon una unidad de adquisición y registro de datos y un sistema de control y monitorización de los sensores para actuar de forma automática sobre el sistema en ensayo. El análisis de los datos mostró gran concordancia con las predicciones teóricas lo que viene a demostrar la importancia que del desarrollo de este tipo de sistemas integrales tiene para la investigación.

### 3. MATERIAL Y MÉTODOS

### **3.1. Introducción**

Para poder cuantificar y analizar el agua percolada en dos lisímetros de tipo monolito sin tensión en la base, se han desarrollado sendos caudalímetros máscicos registradores, el primero con una capacidad de 8 K datos y el segundo de 32 K datos. Con estos equipos se va a realizar el seguimiento de la evolución temporal de la masa de líquido que drena por los dos lisímetros para cada episodio de riego controlado que se va a llevar a cabo.

También se han desarrollado los programas informáticos necesarios para el control de ambos equipos y para el tratamiento de la información que proporcionan.

El análisis de esta información nos permitirá conocer la adecuación del modelo de embalses serie de Nash (1957) al estudio y análisis de la evolución temporal del movimiento de agua de lisímetros y además proporcionará la información necesaria para el desarrollo de un toma-muestras automatizado que permitirá un análisis químico posterior en laboratorio del contenido de solutos del agua percolada.

En el ajuste del modelo de embalses en serie se han empleado cuatro aproximaciones:

- Un método simplificado basado en las propiedades del punto de máximo de la función de densidad Gamma que caracteriza al modelo de embalses en serie (Plate et al., 1988), su empleo permite obviar el uso de ecuaciones semejantes a la propuesta por Lutz (1984).
- Una regresión simplificada que equipara el Hidrograma Unitario Instantáneo (HUI) del lisímetro al Hidrograma Unitario (HU) de duración igual al episodio de riego.
- Una regresión completa que realiza numéricamente la integral de convolución del HUI para obtener el HU.

- Atendiendo a las propiedades de los momentos de primer y segundo orden de la función de densidad Gamma (Ayuso, 1990).

### 3.1.1. Método simplificado

La aplicación del modelo de n embalses en serie da lugar a una función de transferencia (para este caso particular denominada Hidrograma Unitario Instantáneo HUI), que se corresponde con la función de densidad de la distribución Gamma (Ayuso, 1990, epígrafe 3.6.2.).

$$h(t) = \frac{1}{K \cdot \Gamma(n)} \cdot \left(\frac{t}{K}\right)^{n-1} \cdot e^{-\frac{t}{K}} \quad (7)$$

Siendo K el parámetro de escala y n el parámetro de forma de esta distribución.

Puesto que este HUI es la función de transferencia del sistema es independiente de las entradas o salidas aplicadas dependiendo sólo de las características intrínsecas del sistema.

La aplicación de una entrada I(T) de duración finita, produce una salida definida por la integral de convolución:

$$Q(t) = \int_0^t I(t) \cdot h(t-t) \cdot dt \quad (8)$$

Es posible definir un Hidrograma Unitario de duración  $\Delta t$  que represente la integral de convolución del sistema para una entrada I(t) de duración finita  $\Delta t$  y de valor unitario

$$q(t) = \frac{1}{\Delta t} \cdot \int_{t-\Delta t}^t \frac{1}{K \cdot \Gamma(n)} \cdot \left(\frac{t}{K}\right)^{n-1} \cdot e^{-\frac{t}{K}} \cdot dt \quad (9)$$

Si la duración de la entrada es muy pequeña en relación al proceso de circulación completo  $(t/\Delta t) \rightarrow 0$ , entonces se puede realizar la siguiente simplificación:

$$Q(t) \cong I \cdot q(t) \cong I \cdot h(t) \quad (10)$$

Siendo I de valor constante y de duración  $\Delta t$ .

La función de densidad de la distribución Gamma tiene un único punto singular para  $dh(t)/dt=0$  y se corresponde con

$$t_{max} = K \cdot (n - 1) \quad (11)$$

por lo tanto se puede poner

$$Q_{max} = V \cdot \frac{1}{K \cdot \Gamma\left(\frac{t_{max}}{K} + 1\right)} \cdot \left(\frac{t_{max}}{K}\right)^{\left(\frac{t_{max}}{K}\right)} \cdot e^{-\frac{t_{max}}{K}} \quad (12)$$

si en lugar de altura de agua empleamos volumen (V).

### 3.1.1.1. El algoritmo de optimización

Si a partir de los datos de campo se determina el valor de  $t_{max}$  y  $Q_{max}$ , siendo conocido el volumen V de agua aplicado, es posible resolver el sistema de ecuaciones (11) y (12) y con ello determinar los valores de K y n de la función de densidad Gamma. Dado que (1) presenta el parámetro K implícito es necesario una resolución por tanteos, el desarrollo del programa necesario se detalla en el apartado 3.4.9.

### **3.1.2. Regresiones numéricas**

Si obtenemos un fichero de campo con parejas de datos de la forma  $(t, q)$  es posible buscar una función que se ajuste a esos datos haciendo que la suma de los errores al cuadrado sea mínima. El procedimiento habitual es la derivación paramétrica, y para funciones objeto no lineales existen varios procedimientos: Marquardt, Gauss-Newton, y pasos descendentes (Steepest Descent).

Otra alternativa es aplicar un método iterativo de búsqueda con ordenador capaz de obtener los parámetros a ajustar minimizando el error cuadrático entre datos experimentales y los obtenidos al calcular la función objeto.

Para el caso particular de la f.d.d. de la distribución Gamma los parámetros a ajustar son  $K$  y  $n$ . El organigrama del algoritmo de optimización aparece en la figura 1, con la siguiente secuencia:

- Fijamos el valor inicial de los parámetros  $K$  y  $n$ .
- Iniciamos dos bucles anidados entre dos límites para  $K$  y  $n$ .
- Realizamos la síntesis numérica de  $m$  datos de los datos a partir de la función objetivo y generamos los valores del caudal de salida y de volumen acumulado.
- Generamos la suma de errores al cuadrado a partir del fichero de datos de campo.
- Comparamos el error actual con el anterior y si es menor tomamos los actuales  $K$  y  $n$  como los óptimos.
- El proceso continua hasta que se ensayan todas las posibilidades.

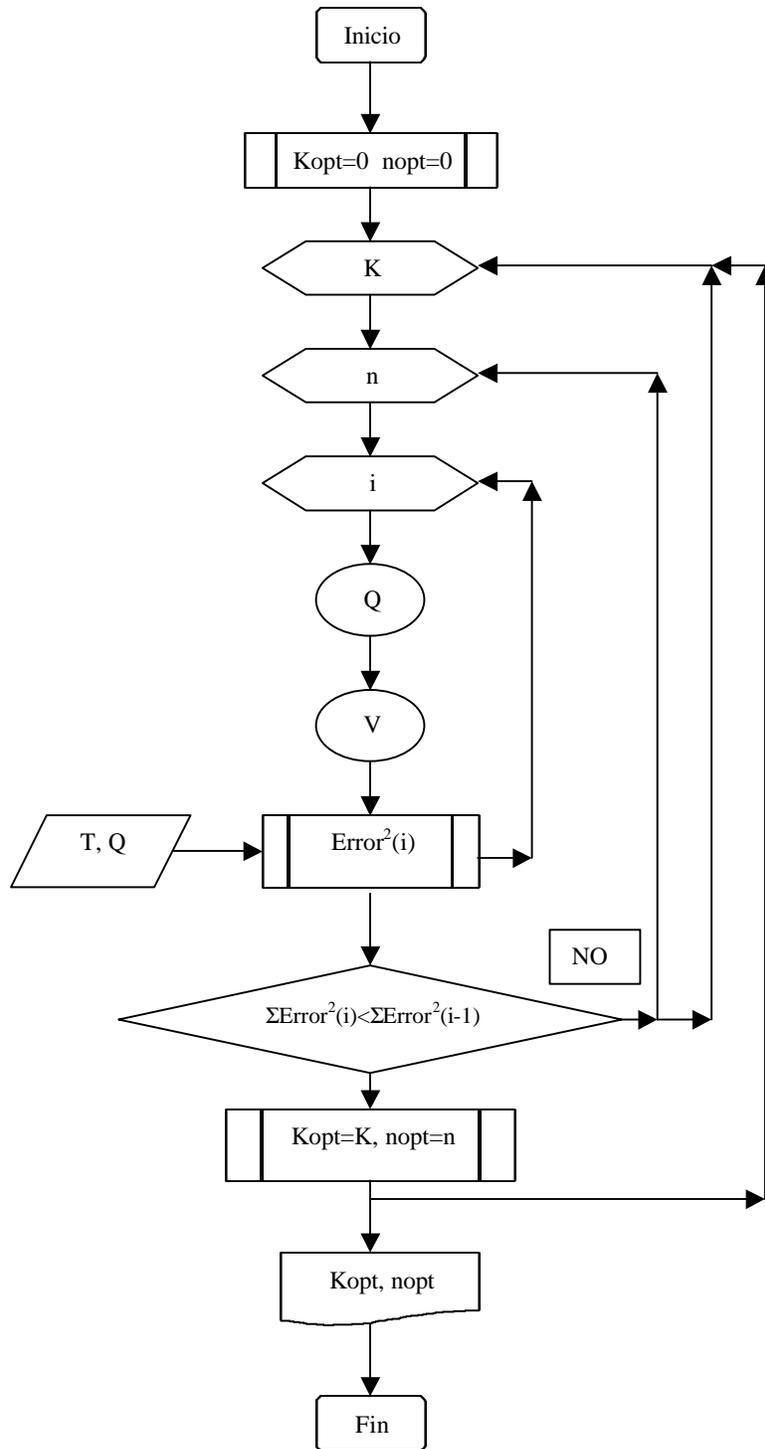


Figura 1. Organigrama del algoritmo de optimización numérico

### 3.1.2.1. Implementación de las funciones de caudal y volumen

Una de las características más importantes de la f.d.d. de la distribución Gamma es que no tiene una función de distribución que se pueda calcular analíticamente, por ello es necesario implementar algunos algoritmos para su cálculo. Se han resuelto dos posibilidades:

1. Cálculo de la integral de una función analítica por medio de la regla de Simpson.
2. Cálculo de la integral de una función definida mediante un fichero de datos empleando el método de los trapecios.

#### 3.1.2.1.1. La función de caudal

El cálculo en forma de fichero de los datos de caudal a partir de los parámetros  $K$  y  $n$  exige implementar un algoritmo que calcule a ecuación (9), para ello empleando (7) se puede determinar por Simpson la integral

$$g(t) = \int_0^t h(t) \cdot dt \quad (13)$$

y con ello un procedimiento en la forma de subrutina o función, que al ser invocado determine (9) aplicando la siguiente identidad

$$Q(t) = \frac{1}{\Delta t} \cdot [g(t) - g(t - \Delta t)] \quad (14)$$

que es el Hidrograma Unitario HU o respuesta a un impulso unitario de duración  $\Delta t$ .

### **3.1.2.1.2. La función de volumen**

El cálculo de esta función se ha resuelto de dos formas:

1. Mediante el método de los trapecios para funciones de caudal expresadas como un fichero de datos
2. Mediante la regla de Simpson para funciones de caudal expresadas analíticamente.

### **3.1.2.2. Regresión simplificada**

Se trata de una aproximación para el cálculo de los parámetros  $K$  y  $n$  de la función Gamma empleando el algoritmo de optimización descrito en 3.1.2. y considerando la simplificación descrita por la aproximación (10) por lo que se parte de una forma analítica de la función de caudal y por ello la función de volumen se obtiene por Simpson. El programa desarrollado se describe en 3.4.10.

### **3.1.2.3. Regresión Completa**

Si se considera que la duración del episodio de riego es finito, se hace necesario el cálculo de (14) y a partir de aquí el fichero de datos correspondientes al volumen mediante el método de los trapecios. La aplicación informática que implementa esta alternativa aparece en 3.4.11.

### **3.1.3. La derivación numérica**

La derivación numérica obtenida a partir de datos experimentales suele producir pobres resultados (Press et al., 1994) por lo que se debe obviar siempre que sea posible. La discretización que produce la digitalización de la información introduce una fuente de error no despreciable para el cálculo de la derivada, dado que si dos datos han digitalizados con el mismo valor digital aunque en el campo analógico sean distintos, la derivada numérica obtenida a partir de ellos será nula.

### **3.1.3.1. Determinación de los parámetros K y n a partir las propiedades de los momentos de primer y segundo orden de la función Gamma.**

Diversas formas de HUI propuestas por varios autores (Nash, 1957 y Lin et al., 1996) presentan propiedades interesantes que pueden resultar de utilidad para el cálculo de los parámetros que las definen.

Los momentos de primer y segundo orden de la función Gamma tienen carácter lineal, y ello facilita una vía que permite calcular con facilidad los parámetros K y n a partir del Hidrograma (caudal) y el Hietograma (precipitación o riego). El método exige que los datos numéricos del hidrograma se correspondan al proceso completo de circulación por lo que sólo deben ser nulos el primer y el último dato. Debido a este requerimiento y dado el efecto discretizante de los convertidores Analógicos/Digitales de los equipos de registro, su aplicación puede requerir el empleo de resoluciones elevadas. Las aplicaciones informáticas desarrolladas son una adaptación de las realizadas por Ayuso (1990) para el caso particular de lisímetros (3.4.5, 3.4.6., 3.4.12.1. y 3.4.12.2.). Es esta limitación que impone el convertidor la que aconseja la puesta a punto de métodos alternativos que empleen directamente los datos del volumen y no los de caudal obtenidos de los anteriores a partir de derivación numérica (3.4.9., 3.4.10. y 3.4.11.).

### 3.2. Caudalímetro gravimétrico para pequeñas masas.

Tras una revisión de diferentes dispositivos medidores de caudal tanto de entorno industrial Creus, (1983) como en el agronómico Barfield et al., (1986) Laguna (1989) y Yoder (1998) se concluye con que ninguno es apropiado para la medida del líquido percolado procedente de un lisímetro monolítico de suelo inalterado sin tensión en la base. Debiéndose esto a los siguientes motivos:

1. El agua a la salida del lisímetro está a presión atmosférica y por ello no es factible el uso de caudalímetros desarrollados para fluidos a presión.
2. Dado que los caudales que se van a medir son de pequeña cuantía, no es recomendable el uso de un medidor de cangilones por varios motivos:
  - El cangilón basculante debería ser de dimensiones muy reducidas, lo que dificulta su realización mecánica.
  - Los autores antes citados constatan la dificultad que conlleva la puesta a punto de este dispositivo así como su calibración.
  - Exigiría un registrador de pulsos en lugar de un registrador de tensión/corriente, esta opción figura habitualmente en los registradores de gama alta lo que se traduciría en un encarecimiento del equipo.

Entre las posibles soluciones alternativas se pensó en un sistema de medida del nivel del líquido que se recogía en un recipiente midiendo la presión en el fondo del depósito mediante un sensor de presión. Pero la solución presentaba varios problemas:

1. El sensor era sensible a la temperatura ambiente.
2. Los rangos de medida de este sensor y la resolución del convertidor del registrador (8 bits) hacía que la precisión del conjunto fuera muy baja.

Una primera aproximación a la solución final consistió en medir el peso del líquido que salía del lisímetro a intervalos de tiempo prefijados. Esta solución exigía el empleo de una célula de carga compensada en temperatura, fácil de obtener. El depósito inicial con el que se contaba era de 25 Kg y el registrador de datos de 8 bits y por lo tanto de 255 pasos. Esto significaba que la resolución máxima que se podía obtener era de 98,04 gr, demasiado reducida para permitir un correcto seguimiento de la evolución temporal del caudal drenado.

La solución definitiva consistió en fraccionar fondo de escala ideando un sistema capaz de albergar en un depósito intermedio una cantidad de agua mucho menor que la total a recoger y dotado de una válvula de descarga que permitiera el vertido procedente de este depósito intermedio de pequeñas dimensiones al depósito principal.

Empleando este principio, la célula de carga a usar podía ser de menor rango (3-5 Kg) con lo que empleando el mismo registrador (8 bits ) la resolución mejoraba notablemente: (19.6 gr para una célula de carga de 5 Kg).

Una primera aproximación al funcionamiento global del caudalímetro es la siguiente (fig. 2):

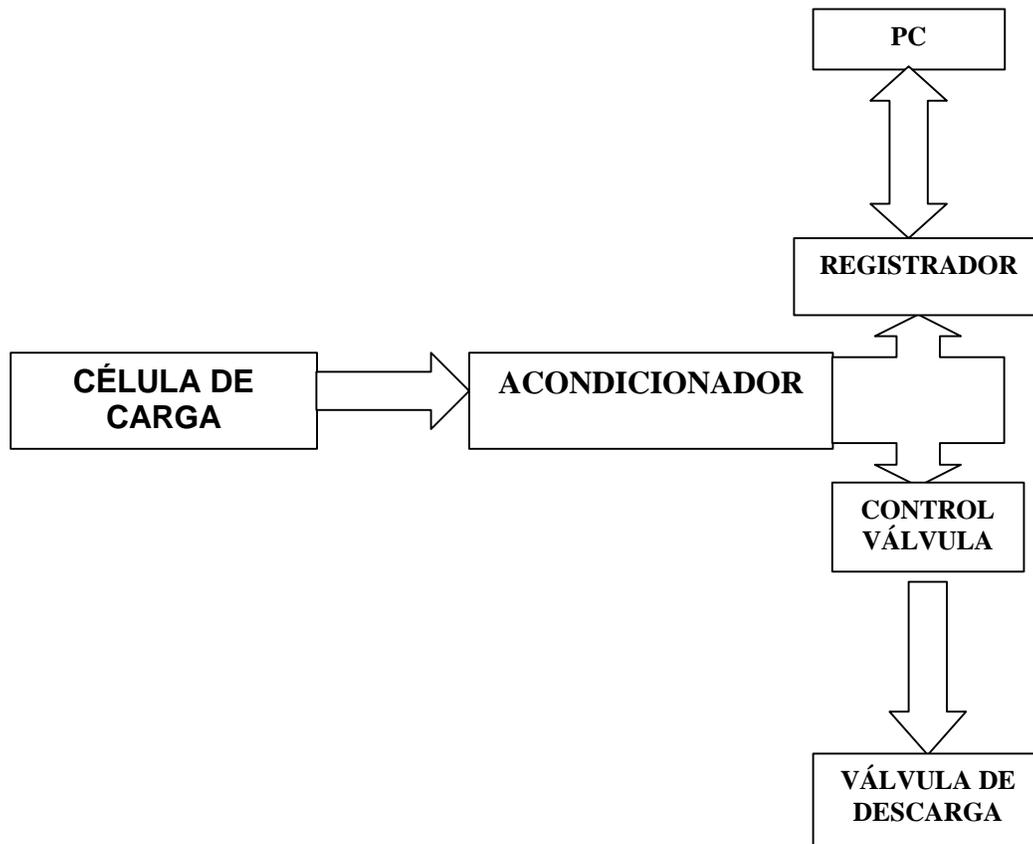


Figura 2. Esquema general conjunto del medidor de caudal.

La célula de carga mide el peso del líquido que se va acumulando en el depósito pequeño con una cadencia que está programada en el registrador de datos. La señal medida es acondicionada convenientemente mediante un amplificador de instrumentación para poder ser almacenada. Simultáneamente esta señal actúa sobre el circuito de control de la válvula la cual se abrirá cuando el peso de líquido almacenado en el depósito pequeño llegue a un valor prefijado.

Terminado el registro de datos estos quedan almacenados hasta que sean volcados a un PC portátil mediante una conexión RS-232-C. Precisamente es a través de esta conexión como se programa el intervalo entre muestras, el momento en el que el caudalímetro empezará a tomar valores o la reescritura de la memoria.

### **3.2.1. Descripción mecánica de caudalímetro**

Podemos distinguir los siguientes componentes fundamentales:

En primer lugar el brazo soporte, el cual tiene la función de unir físicamente la caja que alberga el circuito de registro y control, el sensor de peso, el depósito y la válvula de descarga (fig. 3,4). Este brazo es soportado a su vez por un pie a través del cual desliza el brazo soporte para situarse a la altura apropiada quedando anclado mediante dos tornillos de sujeción (fig. 3,4; foto1). Este conjunto ha sido proyectado para ser fácil de instalar y transportar.

Por otro lado tenemos el sistema de medida y control, que básicamente está constituido por una célula de carga, un registrador de datos, un circuito de control de la válvula de descarga, una batería de 12 V y un PC portátil sobre el que se vuelcan los datos registrados. Se han desarrollado varios programas informáticos para la adquisición, tratamiento, análisis y representación gráfica de los datos.

#### **3.2.1.1. El pie y el brazo soporte**

Estos dos elementos han sido fabricados a partir de tubo de acero hueco cuadrado de 40 mm de lado. Presentan forma de "L" y están reforzados en las uniones mediante chapa en el caso del brazo soporte y de dos trozos de tubo en el cada lado del pie. Este último se ha diseñado

para permitir la presencia en su base de un depósito contenedor de grandes dimensiones donde se realice la descarga de líquido cada vez que se abre la válvula (fig. 3,4; foto 1).

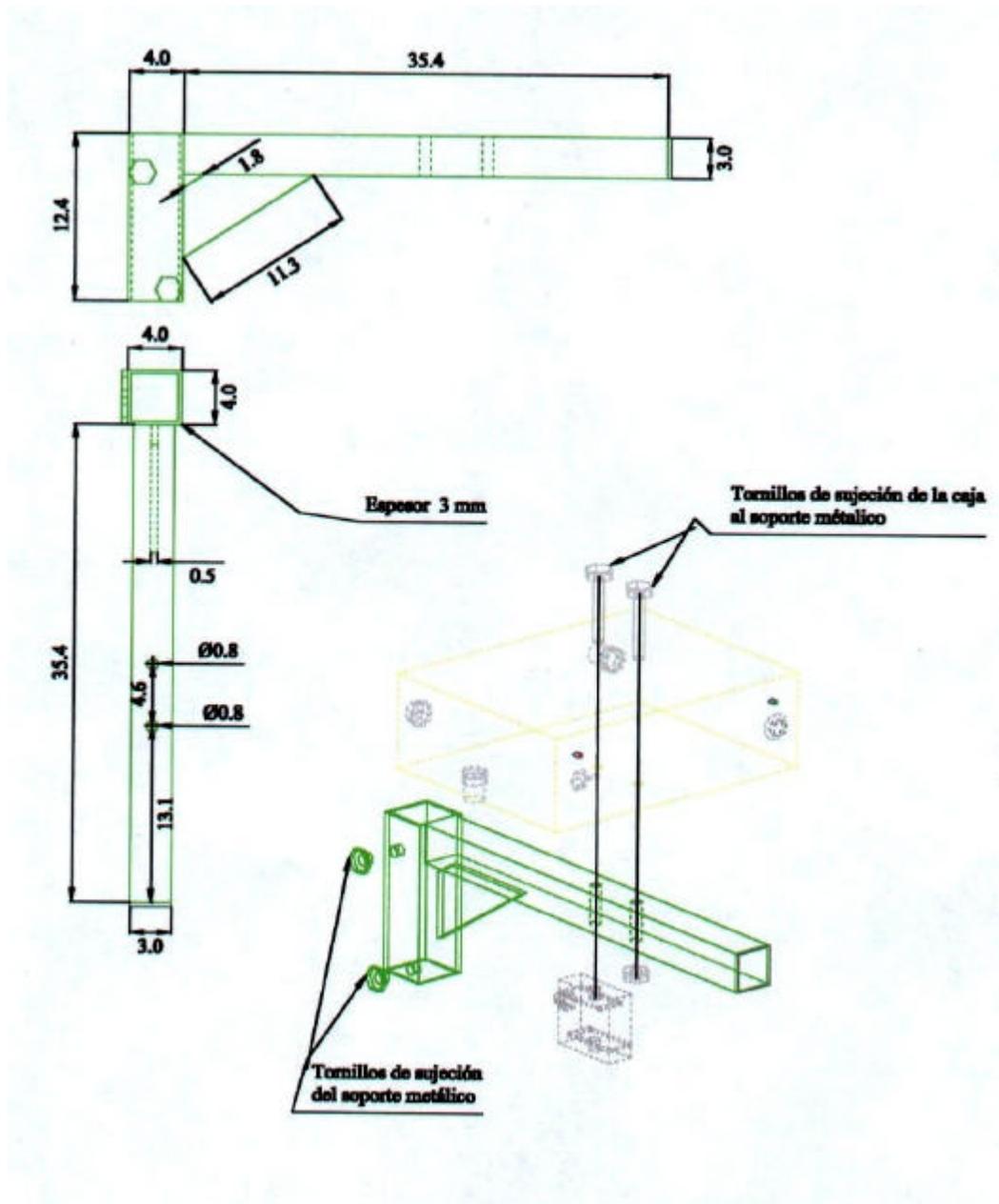


Figura 3. Esquema mecánico del caudalímetro



**Foto 1. Detalle del pie-soporte metálico**

### **3.2.2. Célula de carga, circuitos de registro y control y válvula de descarga**

El caudalímetro consta de los siguientes componentes eléctrico-electrónicos:

1. Célula de carga de 5 Kg para la medida del peso del líquido lixiviado.
2. Depósito receptor de los fluidos percolados de **2,9** litros de capacidad.
3. Válvula de presión nula, normalmente cerrada y de **220 V**.
4. Acondicionador de la señal procedente de la célula de carga y cuyo núcleo básico lo constituye un amplificador de instrumentación de alta precisión.

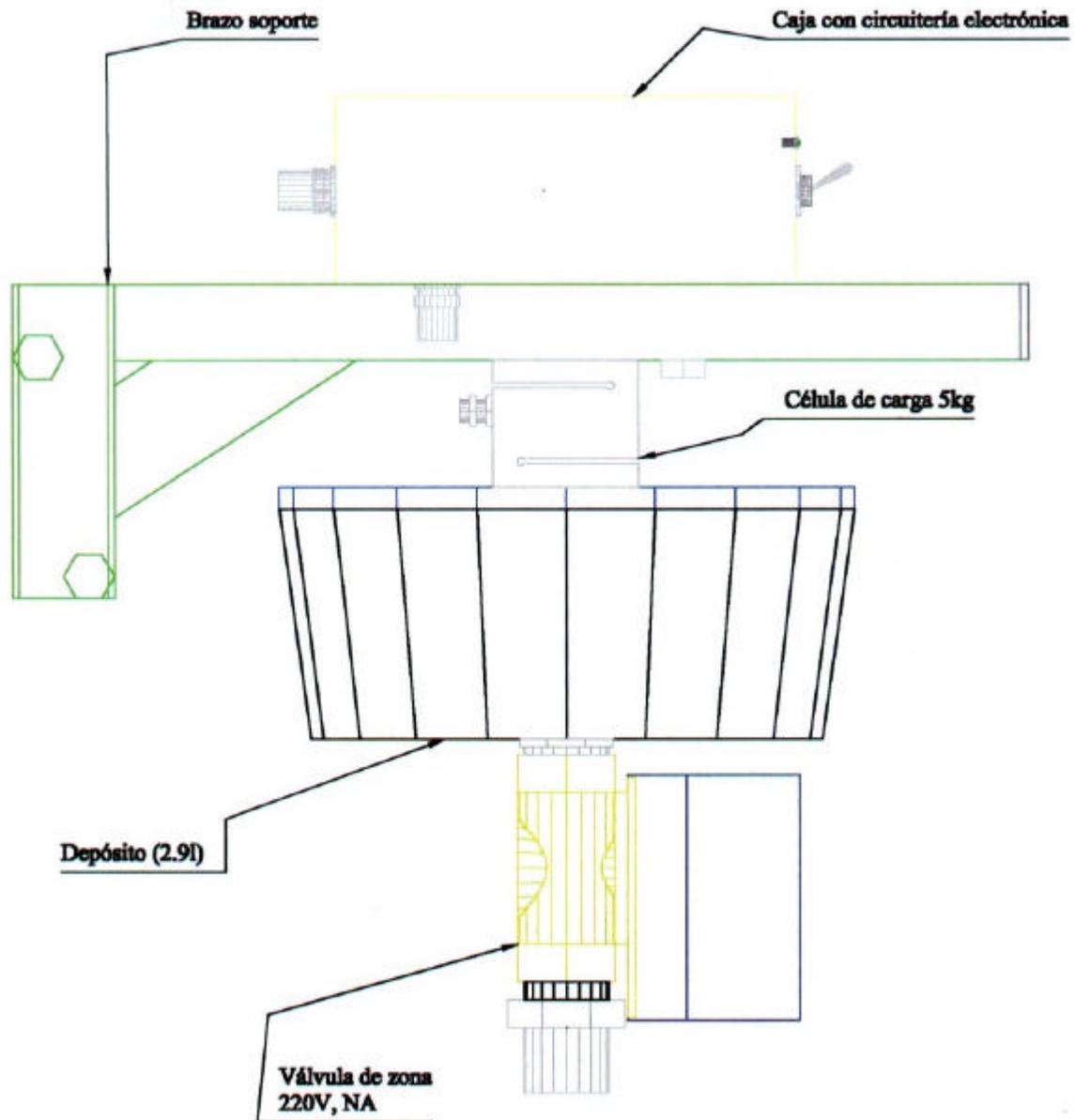


Figura 4. Esquema de disposición de los componentes del caudalímetro

5. Circuito de protección de registrador ante tensiones  $>2,5$  V.
6. Circuito de protección del registrador para tensiones  $< 0$  V.
7. Registrador para el registro del peso de líquido recogido.

8. Circuito de disparo de la válvula de zona.
9. Circuito temporizador del tiempo de apertura de la válvula de zona.
10. El ondulator de alimentación de la válvula de zona.
11. El doblador de tensión de alimentación general.
12. El estabilizador para la alimentación de la célula de carga y de la circuitería analógica.

Para el procesamiento de los datos recogidos de los caudalímetros se han desarrollado programas informáticos para la adquisición y ulterior análisis de la información, todos ellos realizados en **Visual Basic 5.0**.

### 3.2.2.1. Célula de carga para la medida del peso del líquido lixiviado.

Se ha elegido una célula de carga con fondo de escala de **5 Kg** y **3000** divisiones, con una salida de **2 mV/V** y configuración en **punto de Wheastone completo**, siendo capaz de medir axialmente tanto tracción como compresión. Se trata del modelo **D00925** de **Mutronic**. Este fabricante recomienda una alimentación en torno a los **10 V** para así obtener **20 mV** con **5 Kg** de fondo de escala. En el dispositivo desarrollado esta tensión ha sido fijada en **12 V** mediante un regulador electrónico de precisión.

La configuración en punto completo hace insensible a la célula de carga a las variaciones de temperatura ambiente además de mejorar la sensibilidad en relación a una configuración a medio o a cuarto de punto.



Figura 5. Características generales de la célula de carga.

Para el caso particular que nos ocupa nos hemos ceñido a las siguientes condiciones de diseño:

- 1) El convertidor que vamos a emplear (**TLC-549**) y que está alojado en el registrador es de **8 bits** de resolución con un fondo de escala de **2.5 V**, por tanto cada paso del convertidor equivaldrá a **2500 mV/255=10 mV** aproximadamente.
  
- 2) La célula de carga viene verificada de fábrica y el diseñador asegura **3000** divisiones por fondo de escala, como la tensión de alimentación es de 12 V y tenemos una sensibilidad de **2 mV/V**, la máxima salida a fondo de escala será de **12V x 2 mV/V= 24 mV**.

El modelo seleccionado es de **5 Kg** con lo que cada paso medible será en teoría de **5000 gr/3000= 1.67 gr**. Dado que el convertidor solo admite **256 pasos**, el incremento mínimo apreciable será **5000 gr/255= 19.607 gr**. Teóricamente se podría llegar a un valor entre **11-12 bits** de resolución en el convertidor (**2<sup>11</sup>=2048** y **2<sup>12</sup>=4096**).

El motivo de la selección de una célula de carga de **5 Kg**, fue que nos permite un rango de funcionamiento óptimo al admitir la posibilidad de jugar con recipientes de almacenamiento de hasta ese valor.

DESCRIPCIÓN	NOMENCLATURA	COLOR (4 HILOS)	DIAGRAMA DE CONEXIÓN
Alimentación	(+ Vcc)	Rojo	
Alimentación	(-Vcc)	Negro	
Señal (+)	Señal (+)	Verde	
Señal (-)	Señal (-)	Amarillo	

Figura 6. Conexionado de la célula de carga.

Tabla 1. Características Técnicas de la Célula de Carga.

<b>CARACTERISTICAS TECNICAS</b>			
<b>Tensión de excitación</b>	<b>10Vcc</b>	<b>Deriva térmica de cero</b>	<b>&lt;±0.002 % FE</b>
<b>Sensibilidad</b>	<b>2 (mV/V)</b>	<b>Salida sin carga</b>	<b>&lt;1% FE</b>
<b>Ajuste de sensibilidad</b>	<b>0.1%</b>	<b>Resistencia al aislamiento (M Ω)</b>	<b>&gt; 5000 50 Vcc</b>
<b>No linealidad</b>	<b>&lt;0.015 % FE</b>	<b>Resistencia de salida</b>	<b>350 Ohm</b>
<b>Histéresis</b>	<b>&lt;0.02% FE</b>	<b>Temperatura de operación</b>	<b>-10 °C +60°C</b>
<b>Error combinado</b>	<b>&lt; 0.02% FE</b>	<b>Carga máxima</b>	<b>150% capacidad</b>
<b>Repetibilidad</b>	<b>&lt;0.01% FE</b>	<b>Carga Límite</b>	<b>200% capacidad</b>
<b>Fluencia en 30 min.</b>	<b>&lt;0.03% FE</b>	<b>Protección</b>	<b>IP 67</b>
<b>Efecto de la temperatura sobre la sensibilidad</b>	<b>&lt;± 0.0015% °C</b>		

**\* FE= fondo Escala = Capacidad Total**

Tabla 2. Dimensiones en mm de las células de carga de la serie CTSR de MUTRONIC

Cap. (Kg)	A	B	C	D
5	49.5	57	19	PG7
10	49.5	57	19	PG7
15	49.5	57	19	PG7
25	49.5	57	19	PG7
50	49.5	57	19	PG7
100	49.5	57	19	PG7
250	55	46	25	M 10X1
500	55	46	25	M 10X1
750	55	46	25	M 10X1
1000	55	46	25	M 10X1

\*Dimensiones (mm)

### **3.2.2.2. Depósito receptor de los fluidos percolados.**

Es un recipiente de plástico que se ha adaptado a las necesidades del equipo, dotándolo de una unión a través de chapa metálica a la célula de carga y de una unión roscada con una conformación de embudo a la válvula de descarga. En la siguiente figura se muestra la forma de unión a ambos elementos.



**Foto 2. Detalle del depósito para el fluido percolado y válvula de descarga.**

### **3.2.2.3. La válvula de descarga, de presión nula, normalmente cerrada y de alimentación a 220 V**

La medida del caudal se realiza en fracciones máximas de **2.9 litros**. La causa es por una parte, la resolución en el convertidor (**8 bits**), pero sobre todo, que el número de divisiones por fondo de escala para células de carga comerciales rara vez supera las **3000** divisiones sin un encarecimiento exponencial de los precios. Dado que el uso de células de carga para mayor peso traería como resultado una degradación de la resolución del equipo y por tanto de sus prestaciones, la solución óptima es por tanto, la división del volumen de líquido analizado.

Por todo lo anterior se ha seleccionado una válvula normalmente cerrada y capaz de abrirse a presión nula. Este último requerimiento es difícil de conseguir pues en el mercado, lo habitual son electroválvulas de membrana **N.A.** o **N.C.** a **12 V**, **24 V CC/CA** o **220 CA** pero que exigen una presión en tubería para obtener su apertura.

Para esta aplicación hemos seleccionado una válvula motorizada con apertura electromecánica, retorno por resorte y de presión de trabajo nula. Es un modelo habitual para circuitos hidráulicos y tiene su aplicación en riego. Se trata del modelo de dos vías **SF25-2 ART 7.001.01639.0** de **MUT-MECCANICA TOBO S.p.A.**

#### **Características:**

- Alimentación a **220 V CA**.
- Potencia consumida: **5-6 W**.
- Grado de protección: **IP-20 IEC 529 Standards (Ref. European Standards CEI EN 60529)**.

- Capacidad del contacto auxiliar: **3A 250 V A.C.**
- Máxima presión diferencial en caso de existir: **0.92 Kg/cm<sup>2</sup> (90.2 KPa).**
- Máxima presión nominal estática: **10 Kg/cm<sup>2</sup>.**
- Mínima temperatura de fluido **5° C.**
- Máxima temperatura de fluido: **110° C.**
- Máxima temperatura ambiente: **60° C.**
- Tiempo nominal de apertura: **10** segundos para válvula de dos vías.
- Tiempo nominal de cierre: 4 segundos para válvulas de dos vías.
- Peso: **1-1.1 Kg.**
- Longitud de cable estándar: **550 mm.**
- Permite una apertura automática o manual en caso de falta de alimentación.
- Cumple con las directivas: **72/23/EECC** de Baja Tensión y la **89/336/EEC** de Compatibilidad Electromagnética.

#### **3.2.2.3.1. Modo de operación**

La válvula ha sido construida con su extremo **A** normalmente cerrado sin alimentación eléctrica, ver Figura 7a, existiendo una esfera en **A** que cierra gracias a la fuerza de un muelle de retorno. Cuando se conecta la alimentación eléctrica el **servo-motor** vence la acción del muelle y mueve la esfera del extremo **A**, a la posición intermedia en aproximadamente **10** segundos. Esta posición se mantendrá mientras dure el suministro eléctrico, Figura 7c. Cuando se interrumpe la corriente eléctrica el muelle de retorno vuelve a colocar la esfera en el extremo **A** en **4** segundos aproximadamente (fig. 7<sup>a</sup> ).

Existe un modo de apertura manual (sin suministro eléctrico basado en el accionamiento de una leva manual, Figura 7b). Esta función sólo se debe emplear en el caso especial de que falte el suministro eléctrico.

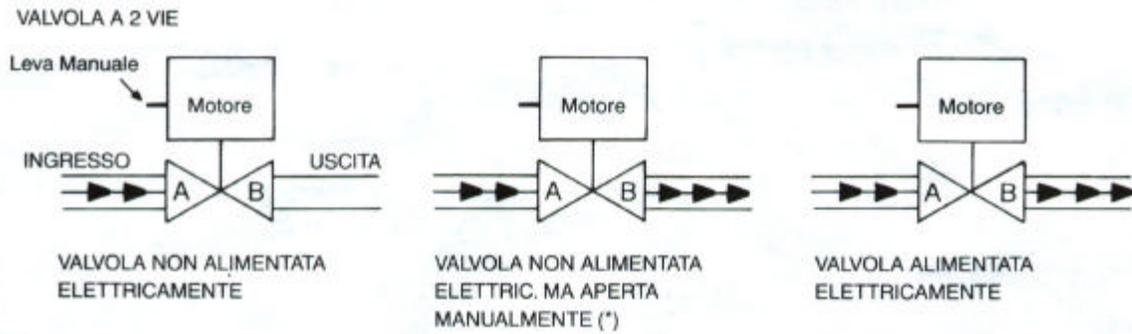


Figura 7. Modos de funcionamiento de la válvula de descarga

### 3.2.2.3.2. Esquema eléctrico del conexionado de la válvula de zona.

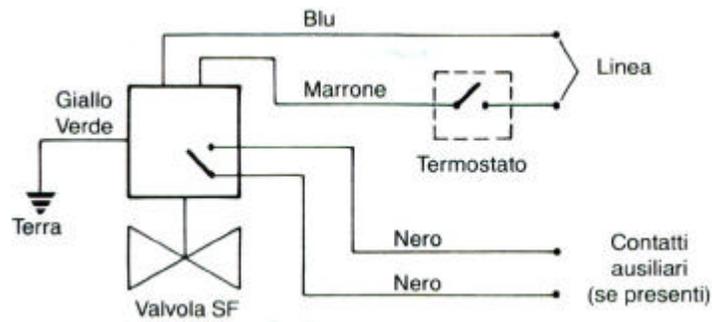


Figura 8. Esquema eléctrico de conexión de la válvula de descarga

#### Alimentación del motor:

- 220 V 50 Hz.
- Hilo marrón: **Fase.**
- Hilo azul: **Neutro.**
- Hilo amarillo-verde: **Tierra.**

Dado que el caudalímetro se alimenta con una batería de **12 V**, la tensión de **220 V 50 Hz** que hace funcionar la válvula de zona se ha obtenido a partir de un ondulator que se ha incluido como parte integrante del circuito desarrollado.

### 3.2.2.4. Acondicionador para la célula de carga

Para el tratamiento adecuado de la señal eléctrica procedente de las galgas de la célula de carga, se requiere un dispositivo especial capaz de amplificar la salida diferencial del **punto de Wheastone** y a su vez tener un elevado rechazo al modo común. Esta misión la vamos a confiar a un dispositivo específico para esta necesidad:

#### 3.2.2.4.1. El amplificador de instrumentación INA-114-AP

Se trata de un dispositivo de bajo costo para su uso de propósito general y que oferta una precisión excelente. Internamente contiene la disposición típica de tres operacionales en configuración diferencial para su empleo como amplificador de instrumentación (fig. 9).

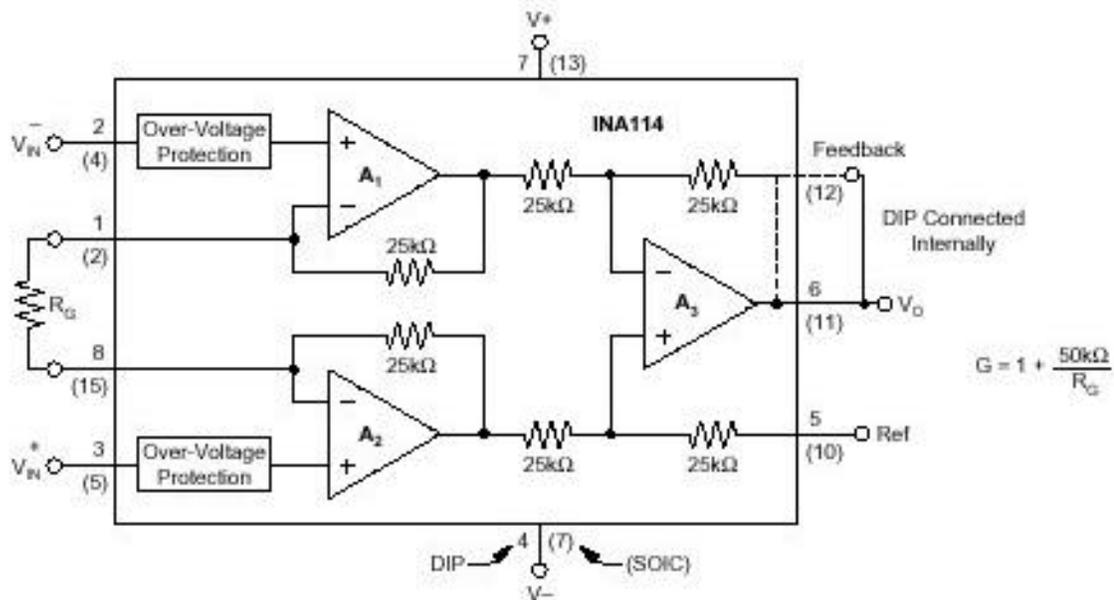


Figura 9. Diagrama interno del INA-114-AP.

Tabla 3. Especificaciones eléctricas del INA-114-AP a 25°C, Vs=±15 V y RI=2 KΩ.

PARAMETER	CONDITIONS	INA114BP, BU			INA114AP, AU			UNITS
		MIN	TYP	MAX	MIN	TYP	MAX	
<b>INPUT</b>								
Offset Voltage, RTI Initial	$T_A = +25^\circ\text{C}$		$\pm 10 + 20/G$	$\pm 50 + 100/G$		$\pm 25 + 30/G$	$\pm 125 + 500/G$	$\mu\text{V}$
vs Temperature	$T_A = T_{\text{MIN}}$ to $T_{\text{MAX}}$		$\pm 0.1 + 0.5/G$	$\pm 0.25 + 5/G$		$\pm 0.25 + 5/G$	$\pm 1 + 10/G$	$\mu\text{V}/^\circ\text{C}$
vs Power Supply	$V_S = \pm 2.25\text{V}$ to $\pm 18\text{V}$		$0.5 + 2/G$	$3 + 10/G$		*	*	$\mu\text{V}/\text{V}$
Long-Term Stability			$\pm 0.2 + 0.5/G$			*	*	$\mu\text{V}/\text{mo}$
Impedance, Differential			$10^{10} \parallel 6$			*	*	$\Omega \parallel \text{pF}$
Common-Mode			$10^{10} \parallel 6$			*	*	$\Omega \parallel \text{pF}$
Input Common-Mode Range		$\pm 11$	$\pm 13.5$		*	*	*	V
Safe Input Voltage	$V_{\text{CM}} = \pm 10\text{V}$ , $\Delta R_S = 1\text{k}\Omega$			$\pm 40$			*	V
Common-Mode Rejection	$G = 1$	80	96		75	90		dB
	$G = 10$	96	115		90	106		dB
	$G = 100$	110	120		106	110		dB
	$G = 1000$	115	120		106	110		dB
<b>BIAS CURRENT</b>			$\pm 0.5$	$\pm 2$		*	$\pm 5$	nA
vs Temperature			$\pm 8$			*		$\text{pA}/^\circ\text{C}$
<b>OFFSET CURRENT</b>			$\pm 0.5$	$\pm 2$		*	$\pm 5$	nA
vs Temperature			$\pm 8$			*		$\text{pA}/^\circ\text{C}$
<b>NOISE VOLTAGE, RTI</b>	$G = 1000$ , $R_S = 0\Omega$							
$f = 10\text{Hz}$			15			*		$\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$
$f = 100\text{Hz}$			11			*		$\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$
$f = 1\text{kHz}$			11			*		$\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$
$f_b = 0.1\text{Hz}$ to $10\text{Hz}$			0.4			*		$\mu\text{Vp-p}$
Noise Current								
$f = 10\text{Hz}$			0.4			*		$\text{pA}/\sqrt{\text{Hz}}$
$f = 1\text{kHz}$			0.2			*		$\text{pA}/\sqrt{\text{Hz}}$
$f_b = 0.1\text{Hz}$ to $10\text{Hz}$			18			*		$\text{pAp-p}$
<b>GAIN</b>								
Gain Equation		1	$1 + (50\text{k}\Omega/R_G)$	10000	*	*	*	V/V
Range of Gain	$G = 1$		$\pm 0.01$	$\pm 0.05$		*	*	V/V
Gain Error	$G = 10$		$\pm 0.02$	$\pm 0.4$		*	*	%
	$G = 100$		$\pm 0.05$	$\pm 0.5$		*	$\pm 0.5$	%
	$G = 1000$		$\pm 0.5$	$\pm 1$		*	$\pm 0.7$	%
Gain vs Temperature	$G = 1$		$\pm 2$	$\pm 10$		*	$\pm 10$	$\text{ppm}/^\circ\text{C}$
50kΩ Resistance <sup>(1)</sup>	$G = 1$		$\pm 25$	$\pm 100$		*	*	$\text{ppm}/^\circ\text{C}$
Nonlinearity	$G = 1$		$\pm 0.0001$	$\pm 0.001$		*	$\pm 0.002$	% of FSR
	$G = 10$		$\pm 0.0005$	$\pm 0.002$		*	$\pm 0.004$	% of FSR
	$G = 100$		$\pm 0.0005$	$\pm 0.002$		*	$\pm 0.004$	% of FSR
	$G = 1000$		$\pm 0.0005$	$\pm 0.002$		*	$\pm 0.004$	% of FSR
<b>OUTPUT</b>								
Voltage	$I_O = 5\text{mA}$ , $T_{\text{MIN}}$ to $T_{\text{MAX}}$	$\pm 13.5$	$\pm 13.7$		*	*		V
	$V_S = \pm 11.4\text{V}$ , $R_L = 2\text{k}\Omega$	$\pm 10$	$\pm 10.5$		*	*		V
	$V_S = \pm 2.25\text{V}$ , $R_L = 2\text{k}\Omega$	$\pm 1$	$\pm 1.5$		*	*		V
Load Capacitance Stability			1000			*		pF
Short Circuit Current			$+20/-15$			*		mA
<b>FREQUENCY RESPONSE</b>								
Bandwidth, -3dB	$G = 1$		1			*		MHz
	$G = 10$		100			*		kHz
	$G = 100$		10			*		kHz
	$G = 1000$		1			*		kHz
Slew Rate	$V_O = \pm 10\text{V}$ , $G = 10$	0.3	0.6		*	*		V/ $\mu\text{s}$
Settling Time, 0.01%	$G = 1$		18			*		$\mu\text{s}$
	$G = 10$		20			*		$\mu\text{s}$
	$G = 100$		120			*		$\mu\text{s}$
	$G = 1000$		1100			*		$\mu\text{s}$
Overload Recovery	50% Overdrive		20			*		$\mu\text{s}$
<b>POWER SUPPLY</b>								
Voltage Range		$\pm 2.25$	$\pm 15$	$\pm 18$	*	*	*	V
Current	$V_{\text{IN}} = 0\text{V}$		$\pm 2.2$	$\pm 3$		*	*	mA
<b>TEMPERATURE RANGE</b>								
Specification		-40		85	*		*	$^\circ\text{C}$
Operating		-40		125	*		*	$^\circ\text{C}$
$\theta_{\text{JA}}$			80			*		$^\circ\text{C}/\text{W}$

\* Specification same as INA114BP/BU.

NOTE: (1) Temperature coefficient of the "50kΩ" term in the gain equation.

La ganancia del dispositivo a diferencia de otros modelos, se realiza a partir de una única resistencia de bajo valor óhmico, lo que permite una gran precisión en el ajuste de la ganancia, oscilando en el intervalo de amplificación de **1 a 10.000**.

Cada entrada diferencial tiene una protección interna capaz de soportar hasta  $\pm 40\text{V}$  sin daño para el dispositivo.

Para eliminar el offset (**max 50  $\mu\text{V}$** ), obtener una reducidísima deriva térmica (**0.25  $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$** ) y un elevado rechazo del modo común (**115 dB a  $\text{G}=1000$** ), el fabricante hace una calibración con láser del dispositivo.

Opera con una tensión a partir de los  $\pm 2.25\text{ V}$  hasta los  $\pm 18\text{ V}$ , y permite el uso de alimentación simple o dual.

El modelo elegido es el **Dual In Pin** de **8 pines**, en plástico y con un rango de temperatura de trabajo desde  $-40^\circ\text{ C}$  a  $85^\circ\text{ C}$ , la referencia comercial es concretamente: **INA 114-AP** (fig. 10).

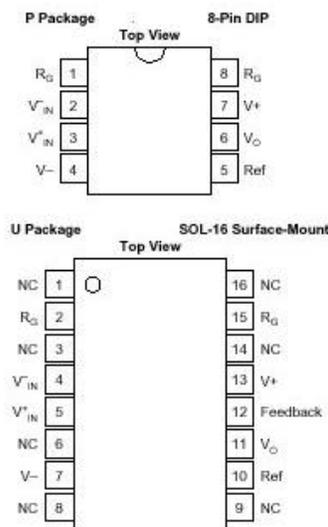


Figura 10. Encapsulados del INA-114-AP

Pese a la protección contra descargas eléctricas de las entradas de hasta  $\pm 40V$  el dispositivo puede sufrir daños por estas (**ESD**) por lo que se debe manejar con las debidas precauciones.

El esquema básico de conexionado se muestra en la Figura 11.

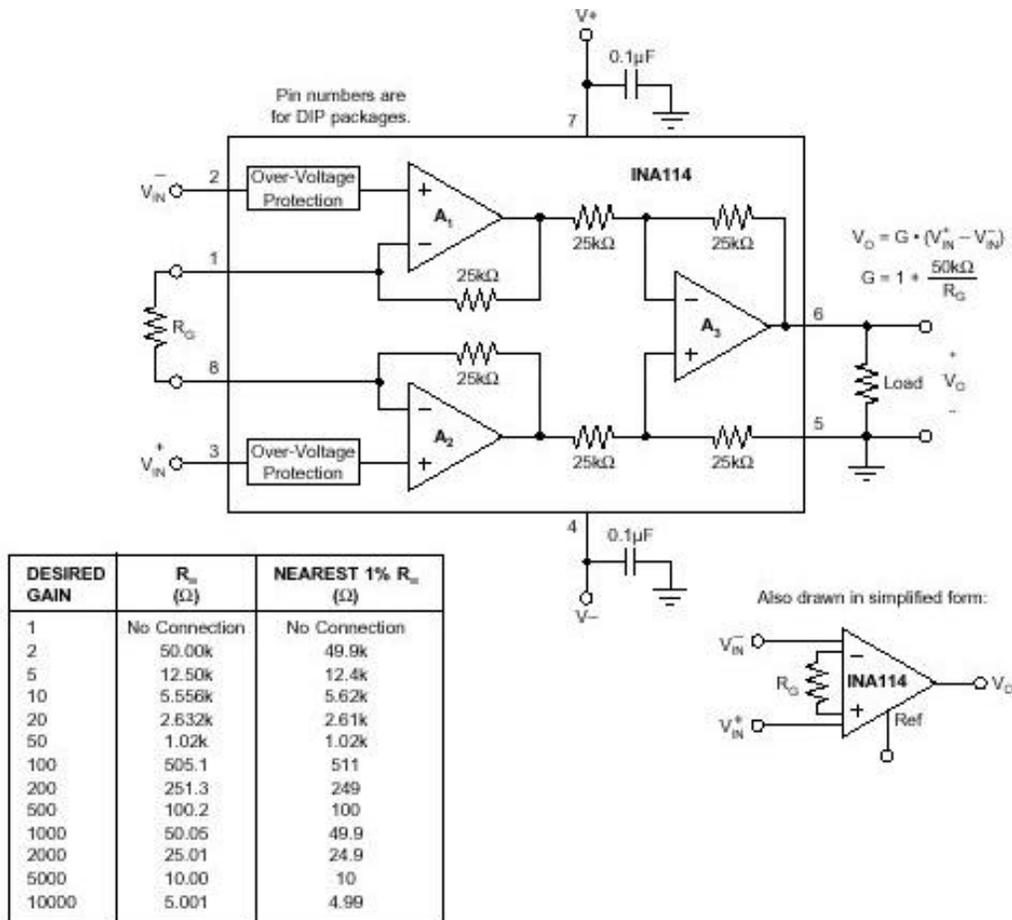


Figura 11. Diagrama de conexionado básico del INA-114-AP

Como se aprecia en la figura es importante el desacoplo de las líneas de alimentación del dispositivo a masa mediante condensadores de un valor entorno a **100 nF**, sobre todo si la fuente de alimentación genera ruido o es de alta impedancia.

La salida esta referida a terminal **REF (5)**, el cual normalmente está conectado a masa. Se debe asegurar una baja impedancia de este pin para obtener un buen rechazo del modo común, basta una resistencia de **5Ω**, para generar una degradación de **80 dB**.

#### 3.2.2.4.1.1. Ajuste de la ganancia

El ajuste de la ganancia se realiza mediante un resistor externo (**R<sub>G</sub>**), para este dispositivo, la ganancia se expresa como:

$$G = 1 + \frac{50K\Omega}{R_G} \quad (15)$$

El origen del término **50 KΩ** en la ecuación anterior se debe a la suma de los dos resistores internos de realimentación del amplificador. Son resistencias de película metálica ajustadas con láser para obtener una precisión absoluta en su valor.

Tanto la precisión como el coeficiente de temperatura de estas resistencias están incluidas en las especificaciones de ganancia y deriva térmica del **INA-114-AP**.

La estabilidad térmica de la resistencia externa de ajuste de la ganancia también afecta a esta última. En especial para elevadas ganancias, lo que exige una resistencia de bajo valor, es relevante y por tanto a tener presente. Otro aspecto importante es la resistencia de los contactos del zócalo soporte del amplificador de instrumentación.

Para ganancias superiores a **100**, se puede empezar a constatar incluso con zócalos de baja calidad, es por ello que para este dispositivo se han empleado:

1. Resistencias de precisión vitrificadas de película metálica de **0.1 %** de tolerancia y mínima deriva térmica  **$\pm 15$  ppm/° C**.
2. Zócalos de pines torneados de baja resistencia de contacto.

#### **3.2.2.4.1.2. Características de ruido del amplificador**

El **INA-114-AP** proporciona un bajo nivel de ruido extremadamente bajo para la mayoría de las aplicaciones. Para fuentes diferenciales con impedancia inferior a **1 K $\Omega$** , existen modelos con mejores prestaciones como el **INA-103**. Para impedancias mayores de **50 K $\Omega$** , es preferible el uso de amplificadores con entrada **FET** como por ejemplo el **INA-111**.

#### **3.2.2.4.1.3. Ajuste del offset**

El **INA-114-AP** ha sido ajustado durante su fase de producción para obtener un bajo offset y una reducida deriva. En la mayoría de las aplicaciones no se va a requerir el ajuste del offset. Si se desea realizar este, la tensión aplicada al **PIN 5 (REF)** se sumará a la tensión de salida.

Para conseguir un buen rechazo del modo común es preciso realizar este ajuste a través de un buffer de baja impedancia tal y como se muestra en la Figura 12.

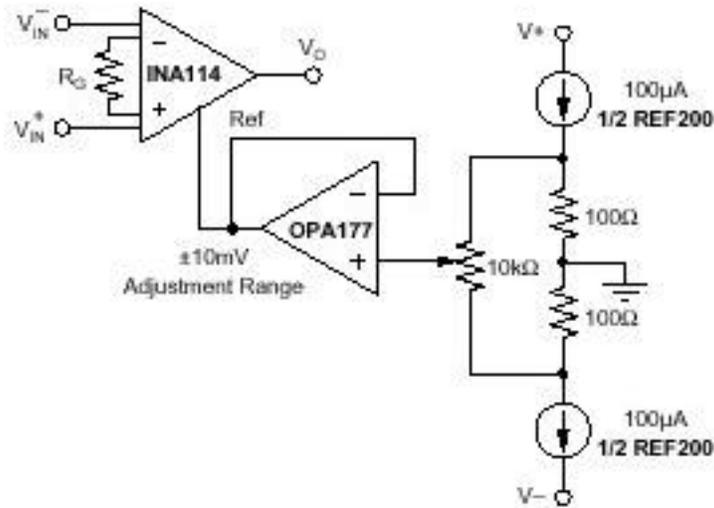


Figura 12. Ajuste externo del offset del INA-114.AP.

El circuito básico para el manejo de una célula de carga a puente completo se ilustra en la Figura 13.

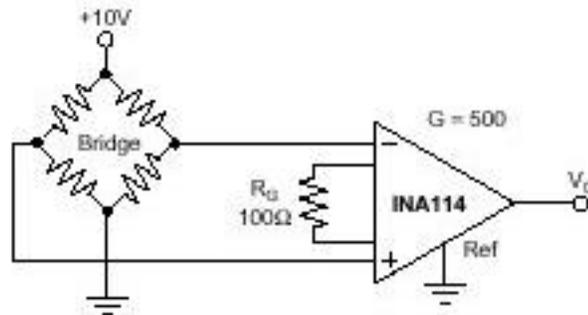
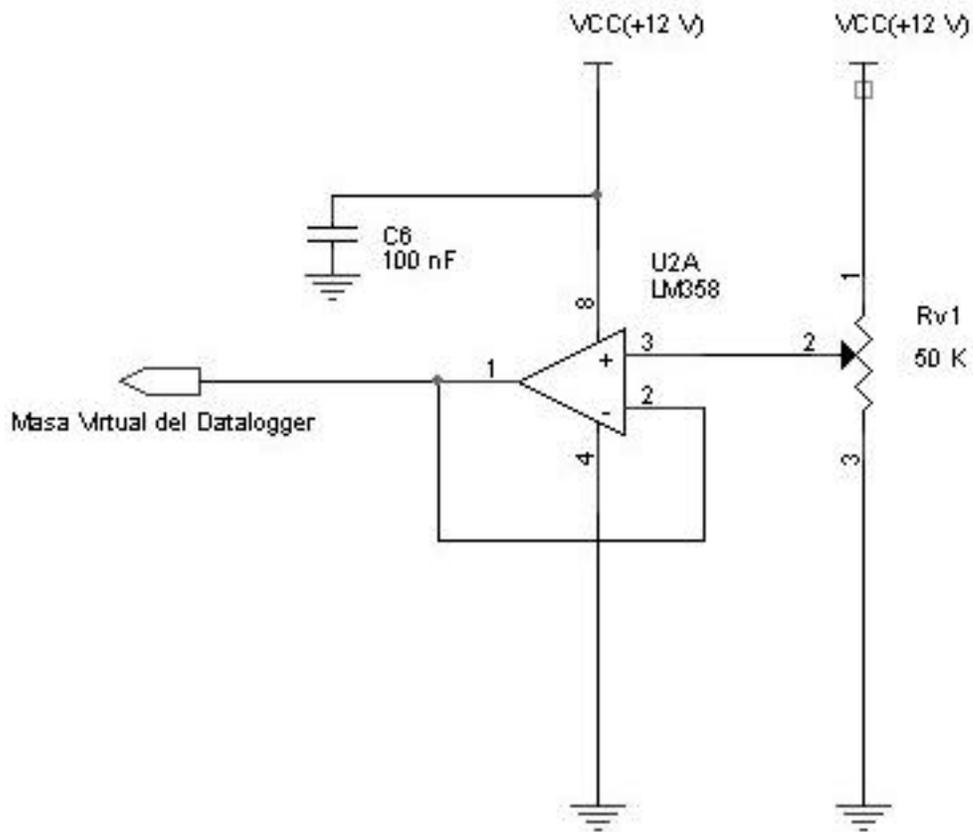


Figura 13. Esquema de la conexión de un puente completo al INA-114-AP.

En el circuito diseñado para el caudalímetro **no** se ha empleado un offset a partir del **pin 5 (REF)**, sino que se ha usado una masa flotante pues el registrador empleado tiene una alimentación autónoma que

permite esta opción. El esquema electrónico queda reflejado en la siguiente figura (fig. 14).



**Figura 14. Masa virtual del INA-114-AP.**

### 3.2.2.5. Circuito de protección del registrador de datos de tensiones superiores a 2.5 V.

Dado que el registrador de datos no puede soportar en su entrada externa tensiones superiores a **2.5 V** pues dañaríamos el convertidos **A/D** modelo **TLC-549** que lleva en su interior, y como la excursión del **INA 114-AP** llega hasta **VCC (+12 V)**, se ha dispuesto un circuito que en caso de tensiones superiores a **2.5 V**:

1. Conecta la entrada externa del registrador a su tierra virtual.
2. Activa el circuito de descarga del depósito.

El esquema es el que se muestra en las Figuras 14 y 15.

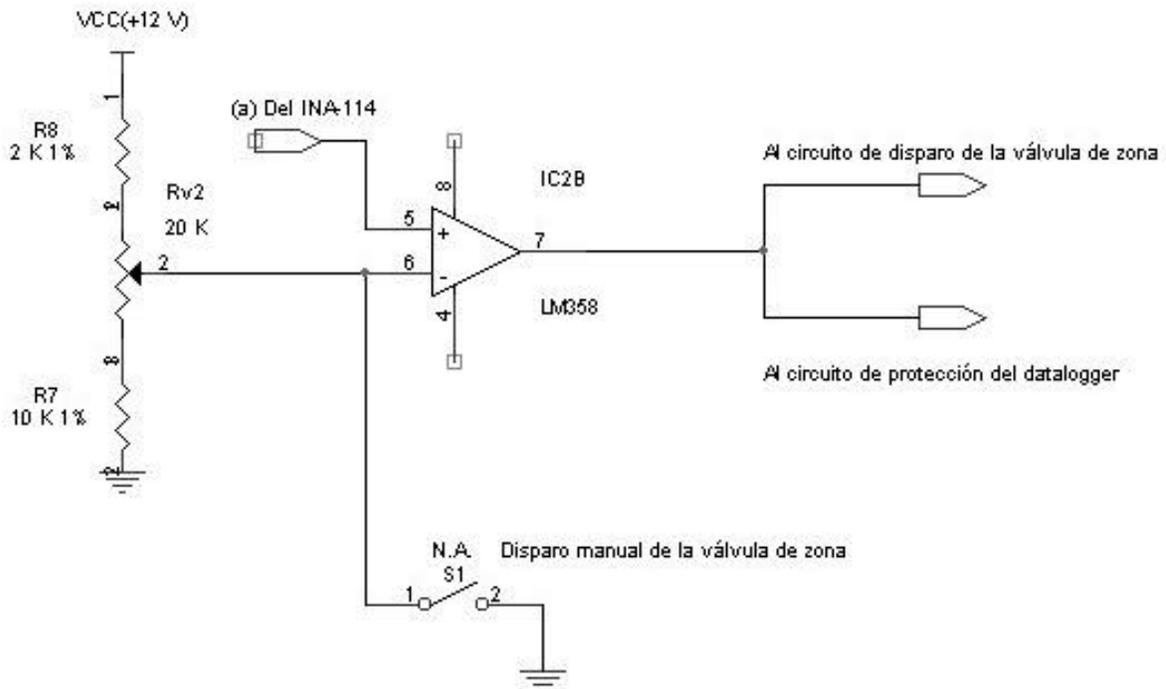


Figura 15. Circuito de protección del registrador para tensiones de entrada superiores a 2.5V

Se trata de un doble amplificador operacional modelo **LM-358** con encapsulado **DIL** de **8 pines**. Como se puede observar en el esquema de la Figura 14, el primero de ellos sirve para generar la tierra virtual y con ello eliminar la salida de offsett producida por el peso del depósito y de la válvula de descarga.

El segundo operacional (fig. 15), que se incluye en este chip, actúa como comparador y pone su salida a  $V_{CC}$  cuando la tensión procedente de la salida del amplificador de instrumentación supera los **2.5 V**. Es justo esta tensión a nivel alto la que dispara el circuito temporizador de apertura de la válvula de descarga y el ondulator que la alimenta.

El potenciómetro multivuelta  $R_{V2}$ , permite un ajuste fino de esta regulación pudiendo adoptarse cualquier otro valor entre **0-2.5 V**, con lo que el peso máximo que mide el cudalímetro se puede variar a voluntad.

#### **3.2.2.6. Circuito de protección del registrador de datos de tensiones inferiores a 0 V.**

Al igual que el registrador no debe ser expuesto a tensiones de entrada superiores a **2.5 V**, tampoco se deben aplicar tensiones negativas (es decir compresiones de la célula de carga). En un funcionamiento normal del equipo, es un hecho que no se produce, pero ante una manipulación incorrecta de este como por ejemplo, olvidar conectar el cable de conexión de la célula de carga, se pudiera dar esta circunstancia.

Este circuito también se ha desarrollado a partir de un amplificador operacional modelo **LM-358** haciéndolo trabajar en modo comparador. El circuito es el que se muestra en el siguiente esquema, (fig. 16) y no requiere ajustes.

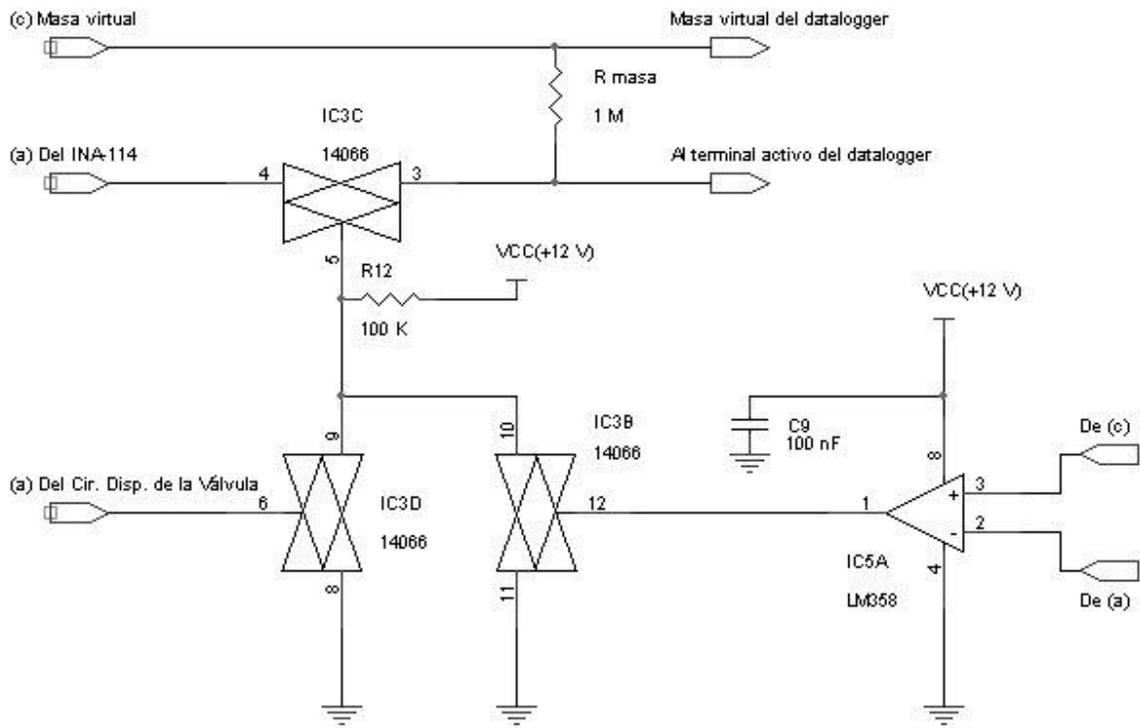


Figura 16. Circuito de protección del registrador para entradas <0V.

### 3.2.2.7. El registrador de datos.

Para el registro de los datos se ha empleado dos modelos de registrador comercial, concretamente de **Onset Computer Corporation**: un **HOBO H08-002-02** de dos canales: uno de temperatura y otro externo de tensión **0-2.5 V** y **8 Kbytes** de memoria, y el **HOBO H08-006-04** de cuatro canales externos de **0-2.5 V** y **32 Kbytes** de memoria (fig. 17).

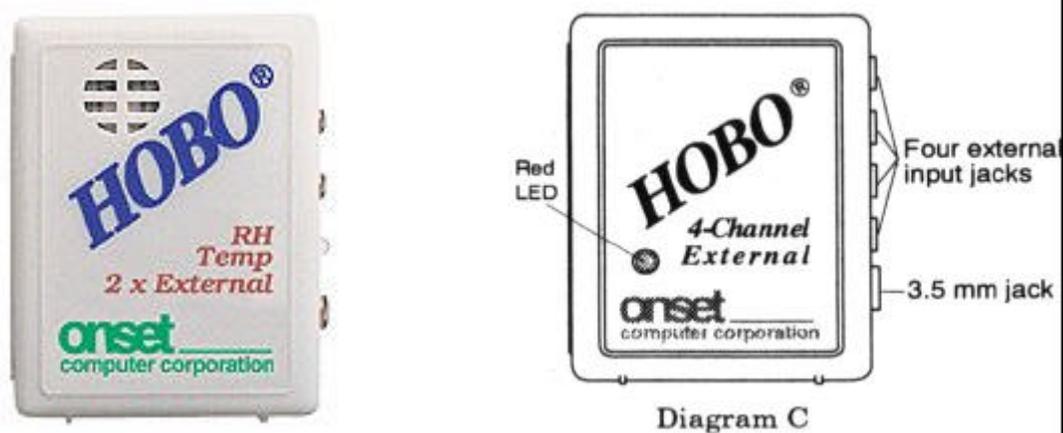


Figura 17. Aspecto externo de los registradores de la serie H8 de ONSET COMPUTER CORPORATION

Las especificaciones comunes más relevantes de estos dispositivos son las siguientes:

1. Alto rango de temperaturas de funcionamiento: **-20° C** a **70° C** y una humedad relativa de **0-95 %**.
2. Precisión del reloj  $\pm 1$  minuto por semana ( **$\pm 100$  ppm** a **20° C**) la dependencia con la temperatura depende de la estabilidad del cristal de cuarzo que incorpora el dispositivo concretamente uno de **32,738 KHz**. La Figura 18 muestra esta dependencia.

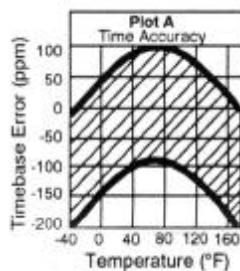


Figura 18. Error Tiempo-Temperatura del registrador

### 3. Capacidad de almacenamiento

**HOBO H08-002-02:** Hasta 7944 datos en una memoria no volátil de tipo EEPROM (24LC32B).

**HOBO H08-006-04:** Hasta 32520 datos en memoria no volátil tipo EEPROM y dispuesta en cuatro bancos de 8 Kbytes cada uno (24LC65 de Arizona Microchip).

4. Dimensiones: 2.4"x1.9"x0.8"

5. Peso: 1 onza.

6. Batería estandar sustituible tipo CR-2032.

7. Duración de la batería: 1 año aproximadamente.

8. Temperatura de Almacenamiento: -40° C a 75° C.

#### 3.2.2.7.1. Entrada externa para la medida de tensión

Se trata de un puerto de entrada accesible mediante jack estereo de **2.5 mm** permitiendo el registro de tensiones referidas a masa. Esta entrada está preparada para medir en el rango de **0-2.5 V DC** con una corriente de perdida entre medidas de **±0.1 μA** y de **±0.4 μA** durante

estas. Como el convertidor interno que lleva el registrador es de ocho bits (un **TLC-549** en **SMD** con **256** pasos por fondo de escala), la resolución es **2500mV/255**, es decir aproximadamente **±10 mV ±5 %** de la lectura.

Es importante hacer notar que la masa de la referida entrada no es la misma que la de la alimentación del registrador, debiendo ir siempre separadas pues su unión dañaría el convertidor **A/D** interno.

Esta entrada de medida dispone además de un suministro de alimentación a **2.5 V** para hacer funcionar sondas externas.

Para el modelo **HOBO H08-002-02**, las ventanas muestreo y retención se son de **5.4 ms**. En el modelo **HOBO H08-006-04** existe un multiplexor (**HEF-4052**) que se encarga de conmutar entre las diferentes entradas y de disparar la alimentación de las sondas externas.

La zona de muestreo y retención de los datos se aprecia en las Figuras 19, 20 y 21.

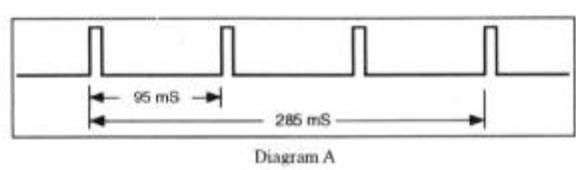


Figura 19. Diagrama de pulsos de alimentación en el HOBO H08-002-02.

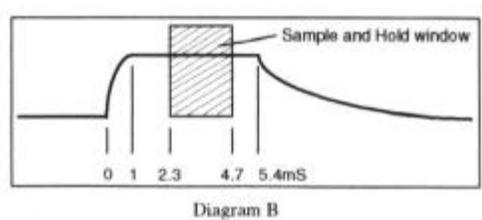


Figura 20. Muestreo y retención en el HOBO H08-002-02.

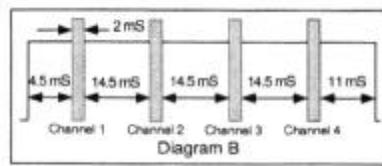


Figura 21. Diagrama de pulsos de alimentación y muestreo en el HOB0 H08-006-04.

### 3.2.2.7.2. Conexión del cable de comunicación y lanzamiento del registrador

Para el correcto uso del registrador se requiere un cable serie con un jack stereo de **3.5 mm** en un extremo y conexión **DB-9** serie por el otro (fig. 22), el primero que va al registrador y el segundo a un puerto serie de un **P.C.** Esto nos va a permitir la comunicación con protocolo **RS-232-C** y con ello realizar todas las operaciones tanto de lanzamiento como de lectura de los datos almacenados.

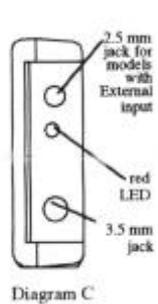


Figura 22. Aspecto de los conectores externos e indicador del registrador.

Un aspecto importante es el hecho de que durante la lectura de los datos almacenados, el registrador no los borra. Si durante el proceso de descarga de los datos (**Offloading**) se produjera un error en la transferencia, sólo hay que volver a realizar el protocolo de lectura.

### **3.2.2.7.3. Indicador de operación**

Se trata de un diodo **LED** que parpadea con luz brillante cada vez que se realiza un muestreo y con luz suave cada dos segundos si el intervalo entre medidas es mayor de dos segundos (fig. 22).

### 3.2.2.8. Circuito de disparo de la válvula de descarga

El circuito de disparo de la válvula de descarga está realizado en torno al esquema de la Figura 23.

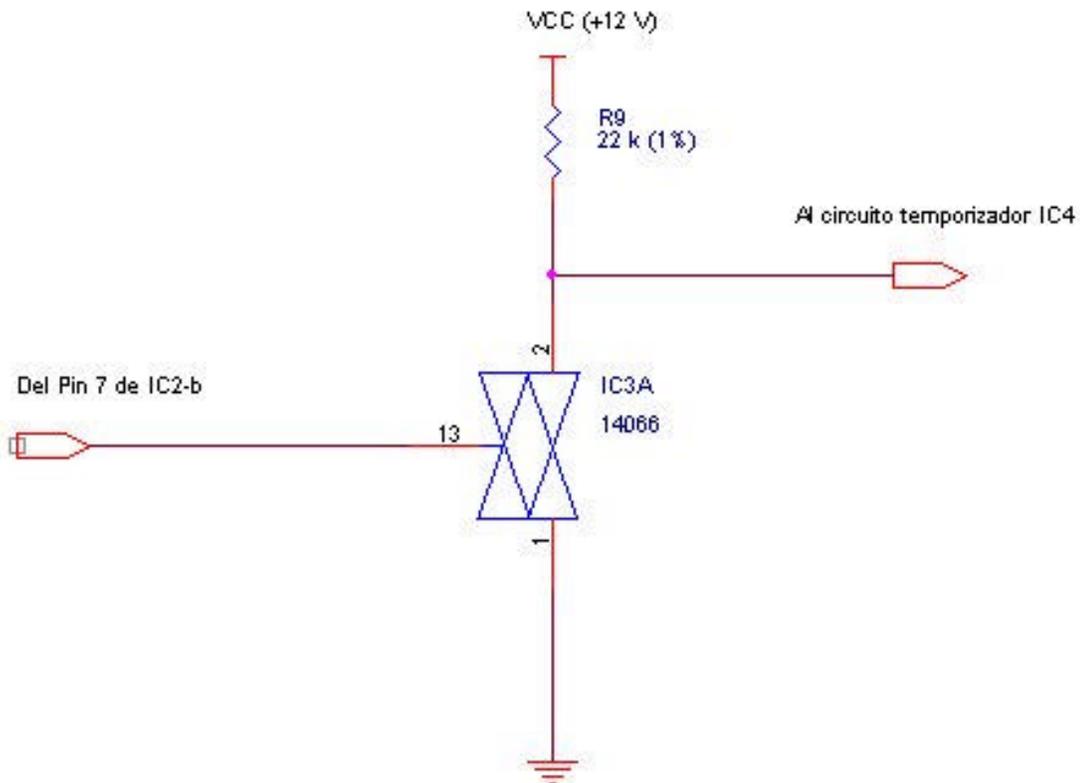


Figura 23. Circuito de disparo de la válvula de descarga

Como se puede apreciar este circuito pone su salida (**pin 2**) a nivel bajo cuando por su entrada (**pin 13**) aparece una señal a nivel alto, actúa por tanto como un inversor lógico a niveles **CMOS**.

Este circuito es necesario debido a que la activación del temporizador (**LM-555**) se realiza con una entrada activa a nivel lógico bajo.

### 3.2.2.9. Circuito temporizador para la apertura de la válvula de descarga

Este circuito se ha desarrollado en torno al temporizador universal modelo **LM-555** de **National Semiconductor**. En la Figura 24, podemos ver el interior de este circuito integrado y en la Figura 25, el diagrama de bloques.

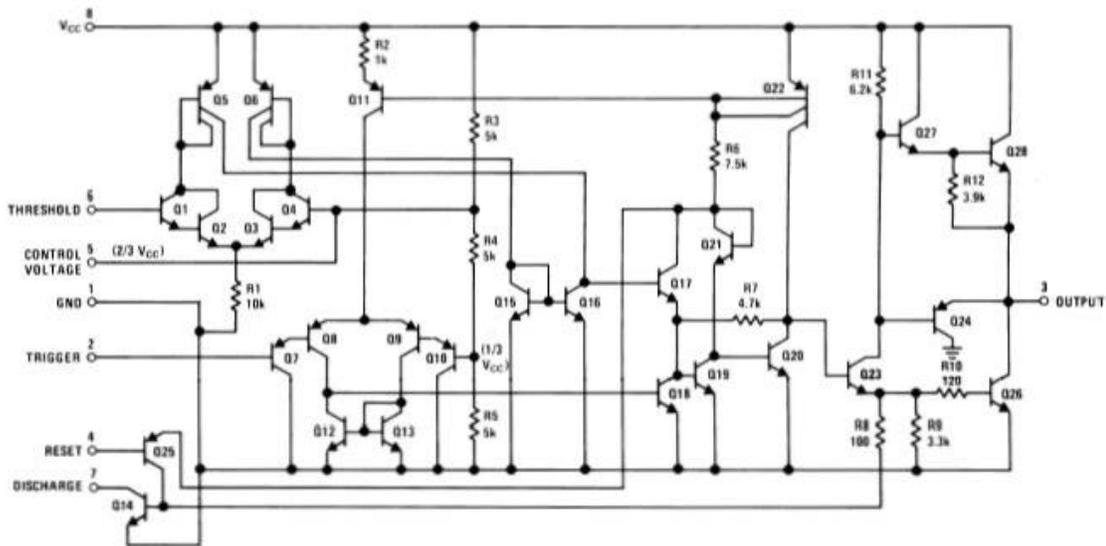


Figura 24. Circuito electrónico interno del LM-555.

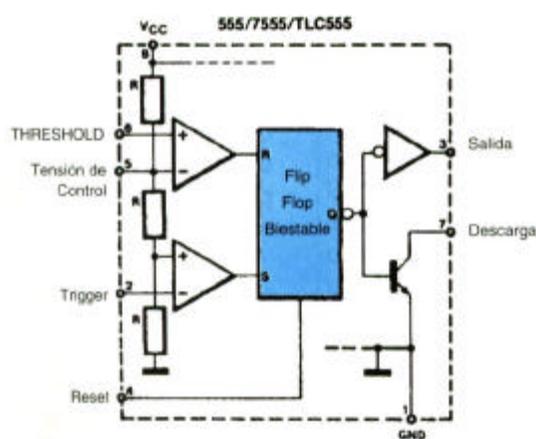


Figura 25. Diagrama de bloques de un LM-555.

El esquema de la aplicación que se ha desarrollado lo podemos ver en la Figura 26.

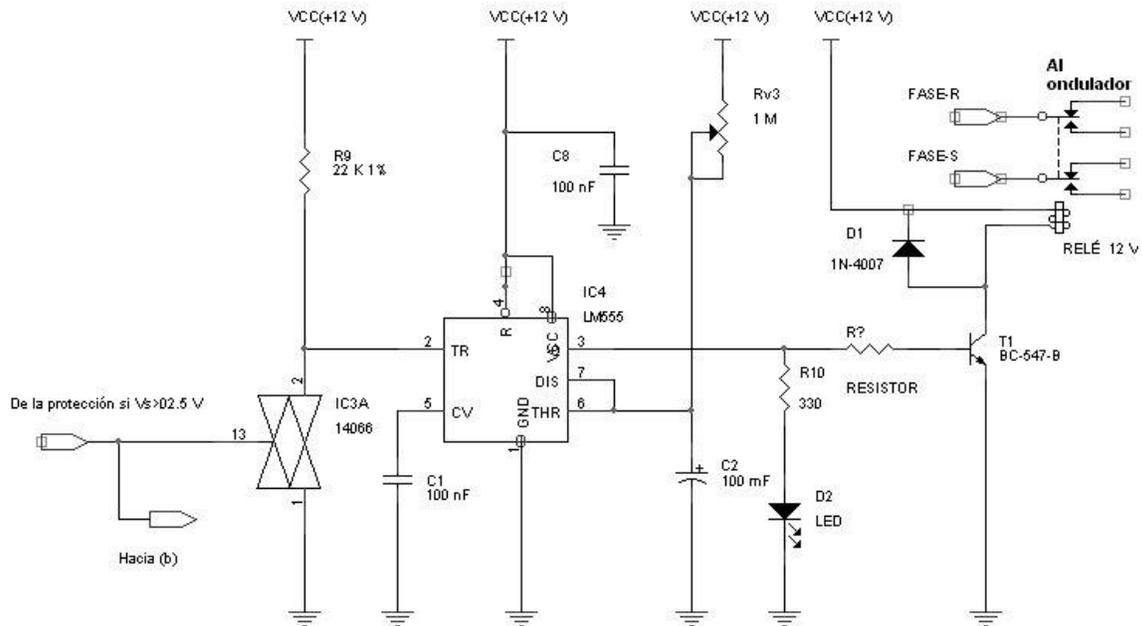


Figura 26. Circuito temporizador de la apertura de la válvula de descarga

Se ha dispuesto una configuración como monoestable con disparo a nivel bajo a través del **pin 2**. El ajuste de la apertura queda fijado en función de los valores de **RV<sub>3</sub>** y **C<sub>2</sub>** seleccionados, que para nuestra aplicación han sido elegidos para permitir una excursión comprendida entre **1** segundo y **120** segundos aproximadamente.

Durante el proceso de ajuste y prueba del dispositivo en campo se apreció que un valor óptimo del tiempo de apertura estaba en torno a **40** segundos, valor que se obtuvo operando sobre el potenciómetro multivuelta **RV<sub>3</sub>**.

Inicialmente el **pin 3** del temporizador estará a nivel bajo, sólo cuando llevemos momentáneamente a masa el **pin 2**, pasará la salida (**pin 3**) a nivel alto, simultáneamente el diodo **LED** se encenderá indicando que la temporización está en curso y con ella la apertura de la válvula de descarga.

La duración de la temporización la marca el tiempo que tarda en cargarse el condensador electrolítico **C<sub>2</sub>** de **100 μF** a través de **RV<sub>3</sub>** hasta **2/3** de la tensión de alimentación, en ese momento, la **patilla 3** pasará a nivel bajo apagándose el **LED** y desconectándose la válvula.

El transistor **TR<sub>1</sub>** está polarizado para trabajar en corte y saturación, activando el relé que lleva conectado en su colector. El diodo **D<sub>1</sub>** evita que la sobrecorriente de apertura del solenoide del relé dañe el transistor.

El relé seleccionado de **12 V<sub>CC</sub>** es de dos vías normalmente abiertas que conectan o desconectan las dos fases de alimentación de la válvula.

### 3.2.2.10. Circuito ondulador para la alimentación de la válvula de descarga

Este circuito basa su funcionamiento en el esquema simplificado de la Figura 27. Como se observa se trata de un circuito que conmuta, a una frecuencia dada, la alimentación en corriente continua de un transformador mediante un circuito de control, obteniéndose en el secundario una onda rectangular.

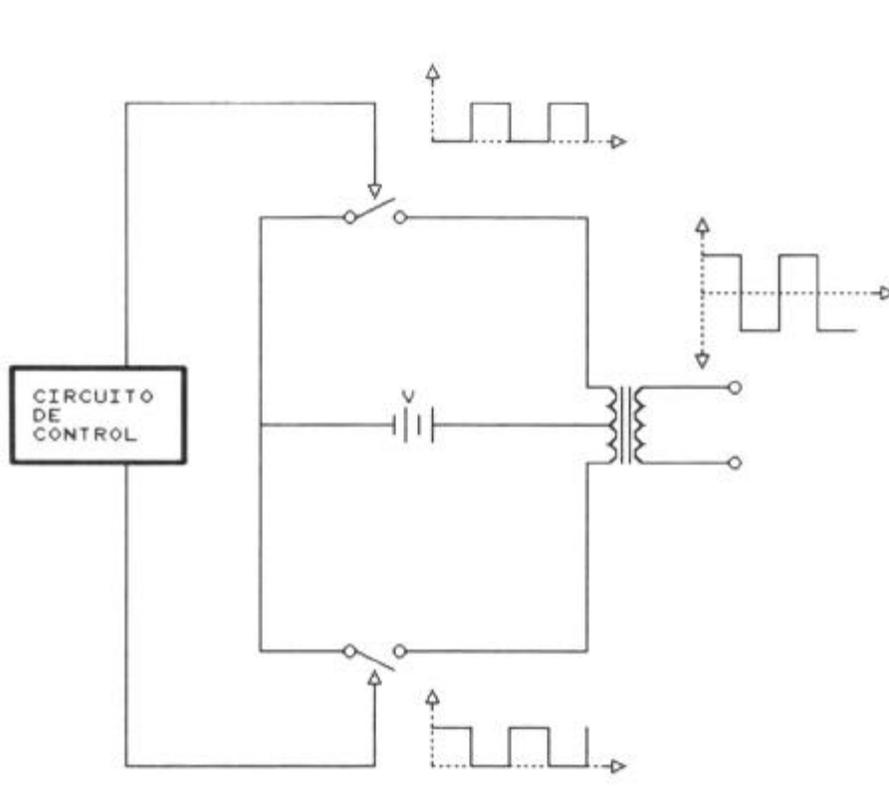


Figura 27. Diagrama general del funcionamiento del circuito ondulador.

El circuito práctico que se ha implementado y que aparece en la Figura 28, puede dividirse en tres partes: **Oscilador, previo conformador y etapa final.**

El subcircuito oscilador patrón suministra una frecuencia de **55 Hz**, por división a partir de un resonador cerámico de **455 KHz**. El circuito encargado de esta función es el **CMOS HEF-4060**, perteneciente a la familia de divisores **4020, 4040 y 4060**, concretamente es el único de ellos que además de incorporar las etapas divisoras conectadas en serie, incorpora un oscilador integrado. Entre las patillas **10 y 11**, se conecta el elemento resonante, puede ser, tanto un cristal de cuarzo, un resonador cerámico o un circuito **L-C**. El ajuste de **C<sub>1</sub>**, permitirá obtener una frecuencia exacta, así como mejorar la amplitud y forma de la onda generada por el resonador, ya que, es posible así compensar las capacidades internas generadas por el chip.

En el terminal **2** de este integrado, obtenemos una señal de **55 Hz** cuadrada y con una amplitud de **12 V**. Esta salida ataca al siguiente circuito integrado, un **HEF-4069**, que dispone en su interior de **6** inversores. La configuración de estos puede apreciarse en el esquema eléctrico de la Figura 28.

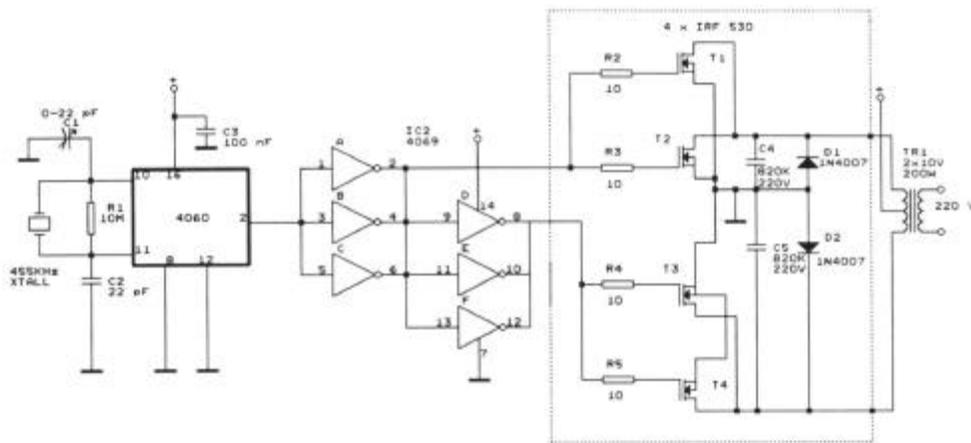


Figura 28. Circuito ondulator con onda de salida rectangular.

Primeramente tres inversores se han colocado en paralelo, los cuales atacan a los otros tres inversores restantes, también conectados en forma paralela. De la conexión de estos últimos, se obtiene una de las salidas para la etapa final de salida. La otra salida la obtenemos de los primeros tres inversores.

La etapa de salida está formada por cuatro transistores de tipo **MOS-POWER** de canal **N (IRF-530)**.

Se ha seleccionado este componente, ya que cuenta con unas características excepcionales:

- ✓ **Tensión drenador-fuente: 100 V.**
- ✓ **Corriente del drenador ( continua/TL=25 ° C):14 A.**
- ✓ **Resistencia interna drenador-fuente :0.1-0.3  $\Omega$ .**

Como puede apreciarse, debido a la baja resistencia interna, la potencia que disipan estos transistores, por pérdidas, es muy pequeña. La configuración de estos transistores es muy básica, simplemente se encuentran conectados en paralelo, lo que es posible gracias a la baja resistencia interna.

Las puertas están protegidas mediante resistencias de **10  $\Omega$  ( $R_2$ - $R_5$ )**; lo que evita que un transistor conduzca más que otro.

Para eliminar los picos de corriente que generan las cargas inductivas (el transformador de salida), se han colocado diodos del tipo **1N-4007** y condensadores ( **$C_4$**  y  **$C_5$** ) conectados entre el bobinado del transformador y el negativo de la alimentación. En la fase de ajuste se opera sobre el trimmer  **$C_1$**  hasta conseguir en la salida, medida con un voltímetro en alterna, una tensión de aproximadamente **210 V**.



### 3.2.2.11. Circuito doblador de tensión y estabilizador

Para evitar fluctuaciones en la tensión de alimentación debidas a la paulatina descarga de la batería que podrían afectar a las medidas se ha previsto el diseño y puesta a punto de un **circuito tampón** capaz de elevar la tensión de la batería al doble de su valor lo que nos asegurará que el sistema funcionará correctamente aunque la batería se agote descendiendo la tensión hasta **8 V** (momento en el que la válvula de descarga se vuelve inoperativa).

Se trata de un convertidor elevador de tensión que actúa como si de un transformador de corriente continua se tratase a partir de un circuito integrado y varios componentes pasivos. Este circuito admite tensiones de entrada entre **6 y 12 V** y entrega tensiones de salida de unos **10 y 22 V** respectivamente.

El diseño utiliza un doble amplificador de audio de bajo coste, el **TDA-2822-M** de Philips. El esquema completo aparece en la Figura 29.

Básicamente, las entradas y salidas de los dos amplificadores del **TDA-2822-M** están en acoplamiento cruzado por medio de los condensadores **C<sub>2</sub>** y **C<sub>7</sub>**, para causar una cantidad de oscilación controlada. Esta topología corresponde a la de un doble **multivibrador astable**, que actúa como un oscilador cargador, que a su vez ataca un multiplicador de tensión basado en diodos.

A través de sus condensadores de salida (**C<sub>4</sub>** y **C<sub>9</sub>**) y con las parejas de diodos asociados (**D<sub>1</sub>-D<sub>2</sub>** y **D<sub>3</sub>-D<sub>4</sub>**), los amplificadores **IC<sub>1a</sub>** e **IC<sub>1b</sub>** contribuyen alternativamente a la carga del condensador de salida **C<sub>10</sub>**. Esta energía está disponible para ser usada por la carga que conectemos en los terminales de salida del convertidor.

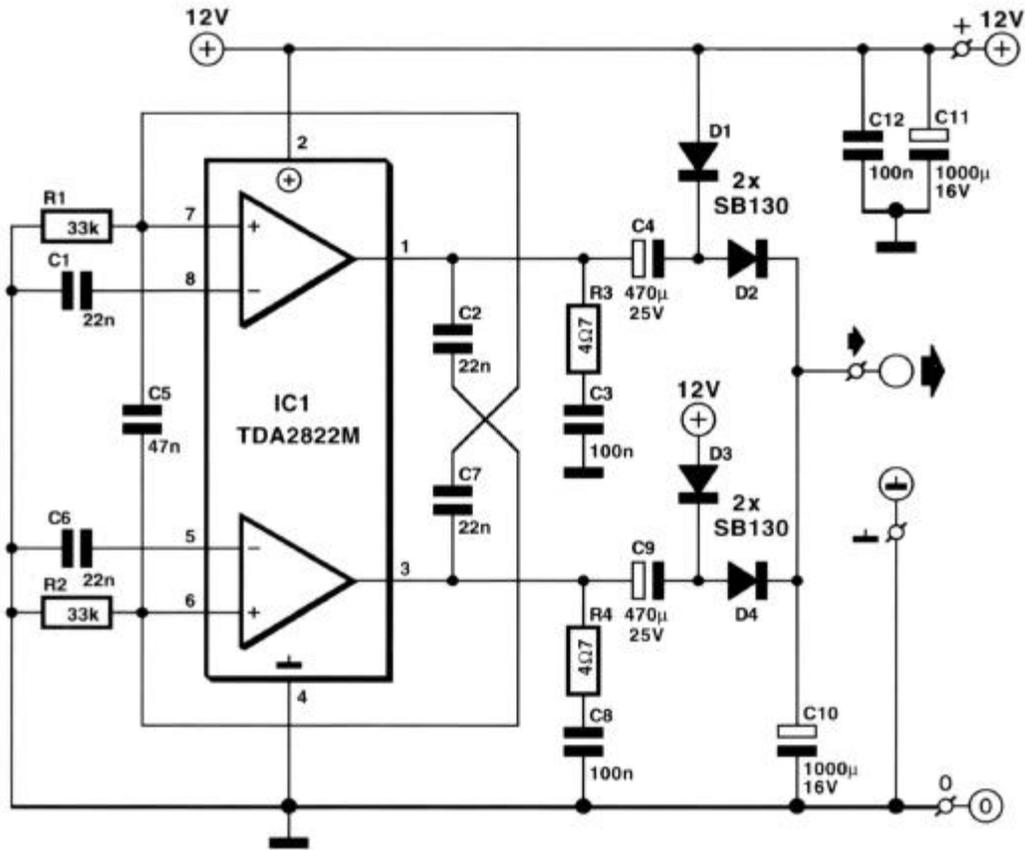


Figura 29. Esquema del convertidor-elevador DC-DC.

Teóricamente la tensión de entrada es doblada, pero hay algunos factores contrarios. Primero, los transistores de salida del **TDA-2822-M** no son dispositivos ideales y dan lugar a pequeñas caídas de tensión. A esto debemos añadir la caída de tensión en los diodos, que nos llevará a que con una tensión de entrada de **12 V** tengamos en la salida una tensión de unos **22 V**, en lugar de los **24 V** esperados. Desgraciadamente, la tensión de salida cae un poco más cuando el convertidor está cargado, pero eso no será un problema dado que detrás de este circuito emplearemos un estabilizador de tensión.

El oscilador funciona a una frecuencia de unos **2 KHz**. Este valor depende de algunos factores como la tensión de alimentación y la corriente de carga. Las **Redes de Boucherot** del amplificador de salida, **R<sub>3</sub>-C<sub>3</sub>** y **R<sub>4</sub>-C<sub>4</sub>**, son habituales en amplificadores de audio, donde sirven para adaptar la impedancia de los altavoces. Aquí, el propósito principal de estas redes es estabilizar el convertidor cuando los diodos están conmutando.

### 3.2.2.11.1. Características del circuito doblador

La máxima corriente continua de salida que puede alimentar el circuito es de unos **300 mA**. El consumo de corriente del convertidor está entre **6 y 8 mA**. Las pruebas realizadas sobre el prototipo dieron los siguientes resultados (Tabla 4):

Tabla 4. Resultados obtenidos sobre el prototipo del elevador de tensión.

V_ENTRADA	I_ENTRADA	V_SALIDA	I_SALIDA	EFICIENCIA
6 V	0.22 A	10 V	0.1 A	80%
12 V	0.44 A	21.3 V	0.21 A	85%

Aunque en el esquema eléctrico se indica el uso de diodos del tipo **SB-120**, pueden ser sustituidos por cualquier otro diodo **Schottky** de potencia media capaz de soportar al menos **1 A**. En el prototipo se ha empleado el **BYW-29** con muy buenos resultados.

### 3.2.2.12. Circuito estabilizador para la alimentación de la célula de carga y de los circuitos analógicos

Este circuito, se ha desarrollado en torno a un estabilizador tipo **LM-7812** con él alimentamos:

- Célula de carga.
- Amplificador de instrumentación.
- Resto de circuitos analógicos.

Sólo el ondulator y el doblador se alimentan directamente de la batería. Se trata de un estabilizador con la configuración estándar que aparece en la Figura 30.

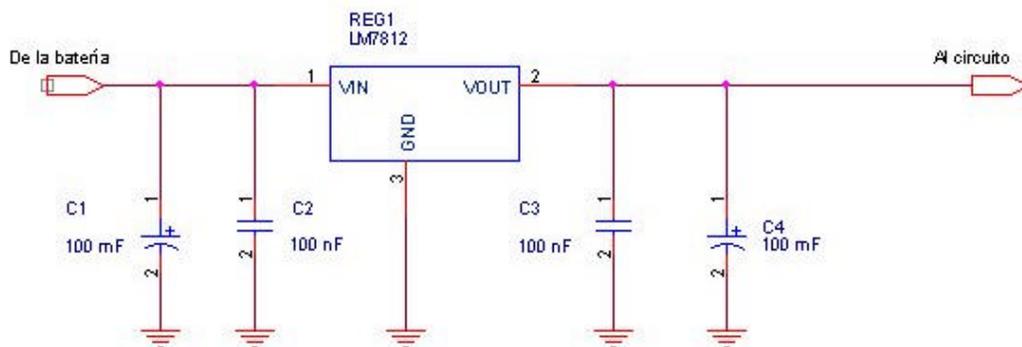


Figura 30. Circuito estabilizador de alimentación con LM-7812

### 3.2.3. Protocolo de ajuste del caudalímetro

El caudalímetro registrador requiere únicamente tres ajustes:

- 1) Tierra virtual
- 2) Nivel de disparo de la válvula de zona
- 3) Duración de la apertura de la válvula de zona.

El primer ajuste sirve para eliminar el peso del depósito y de la válvula. A título de ejemplo, para el 2º caudalímetro, este valor es de **6.88 V**. Se corresponde con el punto de prueba (**c**) (Pin 1 de IC<sub>2A</sub>) y el ajuste se realiza en **RV<sub>1</sub>**. Realmente la salida en reposo del amplificador de instrumentación (punto de prueba (**a**)), (Pin 6 del INA-114-AP), es ligeramente inferior (**5 mV**) al valor del punto de prueba (**c**), de esta manera conseguimos a través de **R<sub>masa</sub>**, la conexión a tierra de la entrada del datalogger cuando el depósito está vacío.

El segundo ajuste es el que marca la apertura de la válvula. Dado que el datalogger es capaz de medir hasta **2.458 V** su valor se ha fijado en **6.87+2.4=9.27 V**. Esto previene posibles saturaciones del datalogger. El punto de prueba es el **pin 6** de **IC<sub>2</sub>** y el ajuste se efectúa en **RV<sub>2</sub>**.

Finalmente el tercer ajuste fija el tiempo de apertura de la válvula. Experimentalmente se ha visto que el tiempo óptimo está en torno a **40** segundos. El ajuste se realiza actuando sobre **RV<sub>3</sub>**.

### 3.3. La parcela experimental.

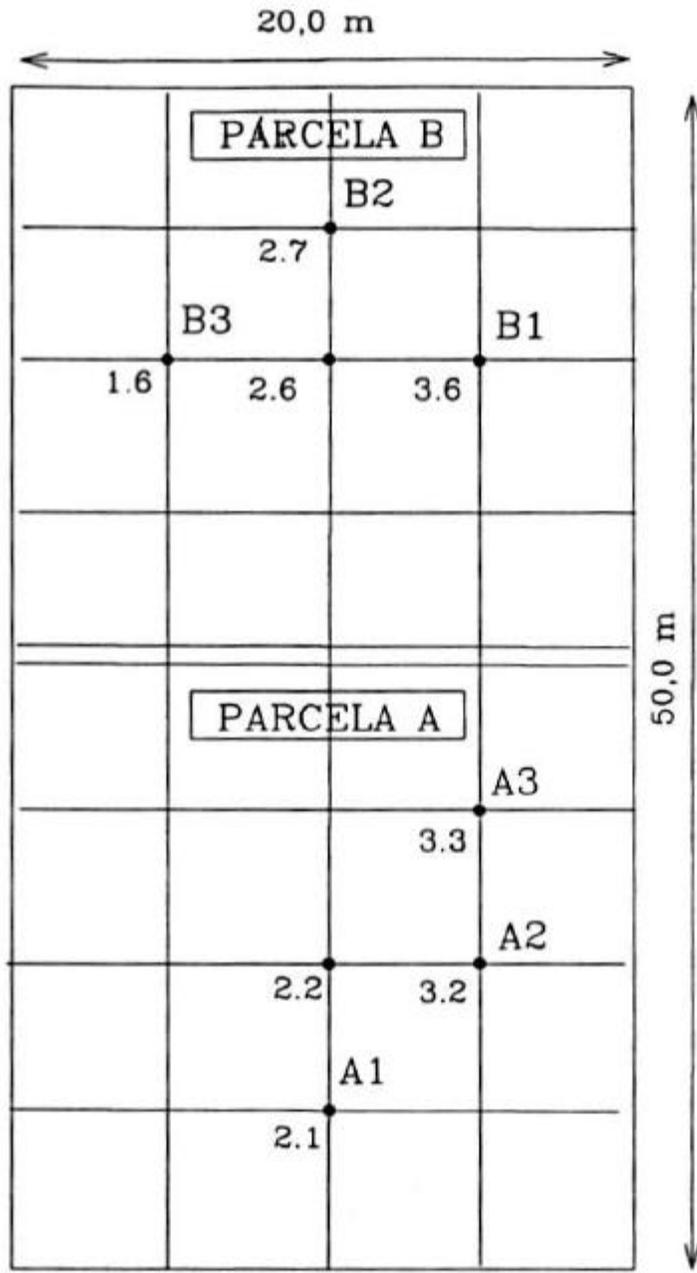
#### 3.3.1. Localización y características edafológicas

Los trabajos experimentales, los ensayos de puesta a punto de los equipos así como de validación de modelos de percolación para suelos de la campiña andaluza se realizaron en la finca experimental del Instituto de Recursos Naturales y Agrobiología de Sevilla (I.R.N.A.S. C.S.I.C.) “La Hampa”, situada en el término municipal de **Coria del Río**, a **14 Km** al suroeste de Sevilla. La finca pertenece a la unidad geomorfológica de la meseta del Aljarafe. En la Figura 31, se detalla la situación geográfica de la misma.



Figura 31. Situación de la finca experimental.

Cayuela (1996) realizó un análisis de las características edafológicas y de la variabilidad espacial de las parcelas experimentales próximas a la ubicación de los lisímetros (fig. 32). Los valores medios de los principales parámetros físicos y químicos se recogen en la Tabla 5.



• D



Figura 32. Ubicación de los lisímetros en relación a las parcelas de ensayo (Cayuela, 1996).

Tabla 5. Valores medios de las principales características edafológicas de las parcelas A y B (Cayuela, 1996)

Parcela.	Prof. (m)	N <sub>t</sub> (ppm)	pH	(CO <sub>3</sub> ) <sup>2-</sup> (%)	M.O. (%)	Ac (%)	Li (%)	Ar (%)
A	0-0,5	605	7,3	4,64	0,76	13,5	16,5	70,1
	0,5-1	449	7,2	3,30	0,75	16,0	17,4	64,1
B	0-0,5	591	7,1	5,99	0,99	13,5	18,4	68,0
	0,5-1	462	7,0	2,78	0,60	16,8	17,0	66,1

N: nitrógeno total M.O.: materia orgánica Ac: arcilla Li: limo Ar: arena

Los datos más relevantes aportados por el análisis son los siguientes:

- El suelo de las parcelas pertenece al **Mioceno del Aljarafe**. Es profundo y bien drenado, de color pardo a pardo-amarillento, de textura franco-arcillo-arenosa, con un **pH** medio de **7.2**.
- Su desarrollo se ha realizado a partir de una roca madre de areniscas calizas. Según la *Soil Taxonomy (Soil Survey Staff, 1975)*,

mm (Martín-Aranda, 1964; Moreno y col., 1981; Mudarra, 1988). La lluvia se distribuye fundamentalmente en los meses de otoño e invierno, estando ausente en el verano. Por tanto el suelo comienza a almacenar agua en octubre-noviembre. El periodo de contenido máximo de humedad en el suelo corresponde a los meses de enero a marzo o abril. Desde estas fechas, con el incremento de la evapotranspiración y disminución de las precipitaciones, se inicia el periodo de consumo de la reserva de agua del suelo. El agotamiento progresivo de ésta conduce a un periodo seco estival con escaso contenido de humedad.

La zona se caracteriza desde el punto de vista termométrico como templada, con una media anual de **17.5° C**. Las temperaturas más bajas se registran en los meses de diciembre y enero, principalmente en este último, con una media de las mínimas de unos **5° C**. El mes más cálido es Julio con **34° C** de media de máximas. La temperatura media anual del suelo está en torno a los **17.5° C**. La temperatura media del verano difiere **13.4° C** respecto a la media invernal (Mudarra, 1988).

La clasificación climática de *Thornthwaite* sitúa el clima de la zona de localización de la finca experimental dentro del **Mesotérmico-seco-subhúmedo**. Según las normas “*Soil Taxonomy*” del **U.S.D.A. (1975)** el régimen de humedad del suelo es **Xérico** y el régimen de temperaturas del suelo es **Térmico**.

### 3.3.3. Lisímetros

El modelo con el que se han realizado los ensayos es del tipo “**monolito sin tensión en la base**”, su principal ventaja reside en que este tipo de lisímetro conserva la estructura del suelo y permite mantener unas condiciones lo más próximas posibles a las del suelo real. Los

ensayos se han realizado sobre los dos lisímetros ubicados en la parcela

Se construyeron de chapa de hierro de , cilíndricos, con **1,00 m** de diámetro y **1,20 m**

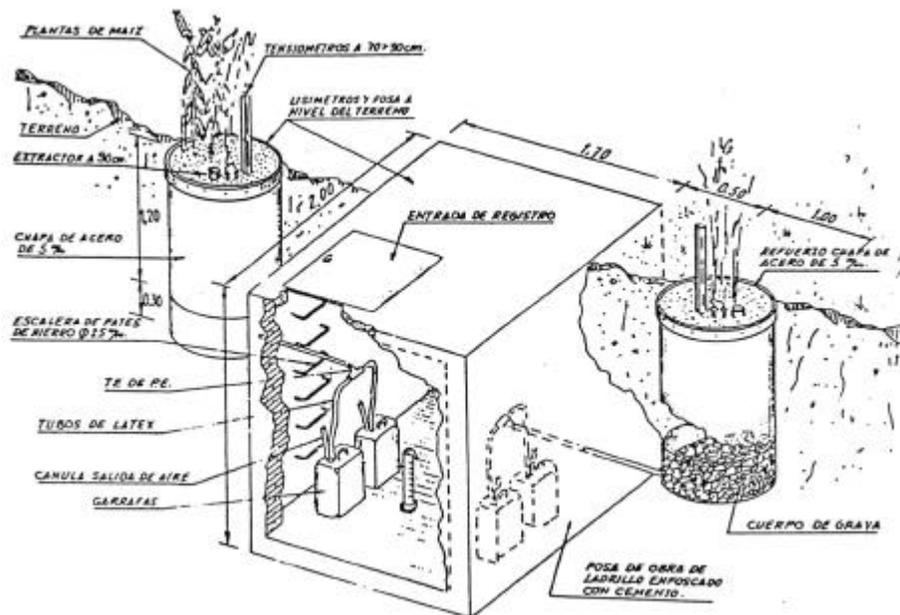
se dispuso un cuerpo de drenaje de **0.30 m** **1.00 m** de te del

**8 %**

lateral de solución del suelo. Para recoger el agua drenada por los lisímetros existe una fosa de de profundidad y lados **2.0 1.7 m**, uerta de acceso superior.

En un principio el agua se recogía en garrafas de , unidas al tubo colector de cada lisímetro, que se colocó en el punto más bajo de la base

Figura 33.



entrada de registro.

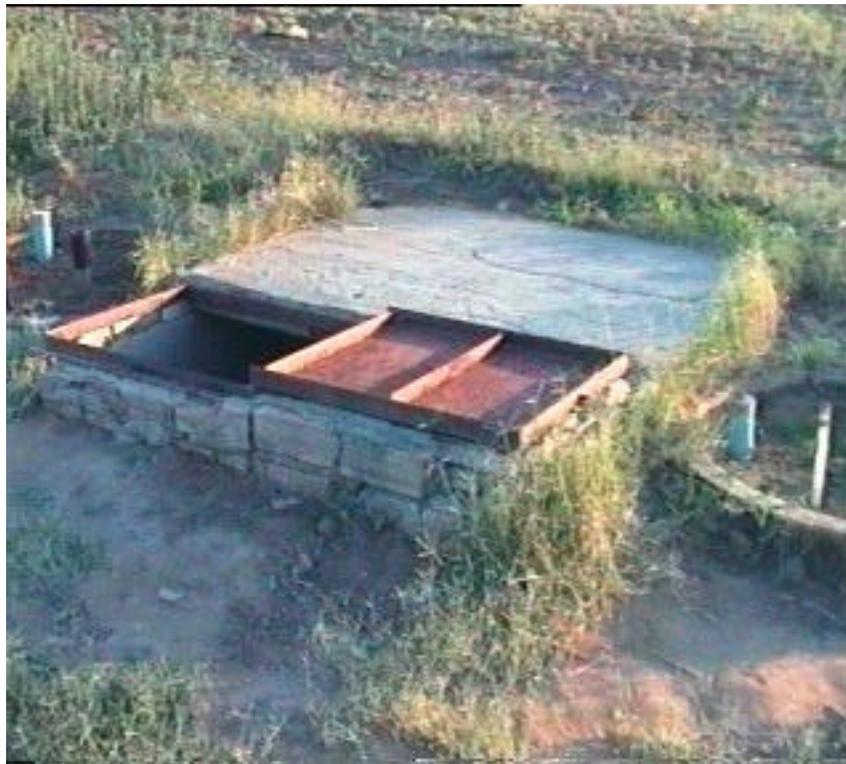
El procedimiento seguido para la instalación del sistema de lisímetros fue el siguiente: Primero se clavaron los cilindros de chapa perpendicularmente en el suelo por la presión del brazo de una retroexcavadora. Tras ello se extrajo la tierra que ocupaba el espacio en el que había de disponerse la fosa. Esto permitió cortar los cilindros del suelo de los lisímetros mediante chapas clavadas horizontalmente en su base por percusión con mazos manuales, con el fin de permitir la elevación de los mismos para así poder disponer bajo ellos los cuerpos de drenaje de grava de **0.30 m** de altura con los tubos colectores dirigidos hacia el centro de la fosa. Una vez hecho esto se construyó el suelo, paredes y techo de la fosa y se restableció el suelo en torno a la misma y al lisímetro quedando el sistema dispuesto para su funcionamiento desde marzo de **1991**.

El comportamiento de estos lisímetros fue investigado por **Cabrera et al. (1993)**, **Fernández-Boy et al. (1994, 1995)** y **Cayuela (1996)** para la caracterización del movimiento de agua y nitratos en un suelo bajo monocultivo de maíz. Estos ensayos consistieron por una parte en la medida del agua drenada en cada lisímetro y su comparación con los datos de precipitación y riego y por otra parte en el análisis químico en laboratorio del lixiviado de nitratos. Estos autores distinguen tres periodos en la experimentación con los lisímetros: i) período de cultivo, ii) período seco y iii) período lluvioso, realizando la medida total del agua drenada y el análisis químico en cada uno de los tres períodos empleando para ello depósitos de 25 litros.

Se trata por tanto de una medida global del agua drenada en la que no se puede conocer la evolución temporal del drenaje.

A partir de ahora se donotará como **Lisímetro 1** o simplemente **L1** al lisímetro más alejado de la entrada a la cámara de registro y **Lisímetro 2** o **L2** al más cercano (fig. 32, 33; Foto 3).

A continuación se muestran varias imágenes de los lisímetros, caudalímetros y el interior del habitáculo de registro.



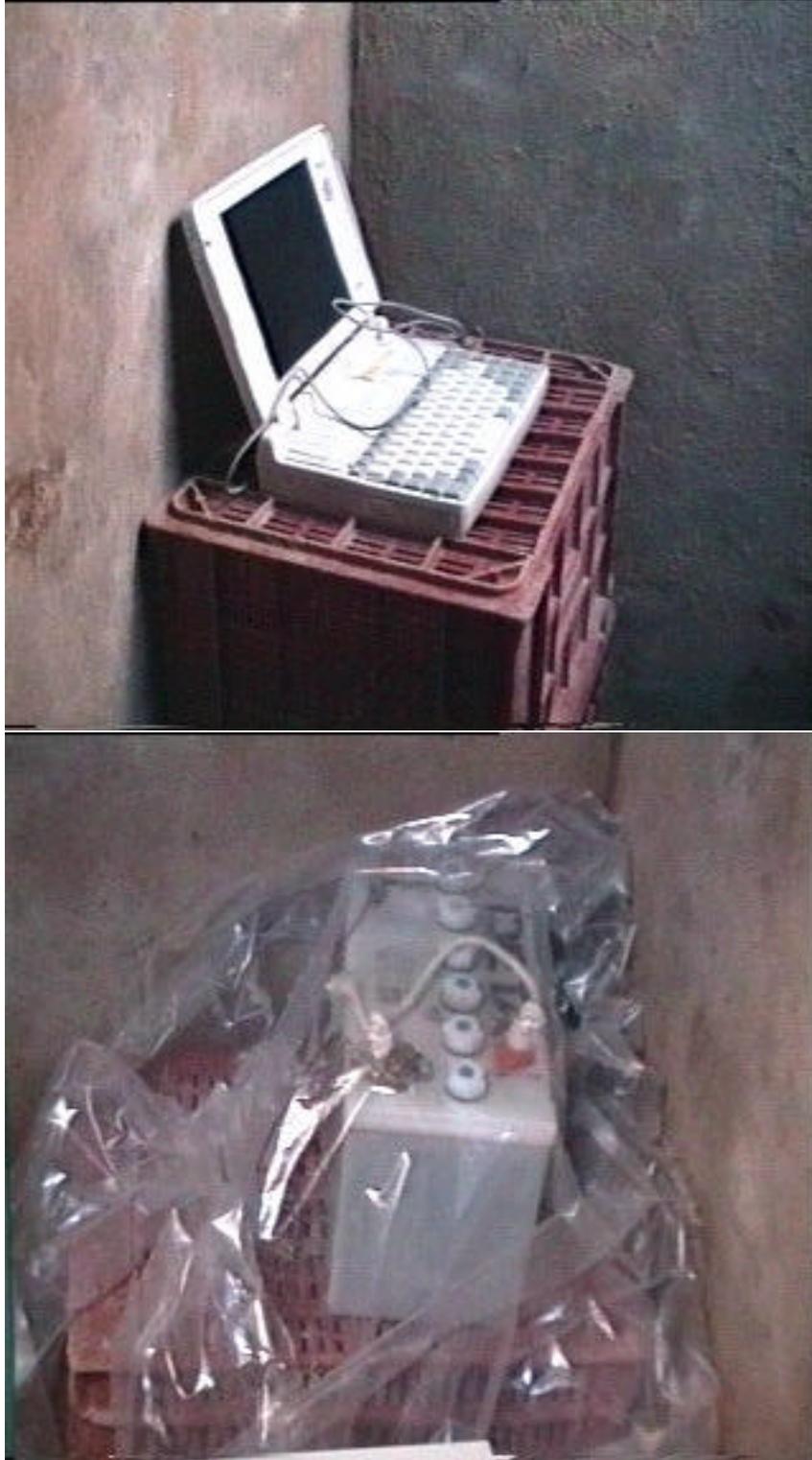
**Foto 3. Imagen general de los lisímetros y cámara registro, L2 a la izquierda y L1 a la derecha.**



**Fotos 4 y 5. L1 y L2 respectivamente.**



Fotos 6 y 7. Caudalímetros de L1 y L2 respectivamente



Fotos 8 y 9. Ordenador portátil y batería de alimentación de los caudalímetros

### 3.4. El software de control y tratamiento de la información de los caudalímetros

El equipo que hemos desarrollado cuenta con un software de control y procesado de la información que comprende los siguientes programas:

- **Box Car Pro v3.51.** Es el software de control que hemos empleado para la gestión de los dos registradores. Se trata de un paquete comercial que permite trabajar en entorno **Windows 95/98** y que además presenta una utilidad con las principales funciones bajo **MS-DOS** denominada **LOGUTIL**. Esta última ha sido empleada para los trabajos de campo al contar sólo con un ordenador modelo **TOSHIBA T-1800** con el sistema operativo **MS-DOS**.
- **Formato v1.0.** Este programa permite generar un fichero de salida apropiado el análisis de la información a partir del fichero de texto que se obtiene de los registradores. Se ha desarrollado con **VB 5.0**.
- **Filtro v1.0.** Este programa permite una selección de los datos previo al estudio, simulando un intervalo entre muestras mayor que el que realmente tuviera el registrador, con ello eliminamos datos redundantes cuando entre muestras consecutivas no existen diferencias mayores que el bit menos significativo.
- **Lisímetro v5.0.** Es el programa principal de gestión de los datos con él obtenemos las curvas de volumen acumulado, la de caudal instantáneo aproximado a través de derivación numérica, la media móvil de **5** términos de la curva de caudal instantáneo y el fichero con el formato apropiado para aplicar el modelo conceptual de Nash (1957), y obtener así los parámetros **K** y **n** de la función **Gamma** que posteriormente ajustaremos.

- **Nash v1.0.** Permite obtener a partir del Fichero generado por **Lisímetro v5.0**, los parámetros **K** y **n** del ajuste del modelo de embalses en serie.
  
- **Hunash v1.0.** Con este programa y el intervalo de duración del riego (**T**) es posible sintetizar por cálculo numérico el hidrograma unitario (**HU**) de **T** segundos de duración. Este **HU** al ser el riego de valor constante y en una sola aplicación se corresponde con la función de caudal instantáneo y por tanto se ajustará a los datos de caudal obtenidos de **Lisímetro v5.0**.
  
- **Convolución v1.0.** Permite a partir del hidrograma unitario **HU** de **T** segundos de duración y los datos de un riego o precipitación cualesquiera, la síntesis de la función de caudal instantáneo de salida del lisímetro.
  
- **Deconvolución v1.0.** Se trata de otro programa que permite obtener directamente los datos de ordenadas del **HUI** a partir de los datos de caudal instantáneo del lisímetro y del pulso de riego único de duración **T** aplicado.
  
- **Método Simplificado v1.0.** Con esta aplicación es posible obtener directamente los parámetros **K** y **n** de **NASH** a partir de las coordenadas del caudal punta del hidrograma de salida y conociendo volumen circulado.
  
- **Regresión Simplificada v1.0.** Permite la búsqueda de la pareja óptima de **K** y **n** que hacen mínimo el error cuadrático en el ajuste entre los datos de campo de volumen acumulado y los datos de volumen obtenidos por síntesis a partir del modelo de **NASH** considerando que puesto que la duración del riego es puntual frente al proceso completo de circulación, el hidrograma de salida del lisímetro es el propio **HUI**.

- **Regresión Completa v1.0.** Permite la búsqueda de la pareja óptima de **K** y **n** que hacen mínimo el error cuadrático en el ajuste entre los datos de campo de volumen acumulado y los datos obtenidos por síntesis a partir del modelo de **NASH** considerando una duración discreta del riego.

Algunas subrutinas que se emplean internamente dentro de los programas antes mencionados también se han implementado independientemente para análisis puntuales de información, estos programas son:

- **Gamma v1.0.** Genera los datos de una función **GAMMA** a partir de los datos de **K**, **n** y abscisa (**X**). Su funcionamiento se basa en el uso de la aproximación para 6 términos propuesta por Lanczos (1990) para el cálculo de **Ln(GAMMA(X))**. Para **X>1** se aplica directamente dicha aproximación. Para **0<X<1** se usa previamente la fórmula de reflexión.
- **Simpson v1.0.** Permite el cálculo de la integral de una función dada entre dos límites de integración también dados usando la **Regla de Simpson** y aproximando hasta una millonésima.

### 3.4.1. Box Car Pro v3.51.

Pasamos a continuación a reseñar las funciones empleadas de este programa para nuestra aplicación.

#### 3.4.1.1. Lanzamiento del registrador

Para la conexión entre el **registrador** y el **P.C.** tenemos que abrir la opción **LAUNCH** que aparece en el desplegable situado en la opción **LOGGER** de la barra de comandos del programa, (fig. 34).



Figura 34. Lanzamiento del registrador.

Si existiera algún problema en la conexión debida al cable o por un error en la transmisión del protocolo de **lanzamiento-lectura**, aparecerá la imagen de la Figura 35.

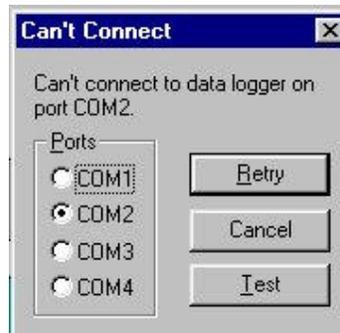


Figura 35. Pantalla de error en la comunicación vía serie.

Para ver la fuente del problema existe una opción que revisa la conexión **Registrador-P.C.** tal y como podemos observar en la Figura 36.

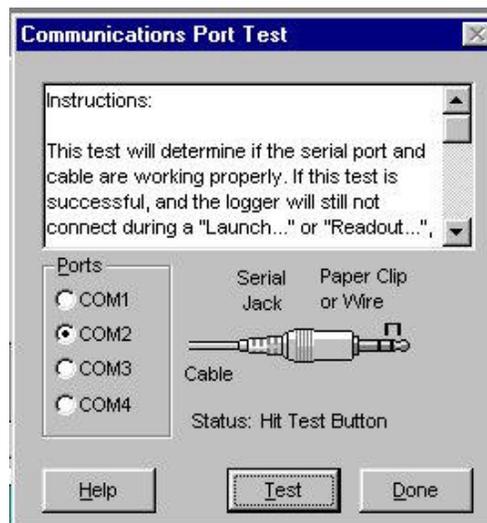


Figura 36. Pantalla para el test de la conexión Registrador-P.C.

Si la comunicación se ha efectuado correctamente aparecerá la pantalla mostrada en la Figura 37.

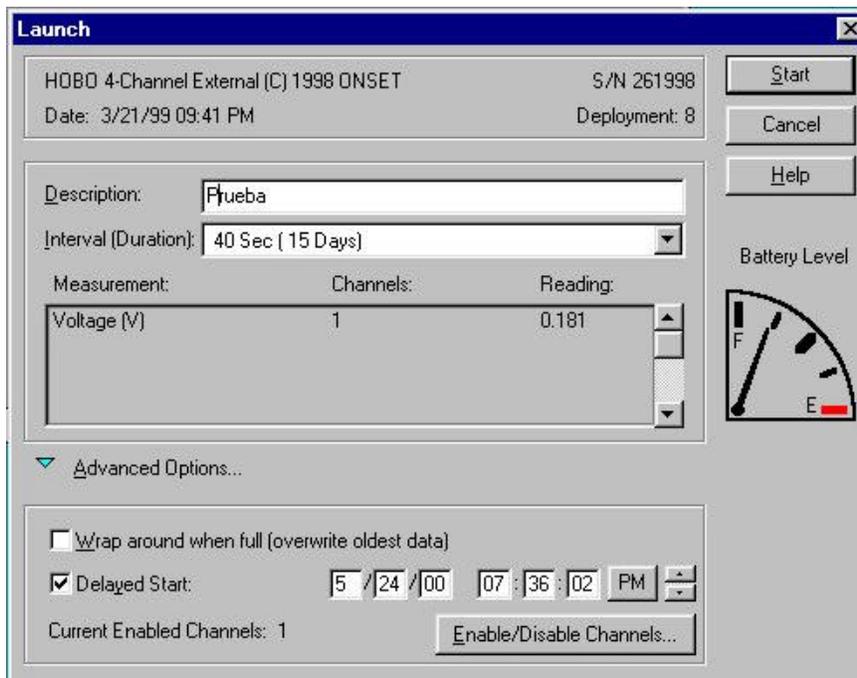


Figura 37. Pantalla de configuración para el lanzamiento.

Como podemos observar aparecen varias opciones de configuración:

- Descripción de la prueba.
- Intervalo entre muestras.
- Canales activos y modo de funcionamiento (con sonda interna o como canal externo).
- Estado de la batería.

Dentro del epígrafe de opciones avanzadas podemos actuar sobre:

- **Funcionamiento circular:** Cuando la memoria se llena se reescriben las primeras posiciones.
- **Modo retardado:** permite que el datalogger empiece a tomar datos a partir de una fecha y horas prefijadas. Para ello es importante que el reloj del ordenador con el se efectúa el lanzamiento este con la fecha y hora correctas.

- **Selección de canales habilitados-deshabilitados.** Este botón nos entra en un submenú que permite esta función. Según el número de canales activos cambiará el número máximo de datos por canal que podremos almacenar. Este submenú aparece en la Figura 38.

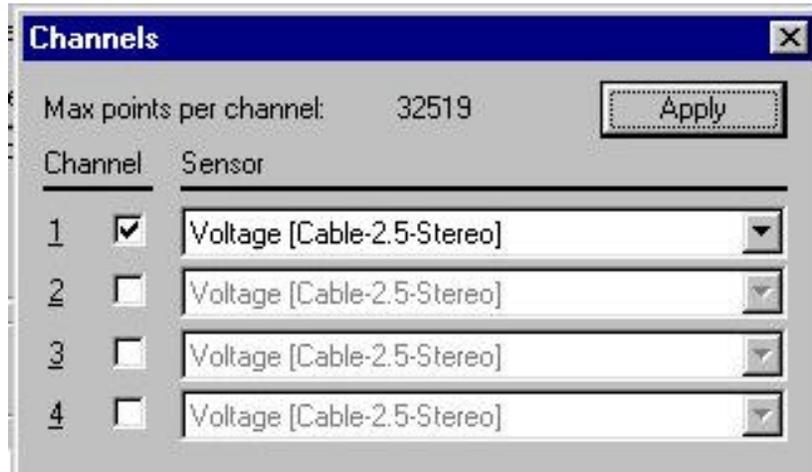


Figura 38. Menú de selección de los canales activos del registrador.

Una vez que la configuración ha sido dispuesta hay que lanzar el registrador con lo que vía serie le transferiremos la configuración de trabajo. Para ello pulsaremos el botón **START** de la Figura 37, obteniendo con ello la pantalla de descarga o lanzamiento, semejante a la de la Figura 39 con la salvedad de que en la ventana de progreso aparecerá la palabra **LAUNCHING**.



Figura 39. Descarga de la configuración de trabajo en el registrador.

#### 3.4.1.2. Lectura de los datos almacenados

Una vez que el registrador ha almacenado el evento de nuestro interés hay que volcar los datos de su **EEPROM** (memoria no volátil grabable y borrrable eléctricamente) al **P.C.** a través del enlace serie.

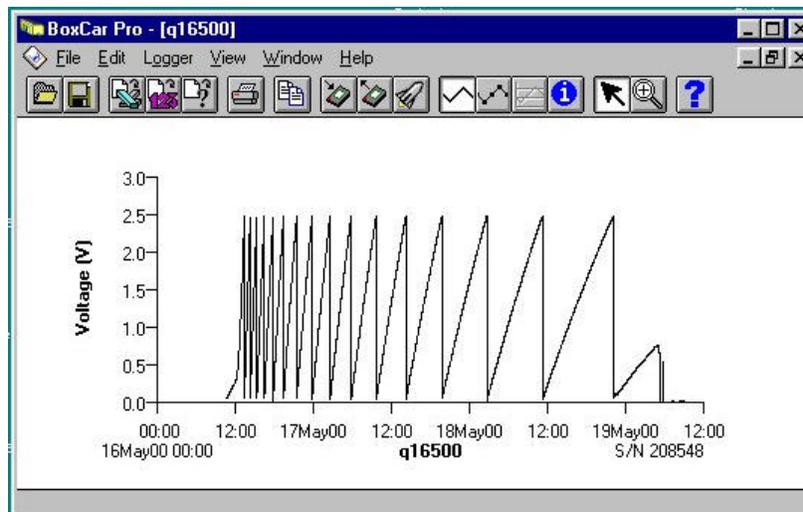


Figura 40. Pantalla de los datos obtenidos por el caudalímetro en un ensayo de campo en la finca “La Hampa” de Coria del Rio, Sevilla.

Nuevamente se sucederán pantallas como la de la Figura 34, en la que esta vez seleccionaremos la opción **READOUT**, la de la Figura 35 y 36, si existen problemas en la comunicación y finalmente si todo se ha ejecutado con normalidad, la pantalla de la Figura 39.

Es posible el análisis puntual de los datos obtenidos desplegando la pantalla de información que en la barra de tareas aparece con la letra

I. El resultado es como el mostrado en la Figura 41.

q16500

HOB0 TEMPERATURE, EXT (C) 1996 ONSET

S/N: 208548      Deployment: 68

Points: 6371      Unit: Voltage (V)

---

Start Time: 5/16/00 11:00:11.0 AM

End Time: 5/19/00 09:46:51.0 AM

Interval: 40 Sec

Alarm Low: N/A      Alarm High: N/A

Min Value: 0.005      Max Value: 2.466

Hide Data

Date/Time	Voltage (V)
5/16/00 11:00:11.0 AM	0.073
5/16/00 11:00:51.0 AM	0.073
5/16/00 11:01:31.0 AM	0.073
5/16/00 11:02:11.0 AM	0.073
5/16/00 11:02:51.0 AM	0.083
5/16/00 11:03:31.0 AM	0.083
5/16/00 11:04:11.0 AM	0.083
5/16/00 11:04:51.0 AM	0.083
5/16/00 11:05:31.0 AM	0.083
5/16/00 11:06:11.0 AM	0.093

Figura 41. Pantalla de los datos obtenidos, la fecha y hora del registro.

### 3.4.1.3. Utilidades bajo MS-DOS: Logutil

Esta aplicación es necesaria cuando se vaya a emplear un **P.C.** que trabaje bajo **MS-DOS**. La pantalla de trabajo aparece en la Figura 42.

```

#####
#                               Logger Utility v3.5                               #
#                               Onset Computer Corp.                             #
#                               Copyright 1995-98                               #
#####
Main Menu _____
CONTROL
L: Launch
R: Readout
U: Optic Shuttle Readout
H: Hobo Shuttle Readout
O: Open File
C: Current Time & Value
P: Change Port
MISC
?: Display Menu
Q: Quit
_____
Choice:

```

Figura 42. Ventana de trabajo bajo MS-DOS del registrador.

Como se puede observar las funciones son semejantes a las homólogas de **Box Car Pro v 5.1**.

- ◆ **L LAUNCH:** Carga del registrador con la configuración de trabajo.
- ◆ **R READOUT:** Lectura de los datos almacenados en la **EEPROM**.
- ◆ **O OPEN FILE:** Abre un fichero para visualizarlo.
- ◆ **C CURRENT TIME & VALUE:** Muestra la fecha y dato actuales
- ◆ **? DISPLAY MENU:** Muestra la pantalla de trabajo.
- ◆ **Q :** Salida del programa.

El resto de funciones no se emplean.

Se presentan a continuación los programas que se han puesto a punto empleando la versión 5.0 de Visual Basic.

### 3.4.2. Formato v1.0

La adaptación del formato de fichero de los registradores a formato compatible con el paquete **OFFICE** de **MICROSOFT** requiere de una aplicación específica.

Para ello lo primero es generar un fichero de texto (extensión **\*.txt**) con separación entre columnas mediante espacios, a partir de los ficheros genéricos de los registradores (extensión **\*.dtf**). Este proceso se realiza con la aplicación **Box Car Pro 3.51** tal y como se aprecia en la Figura 43.

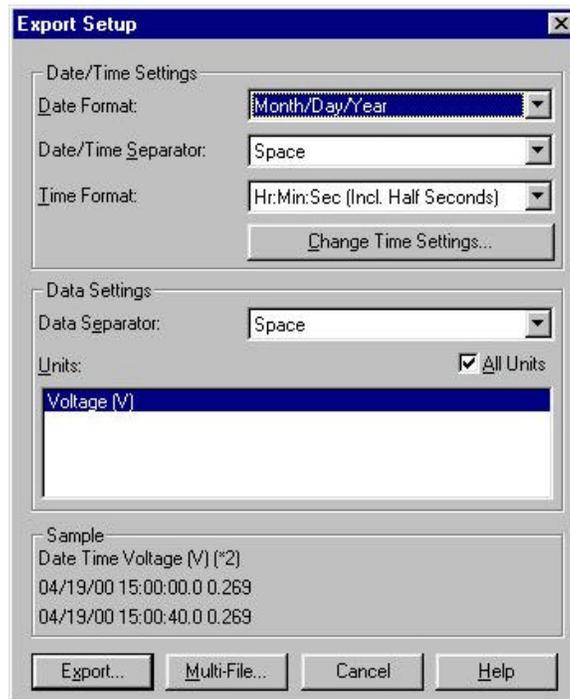


Figura 43. Pantalla para la exportación a fichero de texto.

Una vez obtenido el fichero con la extensión **\*.txt** nos encontramos con unos datos agrupados en tres columnas, la primera con la fecha de la muestra, la segunda con la hora y finalmente la tercera con el dato muestreado entre **0-2.55 V**. Un ejemplo de este fichero aparece en la Figura 44.

Date	Time	Voltage
05/09/00	18:59:39.0	0.015
05/09/00	19:00:19.0	0.015
05/09/00	19:00:59.0	0.015
05/09/00	19:01:39.0	0.015
05/09/00	19:02:19.0	0.015
05/09/00	19:02:59.0	0.015
05/09/00	19:03:39.0	0.015
05/09/00	19:04:19.0	0.024
05/09/00	19:04:59.0	0.024
05/09/00	19:05:39.0	0.024

**Figura 44. Fichero de datos con la extensión \*.txt**

Este fichero no tiene un formato compatible con **EXCEL** ni con **STATGRAPHICS 5.0**, por ello lo primero que realizaremos será una transformación de formato consistente en:

- En la columna de datos eliminamos el punto decimal por una coma decimal y forzamos a que todos los datos sean de la misma longitud, por ejemplo **0.03** pasará a **0,030**, es decir entero y tres cifras decimales. Para conseguir este primer cambio empleamos la aplicación **Formato v1.0** que se ha desarrollado en **VB 5.0**. Un ejemplo con los datos ya modificados aparece en la Figura 45, a estos ficheros de texto ya modificados se les da la extensión **\*\_1.txt**. Una imagen de la aplicación **Formato v1.0** aparece en la Figura 46.

Date	Time	Voltage
05/09/00	18:59:39.0	0,015
05/09/00	19:00:19.0	0,015
05/09/00	19:00:59.0	0,015
05/09/00	19:01:39.0	0,015
05/09/00	19:02:19.0	0,015
05/09/00	19:02:59.0	0,015
05/09/00	19:03:39.0	0,015
05/09/00	19:04:19.0	0,024
05/09/00	19:04:59.0	0,024
05/09/00	19:05:39.0	0,024

Figura 45. Ejemplo de fichero \*\_1.txt con separador decimal por coma.



Figura 46. Pantalla de trabajo de la aplicación Formato v1.0.

### 3.4.3. Filtro v1.0

En los casos en los que tengamos que comparar ensayos realizados con intervalos de muestreo distinto, se hace necesario en la muestra con un intervalo de registro menor, un programa que sea capaz de seleccionar datos distanciados en un intervalo de tiempo mayor e igual al del ensayo con intervalo mayor.

La aplicación desarrollada para este fin es **Filtro v1.0**. (fig. 47).

**PANTALLA:**

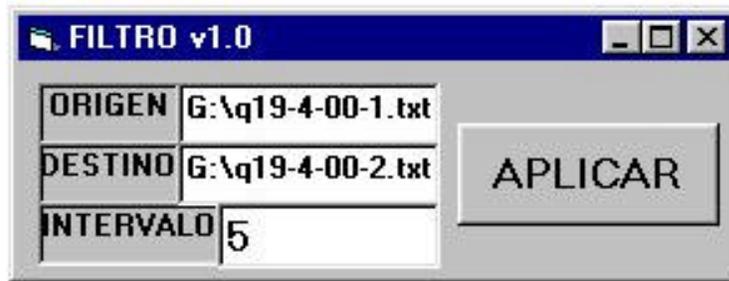


Figura 47. Pantalla de trabajo de la aplicación Filtro v1.0.

**Presenta tres campos:**

1. **ORIGEN:** Es el fichero fuente a modificar.
2. **DESTINO:** Es el fichero generado con el nuevo intervalo.
3. **INTERVALO:** Es el nuevo intervalo entre muestras.

### 3.4.4. Lisímetro v5.0

Se trata del programa principal de gestión de la información recogida de los registradores.

#### PANTALLAS:

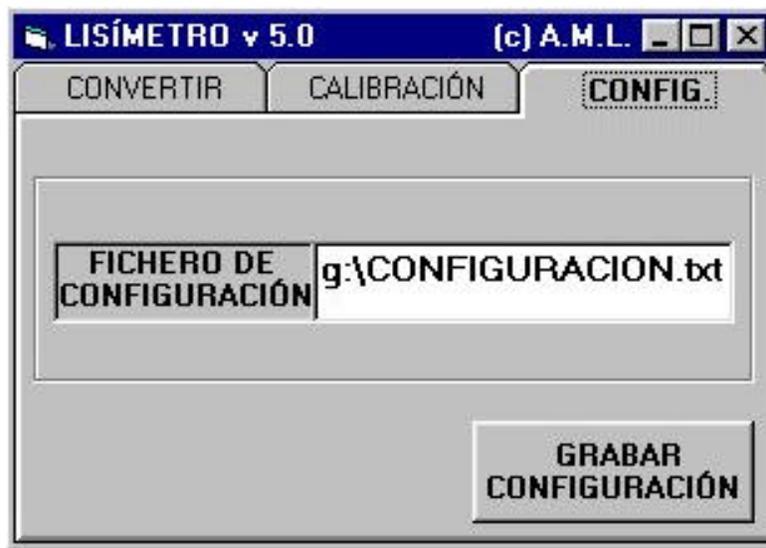


Figura 48. Pantalla de configuración de la aplicación Lisímetro v5.0

#### FUNCIONES:

- Permite guardar la calibración actual del caudalímetro así como el nombre de los ficheros origen y destino.
- En el campo **FICHERO DE CONFIGURACIÓN** incluiremos el **PATH** del fichero de cabecera.

La siguiente pestaña es **CALIBRACIÓN** y en ella aparecen los campos correspondientes a los ficheros de **origen** y **destino** así como

la pendiente y ordenada en el origen de la recta de calibración del caudalímetro, ver Figura 49.



Figura 49. Pestaña de calibración para la aplicación Lisímetro v5.0

Finalmente la pestaña **CONVERTIR** ejecuta la aplicación generando varios ficheros, ver Figura 50.



Figura 50. Pestaña de conversión para la aplicación Lisímetro v5.0.

1. Fichero de salida con extensión **\_2.txt**: En él aparecen por columnas:
  - a) Número de la muestra.
  - b) Tensión eléctrica registrada (**voltios**).
  - c) Tensión acumulada eliminando las descargas del depósito (**V**)
  - d) Peso acumulado empleando la recta de calibración (**Kg**).
  - e) Derivada numérica para la obtención de la curva de caudal en **Kg/h**.
  - f) Derivada móvil de cinco términos para compensar el efecto discretizador del convertidor.
  
2. Fichero de salida del caudal (**Kg/h**).
3. Fichero de salida con el volumen acumulado (**Kg**).

Por último hay que incluir en el Campo de entrada **INTERVALO (THU)** la cadencia temporal entre muestras.

### **3.4.5. Nash v1.0**

Se trata de una aplicación que es una variante del programa del mismo nombre propuesto por Ayuso (1990) e igualmente permite la obtención de los parámetros **K** y **n** del modelo de **Nash** en el que el **HUI** es la función de densidad de la distribución Gamma. Se basa en la obtención del **Hidrograma Unitario Instantáneo** de una cuenca a partir de los datos de un **Hietograma de Precipitación Efectiva (HPE)** (En nuestro caso un riego) y el correspondiente **Hidrograma de Escorrentía Directa (HED)** (Curva de caudal obtenida con la aplicación **LISÍMETRO v5.0**), ver Figura 51.

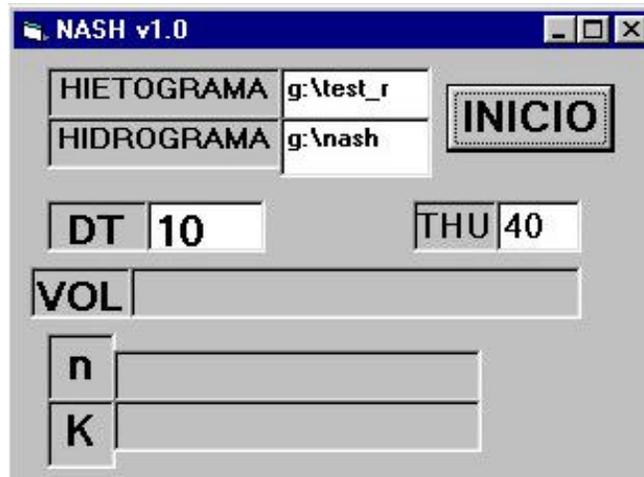


Figura 51. Pantalla de trabajo de la aplicación Nash v1.0.

Sus campos son:

**Entradas:**

- **HIETOGRAMA:** Fichero con el hietograma de precipitación efectiva.
- **HIDROGRAMA:** Fichero con el hidrograma de esorrentía directa.
- **DT:** Duración de cada pulso en el hietograma.
- **THU:** Intervalo entre muestras.

**Salidas:**

- **VOL:** Volumen circulado.
- **K, n:** Parámetros de ajuste al modelo de Nash (1957).

### 3.4.6. Hunash v1.0

Se trata de otra adaptación a **VB 5.0** del programa del mismo nombre propuesto por Ayuso (1990), con el se obtienen los valores de las ordenadas del Hidrograma Unitario **HU** a partir del hidrograma Unitario Instantáneo **HUI** sintetizado a partir de los parámetros **n** y **K** de Nash (1957). Para el cálculo de la integral de convolución emplea el cálculo numérico mediante la regla de Simpson (fig. 52).

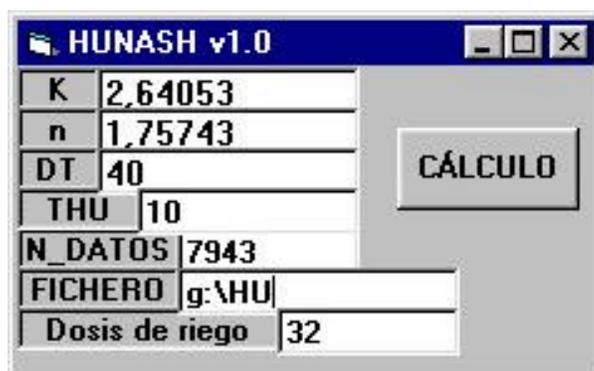


Figura 52. Pantalla de trabajo de la aplicación Hunash v1.0.

#### CAMPOS:

#### Entradas:

- **K, n:** Parámetros del modelo de Nash (1957).
- **DT:** Duración de los pulsos de riego.
- **THU:** Intervalo entre muestras.
- **N\_DATOS:** Número de datos a sintetizar.
- **Dosis de riego:** Lámina de agua aplicada expresada en litros.

#### Salida:

- **FICHERO:** Destino de los datos generados.

### 3.4.7. Convolución v1.0

Esta aplicación emplea una función de transferencia genérica definida en forma de fichero de texto para a partir de unos datos de precipitación también en forma de fichero, generar por convolución el hidrograma de salida (fig. 53).



Figura 53. Pantalla de trabajo de la aplicación Convolución v1.0.

#### CAMPOS:

#### Entradas:

- **H.U.:** Hidrograma unitario de duración T.
- **ENTRADA:** Datos de precipitación o riego.

#### Salidas:

- **SALIDA:** Fichero de salida con los datos de la convolución.
- **GLOBAL:** Fichero de salida con la convolución HU e Hietograma.

### 3.4.8. Deconvolución v1.0

Esta aplicación realiza la función inversa a la anterior permitiendo a partir de un fichero con los datos de un hidrograma y otro con los datos de precipitación, obtener un tercer fichero con los datos de la función de transferencia (fig. 54).



Figura 54. Pantalla de trabajo de la aplicación Deconvolución v1.0.

#### CAMPOS:

#### ENTRADAS:

- **INTENSIDAD:** Intensidad del pulso de riego (la unidad dependerá de los datos de los ficheros).
- **N\_DATOS:** Número de datos de hidrograma.
- **Q\_SALIDA:** Fichero con los datos del hidrograma de duración T.
- **H.U.:** Fichero que contendrá el Hidrograma unitario sintetizado.

### 3.4.9. Método Simplificado v1.0

Se trata de una aplicación que permite obtener rápidamente el valor de los parámetros **K** y **n** de Nash (1957). Se basa en las propiedades del punto de máximo de la función de densidad **GAMMA** Plate et al. (1988) y en considerar que para riegos cortos el **HUI** es equiparable al **HU**:

La aplicación, conocidos **q<sub>max</sub>**, **Vol** y **t<sub>max</sub>** a partir del análisis con **EXCEL** de la salida de la aplicación **Lisímetro v5.0**, resolverá la ecuación anterior hasta obtener el valor de **K** y a partir de ahí aplicando (1) se obtendrá **n** (fig. 55).

MÉTODO SIMPLIFICADO v1.0		
t_max	2	K
q_max	4	n
Vol_aplicado	32	n

CALCULO

Figura 55. Pantalla de trabajo de la aplicación Método Simplificado v1.0.

#### CAMPOS:

#### ENTRADAS:

- **t<sub>max</sub>**: Abscisa del máximo de la función GAMMA.
- **q<sub>max</sub>**: Ordenada del máximo de la función GAMMA.
- **Vol\_aplicado**: Volumen en litros de agua de riego aplicada.

#### SALIDAS:

- **K y n**: Valores de salida ajustados de estos parámetros.

### 3.4.10. Regresión Simplificada v1.0

Es otro de los programas que han servido para el ajuste del modelo de Nash (1957) con los datos procedentes de los dos lisímetros. Se trata de una aplicación que analiza parejas de **K** y **n**. Para cada pareja de valores, sintetiza la función de densidad **GAMMA** correspondiente al **HUI**. En este punto realiza una simplificación que consiste en considerar iguales el **HU** y el **HUI**. Esta simplificación es válida siempre que la duración del fenómeno de circulación supere en gran medida a la duración del pulso de riego. A partir de este punto calcula integrando por la regla de Simpson, la función del peso acumulado y calcula el error cuadrático de la diferencia entre los datos sintetizados y los obtenidos de los caudalímetros. Sigue a continuación un algoritmo de búsqueda sistemática de la pareja **K** y **n** que hacen mínimo el error (fig. 56).



Figura 56. Pantalla de trabajo de la aplicación Regresión Simplificada v1.0.

**CAMPOS:**

**ENTRADAS:**

- **K y n:** Sirven para fijar el intervalo de búsqueda.
- **DT:** Duración del pulso de riego.
- **Vol:** Volumen de agua aplicado en litros.
- **Exp e I:** Ajuste de la precisión de la regla e Simpson.
- **DATOS:** Intervalo de datos a ajustar procedentes del lisímetro.
- **FICHERO:** Fichero con los datos del lisímetro.

**SALIDAS:**

- **K Y n:** Dan el valor de estos parámetros una vez finalizado el ajuste.

### 3.4.11. Regresión Completa v1.0

Se trata de la cuarta aplicación desarrollada para estimar los valores óptimos de **K** y **n**. Al igual que **Regresión Simplificada V1.0**, también emplea un algoritmo de regresión por mínimos cuadrados. En este caso se considera que la duración del riego es finita y por la tanto el **HU** hay que obtenerlo por convolución numérica aplicando la regla de Simpson, llegado a este punto para obtener el peso de líquido hay que realizar una nueva integración por trapecios, en este caso, a partir de los datos del fichero generado por la operación anterior. A partir de aquí el protocolo de minimización del error sigue la misma pauta que en la aplicación antes mencionada (fig. 57).



Figura 57. Pantalla de trabajo de la aplicación Regresión Completa v5.0.

### 3.4.12. Subrutinas:

Como se ha comentado estas subrutinas se han implementado aisladamente para análisis puntuales.

#### 3.4.12.1. Gamma v1.0.

Ver Figura 58.

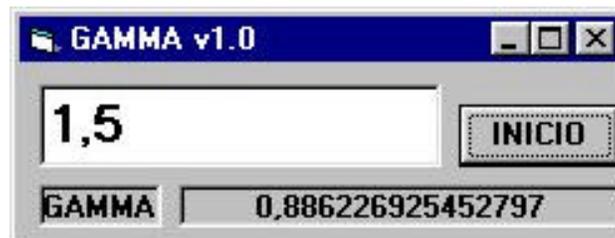


Figura 58. Pantalla de trabajo de la aplicación Gamma v1.0.

**CAMPOS:**

**ENTRADAS:**

- Valor de  $n$ .

**SALIDAS:**

- Gamma: Valor de la función Gamma.

#### 3.4.12.2. Simpson v1.0.



Figura 59. Pantalla de trabajo de la aplicación Simpson v1.0.

Esta aplicación permite el cálculo numérico de la integral definida de la función que se implemente en el procedimiento interno de define la función a ser integrada (fig. 59).

### **3.5. Descripción de los ensayos**

Se ha realizado un único tipo de ensayo encaminado a evaluar el movimiento del agua a través de lisímetros de desagüe.

Las primeras pruebas tuvieron lugar en Octubre de 1999 y se llevaron a cabo en un lisímetro situado en las proximidades del río Guadiamar. El análisis de estos ensayos iniciales, en los que se estudió el drenaje producido por episodios de lluvia, arrojó luz sobre la metodología que se debería seguir en la aplicación de modelos de circulación de flujos basados en Hidrogramas Unitarios Instantáneos y concretamente en el propuesto por Nash (1957).

Los ensayos definitivos se realizaron entre Abril y Julio de 2000 y consistieron en:

1. Activar los registradores de datos de cada caudalímetro para que inicien el almacenamiento de datos a una hora determinada.
2. Aplicar a partir del momento en el que los registradores se activan, un volumen de agua conocido al lisímetro, se ensayaron 28,8 l, 32 l, 48 l y 80 l este último en dos aplicaciones consecutivas.
3. Simultáneamente se realiza la medida del tiempo que el agua permanece sobre la superficie del lisímetro.
4. Cuando la memoria del registrador se ha llenado, (varios días después, dependiendo del intervalo entre muestras) se recogen los datos volcándolos a un P.C. portátil.

La intensidad de riego considerada a efectos de cálculos posteriores, será el cociente entre el volumen de agua aplicado y el tiempo que tarda la lámina de agua en desaparecer de la superficie del lisímetro.

## 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 4.1. Los ensayos de campo

Se ha realizado un total de 12 ensayos en L1 y 6 en L2, los datos más representativos aparecen reflejados en las tablas 6 y 7 y figuras siguientes.

**Tabla 6. Ensayos efectuados en el lisímetro L1.**

Ensayo	Lisím.	Calibr.	Fecha	Inicio	Final	Duración	Vol. (l)	Intervalo (s)	Nº Datos
1	L1	C	19/04/00	15:00:00	15:06:00	6'	28.8	40	6068
2	L1	C	9/05/00	18:59:39	19:08:49	9' 10"	32	40	7851
3	L1		13/05/00	11:05:00	11:16:20	11' 20"	32	40	6340
4	L1		16/05/00	10:50:15	11:01:10	10' 55"	32	40	6368
5	L1		19/05/00	12:49:10	12:59:20	10' 10"	32	40	7940
6	L1		24/05/00	19:20:00	19:31:00	11' 00"	32	40	7940
7	L1		30/05/00	11:45:00	12:01:30	16' 30"	48	40	7940
8	L1		3/06/00	19:51:00	20:09:50	18' 50"	48	40	5644
9	L1	C	6/06/00	11:35:00	11:58:30	23' 30"	48	40	7940
10	L1		19/06/00	20:43:00	20:56:50	13' 50"	48	120	7940
11	L1		8/07/00	21:40:00	21:49:50	9' 50"	40	120	7166
12	L1		11/07/00	9:25:00	9:41:40	21' 40"	40	120	-

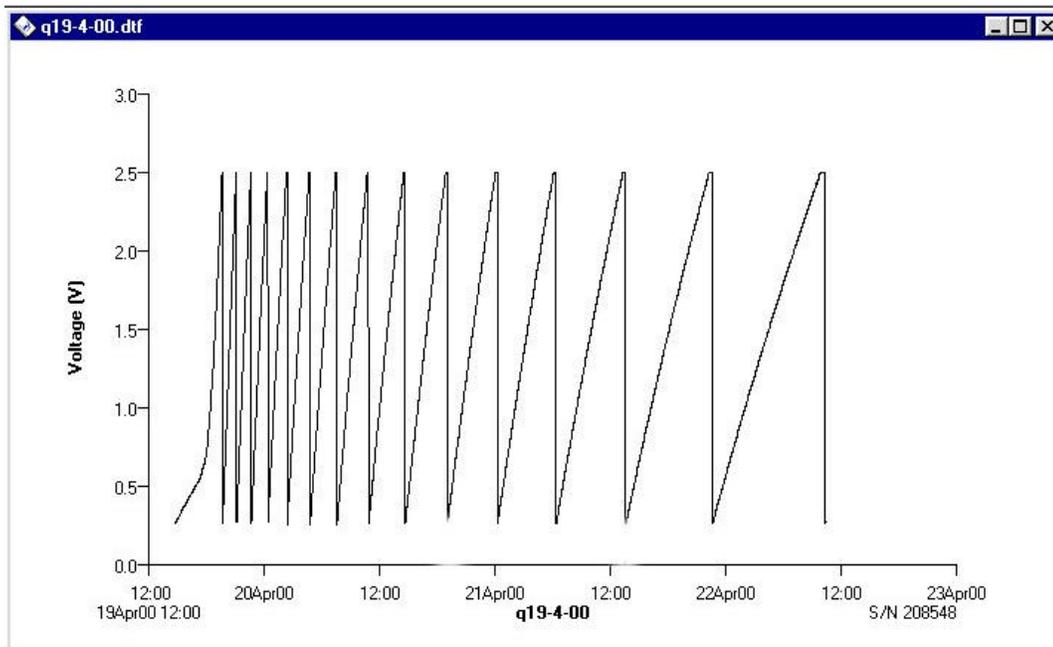
**Tabla 7. Ensayos efectuados en el lisímetro L2.**

Ensayo	Lisím.	Calibr.	Fecha	Inicio	Final	Duración	Vol. (l)	Intervalo (s)	Nº Datos
1	L2	C	20/05/00	10:33:05	10:45:40	12' 35"	32	40	9362
2	L2		24/05/00	19:36:00	19:53:40	17' 40"	32	40	12155
3	L2	C	6/06/00	11:55:00	12:17:10	22' 10"	48	40	28772
4	L2		19/06/00	21:04:00	21:25:00	21' 00"	48	120	12949
5	L2		8/07/00	22:05:00	22:18:30	13' 30"	40	120	5495
6	L2		11/07/00	9:50:00	10:41:20	51' 20"	40	120	-

Las columnas de cada tabla hacen referencia a lo siguiente:

1. Número de orden del ensayo.
2. Lisímetro sobre el que se realizan los ensayos.
3. Calibración del equipo (apéndice 3).
4. Fecha en la que se realizó el ensayo.

5. Hora de inicio del riego.
6. Hora de la que desaparece la lámina de agua de la superficie.
7. Duración de la lámina de agua en superficie (6)-(5).
8. Volumen de agua aplicado (l).
9. Intervalo entre muestras del registrador (s).
10. Número de datos registrados en el ensayo.

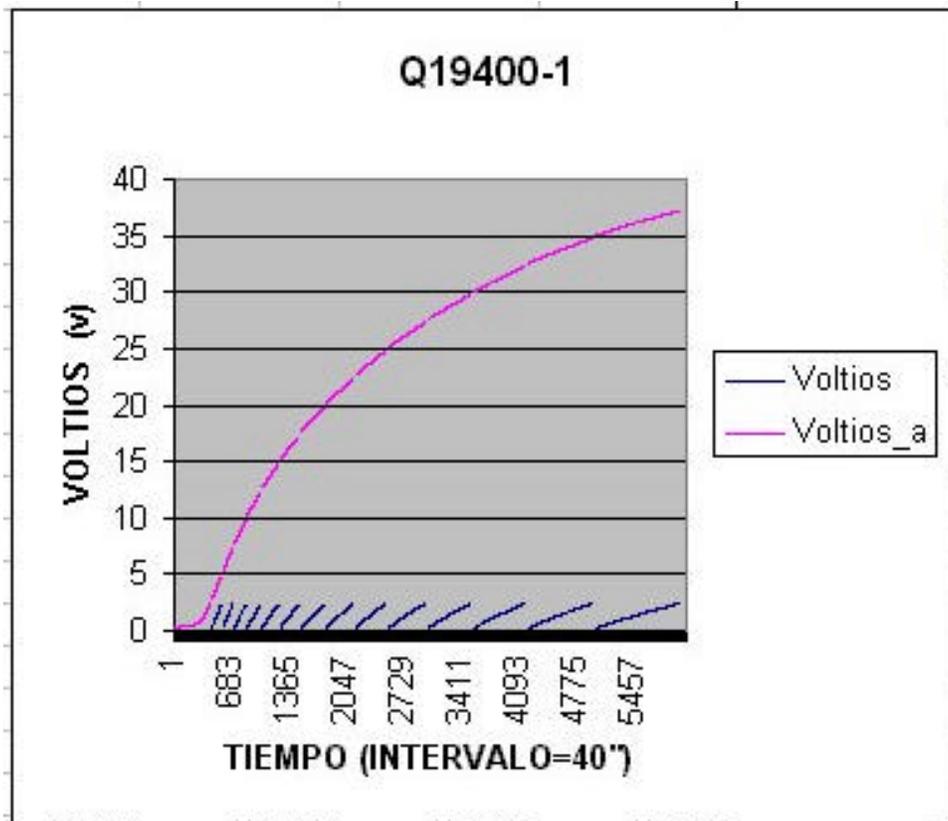


**Figura 60. Salida gráfica del registrador empleando la aplicación BOX-CAR-PRO v3.51 para el ensayo Q19400-1**

En la Figura 60 se puede observar la salida del registrador de datos para el ensayo realizado sobre L1 el 19/4/00. Sobre esta figura se pueden realizar las siguientes apreciaciones:

1. Se observa que inicialmente existe una fase de en la que el volumen que desagua crece con lentitud. Esta zona de la curva está asociada a la fase de recarga de la capa superior del lisímetro Reeder, 1986; Jemison y Fox, 1992; Kung, 1993).

2. Una vez en saturación, se produce un incremento de la velocidad de tránsito por el lisímetro. El depósito de pesada se llena y la válvula de descarga se abre y se vierte el contenido sobre el depósito principal. Esto se aprecia como un descenso brusco en la gráfica y se va repitiendo cada vez que el depósito de pesada se llena.
3. Aunque el riego se termine el lisímetro seguirá desaguando. Se ha llegado a constatar duraciones de hasta 15 días, siendo este aspecto muy importante a la hora de aplicar el modelo de HUI.



**Figura 61. Integración mediante la aplicación Lisímetro v5.0 de la curva de caudal obtenida por el registrador y la aplicación Box Car Pro v3.51.**

La curva de la Figura 61 reconstruye todo el proceso de drenaje, en ella se han eliminado las descargas del depósito usando la aplicación

Lisímetro v5.0. En ordenadas aparece la tensión medida por el registrador y procedente del acondicionador de la célula de carga, en abscisas aparece el número de muestra y el intervalo entre estas.

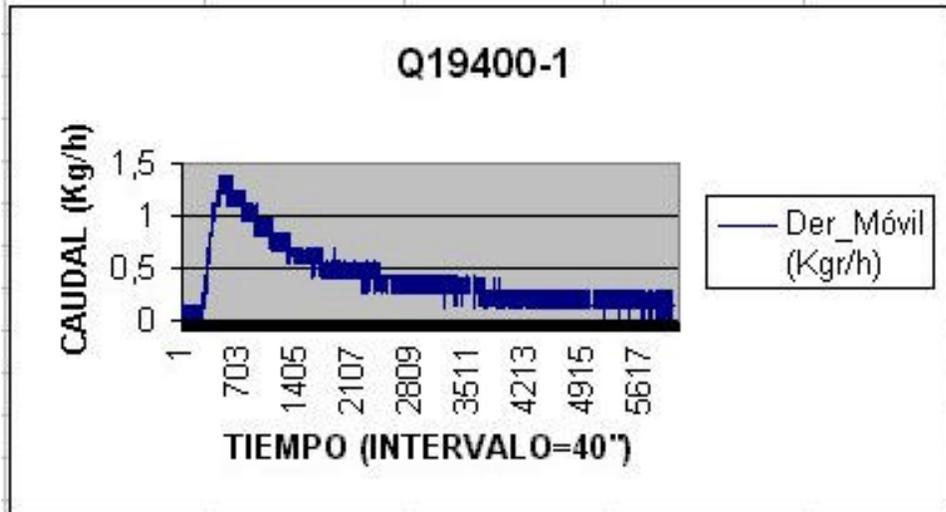


Figura 62. Curva de caudal sintetizada con la aplicación Lisímetro v5.0.

La Figura 62, muestra la curva de caudal. Esta curva se sintetiza igualmente con la aplicación Lisímetro v5.0, apareciendo en ordenadas el caudal másico expresado en  $\text{Kg} \cdot \text{h}^{-1}$  (\*), y en abscisas el número de muestra. Los datos con los que se ha confeccionado esta figura serán empleados para el ajuste por varias vías del modelo de embalses serie de Nash (1957).

Las gráficas del tipo (fig. 61, 62 y 63) correspondientes a todos los ensayos realizados tanto sobre L1 como sobre L2, se han recogido en el apéndice II.

(\*): Para la conversión a  $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$  la superficie de cada lisímetro es la correspondiente al diámetro de 1 m ( $0,785398 \text{ m}^2$ ), se asume que la densidad del líquido percolante es de  $1 \text{ gr} \cdot \text{cm}^3$ .

## 4.2. Discusión de los resultados

### 4.2.1. Validación del modelo de embalses en serie para lisímetros monolíticos

Cuando se inicio el análisis de los primeros ensayos **Q19400-1**, se observó experimentalmente que con un volumen de riego de **28,8 L (36.67 mm)**, la percolación parecía cesar al cabo de unos tres días de la aplicación del riego. Esto llevó a idear un plan de ensayos con esta cadencia y un volumen de agua aplicado de **32 L (40.74 mm)** (**Q13500-1**, **Q16500-1** y **Q19500-1**). Pero posteriormente cuando se pudo emplear la aplicación **LISÍMETRO v5.0 (Q24500-2**, finales de Mayo de 2000), se constató como las curvas de masa de líquido circulada para un intervalo de tiempo de tres días, aún no se volvían asintóticas horizontalmente, ver Figuras **1, 3, 5, 7, 9** y **11** del apéndice II. Para asegurar que esta tendencia era cierta, se realizaron los ensayos **Q30500-1**, **Q3600-1** y **Q6600-1** pero con un volumen de riego mayor concretamente **48 L (61.11 mm)**. El resultado mostró claramente que el proceso de circulación no terminaba en tres días como se había previsto inicialmente, lo que significaba que estábamos frente a un proceso de **convolución** y que cada riego afectaba al siguiente.

Tabla 8. Datos de campo de los ensayos efectuados sobre L1

Ensayo	Nº Datos	Días entre ensayos	Vol de Riego (l)	Peso circulado (Kg)
19/04/00	6071		28,8	29,095
9/05/00	7854	20	32	38,185
13/05/00	6343	4	32	29,1537
16/05/00	6371	3	32	31,0599
19/05/00	7943	3	32	34,327
24/05/00	7943	4	32	31,061
30/05/00	7943	6	48	44,119
3/06/00	5647	4	48	42,652
6/06/00	7943	3	48	48,167
19/06/00	7943	13	48	40,213
8-11/07/00	7166	19	80	83,87

Tabla 9. Datos de campo de los ensayos efectuados sobre L2

Ensayo	Nº Datos	Dias entre ensayos	Vol de Riego (l)	Peso circulado (Kg)
20/05/00	5734		32	12,552
24/05/00	5293	4	32	39,556
6/06/00	28729	13	48	45,697
19/06/00	12943	13	48	39,638
8-11/07/00	5495	19	80	58,7

Esta idea quedó mostrada de forma fehaciente, cuando tras intentar analizar los datos para el ajuste del modelo de **NASH**, se obtuvo una fuerte variabilidad en los parámetros **K** y **n** si cada ensayo se analizaba independientemente de los demás.

Para poder determinar los parámetros **K** y **n** era necesario que le circulación del fluido cesara, por ello el siguiente ensayo se realizó el 19 de Junio de 2000 (**Q19600-1**), observándose que para una lámina de riego de **48 L (61.11 mm)**, el volumen circulado fue de **40,213 L (51.2 mm)** después de **7943** datos con cadencia de **2** minutos entre muestras. Esto vino a demostrar que:

1. El lisímetro debía estar sin circulación de flujo, lo que se conseguía separando los riegos **Q6600-1** → **Q19600-1**: **13** días.
2. Para un tiempo lo suficientemente largo se producía la circulación completa del agua aplicada (**40,213 L (51.2 mm)** en **7940x2/60/24=11,0277** días), ver la columna **6** de la **Tabla 7**.

Los ensayos definitivos que conducirían a la obtención de los parámetros **K** y **n** del modelo de embalse en serie se efectuaron de seguido, obteniéndose un único fichero donde resultaba evidente la convolución ver Figuras 21 y 31, estos ensayos fueron **Q8700-1**,

**Q11700-1, Q8700-2 y Q11700-2.** Dado que el ensayo anterior al **Q8700-1** fue el **Q19600-1** (19 días antes), el proceso de circulación no debía existir, algo que experimentalmente se verificó durante este intervalo al no apreciarse en días anteriores al 8 de Julio de 2000 presencia de líquido almacenado en los depósitos de los caudalímetros.

El primer segmento del ensayo del 8 al 11 de julio sirvió para el ajuste de los modelos.

### **El ajuste del modelo de Nash**

Se han seguido los cuatro métodos expuestos:

1. Metodo simplificado.
2. Regresión simplificada.
3. Regresión completa.
4. Método de los momentos.

De todos ellos el que mejor resultados presentó fue el tercero, dado que tiene presente todo el proceso de la convolución y además realiza un ajuste por mínimos cuadrados. Su única dificultad de uso reside en que es de un coste de cálculo prohibitivo si se desea obtener más de una cifra decimal en los ajustes.

Para mejorar la convergencia se empleó inicialmente el método simplificado pues permitía obtener una aproximación lo suficientemente buena como para reducir notablemente el entorno de búsqueda del segundo método. El segundo método considera que las aplicaciones de riego son de duración puntual. Al igual que el 1ª se uso para acotar la búsqueda del tercer método. La aplicación de este procedimiento mostró ser de gran utilidad para evitar durante el ajuste centrarnos sobre mínimos locales cuando se empleaban retículas de búsqueda amplias.

Finalmente, pese a la rapidez y facilidad de manejo del Método de los Momentos, pues permite el análisis directo de convoluciones con solo conocer el hidrograma de salida y el hietograma de riego, su aplicación se mostró casi ineficaz debido a que una de sus entradas es la curva de caudal y esta para los actuales caudalímetros se obtiene por derivación numérica de los datos procedentes de convertidores de tan sólo 8 bits que hacen que la derivada se anule cada vez que dos puntos consecutivos son de igual valor.

Los resultados obtenidos aparecen en la siguiente tabla resumen.

**Tabla 10. Resultados de los ajustes del modelo de embalses en serie.**

Método	L1			L2		
	K (h <sup>-1</sup> )	n	R <sup>2</sup>	K (h <sup>-1</sup> )	n	R <sup>2</sup>
Método Simplificado	31,955	1,3338	0,9873	31,274	1,45831	0,9865
Regresión Simplificada	32	1,4	0,9888	32	1,4	0,9886
Regresión Completa	31,96	1,33	0,9987	31,28	1,46	0,9986
Método de los Momentos	-	-	-	-	-	-

#### **4.2.2. Comparación entre los dos lisímetros**

Este estudio se basó en comparar los parámetros **K** y **n** una vez estimados. Los ensayos con **L1** se habían iniciado el 19/4/00 y el caudalímetro que se le asignó ya había sido testado previamente durante el año 1999 en un lisímetro situado en la proximidad del río Guadiamar. Por su parte los ensayos con **L2** no se iniciaron hasta el 20 de Mayo de 2000 debido a que hasta esa fecha no se pudo finalizar la construcción del segundo caudalímetro, pudiendo considerarse que los primeros ensayos fueron de test y ajuste del nuevo equipo (**Q20500-2** y **Q24500-2**). Los ensayos paralelos de ambos lisímetros

empezaron a efectuarse a partir del 6/6/00 y en ambos se siguió el mismo protocolo de ensayos.

En la Tabla 9 se muestra que los ajustes obtenidos para ambos lisímetros revelan valores de **K** y **n** muy parecidos, lo que equivale a decir que el comportamiento dinámico de ambos es similar.

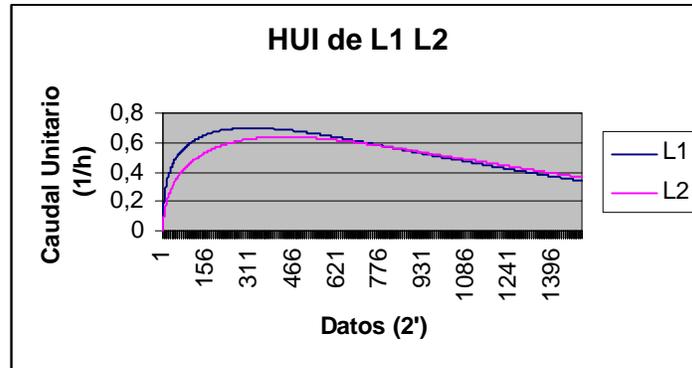


Figura 63. HUI de L1 y L2 obtenidos con la aplicación Regresión Completa v5.0

Como se puede observar en la Figura 63, el momento en el que el caudal en L2 se hace máximo L2 se retrasa respecto a L1. Este retraso observado en el drenaje del lisímetro L2 con respecto al L1 podría estar relacionado con diferencias en la textura del suelo de los dos lisímetros. Cayuela (1996) estudió la variabilidad espacial de la textura del suelo de la parcela en la que se encuentran instalados los lisímetros y encontró que el contenido de arcilla puede variar del 9 % al 17 % en la capa de suelo de 0 a 0.5 m de profundidad, y del 13 % al 19 % en la capa de 0.5 a 1.0 m. Estas diferencias pueden darse en puntos muy próximos entre sí. Por otra parte, Cabrera et al. (1993) realizaron estudios del lavado de nitratos y del movimiento de agua en estos mismos lisímetros y encontraron que el contenido de agua en el perfil de ambos lisímetros era prácticamente igual en la capa de 0-0.5 m. Sin embargo, por debajo de 0.5 m de profundidad el contenido de agua era más elevado en L2 que en L1. Sin duda, esta diferencia en la retención de agua por debajo de 0.5 m de profundidad se debe a que en L2 el contenido de arcilla es mayor que en L1.

### 4.3. Desarrollo de un toma-muestras automatizado

Uno de los objetivos que se han trazado en el presente trabajo es la puesta a punto de un nuevo equipo no solo capaz de cuantificar el volumen de agua que drena para un intervalo de tiempo previamente fijado, sino también de estimar mediante posteriores análisis químicos, la concentración de diferentes sustancias en disolución: cloruros, fosfatos, nitratos, metales pesados, etc.

Para la consecución de este objetivo se ha pensado en el diseño de un equipo que asuma las funciones del registrador comercial y el resto de circuitos con los que cuentan los caudalímetros que se han desarrollado y que a su vez sea capaz de realizar funciones de toma-muestras. Esta última función consistiría en almacenar una pequeña cantidad de lixiviado en un tubo de ensayo cada vez que la válvula de zona se abre, encomendando esta función a un sistema que desplazaría a través de una corredera un grupo de tubos de ensayo mediante la acción de un motor paso a paso unipolar de  $1,8^\circ$  por paso (fig. 78).

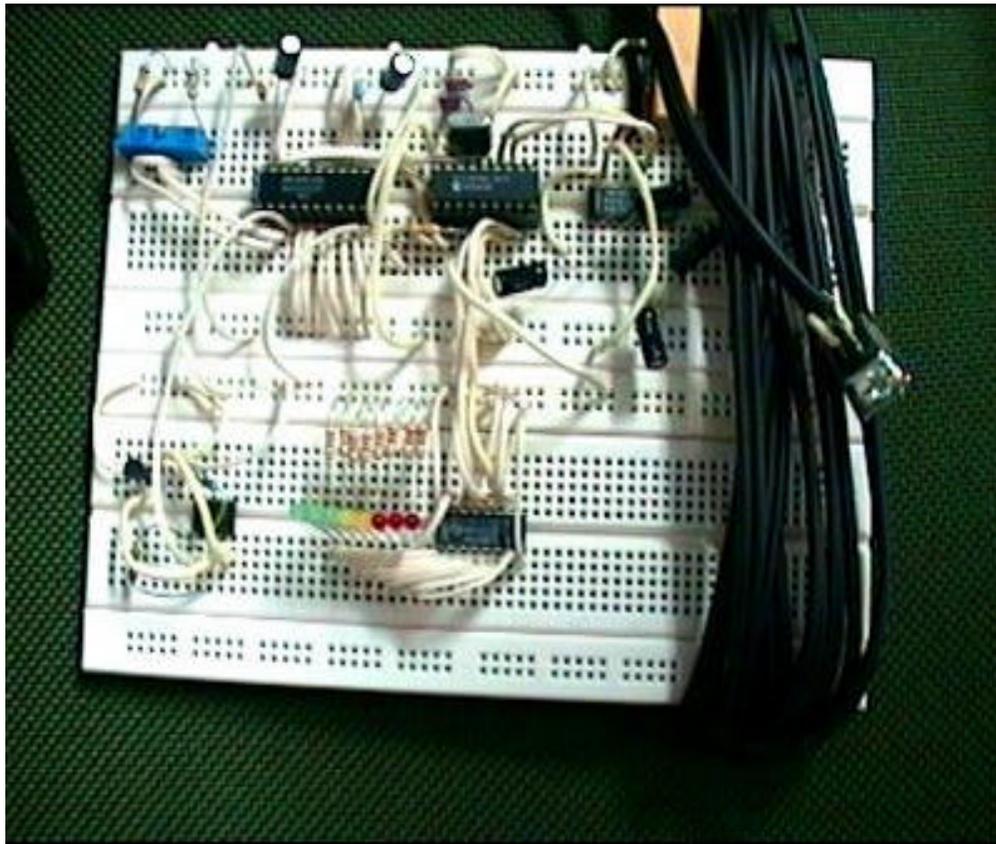
#### 4.3.1. Especificaciones electrónicas del nuevo registrador-controlador

- ✓ 12 Bits de resolución con **MAX-186**.
- ✓ Célula de carga de **5 Kg, 10mV/V**, acondicionada con **INA-114-AP**.
- ✓ **32 Kbytes** de memoria con **24LC256**.
- ✓ Reloj de tiempo real con **HEF-4060** y un **XTAL** de **32,768 KHz**.
- ✓ Conexión serie para **P.C.** a **19200** Baudios con **MAX-232**.
- ✓ Control con microcontrolador **RISC PIC16F84A/20 MHz** con **CLK** a **10 MHz**.
- ✓ Sobremuestreo (oversampling) **X16**.
- ✓ Programa de control en **Visual Basic 5.0**.
- ✓ Número de palabras de **16** bits almacenables: **16 Kpalabras**.

- ✓ Salida digital para la válvula de zona con disparo programable digitalmente vía **P.C.**
- ✓ Salida de impulsos para control del motor paso a paso con driver de potencia **ULN-2003** ó **SAA-1027**.
- ✓ Motor paso a paso monopolar a **6-8 hilos**.
- ✓ Software con funciones equivalentes a las del **HOBO** serie **8** de **ONSET COMPUTER CORPORATION**.

El desarrollo se ha realizado a nivel de prototipo de laboratorio sobre placa de ensayo, se ha programado el microcontrolador y se ha puesto a punto el enlace serie **RS-232-C** con el **P.C.**

Una imagen del prototipo se muestra en la siguiente imagen:



**Foto 10. Protoboard con el prototipo electrónico del toma-muestras**

El software de comunicación se ha puesto a punto en **Visual Basic** y consta de básicamente de dos subrutinas una de lectura del convertidor **LEE( Nº \_CANAL, PUERTO\_SERIE)** y otra de escritura en las salidas **ESCRIBE( Nº \_SALIDA, PUERTO \_SERIE)**. La gestión de la **EEPROM 24LC256** a través de **BUS I<sup>2</sup>C**, el reloj de tiempo real con **HEF-4060**, la comunicación con protocolo **SPI** con el **MAX-186** y finalmente la transferencia de datos al **74HC595** con **BUS** a 4 hilos queda encomendada al microcontrolador y al programa residente que alberga.

El programa de control en VB 5.0 del medidor de concentraciones se ha dividido en cuatro subcarpetas cada una de ellas como una función específica. Los datos extraídos del datalogger quedan directamente almacenados como fichero **ASCII** en el **P.C.**



Figura 64. Pantalla de configuración general de la aplicación Toma-muestras v1.0



Figura 65. Pantalla de configuración del ensayo en la aplicación Toma-muestras v1.0



Figura 66. Pantalla de configuración del motor paso a paso en la aplicación Toma-muestras v1.0



Figura 67. Pantalla de configuración de la válvula de descarga en la aplicación Toma-muestras v1.0

#### 4.3.1.1. Esquema electrónico del toma-muestras

Se presenta a continuación el nuevo diseño electrónico que ha sido testado para el toma-muestras. El circuito completo comprende partes funcionalmente idénticas a las del caudalímetro, concretamente:

1. Acondicionador para la célula de carga.
2. Ondulador para la válvula de descarga.
3. Doblador de tensión para la alimentación general.

El resto del nuevo circuito está realizado en torno a varios componentes:

1. Convertidor **A/D** de **12** bits y **8** canales modelo **MAX186**
2. Microcontrolador **RISC** modelo **PIC16F84A**
3. Eeprom serie **24LC256** de **32** Kbytes.
4. Reloj calendario con **HEF-4060**.
5. Multiplexor digital de salida con *LATCH* **74HC595** (en fase preliminar)
6. Interface de potencia para el motor *PAP* **ULN2003A**
7. Interface **RS-232-A** para comunicaciones serie **MAX232CPD**

#### 4.3.1.1.1. Max-186

El **MAX-186**, es un convertidor serie de aproximaciones sucesivas de *8 canales* multiplexados y **12 bits** de resolución sobre un fondo de escala, que para esta aplicación particular, a sido fijada mediante una referencia interna que posee el propio dispositivo en **4096 mV**, lo que significa que cada paso del convertidor es un milivoltio (foto 11).



Foto 11. Convertidor A/D de aproximaciones sucesivas de 12 bits y 8 canales.

Este dispositivo puede trabajar en modo simple o diferencial y con tensiones positivas referidas a masa o duales. En nuestra aplicación se usa una sola una tensión referida a masa (**4096 mV**), y el modo

simple lo que permite tener los ocho canales como entradas individuales.

La comunicación con el microcontrolador se efectúa a cuatro hilos:

**SCLK**=Reloj serie.

**CS**=Chip Select.

**D\_IN**= Pin de entrada de datos y comandos al **MAX-186**.

**D\_OUT**=Pin de salida de datos serie.

La velocidad de comunicación con el **PIC** no debe ser inferior a **100 Khz** para evitar la degradación de la señal sampleada a la entrada del convertidor.

#### **4.3.1.1.2. 24LC256**

La **24LC256** es una memoria **PROM** serie grabable y borrrable eléctricamente con una capacidad de **32 Kbytes (32Kx8=256 Kbit)**, capaz de trabajar con tensiones de alimentación comprendidas entre los **1.8 V** y los **5.5 V**, sus principales usos residen en comunicación (Teléfonos móviles) y en la adquisición de datos. Dispone de capacidad de grabación por paginado de **64 bytes** y admite el acceso secuencial o aleatorio tanto en lectura como en escritura en toda su extensión. Dado que posee tres líneas de direccionamiento, es posible la conexión simultánea al **Bus I<sup>2</sup>C** de hasta ocho de estos dispositivos permitiendo con ello capacidades de almacenamiento de hasta **2 Mbit**. Esta disponible en formato **DIL** (el que emplearemos) y en formato **SOIC (208 mil)** para aplicaciones en **SMD**. Permite hasta **100.000** ciclos de escritura/borrado, presenta protección electrostática de hasta **4000 V** y retención de datos de **200 años**. El ciclo de grabación es de tan sólo **5 ms** y al estar implementada en tecnología **CMOS** su consumo es de sólo **3 mA a 5.5 V** (fig. 68).

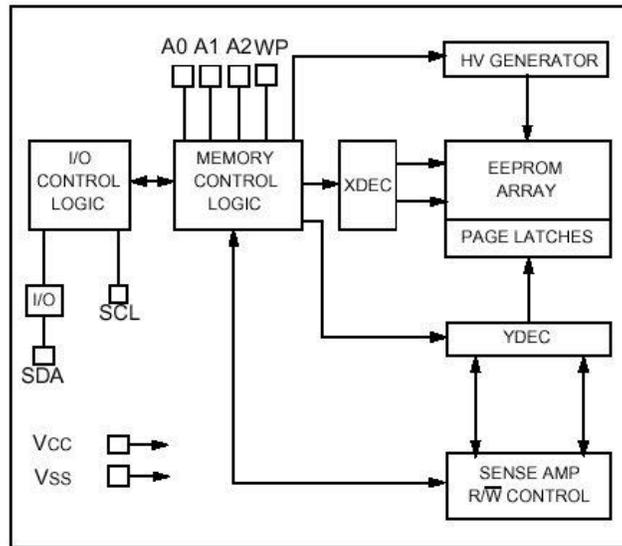


Figura 68. Diagrama de bloques de la estructura interna de la EEPROM 24LC256

#### 4.3.1.1.3. 74HC595A

El **74HC595A** es un registro de desplazamiento con entrada serie de **8 bits**, con registro de salida serie o paralelo y salidas triestado con cerrojo (**LATCH**) (fig. 69).

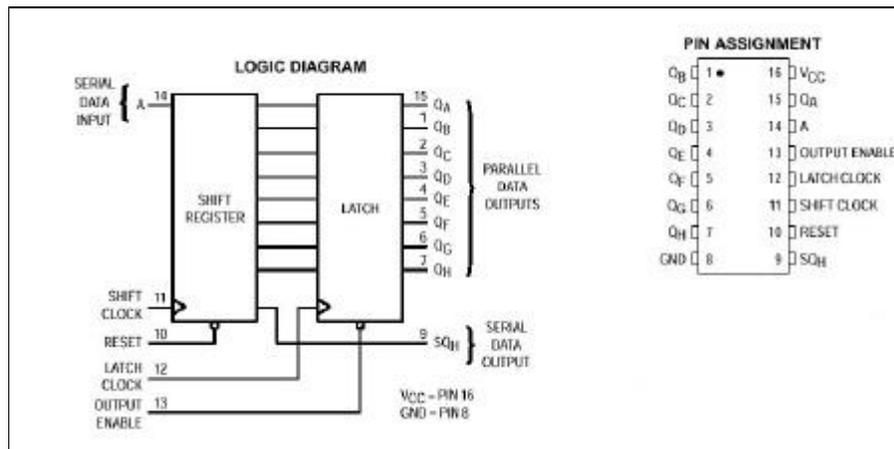


Figura 69. Diagrama lógico y de pines del 74HC595.

La comunicación con el microcontrolador es a 3 hilos:

**S\_CLK= Shift CLK del 74HC595**

**L\_CLK= Latch CLK del 74HC595**

**SDI= Serial Data Input del 74HC595**

Este dispositivo permite una conexión en cascada con otros iguales a él lo que equivale a tener un número indefinido de salidas en múltiplos de ocho. Su empleo quedó justificado en los ensayos iniciales del prototipo.

**4.3.1.1.4. MAX-232-CPD:**

El **MAX-232** es un circuito integrado especializado en la conversión entre niveles **TTL** y **RS-232**. Aunque en principio el microcontrolador empleado permite un uso directo con el puerto serie, la presencia del **MAX-232** en este circuito se justifica al ser un medio óptimo de enviar los datos asegurando una comunicación libre de errores (fig. 70).

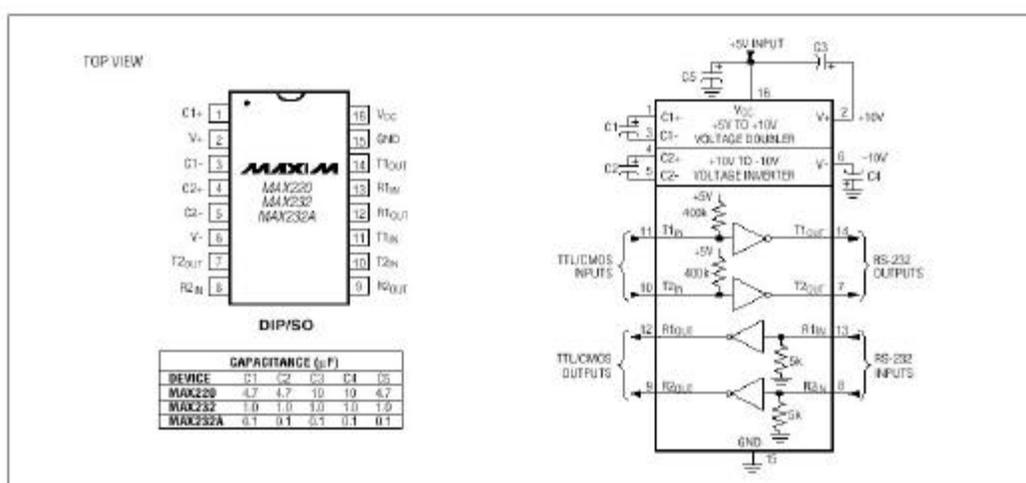


Figura 70. Diagrama de pines e interno del MAX-232A

Emplea un doblador de tensión y un inversor para obtener a partir de niveles **TTL** tensiones en el standad **RS-232-C**.

De las dos entradas–salidas que posee solo empleamos una entrada-salida.

La comunicación se realiza a **19200 baudios**, con ocho bits de datos, sin paridad y con un bit de stop.

#### 4.3.1.1.5. HEF-4060

Para la medida del tiempo vamos a recurrir a un divisor programable con oscilador incorporado modelo **HEF-4060**, y a un cristal de cuarzo de **32.735 KHz** para obtener por división pulsos de reloj de **2 Hz**. El esquema es el que se muestra en la Figura 71. Con esta implementación podremos realizar muestreos con una cadencia mínima de hasta **0,5 segundos**.

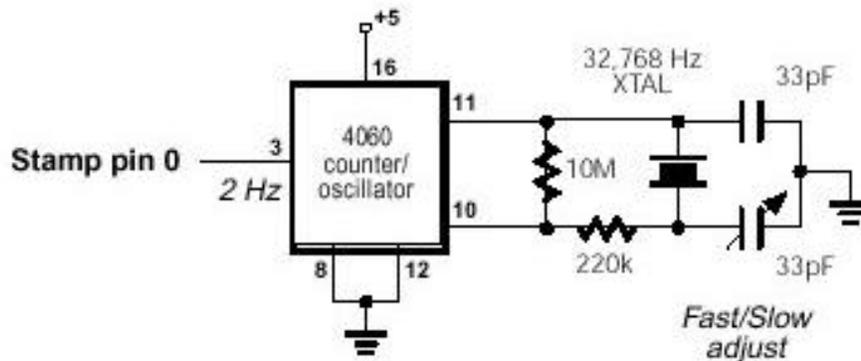


Figura 71. Reloj de tiempo real implementado con un HEF-4060.

Los circuitos implementados con estos componentes se muestran a continuación.

1. Para el muestreo de las entradas tanto analógicas como digitales, vamos a usar exclusivamente las entradas analógicas del convertidor aprovechando así sus 8 canales multiplexados y evitando en consumo de pines de **E/S** del microcontrolador, hay que recordar que este dispositivo que a continuación se describirá solo cuenta con **2** puertos uno de **4+1 pin** (el último a drenador abierto) y un puerto completo de **8 E/S**.

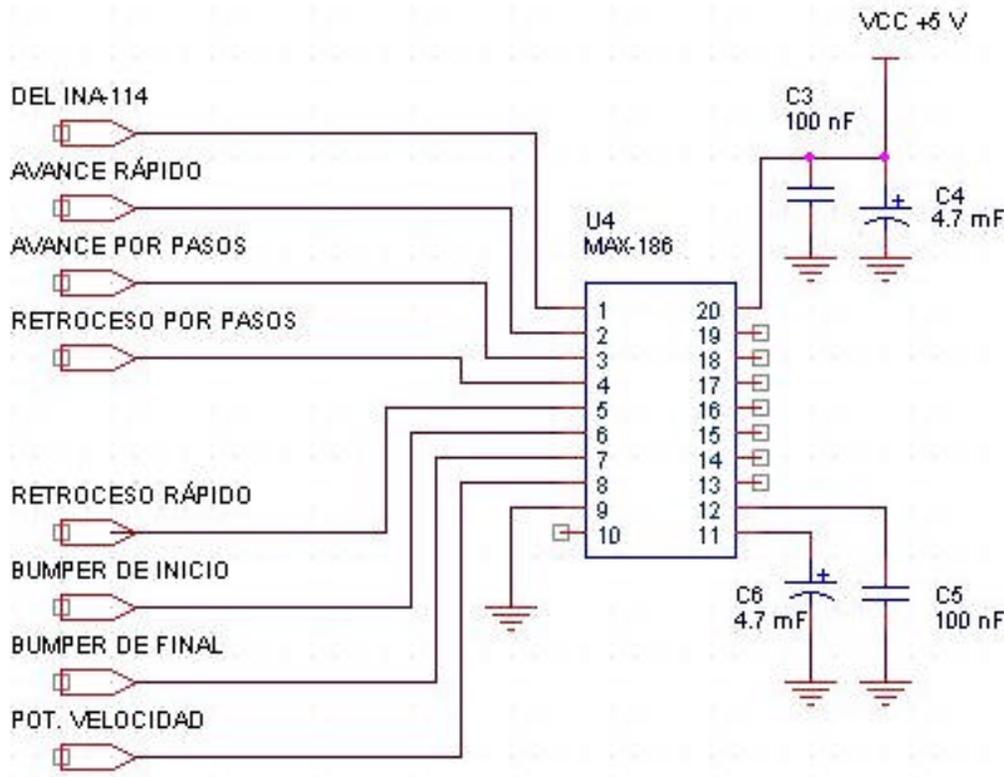


Figura 72. El convertidor MAX-186 y la conexión de sus ocho entradas

El uso de las entradas del **A/D** es el siguiente (fig. 72):

- **CH1:** Entrada de muestreo analógico del amplificador de instrumentación **INA-114-AP**.
- **CH2:** Entrada digital del pulsador para avance rápido del **PAP**.
- **CH3:** Entrada digital del pulsador para el avance paso a paso del **PAP**.

- **CH4:** Entrada digital del pulsador para el retroceso paso a paso del **PAP**.
- **CH5:** Entrada digital del pulsador para retroceso rápido del **PAP**.
- **CH6:** Entrada digital del bumper de inicio de carrera.
- **CH7:** Entrada digital del bumper de final de carrera.
- **CH8:** Entrada analógica del potenciómetro de ajuste de la velocidad del **PAP**.

2. El Microcontrolador **PIC16F84-A** (foto 12), se encarga del control del convertidor **A/D** de acuerdo a un protocolo de comunicación serie a 4 hilos del tipo **QSPI**, las conexiones son las siguientes:

- ◆ **SCLK:** Reloj de comunicación serie.
- ◆ **CS:** Selección del chip.
- ◆ **DIN:** Entrada de datos serie.
- ◆ **DOUT:** Salida de datos serie.

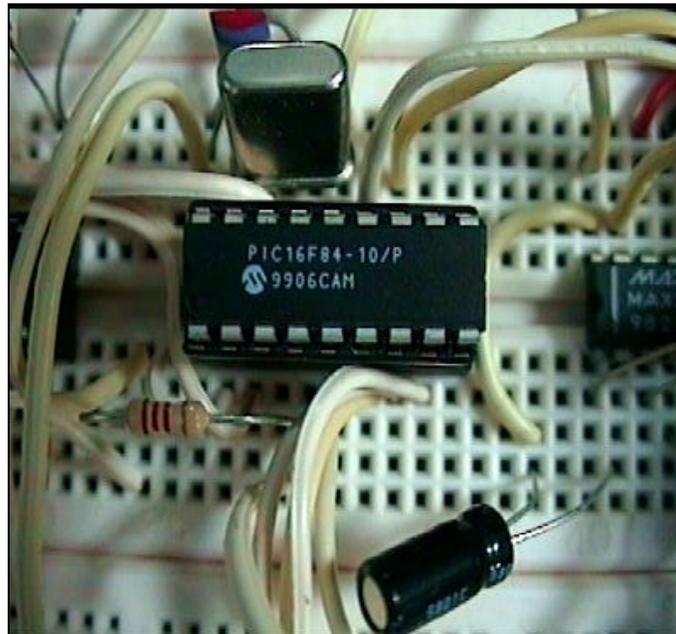


Foto 12. Microcontrolador PIC16-F84/10 en tarjeta de ensayo.



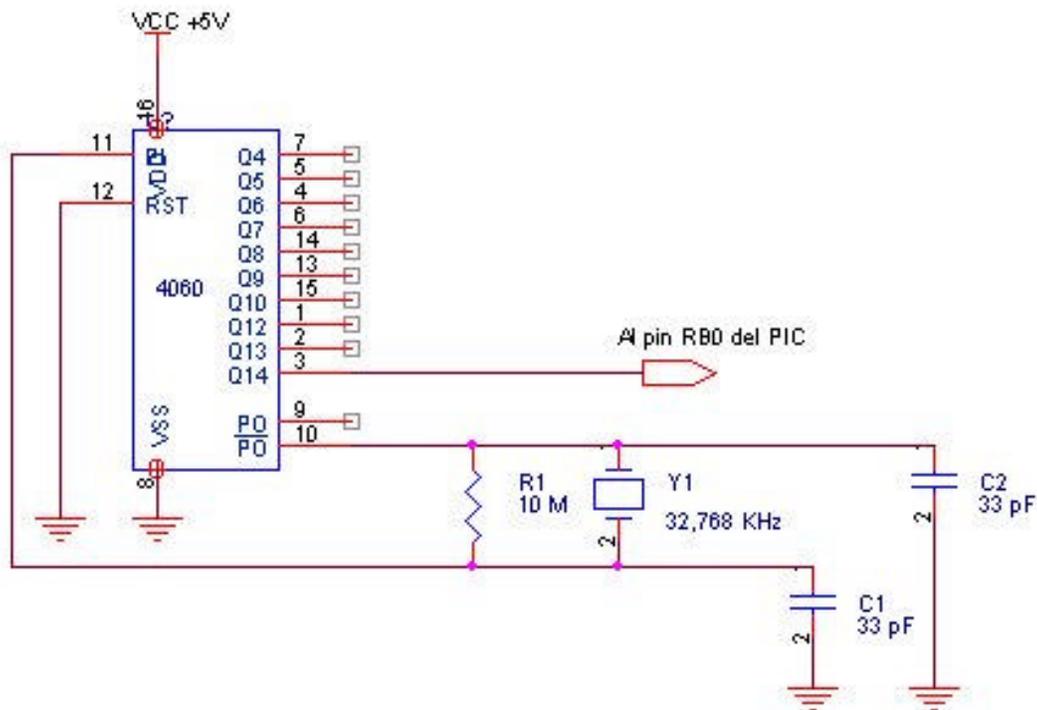


Figura 75. Esquema eléctrico del circuito de Reloj-Calendario con HEF-4060.

5. El Multiplexor con Latch modelo **74HC595** se empleó en principio para, mediante una comunicación serie a tres hilos, tener un número cualquiera de salidas en múltiplos de **8**. En la configuración definitiva del circuito quedará excluido. Su diagrama de bloques se ha mostrado en la Figura 69.
  
6. El controlador del motor **PAP** se ha construido en torno a un driver de potencia modelo **ULN2003A**. Tal como se describe en el apéndice 4, si se va a emplear este circuito integrado es necesario reservar **4** pines de salida del Microcontrolador algo complicado en nuestro caso debido a que el modelo **PIC16F84** solo dispone de **13** pines y todos ellos son empleados para el control del resto de periféricos.

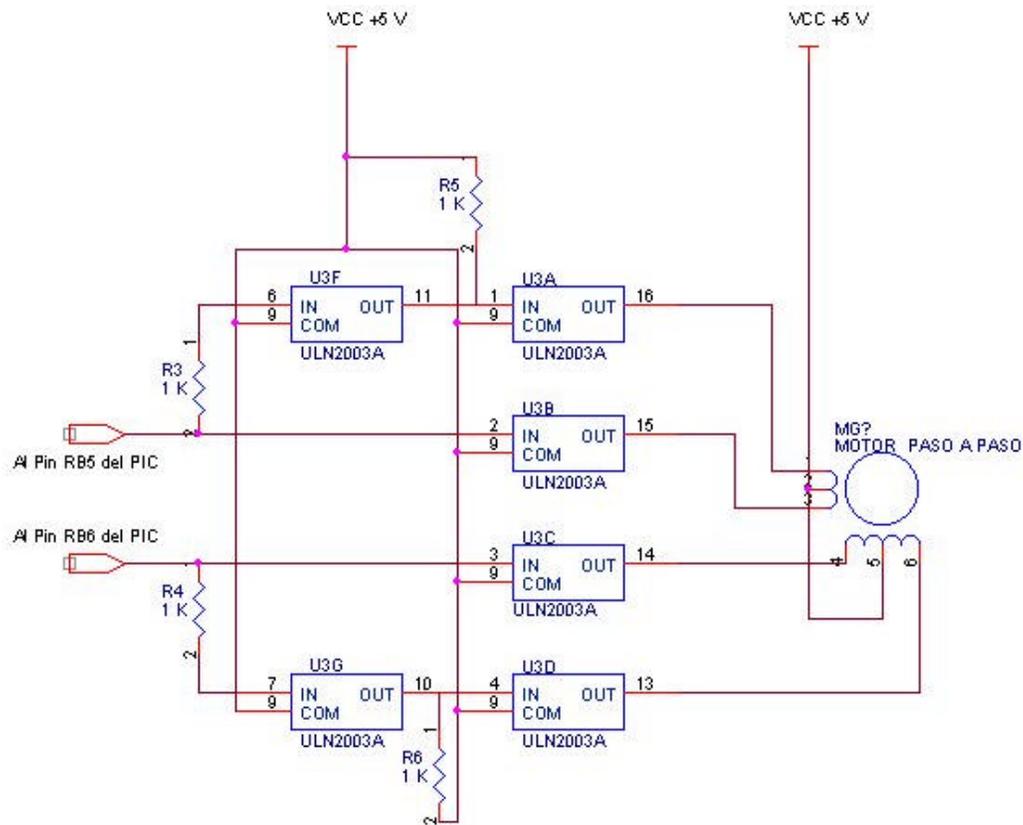


Figura 76. Esquema eléctrico del control del motor paso a paso con un ULN2003 y dos pines del PIC16F84

Es por ello que se ha ideado un control basado en la estructura de la secuencia de control mostrada en las Figuras 142 y 143 (apéndice 4), en la que como se puede apreciar, existen dos salidas que siempre son la negación lógica de las dos restantes. Apoyándonos en esta consideración es posible generar la secuencia de activación de dos de los bobinados (los que tienen una secuencia diferente) a partir de dos pines del **PIC** y de los dos restantes realizar el control mediante una inversión lógica de las señales de control de los dos anteriores. Para esto último emplearemos dos de los driver's del **ULN2003A** que como se puede apreciar en la Figura 138 (apéndice 4), tiene una configuración inversora.

7. El circuito destinado a la comunicación serie con protocolo **RS232-C**, es el **MAX232**, su conexión al microcontrolador se realiza a través de dos pines y el esquema eléctrico aparece en la Figura 73.

#### 4.3.2. Subrutinas de control desarrolladas en Visual Basic 5.0

A continuación se describe las 2 subrutinas de enlace serie **RS-232-C** que constituyen el núcleo fundamental del software de control.

**LEE (Nº\_CANAL, Nº\_PUERTO)**

**ESCRIBE (Nº\_SALIDA, Nº\_PUERTO)**



Figura 77. Pantalla de trabajo de la aplicación PIX113b

El código del  $\mu\text{C}$  (microcontrolador), ha sido programado en **ASM** mediante el ensamblador **MPASM** y reconoce una serie de “**TOKENS**” enviados vía serie desde el ordenador con un programa de control escrito en **Visual Basic 5.0**, concretamente:

**E**=Escribe en las salidas de los actuadores a través del registro serie y el latch **74HC595**.

**L**=Lee el convertidor (**MAX-186**), para lo cual hay que enviar el número de canal a leer: **0-7**.

El programa que se ha empleado para grabar la memoria de programa y de datos del microcontrolador es el **PIX113b** (fig. 77).

El grabador empleado es para puerto serie y es compatible con la gama baja y media de los microcontroladores de **ARIZONA MICROCHIP** (foto 13).



**Foto 13. Imagen del grabador serie para microcontroladores PIC.**

Las subrutinas de enlace en **Visual Basic** son las siguientes:

#### 4.3.2.1. Subrutina de escritura en las salidas

Private Sub Escribe(Dato%, puerto%)

'Nº de Puerto

MSComm1.CommPort = puerto%

'Configuración del Puerto

MSComm1.Settings = "19200,n,8,1"

'Longitud de cada caracter= 1 byte

MSComm1.InputLen = 1

'Abrir el Puerto

MSComm1.PortOpen = True

'Orden de escritura de datos

'en las salidas, letra E

C\$ = Chr(&H45)

'Print C\$

MSComm1.Output = C\$

'Dato a escribir

C\$ = Chr(Dato%)

'Print C\$

MSComm1.Output = C\$

'Cerrar el puerto

MSComm1.PortOpen = False

End Sub

#### 4.3.2.2. Subrutina de lectura del Max-186

Private Function Lee(canal%, puerto%) As Double

'Nº de Puerto

MSComm1.CommPort = puerto%

'Configuración del Puerto

MSComm1.Settings = "19200,n,8,1"

'Longitud de cada caracter= 1 byte

MSComm1.InputLen = 1

'Abrir el Puerto

MSComm1.PortOpen = True

Select Case canal%

Case 0

v\_canal% = &H30

Case 1

v\_canal% = &H34

Case 2

v\_canal% = &H31

Case 3

v\_canal% = &H35

Case 4

v\_canal% = &H32

Case 5

v\_canal% = &H36

Case 6

v\_canal% = &H33

Case 7

v\_canal% = &H37

Case Else

GoTo fin

End Select

```
'Orden de conversión usamos el caracter L
C$ = Chr(&H4C)
MSComm1.Output = C$
```

```
'Canal leído
C$ = Chr(v_canal%)
MSComm1.Output = C$
```

```
'Esperamos a tener los 4 bytes
'el buffer de recepción
Do
DoEvents
Loop Until MSComm1.InBufferCount >= 4
```

```
Valor# = 0
'Leemos los 4 datos
H% = Asc(MSComm1.Input)
H1% = Asc(MSComm1.Input)
L% = Asc(MSComm1.Input)
L1% = Asc(MSComm1.Input)
If H1% = 1 Then H% = 0
If L1% = 1 Then L% = 0
```

```
'PARA UNA SONDA STANDARD O-5V
'Valor# = 100 / 4095 * ((16 * H%) + (L% / 16))
'Lee# = Int(10 * Valor#) / 10
```

```
'PARA UNA SENSOR ACONDICIONADO G=11
Valor# = ((16 * H%) + (L% / 16)) / 110
Lee# = Int(100 * Valor#) / 100
fin:
'Cerrar el puerto
MSComm1.PortOpen = False
```

```
End Function
```

### 4.3.2.3. Rutina de enlace para puerto serie con protocolo RS-232-C del PIC16F84

El microcontrolador empleado no dispone de puerto serie implementado por hardware, por ello es necesario el desarrollo de una rutina capaz de realizar vía software este protocolo de comunicación. Esta librería se ha creado para ser enlazada con el programa principal que gestionará el toma-muestras. Se trata de **RS232-C.INC** y aparece a continuación:

```

;*****
*
;
;           RS232-C.INC
;
;Sevilla 16 de Mayo de 2000
;Rutina diseñada para los dispositivos 16cxx que transmiten o reciben
;caracteres en serie. El programa principal que hace uso de estas rutinas tiene
que
;cargar las siguientes variables:
;
;CLKIN:           Frecuencia del oscilador expresada en ciclos/segundo
;BAUDIOS: Frecuencia a la que se desea comunicar
;T_MODO: Modo de transmisión, a "1" se transmite primero el bit LSB, a "0" el
MSB
;R_MODO: Modo de recepción, a "1" se recibe primero el bit LSB, a "0" el MSB
;T_Nbit: Número de bits a transmitir, 7 u 8
;R_Nbit: Número de bits a recibir, 7 u 8
;Sbit:           Número de bits de stop, 1 o 2
;
;
CLKOUT      equ    CLKIN >> 2      ;Calcula duración del ciclo máquina
DELAY       equ    ((CLKOUT/BAUDIOS)/3)-.5      ;Calcula la duración del
bit
DELAY_L     equ    low  DELAY      ;Calcula la parte baja de DELAY
DELAY_H     equ    high DELAY+1    ;Calcula la parte alta de DELAY
DELAY_START equ    (DELAY/2)+DELAY      ;Calcula duración del bit de
inicio
DELAY_START_L equ    low DELAY_START      ;Calcula parte baja de
DELAY_START
DELAY_START_H equ    high DELAY_START+1    ;Calcula parte alta de
DELAY_START

          CBLOCK Rs232_var      ;Reserva de memoria. Inicio de las variables
          Rxdreg                ;Registro de recepción
          Txdreg                ;Registro de transmisión
          Cont                   ;Contador de bits transmitidos

```

```

Dlycnt_l          ;Contador de delay parte baja
Dlycnt_h          ;Contador de delay parte alta
ENDC

#define           Txd_pinPORTB,4           ;Línea de transmisión
#define           Rxd_pinPORTB,5           ;Línea de recepción

;*****
****
;RxD: Rutina de recepción. Trás detectar el bit de inicio, espera recibirse una
;palabra de 7 u 8 bits según la variable R_Nbit. Se recibe primero el bit de
más peso
;o el de menos peso según la variable R_MODO

RxD              clr   Rxdreg              ;Borrar registro receptor
RxD_1            clrwdt                     ;Refresco del WDT
                btfsc Rxd_pin
                goto  RxD_1                ;Espera el bit de inicio ("0")
                call  Delay_ini             ;Tiempo de retraso del bit de inicio (1.5 del
resto                                                    ;de los bits)

                IF    R_Nbit == 8
                movlw 8                    ;8 bits de datos
                ELSE
                movlw 7                    ;7 bits de datos
                ENDIF

                movwf Cont
RxD_next        bcf   STATUS,C
                IF    R_MODO == 1
                rrf   Rxdreg,F              ;Recibir primero el bit de menos peso
                ELSE
                rlf   Rxdreg,F              ;Recibir primero el bit de más peso
                ENDIF

                btfsc Rxd_pin              ;Chequea bit de entrada y mira si es "1"
                IF    R_MODO == 1
                IF    R_Nbit == 8
                bsf   Rxdreg,7              ;Activa bit 7 de Rxdreg si n°bits=8 y 1° bit
LSB
                ELSE
                bsf   Rxdreg,6              ;Activa bit 6 de Rxdreg si n°bits=7 y 1° bit
LSB
                ENDIF
                ELSE
                bsf   Rxdreg,0              ;Activa bit 0 de Rxdreg si 1° el bit MSB
                ENDIF

                call  Delay_bit              ;Espera entre bits

```

```

    decfsz Cont,F          ;Decrementa contador de nº de bits
    goto RxD_next
    call Delay_bit
    IF Sbit == 2
    call Delay_bit
    ENDIF                ;Espera 1 o 2 bits de stop

    return

;*****
;TxD: Rutina de transmisión. Trás el bit de inicio se transmite la palabra
contenida
;en el registro transmisor Txdreg seguido de uno o dos bits de stop según la
variable
;Sbit

TxD
    IF T_Nbit == 8
    movlw 8                ;Transmisión de palabras de 8 bits
    ELSE
    movlw 7                ;Transmisión de palabras de 7 bits
    ENDIF
    movwf Cont

    IF T_MODO == 1        ;Si se transmite 1º el LSB y la palabra es de
    ELSE                  ;7 bits, el registro transmisor se desplaza
    IF T_Nbit == 8        ;una posición a la izquierda para descartar
    ELSE                  ;el 8º bit
    rlf Txdreg,F
    ENDIF
    ENDIF

    bcf Txd_pin          ;Transmite el bit de inicio
    call Delay_bit

TxD_next bcf STATUS,C
    IF T_MODO == 1
    rrf Txdreg,F          ;Desplazamiento a dcha si 1º es el bit LSB
    ELSE
    rlf Txdreg,F          ;Desplazamiento a izda. si 1º es el bit MSB
    ENDIF

    btfsc STATUS,C
    bsf Txd_pin          ;Si el carry es uno, se transmite un "1"
    btfss STATUS,C
    bcf Txd_pin          ;Si el carry es cero se transmite un "0"
    call Delay_bit
    decfsz Cont,F        ;Decrementa contador de bits
    goto TxD_next

```

```

    bsf    Txd_pin      ;Transmite un bit de stop
    call   Delay_bit

    IF     Sbit == 2
    bsf    Txd_pin      ;Transmite segundo bit de stop si Sbit=2
    call   Delay_bit
    ENDIF

    return

;*****
;*****
;Delay_bit:      Rutina de temporización para los intervalos entre bit y bit

Delay_bit clrwdt
            movlw  DELAY_H
            movwf  Dlycnt_h
Delay_bit_1  movlw  DELAY_L
            movwf  Dlycnt_l
Delay_bit_2  decfsz Dlycnt_l,F
            goto   Delay_bit_2
            decfsz Dlycnt_h,F
            goto   Delay_bit_1
            return

;*****
;*****
;Delay_ini:      Rutina de temporización para el bit de inicio en el modo de
recepción. Esta
;temporización es de 1.5 con respecto a la del resto de bits. Así se consigue
que el
;muestreo sea aproximadamente en el centro de cada bit recibido.

Delay_ini clrwdt
            movlw  DELAY_START_H
            movwf  Dlycnt_h
Delay_ini_1  movlw  DELAY_START_L
            movwf  Dlycnt_l
Delay_ini_2  decfsz Dlycnt_l,F
            goto   Delay_ini_2
            decfsz Dlycnt_h,F
            goto   Delay_ini_1
            return

```

### 4.3.3. Prototipo mecánico del toma-muestras

La mecánica del toma-muestras no se ha realizado, pero si se propone un esquema de las partes que deberá incluir para ser compatible con el hardware electrónico y software que se han desarrollado. El esquema aparece en la Figura 78.

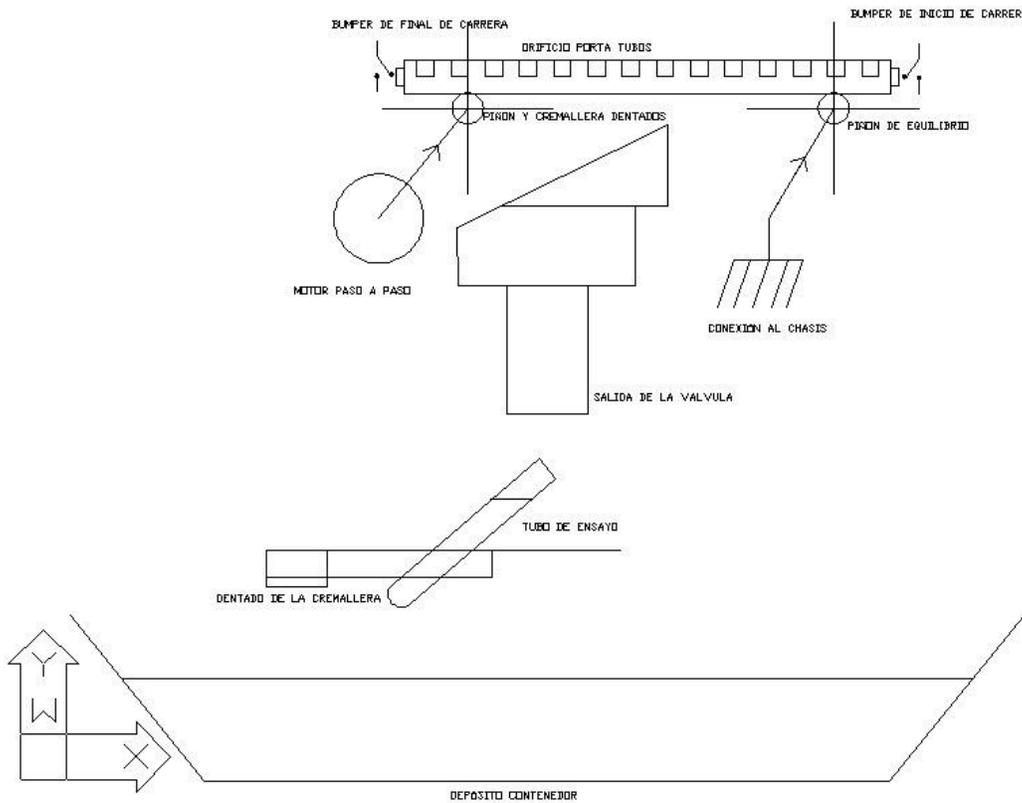


Figura 78. Esquema de la mecánica del toma-muestras automatizado

## 5. CONCLUSIONES

## 5.1. Conclusiones

1. El diseño y desarrollo de un equipo para el registro continuo del drenaje en lisímetros de tipo monolito permite la obtención de los hidrogramas de drenaje correspondientes después de un episodio de lluvia o riego. Asimismo, se ha diseñado y desarrollado otro equipo para la toma de muestras del agua de drenaje para el análisis de la concentración de solutos. Este equipo permite la programación de la frecuencia de toma de muestras durante el periodo de tiempo que dura el drenaje.
2. El caudalímetro gravimétrico, para la medida del drenaje en lisímetros de tipo monolito, ha demostrado ser adecuado para la realización de los ensayos de campo, resultando de gran versatilidad y facilidad en la programación y recogida de datos. Ello permite obtener una información completa sobre las características del drenaje en los estudios que se realicen con este tipo de lisímetros.
3. Se ha particularizado el método del HUI a través del modelo de embalses en serie de Nash (1957) para su utilización en lisímetros de tipo monolito, con suelo no alterado, lo que permite conocer a priori el comportamiento del sistema suelo-agua y el drenaje que tiene lugar durante lluvias o riegos.
4. El estudio comparativo del comportamiento de dos lisímetros, con protocolos de la aplicación del riego idénticos, ha demostrado, a través de la caracterización del HUI, que ambos tiene un comportamiento similar como cabría esperar dada su proximidad e idéntica construcción.
5. El software desarrollado específicamente para los equipos diseñados y construidos en este trabajo, así como el adaptado de otros autores permite un fácil y rápido procesado de la información y por tanto de la caracterización del drenaje y del sistema suelo-agua en los lisímetros.

6. Del análisis de los datos obtenidos en los experimentos con los lisímetros se ha extraído una información muy valiosa que ha servido de base para el diseño y desarrollo definitivo del equipo de toma de muestras automático de muestras de agua de drenaje. Con ello se han podido mejorar las condiciones del equipo:

- a) Resolución del convertidor a 12 Bits.
- b) Memoria de almacenamiento más amplia: 32 Kb
- c) Control digital del motor paso a paso y de la válvula de zona.
- d) Panel de control en el equipo y por software.

7. Aunque en este trabajo nos hemos centrado en el modelo de Nash (1957) para analizar la bondad del equipo y caracterizar el drenaje y el sistema suelo-agua, mediante las aplicaciones de regresión que se han desarrollado, es posible, mediante ligeras modificaciones, emplear cualquier otro modelo conceptual con la ventaja de que el ajuste se efectúa sobre la curva de volumen acumulado y no sobre la de caudal.

8. Que la aplicación del modelo de Nash (1957) para la caracterización de la función de transferencia de un lisímetro requiere un protocolo de ensayo:

- a) Para el ajuste de los parámetros  $K$  y  $n$ , el lisímetro no debe estar drenando agua de un riego anterior, pues al aplicar una nueva cantidad de agua se obtendría una convolución que falsearía la estimación de los mencionados parámetros.
- b) El intervalo entre riegos, para el caso del suelo de nuestros lisímetros, no debe ser inferior a 15 días.
- c) El volumen de agua aplicado que proporcionó los mejores resultados está en torno a los 40 L.

9. En lo que se refiere al software aplicado, hay que indicar que la aplicación que mejores resultados proporcionó fue la regresión no

lineal completa, sirviendo el resto de métodos para reducir el intervalo de análisis de los parámetros.

10. El Método de los Momentos no fue de aplicación, dadas las pobres características de la derivada numérica que se obtuvo de los convertidores de 8 bits alojados en los registradores de los caudalímetros.
11. El uso de un equipo electrónico, de las características del desarrollado en este trabajo, en lisímetros de construcción rápida permitirá generar una base de datos de las características del drenaje en suelos de diferentes tipos.

## 6. BIBLIOGRAFÍA

Abbaspour, K.C., A.A. Sonnleitner, and R. Schulin. 1999. Uncertainty in Estimation of Soil Hydraulic Parameters by Inverse Modeling: Example Lysimeter Experiment. *Soil Sci. Am. J.* 63:501-509.

Addiscott, T.M. (1990). Measurement of nitrate leaching: a review of methods. *Nitrate-Agriculture-Eau. Int. Symp. Proc. INRA. Paris-La Défense.* 157-169.

Agüera, J. 1986. Diseño y aplicación de un penetrómetro registrador de precisión para la determinación de la compactación en suelos agrícolas. Tesis Doctoral. E.T.S.I.A. Univ. de Córdoba.

Agüera, J., Cubero, A., SanMiguel, E. Salas, L. 1992. Microprocesador para la optimización del Punto de Funcionamiento del Motor de un Tractor Trabajando en Campo. XXIV CIMA. Zaragoza.

Ahmad N., R.S. Kanwar. 1991. Effect of Different Moisture Stress Levels on Corn Growth in Field Lysimeters. *American Society of Agricultural Engineers.* 34:1991-1995.

Allen R.G., D.K. Fisher. 1990. Low-Cost Electronic Weighing Lysimeters. *American Society of Agricultural Engineers.* 33:1823-1833.

Angulo, J.M., S. Romero, I. Angulo. 1999. *Microrobótica.* Pp.: 208-225. Ed. Paraninfo.

Ayuso, J.L. 1990. *Circulación de Flujos.* Servicio de publicaciones. E.T.S.I.A.M. Univ. Córdoba.

Barber, G.C., and K.W. Brown. 1986. Comparison between suction and free drainage soil solution samplers. *Soil Sci.* 141:149-154.

Barfield, B.J., and M.C. Hirschi. 1986. Tipping bucket flow measurements on erosion plots. *Trans. ASAE,* 29:1600-1604.

Bergstrom, L. 1990. Leaching of chlorsulfuron and metsulfuron methyl in three Swedish soils measured in field lysimeters. *J. Environ. Qual.* 19:701-706.

Bergstrom, L., and R. Johansson. 1991. Leaching of nitrate from monolith lysimeter of different types of agricultural soils. *J. Environ. Qual.* 20:801-807.

- Black, T.A., G.W. Thurtell and C.B. Tanner. 1968. Hydraulic load cell lysimeter, construction, calibration, test. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 32:623-629.
- Boll, J., T.S. Steenhuis, B.M. Nijssen, and E.S. Ochs. 1990. Fiberglass wicks for sampling water and solutes from the unsaturated zone. *Pap.* 90-2551. ASAE, St. Joseph, MI.
- Bonta, J.V. 1998. Modified Drop-Box Weir for Monitoring Flows from Erosion Plots and Small Watersheds. *Trans. ASAE.* 41:565-573.
- Brye, K.R., J.M. Norman, L.G. Bundy, and S.T. Gower. 1999. An equilibrium Tension Lysimeter for Measuring Drainage through Soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 63:536-543.
- Cabrera, F., A. Reyes, E. Fernández-Boy, J.A. Cayuela, J.M. Murillo, F. Moreno (1993). Losses of nitrate from a sandy loam soil under corn lysimeter experiment. *Acta Horticulturæ*, 335: 59-64.
- Cayuela, J.A. (1996). Movimiento de agua y lixiviación de nitratos en un suelo bajo monocultivo de maíz. Tesis Doctoral. E.T.S.I.A.M. Universidad de Córdoba.
- Colman, E.A. (1946). A laboratory study of lysimeter drainage under controlled soil moisture tension. *Soil Sci.* 62:365-382.
- Cornish, K.A. and G.C. Green. 1992. An Economical recording tipping-bucket rain gauge. *Agric. Meteorol.*, 26:247-253.
- Creus, A. 1983. Transductores y medidores electrónicos. pp. 78-93. Ed. Marcombo.
- Cubero A.J. 1986. Desarrollo de un Equipo de Toma y Registro de Datos para la Determinación de la Eficiencia de Operación de Tractores y Maquinaria Agrícola en Campo. Tesis Doctoral. E.T.S.I.A. Universidad de Córdoba.
- Dalton, J. (1802). Experimental observations to determine whether the quantity of rain and dew is equal to the quantity of water carried off by rivers and raised by evaporation; with an inquiry into the origin of springs. *Mem, Literary and Philosoph. Soc. Manchester* 5 II:346-372.
- Dolan, P.W., B. Lowery, K.J. Fermanich, N.C. Wollenhaupt, and K. McSweeney, 1993. Nitrogen placement and leaching in a ridge-tillage system. P. 176-183. In *Conference Proceedings on Agricultural Research*

to Protect Water Quality. 21-24 Feb. 1993. Minneapolis, MN. Soil Water Conserv. Soc. Ankeny, IA.

Frankling, G., J.D. Powell and A. Emami. 1991. Control de Sistemas Dinámicos con Retroalimentación. Ed. Addison-Wesley.

Gamble, B.F., Y. Eckstein and W.M. Edwards. 1990. Evaluation of Soil Water Residence Time in a Monolith Lysimeter from the Application of queueing disciplines to water budget data (Demonstration-II). Journal of Hidrology, 113:27-49.

Gil, J., J. Agüera, L. Salas, A. Cubero, J. López, J. Fuentes. 1992. Análisis de la Maquinaria en Distintos Sistemas de Manejo de Suelo y Residuos. XXIII CIMA. Zaragoza.

Gil, J., J. Agüera, L. Salas, A. Cubero. 1991. Ensayo en campo de las Operaciones Mecanizadas de Labranza y Siembra. XXIII CIMA. Zaragoza.

Grossman, J., and P. Udluft. 1991. The extraction of soil water by the suction-cup method: A review. J. Soil Sci. 42:83-93.

Haines, B.L., J.B. Waide, and R.L. Todd. 1982. Soil solution nutrient concentrations sampled with tension and zero-tension lysimeters: Report of discrepancies. Soil Sci. Soc. Am. J. 46:658-661.

Haines, B.L., Waide, J.B. and Todd, FR.L. (1982). Soil solution nutrient concentrations sampled with tension and non-tension lysimeters: report of discrepancies. Soil Sci. Soc. Am. J. 46:658-661.

Hanks, R.J. and R.W. Shawcroft. 1965. An economical lysimeter for evapotranspiration studies. Agron. J. 57:634-636.

Hanna, A.Y., P.W. Harlan, and D.T. Lewis, 1983. Effect of slope on water balance under central-pivot irrigation. Soil Sci. Soc. Am. J. 47:760-764.

Hansen, E.A., and A.R. Harris.. 1975. Validity of soil-water samples collected with porous ceramic cups. Soil Sci. Soc. Am. J. 39:528-536.

Holder, M., K.W. Brown, J.C. Thomas, D. Zabcik, and H.E. Murry. 1991. Capillary-wick unsaturated zone soil pore water sample. Soil Sci. Soc. Am. J. 55:1195-1202.

Howell, T.A., R.L. McCormick and C.J. Phene. 1985. Design and installation of large weighing lysimeters. Trans ASAE 28:106-112.

Illanes, R. 1990. Determinación y análisis de las fuerzas ejercidas sobre el tractor por los aperos de labranza. Tesis Doctoral. Universidad de Córdoba.

Jemison, J.M., and R.H. Fox. 1992. Estimation of zero-tension pan lysimeter collection efficiency. *Soil Sci.* 154:85-94.

Jemison, J-M., and R.H. Fox. 1994. Nitrate leaching from nitrogen fertilizer nd manured corn with zer-tension pan lysimeters. *J. Environ. Qual.* 23:337-343.

Joffe, J.S. 1932. Lysimeter studies. I. Moisture percolation through soil profiles. *Soil Sci.* 34:123-143.

Johnson, C.W., H.D. Copp, and E.R. Tiney. 1966. Drop-box weir for sediment-laden flow measurement. *J. Hydraul.* 92:165-190.

Jones, M.B., J.E. Street and W.A. Williams. 1974. Leaching and uptake of nitrogen applied to annual grass and clover-grass mixtures in lysimeters. *Agron. J.* 66:256-258.

Jordan, C.F. 1968. A simple tension-free lysimeter. *Soil Sci* 105:81-86.

Karnok, K.J., and R.T. Kucharski. 1982. Design and construction of a rhizotron-lysimeter facility at the Ohio state University. *Agron. J.* 74:152-156.

Khan, A.A.H., C.K. Ong. 1997. Design and Calibration of Tipping Bucket System for Field Quantification. *J. Soli and Water Cons.* 52:437-443.

King, B.A., I.R. McCann, C.V. Eberlein and J.C. Stark. 1999. Computer Control System for Spatially Varied Water and Chemical Application Studyes with Continuous-move Irrigation Systems. *Computers and Electronics in Agriculture.* 24: 177-194.

Klocke, N.L., R.W. Todd, G.W. Hergert, D.G. Watts and A.M. Parkhurst. 1993. Design, Installation, and Performance of Percolation Lysimeters for Water Quality Sampling. 1993. *Trans ASAE* 36:429-435.

Knuston, J.H., and J.S. Selker. 1996. Fiberglass wick sampler effects on measurements of solute transport in the vadose zone. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 60:420-424.

Kohnke, H., Dreibellis, F.R. and Davison, J.M. (1940). A survey and discussion of lysimeters and bibliography on their construction and performance. USADA. Misc. Pub. 372.

Kranz, W.L., R.S. Kanwar and C.E. Pederson. 1998. Collection and Monitoring of One-Meter Cubic Soli Monoliths for Leaching Studies. Trans. ASAE. 41:333-334.

Kung, K.J.S. 1993. Laboratory observation of funnel flow mechanism and its influence on solute transport. J. Environ. Qual. 22:91-102.

Laguna, A. 1989. Análisis cuantitativo de la erosión del suelo. Tesis Doctoral. E.T.S.I.A.M. Universidad de Córdoba.

Liator, M.J. 1988. Review of soil solution samplers. Water Resour, Res. 24:727-733.

Linden, D.R. 1977 Design, installation, and use of porous ceramicsamplersfor monitoring soil-water quality. Tech. Bull. 1562. USDA-ARS, Washington, DC.

Lin, G-F., Y-M. Wang. 1996. General Stochastic Instantaneous Unit Hydrograph. Journal of Hydrology. 182: 227-238.

Litaor, M.I. 1988. Review of soil solution samplers. Water Resour. Res 24:727-733.

Losada, A. 1988. El riego, fundamentos hidráulicos. pp. 194-196. Ed. Mundi-Prensa.

Llanos, I. 1993. Proceso de Adaptación de un Huerto de naranjos Adultos al Riego Localizado Bajo Distintos Regímenes Hídricos. Respuesta Productiva y Adaptación del Sistema radicular. Tesis Doctoral. E.T.S.I.A.M. Universidad de Córdoba.

Madueño, A. 1994. Determinación experimental, análisis y monitorización de la eficiencia de tracción de los tractores agrícolas. Proyecto Fin de Carrera. E.T.S.I.A. Universidad de Córdoba.

Marek, T.H., A.D. Schneider, T.A. Howell, L.L. Ebeling. 1988. Design and Construction of Large Weighing Monolithics Lysimeters. 1988. Trans. ASAE 31:477-484.

Martin, E.C., T.I. Loudon, J.T. Ritchie, and A. Werner. 1994. Use of drainage lysimeter to evaluate nitrogen and irrigation management

strategies to minimize nitrate leaching in maize production. *Trans. ASAE* 37:79-83.

Martín. E., J.M. Angulo. 1997. Sistemas distribuidos de control y adquisición de datos para piscifactorías, con minimización de cableado. *Revista Española de Electrónica*. Jul-Ago:86-90.

Martinez, J. And G. Guiraud. 1990. A lysimeter study of effects of ryegrass catch crop, during a winter wheat/maize rotation, on nitrate leaching and on following crop. *Journal Soil Science*. 41:5-16.

Maschhaupt, J.G. (1938). Lysimeter investigations at Groningen and elsewhere. I. rainfall, drainage and evaporation. *Versl. Landbouwk. Onderz.* 47:165-528.

Maschhaupt, J.G. (1949). Lysimeter investigation at Groningen. III. Rainfall, drainage and evaporation. *Varssl. Landbouwk. Onderz.*

Mata, M., J. Girona, D. Goldhamer, E. Fereres, M. Cohen and S. Johnson. 1999. Wares relations of lysimeter-grown peach trees are sensitive to deficit irrigation. *California Agriculturae*. 53: 17-20.

Moyer, J.W., L.S. Saporito, and R.R. Janke. 1996. Design, construction, and installation of an intact soil core lysimeter. *Agron. J.* 88:253-256.

Narasimhan, T., and S.J. Dreiss. 1986. A numerical technique for modelling transient flow of water to soil water sampler. *Soil Sci.* 141:230-236.

Nash, J.E., 1957. The Form of the Instantaneous unit Hydrograph. *IAHS Publ.*, 45: 114-121.

Owens, L.B. 1987. Nitrate leaching losses from monolith lysimeters as influenced by nitrapyrin. *J. Environ. Qual.* 16:34-38.

Parizek, R. R., and B. E. Lane. 1970. Soil water sampling using pan and deep pressure-vacuum lysimeters. *J. Hydrol.* 11:1-21.

Pelletier, G., S.K. Upadhyaya. 1999. Development of a tomato load/yield monitor. *Computers and Electronics in Agriculture*. 23:103-117.

Phene, C.P., R.L. McCormick, K.R. Davis, J.D. Pierro, D.W. Meek. 1989. A Lysimeter Feedback Irrigation Controller System for Evapotranspiration Measurements and Real Time Irrigation Scheduling. *Trans. ASAE*. 32:477-484.

Plate, E., J. Ihringer and W. Lutz. 1988. Operational Models for Flood Calculations. *Journal of Hidrology*. 100: 489-506.

Press, W.H., S.A. Teukolsky, W.T. Vetterling and B.P. Flannery (1992). *Numerical recipes in C*. Cambridge University Press.

Radulovich, R., and P. Sollins. 1987. Improved performance of zero-tension lysimeters. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 51:1386-1388.

Reeder, J.D. 1986. A non-weighing lysimeters design for field studies using nitrogen-15. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 50:1224-1227.

Richards, L.A., Neal, O.R. and Russell, M.B. (1939). Observations on moisture conditions in lysimeters. II. *Soil Sci. Soc. Am. Peoc.* 4:55-59.

Ritchie, J.T. and E. Burnett. 1968. A precision weighing lysimeter for row crop water use studies. *Agron. J.* 60:545-549.

Rodriguez, M.A., I. González y A. Sanz. 1992. Trabajo simultáneo de múltiples elementos de medida y control intercomunicados mediante puentes serie RS-232-C. *Anales de Ingeniería Mecánica*. 2:93-98.

Rusell, A.E., and J.J. Ewel. 1985. Leaching from a tropical Andept during big storms: A comparison of three methods. *Soil Sci.* 139:181-189.

Salas, L., 1993. Caracterización energética de las operaciones mecanizadas bajo distintos sistemas de manejo de suelos y residuos. Tesis Doctoral. E.T.S.I.A.M. Universidad de Córdoba.

Sherman, L.K. 1932. Stream flow from rainfall by the unit-graph method. *Eng. News. Rec.*, 108: 801-805.

Shipitalo, M.J., and W.M. Edwards. 1993. Seasonal patterns of water and chemical movement in tilled and no-till column lysimeters. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 57:218-223.

Thompson, M.L., and R.L. Scharf. 1994. An improved zero-tension lysimeter to monitor colloid transport in soils. *J. Environ. Qual.* 23:378-383.

Tyler, D.D., and G.W. Thomas. 1997. Lysimeter measurements of nitrate and chloride losses from soil under conventional and no-tillage corn. *J. Environ. Qual.* 6:63-66.

Valera, D.L. 1997. Medida sin Contacto y Análisis del Microrelieve de los Suelos Agrícolas. Aplicación al Estudio Experimental de los Daños Provocados por el Paso de Tractores Sobre Campos de Cultivo. Tesis Doctoral. E.T.S.I.A.M. Universidad de Córdoba.

Van der Ploeg, R.R., and F. Beese. 1977. Model calculation for the extraction of soil water by ceramic cups and plates. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 41:466-470.

Warrick, A.W., and A. Amoozegar-Fard. 1977. Soil water regimes near porous cup water samplers. *Water Resour. Res.* 13:203—207.

White, R.E. 1985. The influence of macropores on the transport of dissolved and suspended matter through soils. *Adv. Soil Sci.* 3:95-120.

Winnik, M. (1935). Ten years of lysimeters studies on some soils of Palestine. *Trans. Int. Cong. Soli Sci. Oxford I*:212-214.

Wu, L., J.M. Baker, and R.R. Allmaras. 1995. Numerical and Field Evaluation of Soil Water Samples by Suction Lysimeters. *J. Environ. Qual.* 24:147-152.

Yoder, D.C., J.B. Wilkerson, J.R. Buchanan, K.J. Hurley, R.E. Yoder. 1998. Development and Evaluation of a Device to Control Time Varying Flows.

## 7. APÉNDICES

## 7.1. PROGRAMAS

Form1 - 1

```
*****
*      FILTRO  v1.0      *
*****
```

```
Dim Datos(30000) As String
'ESTE PRIGRAMA ACTÚA DE FILTRO
'SELECCIONANDO UN DATO DE CADA N ELEMENTOS
'PARA ASÍ EVITAR LA REDUNDANCIA DE DATOS HASTA EL SIGUIENTE PASO
'DEL CONVERTIDOR CUANDO EL CAUDAL EL PEQUEÑO
'(c) ANTONIO MADUEÑO LUNA
'SEVILLA 30 DE MAYO DE 2000
```

```
Private Sub Command1_Click()
'Abrimos el fichero de datos originales
nombre$ = Text1.Text
Open nombre$ For Input As #1
```

```
Do While Not EOF(1)
  Line Input #1, a1$
  Datos(i%) = a1$
  i% = i% + 1
```

```
Loop
Close #1
Print i%
```

```
b% = Text3.Text
Open Text2.Text For Output As #1
For j% = 0 To i% / b%
  Print #1, Datos(b% * j%)
Next j%
```

```
End
End Sub
```

Form1 - 1

```
*****
'* LISÍMETRO v5.0 *
*****
```

```
'CÓRDOBA 11 DE JULIO DE 2000
'ÚLTIMA MODIFICACIÓN PARA ESTE PROGRAMA
```

```
'CARACTERÍSTICAS:
```

```
'GENERA UNA SALIDA EN:
'VOLTIOS
'VOLTIOS ACUMULADOS
'GRAMOS
'GRAMOS ACUMULADOS
'CAUDAL INSTANTÁNEO
'CAUDAL CON MEDIA MÓVIL DE 5 TÉRMINOS
'FICHERO COMPATIBLE PARA LOS PROGRAMAS DE REGRESIÓN Y NASH
'CONSISTENTE EN DOS SALIDAS FIJAS:
'G:\CAUDAL
'G:\VOLUMEN
```

```
*****
```

```
Dim Derivada(32767) As Double
Dim Derivada_m(32767) As Double
Dim Datos(32767) As String
Dim Voltios(32767) As Double
Dim Voltios_a(32767) As Double
Dim Kgramos(32767) As Double
```

```
Private Sub Command1_Click()
i% = 0
m# = Text3.Text
n# = Text4.Text
```

```
'Abrimos el fichero de datos originales
nombre$ = Text1.Text
Open nombre$ For Input As #1
Line Input #1, Cabecera$
```

```
Do While Not EOF(1)
Line Input #1, a1$
'Datos está en Voltios
Datos(i%) = Right$(a1$, 5)
i% = i% + 1
Loop
Close #1
```

```
'Cambiamos de String a Double (hasta i%-2 para evitar el EOF)
For j% = 0 To i% - 2
Voltios(j%) = Datos(j%)
Next j%
```

```
'Eliminamos fluctuaciones de la salida
'del convertidor cuando este
'incrementa su salida en un bit
For k% = 0 To i% - 2
If Voltios(k%) > Voltios(k% + 1) And Voltios(k%) - Voltios(k% + 1) <= 0.02 Then Voltios(k% + 1) = Voltios(k%)
Next k%
```

```
'Pesos acumulados
For l% = 0 To i% - 3
If indice# > 0 Then
indice# = indice# - 1
GoTo sigue
End If
If Voltios(l%) - Voltios(l% + 1) > 0.3 Then
Máximo# = Voltios(l%) + Máximo#
```

Form1 - 2

```

indice# = 5
End If
sigue:
Voltios_a(1% + 1) = Máximo# + Voltios(1% + 1)
Next 1%

'Este filtro elimina los puntos intermedios entre
'el máximo y el mínimo en la descarga
For k% = 0 To i% - 3
If Indice_2# > 0 Then
Indice_2# = Indice_2# - 1
GoTo sigue_1
End If
If Voltios_a(k%) > Voltios_a(k% + 1) Then
Voltios_a(k% + 1) = Voltios_a(k%)
Indice_2# = 5
End If
sigue_1:
Next k%

'Cálculo del peso de agua recogida expresado en gramos.
'Utilizamos los coeficientes de regresión procedentes de
'la calibración del caudalímetro

For 1% = 0 To i% - 2
Kgramos(1%) = (m# * Voltios_a(1%) + n#) / 1000
Next 1%

'=====
'Fijamos el intervalo entre muestras para así poder
'calcular la derivada
Intervalo# = Text5.Text / 3600

'Abrimos el fichero de salida
nombre_1$ = Text2.Text
Open nombre_1$ For Output As #1
Print #1, "n_Dato ", "", "Voltios", "", "Voltios_a", "", "Kgramos", "", "Der (Kgr/h)", "", "Der_Móvil (Kgr/h)"
Print #1, ""
Print #1, 0, "", Voltios(0), "", Voltios_a(0), "", Int(10000 * Kgramos(0)) / 10000

'Cálculo numérico de la derivada
For j% = 1 To i% - 1
Derivada(j%) = (Kgramos(j%) - Kgramos(j% - 1)) / Intervalo#
Next j%

'Media móvil de 5 elementos para la derivada. Sirve para
'atenuar el efecto discretizador de los 8 bits de
'convertidor del datalogger.
For G% = 2 To i% - 3
Derivada_m(G%) = (Derivada(G% - 2) + Derivada(G% - 1) + Derivada(G%) + Derivada(G% + 1) + Derivada(G% + 2)) / 5
Next G%

'Escribimos el fichero
For k% = 2 To i%
Print #1, k% - 1, "", Voltios(k% - 1), "", Voltios_a(k% - 1), "", Int(10000 * Kgramos(k% - 1)) / 10000, "", Int(10000 * Derivada(k%
- 1)) / 10000, "", Int(10000 * Derivada_m(k% - 1)) / 10000
Next k%

'Cerramos el fichero
Close #1

*****

'Abrimos el fichero de datos de caudal
nombre_2$ = Text6.Text
Open nombre_2$ For Output As #1

'FORZAMOS UN CERO INICIAL A LA DERIVADA
Print #1, 0, 0

```

Form1 - 3

```

For h% = 1 To i% - 1
'TIEMPO Y DATOS MULTIPLICADOS POR 1000000000
'PARA COMPATIBILIZAR EL INTERCAMBIO DE
'FICHEROS

'RESTRICCIONES A LA DERIVADA
If Derivada(h%) <= 0 Then Derivada(h%) = 0
'If Derivada(h%) > Derivada(h% - 1) And Derivada(h%) > Derivada(h% + 1) Then GoTo mas
Print #1, h%, Int(1000000000 * Derivada(h%))
'mas:
'Derivada(h%) = 0
Next h%

```

Close #1

\*\*\*\*\*

```

'Abrimos el fichero de datos de VOLUMEN
nombre_3$ = Text8.Text
Open nombre_3$ For Output As #1

```

```

For G1% = 0 To i% - 1
'TIEMPO Y DATOS MULTIPLICADOS POR 1000000000
'PARA COMPATIBILIZAR EL INTERCAMBIO DE
'FICHEROS
If Kgramos(G1%) < 0 Then Kgramos(G1%) = 0
Print #1, G1%, Int(1000000000 * Kgramos(G1%))
Next G1%

```

Close #1

\*\*\*\*\*

\*\*\*\*\*

```

'Abrimos el fichero de datos de VOLUMEN_r
nombre_4$ = Text8.Text + "_r"
Open nombre_4$ For Output As #1

```

```

For G2% = 0 To i% - 1
Print #1, G2%, Kgramos(G2%)
Next G2%

```

Close #1

\*\*\*\*\*

End  
End Sub

Private Sub Command2\_Click()

```

'GRABACIÓN DEL FICHERO DE CONFIGURACIÓN
config$ = Text7.Text
F_Origen$ = Text1.Text
F_Destino$ = Text2.Text
m$ = Text3.Text
n$ = Text4.Text
p$ = Text5.Text
Open config$ For Output As #1
Print #1, F_Origen$
Print #1, F_Destino$
Print #1, m$
Print #1, n$
Print #1, p$
Close #1
End Sub

```

Private Sub Form\_Load()

```

'LECTURA DEL FICHERO DE CONFIGURACIÓN
config$ = Text7.Text

```

Form1 - 4

```
Open config$ For Input As #1
Input #1, aa1$
Input #1, aa2$
Line Input #1, aa3$
Line Input #1, aa4$
Line Input #1, aa5$
Close #1
Text1.Text = aa1$
Text2.Text = aa2$
Text3.Text = CDb1(aa3$)
Text4.Text = CDb1(aa4$)
Text5.Text = CDb1(aa5$)
End Sub
```

Form1 - 1

```
*****
'*      NASH v1.0      *
*****
```

```
'Cordoba 10 de Julio de 2000
'Tres cifras exactas
```

```
Dim P(50) As Double
Dim TQ(30000) As Double
Dim Q(30000) As Double
Dim SP(50) As Double
Dim SQ(30000) As Double
```

```
Private Sub Command1_Click()
```

```
DTP# = Text2.Text / 60 'INTERVALO DE TIEMPO EN QUE
      'SE DAN LOS PULSOS DEL HIETOGRAMA (h)
```

```
'ABRIMOS EL FICHERO CON LOS DATOS DEL HIETOGRAMA
```

```
nombre$ = Text3.Text
Open nombre$ For Input As #1
```

```
Do While Not EOF(1)
```

```
  Input #1, P(NP%)
  P(NP%) = P(NP%)
  'Print P(NP%)
  NP% = NP% + 1
```

```
Loop
Close #1
```

```
'ABRIMOS EL FICHERO CON LOS
'DATOS DEL HIDROGRAMA (Tiempo, Caudal)
'ESTÁN DIVIDIDOS POR 1000000000 PARA TENER
'COMPATIBILIDAD CON EL FICHERO DE
'ENTRADA.
```

```
nombre$ = Text4.Text
Open nombre$ For Input As #1
```

```
Do While Not EOF(1)
```

```
  Input #1, TQ(NQ%), Q(NQ%)
  'TQ(NQ%) = TQ(NQ%) / 10000
  Q(NQ%) = Q(NQ%) / 1000000000
  'Print TQ(NQ%), Q(NQ%)
  NQ% = NQ% + 1
```

```
Loop
Close #1
'Print NP%, NQ%
'Print
```

```
'INTERVAO ENTRE DATOS EN EL HIDROGRAMA
```

```
THU# = Text1.Text
For i% = 0 To NQ%
  TQ(i%) = TQ(i%) * THU# / 3600
Next i%
```

```
'PONE A CERO LOS ACUMULADORES S1, FMP1,
'FMP2 (AREA Y MOMENTOS DEL HIETOGRAMA
'RESPECTO AL ORIGEN) Y ESTABLECE EL
'BRAZO DEL PRIMER PULSO DE RIEGO
S1# = 0
FMP1# = 0
FMP2# = 0
BRP# = DTP# * 0.5
```

```
'CICLO PARA OBTENER AREAS Y
'MOMENTOS DEL HIETOGRAMA
```

Form1 - 2

For i% = 0 To NP% - 1

SP(i%) = P(i%) \* DTP# 'OBTIENE EL AREA EL AREA  
'DE CADA PULSO DE LLUVIA  
'EN m3/sxh

S1# = S1# + SP(i%) 'SUMA LA SUPERFICIE DEL PULSO i%  
'AL ACUMULADOR S1#

'SUMA LOS MOMENTOS DE PRIMER Y SEGUNDO  
'ORDEN A LOS ACUMULADORES FMP1# Y FMP2#  
FMP1# = FMP1# + SP(i%) \* BRP#  
FMP2# = FMP2# + SP(i%) \* BRP# ^ 2  
'Print SP(i%), BRP#, FMP1#, FMP2#

'INCREMENTA EL BRAZO EN EL INTERVALO DTP#  
'PARA EL SIGUIENTE PULSO  
BRP# = BRP# + DTP#  
Next i%

'Print S1#  
'PONE A CERO LOS ACUMULADORES S2, FMQ1,  
'FMQ2 (AREA Y MOMENTOS DEL HIDROGRAMA  
'RESPECTO AL ORIGEN) Y VALOR DEL TIEMPO  
'DESDE EL ORIGEN HASTA EL PRINCIPIO DEL INTERVALO  
'TRAPECIAL  
S2# = 0  
FMQ1# = 0  
FMQ2# = 0  
DT0# = 0

'CICLO PARA OBTENER EL AREA Y MOMENTOS  
'DEL HIDROGRAMA  
For i% = 0 To NQ% - 2  
SY# = Q(i%) + Q(i% + 1) 'OBTIENE LA SUMA DE LAS  
'ORDENADAS DE LA PORCIÓN  
'TRAPECIAL  
DTQ# = TQ(i% + 1) - TQ(i%) 'OBTIENE EL INTERVALO DE  
'TIEMPO ENTRE LAS ORDENADAS  
SQ(i%) = SY# \* DTQ# \* 0.5 'OBTIENE EL AREA DEL TRAPECIO  
S2# = S2# + SQ(i%) 'SUMA EL AREA AL ACUMULADOR S2

'OBTIENE LA DISTANCIA DEL C.D.G. DEL TRAPECIO AL ORIGEN  
'DE TIEMPOS MEDIANTE LA SUMA DE DT0 Y LA DISTANCIA DEL  
'C.D.G. A LA PRIMERA ORDENADA DEL TRAPECIO  
BRQ# = DT0# + (Q(i%) + 2 \* Q(i% + 1)) / SY# \* DTQ# / 3  
'Print BRQ#  
'SUMA LOS MOMENTOS DE PRIMER Y SEGUNDO ORDEN A LOS  
'ACUMULADORES FMQ1# Y FMQ2#  
FMQ1# = FMQ1# + SQ(i%) \* BRQ#  
FMQ2# = FMQ2# + SQ(i%) \* BRQ# ^ 2

'Print SQ(i%), BRQ#, FMQ1#, FMQ2#  
'OBTIENE LA DISTANCIA HASTA EL ORIGEN DE TIEMPOS  
'DEL SIGUIENTE INTERVALO TRAPECIAL  
DT0# = DT0# + DTQ#  
Next i%

'DETERMINAMOS EL VOLUMEN DE AGUA APLICADO EN GRAMOS  
Label9.Caption = S2#

'OBTIENE EL VALOR DE N\*K  
FNK# = FMQ1# / S2# - FMP1# / S1#

'OBTENEMOS EL VALOR DE n Y K  
FK# = (FMQ2# / S2# - FMP2# / S1# - FNK# ^ 2 - 2 \* FNK# \* FMP1# / S1#) / FNK#  
FN# = FNK# / FK#

'IMPRIMIMOS EL RESULTADO EN EL FORMULARIO

Form1 - 3

Label3.Caption = FN#

Label4.Caption = FK#

End Sub

Form1 - 1

```
*****
'*   HUNASH v1.0   *
*****
```

```
'Sevilla 20 de Mayo de 2000
Dim GMM As Double
Dim X#, tmp#, ser#
Dim cof(5) As Double
Dim HUI(32000) As Double
Dim QHU(32000) As Double
```

Function gammln(xx#) As Double

```
'OBTIENE EL VALOR DE LN(GAMMA(XX#)), PARA XX#>1
cof(0) = 76.1800917294715
cof(1) = -86.5053203294168
cof(2) = 24.0140982408309
cof(3) = -1.23173957245015
cof(4) = 1.20865097386617E-03
cof(5) = -5.395239384953E-06
```

X# = xx# - 1

```
tmp# = X# + 5.5
tmp# = (X# + 0.5) * Log(tmp#) - tmp#
ser# = 1.00000000019001
```

```
For j% = 0 To 5
X# = X# + 1
ser# = ser# + cof(j%) / X#
Next j%
```

gammln# = tmp# + Log(2.506628274631 \* ser#)

End Function

Function GAMMA(LG#) As Double

```
*****
'CÁLCULO DE GAMMA(X) PARA X>0
'PARA X>1 SE APLICA DIRECTAMENTE
'EL CÁLCULO DEL LN(GAMMA(X)) A PARTIR
'DE LA APROXIMACIÓN PARA 6 TÉRMINOS
'PROPUESTA POR LANZOS
'PARA 0<X<1 SE EMPLEA LA FÓRMULA DE REFLEXIÓN.
'(TOMADO DE "NUMERICAL RECIPES IN C", W.H. PRESS EL AL.
'1992 Y DE AYUSO J.L. 1990).
*****
```

```
dato# = LG#
If dato# < 1 Then
pi# = 3.14159265358979
z# = 1 - dato#
u# = 2 - dato#
zz# = Exp(gammln(u#))
GAMMA# = pi# * z# / zz# / Sin(pi# * z#)
Else
GAMMA# = Exp(gammln(dato#))
End If
```

End Function

Function FUNC(X#) As Double

```
FK# = Text1.Text
FN# = Text2.Text
TT# = X# / FK#
FUNC# = (TT# ^ (FN# - 1)) / (FK# * GMM#) * Exp(-TT#)
```

Form2 - 2

End Function

Function SIMPS(A#, B#) As Double

'Definimos los Parámetros

EPS# = 1 \* 10 ^ -6

JMAX% = 10

'Valor inicial de la integral

'o área encerrada entre la función

'y los límites (a,b)

SOLD# = 0

'Ciclo para el cálculo de la integral.

'Se inicia dividiendo el intervalo en

'dos partes para continuar dividiendo

'en 4,8,16.....2^n

For j% = 1 To JMAX%

'N=número de partes de amplitud h en

'que se divide el intervalo (a,b)

N# = 2 ^ j%

'M=número de partes de amplitud 2\*h

'en que se divide el intervalo (a,b)

M# = N# / 2

'límite inferior del intervalo en que

'se calcula la integral

X# = A#

'amplitud o paso del intervalo de la

'función que se integra

H# = (B# - A#) / N#

'Valor inicial del acumulador S

S# = 0

'Ciclo para calcular las M áreas de

'amplitud 2\*h en que se ha dividido

'el intervalo (a,b)

For i% = 1 To M#

'Acumula las áreas obtenidas

S# = S# + H# \* (FUNC(X#) + 4 \* FUNC(X# + H#) + FUNC(X# + 2 \* H#)) / 3

'Establece el límite inferior de la siguiente área

X# = X# + 2 \* H#

Next i%

'Comprueba si el valor del área obtenida

'es menor en 10^-6 del valor del área anterior

If Abs(SOLD# - S#) <= EPS# Then GoTo fin\_función

'Asigna como valor del área antigua el área obtenida

SOLD# = S#

'Inicia otro nuevo ciclo dividiendo el intervalo

'en el doble de divisiones que anteriormente

Next j%

fin\_función:

'Asignación del valor final del área para la salida

'de la función

SIMPS# = S#

End Function

Private Sub Command1\_Click()

'ASIGNAMOS VALOR A LOS PARÁMETROS DE TRABAJO

FK# = Text1.Text

FN# = Text2.Text

DT# = Text3.Text / 3600 'Intervalo entre datos ej:40"

N\_DATOS% = Text4.Text

'CALCULAMOS LA FUNCIÓN GAMMA PARA EL VALOR DE N

GMM# = GAMMA(FN#)

'ESTABLECEMOS EL VALOR INICIAL DEL

Form1 - 3

```

TIEMPO DEL HUI
T# = 0

'VOLUMEN DE AGUA CIRCULADA
VOL# = Text7.Text
For i% = 0 To N_DATOS%

'OBTENEMOS EL VALOR DE LA ORDENADA DEL HUI
'(ORDENADA DE LA FUNCIÓN DE DENSIDAD
'DE LA DISTRIBUCIÓN GAMMA) Y LOS ALMACENAMOS
'EN UNA MATRIZ
HUINST# = 1 / FK# / GMM# * (T# / FK#) ^ (FN# - 1) * Exp(-T# / FK#)

'CONVERTIMOS A LAS DIMENSIONES CORRECTAS ( )
'HUI=HUI.....

HUI#(i%) = HUINST# * VOL# '* 243 / 3.6

'INCREMENTAMOS EL TIEMPO PARA EL CÁLCULO
'DE LA ORDENADA DEL HUI AL FINAL
'DEL INCREMENTO
T# = T# + DT#

Next i%

'ESTABLECEMOS EL VALOR INICIAL DEL
TIEMPO DEL HU
T# = 0
'THU es el tiempo del intervalo finito de lluvia
'es decir vamos a obtener el HU de THU horas ( o
'de la unidad de tiempo que estemos empleando)
'de duración.

THU# = Text5.Text / 60

For j% = 1 To N_DATOS%

'INCREMENTAMOS EL TIEMPO PARA EL CÁLCULO
'DE LA ORDENADA DEL HU AL FINAL
'DEL INCREMENTO
T# = T# + DT#

If T# <= THU# Then
A# = 0
Else
A# = T# - THU#
End If

'LLAMA A LA FUNCTION SIMPS PARA EL
'CÁLCULO DE LA INTEGRAL ENTRE A Y T
QHU#(j%) = SIMPS(A#, T#) / THU# * VOL# '* 243 / 3.6

Next j%

nombre$ = Text6.Text
Open nombre$ For Output As #1

For k% = 0 To N_DATOS%
Print #1, k%, HUI#(k%), "", QHU#(k%)
Next k%

Close #1
End
End Sub

```

Form1 - 1

```
*****
'* CONVOLUCIÓN v1.0 *
*****
```

Private Sub Command1\_Click()

'Sevilla 9 de Abril de 2000

'ESTE PROGRAMA GENERA LA CONVOLUCIÓN  
'Y POR TANTO EL CAUDAL DE SALIDA DEL  
'LISÍMETRO A PARTIR DEL HU Y LOS DATOS DE  
'PRECIPITACIÓN

Dim Datos\_hu(50) As Double 'El número de datos solo puede ser la mitad  
Dim Datos\_i(50) As Double 'El número de datos solo puede ser la mitad  
Dim Convolución(50, 25) As Double  
Dim Salida(50) As Double

```
x% = 0
Nomb_1$ = Text1.Text
Open Nomb_1$ For Input As #1 ' Abre el archivo.
Do While Not EOF(1) ' Busca el fin del archivo.
    Input #1, Datos_hu(x%) ' Lee la línea de datos.
    x% = x% + 1
Loop
Close #1 ' Cierra el archivo.
```

```
Y% = 0
Nomb_2$ = Text2.Text
Open Nomb_2$ For Input As #1 ' Abre el archivo.
Do While Not EOF(1) ' Busca el fin del archivo.
    Input #1, Datos_i(Y%) ' Lee la línea de datos.
    Y% = Y% + 1
Loop
Close #1 ' Cierra el archivo.
```

'CÁLCULO DE LA CONVOLUCIÓN A PARTIR  
'DEL HIDROGRAMA UNITARIO (SHERMAN, 1932)

```
'BORRAMOS LA MATRIZ DE CONVOLUCIÓN
For i% = 0 To Y% - 1
For j% = 0 To x% - 1
Convolución(j%, i%) = 0
Next j%
Next i%
```

```
'PRODUCTO DEL INTEGRANDO
For Columna% = 0 To Y% - 1
For Fila% = 0 To x% + Y% - 2
Convolución(Fila% + Columna%, Columna%) = Datos_i(Columna%) * Datos_hu(Fila%)
Next Fila%
Next Columna%
```

```
For Fila% = 0 To x% + Y% - 2
'Print Convolución(Fila%, 3)
Next Fila%
```

```
'SUMA DE LA INTEGRAL
For Fila% = 0 To x% + Y% - 2
Suma# = 0
For Columna% = 0 To Y% - 1
Suma# = Suma# + Convolución(Fila%, Columna%)
Next Columna%
Salida(Fila%) = Suma#
'Print Suma#
Next Fila%
```

Form1 - 2

'ESCRIBIMOS EL CAUDAL DE SALIDA EN UN FICHERO

Nomb\_3\$ = Text3.Text

Open Nomb\_3\$ For Output As #1 ' Abre el archivo.

For i% = 0 To x% + Y% - 2

Print #1, Salida(i%)

Next i%

Close #1

'ESCRIBIMOS LA SALIDA COMPLETA EN UN FICHERO

Nomb\_3\$ = Text4.Text

Open Nomb\_3\$ For Output As #1 ' Abre el archivo.

Print #1, "TIEMPO", "H.U.", "I\_PRECIP.", "Q\_SALIDA"

Print #1, ""

For i% = 0 To x% + Y% - 2

Print #1, i%, Datos\_hu(i%), Datos\_i(i%), Salida(i%)

Next i%

Close #1

End

End Sub

Form1 - 1

```
*****
* DECONVOLUCIÓN *
*****
```

```
Private Sub Command1_Click()
'Sevilla 9 de Abril de 2000
```

```
'ESTE PROGRAMA CALCULA EL HU A PARTIR
'DE UN CAUDAL DE SALIDA GENERADO CON
'UNA PRECIPITACIÓN DE VALOR CONSTANTE
'APLICADA DURANTE UN NÚMERO DE IMPULSOS
'CONOCIDOS
```

```
Dim Datos_Caudal(50) As Variant
Dim hu(50) As Double
```

```
'LEEMOS EL FICHERO DE CAUDAL DE
'SALIDA DEL LISÍMETRO
x% = 0
Nomb_1$ = Text3.Text
Open Nomb_1$ For Input As #1 ' Abre el archivo.
Do While Not EOF(1) ' Busca el fin del archivo.
Line Input #1, Datos_Caudal(x%) ' Lee la línea de datos.
x% = x% + 1
Loop
Close #1 ' Cierra el archivo.
```

```
Intensidad# = Text1.Text
Número_Impulsos% = Text2.Text
```

```
'CÁLCULO DEL H.U.
hu(0) = Datos_Caudal(0) / Intensidad#
For i% = 1 To x%
If i% <= Número_Impulsos% Then
hu(i%) = (Datos_Caudal(i%) - Datos_Caudal(i% - 1)) / Intensidad#
Else
a# = Val(Datos_Caudal(i% - Número_Impulsos%) - Datos_Caudal(i% - Número_Impulsos% - 1))
hu(i%) = (Datos_Caudal(i%) - Datos_Caudal(i% - 1) + a#) / Intensidad#
If hu(i%) < 0 Then hu(i%) = 0
End If
Next i%
```

```
'ESCRIBIMOS LA SALIDA COMPLETA EN UN FICHERO
Nomb_2$ = Text4.Text
Open Nomb_2$ For Output As #1 ' Abre el archivo.
Print #1, "TIEMPO", "Q_SALIDA", "H.U."
Print #1, ""
```

```
For i% = 0 To x% - 1
Print #1, i%, Datos_Caudal(i%), hu(i%)
Next i%
```

```
Close #1
End
End Sub
```

Form1- 1

```

*****
*   MÉTODO SIMPLIFICADO v1.0   *
*****

Dim x#, tmp#, ser#
Dim cof(5) As Double

Function gammln(xx#) As Double

'OBTIENE EL VALOR DE LN(GAMMA(XX#)), PARA XX#>1
cof(0) = 76.1800917294715
cof(1) = -86.5053203294168
cof(2) = 24.0140982408309
cof(3) = -1.23173957245015
cof(4) = 1.20865097386617E-03
cof(5) = -5.395239384953E-06

x# = xx# - 1

tmp# = x# + 5.5
tmp# = (x# + 0.5) * Log(tmp#) - tmp#
ser# = 1.00000000019001

For j% = 0 To 5
x# = x# + 1
ser# = ser# + cof(j%) / x#
Next j%

gammln# = tmp# + Log(2.506628274631 * ser#)

End Function

Private Sub Command1_Click()

*****
'CÁLCULO DE GAMMA(X) PARA X>0
'PARA X>1 SE APLICA DIRECTAMENTE
'EL CÁLCULO DEL LN(GAMMA(X)) A PARTIR
'DE LA APROXIMACIÓN PARA 6 TÉRMINOS
'PROPUESTA POR LANCZOS
'PARA 0<X<1 SE EMPLEA LA FÓRMULA DE REFLEXIÓN.
'(TOMADO DE "NUMERICAL RECIPES IN C", W.H. PRESS ET AL.
'1992 Y DE AYUSO J.L. 1990).
*****

'Indices iniciales
Divisor# = 1
K# = 1

'CALCULAMOS EL VALOR ACTUAL DE LA FUNCIÓN: HUI-qmax/Vol_Aplicado
m001:
Adim# = (Text1.Text / K#)
dato# = Adim# + 1
If dato# < 1 Then
pi# = 3.14159265358979
z# = 1 - dato#
u# = 2 - dato#
zz# = Exp(gammln(u#))
gamma# = pi# * z# / zz# / Sin(pi# * z#)
Else
gamma# = Exp(gammln(dato#))
End If

Función# = 1 / (K# * gamma#) * (Adim# ^ Adim#) * Exp(-Adim#) - Text2.Text / Text3.Text

If Función# > 0 Then

```

Form1 - 2

```
K# = K# + Divisor#
```

```
GoTo m001
```

```
Else
```

```
K# = K# - Divisor#
```

```
Divisor# = Divisor# / 10
```

```
End If
```

```
If Abs(Función#) < 1 * 10 ^ -6 Then GoTo salida
```

```
GoTo m001
```

```
salida:
```

```
Label5.Caption = K#
```

```
n# = (Text1.Text / K#) + 1
```

```
Label7.Caption = Int(100000 * n#) / 100000
```

```
End Sub
```

Form1 - 1

```
*****
'* REGRESIÓN SIMPLIFICADA *
*****
```

```
'CÓRDOBA 5 DE JULIO DE 2000
'REGRESIÓN NUMÉRICA POR MÍNIMOS CUADRADOS SIMPLIFICADA
```

```
Dim Abscisa(30000) As Double
Dim Ordenada(30000) As Double
Dim x#, tmp#, ser#, FK#, FN#, GMM#, VOL#, EXPONENTE#, ITERACIONES#
Dim cof(5) As Double
```

```
Function gammln(xx#) As Double
```

```
'OBTIENE EL VALOR DE LN(GAMMA(XX#)), PARA XX#>1
cof(0) = 76.1800917294715
cof(1) = -86.5053203294168
cof(2) = 24.0140982408309
cof(3) = -1.23173957245015
cof(4) = 1.20865097386617E-03
cof(5) = -5.395239384953E-06
```

```
x# = xx# - 1
```

```
tmp# = x# + 5.5
tmp# = (x# + 0.5) * Log(tmp#) - tmp#
ser# = 1.00000000019001
```

```
For j% = 0 To 5
x# = x# + 1
ser# = ser# + cof(j%) / x#
Next j%
```

```
gammln# = tmp# + Log(2.506628274631 * ser#)
```

```
End Function
```

```
Function NASH(x#) As Double
TT# = x# / FK#
NASH# = (TT# ^ (FN# - 1)) / (FK# * GMM#) * Exp(-TT#)
End Function
```

```
Function SIMPS(A#, B#) As Double
```

```
'Definimos los Parámetros
EPS# = 1 * 10 ^ -(EXPONENTE#)
JMAX% = ITERACIONES#
```

```
'Valor inicial de la integral
'ó área encerrada entre la función
'y los límites (a,b)
SOLD# = 0
```

```
'Ciclo para el cálculo de la integral.
'Se inicia dividiendo el intervalo en
'dos partes para continuar dividiendo
'en 4,8,16,....2^n
For j% = 1 To JMAX%
'N=número de partes de amplitud h en
'que se divide el intervalo (a,b)
N# = 2 ^ j%
'M=número de partes de amplitud 2*h
'en que se divide el intervalo (a,b)
M# = N# / 2
'límite inferior del intervalo en que
'se calcula la integral
x# = A#
```

Form1 – 2

```
'amplitud o paso del intervalo de la
'función que se integra
H# = (B# - A#) / N#
'Valor inicial del acumulador S
s# = 0

'Ciclo para calcular las M áreas de
'amplitud 2*h en que se ha dividido
'el intervalo (a,b)
For i% = 1 To M#
'Acumula las áreas obtenidas
s# = s# + H# * (NASH(x#) + 4 * NASH(x# + H#) + NASH(x# + 2 * H#)) / 3

'Establece el límite inferior de la siguiente área
x# = x# + 2 * H#
Next i%

'Comprueba si el valor del área obtenida
'es menor en 10^-6 del valor del área anterior
If Abs(SOLD# - s#) <= EPS# Then GoTo fin_función
'Asigna como valor del área antigua el area obtenida
SOLD# = s#
'Inicia otro nuevo ciclo dividiendo el intervalo
'en el doble de divisiones que anteriormente
Next j%

fin_función:
'Asignación del valor final del área para la salida
'de la función
SIMPS# = s#
End Function

Private Sub Command1_Click()

Label2.Caption = ""
Label4.Caption = ""

EXPONENTE# = Text11.Text
ITERACIONES# = Text12.Text

VOL# = Text9.Text
DT# = Text8.Text

'Abrimos el fichero de los datos a ajustar
nombre$ = Text1.Text
Open nombre$ For Input As #1

Do While Not EOF(1)
Input #1, x#, y#

    Abscisa(i%) = x# * DT# / 3600
    Ordenada(i%) = y# / 1000000000 / VOL#
    i% = i% + 1

    'Print i%, x#, y#

Loop
Close #1
N_Datos# = i%

'For k# = 0 To 10
'Print linea$
'Print k#, Abscisa(k#), Ordenada(k#)
'Next k#

'INTERVALOS E INCREMENTO DE BUSQUEDA
FK_MIN# = Text2.Text
FK_MAX# = Text3.Text
FN_MIN# = Text4.Text
FN_MAX# = Text5.Text
DELTA# = Text10.Text
```

Form1 - 3

TOTAL# = ((FK\_MAX# - FK\_MIN#) / DELTA# + 1) \* ((FN\_MAX# - FN\_MIN#) / DELTA# + 1)

CONTADOR# = 0

'INICIO DE LOS BUCLES DE BUSQUEDA

Indice% = 0

For FK# = FK\_MIN# To FK\_MAX# Step DELTA# 'ES LA K

For FN# = FN\_MIN# To FN\_MAX# Step DELTA# 'ES LA n

'BARRA DE PROCESO

PORCENTAJE% = Int(100 \* CONTADOR# / TOTAL#)

ProgressBar1.Value = PORCENTAJE%

CONTADOR# = CONTADOR# + 1

\*\*\*\*\*

\*\*\*\*\*

'CÁLCULO DE GAMMA(X) PARA X>0

'PARA X>1 SE APLICA DIRECTAMENTE

'EL CÁLCULO DEL LN(GAMMA(X)) A PARTIR

'DE LA APROXIMACIÓN PARA 6 TÉRMINOS

'PROPUESTA POR LANCZOS

'PARA 0<X<1 SE EMPLEA LA FÓRMULA DE REFLEXIÓN.

'(TOMADO DE "NUMERICAL RECIPES IN C", W.H. PRESS EL AL.

'1992 Y DE AYUSO J.L. 1990).

\*\*\*\*\*

Dato# = FN#

If Dato# < 1 Then

pi# = 3.14159265358979

z# = 1 - Dato#

u# = 2 - Dato#

zz# = Exp(gammln(u#))

gamma# = pi# \* z# / zz# / Sin(pi# \* z#)

Else

gamma# = Exp(gammln(Dato#))

End If

GMM# = gamma#

'Print GMM#

\*\*\*\*\*

\*\*\*\*\*

'AQUI EMPIEZA LA RUTINA NUMÉRICA DE REGRESIÓN

Error# = 0

For j% = Text6.Text To Text7.Text

\*\*\*\*\*

'PARA CÁLCULOS CON LA CURVA DE CAUDAL

'Y\_est# = NASH(Abscisa(j%))

'PARA CÁLCULOS CON LA CURVA DE VOLUMEN ACUMULADO

Y\_est# = SIMPS(0, Abscisa(j%))

\*\*\*\*\*

'Print Abscisa(j%), Y\_est#

Error# = Error# + (Ordenada(j%) - Y\_est#) ^ 2

Next j%

If Indice% = 0 Then

Error\_1# = Error#

Indice% = 1

End If

If Error# <= Error\_1# Then

m1# = FK#

n1# = FN#

Error\_1# = Error#

End If

Next FN#

Next FK#

Form1 - 4

Label2.Caption = m1#

Label4.Caption = n1#

ProgressBar1.Value = 0

'Print N\_Datos#

'End

End Sub

Form1 - 1

```

*****
*   REGRESIÓN COMPLETA v1.0   *
*****

'CÓRDOBA 6 DE JULIO DE 2000
'REGRESIÓN NUMÉRICA COMPLETA POR MÍNIMOS CUADRADOS

Dim Abscisa(160000) As Double
Dim Ordenada(160000) As Double
Dim x#, tmp#, ser#, FK#, FN#, GMM#
Dim VOL#, EXPONENTE#, ITERACIONES#
Dim HUI(160000) As Double
Dim QHU(160000) As Double
Dim VOLUMEN(160000) As Double
Dim cof(5) As Double

'ALGORITMO PARA EL CÁLCULO DEL LOGARITMO DE UNA GAMMA
Function gammln(xx#) As Double

'OBTIENE EL VALOR DE LN(GAMMA(XX#)), PARA XX#>1
cof(0) = 76.1800917294715
cof(1) = -86.5053203294168
cof(2) = 24.0140982408309
cof(3) = -1.23173957245015
cof(4) = 1.20865097386617E-03
cof(5) = -5.395239384953E-06

x# = xx# - 1

tmp# = x# + 5.5
tmp# = (x# + 0.5) * Log(tmp#) - tmp#
ser# = 1.0000000019001

For j% = 0 To 5
x# = x# + 1
ser# = ser# + cof(j%) / x#
Next j%

gammln# = tmp# + Log(2.506628274631 * ser#)

End Function

'FUNCIÓN NASH PARA EMBALSES EN SERIE
Function NASH(x#) As Double
TT# = x# / FK#
NASH# = (TT# ^ (FN# - 1)) / (FK# * GMM#) * Exp(-TT#)
End Function

'REGLA DE SIMPSON
Function SIMPS(A#, B#) As Double

'Definimos los Parámetros
EPS# = 1 * 10 ^ -(EXPONENTE#)
JMAX% = ITERACIONES#

'Valor inicial de la integral
'o área encerrada entre la función
'y los límites (a,b)
SOLD# = 0

'Ciclo para el cálculo de la integral.
'Se inicia dividiendo el intervalo en
'dos partes para continuar dividiendo
'en 4,8,16,....2^n
For j% = 1 To JMAX%

```

Form1 - 2

```

'N=número de partes de amplitud h en
'que se divide el intervalo (a,b)
N# = 2 ^ j%
'M=número de partes de amplitud 2*h
'en que se divide el intervalo (a,b)
M# = N# / 2
'límite inferior del intervalo en que
'se calcula la integral
x# = A#
'amplitud o paso del intervalo de la
'función que se integra
H# = (B# - A#) / N#
'Valor inicial del acumulador S
s# = 0

'Ciclo para calcular las M áreas de
'amplitud 2*h en que se ha dividido
'el intervalo (a,b)
For i% = 1 To M#
'Acumula las áreas obtenidas
s# = s# + H# * (NASH(x#) + 4 * NASH(x# + H#) + NASH(x# + 2 * H#)) / 3

'Establece el límite inferior de la siguiente área
x# = x# + 2 * H#
Next i%

'Comprueba si el valor del área obtenida
'es menor en 10^-6 del valor del área anterior
If Abs(SOLD# - s#) <= EPS# Then GoTo fin_función
'Asigna como valor del área antigua el area obtenida
SOLD# = s#
'Inicia otro nuevo ciclo dividiendo el intervalo
'en el doble de divisiones que anteriormente
Next j%

fin_función:
'Asignación del valor final del área para la salida
'de la función
SIMPS# = s#
End Function

'INICIO DEL COMPUTO
Private Sub Command1_Click()

'RESET DE LAS SALIDAS GRÁFICAS
Label3.Caption = ""
Label5.Caption = ""

*****
'PARAMETROS DE INTEGRACIÓN CON LA REGLA DE SIMPSON
EXPONENTE# = Text1.Text
ITERACIONES# = Text2.Text

'PARÁMETROS DEL DATALOGGER Y DE LA APLICACIÓN DEL RIEGO
VOL# = Text3.Text
DT# = Text4.Text / 3600

'THU es el tiempo del intervalo finito de lluvia
'es decir vamos a obtener el HU de THU horas ( o
'de la unidad que estamos empleando) de duración
THU# = Text5.Text / 60
*****

'ABRIMOS EL FICHERO CON LOS DATOS A AJUSTAR
nombre$ = Text6.Text
Open nombre$ For Input As #1

Do While Not EOF(1)
Input #1, x#, y#

Abscisa(i%) = x# * DT#
Ordenada(i%) = y# / 100000000

```

Form1 - 3

```

i% = i% + 1

'Print i%, x#, y#

Loop
Close #1
N_DATOS# = i%

'For k# = 0 To 10
'Print linea$
'Print k#, Abscisa(k#), Ordenada(k#)
'Next k#

*****

'PARÁMETROS DE BUSQUEDA (INTERVALOS E INCREMENTO)
FK_MIN# = Text7.Text
FK_MAX# = Text8.Text
FN_MIN# = Text9.Text
FN_MAX# = Text10.Text
N_MIN# = Text12.Text
N_MAX# = Text13.Text
DELTA# = Text11.Text

'NÚMERO DE SIMULACIONES A REALIZAR
TOTAL# = ((FK_MAX# - FK_MIN#) / DELTA# + 1) * ((FN_MAX# - FN_MIN#) / DELTA# + 1)
CONTADOR# = 0

Open "G:\ERROR" For Output As #1

'INICIO DE LOS BUCLES DE BUSQUEDA
Indice% = 0
For FK# = FK_MIN# To FK_MAX# Step DELTA# 'ES LA K
For FN# = FN_MIN# To FN_MAX# Step DELTA# 'ES LA n

'BARRA DE PROCESO
PORCENTAJE% = Int(100 * CONTADOR# / TOTAL#)
ProgressBar1.Value = PORCENTAJE%
CONTADOR# = CONTADOR# + 1

'GAMMA:
*****
*****
'CÁLCULO DE GAMMA(X) PARA X>0
'PARA X>1 SE APLICA DIRECTAMENTE
'EL CÁLCULO DEL LN(GAMMA(X)) A PARTIR
'DE LA APROXIMACIÓN PARA 6 TÉRMINOS
'PROPUESTA POR LANZOS
'PARA 0<X<1 SE EMPLEA LA FÓRMULA DE REFLEXIÓN.
'(TOMADO DE "NUMERICAL RECIPES IN C", W.H. PRESS EL AL.
'1992 Y DE AYUSO J.L. 1990).
*****

Dato# = FN#
If Dato# < 1 Then
pi# = 3.14159265358979
z# = 1 - Dato#
u# = 2 - Dato#
zz# = Exp(gammln(u#))
GAMMA# = pi# * z# / zz# / Sin(pi# * z#)
Else
GAMMA# = Exp(gammln(Dato#))
End If

GMM# = GAMMA#

*****
'CÁLCULO DE LA CONVOLUCIÓN: HUI-->HU

For j# = 0 To N_DATOS# - 1
If Abscisa(j#) <= THU# Then
A# = 0

```

Form1 - 4

```

Else
A# = Abscisa(j#) - THU#
End If

'LLAMA A LA FUNCION SIMPS PARA EL
'CÁLCULO DE LA INTEGRAL ENTRE A Y T
QHU#(j#) = VOL# * SIMPS(A#, Abscisa(j#)) / THU#
Next j#

*****
*****

'INTEGRAL NÚMÉRICA POR TRAPECIOS PARA EL
'CÁLCULO DEL LA CURVA DE VOLUMEN ESTIMADO

'PONEMOS A CERO EL ACUMULADOR (AREA DEL HIDROGRAMA)
'Y VALOR DEL TIEMPO DESDE EL ORIGEN HASTA EL
'PRINCIPIO DEL INTERVALO TRAPECIAL
S2# = 0
DT0# = 0
VOLUMEN#(0) = 0

'CICLO PARA OBTENER EL AREA DEL HU Y CON ELLO LA
'CURVA DE VOLUMEN DE LÍQUIDO ACUMULADO ESTIMADO
For i1# = 0 To N_DATOS# - 1
SY# = QHU#(i1#) + QHU#(i1# + 1) 'OBTIENE LA SUMA DE LAS
'ORDENADAS DE LA PORCIÓN
'TRAPECIAL

SQ# = SY# * DT# * 0.5 'OBTIENE EL AREA DEL TRAPECIO
S2# = S2# + SQ# 'SUMA EL AREA AL ACUMULADOR S2

'ALMACENAMOS EN UNA MATRIZ LOS VOLUMENES ACUMULADOS
'OBTENIDOS
VOLUMEN#(i1# + 1) = S2#
'Print #1, i1#, "", Int(1000 * Abscisa(i1#)) / 1000, "", Int(1000 * NASH(Abscisa(i1#))) / 1000, "", Int(1000 * QHU(i1#)) / 1000, "",
VOLUMEN(i1#)

'OBTIENE LA DISTANCIA HASTA EL ORIGEN DE TIEMPOS
'DEL SIGUIENTE INTERVALO TRAPECIAL
DT0# = DT0# + DT#
Next i1#
*****

'AQUI EMPIEZA LA RUTINA NUMÉRICA DE REGRESIÓN
Error# = 0

For J1# = N_MIN# To N_MAX#
Error# = Error# + (Ordenada(J1#) - VOLUMEN#(J1#)) ^ 2
Print #1, Ordenada(J1#), VOLUMEN(J1#)
Next J1#

If Indice% = 0 Then
Error_1# = Error#
Indice% = 1
End If

If Error# <= Error_1# Then
m1# = FK#
n1# = FN#
Error_1# = Error#
End If

'Print #1, FK#, FN#, Error#

Next FN#
Next FK#

Close #1

Label13.Caption = Int(10000 * m1#) / 10000

```

Form1 - 5

```

Label15.Caption = Int(10000 * n1#) / 10000

ProgressBar1.Value = 0
'Print N_Datos#

'End
Command2.Enabled = True
End Sub

Private Sub Command2_Click()

N_DATOS# = 7000
FK# = 37.9
FN# = 1.8

'PARAMETROS DE INTEGRACIÓN CON LA REGLA DE SIMPSON
EXPONENTE# = Text1.Text
ITERACIONES# = Text2.Text

'PARÁMETROS DEL DATALOGGER Y DE LA APLICACIÓN DEL RIEGO
VOL# = Text3.Text
DT# = Text4.Text / 3600

'THU es el tiempo del intervalo finito de lluvia
'es decir vamos a obtener el HU de THU horas ( o
'de la unidad que estemos empleando) de duración
THU# = Text5.Text / 60
*****

'GAMMA:
*****
*****
'CÁLCULO DE GAMMA(X) PARA X>0
'PARA X>1 SE APLICA DIRECTAMENTE
'EL CÁLCULO DEL LN(GAMMA(X)) A PARTIR
'DE LA APROXIMACIÓN PARA 6 TÉRMINOS
'PROPUESTA POR LANZOS
'PARA 0<X<1 SE EMPLEA LA FÓRMULA DE REFLEXIÓN.
'(TOMADO DE "NUMERICAL RECIPES IN C", W.H. PRESS EL AL.
'1992 Y DE AYUSO J.L. 1990).
*****

Dato# = FN#
If Dato# < 1 Then
pi# = 3.14159265358979
z# = 1 - Dato#
u# = 2 - Dato#
zz# = Exp(gammln(u#))
GAMMA# = pi# * z# / zz# / Sin(pi# * z#)
Else
GAMMA# = Exp(gammln(Dato#))
End If

GMM# = GAMMA#

*****
'CÁLCULO DE LA CONVOLUCIÓN: HUI-->HU

Open "G:\oro\TEST_Q" For Output As #1

For j# = 0 To N_DATOS# - 1
If Abscisa(j#) <= THU# Then
A# = 0
Else
A# = Abscisa(j#) - THU#
End If

'LLAMA A LA FUNCION SIMPS PARA EL
'CÁLCULO DE LA INTEGRAL ENTRE A Y T
QHU#(j#) = VOL# * SIMPS(A#, Abscisa(j#)) / THU#

'Print #1, j#, Int(100000000 * QHU(j#))

```

Form1 – 6

Print #1, j#, Int(1000000000 \* QHU(j#)) / 1000000000

Next j#

Close #1

\*\*\*\*\*  
\*\*\*\*\*

'INTEGRAL NÚMÉRICA POR TRAPECIOS PARA EL  
'CÁLCULO DEL LA CURVA DE VOLUMEN ESTIMADO

'PONEMOS A CERO EL ACUMULADOR (AREA DEL HIDROGRAMA)  
'Y VALOR DEL TIEMPO DESDE EL ORIGEN HASTA EL  
'PRINCIPIO DEL INTERVALO TRAPECIAL

S2# = 0

DT0# = 0

VOLUMEN#(0) = 0

'CICLO PARA OBTENER EL AREA DEL HU Y CON ELLO LA  
'CURVA DE VOLUMEN DE LÍQUIDO ACUMULADO ESTIMADO

Open "G:\oro\TEST\_V" For Output As #1

For i1# = 0 To N\_DATOS# - 1

SY# = QHU#(i1#) + QHU#(i1# + 1) 'OBTIENE LA SUMA DE LAS  
'ORDENADAS DE LA PORCIÓN  
'TRAPECIAL

SQ# = SY# \* DT# \* 0.5 'OBTIENE EL AREA DEL TRAPECIO

S2# = S2# + SQ# 'SUMA EL AREA AL ACUMULADOR S2

'ALMACENAMOS EN UNA MATRIZ LOS VOLUMENES ACUMULADOS  
'OBTENIDOS

VOLUMEN#(i1# + 1) = S2#

'Print #1, i1#, Int(1000000000 \* VOLUMEN(i1#))

Print #1, i1#, Int(1000000000 \* VOLUMEN(i1#)) / 1000000000

'OBTIENE LA DISTANCIA HASTA EL ORIGEN DE TIEMPOS  
'DEL SIGUIENTE INTERVALO TRAPECIAL

DT0# = DT0# + DT#

Next i1#

\*\*\*\*\*

Close #1

End

End Sub

Form1 - 1

```
*****
'* GAMMA v1.0 *
*****
```

```
Dim x#, tmp#, ser#
Dim cof(5) As Double
```

Function gammln(xx#) As Double

```
'OBTIENE EL VALOR DE LN(GAMMA(XX#)), PARA XX#>1
cof(0) = 76.1800917294715
cof(1) = -86.5053203294168
cof(2) = 24.0140982408309
cof(3) = -1.23173957245015
cof(4) = 1.20865097386617E-03
cof(5) = -5.395239384953E-06
```

```
x# = xx# - 1
```

```
tmp# = x# + 5.5
tmp# = (x# + 0.5) * Log(tmp#) - tmp#
ser# = 1.00000000019001
```

```
For j% = 0 To 5
x# = x# + 1
ser# = ser# + cof(j%) / x#
Next j%
```

```
gammln# = tmp# + Log(2.506628274631 * ser#)
```

End Function

Private Sub Command1\_Click()

```
*****
'CÁLCULO DE GAMMA(X) PARA X>0
'PARA X>1 SE APLICA DIRECTAMENTE
'EL CÁLCULO DEL LN(GAMMA(X)) A PARTIR
'DE LA APROXIMACIÓN PARA 6 TÉRMINOS
'PROPUESTA POR LANZOS
'PARA 0<X<1 SE EMPLEA LA FÓRMULA DE REFLEXIÓN.
'(TOMADO DE "NUMERICAL RECIPES IN C", W.H. PRESS EL AL.
'1992 Y DE AYUSO J.L. 1990).
*****
```

```
dato# = Text1.Text
If dato# < 1 Then
pi# = 3.14159265358979
z# = 1 - dato#
u# = 2 - dato#
zz# = Exp(gammln(u#))
gamma# = pi# * z# / zz# / Sin(pi# * z#)
Else
gamma# = Exp(gammln(dato#))
End If
```

```
Label2.Caption = gamma#
```

End Sub

Form1 - 1

```
*****
*   SIMPSON v1.0   *
*****
```

```
Function FUNC(X#) As Double
FN# = 1.75742
FK# = 2.64053
GMM# = 0.920773365
TT# = X# / FK#
FUNC# = (TT# ^ (FN# - 1)) / (FK# * GMM#) * Exp(-TT#)
```

```
End Function
Function SIMPS(A#, B#) As Double
```

```
'Definimos los Parámetros
EPS# = 1 * 10 ^ -20
JMAX% = 15
```

```
'Valor inicial de la integral
'o área encerrada entre la función
'y los límites (a,b)
SOLD# = 0
```

```
'Ciclo para el cálculo de la integral.
'Se inicia dividiendo el intervalo en
'dos partes para continuar dividiendo
'en 4,8,16,....2^n
For j% = 1 To JMAX%
'N=número de partes de amplitud h en
'que se divide el intervalo (a,b)
N# = 2 ^ j%
'M=número de partes de amplitud 2*h
'en que se divide el intervalo (a,b)
M# = N# / 2
'límite inferior del intervalo en que
'se calcula la integral
X# = A#
'amplitud o paso del intervalo de la
'función que se integra
H# = (B# - A#) / N#
'Valor inicial del acumulador S
S# = 0
```

```
'Ciclo para calcular las M áreas de
'amplitud 2*h en que se ha dividido
'el intervalo (a,b)
For i% = 1 To M#
'Acumula las áreas obtenidas
S# = S# + H# * (FUNC(X#) + 4 * FUNC(X# + H#) + FUNC(X# + 2 * H#)) / 3
```

```
'Establece el límite inferior de la siguiente área
X# = X# + 2 * H#
Next i%
```

```
'Comprueba si el valor del área obtenida
'es menor en 10^-6 del valor del área anterior
If Abs(SOLD# - S#) <= EPS# Then GoTo fin_función
'Asigna como valor del área antigua el área obtenida
SOLD# = S#
'Inicia otro nuevo ciclo dividiendo el intervalo
'en el doble de divisiones que anteriormente
Next j%
```

```
fin_función:
'Asignación del valor final del área para la salida
```

Form1 - 2

```
'de la función  
SIMPS# = S#  
End Function
```

```
Private Sub Command1_Click()  
Area# = SIMPS(0, 40)  
Print Area#  
End Sub
```

Form1 – 1

```
'GRABADOR DE LA EEPROM 24LC256 CON UN
'P.C. Y UN 4066
'(c) Antonio Madueño Luna
'Sevilla 20 de Abril de 2000
```

```
Dim a(15) As Integer
Dim Datos_Fichero(32768) As Integer
Dim Numero_de_Lineas As Double
```

```
'PAUSA PARA LA GRABACIÓN DE DATOS EN LA EEPROM
Sub Pausa()
For t% = 0 To 100
For u% = 0 To 200
Next u%
Next t%
End Sub
```

```
'RETARDO PARA ALARGAR LOS PULSOS
Sub Retardo()
For l% = 1 To 1
For k% = 1 To 2
Next k%
Next l%
End Sub
```

```
'DESCRIPCIÓN:
'CIRCUITO ORIGINAL CON EL 74HC244:
'D4= Línea de activación de la transferencia de datos
'del P.C. a la memoria
'D3= Línea de datos P.C-->memoria
'D2= Línea de activación de la transferencia de datos
'de la memoria al P.C.
'D0= Línea del reloj serie (SLC)
'E3= Línea de recepción de datos del P.C.
```

```
'NUEVO CIRCUITO CON EL 4066:
'D6= Línea de salida del P.C. para la verificación del
'cable que enlaza a este con el afinador
'D5= Línea de activación de la transferencia de datos
'del P.C. a la memoria (equivalente al D4 del otro circuito)
'pero aquí trabaja invertido
'D4= Se usa en la otra variante
'D3= Línea de datos P.C-->memoria
'D2= Se usa en la otra variante (Sin equivalente)
'D1= Línea de activación de la grabación de datos
'D0= Línea del reloj serie (SLC)
'E3= Línea de recepción de datos del P.C.
'-----
```

```
'ESTA FUNCIÓN LEE EL DATO DE LA EEPROM Y LO ENVIA
'AL P.C. A TRAVÉS DE LA LÍNEA E3 DE REGISTRO DE ESTADO
'DEL PUERTO PARALELO
```

```
Function Lee() As Integer
Dato% = 0
Call vbOut(&H378, 0 + 32 + 0 + 0 + 4 + 2 + 0)
Call Retardo
For z% = 0 To 7
Call vbOut(&H378, 0 + 0 + 16 + 0 + 0 + 2 + 0)
Call Retardo
Call vbOut(&H378, 0 + 0 + 16 + 0 + 0 + 2 + 1)
Call Retardo
x% = (vbInp(&H379) And 8) / 8
Dato% = Dato% + x% * 2 ^ (7 - z%)
Call vbOut(&H378, 0 + 0 + 16 + 0 + 0 + 2 + 0)
Call Retardo
Next z%
Lee% = Dato%
Call vbOut(&H378, 0 + 32 + 0 + 0 + 4 + 2 + 0)
Call Retardo
End Function
```

```
'ESTA SUBRRUTINA DEFINE EL ACK (RECONOCIMIENTO)
```

Form1 - 2

'NECESARIO PARA VALIDAR LAS OPERACIONES CON EL BUS  
'I2C

```
Sub Reconoce()
Call vbOut(&H378, 0 + 32 + 0 + 0 + 4 + 2 + 0)
Call Retardo
Call vbOut(&H378, 0 + 0 + 16 + 0 + 0 + 2 + 0)
Call Retardo
Call vbOut(&H378, 0 + 0 + 16 + 0 + 0 + 2 + 1)
Call Retardo
x% = (vbInp(&H379) And 8) / 8
Call vbOut(&H378, 0 + 0 + 16 + 0 + 0 + 2 + 0)
Call Retardo
Call vbOut(&H378, 0 + 32 + 0 + 0 + 4 + 2 + 0)
Call Retardo
End Sub
```

'ESTA SUBRRUTINA CONVIERTE DE DECIMAL A BINARIO  
'PARA ASÍ ENVIAR LOS BITS A LA EEPROM

```
Sub Conv_Bin(Código#)
For j% = 0 To 15
a(15 - j%) = Código# Mod 2
Código# = Código# \ 2
Next j%
End Sub
```

'ESTA ES LA SUBRRUTINA QUE SE USA TANTO  
'PARA ENVIAR COMANDOS COMO DATOS A LA EEPROM

```
Sub Escribe(Palabra#, n_min%, n_max%)
Call Conv_Bin(Palabra#)
For i% = n_min% To n_max%
'Print a(i%)
Call vbOut(&H378, 0 + 32 + 0 + 0 + 4 + 2 + 0)
Call Retardo
Call vbOut(&H378, 0 + 32 + 0 + 8 * a(i%) + 4 + 2 + 0)
Call Retardo
Call vbOut(&H378, 0 + 32 + 0 + 8 * a(i%) + 4 + 2 + 1)
Call Retardo
Call vbOut(&H378, 0 + 32 + 0 + 8 * a(i%) + 4 + 2 + 0)
Call Retardo
Call vbOut(&H378, 0 + 32 + 0 + 0 + 4 + 2 + 0)
Call Retardo
Next i%
End Sub
```

'SUBRRUTINA QUE GENERA EL PROTOCOLO DE STOP EN  
'LA COMUNICACIÓN CON LA EEPROM

```
Sub Fin()
Call vbOut(&H378, 0 + 32 + 0 + 0 + 4 + 2 + 0)
Call Retardo
Call vbOut(&H378, 0 + 32 + 0 + 0 + 4 + 2 + 1)
Call Retardo
Call vbOut(&H378, 0 + 32 + 0 + 8 + 4 + 2 + 1)
Call Retardo
Call vbOut(&H378, 0 + 32 + 0 + 8 + 4 + 2 + 0)
Call Retardo
End Sub
```

'SUBRRUTINA QUE GENERA EL PROTOCOLO DE START CON  
'LA EEPROM

```
Sub Inicio()
Call vbOut(&H378, 0 + 32 + 0 + 0 + 4 + 2 + 0)
Call Retardo
Call vbOut(&H378, 0 + 32 + 0 + 8 + 4 + 2 + 0)
Call Retardo
Call vbOut(&H378, 0 + 32 + 0 + 8 + 4 + 2 + 1)
Call Retardo
Call vbOut(&H378, 0 + 32 + 0 + 0 + 4 + 2 + 1)
Call Retardo
Call vbOut(&H378, 0 + 32 + 0 + 0 + 4 + 2 + 0)
End Sub
```

'SUBRRUTINA DE GRABACIÓN

Form1 - 3

```
Sub I2C_Graba(Dirección#, Dato#)
aa# = Dirección#
bb# = Dirección#
'Print Dirección#
'Print
```

```
'AQUÍ SE INICIA LA RUTINA DE GRABACIÓN
Call Inicio
'Control
Call Escribir(160, 8, 15)
Call Reconoce
'Dirección alta
'Print
Call Escribir(aa#, 0, 7)
Call Reconoce
'Dirección baja
'Print
Call Escribir(bb#, 8, 15)
Call Reconoce
'Dato
'Print
Call Escribir(Dato#, 8, 15)
Call Reconoce
Call Fin
End Sub
```

```
'FUNCIÓN DE LECTURA DE LOS DATOS DE LA EEPROM
Function I2C_Lee(Dirección#) As Integer
cc# = Dirección#
dd# = Dirección#
'Aquí se inicia la rutina de lectura
Call Inicio
'Control
Print
Call Escribir(160, 8, 15)
Call Reconoce
'Dirección alta
Print
Call Escribir(cc#, 0, 7)
Call Reconoce
'Dirección baja
Print
Call Escribir(dd#, 8, 15)
Call Reconoce
'Comienza la lectura
Call Inicio
Print
Call Escribir(161, 8, 15)
Call Reconoce
'Dato
I2C_Lee% = Lee%
'Sin Reconocimiento
Call Fin
End Function
```

```
'ACTIVA LA FINALIZACIÓN DEL PROGRAMA
'Y PERMITE AL MICROCONTROLADOR TOMAR
'EL CONTROL DE LA MEMORIA
Private Sub Command1_Click()
Call vbOut(&H378, 0 + 0 + 16 + 0 + 4 + 0 + 0)
End
End Sub
```

```
Private Sub Command3_Click()
Command3.Enabled = False
```

```
'ABRIMOS EL FICHO DE DATOS A VOLCAR EN LA EEPROM
'Y LO GRABAMOS EN UNA MATRIZ
Numero_de_Lineas# = 0
nombre_1$ = Text1.Text
Open nombre_1$ For Input As #1 ' ABRIMOS EL ARCHIVO
Do While Not EOF(1) ' BUSCAMOS EL FINAL DEL ARCHIVO
```

Form1 - 4

```

Input #1, Datos_Fichero(Numero_de_Lineas#)
Numero_de_Lineas# = Numero_de_Lineas# + 1
Loop
Close #1 ' CERRAMOS EL ARCHIVO

'VOLCAMOS EL FICHERO EN LA EEPROM
For Dirección# = 0 To Numero_de_Lineas# - 1 'Quitamos uno por
'empezar por cero y otro uno para eliminar el EOF
Datos# = Datos_Fichero(Dirección#)
Call I2C_Graba(Dirección#, Datos#)
Call Pausa
ProgressBar1.Value = Int(100 * Dirección# / Numero_de_Lineas#)
Next Dirección#

ProgressBar1.Value = 0
End Sub

Private Sub Command4_Click()

'Leemos el fichero origen
'y la EEPROM y los volcamos
'en el fichero destino

nombre_2$ = Text2.Text
Open nombre_2$ For Output As #1

For h# = 0 To Numero_de_Lineas# - 1
Print #1, Datos_Fichero(h#), I2C_Lee(h#)
ProgressBar1.Value = Int(100 * h# / Numero_de_Lineas#)
Next h#

Close #1
ProgressBar1.Value = 0
End Sub

Private Sub HScroll1_Change()
Label4.Caption = HScroll1.Value
End Sub

Private Sub HScroll2_Change()
Label5.Caption = HScroll2.Value
End Sub

Private Sub Form_Load()
Repite:
Call vbOut(&H378, 0 + 0 + 16 + 0 + 4 + 0 + 0)
Test1% = (vbInp(&H379) And 32) / 32
Call vbOut(&H378, 64 + 0 + 16 + 0 + 4 + 0 + 0)
Test2% = (vbInp(&H379) And 32) / 32

If Test1% = 1 Or Test2% = 0 Then
Label2.Caption = "ERROR"
GoTo Repite
End If
End Sub

```

Module1 - 1

```
Declare Sub vbOut Lib "win95io.dll" (ByVal nPort As Integer, ByVal nData As Integer)
Declare Function vbInp Lib "win95io.dll" (ByVal nPort As Integer) As Integer
```

Form1 – 1

```

*****
'* MOTOR PAP v1.0 *
*****

'PAUSA ENTRE PULSOS
Sub Pausa_D()
For j% = 0 To Text2.Text
For k% = 0 To 20
Next k%
Next j%
End Sub
Sub Pausa_I()
For j% = 0 To Text4.Text
For k% = 0 To 20
Next k%
Next j%
End Sub

Private Sub Command1_Click()
'GIRO A DERECHAS
Tiempo% = Text2.Text
For i% = 1 To Text1.Text
Call vbOut(&H378, 10)
Pausa_D
Call vbOut(&H378, 6)
Pausa_D
Call vbOut(&H378, 5)
Pausa_D
Call vbOut(&H378, 9)
Pausa_D
Next i%
Call vbOut(&H378, 0)
End Sub

Private Sub Command2_Click()
End
End Sub

Private Sub Command3_Click()
'GIRO A IZQUIERDAS
For i% = 1 To Text3.Text
Call vbOut(&H378, 9)
Pausa_I
Call vbOut(&H378, 5)
Pausa_I
Call vbOut(&H378, 6)
Pausa_I
Call vbOut(&H378, 10)
Pausa_I
Next i%
Call vbOut(&H378, 0)
End Sub

```

Module1 – 1

```
Declare Sub vbOut Lib "win95io.dll" (ByVal nPort As Integer, ByVal nData As Integer)
Declare Function vbInp Lib "win95io.dll" (ByVal nPort As Integer) As Integer
```

Form1 - 1

```
*****
'*  FORMATO V1.0  *
*****
```

Dim a(32767) As String

```
'ESTE PROGRAMA PERMITE COMPATIBILIZAR
'EL FICHERO GENERADO POR EL CAUDALÍMETRO
'Y EL FORMATO DE ENTRADA DE DATOS QUE
'EXIGE VISUAL BASIC O EXCEL
```

```
'(C) ANTONIO MADUEÑO LUNA
'SEVILLA 19 DE ABRIL DE 2000
```

Private Sub Command1\_Click()

nombre\$ = Text1.Text

Open nombre\$ For Input As #1

Line Input #1, Cabecera\$

Do While Not EOF(1)

Input #1, Dato\$

Mid(Dato\$, 22, 1) = "," 'SUSTITUIAMOS EL PUNTO DECIMAL
'POR LA COMA DECIMAL

Dato\$ = Dato\$ + "00" 'AÑADIMOS CEROS A LA IZQUIERDA

a(i%) = Left\$(Dato\$, 25) 'PARA TENER SIEMPRE 25

i% = i% + 1 'CARACTERES POR LÍNEA

Loop

Close #1

nombre\$ = Text2.Text

Open nombre\$ For Output As #1

Print #1, Cabecera\$

For j% = 0 To i%

Print #1, a(j%)

Next j%

Close #1

End

End Sub

## 7.2. ENSAYOS

### 7.2.1. Salidas de la aplicación BOX-CAR-PRO v3.51

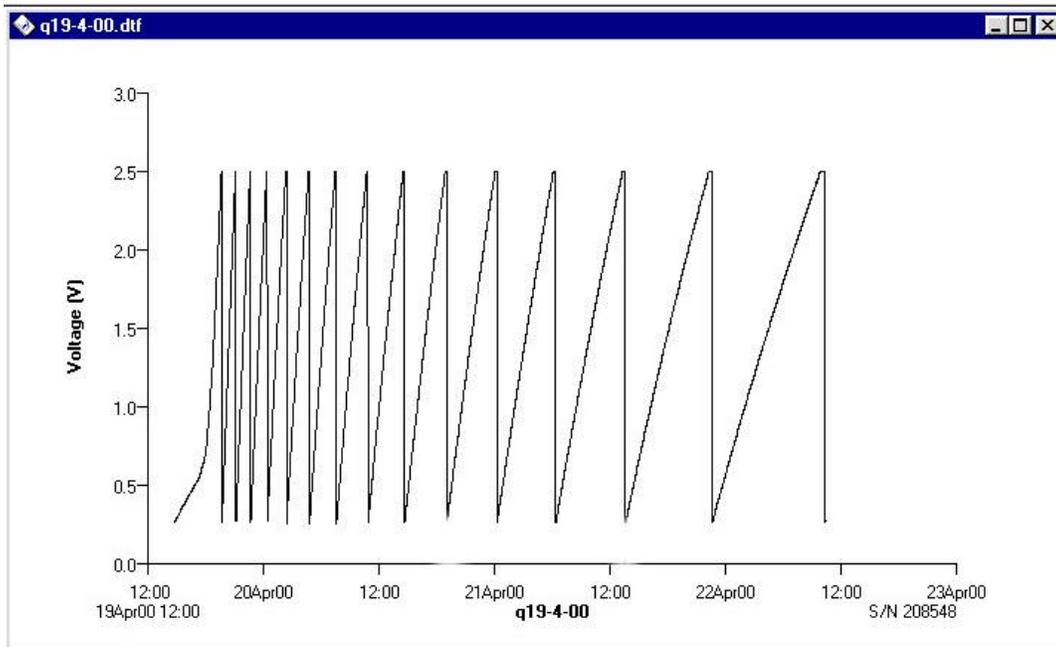


Figura 79. Ensayo Q19400-1.

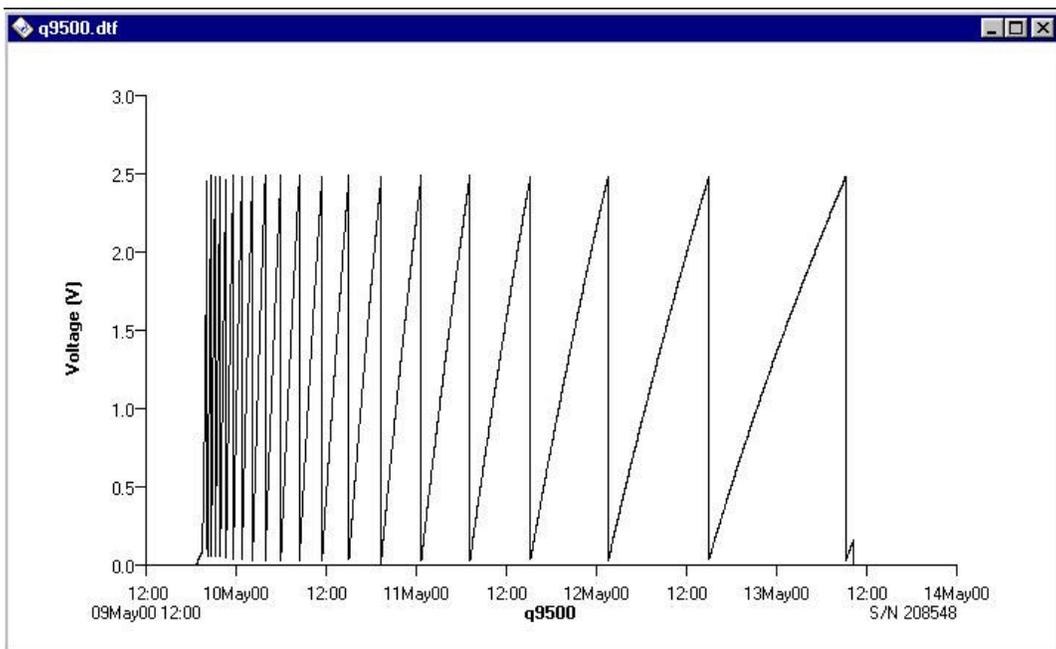


Figura 80. Ensayo Q9500-1.

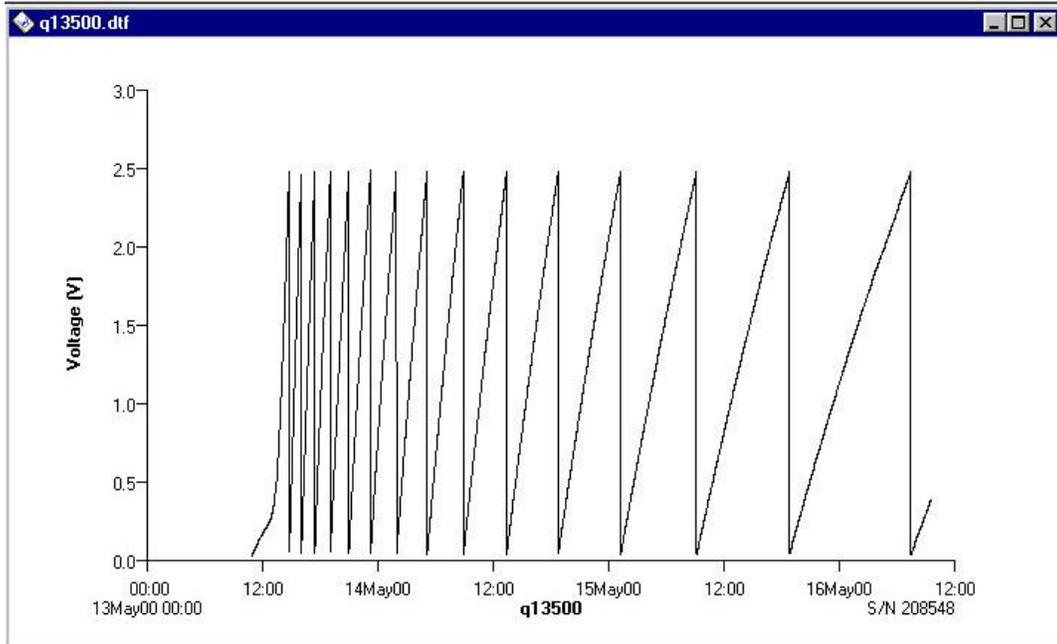


Figura 81. Ensayo Q13500-1.

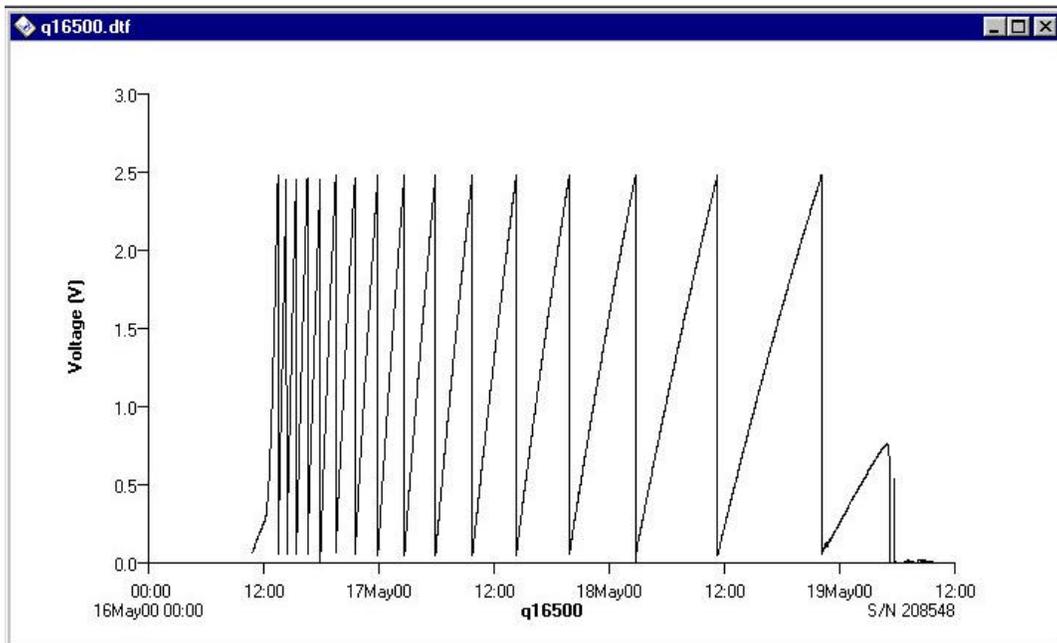


Figura 82. Ensayo Q16500-1.

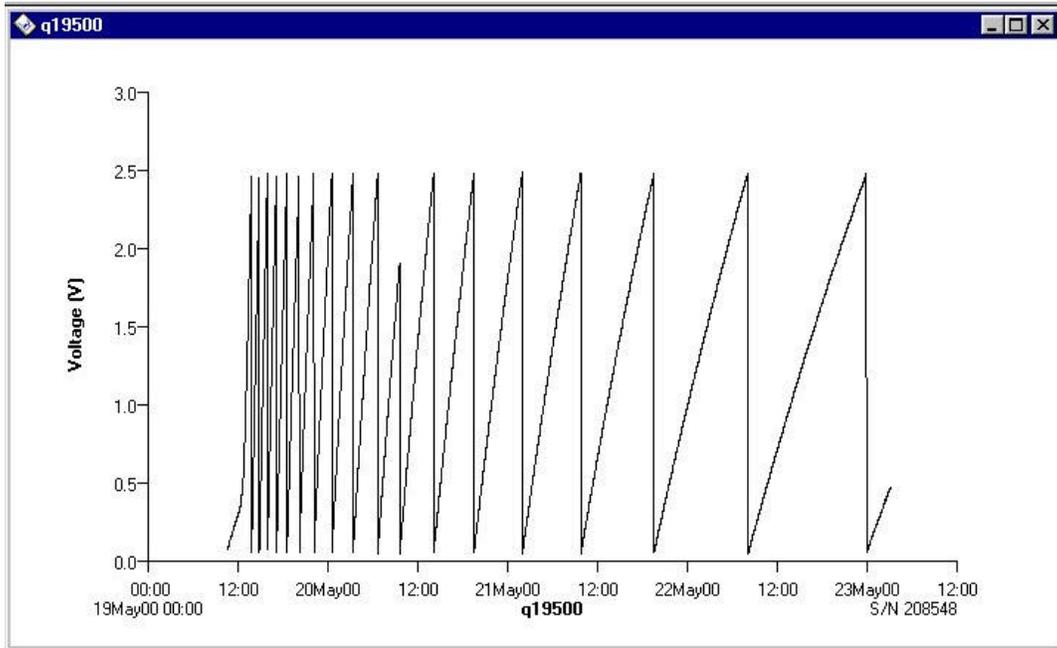


Figura 83. Ensayo Q19500-1.

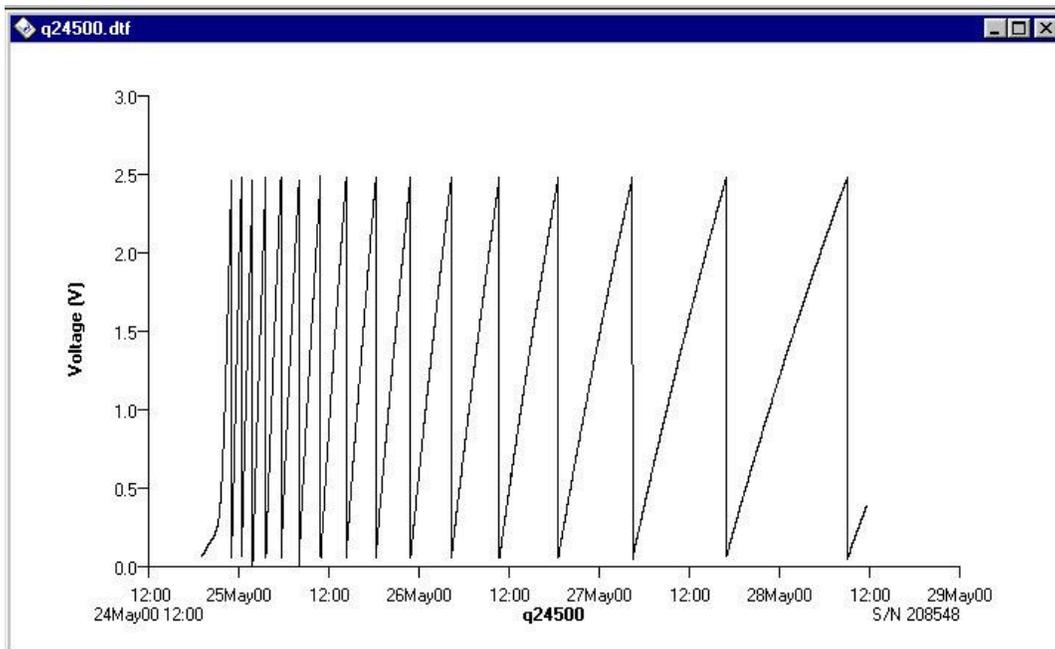


Figura 84. Ensayo Q24500-1.

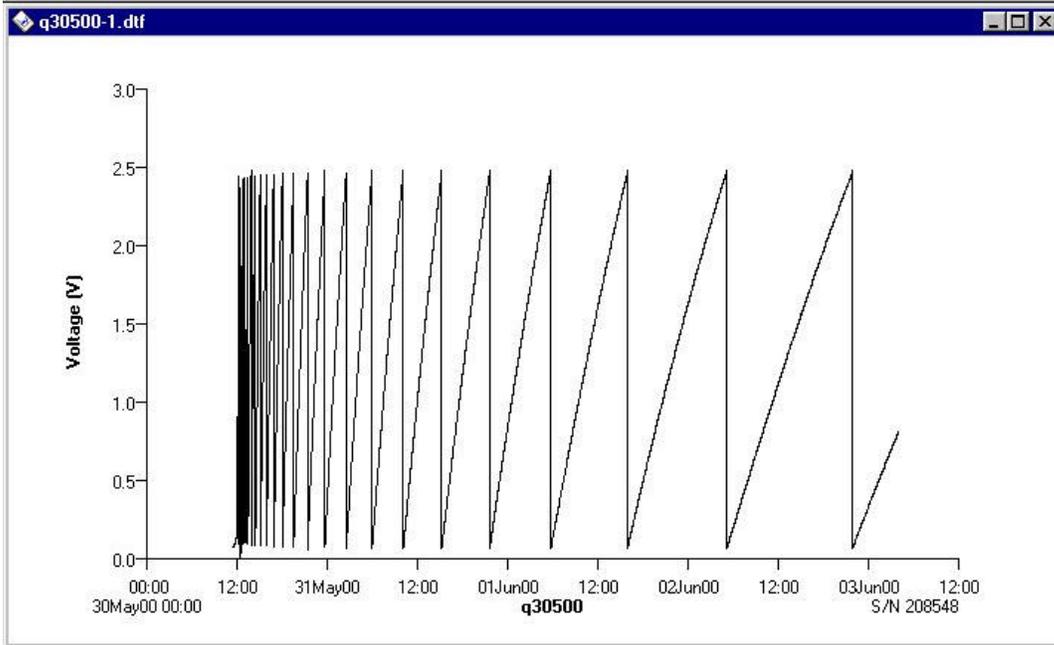


Figura 85. Ensayo Q30500-1.

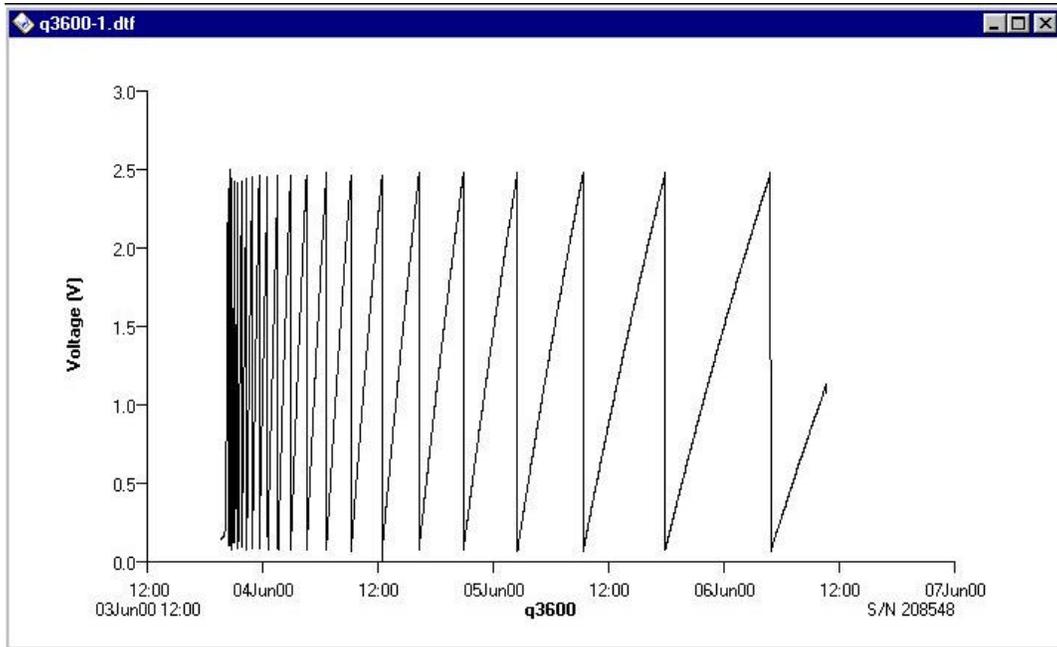


Figura 86. Ensayo Q3600-1.

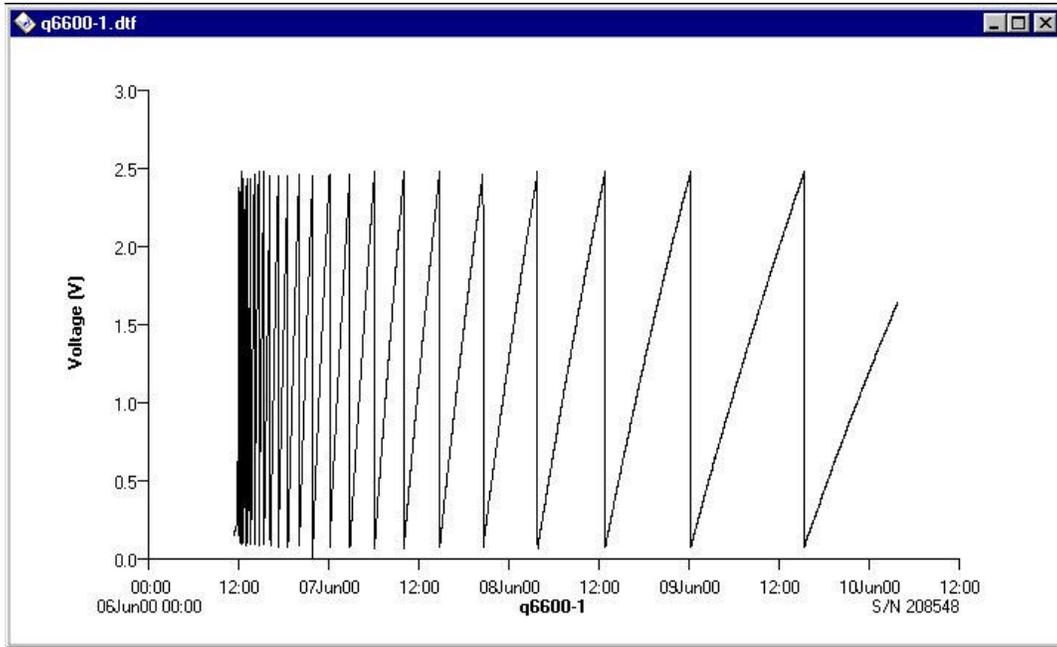


Figura 87. Ensayo Q6600-1.

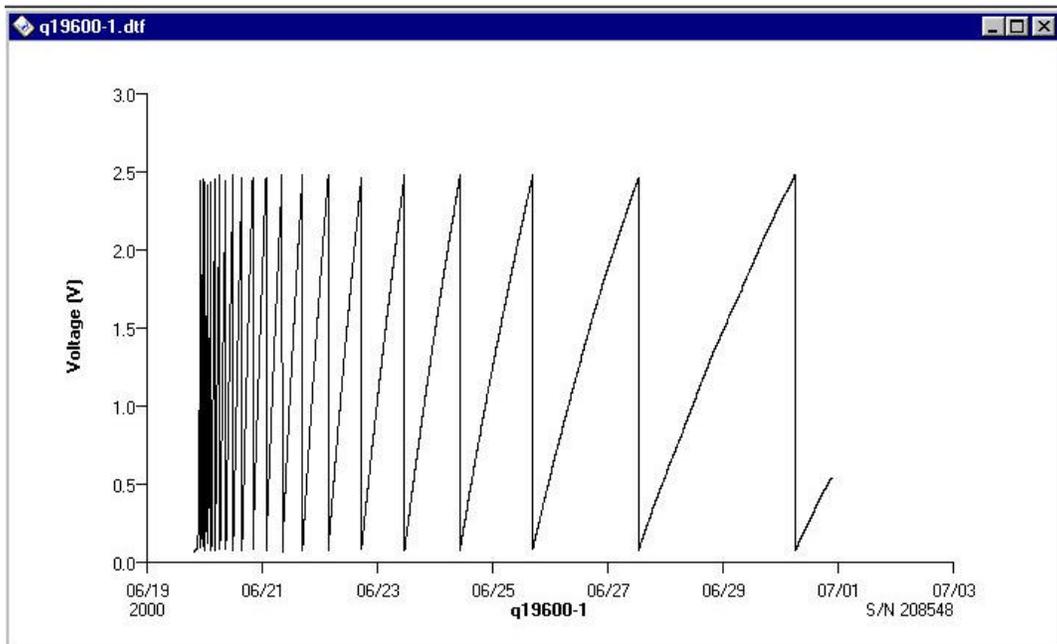


Figura 88. Ensayo Q19600-1.

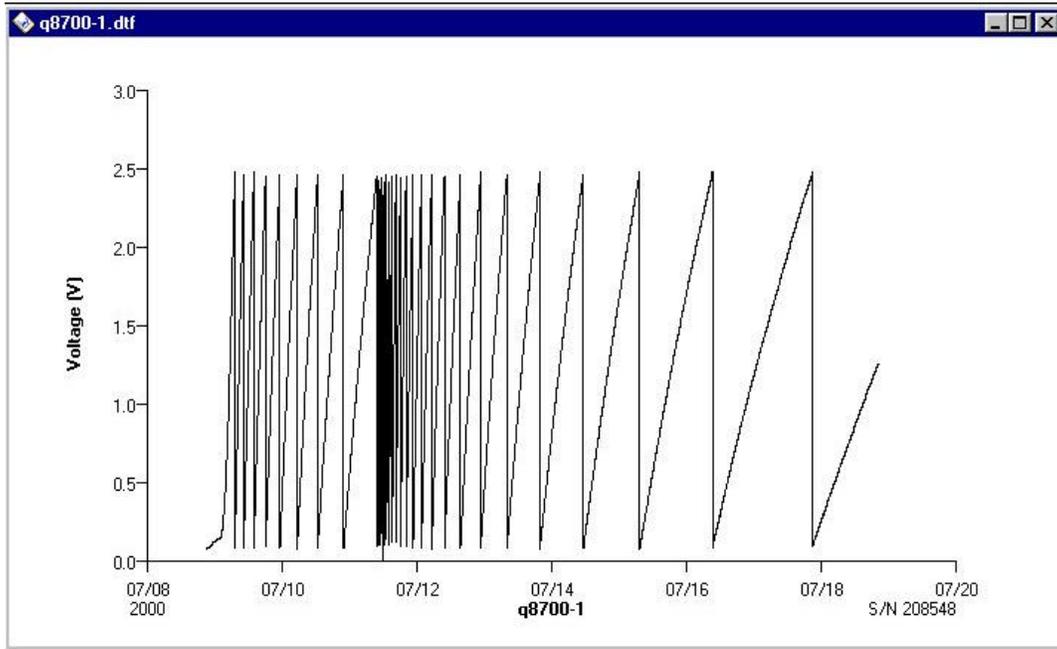


Figura 89. Ensayo conjunto Q8700-1 y Q11700-1.

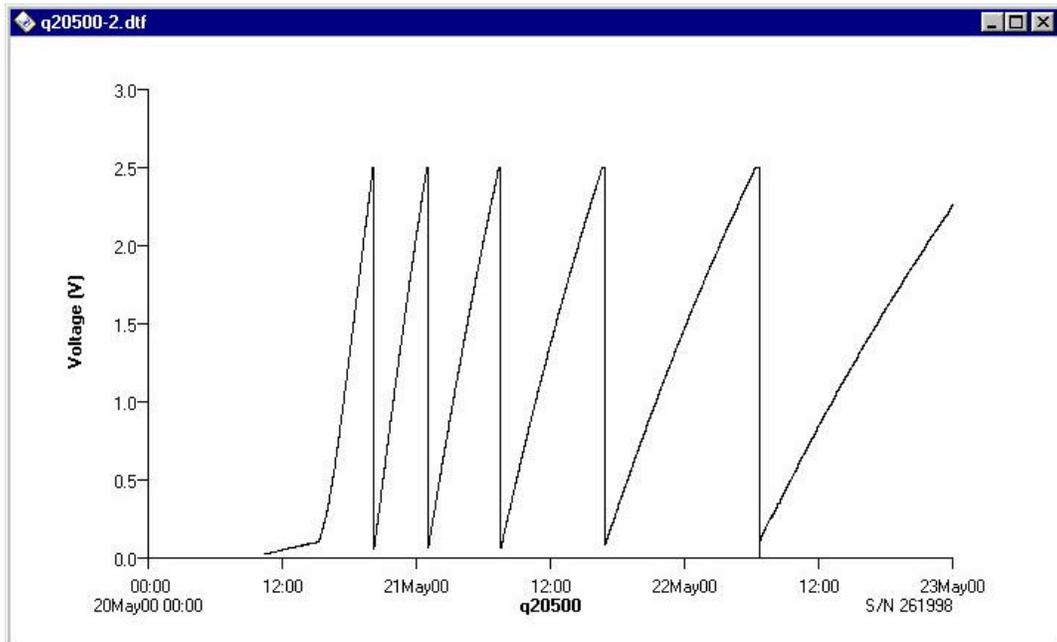


Figura 90. Ensayo Q20500-2.

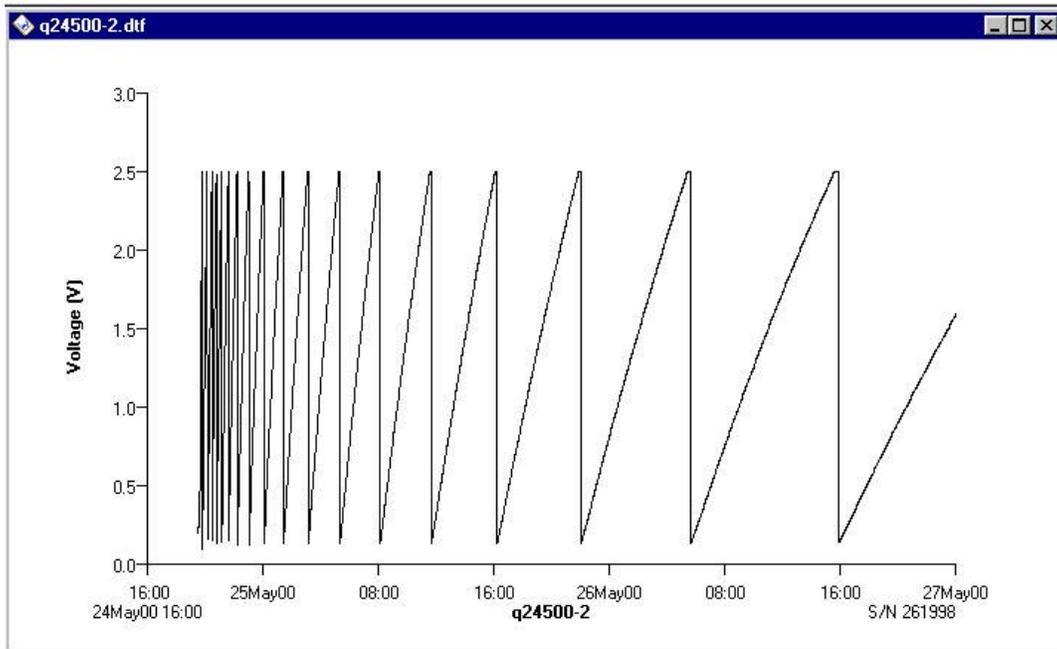


Figura 91. Ensayo Q24500-2.

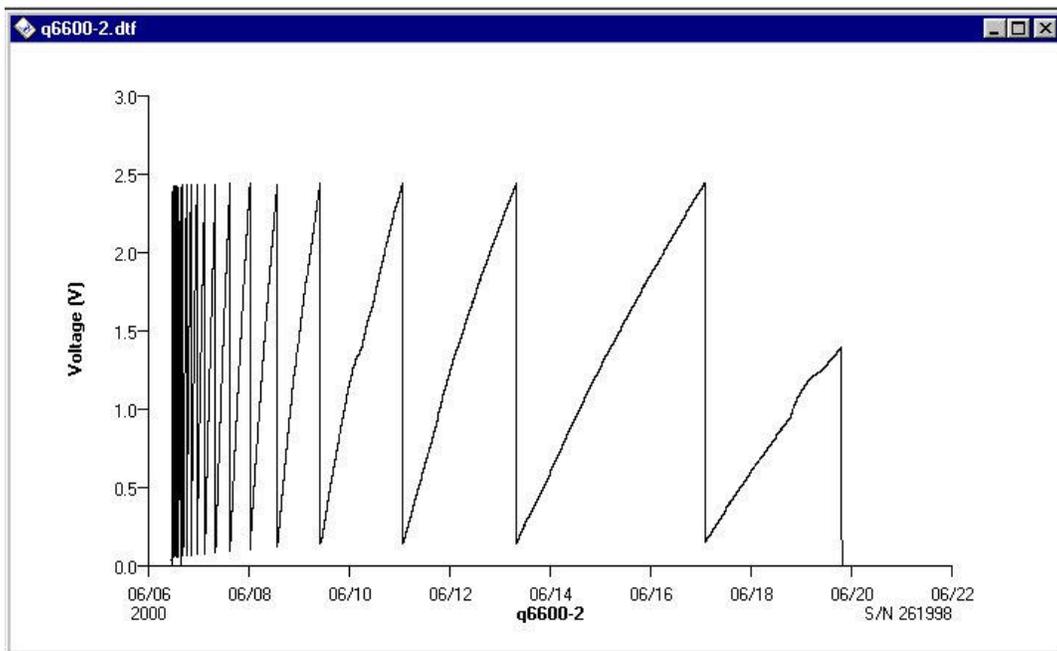


Figura 92. Ensayo Q6600-2.

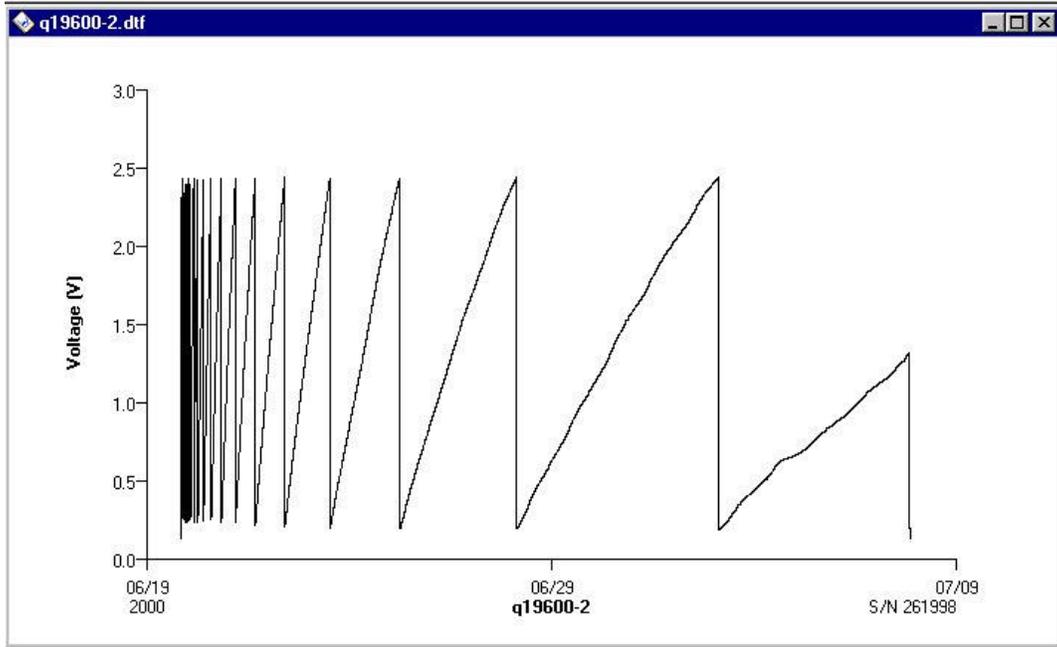


Figura 93. Ensayo Q19600-2.

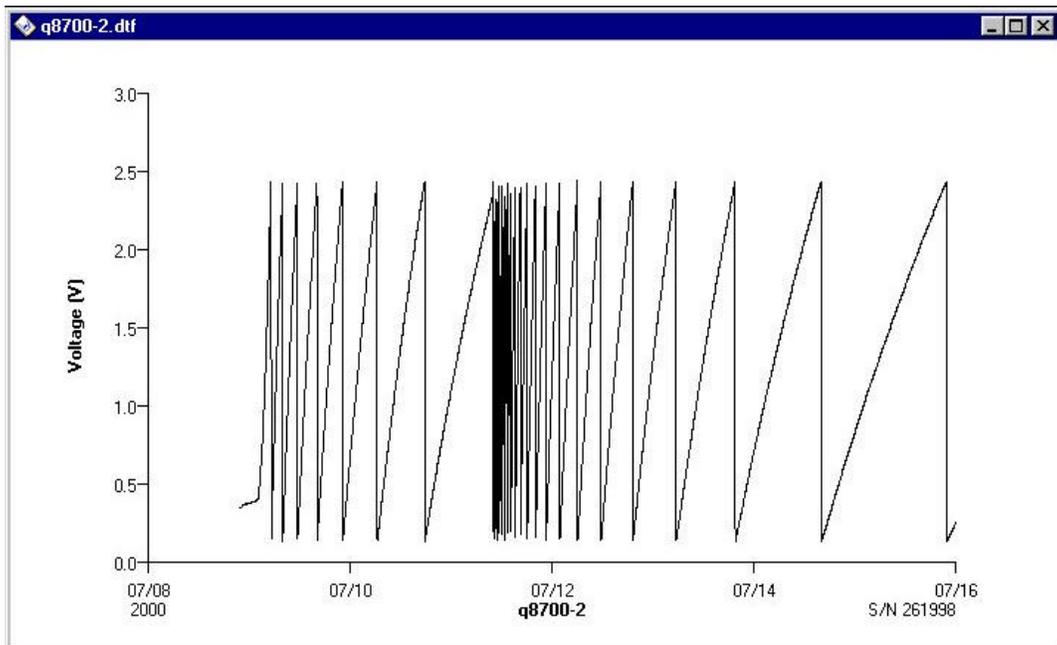


Figura 94. Ensayo Q8700-2.

7.2.2. Salidas de la aplicación Lisímetro v5.0.

Se presentan a continuación, para cada uno de los ensayos, los datos de campo una vez procesados por esta aplicación.

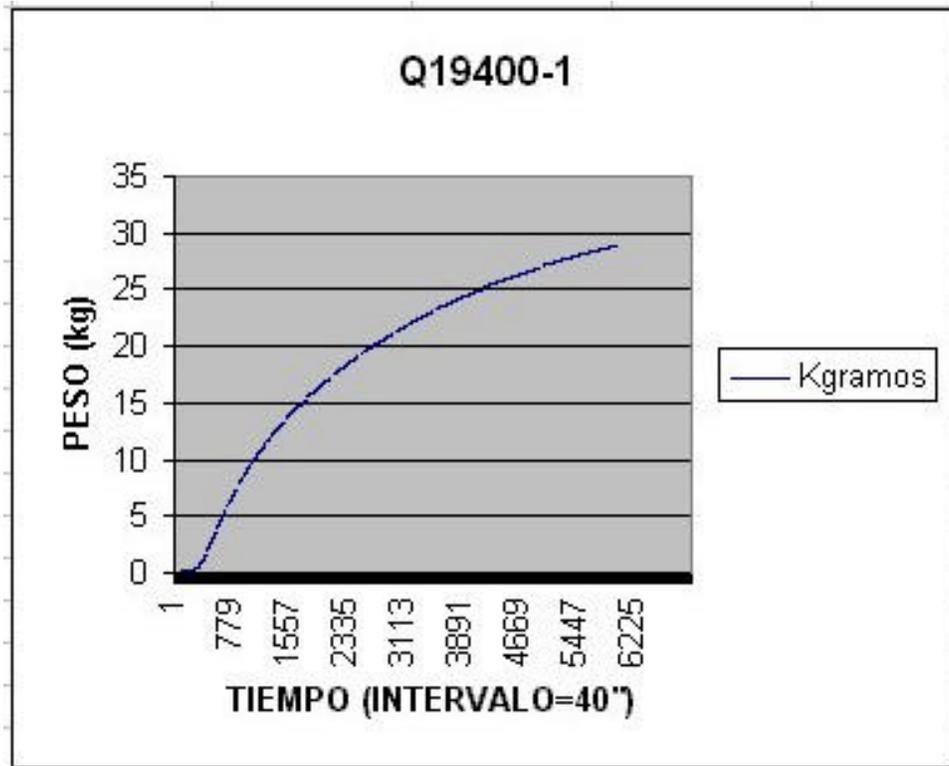


Figura 95. Salida Peso-Tiempo para el ensayo Q19400-1.

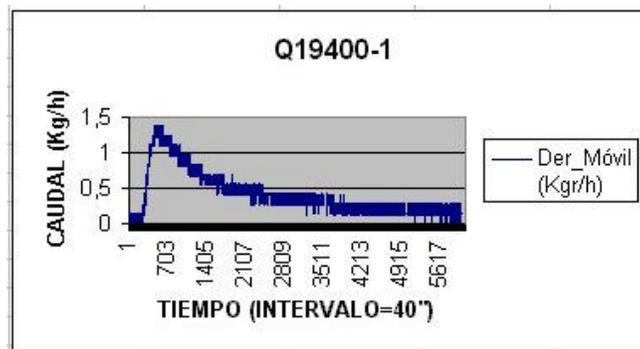


Figura 96. Caudal de salida para Q19400-1.

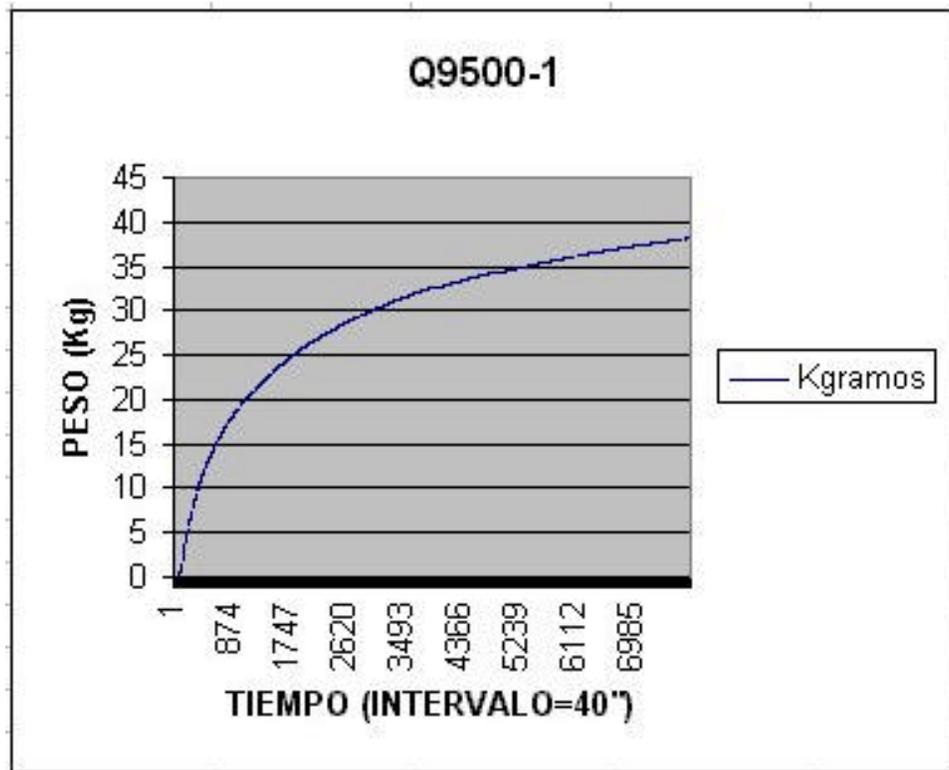


Figura 97. Salida Peso-Tiempo para el ensayo Q9500-1.

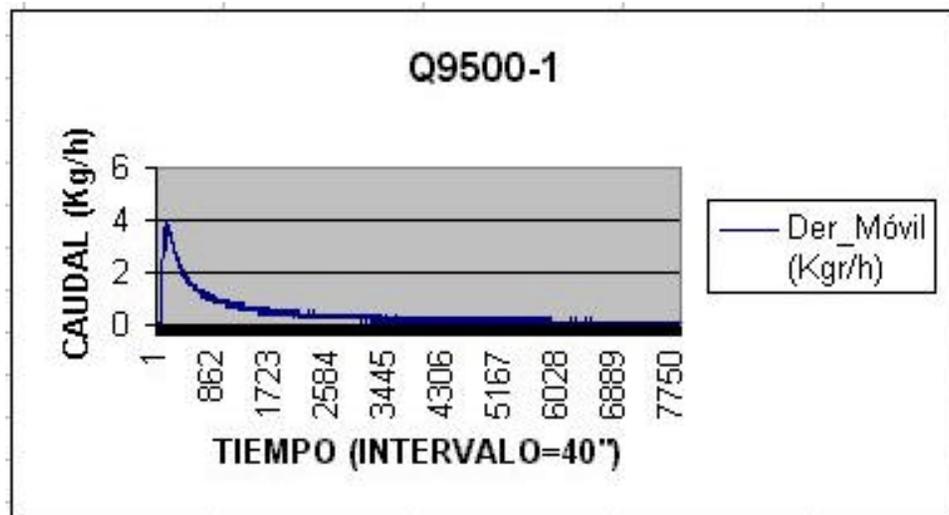


Figura 98. Caudal de salida para Q9500-1.

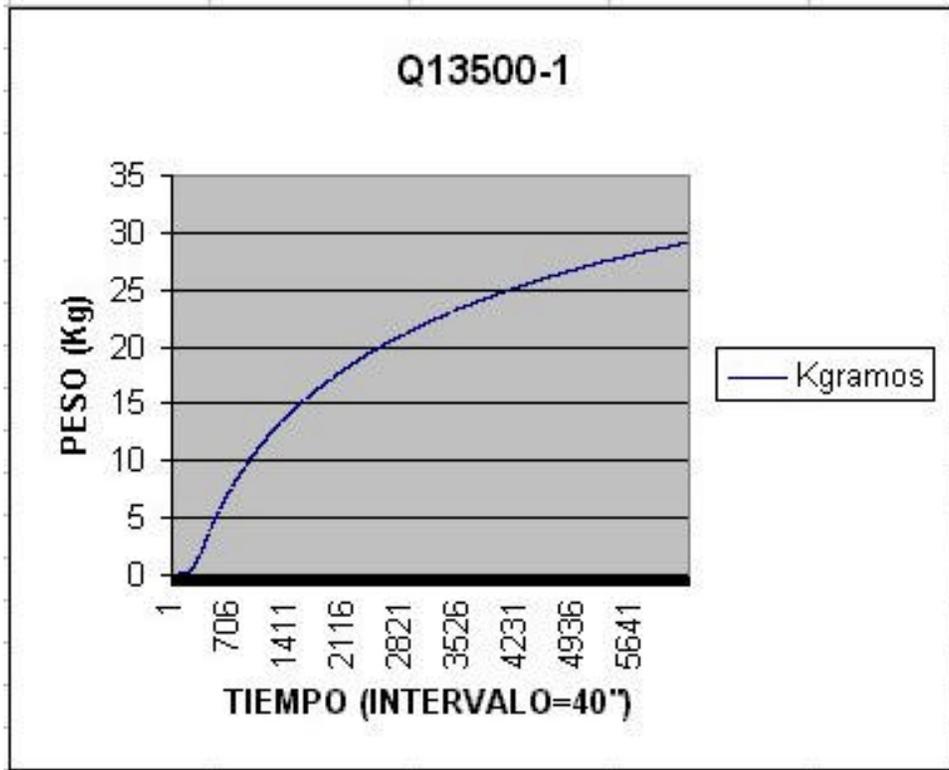


Figura 99. Salida Peso-Tiempo para el ensayo Q13500-1.

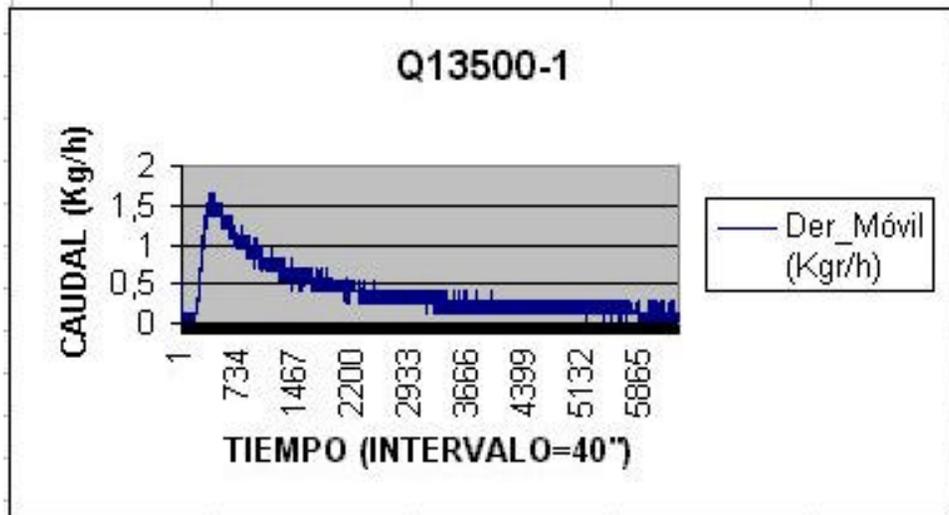


Figura 100. Caudal de salida para Q13500-1.

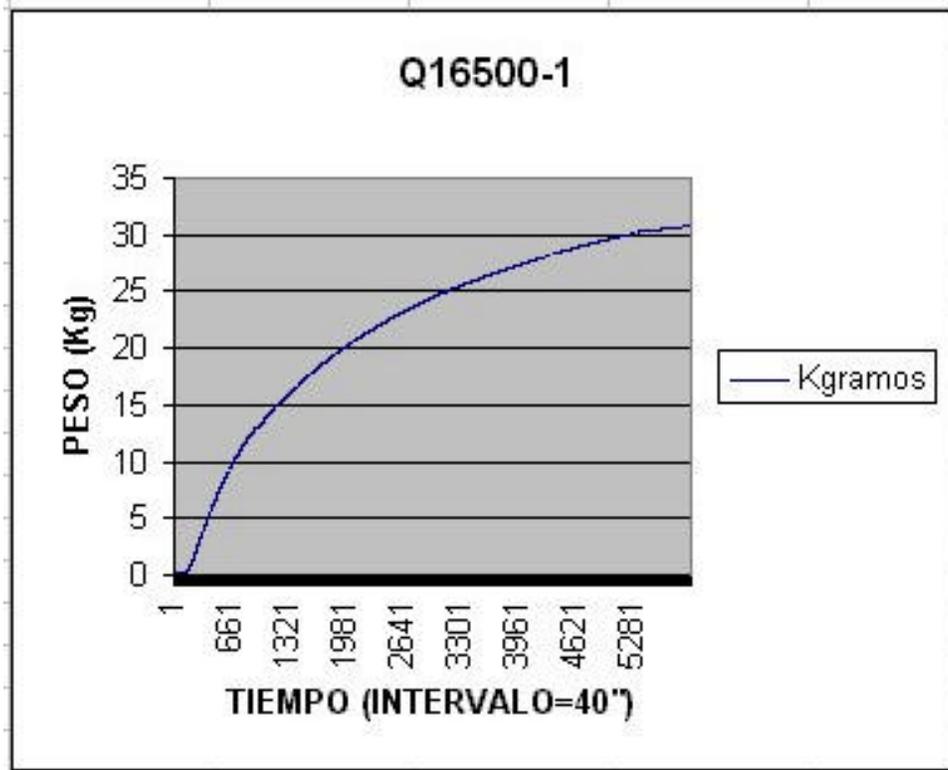


Figura 101. Salida Peso-Tiempo para el ensayo Q16500-1.

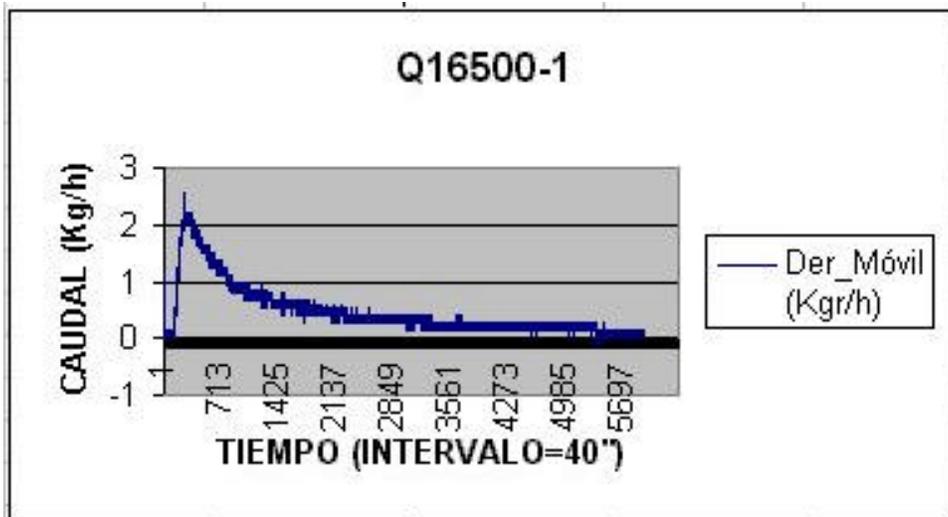


Figura 102. Caudal de salida para Q16500-1.

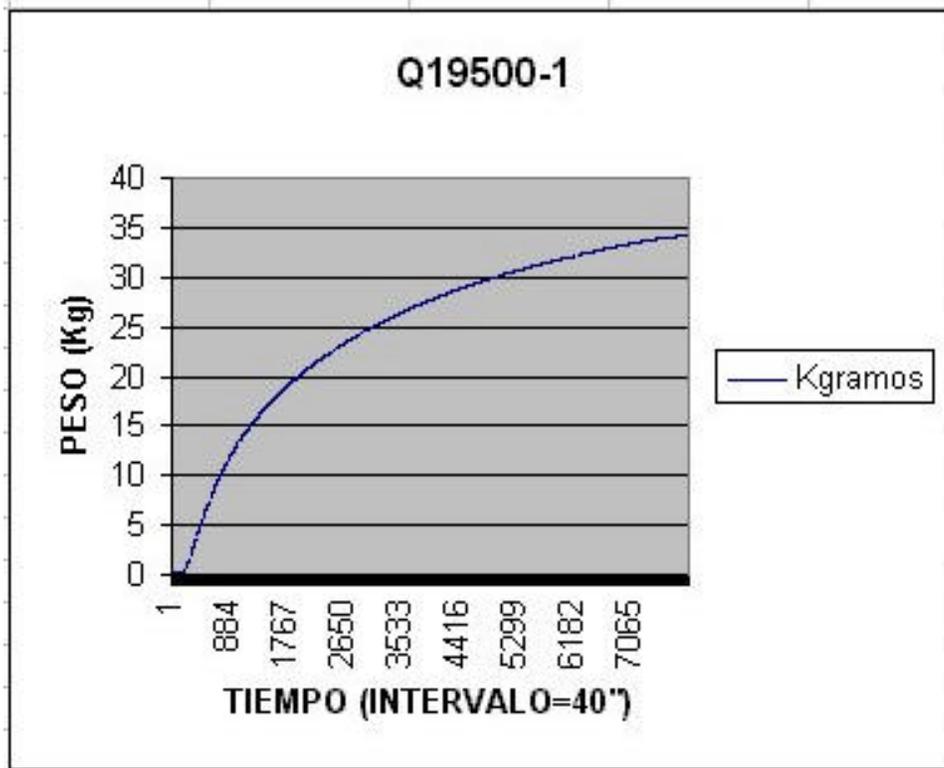


Figura 103. Salida Peso-Tiempo para el ensayo Q19500-1.

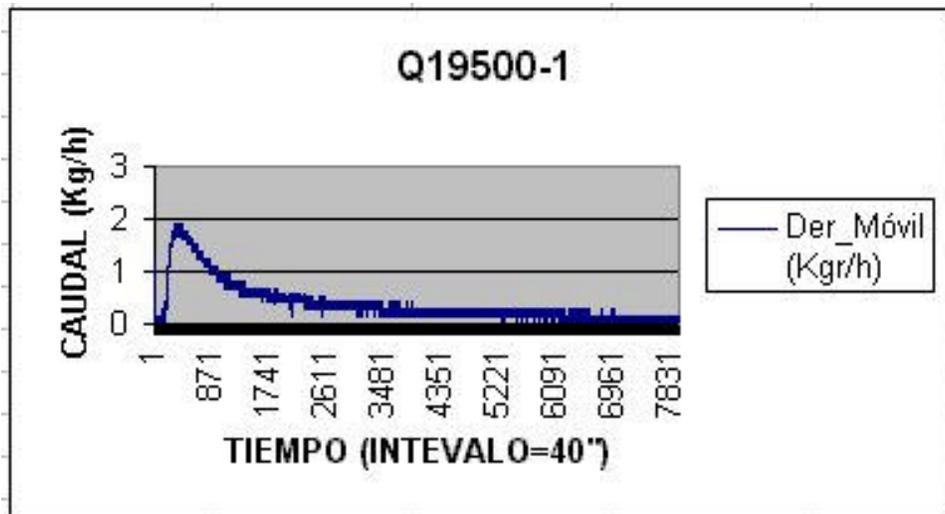


Figura 104. Caudal de salida para Q19500-1.

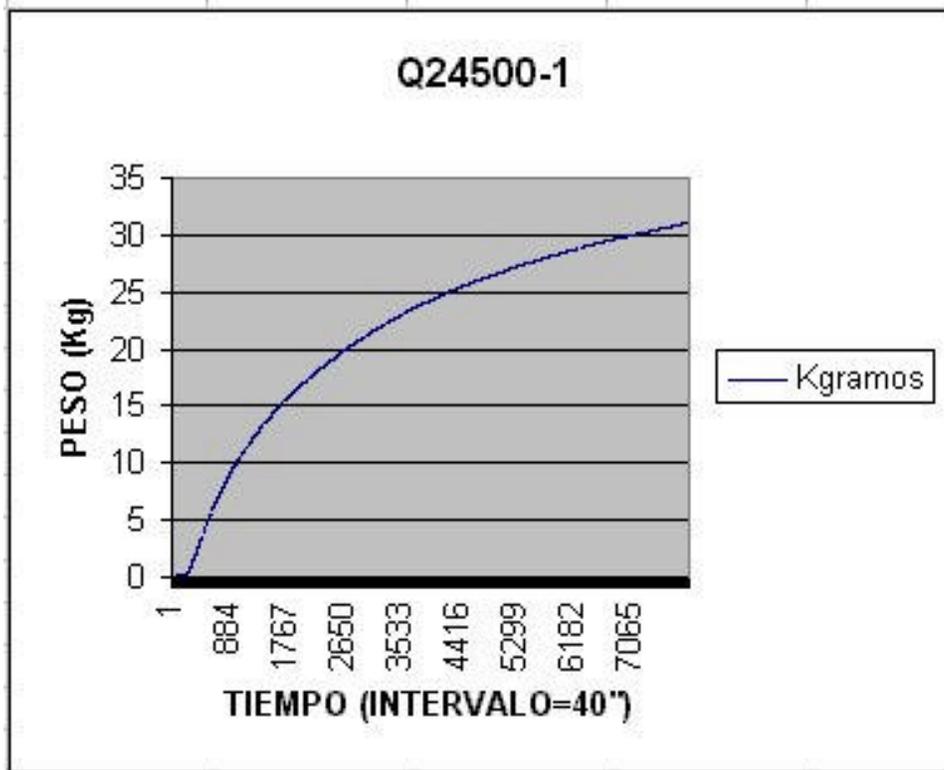


Figura 105. Salida Peso-Tiempo para el ensayo Q24500-1.

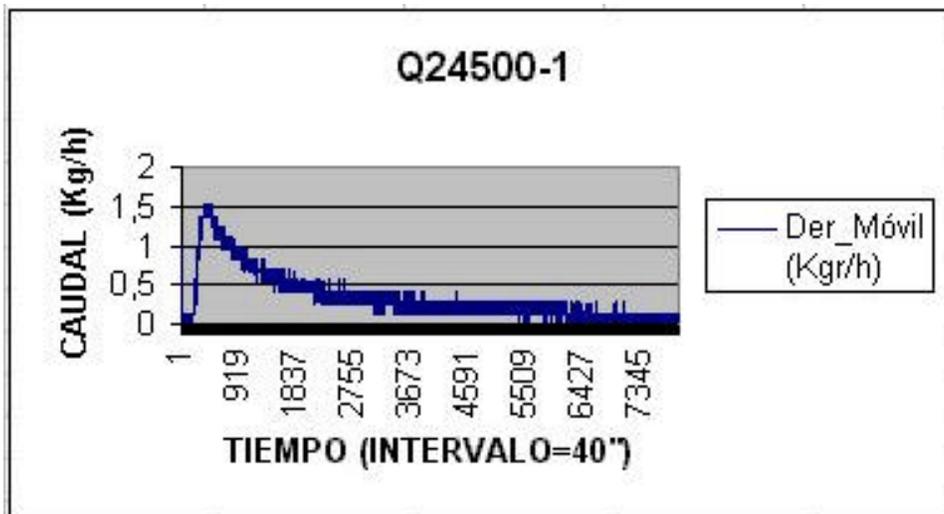


Figura 106. Caudal de salida para Q24500-1.

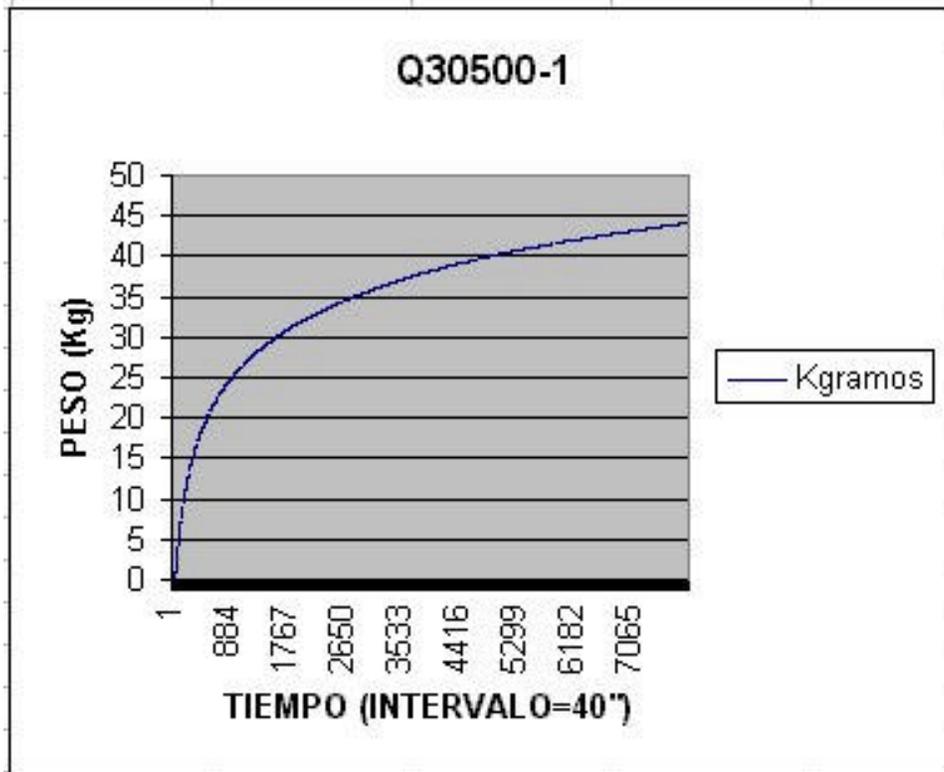


Figura 107. Salida Peso-Tiempo para el ensayo Q30500-1.

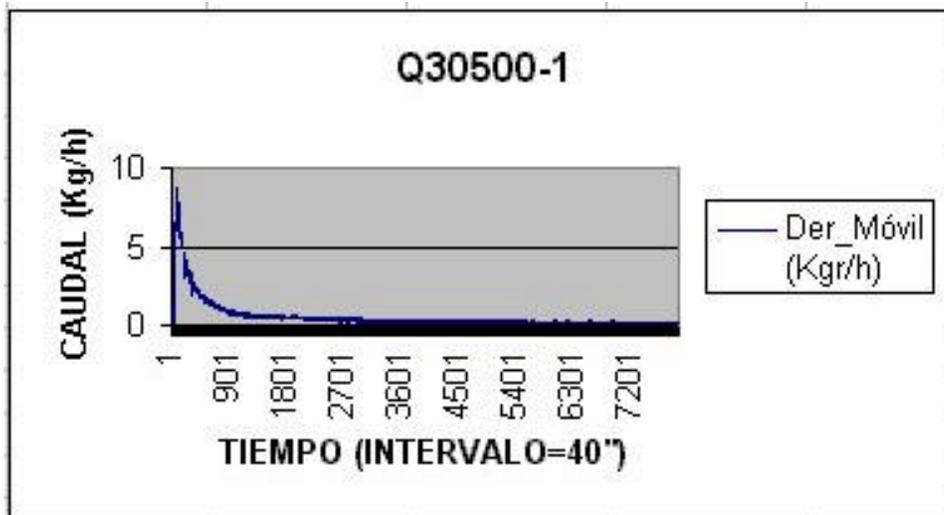


Figura 108. Caudal de salida para Q30500-1.

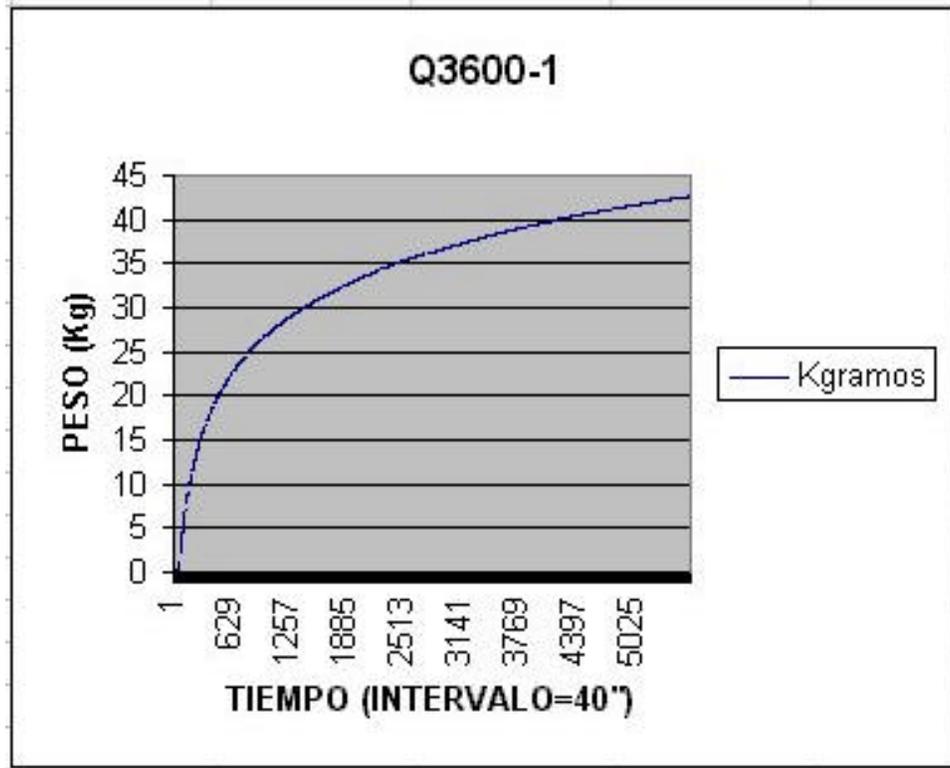


Figura 109. Salida Peso-Tiempo para el ensayo Q3600-1.

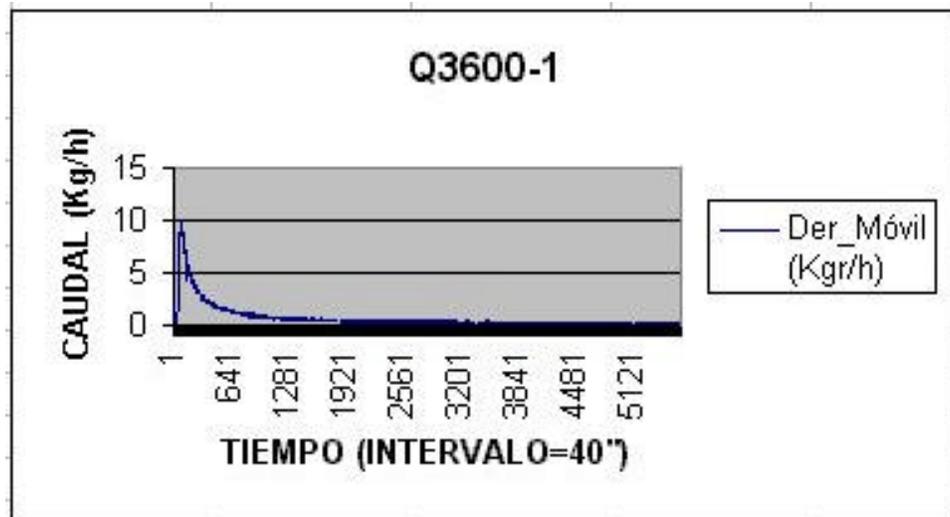


Figura 110. Caudal de salida para Q3600-1.

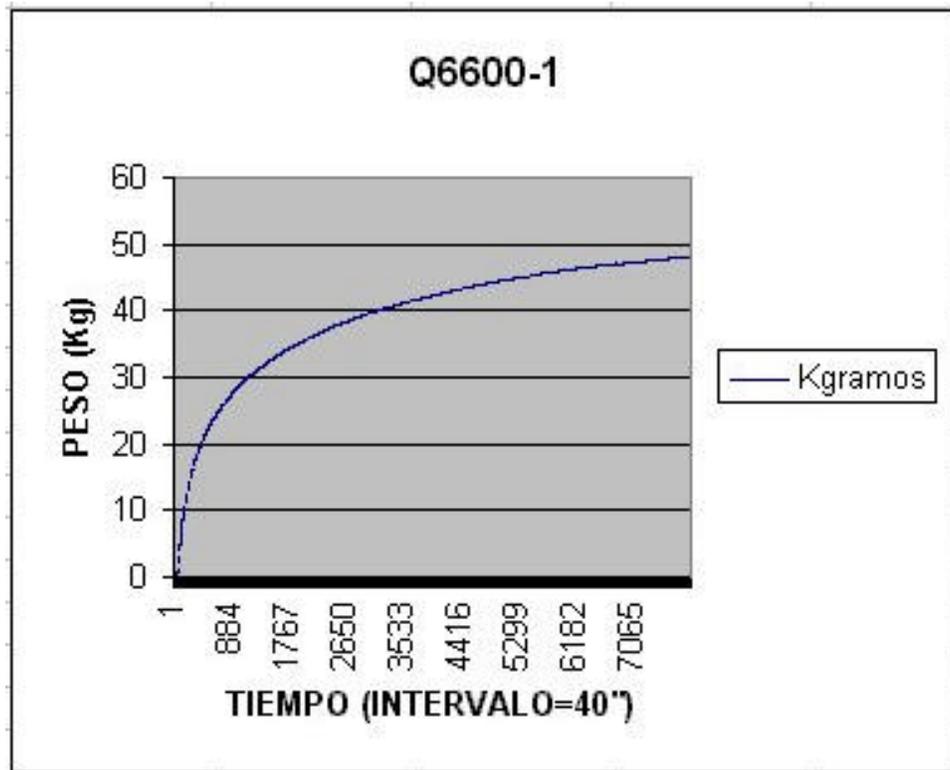


Figura 111. Salida Peso-Tiempo para el ensayo Q6600-1.

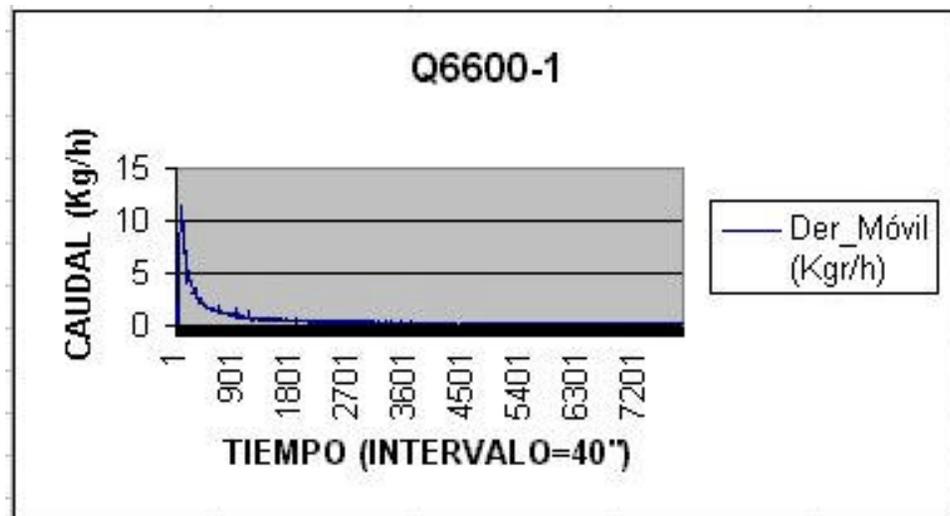


Figura 112. Caudal de salida para Q6600-1.

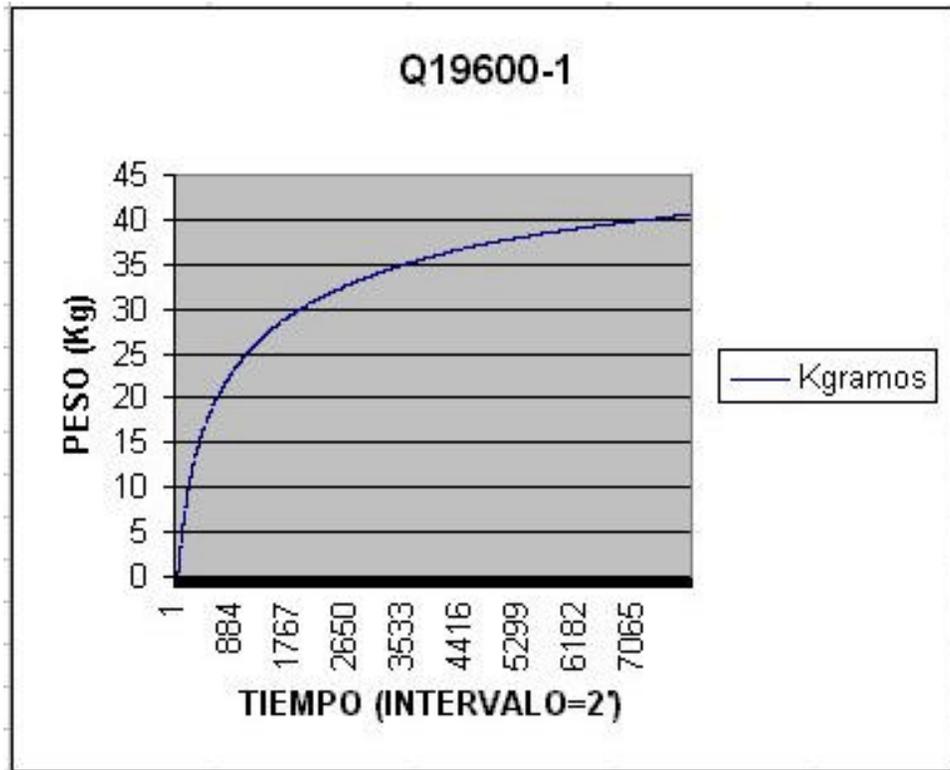


Figura 113. Salida Peso-Tiempo para el ensayo Q19600-1.

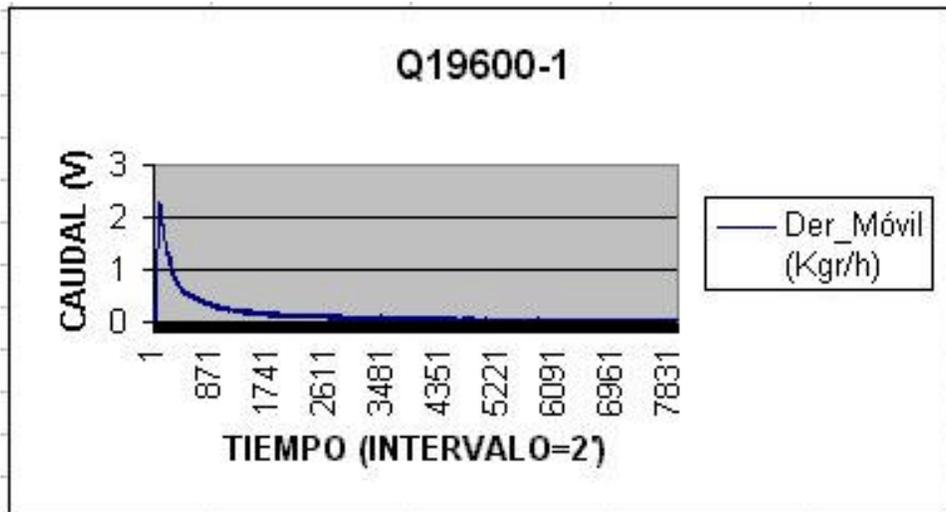


Figura 114. Caudal de salida para Q19600-1.

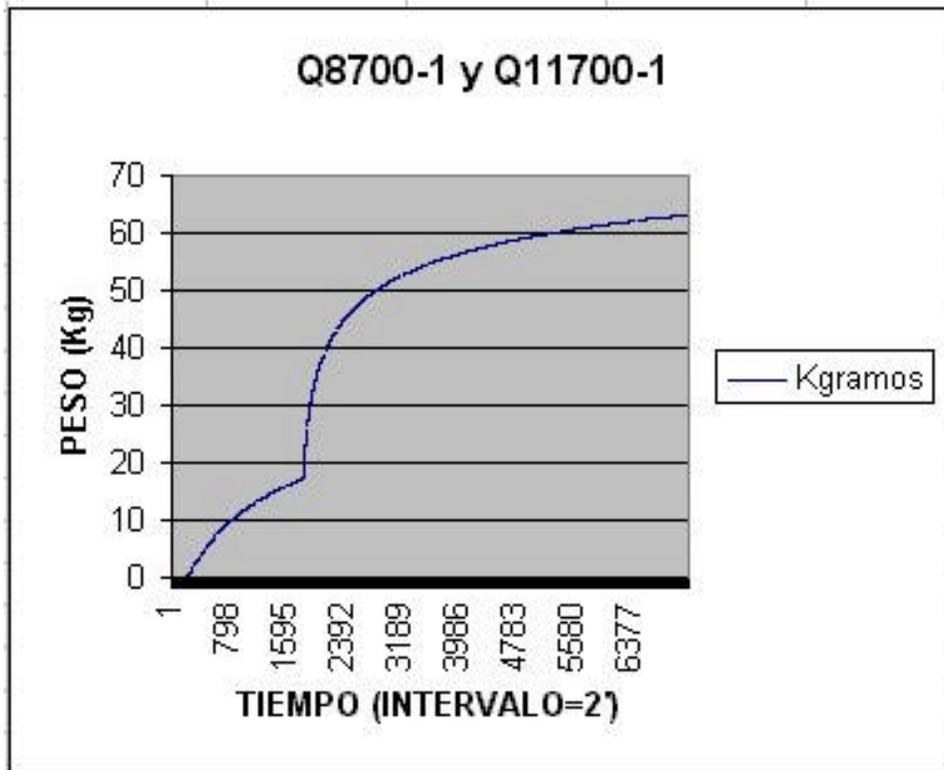


Figura 115. Salida Peso-Tiempo para los ensayos Q8700-1 y Q11700-1.

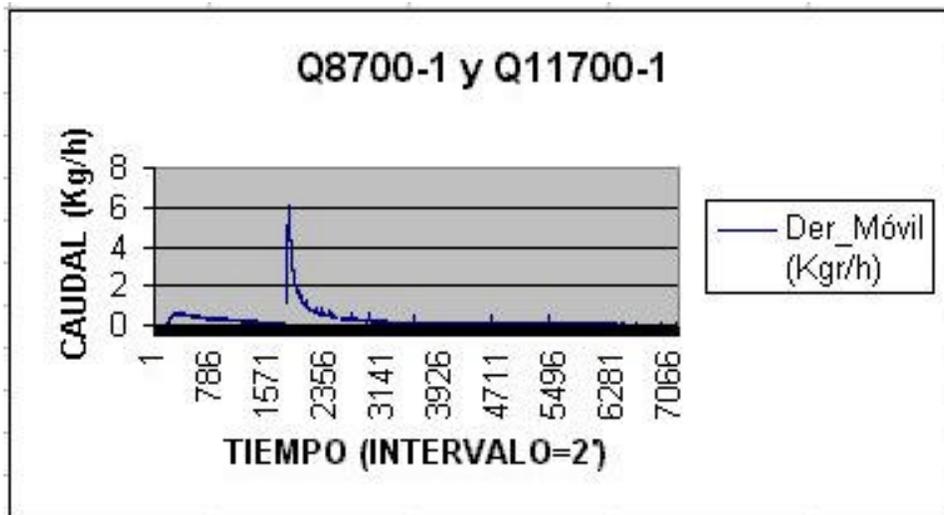


Figura 116. Caudal de salida para Q8700-1 y Q11700-1.

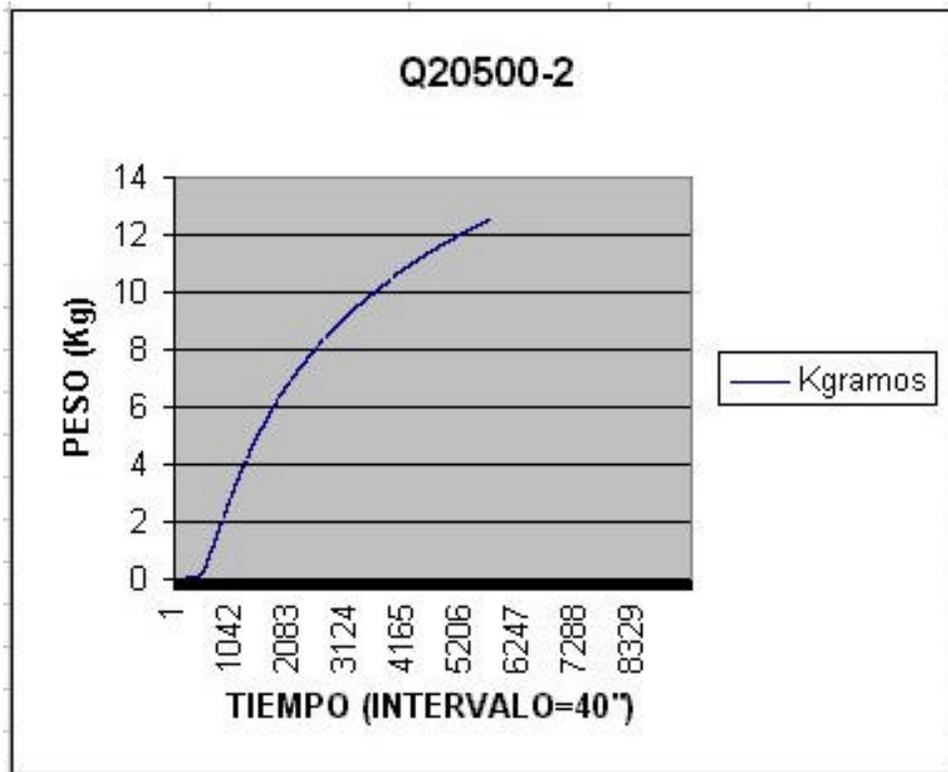


Figura 117. Salida Peso-Tiempo para el ensayo Q20500-2.

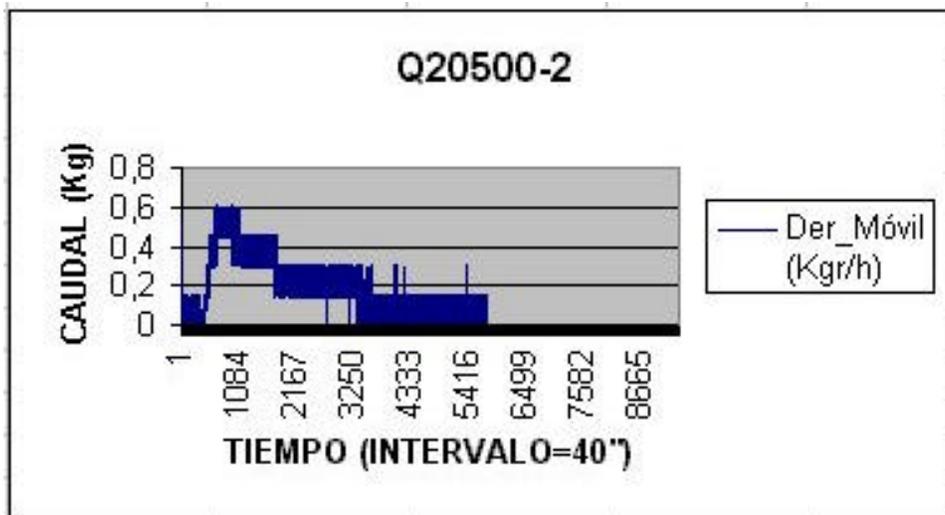


Figura 118. Caudal de salida para Q20500-2.

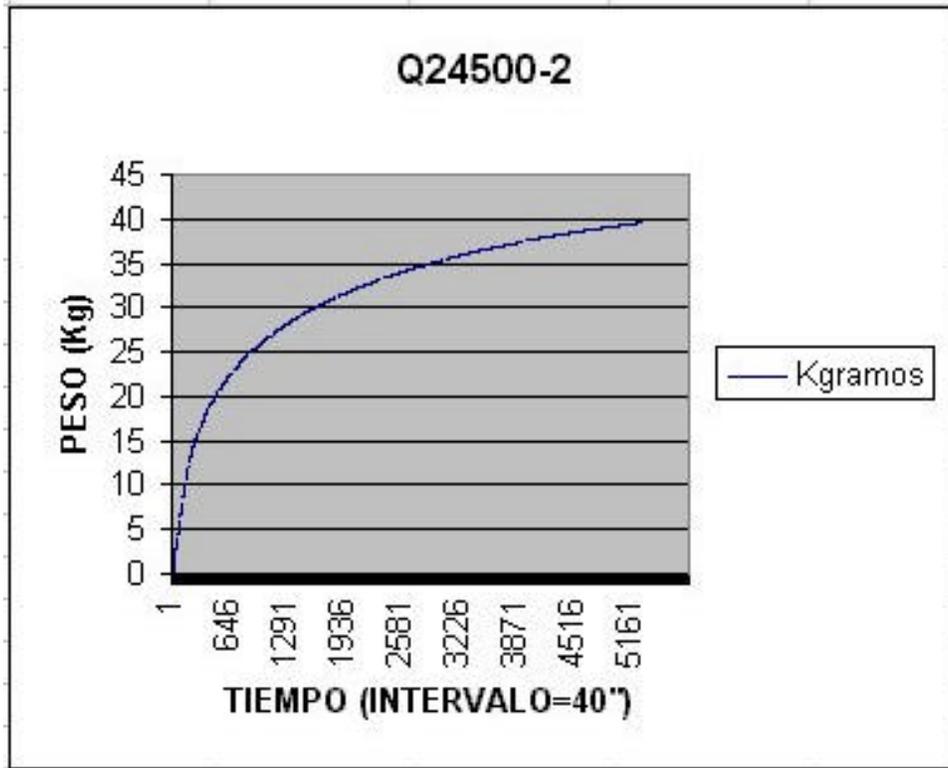


Figura 119. Salida Peso-Tiempo para el ensayo Q24500-2.

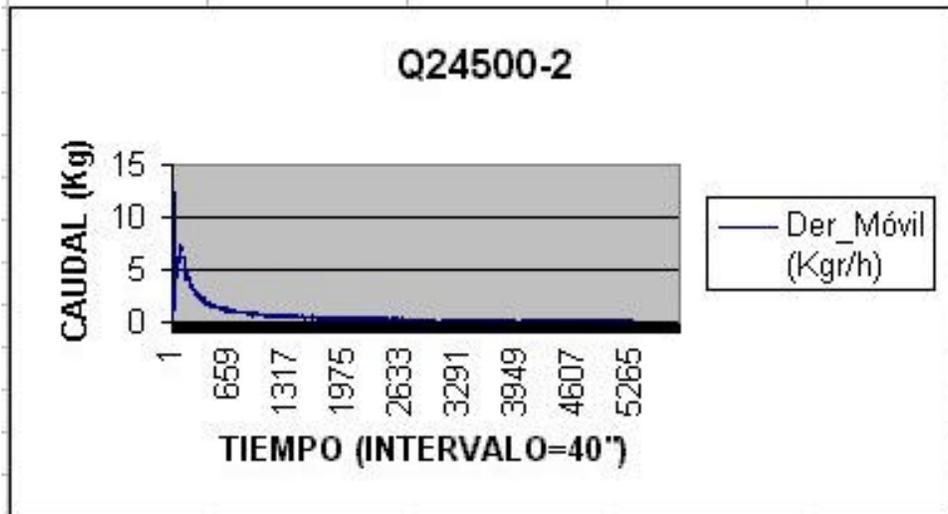


Figura 120. Caudal de salida para Q24500-2.

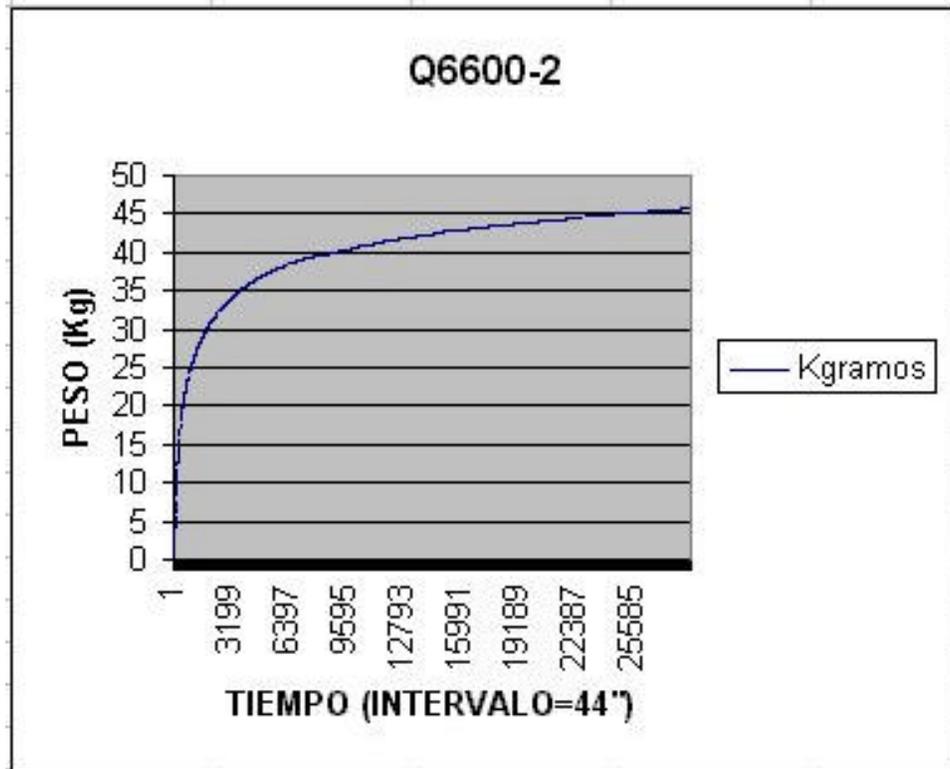


Figura 121. SalidaPeso-Tiempo para el ensayo Q6600-2.

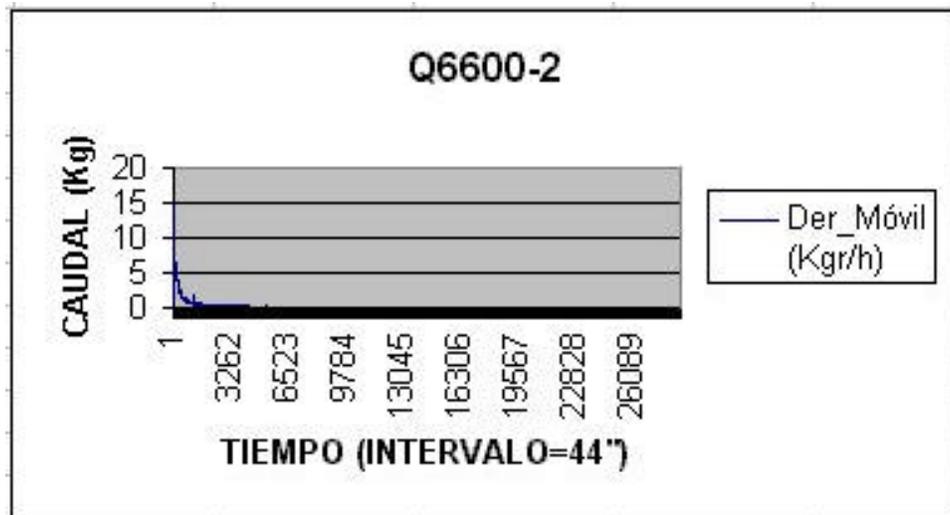


Figura 122. Caudal de salida para Q6600-2.

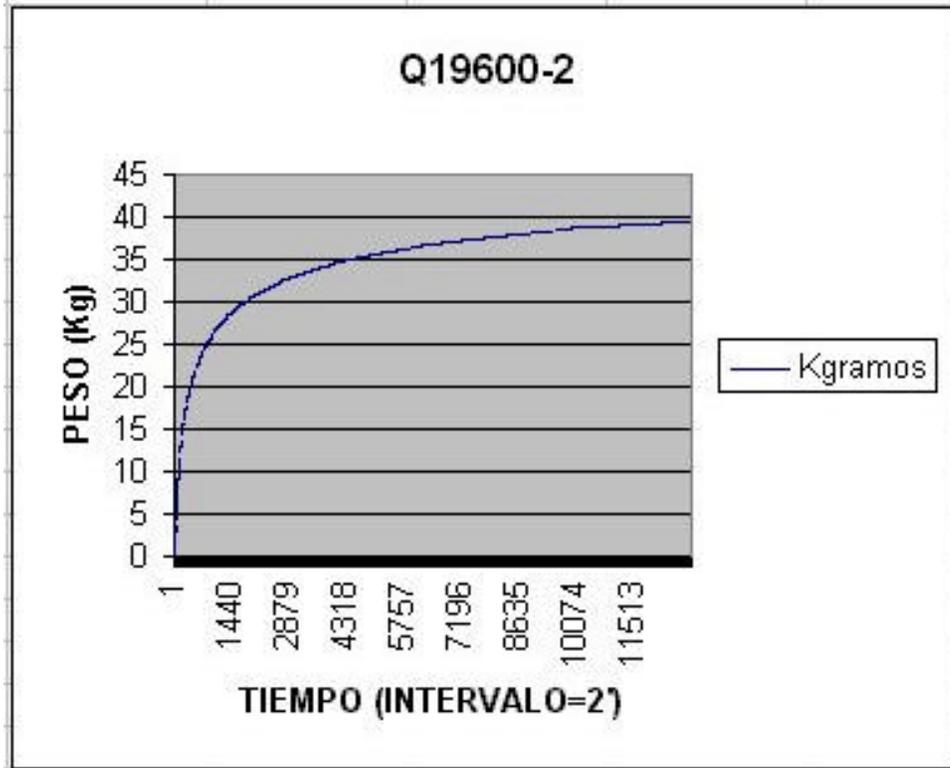


Figura 123. Salida Peso-Tiempo para el ensayo Q19600-2.

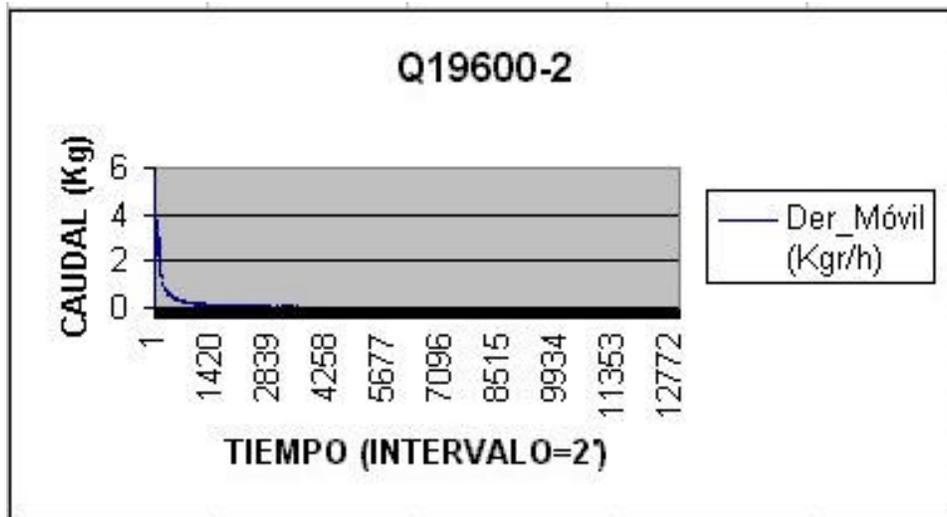


Figura 124. Caudal de salida para Q19600-2.

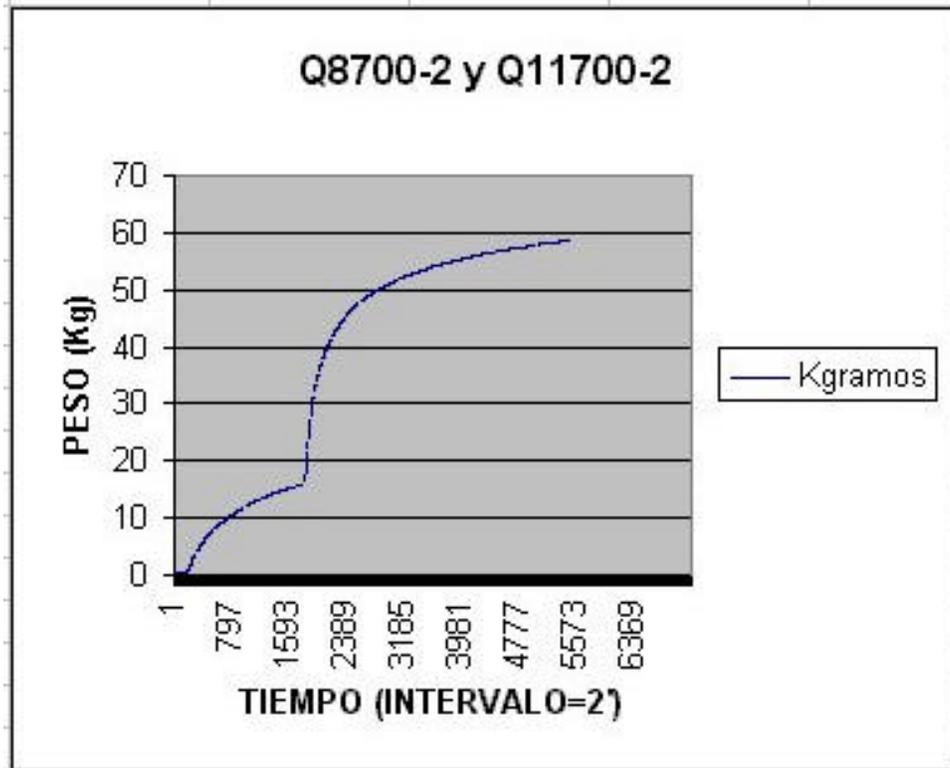


Figura 125. Salida Pesos-Tiempo para el ensayo Q8700-2 7 Q11700-2.

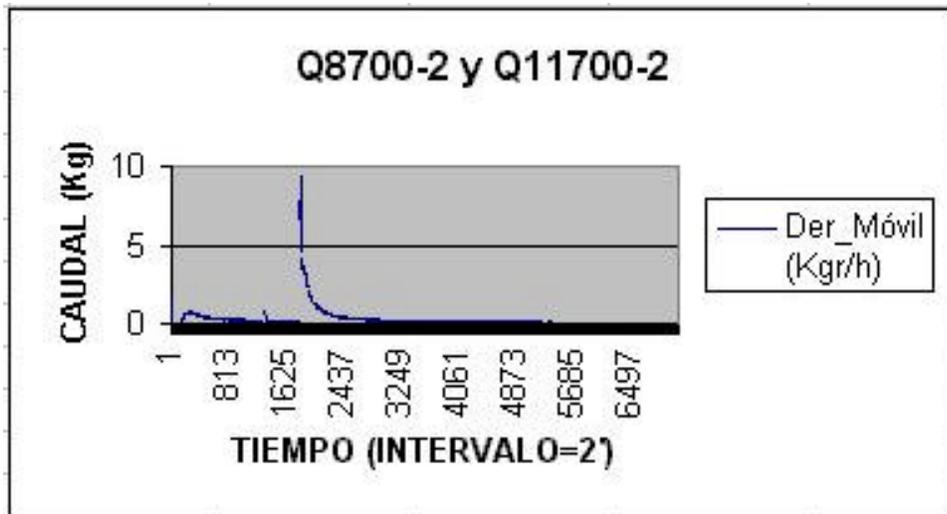


Figura 126. Caudal de salida para Q8700-2 y Q11700-2.

## 7.3. CALIBRACIÓN

### 7.3. Calibración de los caudalímetros

Como se ha indicado en el apartado de Resultados y Discusión, se han efectuado una serie de calibraciones periódicas sobre los dispositivos registradores. La metodología del proceso fue ideada para conseguir un procedimiento rápido, fiable y de fácil repetición.

**Tabla 11. Pesos de las tuercas y tornillos usados en la calibración de los caudalímetros**

TO_G	TU_G
gr	gr
116,08	39,97
115,88	45,4
116,19	45,48
116,61	45,34
116,14	45,15
116,32	45,56
116,22	39,81
116,04	45,34
116,16	45,21
115,98	45,2
49,7	15,1
49,89	15,53
49,9	15,66
49,99	15,32
49,89	15,05
49,73	15,44
49,96	15,15
49,9	15,07
49,82	15,64
49,82	15,04
49,78	15
50	15,03
49,84	15,4
49,78	15,19
49,84	15,72
49,97	15,6
49,83	15,52
49,75	15,6
49,93	15,47
49,91	15,21

El protocolo de ajuste consiste en aplicar sobre la tapa del depósito unos pesos de valor conocido, activar el registrador para una captura de 2 datos por segundo y de esta forma, registrar los pesos aplicados que de valor creciente se añaden sobre la tapa del depósito.

Estos pesos de valor conocido (tabla 11), se han obtenido a partir de unas unos tornillos y unas tuercas de acero inoxidable pesados en balanza de precisión.

Las abreviaturas significan lo siguiente:

- **TOG**:Tornillo grande.
- **TUG**:Tuerca grande.
- **TOP**:Tornillo pequeño.
- **TUP**:Tuerca pequeña.

En los ensayos cada aplicación de peso consistió en añadir una tuerca con su correspondiente tornillo sobre el depósito del caudalímetro, esperar aproximadamente **30** segundos para que se estabilizara la medida, añadir el siguiente grupo de tuerca y tornillo esperar otros **30** segundos y así sucesivamente, empleando la serie de tuercas y tornillos grandes se conseguía con la décima aplicación estar muy próximos al disparo de la válvula. Los pesos acumulados crecientes empleados aparecen en la Tabla 12.

Tabla 12. Relación de los pesos empleados en las calibraciones

<b>Peso TO_G</b>	<b>Peso TU_G</b>	<b>Peso TO_G+TU_G</b>	<b>Peso Acumulado</b>
<b>(gr)</b>	<b>(gr)</b>	<b>(gr)</b>	<b>(gr)</b>
<b>116,08</b>	<b>39,97</b>	<b>156,05</b>	<b>156,05</b>
<b>115,88</b>	<b>45,4</b>	<b>161,28</b>	<b>317,33</b>
<b>116,19</b>	<b>45,48</b>	<b>161,67</b>	<b>479</b>
<b>116,61</b>	<b>45,34</b>	<b>161,95</b>	<b>640,95</b>
<b>116,14</b>	<b>45,15</b>	<b>161,29</b>	<b>802,24</b>
<b>116,32</b>	<b>45,56</b>	<b>161,88</b>	<b>964,12</b>
<b>116,22</b>	<b>39,81</b>	<b>156,03</b>	<b>1120,15</b>
<b>116,04</b>	<b>45,34</b>	<b>161,38</b>	<b>1281,53</b>
<b>116,16</b>	<b>45,21</b>	<b>161,37</b>	<b>1442,9</b>
<b>115,98</b>	<b>45,2</b>	<b>161,18</b>	<b>1604,08</b>

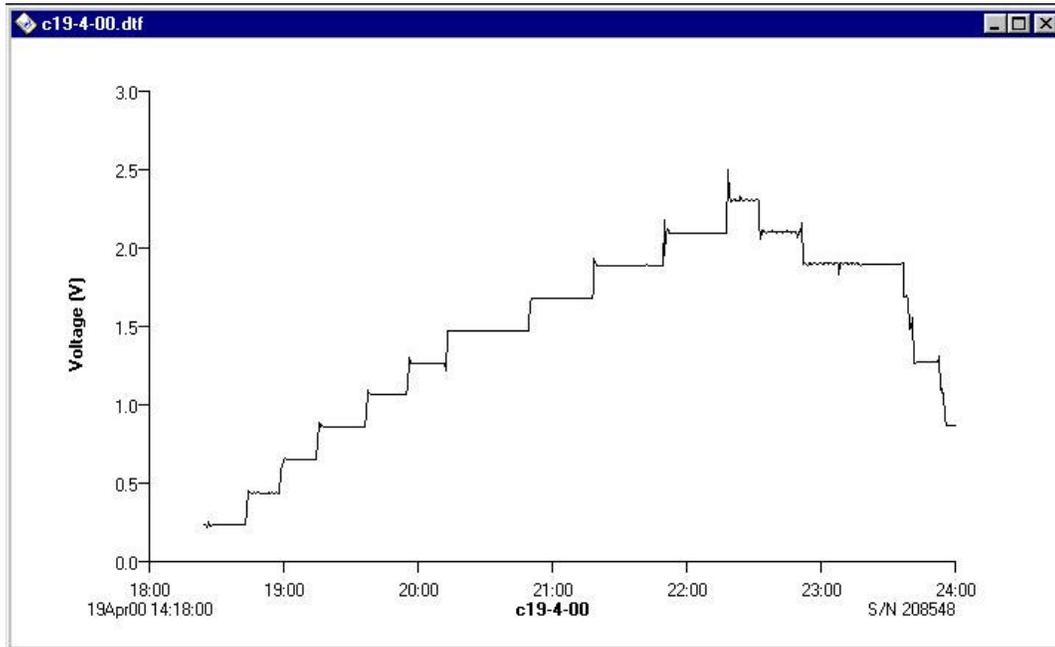
Para el ajuste de las rectas de regresión se ha empleado **EXCEL**. El resumen de estos ajustes aparece en la Tabla 13.

**Tabla 13. Parámetros obtenidos con ajuste por regresión para los caudalímetros**

<b>EQUIPO</b>	<b>FECHA</b>	<b>M</b>	<b>N</b>	<b>R^2</b>
		<b>(gr/V)</b>	<b>(gr)</b>	
<b>1</b>	<b>19/04/00</b>	<b>780,5371985</b>	<b>-186,6650058</b>	<b>0,99996881</b>
<b>1</b>	<b>9/05/00</b>	<b>779,9718148</b>	<b>-6,315518595</b>	<b>0,99990119</b>
<b>1</b>	<b>6/06/00</b>	<b>773,4687149</b>	<b>-47,84885386</b>	<b>0,99994249</b>
<b>2</b>	<b>20/05/00</b>	<b>843,8240898</b>	<b>-21,27679927</b>	<b>0,99990547</b>
<b>2</b>	<b>6/06/00</b>	<b>838,301061</b>	<b>-7,89564879</b>	<b>0,99993068</b>

**7.3.1. Calibración realizada el 19/4/00 al caudalímetro de L1**

La Figura 127, muestra la salida del registrador ante la secuencia de pesos crecientes aplicados (tabla 12).



**Figura 127. Datos registrados para la calibración del 19-4-00.**

**Tabla 14. Datos obtenidos de la calibración C19400-1**

Peso TO_G (gr)	Peso TU_G (gr)	(1)+(2) (gr)	(1)+(2) acumulado (gr)	Tensión (v)
116,08	39,97	156,05	156,05	0,437
115,88	45,4	161,28	317,33	0,649
116,19	45,48	161,67	479	0,854
116,61	45,34	161,95	640,95	1,06
116,14	45,15	161,29	802,24	1,265
116,32	45,56	161,88	964,12	1,47
116,22	39,81	156,03	1120,15	1,675
116,04	45,34	161,38	1281,53	1,888
116,16	45,21	161,37	1442,9	2,085
115,98	45,2	161,18	1604,08	2,2934

La recta de regresión ajustada tiene la forma:

$$\text{Gramos} = 780.5371985 \cdot \text{Voltios} - 186.6650058$$

Los parámetros más significativos de este ajuste son los siguientes (tabla 15):

Tabla 15. Resumen del ajuste por mínimos cuadrados para la calibración C19400-1

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
Coefficiente de correlación múltiple	0,999986137
Coefficiente de determinación R^2	0,999972275
R^2 ajustado	0,999968809
Error típico	2,718112496
Observaciones	10

ANÁLISIS DE VARIANZA	
	<i>Grados de libertad</i>
Regresión	1
Residuos	8
Total	9

<i>Coefficientes</i>	
Intercepción	-186,6650058
Variable X 1	780,5371985

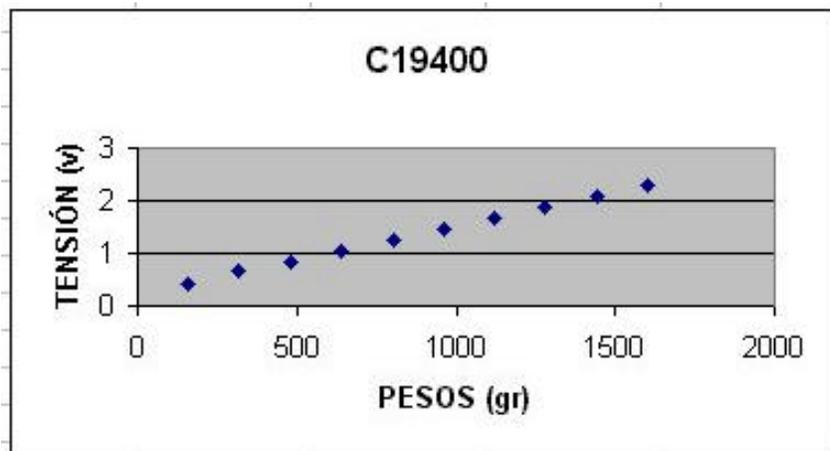
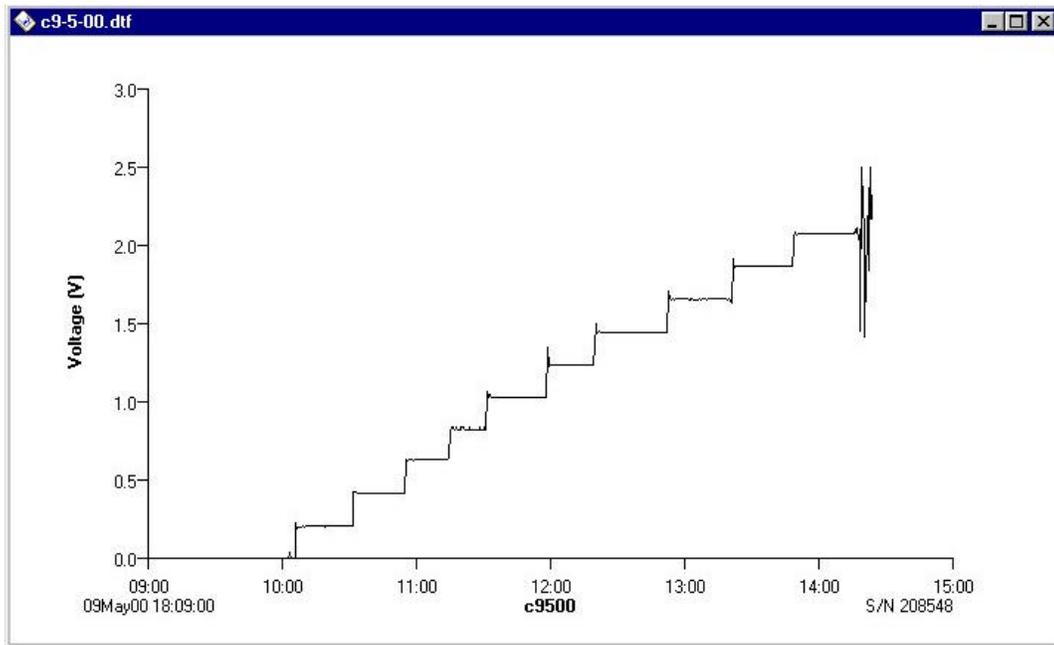


Figura 128. Recta de ajuste de C19400.

**7.3.2. Calibración realizada el 9/5/00 al caudalímetro de L1**

La Figura 129, muestra la salida del registrador ante la secuencia de pesos crecientes aplicados (tabla 12).



**Figura 129. Datos registrados para la calibración del 9-5-00.**

**Tabla 16. Datos obtenidos de la calibración C9500-1**

Peso TO_G (gr)	Peso TU_G (gr)	(1)+(2) (gr)	(1)+(2) acumulado (gr)	Tensión (v)
116,08	39,97	156,05	156,05	0,21
115,88	45,4	161,28	317,33	0,415
116,19	45,48	161,67	479	0,63
116,61	45,34	161,95	640,95	0,8284
116,14	45,15	161,29	802,24	1,03
116,32	45,56	161,88	964,12	1,235
116,22	39,81	156,03	1120,15	1,44
116,04	45,34	161,38	1281,53	1,6606
116,16	45,21	161,37	1442,9	1,86
115,98	45,2	161,18	1604,08	2,065

La recta de regresión ajustada tiene la forma:

$$\text{Gramos} = 779.9718148 \cdot \text{Voltios} - 6.315518595$$

Los parámetros más significativos del ajuste son los siguientes (tabla 17):

Tabla 17. Resumen del ajuste por mínimos cuadrados para la calibración C9500-1

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
Coefficiente de correlación múltiple	0,999956083
Coefficiente de determinación R <sup>2</sup>	0,999912168
R <sup>2</sup> ajustado	0,999901189
Error típico	4,837885492
Observaciones	10

ANÁLISIS DE VARIANZA	
	<i>Grados de libertad</i>
Regresión	1
Residuos	8
Total	9

<i>Coefficientes</i>	
Intercepción	-6,315518595
Variable X 1	779,9718148

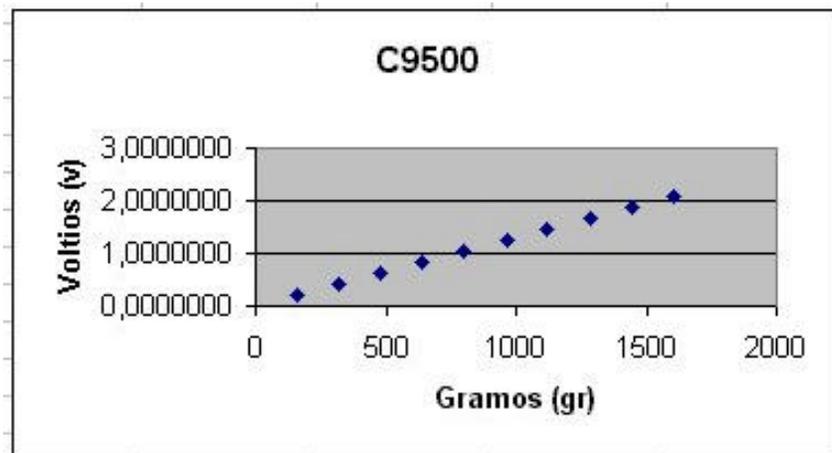


Figura 130. Recta de ajuste de C9500.



### 7.3.3. Calibración realizada el 6/6/00 con el caudalímetro de L1

La Figura 131, muestra la salida del registrador ante la secuencia de pesos crecientes aplicados (tabla 12).

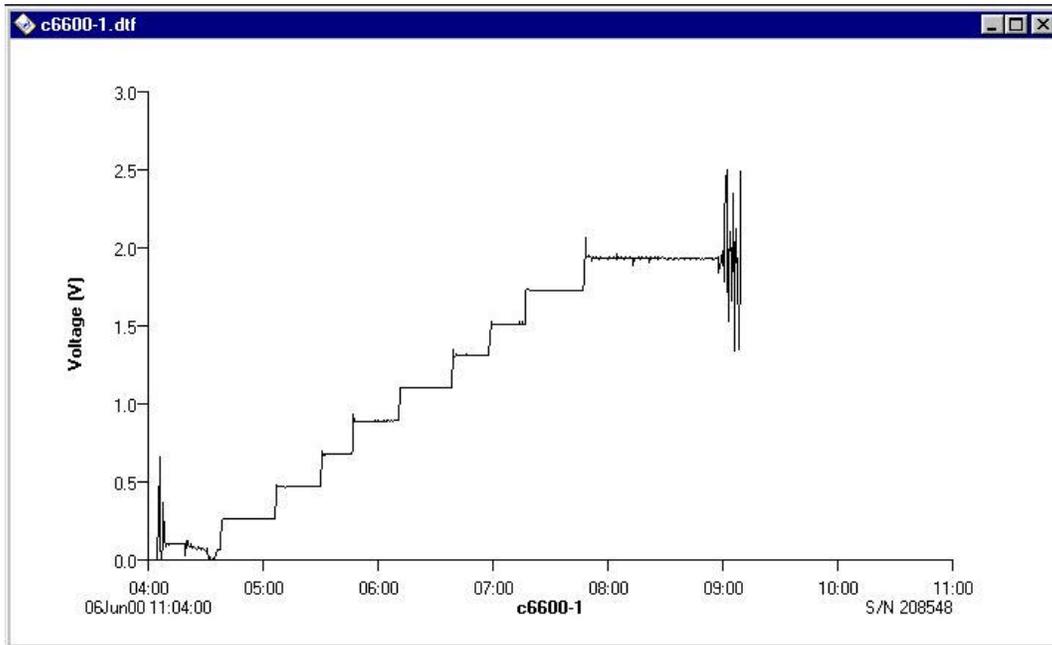


Figura 131. Datos registrados para la calibración del 6-6-00-1.

Tabla 18. Datos para la calibración C6600-1

Peso TO_G (gr)	Peso TU_G (gr)	(1)+(2) (gr)	(1)+(2) acumulado (gr)	Tensión (v)
116,08	39,97	156,05	156,05	0,269
115,88	45,4	161,28	317,33	0,474
116,19	45,48	161,67	479	0,679
116,61	45,34	161,95	640,95	0,884
116,14	45,15	161,29	802,24	1,099
116,32	45,56	161,88	964,12	1,304
116,22	39,81	156,03	1120,15	1,509
116,04	45,34	161,38	1281,53	1,724
116,16	45,21	161,37	1442,9	1,929
115,98	45,2	161,18	1604,08	

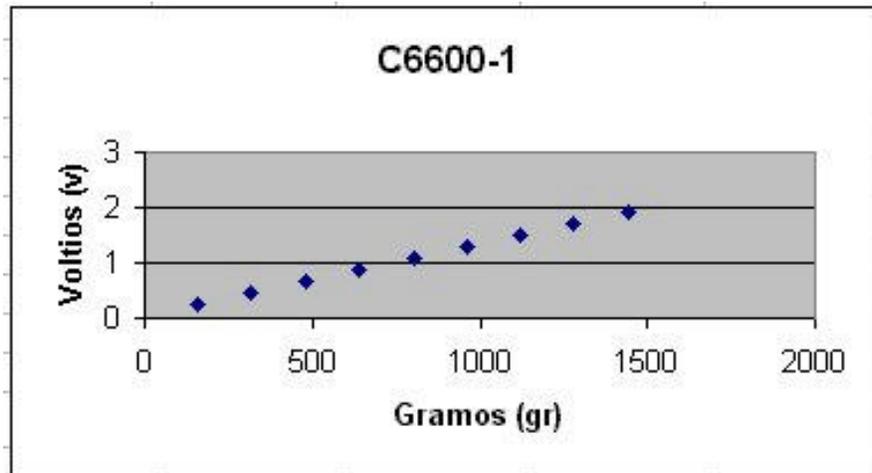
La recta de regresión ajustada tiene la forma:

$$\text{Gramos} = 773.4687149 \cdot \text{Voltios} - 47.84885386$$

Los parámetros más significativos del ajuste son los siguientes (tabla 19):

**Tabla 19. Resumen del ajuste por mínimos cuadrados para la calibración C6600-1**

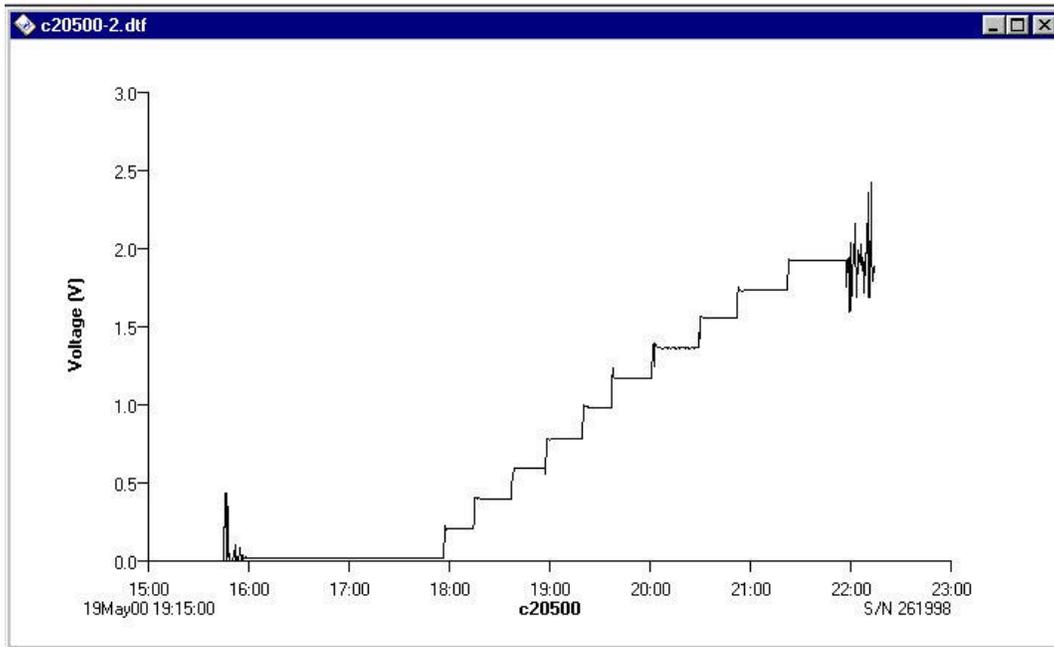
<i>Estadísticas de la regresión</i>	
Coefficiente de correlación múltiple	0,99997484
Coefficiente de determinación R <sup>2</sup>	0,99994968
R <sup>2</sup> ajustado	0,999942491
Error típico	3,338658056
Observaciones	9
ANÁLISIS DE VARIANZA	
	<i>Grados de libertad</i>
Regresión	1
Residuos	7
Total	8
<i>Coefficientes</i>	
Intercepción	-47,84885386
Variable X 1	773,4687149



**Figura 132. Recta de ajuste de C6600-1.**

**7.3.4. Calibración realizada el 20/5/00 al caudalímetro de L2**

La Figura 133, muestra la salida del registrador ante la secuencia de pesos crecientes aplicados (tabla 12).



**Figura 133. Datos registrados para la calibración del 20-5-00-2.**

**Tabla 20. Datos obtenidos de la calibración C20500-2**

Peso TO_G (gr)	Peso TU_G (gr)	(1)+(2) (gr)	(1)+(2) acumulado (gr)	Tensión (v)
116,08	39,97	156,05	156,05	0,21
115,88	45,4	161,28	317,33	0,396
116,19	45,48	161,67	479	0,591
116,61	45,34	161,95	640,95	0,786
116,14	45,15	161,29	802,24	0,981
116,32	45,56	161,88	964,12	1,167
116,22	39,81	156,03	1120,15	1,3596
116,04	45,34	161,38	1281,53	1,548
116,16	45,21	161,37	1442,9	1,733
115,98	45,2	161,18	1604,08	1,919

La recta de regresión ajustada tiene la forma:

$$\text{Gramos} = 843.8240898 \cdot \text{Voltios} - 21.27679927$$

Los parámetros más significativos del ajuste son los siguientes (tabla 21):

Tabla 21. Tabla resumen del ajuste por mínimos cuadrados para la calibración C20500-2

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
Coefficiente de correlación múltiple	0,999958643
Coefficiente de determinación R <sup>2</sup>	0,999917289
R <sup>2</sup> ajustado	0,999905473
Error típico	4,276979447
Observaciones	9
ANÁLISIS DE VARIANZA	
	<i>Grados de libertad</i>
Regresión	1
Residuos	7
Total	8
	<i>Coefficientes</i>
Intercepción	-21,27679927
	843,8240898

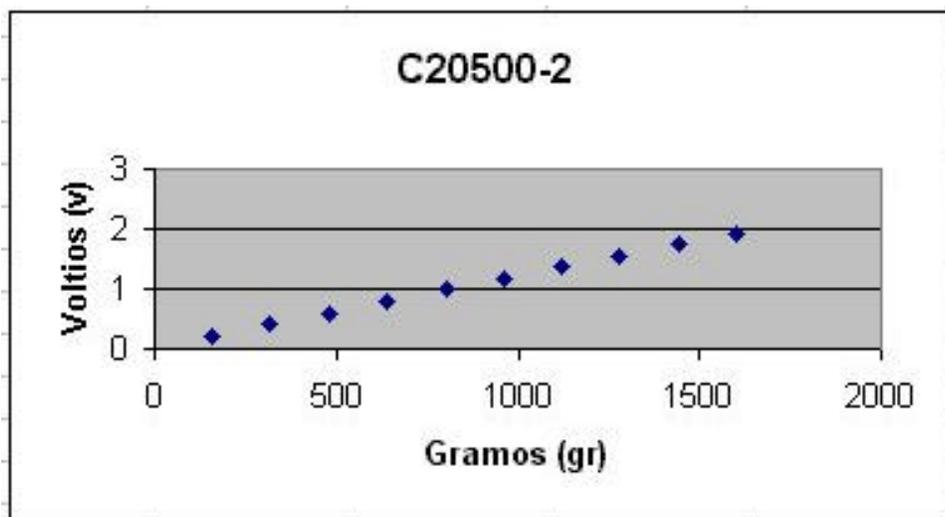
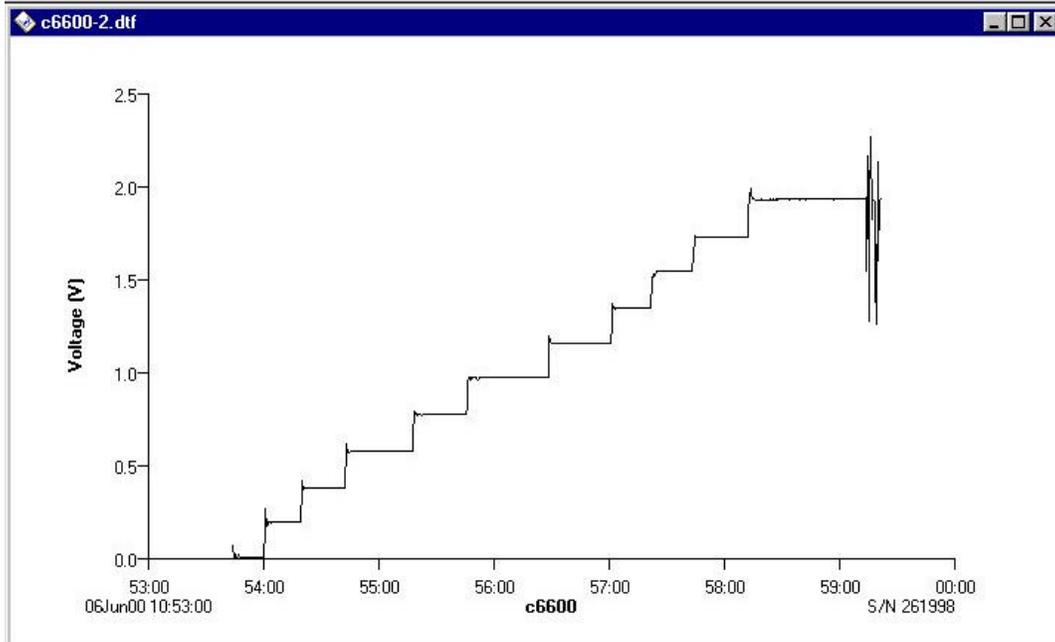


Figura 134. Recta de ajuste de C20500-2.

**7.3.5. Calibración realizada el 6/6/00 al caudalímetro de L2**

La Figura 135, muestra la salida de registrador ante la secuencia de pesos crecientes aplicados (tabla 12).



**Figura 135. Datos registrados para la calibración del 6-6-00-2.**

**Tabla 22. Datos obtenidos de la calibración C6600-2**

Peso TO_G (gr)	Peso TU_G (gr)	(1)+(2) (gr)	(1)+(2) acumulado (gr)	Tensión (v)
116,08	39,97	156,05	156,05	0,2
115,88	45,4	161,28	317,33	0,386
116,19	45,48	161,67	479	0,581
116,61	45,34	161,95	640,95	0,776
116,14	45,15	161,29	802,24	0,972
116,32	45,56	161,88	964,12	1,157
116,22	39,81	156,03	1120,15	1,343
116,04	45,34	161,38	1281,53	1,538
116,16	45,21	161,37	1442,9	1,7224
115,98	45,2	161,18	1604,08	1,929

La recta de regresión ajustada tiene la forma:

$$\text{Gramos} = 838.301061 \cdot \text{Voltios} - 7.89564879$$

Los parámetros más significativos del ajuste son los siguientes (tabla 23):

Tabla 23. Resumen del ajuste por mínimos cuadrados para la calibración C6600-2

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
Coefficiente de correlación múltiple	0,999969672
Coefficiente de determinación R <sup>2</sup>	0,999939345
R <sup>2</sup> ajustado	0,99993068
Error típico	3,662578544
Observaciones	9

ANÁLISIS DE VARIANZA	
	<i>Grados de libertad</i>
Regresión	1
Residuos	7
Total	8

<i>Coefficientes</i>	
Intercepción	-7,895648787
	838,3010608

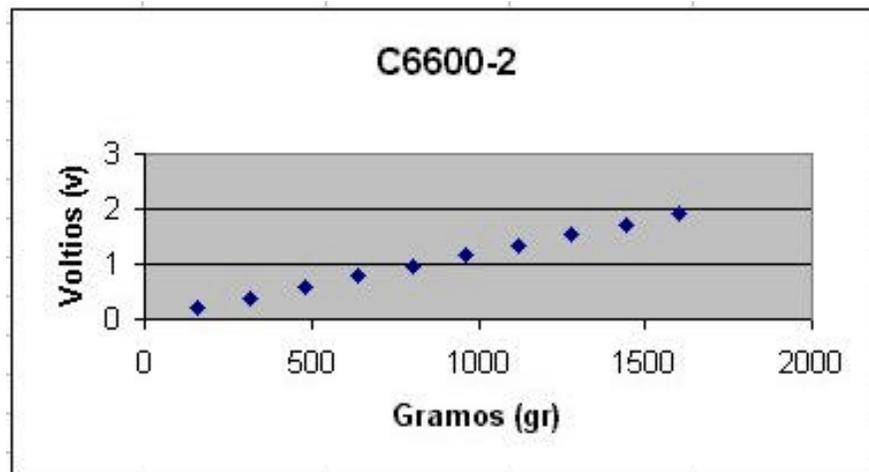


Figura 136. Recta de ajuste de C6600-2.

## 7.4. MOTOR PASO A PASO

### 7.4. Sistema de control para el motor paso a paso

Los sistemas de control de este tipo de motores reciben consignas del sentido de giro y la velocidad y generan la correspondiente secuencia de impulsos eléctricos para aplicar a los extremos de las bobinas del estator.

Generalmente en este tipo de motores no existe realimentación y funcionan en lazo abierto, por lo que resulta imperativo que respondan con precisión a los cambios de excitación en sus bobinas. Si los cambios son muy rápidos y no puede seguirlos el movimiento del eje, se originan errores en el posicionamiento. También hay que tener en cuenta las variaciones de la carga conectada al motor.

Se han estudiado y puesto en práctica dos alternativas para el presente trabajo:

- Uso de un codificador específico (**SAA-1027** o equivalente).
- Empleo de un ordenador o controlador capaz de excitar los bobinados mediante un driver de potencia (**ULN-200x** o similar).

La primera opción simplifica el software de control aunque encarece el hardware y mantiene permanentemente excitados los bobinados.

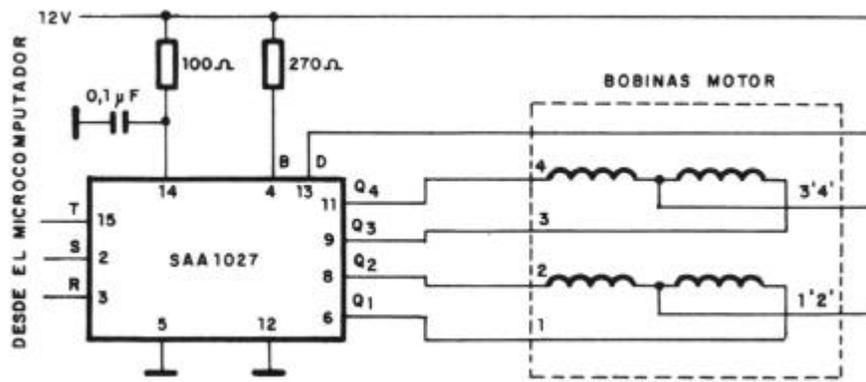


Figura 137. Conexión del SAA-1027 a un PAP.

Para el correcto funcionamiento del **SAA-1027** se precisa aplicarle tres señales de consigna:

**T:** Recibe impulsos cuya frecuencia regula la velocidad de la secuencia de impulsos de salida a las bobinas y que determinan la velocidad de giro y la posición final.

**R:** Señal digital que indica el sentido de giro. Sí **R=1**, giro antihorario y sí **R=0**, giro horario.

**S:** Habilita al circuito integrado para permitir el movimiento del motor (**S=1**).

Para el segundo caso (fig. 138), se han constatado las siguientes ventajas:

- 1) El control es fácilmente variable al basarse en un programa.
- 2) Es posible controlar otras funciones auxiliares de la aplicación.
- 3) Se puede dedicar parte de la memoria del sistema microcomputador a guardar datos y programas de utilidad.
- 4) En caso necesario, se pueden desactivar los bobinados (reducción del consumo) siempre que el eje del motor no este sometido a un par externo.

#### 7.4.1. Programa de evaluación en Visual Basic 5.0

Se ha adquirido un *motor paso/paso híbrido* de **1.8°/paso, 12 V y 0.4 A** de consumo código: **RS-191-8334**. Este motor presenta una resolución de un **5%** por paso y su conexionado exterior es a 8 hilos, con un par de parada de **77.6 mN· m** y un par de mantenimiento de **1200 mN· m**.

## Programa

**Nombre: Motor paso a paso v1.0.**

Este programa permite el control del motor paso a paso a partir de los pulsos enviados por el puerto paralelo de un **P.C.** Se han empleado 4 líneas:

**D0 pin 1, D1 pin2, D3 pin3, D4 pin4.**

**Pin16 Rojo, Pin15 Negro, Pin14 Amarillo, Pin 13 Verde.** El resto de hilos del motor se corresponden con los terminales centrales de los devanados y se conectan al positivo de la alimentación (**+12 V**).

El esquema eléctrico de control es el correspondiente a la Figura 138.

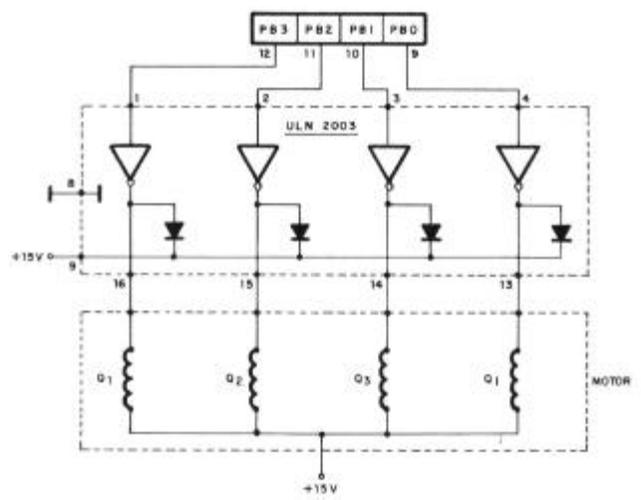


Figura 138. Esquema eléctrico del control del PAP por P.C.

**La pantalla de control del motor** es la siguiente:



Figura 139. Pantalla de control del PAP a través del P.C.

Como interface de potencia se ha usado un **ULN-2003** que permite un control con niveles **TTL** y un funcionamiento del motor con tensiones de hasta **50 V** y **0.5 A**. Para el acceso al puerto paralelo a través de visual Basic se ha escrito una **DLL** en **C** que se ha ubicado en **WINDOWS/SYSTEM**.

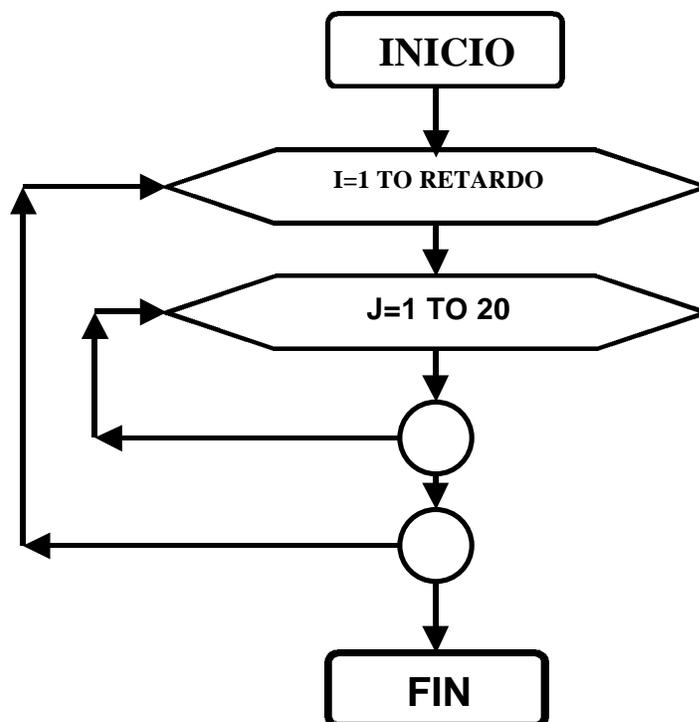


Figura 140. Subrutina de retardo para el control de la velocidad de giro del PAP

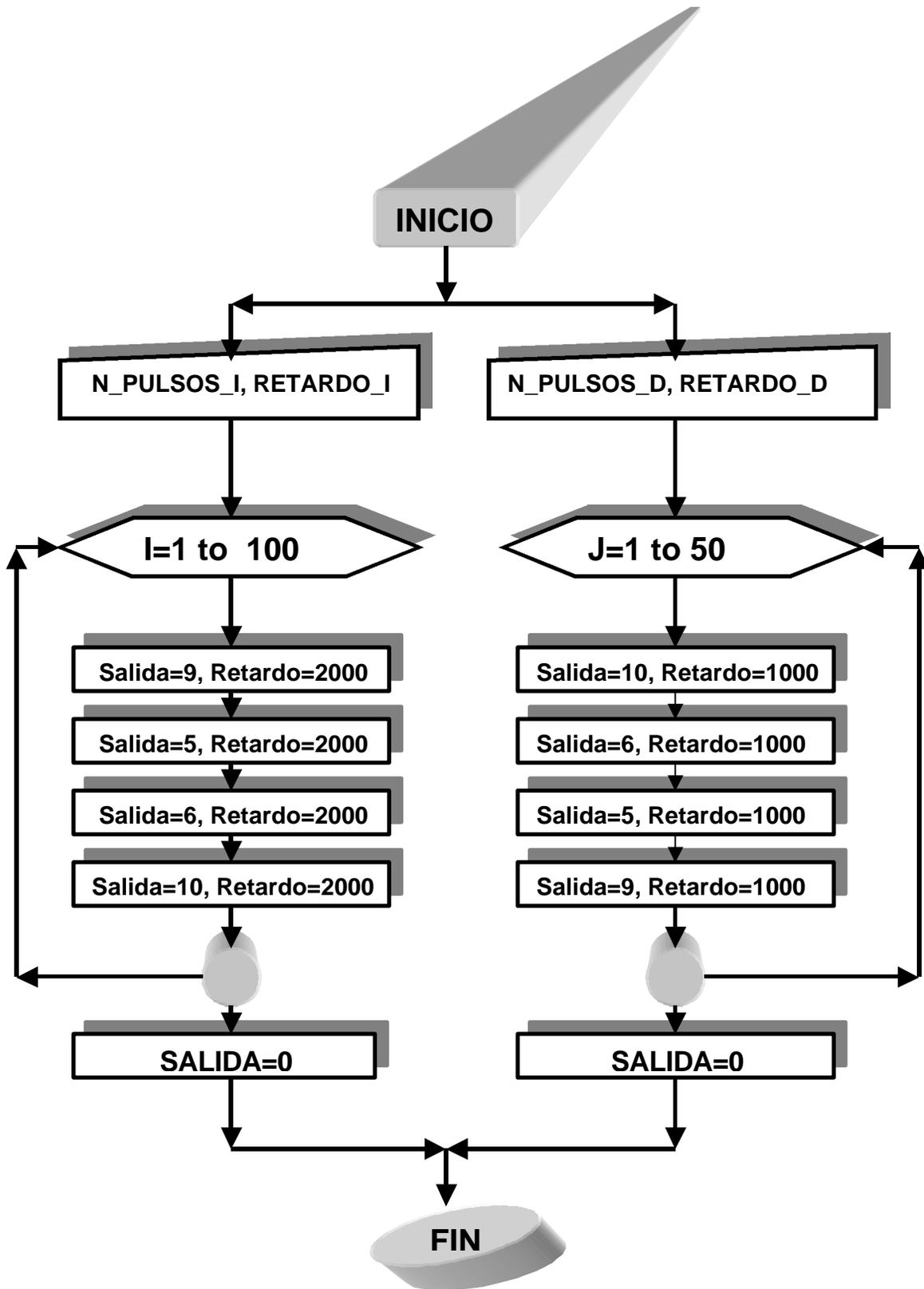


Figura 141. Organigrama del programa para el control del PAP con PC

**Nombre: Puerto.dll**

Para su uso debemos declarar en Visual Basic un módulo estándar e indicar el uso de la citada **DLL**.

**Llamadas: vbOut ( Puerto, dato).** Se trata de una subrutina que es invocada con la instrucción **Call** de **VB 5.0**.

**Código fuente**

Este es código fuente generado:

```
'PAUSA ENTRE PULSOS
```

```
Sub Pausa_D()
```

```
For j% = 0 To Text2.Text
```

```
For k% = 0 To 20
```

```
Next k%
```

```
Next j%
```

```
End Sub
```

```
Sub Pausa_I()
```

```
For j% = 0 To Text4.Text
```

```
For k% = 0 To 20
```

```
Next k%
```

```
Next j%
```

```
End Sub
```

```
Private Sub Command1_Click()
```

```
'GIRO A DERECHAS
```

```
Tiempo% = Text2.Text
```

```
For i% = 1 To Text1.Text
```

```
Call vbOut(&H378, 10)
```

```
Pausa_D
```

```
Call vbOut(&H378, 6)
```

```
Pausa_D
```

```
Call vbOut(&H378, 5)
```

```
Pausa_D
```

```

Call vbOut(&H378, 9)
Pausa_D
Next i%
Call vbOut(&H378, 0)
End Sub

```

```

Private Sub Command2_Click()
End
End Sub

```

```

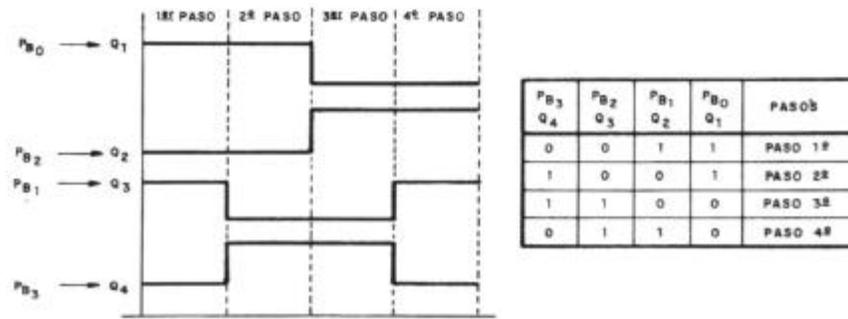
Private Sub Command3_Click()
'GIRO A IZQUIERDAS
For i% = 1 To Text3.Text
Call vbOut(&H378, 9)
Pausa_I
Call vbOut(&H378, 5)
Pausa_I
Call vbOut(&H378, 6)
Pausa_I
Call vbOut(&H378, 10)
Pausa_I
Next i%
Call vbOut(&H378, 0)
End Sub

```

Tablas 24 y 25. Secuencias para giro horario y antihorario de un PAP

DERECHAS	VERDE	AMARILLO	NEGRO	ROJO
10	1	0	1	0
6	0	1	1	0
5	0	1	0	1
9	1	0	0	1

IZQUIERDAS	VERDE	AMARILLO	NEGRO	ROJO
9	1	0	0	1
5	0	1	0	1
6	0	1	1	0
10	1	0	1	0



Figuras 142 y 143. Niveles lógicos a la salida del P.C. para el control del PAP

Como se puede apreciar en el código se han declarado dos subrutinas de retardo una para giro horario **Pausa\_D** y otra para el giro antihorario **Pausa\_I**.

En **Command1** hemos incluido la secuencia de giro horaria **10-6-5-9**. Y en **Command3** la antihoraria **9-5-6-10**.

La parada del programa se realiza a través de **Command2**.

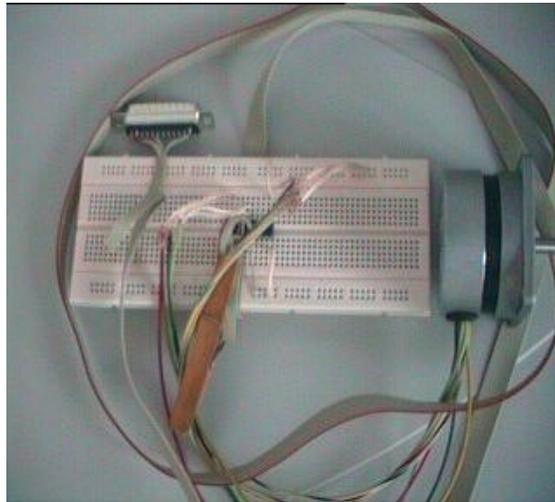
La instrucción **Call vbOut ( &h378, 0)** sirve para eliminar la alimentación de las bobinas. En la aplicación definitiva, como no tenemos pares resistentes, se empleará esta opción para evitar el calentamiento del motor al estar energizado y además reducir el gasto de batería.

El enlace con la **DLL** a través del módulo estándar es la siguiente:

**Declare Sub vbOut Lib "Puerto.dll" (ByVal nPort As Integer, ByVal nData As Integer)**

Donde **nPort** es la dirección del puerto a enlazar (normalmente la **&h378**) y **nData** el **byte (0-255)** a enviar por el registro de datos del puerto paralelo.

La placa de ensayo con el circuito integrado **ULN-2003** y motor conectado aparece en la siguiente imagen.



**Foto 14. Protoboard con ULN-2003 y motor PAP.**

## 7.5. EEPROM

## 7.5. Empleo de la Eeprom 24LC256

Al igual que se ha hecho con el motor paso a paso, hemos realizado unos ensayos preliminares para la puesta a punto de las rutinas que permitan el control de este tipo de dispositivos con ordenador como con microcontrolador.

Este tipo de dispositivo de almacenamiento estático de la información presenta una interface serie de comunicación con protocolo **I<sup>2</sup>C** que lo hace especialmente atractivo, no sólo por permitir que la información registrada permanezca almacenada sin alimentación eléctrica del mismo, sino por que este tipo de bus sólo necesita dos hilos para la comunicación, una línea de reloj (**SLC**) y otra de Datos (**SDA**) a drenador abierto, lo que optimiza el empleo de los pines de entrada/salida del microcontrolador.

### 7.5.1. El programa de comunicación entre el P.C. y la Eeprom

Este programa se ha desarrollado para permitir una comunicación directa entre el **P.C.** y la memoria a través del puerto paralelo.



Figura 144. Pantalle de trabajo de la aplicación GRABADOR v1.1.

Básicamente consiste en un enlace con una **DLL** escrita en **C** que nos da acceso al citado puerto de Entrada/Salida del ordenador. Con

esta aplicación tenemos la posibilidad de leer (**VERIFICAR**) la memoria volcándola a un fichero de texto o realizar la grabación (**GRABAR**) de esta a partir de un fichero texto. La aplicación se denomina **GRABADOR v1.1**, (fig. 144).

Se han realizado dos circuitos distintos que actúan de interfase entre la memoria y el P.C.

El primero de ellos entorno a un óctuple buffer modelo **74HC244** capaz de aislar el puerto paralelo del circuito así como proporcionar los niveles **TTL** correctos para el adecuado funcionamiento de la **EEPROM**. El conexionado ha sido el siguiente:

### Descripción

#### Circuito con 74HC244

'D<sub>4</sub>= Línea de activación de la transferencia de datos del **P.C.** a la memoria.

'D<sub>3</sub>= Línea de datos **P.C-->**memoria

'D<sub>2</sub>= Línea de activación de la transferencia de datos de la memoria al **P.C.**

'D<sub>0</sub>= Línea del reloj serie (**SLC**)

'E<sub>3</sub>= Línea de recepción de datos del **P.C.**

Dado que la línea **SDA** del **BUS I<sup>2</sup>C** es bidireccional y como los puertos estándar de un ordenador no contemplan esta posibilidad (sí los modernos puertos actuales del tipo **ECP** y **EPP**) el **74HC244** se ha configurado para conseguir a partir de las líneas unidireccionales de los registros de datos (**D<sub>4</sub>**) y estado (**E<sub>3</sub>**) del puerto una línea bidireccional (**SDA**).

La segunda variante empleada hace uso de un cuádruple interruptor analógico modelo **HEF-4066** de tecnología **CMOS**. Con esta

implementación se buscó tener acceso “en circuito” a la **EEPROM** sin la necesidad de extraerla de su ubicación durante la fase de depuración.

## Descripción

### Circuito con el HEF4066

**D<sub>6</sub>**= Línea de salida del **P.C.** para la verificación del cable que enlaza a este con el circuito.

**D<sub>5</sub>**= Línea de activación de la transferencia de datos del **P.C.** a la memoria (equivale al **D<sub>4</sub>** del otro circuito)

pero aquí trabaja invertido

**D<sub>4</sub>**= Se usa en la otra variante

**D<sub>3</sub>**= Línea de datos **P.C.**-->memoria

**D<sub>2</sub>**= Se usa en la otra variante (Sin equivalente)

**D<sub>1</sub>**= Línea de activación de la grabación de datos

**D<sub>0</sub>**= Línea del reloj serie (**SLC**)

**E<sub>3</sub>**= Línea de recepción de datos del **P.C.**

### 7.5.2. Librería de enlace del microcontrolador con la Eeprom

El microcontrolador empleado es el **PIC-16F84** de Arizona Microchip. Este dispositivo no dispone de puerto hardware para bus **I<sup>2</sup>C** por lo que hay que realizar una implementación por software de dicho enlace.

Para ello se ha desarrollado una librería en ensamblador que se enlazará con el programa principal que gestiona todo el proceso del toma-muestras.

La librería de gestión de dispositivos I<sup>2</sup>C se denomina **EEPROM.LIB**

El código completo se muestra a continuación:

```

;EEPROM.LIB

;Sevilla 25 de Mayo de 2000
;Esta rutina es transparente para los bits RA<2,7>
;y para todo el PORTB.

;*****
start:  bcf      porta,slc
        bcf      porta,sda
        call     Retardo_EEPROM
        bsf      porta,sda
        call     Retardo_EEPROM
        bsf      porta,slc
        call     Retardo_EEPROM
        bcf      porta,sda
        call     Retardo_EEPROM
        bcf      porta,slc
        return

;*****
write:  movlw    08h
        movwf    indice
sigue:  bcf      porta,sda
        rlf      codigo,f
        btfsc   status,c
        bsf      porta,sda
        call     Retardo_EEPROM
        bsf      porta,slc
        call     Retardo_EEPROM
        bcf      porta,slc
        call     Retardo_EEPROM
        decfsz   indice,f
        goto     sigue
        return

;*****
read:   bsf      status,rp0
        movlw    b'11111110'      ;slc salida sda entrada el resto
        andwf    trisa,f          ;son transparentes
        movlw    b'0000010'
        iorwf    trisa,f
        bcf      status,rp0

        movlw    08h
        movwf    indice

otro:   bcf      porta,slc
        call     Retardo_EEPROM
        bsf      porta,slc
        call     Retardo_EEPROM
        bcf      Dato_EEPROM,intro
        btfsc   porta,sda

```

```

        bsf    Dato_EEPROM,intro
        bcf    porta,slc
        call   Retardo_EEPROM

        clrf   valor
        decf   indice,f
        movf   indice,w

        subwf  valor,w
        btfsc status,z
        goto  igual

        rlf    Dato_EEPROM,f
        goto  otro

igual:  bsf    status,rp0
        movlw  b'11111100'           ; slc y sda son ahora salidas
        andwf  trisa,f
        bcf    status,rp0
        return

;*****
ack:    bsf    status,rp0
        movlw  b'11111110'         ;slc salida sda entrada el resto
        andwf  trisa,f             ;son transparentes
        movlw  b'00000010'
        iorwf  trisa,f
        bcf    status,rp0

        bcf    porta,slc
        call   Retardo_EEPROM
        bsf    porta,slc
        call   Retardo_EEPROM
        bcf    porta,slc
        call   Retardo_EEPROM

        bsf    status,rp0
        movlw  b'11111100'         ; slc y sda son ahora salidas
        andwf  trisa,f
        bcf    status,rp0
        return

;*****
stop:   bcf    porta,slc
        bcf    porta,sda
        call   Retardo_EEPROM
        bsf    porta,slc
        call   Retardo_EEPROM
        bsf    porta,sda
        call   Retardo_EEPROM
        bsf    porta,slc
        return

;*****
;Dato_EEPROM=Lee_EEPROM (dir_H, dir_L))

Lee_EEPROM:  bsf    status,rp0           ;Inputs: dir_L, dir_H
              movlw  b'11111100'       ;Output: dato
              andwf  trisa,f           ;Config transparente

              bcf    status,rp0

```

```
call    start

movlw   0a0h
movwf   codigo
call    write

call    ack

movf    dir_H,w           ;para la 241c256b
movwf   codigo
call    write

call    ack

movf    dir_L,w
movwf   codigo
call    write

call    ack

call    start

movlw   0a1h
movwf   codigo
call    write

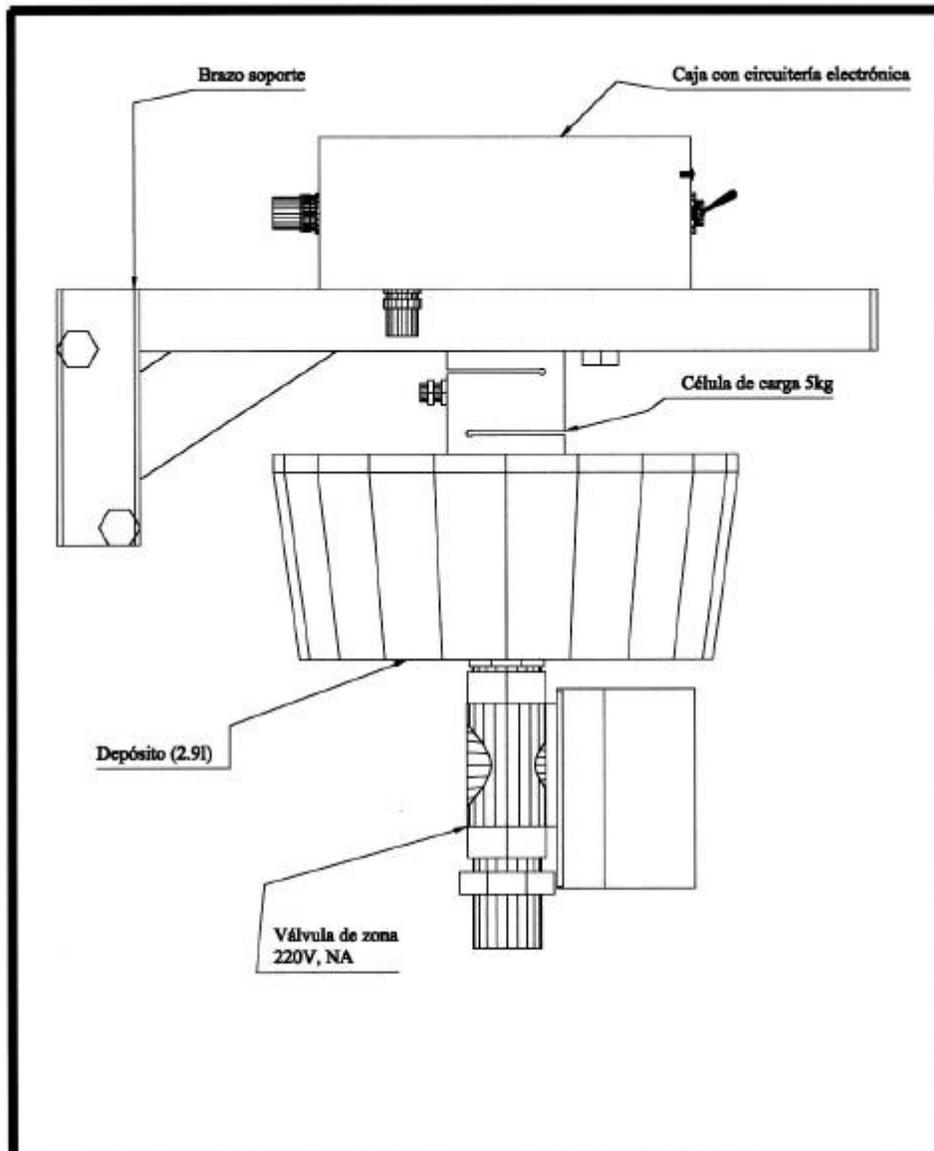
call    ack

call    read

call    stop

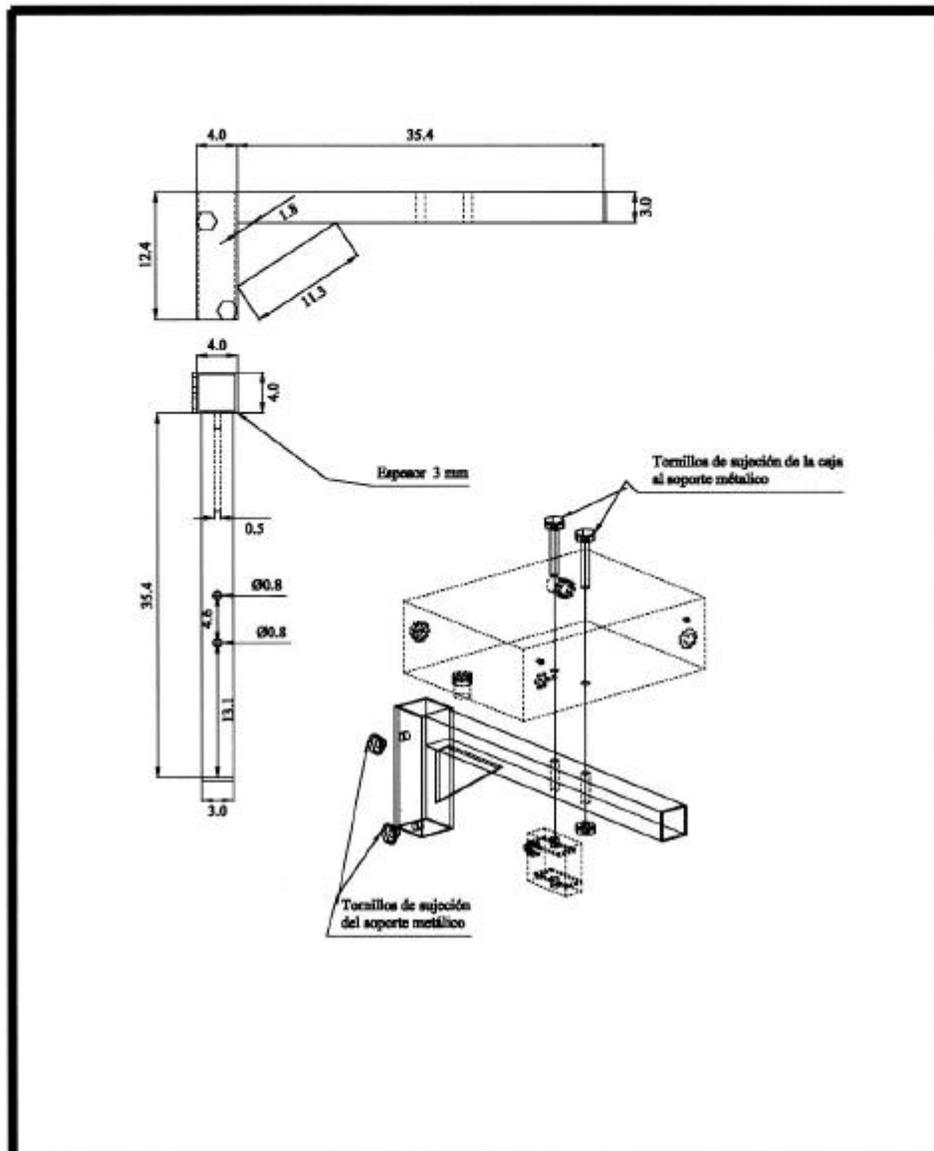
return
```

## 7.6. PLANOS



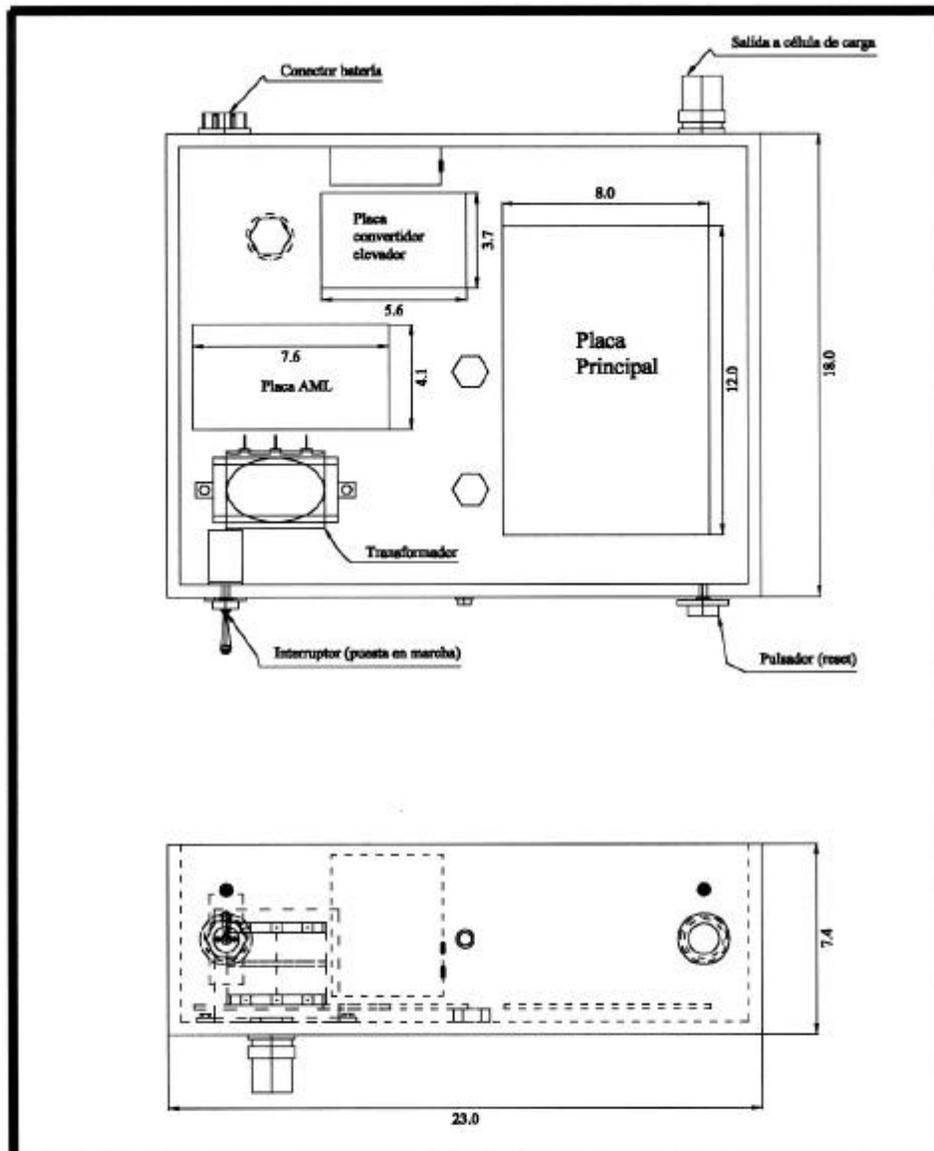
**A. C. E. S. ENGINEERING-Co.**

Dibujado:	A. C. Escobar	Firma:	Promotor:	 <b>A.C.E.S.</b> <b>ENGINEERING-Co</b>
Fecha:	14/6/2000		A. Madueño	
Escala:	1/2.5	<b>Lisímetro</b>		



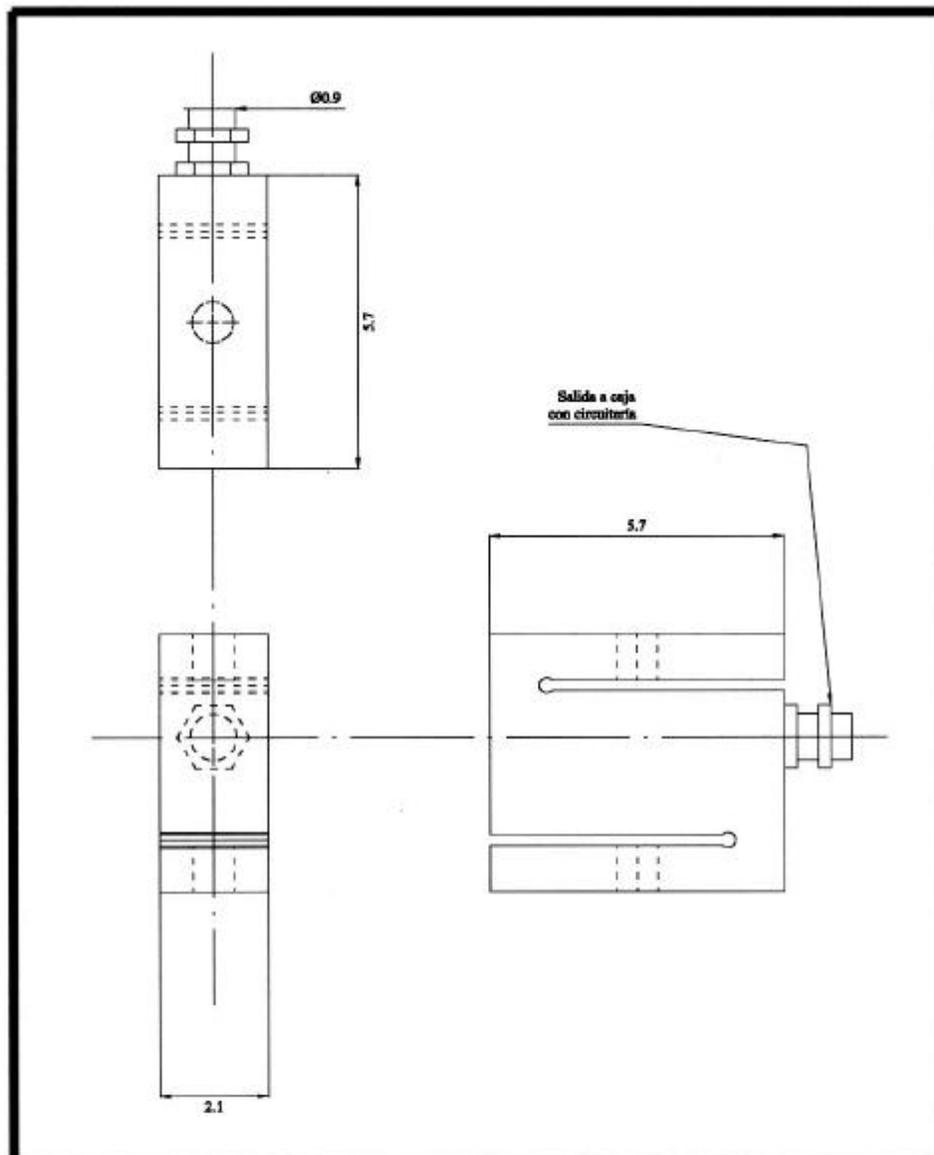
**A. C. E. S. ENGINEERING-Co.**

Dibujado:	A. C. Escobar	Firma:	Promotor:	 A.C.E.S. ENGINEERING-Co
Fecha:	10/6/2000		A. Madueño	
Escala:	1:5	Soporte Metálico		



**A. C. E. S. ENGINEERING-Co.**

Dibujado:	A. C. Escobar	Firma:	Promotor:	 <b>A.C.E.S.</b> <b>ENGINEERING-Co</b>
Fecha:	9/6/2000		A. Madueño	
Escala:	1:2	Caja con Circuitería		

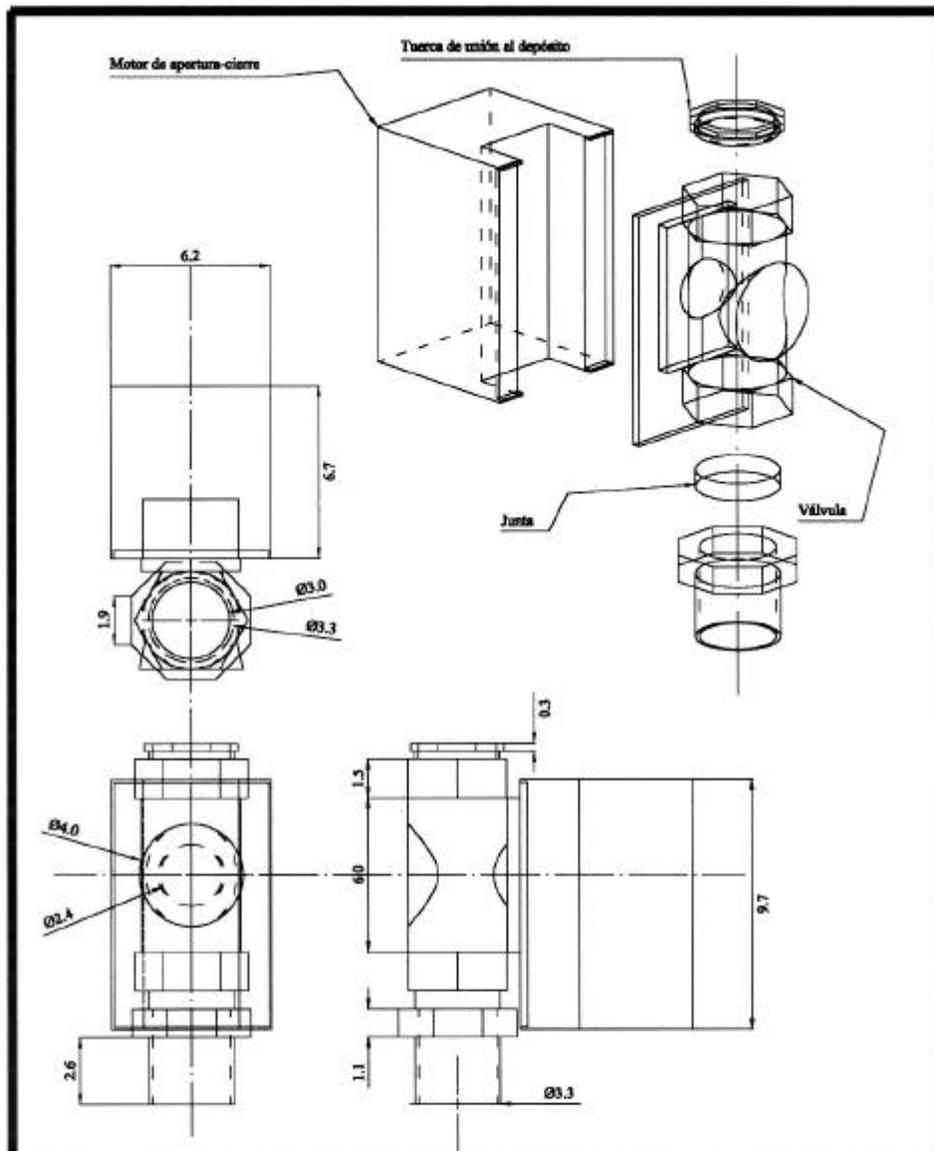


**A. C. E. S. ENGINEERING-Co.**

Dibujado:	A. C. Escobar	Firma:	Promotor:
Fecha:	10/6/2000		A. Madueño

Escala:	1:1	Célula de carga	
---------	-----	-----------------	--



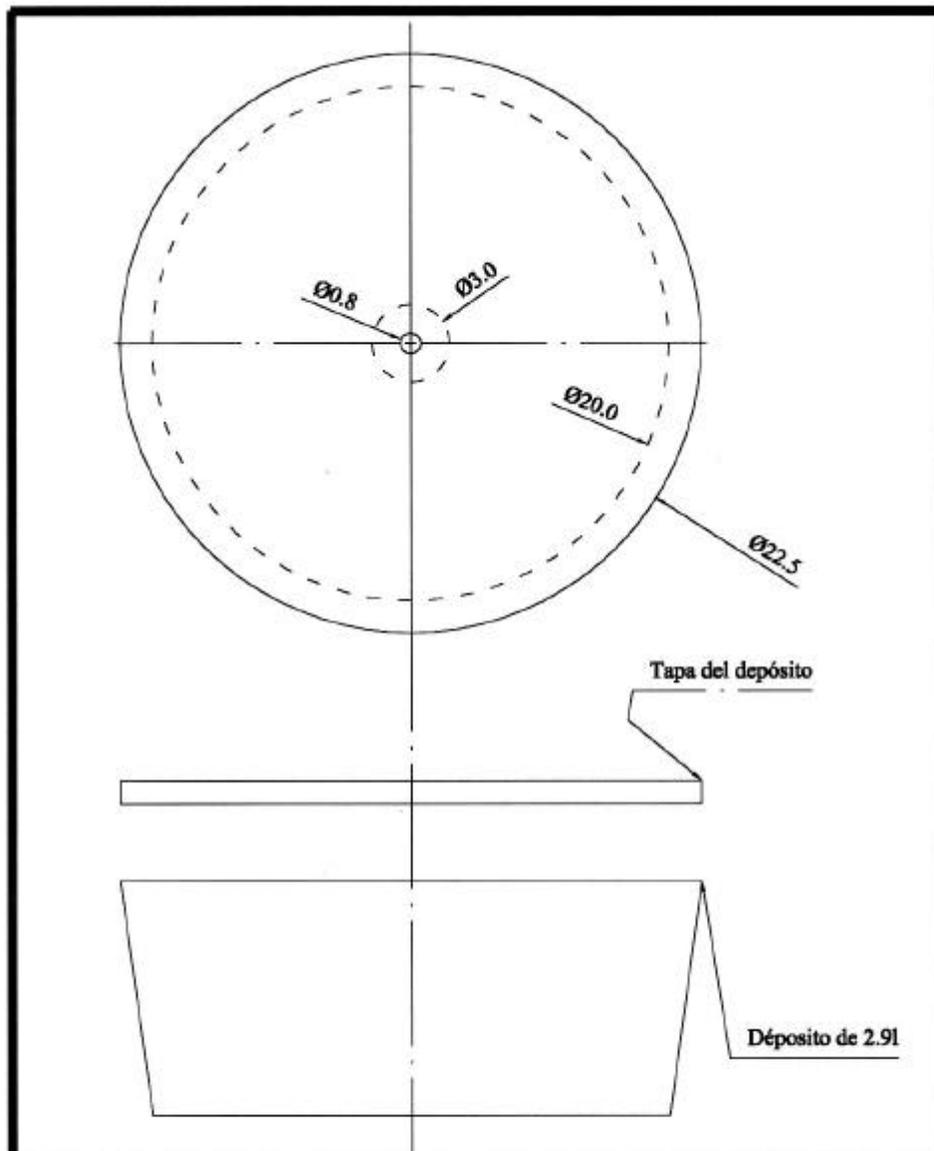


**A. C. E. S. ENGINEERING-Co.**

Dibujado:	A. C. Escobar	Firma:	Promotor:
Fecha:	13/6/2000		A. Madueño

Escala:	1:2	Válvula de zona	
---------	-----	-----------------	--





**A. C. E. S. ENGINEERING-Co.**

Dibujado:	A. C. Escobar	Firma:	Promotor:	 A.C.E.S. ENGINEERIG-Co
Fecha:	10/6/2000		A. Madueño	
Escala:	1:2	Depósito		