

01162

3
2ej.



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO



**DIVISION DE ESTUDIOS DE POSGRADO
FACULTAD DE INGENIERIA**

**EQUIPOS PARA LA MODERNIZACIÓN DE
SISTEMAS DE RIEGO POR GRAVEDAD**

TESIS

PRESENTADA POR:

OSCAR ANTONIO DZUL GARCÍA

COMO REQUISITO PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN INGENIERÍA

259404

CAMPUS MORELOS

MARZO 1998

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

*A mi esposa Verónica;
mis padres Manuel Antonio y Raquel;
y a mis hermanos Wilbert, Ricardo, Edgar y Gladys.*

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Nacional Autónoma de México, por mi formación académica.

Al Dr. Nahun Hamed García Villanueva quien me enseñó los fundamentos del riego y por su valiosa ayuda en la estructuración y elaboración de este trabajo.

A los Doctores Polioptro Martínez Austria, Carlos A. Escalante Sandoval, al M.I. Victor Manuel Arroyo Correa por la revisión preliminar, así como las sugerencias y comentarios.

Agradezco en forma especial a la Maestría en Planeación de Recursos Hidráulicos de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Zacatecas su apoyo para la elaboración de este trabajo.

Al M.I. J. Natividad Barrios Domínguez, Coordinador de la Maestría, por su confianza e invitarme a colaborar en dicha maestría y por sus valiosas discusiones sobre los temas tratados en este trabajo, además de la revisión preliminar.

Al M.C. Julián González Trinidad, por su apoyo constante y compartir sus experiencias, además, de haber sacrificado gran parte de su tiempo en la calibración y puesta a punto de los sistemas desarrollados en la parcela experimental.

Al Ing. Efraín Aguilar Hernández, por su entusiasmo y haber tenido la paciencia en enseñarme los aspectos mecánicos y constructivos de los equipos desarrollados.

Al Ing. Miguel Eduardo González Elías por su apoyo y su paciencia en explicarme el funcionamiento electrónico de los equipos, así, como a su tiempo dedicado a la calibración y operación de los equipos en la parcela experimental.

A Gustavo Zamora Nájera, por revisar la ortografía y por capturar parte del texto e imágenes.

INDICE

	Página
CAPITULO 1	
RIEGO POR GRAVEDAD	1
1.1. Descripción física del riego por gravedad.....	2
1.1.1. Riego continuo.....	2
1.1.2. Riego intermitente.....	4
1.2. El diseño.....	7
1.2.1. Métodos empíricos.....	8
1.2.2. Modelos matemáticos.....	8
CAPITULO 2	
DIABETO	10
2.1. Descripción del Diabeto.....	10
2.2. Consideraciones para el diseño del Diabeto.....	11
2.2.1. Carga de cebado.....	11
2.2.2. Depósito.....	11
2.2.3. Caudal suministrado Q_c	11
2.2.4. Gasto máximo suministrado a la melga (Q_o).....	11
2.2.5. Tiempo de vaciado del Diabeto.....	12
2.3. Fundamentación físico-matemática.....	12
2.3.1. Tiempo de llenado.....	12
2.3.2. Área del Diabeto.....	16
2.3.3. Hidrograma de descarga.....	16
2.4. Estudio experimental.....	18
2.5. Metodología de diseño.....	18
2.6. Diabeto en parcela de la UAZ.....	19
2.6.1. Diseño del Diabeto.....	19
Gasto máximo no erosivo.....	19
Tiempo de vaciado.....	20
Carga de cebado.....	20
Carga de descebado.....	20
Área del tanque.....	20
Diseño de la regadera.....	20
2.6.2. Construcción del Diabeto.....	21
Cimentación.....	21
Cadenas de desplante.....	21
Muros.....	21
Castillos.....	21
Piso.....	21
Acabado.....	21
Colocación del sifón.....	21
2.6.3. Obras adicionales.....	22
2.6.4. Diseño del riego.....	23
2.6.4.1. Riego de presiembra.....	23
2.6.4.2. Diseño del riego de auxilio.....	24
2.6.5. Operación del sistema.....	25
2.6.6. Pruebas del Diabeto.....	25
2.6.6.1. Gasto aplicado.....	25

2.6.6.2. Cebado de los sifones.....	25
2.6.6.3. Carga de cebado.....	25
2.6.6.4. Carga de descebado.....	26
2.6.6.5. Tiempo de llenado.....	26
2.6.6.6. Tiempo de vaciado.....	26
2.6.6.7. Número de ciclos para aplicar la lámina de riego.....	27
2.6.6.8. Obtención de las curvas de avance y recesión.....	27
2.6.6.9. Determinación de la distribución de la humedad en la zona radicular.....	27
2.6.6.10. Pérdidas por coleos.....	27
2.6.6.11. Requerimientos de mano de obra.....	28
2.6.6.12. Eficiencia del riego.....	28
2.7. Ventajas.....	29
2.8. Desventajas.....	30

CAPITULO 3

TANQUE DE DESCARGAS DE FONDO.....	31
3.1. Descripción del Tanque de Descargas de Fondo.....	31
3.2. Consideraciones para el diseño del tanque de descarga.....	32
3.2.1. Tanque.....	32
3.2.2. Caudal suministrado Q_e	34
3.2.3. Gasto máximo suministrado al surco (Q_o).....	34
3.2.4. Velocidad máxima no erosiva.....	34
3.2.5. Tiempo de vaciado del tanque.....	35
3.2.6. Tubería de compuerta.....	36
3.3. Fundamentación físico-matemática.....	36
3.3.1. Tiempo de llenado.....	36
3.3.2. Número de compuertas.....	37
3.3.3. Diámetro de la tubería.....	40
3.3.4. Hidrograma de descarga.....	41
3.4. Estudio experimental.....	43
3.5. Metodología de diseño.....	45
3.6. Dispositivo de apertura/cierre.....	46
3.7. TDF de la Facultad de Veterinaria de la UAZ.....	49
3.7.1. Diseño de los TDF.....	50
3.7.1.1. Velocidad máxima no erosiva.....	50
3.7.1.2. Gasto máximo no erosivo.....	50
3.7.1.3. Tiempo de vaciado.....	50
3.7.1.4. Carga de apertura.....	50
3.7.1.5. Carga de cierre.....	50
3.7.1.6. Tubería de compuerta.....	50
3.7.1.7. Gasto descargado por la compuerta.....	50
3.7.1.8. Tanque.....	51
Sección de fondo de tanque.....	51
Tiempo de llenado.....	51
Cálculo de f	51
Cálculo del gasto máximo dimensional Q_i^*	51
Número de compuertas abiertas.....	51
Diámetro de la tubería de compuerta.....	51
3.7.2. Construcción de los TDF.....	52
3.7.3. Sistema de apertura/cierre.....	54
3.7.4. Operación del sistema.....	56
3.7.5. Validación del TDF.....	56
3.7.5.1. $V_{m\acute{a}x}$ y Abertura máxima de la compuerta.....	56
3.7.5.2. Tiempo de llenado.....	56

3.7.5.3. Tiempo de vaciado.....	56
3.7.5.4. Carga de apertura y cierre.....	58
3.7.5.5. Obtención de las curvas de avance y recesión.....	58
3.7.5.6. Correcciones adicionales.....	59
3.7.6. Diseño del sistema con las ecuaciones corregidas.....	59
3.7.7. Rediseño del TDF.....	61
Velocidad máxima no erosiva.....	61
Gasto máximo no erosivo.....	61
Carga de apertura.....	61
Carga de cierre.....	61
Tubería de compuerta.....	61
Abertura de compuertas.....	61
Gasto descargado por las compuertas.....	61
Tanque.....	61
3.7.8. Tablas para el diseño de los TDF.....	64
3.7.9. Verificación en campo de las ecuaciones corregidas.....	65
3.7.10. Diseño del riego.....	67
3.7.10.1. Riego de presiembra.....	67
3.7.10.2. Riego de auxilio.....	69
3.7.11. Funcionamiento del sistema de apertura/cierre.....	70
3.7.12. No de ciclos para aplicar la lámina de riego.....	70
3.7.13. Obtención de las curvas de avance y recesión.....	71
3.7.14. Determinación de la distribución de la humedad en la zona radicular.....	71
3.7.15. Pérdidas por coleos.....	71
3.7.16. Requerimientos de mano de obra.....	71
3.7.17. Rendimiento del cultivo en riego intermitente.....	72
3.7.18. Producción obtenida.....	72
3.8 Variantes del TDF.....	73
3.8.1. TDF portátil.....	73
3.8.2. TDF en huertos familiares.....	73
3.9 Transferencia del TDF a parcelas productivas.....	76
3.10 Ventajas del TDF.....	79

CAPITULO 4

VALVULA ELECTROMECHANICA PARA RIEGO INTERMITENTE.....	80
4.1. Controladores.....	81
4.2. Bases de diseño.....	82
4.2.1. Método de solución.....	83
4.2.2. Diseño mecánico.....	85
4.2.3. Diseño de la mariposa.....	85
4.2.4. Diseño de la motorización.....	86
4.2.5. Diseño electrónico.....	87
4.2.5.1. Fuente de energía.....	87
4.2.5.2. Microcontrolador.....	87
4.2.5.3. Control de puertos.....	87
4.2.5.4. Control de sensores.....	87
4.2.5.5. Control de energía.....	88
4.2.6. Programación del microcontrolador.....	88
4.2.7. Descripción del sistema.....	88
4.2.8. Fabricación.....	90
4.3 Funcionamiento.....	90
4.3.1. Instalación.....	91
4.3.2. Activación del equipo.....	91
4.3.2.1. Modo de operación.....	92

4.3.2.1.1. Operación manual.....	92
4.3.2.1.2. Operación modo automático.....	92
4.4. Operación de la Válvula en parcelas.....	94
4.5. Diseño del riego con Válvula.....	95
4.5.1. Métodos empíricos.....	95
4.5.2. Diseño con ciclo fijo.....	96
4.6. Duración de la batería.....	96
4.7. Costo de la válvula electromecánica.....	97
4.8. Riego continuo e intermitente en la parcela.....	97
4.9. Trazo del sistema de riego.....	99
4.10. Desarrollo futuro.....	99
4.11. Ventajas.....	99
4.10. Limitaciones.....	99

CAPITULO 5

EQUIPO DE AVANCE Y RECESION.....	100
5.1. Introducción.....	100
5.2. Medición del avance y recesión.....	100
5.3. Bases de diseño.....	101
5.3.1. Método de solución.....	102
5.3.2. Descripción del sistema.....	103
5.3.2.1. Fuente de energía.....	104
5.3.2.2. Microcontrolador.....	105
5.3.2.3. Memoria.....	105
5.3.2.4. Control de puertos.....	106
5.3.2.5. Control de sensores.....	108
5.3.3. Programación del microcontrolador.....	109
5.3.4. Fabricación del sistema.....	111
5.3.5. Selección del cable.....	112
5.3.6. Sensores.....	113
5.4. Activación del equipo.....	114
5.5. Funcionamiento del equipo de avance y recesión.....	115
5.5.1. Selección del surco.....	115
5.5.2. Tendido del cable DB.....	116
5.5.3. Colocación y prueba de los sensores.....	116
5.5.4. Medición.....	117
5.5.5. Levantado del equipo.....	118
5.5.6. Traslado de la información.....	119
5.6. Operación del equipo de Avance y Recesión en parcelas.....	122
5.7. Análisis de la información.....	126
5.7.1. Función de avance.....	126
5.7.2. Velocidad de avance por ciclo.....	127
5.7.3. Eficiencia del riego.....	129

CAPITULO 6

MEDIDOR DE HUMEDAD.....	130
6.1. Medición de la humedad.....	130
6.1.1. Métodos directos.....	131
6.1.2. Método indirectos.....	131
6.1.2.1. Tensiómetros.....	131
6.1.2.2. Bloques de yeso.....	132
6.1.2.3. Aspersor de neutrones.....	132

6.2. Bases de diseño.....	133
6.2.1. Método de solución.....	134
6.2.2. Descripción del sistema.....	136
6.2.2.1. Fuente de energía.....	137
6.2.2.2. Microcontrolador.....	138
6.2.2.3. Memoria.....	138
6.2.2.4. Control de puertos.....	140
6.2.2.5. Control de sensores.....	142
6.2.2.6. Gráfica.....	143
6.2.3. Programación del microcontrolador.....	143
6.2.4. Fabricación del sistema.....	144
6.2.5. Selección de los sensores.....	145
6.3. Activación del equipo.....	145
6.4. Funcionamiento del medidor de humedad.....	146
6.4.1. Selección del lugar donde se instala el equipo.....	147
6.4.2. Instalación del equipo.....	147
6.4.3. Medición.....	148
6.4.4. Traslado de la información.....	149
6.4.5. Interpretación de la información.....	149
6.5. Medición de la humedad con el equipo en parcelas.....	149
6.5.1. Calibración del medidor de humedad.....	150
6.5.1.1. Medición de la humedad en el perfil del suelo.....	152

CAPITULO 7

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	154
-------------------------------------	-----

ANEXOS

ANEXO A PARCELA EXPERIMENTAL DE LA UAZ.....	157
ANEXO B TUBERIA DE COMPUERTA.....	161
ANEXO C CONSIDERACIONES PARA EL DISEÑO DEL EQUIPO ELECTRONICO.....	165
Referencias bibliográficas.....	173

INDICE DE FIGURAS

	Página
Figura 1-1 Parcela regada en continuo.....	3
Figura 1-2 Patrón de humedecimiento en riego continuo.....	3
Figura 1-3 Secuencia ilustrativa del riego intermitente.....	5
Figura 2-1 Diabeto.....	10
Figura 3-1 Tanque de Descargas de Fondo.....	32
Figura 3-2 Funcionamiento del Tanque de Descargas de Fondo.....	33
Figura 3-3 Gasto máximo no erosivo en surcos.....	34
Figura 3-4 Selección del Tiempo de Vaciado del TDF.....	35
Figura 3-5 Sistema apertura/cierre (1995).....	47
Figura 3-6 Sistema apertura/cierre (1996).....	47
Figura 3-7 Detalles constructivos del TDF.....	52
Figura 3-8 Corte de tubo de PVC.....	55
Figura 3-9 Construcción del sistema de apertura/cierre para el TDF.....	57
Figura 3-10 Valores de Q_i vs Q_c para el TDF I.....	58
Figura 3-11 Construcción del TDF para huertos familiares.....	74
Figura 4-1 Válvulas comerciales para riego intermitente.....	81
Figura 4-2 Características de la Válvula electromecánica.....	85
Figura 4-3 Módulos de la Válvula electromecánica.....	89
Figura 4-4 Diagrama eléctrico del sistema de control de la Válvula.....	90
Figura 4-5 Riego en parcelas de diferentes configuración con la Válvula electromecánica.....	98
Figura 5-1 Módulos del Equipo de Avance y Recesión.....	104
Figura 5-2 Diagrama eléctrico de la Tarjeta Fuente de Energía.....	106
Figura 5-3 Diagrama eléctrico de la Tarjeta Fuente de Energía.....	106
Figura 5-4 Diagrama eléctrico de la Tarjeta Control de Puertos.....	108
Figura 5-5 Diagrama eléctrico de la Tarjeta Control de Sensores.....	109
Figura 5-6 Funcionamiento electrónico del Equipo de Avance y Recesión.....	111
Figura 5-7 Programa RM para lectura de la memoria.....	121
Figura 5-8 Lectura de los datos de la memoria.....	122
Figura 5-9 Curvas de avance y recesión, mediciones a pie vs equipo.....	126
Figura 5-10 Curvas de avance, Continuo vs Intermitente.....	128
Figura 5-11 Curvas de avance, Velocidad por ciclo.....	128
Figura 6-1 Tensiómetro de mercurio.....	133
Figura 6-2 Dispensor de neutrones.....	134
Figura 6-3 Módulos del Medidor de Humedad.....	137
Figura 6-4 Diagrama eléctrico de la Tarjeta de memoria.....	140
Figura 6-5 Diagrama eléctrico de la Tarjeta Control de Puertos.....	142
Figura 6-7 Diagrama eléctrico de la Tarjeta Control de Sensores.....	144
Figura 6-8 Calibración del Medidor de Humedad.....	152
Figura 6-9 Variación de la humedad en el perfil del suelo.....	154

INDICE DE FOTOGRAFIAS

	Página
Fotografía 2-1 Construcción de la regadera del Diabeto.....	22
Fotografía 2-2 Riego con Diabeto en melgas.....	27
Fotografía 2-3 Riego tradicional con regadera y sifones.....	28
Fotografía 2-4 Diabeto con tubería de compuerta.....	29
Fotografía 2-5 Riego con Diabeto y tubería de compuerta.....	29
Fotografía 3-1 Sistema de apertura/cierre (1994).....	46
Fotografía 3-2 Sistema de apertura/cierre (1996).....	48
Fotografía 3-3 Sistema de apertura/cierre (1997).....	49
Fotografía 3-4 TDF de la Facultad de Veterinaria (UAZ).....	57
Fotografía 3-5 Operación del TDF con sistema de apertura de PVC.....	70
Fotografía 3-6 Equipo de Avance y Recesión en parcela regada con TDF.....	71
Fotografía 3-7 Cambio del grupo de compuertas por regar.....	72
Fotografía 3-8 Parcelas regadas en forma tradicional y con TDF.....	72
Fotografía 3-9 TDF para huertos familiares.....	76
Fotografía 3-10 El Duraznillo, Pánuco, Zac.....	76
Fotografía 3-11 San Gerónimo, Guadalupe, Zac.....	77
Fotografía 3-12 El Duraznillo, Pánuco, Zac.....	77
Fotografía 3-13 Calera, Zac.....	77
Fotografía 3-14 Noria de Angeles, Zac.....	78
Fotografía 3-15 Calera, Zac.....	78
Fotografía 3-16 TDF en el semidesierto zacatecano.....	79
Fotografía 4-1 Instalación de la válvula.....	94
Fotografía 5-1 Fabricación de la Tarjeta.....	111
Fotografía 5-2 Tarjetas del Equipo de Avance y Recesión.....	112
Fotografía 5-3 Sensor del EAR.....	113
Fotografía 5-4 Tendido del cable plano.....	116
Fotografía 5-5 Verificación de funcionamiento del EAR.....	117
Fotografía 5-6 Equipo de Avance y Recesión en parcela.....	118
Fotografía 5-7 Levantado del EAR.....	119
Fotografía 5-8 Memoria del EAR.....	120
Fotografía 5-9 Validación del EAR en campo.....	122
Fotografía 5-10 EAR en riego nocturno.....	123
Fotografía 5-11 Avance en continuo.....	128
Fotografía 5-12 Avance en intermitente.....	128
Fotografía 6-1 Instalación de los sensores del medidor de humedad en la parcela.....	147
Fotografía 6-2 Conexión del equipo electrónico a los sensores.....	148
Fotografía 6-3 Lectura de voltajes.....	150

INDICE DE TABLAS

	Página
Tabla 1-1 <i>Adaptación, limitación y ventajas del riego intermitente por melgas o surcos</i>	2
Tabla 2-1 <i>Características de la parcela regada con el Diabeto</i>	19
Tabla 2-2 <i>Materiales y mano de obra del Diabeto</i>	22
Tabla 2-3 <i>Operación del Diabeto con tubería de compuerta</i>	28
Tabla 3-1 <i>Diseño de la pila $A_t = 12 \text{ m}^2$ $h_a = 1 \text{ m}$ $Q_e 3 \text{ l/s}$</i>	44
Tabla 3-2 <i>Características de los TDF de las parcelas experimentales</i>	49
Tabla 3-3 <i>Gasto descargado para diferentes aberturas de compuerta</i>	51
Tabla 3-4 <i>Materiales y mano de obra para el TDF 1</i>	53
Tabla 3-5 <i>Materiales y mano de obra para el TDF 2</i>	53
Tabla 3-6 <i>Materiales y mano de obra para el TDF 3</i>	54
Tabla 3-7 <i>Materiales del Flotador y ménsulas para fijarlo al Tanque</i>	54
Tabla 3-8 <i>Materiales del sapo</i>	55
Tabla 3-9 <i>Pruebas de vaciado del TDF (Datos de campo vs Modelo Numérico)</i>	65
Tabla 3-10 <i>Ayuda de diseño para el Tanque de Descargas de Fondo</i>	66
Tabla 3-11 <i>Ayuda de diseño para el tanque de Descargas de Fondo</i>	67
Tabla 3-12 <i>Materiales del Tanque</i>	73
Tabla 3-13 <i>Materiales de la tubería de orificios</i>	73
Tabla 3-14 <i>Materiales de la base para el Tanque</i>	73
Tabla 4-1 <i>Operación de la parcela regada con válvula</i>	97
Tabla 5-1 <i>Mediciones con el personal de campo</i>	124
Tabla 5-2 <i>Mediciones con el equipo electrónico</i>	124
Tabla 6-1 <i>Medición de la humedad en el perfil del suelo</i>	152

I

INTRODUCCION

En nuestro país la superficie abierta al cultivo es de 22 millones de Hectáreas, de las que un poco más de 6 millones corresponden a áreas con buen temporal, otras tantas son de temporal errático y 6.3 millones disponen de infraestructura para riego, de esta última superficie el 60 por ciento se concentra en 81 distritos de riego y el resto disperso en aproximadamente 30 000 unidades de riego con pozos particulares.

En el 92 % del área de riego predominan los sistemas de riego por gravedad en su modalidad de surcos y melgas. En el 8 % restante se tienen instalados sistemas de riego por aspersión, microaspersión y goteo.

El agua subterránea es la fuente de abastecimiento para aproximadamente un 45 % de la superficie de riego; no obstante que su costo es significativamente mayor que el agua de superficie.

Para satisfacer estas necesidades de riego se explotan 258 grandes acuíferos mediante la operación de aproximadamente 80 000 pozos. Ochenta de estos están sobreexplotados. Esto ha tenido como consecuencias el abatimiento acelerado de los niveles estáticos del agua (mas de 1.2 m al año); pozos agrícolas operando con niveles dinámicos de 70 a 140 m y más, además de los altos costos de los energéticos requeridos para su bombeo.

Actualmente los sistemas de riego por gravedad operan a un 47 % de eficiencia a nivel parcelario, debido a las pérdidas de agua por escurrimiento superficial (coleos) y por percolación profunda, además de aplicar riegos inoportunos, ocasionando que los rendimientos de los cultivos sean bajos.

Considerando la situación anterior, resulta claro plantear soluciones a este problema. Una de estas sería introducir nuevas técnicas en la aplicación del agua, como el riego presurizado que incrementa la eficiencia del riego y a la vez aumenta los rendimientos de los cultivos. Sin embargo, la implantación y operación de este sistema se ve limitado por el requerimiento de grandes inversiones iniciales, de los altos costos en mantenimiento, operación y de energéticos.

Por esta y otras razones y tomando como un hecho la urgente necesidad de hacer un mejor uso de los recursos agua-suelo, disminuyendo el riesgo de sobreexplotación de los acuíferos y el abatimiento de los niveles freáticos, se debe considerar como una solución importante la introducción de tecnologías más eficientes en el uso del agua y la energía en el riego por gravedad. Para su aceptación e implantación en el agro mexicano deben considerarse las condiciones físicas existentes en las zonas de riego, reconociendo la diversidad económica y social del agricultor.

Para mejorar las eficiencias de aplicación y distribución a nivel parcelario, recientemente se ha investigado e implementado una nueva forma de suministro del agua de riego, la cual consiste en aplicarla en forma cíclica en la parcela, tal metodología se denomina riego intermitente. Al respecto el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) y la Universidad Autónoma de Zacatecas (UAZ) han desarrollado una serie de alternativas tecnológicas para aplicar el riego intermitente. Como producto de estas actividades se ha generado una serie de dispositivos (Diabeto, Tanque de Descargas de Fondo y Válvula Electromecánica) que han sido probados en parcelas experimentales y productivas presentando eficiencias de aplicación cercanas al 80% con ahorros de agua y energía del orden del 25% con relación a las prácticas tradicionales en los sitios de prueba.

Por otra parte, para el diseño óptimo o evaluación de los sistemas de riego por gravedad, se deben evaluar la velocidad de los frentes de avance y recesión de la región de flujo que transita en el surco o melga y, el contenido de humedad y su variación en la zona radicular, para ello el IMTA y la UAZ han desarrollado dos equipos electrónicos (Equipo de Avance y Recesión y Medidor de Humedad) que miden estos parámetros en forma sencilla y confiable.

En este trabajo se describen el diseño, construcción y la aplicación de estos sistemas de riego; así como las metodologías y criterios para el riego intermitente. Se presentan además dos equipos electrónicos como apoyo a la modernización del riego por gravedad (Equipo de Avance y Recesión y Medidor de Humedad), sus ventajas

respecto a otros sistemas tradicionales de medición de la relación avance/recesión superficial del flujo y de la humedad y su variación en el suelo.

Este trabajo recoge las experiencias acumuladas por un equipo multidisciplinario de investigadores del IMTA y la UAZ que han dirigido sus esfuerzos en el establecimiento y desarrollo de criterios, herramientas y dispositivos de uso general orientados a la modernización, diseño, construcción y operación de sistemas de riego por gravedad.

RIEGO POR GRAVEDAD

En el riego por gravedad sobresalen los métodos de riego por melgas y surcos.

Una melga es una franja de terreno, generalmente rectangular, delimitada por dos bordos longitudinales paralelos y dos bordos transversales. También pueden ser cuadros irregulares muy cortos, siguiendo las curvas de nivel (en terrenos poco nivelados). La melga tiene una pendiente longitudinal que coincide con la dirección del riego y una transversal que es nula o muy pequeña. Las melgas rectas son muy utilizadas para el cultivo de forrajes y granos pequeños.

El surco es un caso particular de la melga, donde el ancho es muy pequeño; tiene una pendiente longitudinal que coincide con la dirección del riego, que puede ser trazado sobre terrenos con pendientes transversales fuertes. Este método de riego se adapta a muchos tipos de cultivos, principalmente a los que se siembran por hilera, como las gramíneas de porte alto, el maíz y el sorgo; también se adapta en cultivos como el frijol, la papa y prácticamente todas las hortalizas.

El objetivo del riego por gravedad en melgas es aplicar uniformemente la lámina de riego a lo largo de la misma; esto puede realizarse siempre y cuando las pendientes longitudinales sean uniformes y la transversal sea nula o muy pequeña. En el caso del surco, la pendiente transversal del terreno no es importante, pues su ancho es muy pequeño y cada surco es independiente de los otros, por lo que únicamente se requiere

una pendiente longitudinal uniforme.

Para definir el tipo de riego (melgas o surcos) se tienen varios factores que son muy importantes, como son la pendiente longitudinal y transversal, el tipo de cultivo, la capacitación para el manejo del agua, etc. En la Tabla 1-1 se muestran algunos factores que influyen en la selección del método del riego por gravedad.

Tabla 1-1 Adaptación, limitación y ventajas de riego por melgas o surcos.

Tipo	Adaptación	Limitación	Ventajas
MELGAS	<ol style="list-style-type: none"> 1. Cultivos de siembra densa, pastos, cereales. 2. Todos los suelos aptos para riego 3. Pendientes hasta de 1.5 %, óptima 0.2 %. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Se requiere nivelación. 2. Se requieren caudales grandes. 3. Los suelos poco profundos no pueden nivelarse a bajo costo. 4. No utilizable en cultivos sensibles a la inundación. 5. Agua de buena calidad para evitar salinización. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Buena eficiencia de aplicación con buen proyecto y operación. 2. Eficiente uso de la mano de obra. 3. Bajos costos de mantenimiento. 4. Regular control sobre el agua.
SURCOS	<ol style="list-style-type: none"> 1. Cultivos en hilera y frutales. 2. Todos los suelos aptos para el riego. 3. Pendiente hasta del 3 %, óptima 0.2 %. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Moderada necesidad de mano de obra. 2. Pérdidas requeridas para aplicación uniforme. 3. Peligro de erosión en pendientes fuertes. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Aplicación uniforme del agua. 2. Buena eficiencia. 3. Buen control del riego. 4. Equipos de control de riego como sifones o tubería de compuerta. 5. Solo requiere emparejar.

* Modificado de C. Grass, 1989. "Técnica de riego por superficie"

1.1 Descripción física del riego por gravedad

1.1.1 Riego continuo

En la figura 1-1 se muestra una disposición típica; un canal o tubería de alimentación que surte agua a la melga o surco. La parcela tiene una pendiente longitudinal que favorece el escurrimiento. El agua se descarga a la parcela y cubre el suelo con una lámina de la que una parte escurre superficialmente y otra parte se infiltra. Si el riego ha sido bien diseñado, después de un cierto tiempo el flujo alcanzará el final de la parcela. Esta fase del riego se conoce como *fase de avance*.

Una vez que el agua llegó al final de la parcela, se continúa suministrando durante cierto tiempo hasta aplicar la lámina de riego requerida, esta es la *fase de almacenamiento*, que termina cuando se corta el suministro a la parcela. Cuando se suspende el agua, rápidamente deja de fluir agua por la superficie y permanece por un corto tiempo mientras se infiltra. Superficialmente se observa una desaparición gradual

del agua desde la cabecera hasta el final de la parcela, similar a una onda que se desplaza, y entonces el surco o la melga quedan sin agua superficial. Esta desaparición gradual del agua se denomina *recesión*.

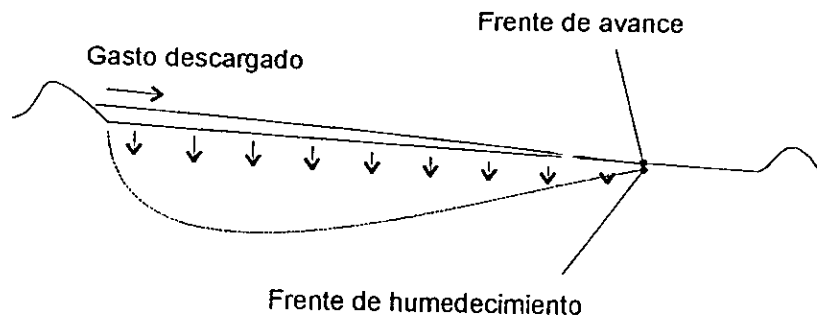


Figura 1-1 Parcela regada en continuo

Considerando que se desea aplicar una determinada lámina para humedecer la zona de raíces y dar un buen riego, el agua debe ser aplicada a lo largo de la parcela por un período de tiempo, denominado tiempo de aplicación (T_{apl}), para que el agua superficial se infiltre. Para un suelo seco, inicialmente el agua avanza rápidamente; pero como una parte se infiltra, el caudal disminuye a medida que el agua avanza produciendo una reducción en la velocidad del flujo, e incrementando el tiempo de avance del flujo (T_{av}) a lo largo del surco o melga. Considerando estas dos variables (T_{apl} y T_{av}), para aplicar la lámina requerida a lo largo de la parcela, se tiene un tiempo en exceso al inicio de ella, por lo que se infiltrará una mayor lámina que al final de la parcela. Esta sobredosis de agua no es aprovechada por el cultivo ya que es drenada por gravedad (Pérdidas por percolación). En la figura 1-2 se muestra la distribución del agua infiltrada a lo largo de la parcela.

En México las eficiencias de aplicación a nivel parcelario son bajas (hasta un 45 %) debido a las pérdidas de agua por coleos y percolación profunda. Para mejorar las eficiencias de aplicación y distribución, recientemente se ha desarrollado una nueva forma de aplicación del agua en la parcela denominado *riego intermitente*. De esta forma se disminuyen las pérdidas de agua por percolación, y coleos; produciéndose una mayor uniformidad del perfil de humedad en el suelo.

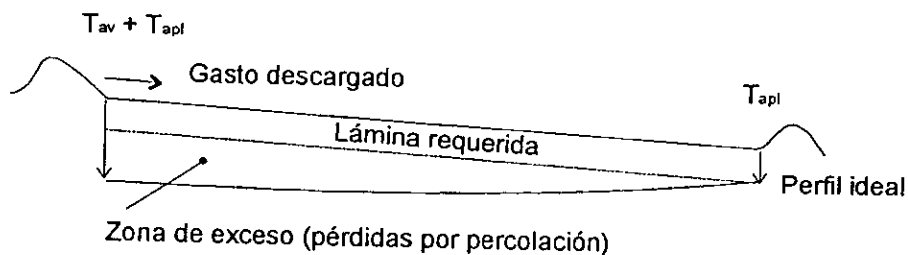


Figura 1-2 Patrón de humedecimiento en riego continuo

1.1.2 Riego intermitente

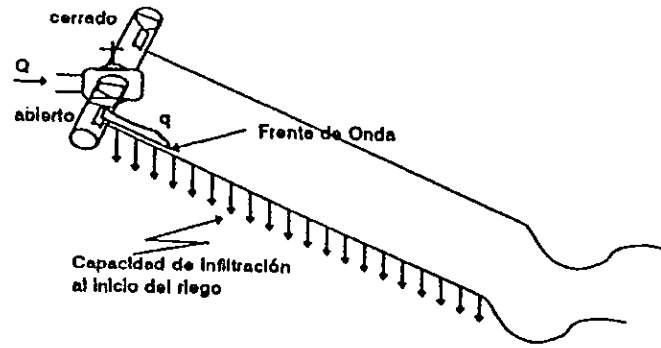
El riego intermitente está basado en un sistema de descargas a intervalos de tiempo definidos, las cuales son controladas por un dispositivo que regula el flujo hacia la parcela. El riego intermitente inicia igual que en riego continuo, pero después de cierto tiempo se suspende el suministro y consecuentemente el flujo de agua superficial, produciéndose en la sección mojada una serie de transformaciones físico-químicas. La estructura del surco se altera, se expanden y acomodan las partículas de arcilla, sellando la superficie del suelo y reduciendo la velocidad de infiltración. Tal sellamiento superficial se desarrolla normalmente en 4 o 5 minutos (García, 1994).

Como la infiltración disminuye y el suelo mojado se vuelve más liso, durante el segundo y subsecuentes ciclos, el agua de cada descarga se aproxima al suelo seco, o sea, a la zona que no ha sido humedecida a una mayor velocidad de avance y con una mayor inercia que en el riego continuo. El flujo alcanza el final de la parcela después de varios ciclos. Cuando el frente de onda llega al final, no se concluye el riego, sino que se continúa aplicando las descargas hasta que en toda la longitud de la parcela se ha infiltrado la lámina requerida. En la Figura 1-3 se muestra la secuencia del riego en forma intermitente (García, 1994). Este método de riego presenta ventajas respecto al riego continuo, se tiene un avance más rápido del flujo, reducción en la infiltración en el suelo previamente mojado y en consecuencia un incremento en la eficiencia del riego con una reducción del agua y tiempo de riego. En este sentido, y considerando la infraestructura agrícola existente en el país, el riego intermitente es una buena alternativa para modernizar el riego por gravedad.

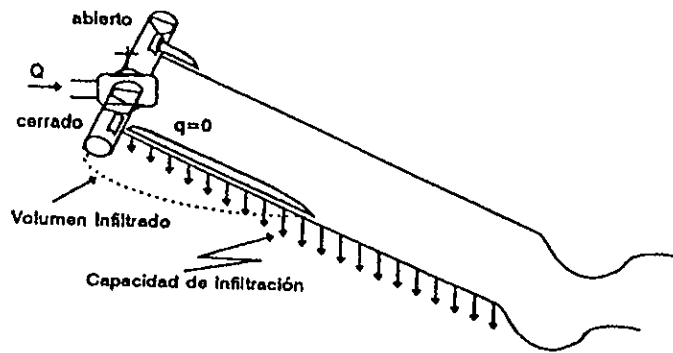
Para aplicar el riego intermitente, es necesario disponer de la infraestructura necesaria para aplicar el agua en el surco sin pérdidas apreciables de agua y contar con dispositivos automáticos de descarga cíclica de bajo costo. Por otra parte, para aplicar el agua al surco desde la fuente de abastecimiento con el método de riego intermitente, es necesario contar con tubería de conducción y de compuerta en vez de canales o regaderas con sifones. Si se compara con un sistema tradicional este sistema tiene las siguientes ventajas:

- Presenta pocas pérdidas de agua por filtración y evaporación.
- Presenta una mayor respuesta.
- Puede conseguirse una longitud menor del sistema debido a que su trazo no está obligado a seguir los linderos ni determinada pendiente.
- Es posible descargar el gasto deseado al surco o melga con solo regular la abertura de la compuerta.

En el Anexo B se muestran las características y criterios de manejo de la tubería de compuerta en el riego por gravedad.



Inicio del Primer Ciclo



Fin del Primer Impulso

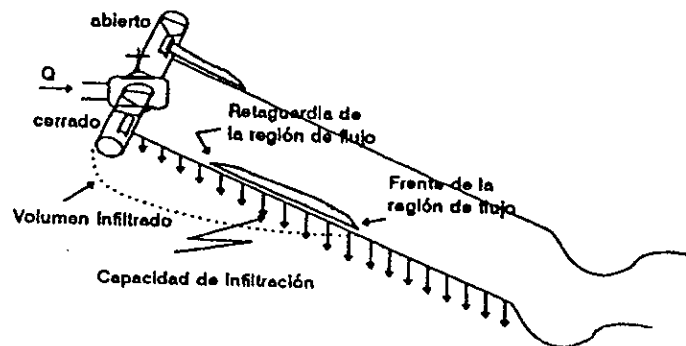
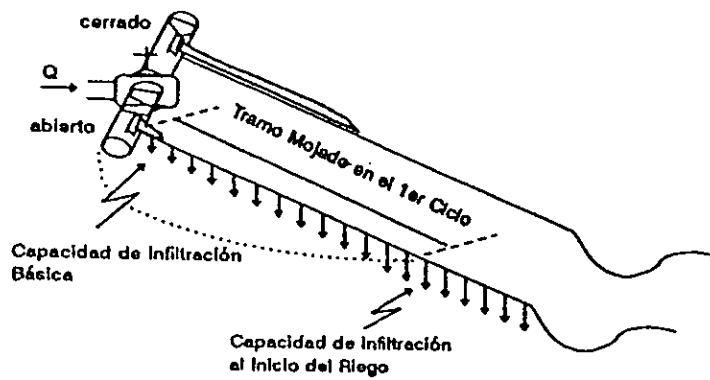
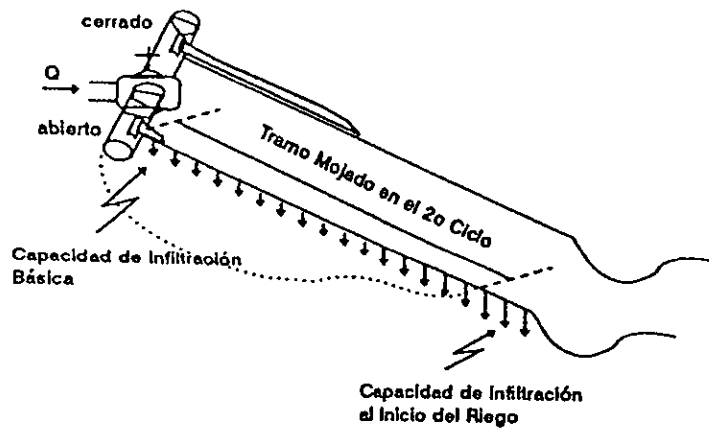


Figura 1-3 *Secuencia ilustrativa del riego intermitente*



Final del 1er. ciclo e Inicio del 2o.



Final del 2o. ciclo e Inicio del 3o.

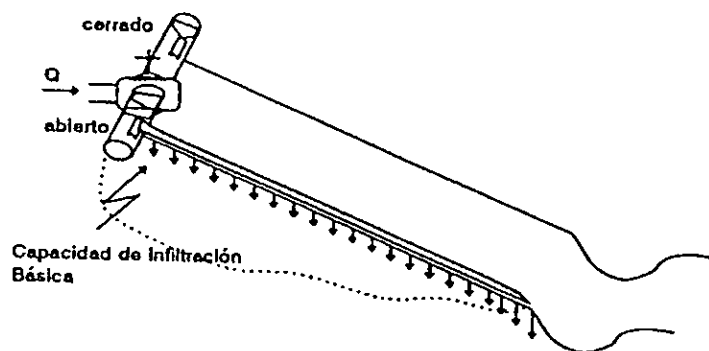
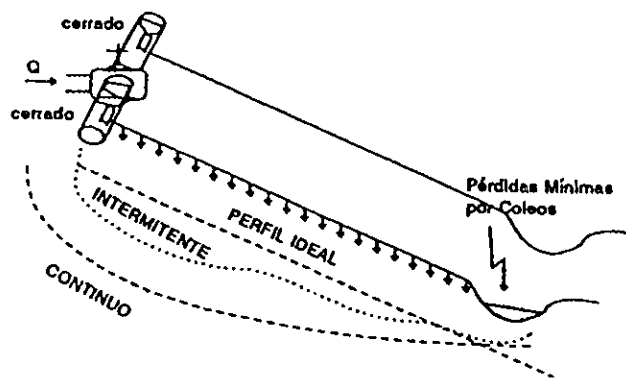


Figura 1-3 Secuencia ilustrativa del riego intermitente (Continuación)



Sistema al Final del Riego

Figura 1-3 Secuencia ilustrativa del riego intermitente (Continuación)

Con el fin de contribuir en el desarrollo de este tipo de riego, el IMTA y la UAZ en convenio han desarrollado tres dispositivos de control del riego intermitente (Diabeto, Tanque de Descargas de fondo y una válvula electromecánica).

El Diabeto está diseñado para regar en melgas; no requiere energía externa para su operación, las descargas cíclicas se producen por automatización fluidica del cebado y descebado de un grupo de sifones que descargan a la parcela. El Diabeto opera con ciclos de tiempo constante, alimentado por gastos constantes pequeños, de 1 a 10 l/s.

El Tanque de Descargas de Fondo (TDF) está diseñado para dar el riego en surcos, opera en ciclos de tiempo constante o variable (de acuerdo al riego deseado), los ciclos se dan a través de un sistema de apertura y cierre automatizado fluidicamente a través de la aplicación del principio de flotación hidrostática. El TDF opera en parcelas de hasta 250 m de longitud alimentado con gastos entre 0.05 l/s y 10 l/s.

Para parcelas que disponen de gastos mayores (10 a 50 l/s) y longitudes de surco mayores a los 250 m se diseñó la Válvula Electromecánica. Este equipo contiene un controlador automático programable de ciclos de descargas de caudal.

En los capítulos siguientes se describen en detalle los equipos desarrollados por el IMTA y la UAZ.

1.2 El diseño

Para el diseño del riego por gravedad, basado en eficiencias de aplicación, es necesario considerar la longitud, el ancho de la melga o el espaciamiento del surco, la pendiente longitudinal, la velocidad de infiltración, así como el gasto disponible para el riego y la lámina de riego requerida.

Para el diseño del riego por gravedad se pueden utilizar dos métodos:

- a) Métodos empíricos.
- b) Modelos teóricos físicamente fundamentados.

1.2.1 Métodos empíricos

Consisten en realizar pruebas de riego en campo en donde las variables experimentales son el gasto descargado, la longitud de la melga o del surco y el tipo de suelo. Basados en los resultados para cada tipo de suelo se obtiene una tabla o una relación empírica donde se representan las combinaciones gasto-longitud que permitan aplicar uniformemente una cierta lámina de riego.

Estas pruebas de campo tienen la desventaja de que son tardadas y costosas, por lo que no son muy recomendables.

1.2.2 Modelos matemáticos

En el riego se presentan dos escurrimientos; i) Superficial, que puede considerarse como horizontal y ii) subterráneo, considerado generalmente como vertical. El escurrimiento superficial es representado por las ecuaciones de Saint-Venant (1871); y el escurrimiento subterráneo empleando ecuaciones de conservación de masa y una ecuación derivada de Darcy aplicable a medios porosos.

La solución simultánea de las ecuaciones describe el flujo en la melga o en el surco, debido a su complejidad y a las condiciones iniciales y de frontera, se han desarrollado diversos modelos, como son:

- *Modelos hidrodinámicos.* Basados en versiones completas de las ecuaciones de Saint-Venant.
- *Modelos de inercia-cero.* Basados en versiones simplificadas en las cuales a la ecuación de conservación de cantidad de movimiento se le han eliminado los términos inerciales.
- *Modelos basados en la ecuación de onda cinemática.*
- *Modelos por balance de volumen.* Basados en la ecuación de conservación de masa y una relación de almacenamiento-descarga que sustituye la ecuación de la energía.

Todos los modelos se aplican para simular el avance del frente de onda; algunos se aplican a la simulación del proceso de recesión, y válidos únicamente para bordos (secciones rectangulares).

Tal vez el modelo con el que se han obtenido mejores resultados para simular el riego intermitente es el propuesto por García (1994). Este autor desarrolló un modelo hidrodinámico basado en la transformación adimensional de las ecuaciones de Saint-Venant que simula el avance y recesión del riego continuo e intermitente para

cualquier tipo de sección transversal de la conducción, estableciendo, además, los criterios de simulación de la variación de la intensidad de la infiltración según transcurre el riego. Desarrolla un programa de cómputo de fácil manejo, aplicado a diversos casos y condiciones de operación del sistema donde se realiza el riego.

DIABETO

2.1 Descripción del diabeto

En la figura 2-1 se muestra un esquema simplificado del Diabeto (Martínez y Aldama, 1990) que está constituido por dos partes fundamentales; Depósito de almacenamiento y los Sifones.

En el depósito, inicialmente vacío, se descarga en forma continua el caudal disponible para riego (Q_e); de esta manera, el tirante dentro del depósito se incrementa gradualmente hasta alcanzar el nivel previsto (h_c) para el cebado del sifón e iniciar la descarga hacia la parcela.

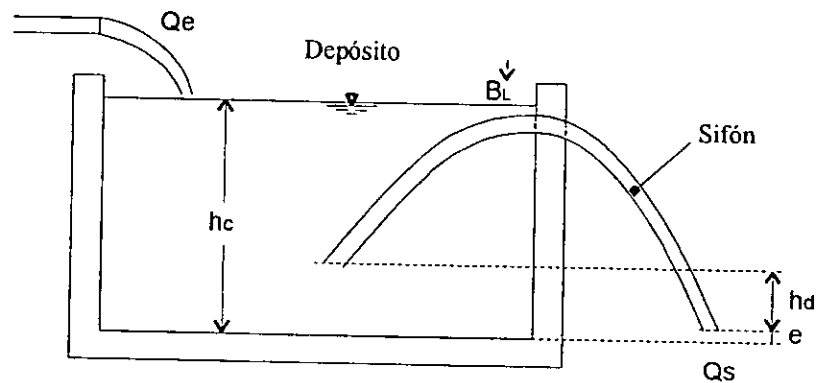


Figura 2-1 Diabeto

Como el gasto descargado (Q_s) por el sifón siempre es mayor que el gasto de entrada (Q_e) al sistema, el nivel del depósito desciende paulatinamente hasta que por efecto de la intrusión de aire se produce el descebado del sifón, iniciando con ello un nuevo ciclo de llenado y vaciado.

2.2 Consideraciones para el diseño del Diabeto

2.2.1 Carga de cebado

Por razones económicas, es recomendable adoptar valores de $0.3 \leq h_c \leq 1.25$ m, o al menos 10 cm respecto a la carga disponible con que es abastecido el Diabeto.

2.2.2 Depósito

El Diabeto por ser una obra permanente en la parcela debe construirse de materiales duraderos tales como tabique o piedra. Por razones económicas y estructurales, el tanque debe tener las siguientes características:

Con el fin de establecer dimensiones estandarizadas, se propone adoptar secciones de fondo cuadradas. En caso de que la topografía del terreno restrinja la dimensión del diabeto, se adoptará una sección rectangular. Las dimensiones del depósito deben ser múltiplos de 5 cm.

Para evitar derrames generados por efecto de la descarga o acción del viento, se recomienda un bordo libre de 15 cm ($B_L = 0.15$ m).

La altura total del diabeto está dada por:

$$H_d = h_c + e + B_L \quad (2.1)$$

donde e es el desnivel entre el fondo del depósito y el nivel de descarga de los sifones, se recomienda un valor $e = 0.05$ m

2.2.3 Caudal suministrado Q_e

Como se indicó anteriormente; el dispositivo está concebido para aplicar el riego intermitente en zonas donde se dispone de caudales pequeños (1-10 lps)

$$1 \text{ lps} \leq Q_e \leq 10 \text{ lps} \quad (2.2)$$

2.2.4 Gasto máximo suministrado a la melga (Q_o)

Generalmente se considera conocido; se determina en función del tipo de suelo y la pendiente longitudinal de la parcela:

2.2.5 Tiempo de vaciado del Diabeto

Este es uno de los más importantes parámetros que se requieren para el diseño adecuado del Diabeto. De la selección correcta de este dato dependerá la eficiencia del riego con que operará el sistema.

2.3 Fundamentación físico-matemática

2.3.1 Tiempo de llenado

Durante el proceso de llenado del tanque (Figura 2-1), por efecto del suministro del gasto de entrada (Q_e), tiempo en el que los sifones no descargan, el volumen almacenado (V_d) se incrementa respecto al tiempo como:

$$\frac{dV_d}{dt} = Q_e \quad (2.3)$$

Se desea conocer la variación del tirante en el depósito. Expresando el volumen (V) en función del área de fondo del depósito (A_d) y el tirante (h).

$$V = A_d h \quad (2.4)$$

sustituyendo (2.4) en (2.3),

$$\frac{d(A_d h)}{dt} = Q_e \quad (2.5)$$

Considerando que A_d es constante y despejando dt , resulta

$$dt = \frac{A_d}{Q_e} dh \quad (2.6)$$

Denominando t_{LL} al tiempo de llenado, el cual corresponde al tiempo que transcurre para que el tirante (h) se incremente desde la carga de descebado (h_d), hasta la de cebado (h_c), que es la carga máxima en que inicia la descarga del depósito. Para cuantificar dicho tiempo se integra la ecuación (2.6) entre los límites 0 a t_{LL} en el tiempo y de h_d a h_c en el tirante, obteniéndose:

$$t_{LL} = \frac{A_d(h_a - h_c)}{Q_e} \quad (2.7)$$

Por otra parte el proceso de vaciado del depósito por efecto de la descarga Q_s de los sifones se cuantifica como:

$$\frac{dV}{dt} = Q_e - Q_s \quad (2.8)$$

Expresando la ecuación (2.8) en función del área y del tirante,

$$A_d \frac{dh}{dt} = Q_e - Q_s \quad (2.9)$$

Para un sifón, el gasto de salida está definido por la ecuación (2.10), en donde μ es el coeficiente de descarga y A_s el área del sifón.

$$q_s = \mu A_s \sqrt{2gh} \quad (2.10)$$

Considerando m sifones, el gasto descargado Q_s es;

$$Q_s = m\mu A_s \sqrt{2gh} \quad (2.11)$$

despejando h de la ecuación (2.11)

$$h = \frac{1}{2g} \left(\frac{Q_s}{m\mu A_s} \right)^2 \quad (2.12)$$

Reemplazando (2.12) en (2.9),

$$\frac{Q_s}{Q_s - Q_e} \frac{dQ_s}{dt} = - \frac{g(m\mu A_s)^2}{A_d} dt \quad (2.13)$$

Para obtener una solución general, se introducen las siguientes variables adimensionales:

gasto adimensional

$$Q^* = \frac{Q_s}{Q_e}$$

tiempo adimensional

$$t^* = \frac{t}{t_v}$$

de esta manera, la ecuación (2.13) se puede expresar como;

$$\frac{Q^*}{Q^* - 1} \frac{dQ^*}{dt^*} = -K dt^* \quad (2.14)$$

en donde

$$K = \frac{g(m\mu A_s)^2 t_v}{Q_e A_d} \quad (2.15)$$

Durante el vaciado deben satisfacerse las siguientes condiciones,

$$Q_i^* = \frac{Q_{sc}}{Q_e} > 1$$

$$Q_c^* = \frac{Q_{sd}}{Q_e} > 1$$

donde Q_i^* es el gasto máximo dimensional al iniciar el vaciado del depósito, Q_c^* es el gasto mínimo dimensional al momento del descebado del diabeto, Q_{sc} el gasto al inicio de la descarga, y Q_{sd} el gasto en el momento del descebado.

Para que ocurra el descebado del Diabeto, es necesario que cuando $t^* = 1$, se continúe cumpliendo la desigualdad anterior. Introduciendo un factor de seguridad del 10 %, se tiene $Q_c^* = 1.1$

Bajo las consideraciones anteriores, integrando la ecuación (2.14) entre los límites ya indicados anteriormente se tiene;

$$-1.2025 - Q_i^* - \ln(Q_i^* - 1) = -K \quad (2.16)$$

Por otra parte considerando la ecuación (2.11), Q^* se puede expresar como

$$Q^* = \frac{m \mu A_s \sqrt{2g h}}{Q_e} \quad (2.17)$$

Despejando $n \mu A_s^*$ se tiene;

$$m \mu A_s = \frac{Q_e Q^*}{\sqrt{2g h}} \quad (2.18)$$

reemplazando (2.18) en (2.15) y simplificando resulta

$$K = \frac{Q_e Q^* t_v}{2h A_d} \quad (2.19)$$

Considerando que el tiempo de vaciado es igual al tiempo de llenado, se cumple;

$$t_v = \frac{A_d (h_c - h_d)}{Q_e} \quad (2.20)$$

Reemplazando (2.20) en (2.19), resulta

$$K = \frac{Q^*}{2} \frac{h_c - h_d}{h} \quad (2.21)$$

Durante el vaciado del tanque K permanece constante, por lo que se cumplen las siguientes relaciones:

$$K = \frac{Q_i^* h_c - h_d}{2 h_c} \quad (2.22)$$

$$K = \frac{(1.1)^2 h_c - h_d}{2 h_d} \quad (2.23)$$

Igualando (2.23) con (2.22) se cumple;

$$\frac{h_c}{h_d} = \frac{Q_i^{*2}}{1.21} \quad (2.24)$$

Reemplazando (2.24) en (2.22) y esta en (2.16), se obtiene;

$$Q_i^{*2} - 2Q_i^* - 2\ln(Q_i^* - 1) - 3.62 = 0 \quad (2.25)$$

Solucionando esta ecuación, se obtiene;

$$Q_i^* = 3.6 \quad (2.26)$$

el cual representa el gasto dimensional descargado por el diabeto al iniciar el vaciado.

Por otra parte, si se reemplaza (2.26) en (2.24), resulta;

$$\frac{h_c}{h_d} = 10.7 \quad (2.27)$$

De aquí,

$$h_d = 0.0934 h_c \quad (2.28)$$

Despejando h_c de la ecuación (2.20) y sustituyendo en (2.28), resulta:

$$h_c = \frac{t_v Q_e}{0.9066 A_d} \quad (2.29)$$

Considerando la ecuación (2.26), se cumple

$$Q_e = \frac{Q_{si}}{3.6} \quad (2.30)$$

Considerando que el gasto descargado inicialmente por el diabeto (Q_{si}) es igual a;

$$Q_{si} = n_s Q_o \quad (2.31)$$

donde Q_0 es el gasto máximo por unidad de ancho de la melga durante el riego. Sustituyendo (2.31) en (2.30) y despejando n_s

$$n_s = \frac{3.6 Q_e}{Q_0} \quad (2.32)$$

La ecuación anterior determina el ancho de la melga regada por el diabeto.

Para evaluar la carga de cebado, sustituyendo (2.32) en (2.29) se tiene:

$$h_c = \frac{t_v n_s Q_0}{3.264 A_d} \quad (2.33)$$

Por otra parte, despejando m de la ecuación (2.18), el número de sifones considerando $h=h_c$ y reemplazando en la expresión resultante las ecuaciones (2.26) y (2.33) se obtiene;

$$m = \frac{n_s Q_0}{\mu A_s \sqrt{2gh_c}} \quad (2.34)$$

2.3.2 Area del Diabeto

Sustituyendo (2.32) en (2.34) y despejando h_c de la expresión resultante como de la ecuación (2.29), se tiene:

$$A_d = \frac{0.1702 g t_v (m \mu A_s)^2}{Q_e} \quad (2.35)$$

2.3.3 Hidrograma de descarga

Para determinar el gasto descargado por el conjunto de compuertas, es necesario conocer el hidrograma de descarga del tanque durante la intermitencia.

Partiendo de la ecuación (2.14), e integrando desde $Q^* = 3.6$ a Q^* para el gasto; y de 0 a t^* para el tiempo;

$$Q^* + \ln(Q^* - 1) - 4.555 = K t^* \quad (2.36)$$

Considerando la ecuación (2.26) en (2.24) y esta en (2.22), la ecuación (2.36) se puede expresar como:

$$Q^* + \ln(Q^* - 1) - 4.555 = 5.875 t^* \quad (2.37)$$

Como Q^* y t^* son conocidos, la ecuación (2.37) representa el hidrograma de descarga ($Q^* - t^*$). Sin embargo, es deseable tener una relación explícita de Q^* en función de t^* , la cual no se puede obtener directamente de la expresión (2.37). García 1994, soluciona

este problema al realizar un análisis de regresión no lineal para obtener una función numéricamente equivalente a la expresión $Q^* + \ln(Q^*-1)$, obteniendo la siguiente expresión:

$$Q^* + \ln(Q^* - 1) - 4.555 = - 5.507323 + 4.244105 \ln Q^* \quad (2.38)$$

Con un coeficiente de correlación de 0.998, considerándose aceptable. Por lo anterior la ecuación (2.37) puede ser representada como:

$$- 5.507323 + 4.244105 \ln Q^* = 5.875t^* \quad (2.39)$$

Despejando Q^* de (2.39):

$$Q^* = e^{(1.2976 - 1.3166t^*)} \quad (2.40)$$

o sea,

$$Q^* = \frac{3.6}{e^{1.3842t}} \quad (2.41)$$

La expresión (2.41) para $t^*=0$ cumple con el límite superior $Q^*=3.6$, con el fin de satisfacer también con el límite inferior $Q^*=1.1$ cuando $t^*=1$, se modifica el valor 1.384. y se sustituye el valor que cumple esta condición que es 1.19, quedando la ecuación (2.42):

$$Q^* = \frac{3.6}{e^{1.19t}} \quad (2.42)$$

Al integrar la ecuación (2.42), se obtiene el gasto medio ($Q_{S_{medio}}$) descargado por el diabeto.

$$Q_{S_{medio}} = 2.105 Q_o \quad (2.43)$$

sustituyendo (2.30) en (2.43), el gasto medio descargado;

$$Q_{S_{medio}} = 0.5897 n_s Q_o \quad (2.44)$$

De la ecuación (2.42), considerando el tiempo y gasto adimensionales, se tiene que el hidrograma de descarga está dado por la expresión siguiente:

$$Q_o = \frac{3.6 Q_{max}}{e^{1.19 \frac{t}{t_v}}} \quad (2.45)$$

2.4 Estudio experimental

Austria y Aldama en 1990, realizan el estudio experimental del Diabeto para validar las ecuaciones de diseño. El estudio comprendió varias pruebas con diferentes condiciones de operación, tales como el gasto de entrada, carga de cebado y descebado.

Las características del diabeto en el que se realizó la validación fueron:

Datos : Gasto de entrada de 1 lps, tiempo de vaciado de 180 segundos, carga de cebado de 30 cm.

Con estos datos, a partir de las ecuaciones de diseño, obtuvieron las siguientes características del diabeto:

1 Sifón de diámetro	$\varnothing = 2''$
Carga de cebado	$h_c = 0.3 \text{ m}$
Carga de descebado	$h_d = 0.028 \text{ m}$
Depósito cuadrado	$L = 0.74 \text{ m}$

Los resultados de mayor relevancia fueron:

El funcionamiento del dispositivo fue satisfactorio, las descargas se generaron en forma automática.

Validan los parámetros Q^* y t^*

Determinan que la variación máxima aceptable del gasto de entrada no debe ser mayor o menor en 9.5% que el considerado en el diseño.

Para minimizar costos, los autores consideran la descarga hacia un canal regadera, el cual hace llegar el agua a las melgas desde el diabeto.

2.5 Metodología de diseño

Considerando las ecuaciones desarrolladas anteriormente, se describe el diseño del Diabeto para fines prácticos.

Datos : Gasto disponible para el riego (Q_e), gasto permisible suministrado por unidad de ancho de la melga (Q_o) y la carga de cebado (h_c).

1. Se calcula la carga de descebado con la ecuación (2.28).

$$h_d = 0.0934 h_c$$

2. Se determina el ancho de la melga a regar (ecuación 2.32)

$$n_s = \frac{3.6 Q_e}{Q_o}$$

3. Se determina el área de los sifones con la ecuación (2.18).

$$m = \frac{n_s Q_o}{\mu A_s \sqrt{2gh_c}}$$

4. Se calcula el área del depósito ecuación (2.35)

$$A_d = \frac{0.1702 g t_v (m \mu A_s)^2}{Q_e}$$

2.6 Diabeto en parcela de la UAZ

Desde 1992 el IMTA y la Universidad Autónoma de Zacatecas (UAZ) han probado en una parcela experimental ubicada en la Facultad de Veterinaria de la propia UAZ un diabeto. Como la parcela no disponía de la infraestructura necesaria para aplicar el riego con el diabeto, fue necesario equiparla. En el anexo A se describe la planeación y diseño del sistema experimental.

2.6.1 Diseño del Diabeto.

Para validar el diabeto con gastos pequeños en parcelas productivas se planeó regar una parcela de 1 Ha. Las características de la parcela regada con el diabeto son:

Tabla 2-1 Características de la parcela regada con el Diabeto.

Parcela regada con:	Diabeto
Tipo	Melgas
Gasto de entrada Q_e , l/s	5
Ancho de cabecera L_c , m	112
Longitud de melga L_m , m	120
Pendiente longitudinal S_o	0.007
Pendiente transversal S_t	0.005
Tipo de suelo	franco-arcillo-arenoso

Partiendo con los datos de la Tabla 2-1 se describe el diseño del diabeto.

Gasto máximo no erosivo

Para determinar el gasto máximo no erosivo en la melga, se realizaron pruebas en campo, determinando en este caso $Q_{max} = 1.5$ l/s por metro de ancho de la melga.

Tiempo de vaciado

Para las mediciones en campo, el tiempo que tarda en avanzar el flujo desde la cabecera hasta el final de la melga en suelo húmedo es 16 minutos, por tanto, el tiempo de vaciado es 16 minutos.

Carga de cebado

Considerando $h_c = 1.25$ m

Carga de descebado

De la ecuación (2.28),

$$h_d = 0.0934 (1.25) = 0.12 \text{ m}$$

Ancho de la melga a regar, de la ecuación (2.32):

$$n_s = \frac{3.6(5)}{1.5} = 12 \text{ m}$$

Considerando sifones de 2" de diámetro, el área de los sifones es;

$$m = \frac{(12)(0.0015)}{(0.6)(0.002026) \sqrt{2g(1.25)}} = 3 \text{ sifones}$$

Area del Tanque

El área del depósito es;

$$A_d = \frac{0.1702g(16 \cdot 60) [3(0.6)(0.002026)]^2}{0.005} = 4.3 \text{ m}^2$$

Por lo tanto, se requiere un tanque de 1 m x 4.3 m x 1.40 m (dimensiones interiores).

Diseño de la regadera.

De acuerdo con la concepción original el Diabeto es utilizado para regar en melgas por medio de un canal regadera en el que se abren portillos en las franjas a regar, reduciendo los requerimientos de mano de obra y maquinaria (Martínez y Aldama, 1990).

Considerando un canal trapecial las dimensiones de la regadera a partir del diseño hidráulico fueron:

Gasto $Q = 18$ lps
Plantilla $b = 0.5$ m
Talud $k = 0.5$
Tirante $y = 0.15$ m

2.6.2 construcción del diabeto.

Sobre la línea del subsistema se construyó el Diabeto (Anexo A). El proceso constructivo consistió en las siguientes etapas:

Cimentación

Se excavó una zanja de 30 cm de profundidad donde se desplantó la cimentación (concreto y voleos). Se tuvo cuidado en su construcción para evitar posibles asentimientos.

Cadenas de desplante

Sobre la cimentación se coló la dala de desplante, de cadena electrosoldada de 4 varillas de 5/16" de acero de alta resistencia, concreto de 150 kg/cm².

Muros

Los muros fueron de tabique recocido, en la parte media del muro se coló una cadena de cerramiento, para evitar la construcción de contras.

Castillos

Se colaron castillos en las esquinas, un castillo intermedio en claros mayores a 2 m.

Piso

Se compactó el suelo y se coló una losa de concreto de 10 cm de espesor.

Acabado

Para impermeabilizar los muros del tanque se dio un repellado de cemento-cal-arena y emboquillado de agua-cemento.

Colocación del sifón.

Para la colocación del sifón se tuvo cuidado en la nivelación de las cargas de cebado y descebado. Esto para garantizar la operación en las cargas de diseño.

Las cantidades de obra se presentan en la Tabla 2-2; así como los costos de materiales y de mano de obra. El costo aproximado del diabeto es de 300 dólares.

Tabla 2-2 Materiales y manos de obra del Diabeto.

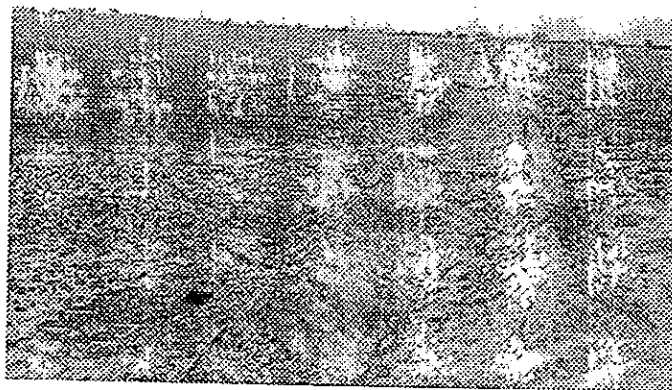
Materiales :	Unidad	Cantidad	P.U.	Importe
Acero en castillos	M	9.00	\$ 12.00	\$ 108.00
Acero en cadenas	m	34.80	\$ 12.00	\$ 408.00
Acero en firme	m2	6.16	\$ 4.00	\$ 53.76
Alambre recocido	kg	4.00	\$ 5.00	\$ 24.64
Arena en cadenas y castillos	m3	0.90	\$ 55.00	\$ 49.50
Arena en losa	m3	1.23	\$ 55.00	\$ 67.65
Arena en aplanado	m3	0.65	\$ 55.00	\$ 35.75
Ladrillos en muros	millar	0.71	\$375.00	\$ 266.25
Cemento	ton	0.50	\$950.00	\$ 475.00
Calhidra	ton	0.18	\$380.00	\$ 68.40
Subtotal				\$ 1556.95

Mano de obra en:	Unidad	Cantidad	P.U.	Importe
Castillos	m	9.00	\$ 12.00	\$ 108.00
Cadenas	m	34.80	\$ 12.00	\$ 417.60
Firme	m2	6.16	\$ 12.00	\$ 161.28
Tabique	m2	10.0	\$ 12.00	\$ 73.92
Aplanado	m2	16.24	\$ 12.00	\$ 194.88
Subtotal				\$ 955.68
Total Diabeto				\$ 2512.63

Precios diciembre 1997

2.6.3 Obras adicionales

Una vez terminada la construcción del Diabeto, a partir del diseño hidráulico, se construyó en la parcela la regadera la cual se hace llegar el agua a los surcos. Se cubrió de hule el fondo y los taludes para evitar erosiones y hacer que la descarga llegue lo más rápido posible a la parte más lejana de la parcela sin alterar en gran medida el hidrograma de descarga.



Fotografía 2- 1 Construcción de la regadera del Diabeto

2.6.4 Diseño del riego

2.6.4.1 Riego de presiembra

Para el riego de presiembra se aplica una lámina de 6 cm.

Area regada por melga. Ancho de la melga (A_m) por su longitud (L_m), se tiene:

$$A_r = a_m \cdot L_m$$

$$A_r = 12 \cdot 120 = 1440 \text{ m}^2$$

Volumen neto aplicado. Es el área regada por melga por la lámina aplicada:

$$V_{n_a} = A_r \cdot L_r$$

$$V_{n_a} = (1440)(0.06) = 86.40 \text{ m}^3$$

Volumen bruto aplicado, es la relación del volumen neto entre la eficiencia de aplicación.

$$V_{b_a} = \frac{V_{n_a}}{\eta}$$

La eficiencia de aplicación en el riego intermitente (Espiegel, 1987) oscila entre 80 y 90%, para tubería de compuerta. Para melgas es de esperarse que se tengan eficiencias menores que en surcos, por lo anterior considerando una eficiencia de aplicación del 70%.

$$V_{b_a} = \frac{86.40}{0.7} = 123.43 \text{ m}^3$$

Volumen descargado por ciclo. Es el volumen disponible por descarga mas el volumen de ingreso al tanque durante el vaciado, o sea;

$$V_{d_c} = A_t(h_c - h_d) + Q_e \cdot t_v$$

$$V_{d_c} = 1 \times 4.3 (1.13) + 0.005 (16 \cdot 60) = 9.659 \text{ m}^3 / \text{ciclo}$$

Número de ciclos. Es la relación del volumen bruto aplicado entre el volumen descargado por ciclo.

$$N_c = \frac{V_{b_a}}{V_{d_c}}$$

$$N_c = \frac{123.43}{9.659} = 13 \text{ ciclos}$$

Tiempo de riego para la melga.

$$t_r = N_c(t_v + t_{L1})$$

$$t_r = 13(16 + 16) = 7 \text{ horas}$$

Número de melgas por regar.

$$G_m = \frac{L_c}{a_m}$$

$$G_m = \frac{112}{12} = 9.3 \text{ melgas}$$

se riegan 9 melgas, ya que se introduciría un gasto mayor al erosivo en la fracción faltante, en caso de que fuera regada.

Tiempo de riego para la parcela.

$$T_r = G_m \cdot t_r$$

$$T_r = (9) \cdot (7) = 3 \text{ días}$$

2.6.4.2 Diseño del riego de auxilio

Para el riego de auxilio se aplica una lámina de 5 cm.

Volumen neto aplicado.

$$V_{na} = (1440)(0.05) = 72.00 \text{ m}^3$$

Volumen bruto aplicado.

$$V_{ba} = \frac{72.00}{0.7} = 102.86 \text{ m}^3$$

Numero de ciclos.

$$N_c = \frac{102.86}{9.659} = 11 \text{ ciclos}$$

Tiempo de riego para la melga.

$$t_r = 11(16 + 16) = 6 \text{ horas}$$

Tiempo de riego para la parcela

$$T_r = (9) \cdot (6) = 2.5 \text{ días}$$

En resumen:

Parcela con Diabeto: gasto de ingreso de 5 l/s, melga de 12 m de ancho. 9 melgas. Riego de presiembra: 3 días, aplicación de 13 ciclos por melga. Riegos de auxilio: 2.5 días, aplicación de 11 ciclos por melga.

2.6.5 Operación del sistema

El Diabeto ha operado durante 6 ciclos vegetativos, tres de primavera-verano y dos de otoño invierno.

Para los ciclos primavera-verano el cultivo establecido es maíz forrajero, y avena para los ciclos otoño-invierno.

2.6.6 Pruebas del Diabeto.

Durante la operación del Diabeto se midieron las principales variables consideradas en el diseño, en resumen las más importantes fueron:

2.6.6.1 Gasto aplicado

Para determinar el gasto descargado al inicio de la descarga, se aforó obteniendo en promedio un gasto de 1.55 l/s.

2.6.6.2 Cebado de los sifones

Al operar el sistema, no se logró el cebado automático de los sifones como se tenía contemplado. Se realizaron correcciones a las mangueras, tales como aumentar su longitud, la nivelación y colocación horizontal de la descarga, entre otras. Con estas modificaciones se tuvieron mejoras en el cebado simultáneo de los sifones, pero solo en los primeros ciclos, ya que en ocasiones al cebarse una manguera, las otras no descargaban por el descenso del nivel del agua.

Se analizaron diferentes alternativas para lograr el cebado simultáneo, optando por construir muros intermedios para garantizar la descarga de todos los sifones. Esta alternativa presenta el inconveniente de que se debe distribuir el gasto de entrada al Diabeto entre los sifones, para ello se instaló un tramo de tubería de compuerta, en la que cada compuerta descarga en cada tanque el gasto distribuido.

Además, para garantizar que el cebado y descebado de los sifones ocurriera a tiempos similares se hizo una perforación de $\frac{1}{4}$ de pulgada en los muros a 50 cm arriba del nivel de la entrada del sifón, esto permite compensar cualquier variación del gasto de entrada en los sifones. De esta forma es posible uniformizar la velocidad de ascenso y descenso del agua en todos los sifones y con ello garantizar el cebado simultáneo de todas las mangueras.

2.6.6.3 Carga de cebado

Inicialmente se partió de la suposición de que el cebado de los sifones ocurre cuando el nivel del agua sobrepasa ligeramente el lomo de la manguera, como fue probado en el modelo reducido del IMTA, sin considerar el tipo de material, la rugosidad de los sifones y las pérdidas por cambio de dirección al utilizar diferentes materiales.

Se utilizaron diferentes tipos de material para los sifones, encontrándose que para materiales rígidos como el PVC, el cebado ocurre a 15 cm sobre el lomo del sifón; para

manguera industrial el cebado ocurre a 9 cm sobre el lomo. Este incremento de carga para el cebado del sifón de PVC se debe a que en el lomo se requiere un codo para producir el cambio de dirección, a diferencia de la manguera la cual es flexible, facilitando el doblado para darle una curvatura uniforme y suave. Se analizó la posible causa del incremento de la carga para que ocurra el cebado de la manguera, encontrándose en el lomo pequeñas protuberancias producto del doblado. Se probaron diversas alternativas para eliminar las protuberancias, no siendo posible eliminarlas completamente. Haciendo las mejoras al sifón el cebado ocurrió siempre a una carga de 9 cm sobre el lomo de la manguera.

Como la manguera industrial presentaba mejor comportamiento hidráulico respecto al PVC, se decidió utilizar este material como sifón.

2.6.6.4 Carga de descebado

El descebado de los sifones no ocurrió como estaba previsto, considerando la hipótesis de que al descender el nivel del agua hasta la entrada de los sifones ocurre la interrupción del flujo. A una carga de 3 a 6 cm de la salida de los sifones se producían vórtices, los cuales desaparecían o eran arrastrados hacia la descarga, interrumpiendo con ello el flujo. Debido a lo aleatorio del fenómeno se dificultó el descebado en tiempos iguales.

Para eliminar los vórtices se probaron diferentes propuestas, sin embargo, ninguna de ellas dio resultados satisfactorios. Por lo anterior se buscó un arreglo que permitiera el descebado en tiempos iguales. Para lograrlo, se comunicaron los sifones con manguera de $\frac{1}{2}$ ", así al ocurrir el descebado en cualquier sifón, el aire ingresa a los sifones restantes interrumpiendo el flujo.

De esta forma fue posible el descebado simultáneo de los sifones.

2.6.6.5 Tiempo de llenado

El tiempo de llenado en las pilas (16 minutos) en promedio, no difiere en gran medida al del modelo numérico.

2.6.6.6 Tiempo de vaciado

Por el incremento de la carga, el tiempo de vaciado se incrementó a 18 minutos, similar al del modelo numérico (16 minutos). Para fines de riego esta variación de tiempo puede ser considerada aceptable.

Para garantizar las descargas en forma intermitente Martínez y Aldama, demuestran teóricamente que el gasto de entrada al tanque debe ser constante, o en su defecto, no debe sufrir variaciones en $\pm 9.5\%$ al gasto de diseño. Para comprobarlo, se hicieron pruebas de vaciado modificando el gasto de entrada al tanque en porcentajes mayores al permitido. En todos los casos al llegar el nivel del agua a la carga de cebado, se

presentaba el gasto de equilibrio, o sea, funcionando como vertedor, y, por tanto, no se generaban las intermitencias (Trinidad y Dzul, 1995). En parcelas alimentadas con un gasto de entrada que sufra variaciones mayores al anteriormente señalado, no es posible utilizar el Diabeto para generar las intermitencias. La condición anterior descarta su uso en parcelas alimentadas por norias o aerobombas.

2.6.6.7 Número de ciclos para aplicar la lámina de riego

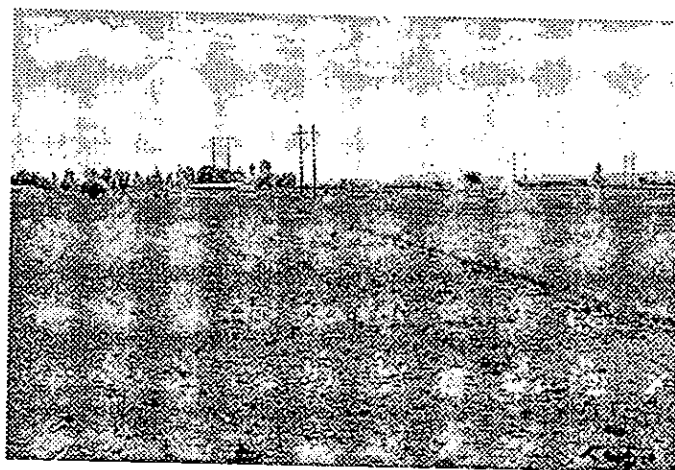
De acuerdo con el plan de riegos se dieron los ciclos requeridos para aplicar la lámina de riego. Por lo general, el número de ciclos para regar las melgas fue igual a los del diseño.

2.6.6.8 Obtención de las curvas de avance y recesión.

En los riegos de auxilio se realizaron mediciones del avance del flujo en las melgas, debido a la presencia de bajos locales el avance del frente de onda no era uniforme, por lo que se desechó el uso del equipo electrónico diseñado por la UAZ, haciendo las mediciones con personal de campo (Dzul, Trinidad y Elías, 1995).

2.6.6.9 Determinación de la distribución de la humedad en la zona radicular

Durante el ciclo otoño-invierno 1995, se estuvo monitoreando la humedad del suelo antes y durante el riego con el equipo electrónico (Medidor de humedad) y con el método gravimétrico. Debido a que el equipo presentó problemas al grabar la información en la memoria, ésta no fue almacenada, por lo que no fue posible disponer de datos de humedad en la parcela regada con el Diabeto (Trinidad y Dzul, 1995).



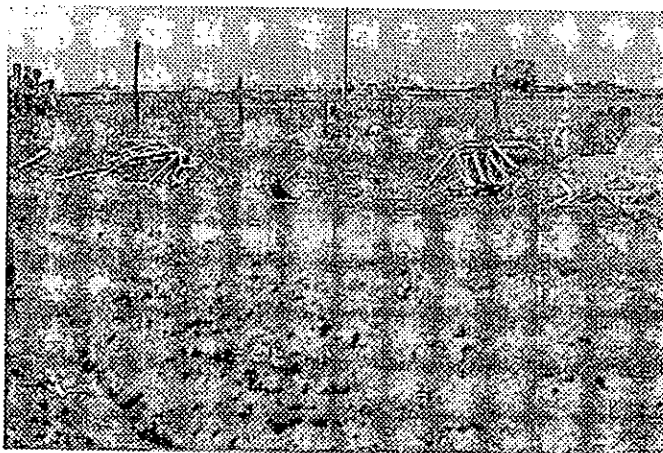
Fotografía 2- 2 *Riego con Diabeto en melgas.*

2.6.6.10 Perdidas por coleos

Con el número de ciclos de diseño para dar la lámina y al ser melgas cerradas, no se tuvieron pérdidas por coleos.

2.6.6.11 Requerimientos de mano de obra

Durante la preparación del sistema para aplicar el riego se requiere de un regador (Preparación del canal). Esta misma persona durante el riego hace el cambio del agua abriendo portillos en la melga. Para esto se requiere un regador con experiencia para realizar estos cambios, ya que si los portillos son demasiado pequeños o demasiado grandes se tendrán problemas de erosión en la descarga, distribución no uniforme del agua en la cabecera, etc.



Fotografía 2-3 Riego tradicional con regadera y sifones.

2.6.6.12 Eficiencia del riego.

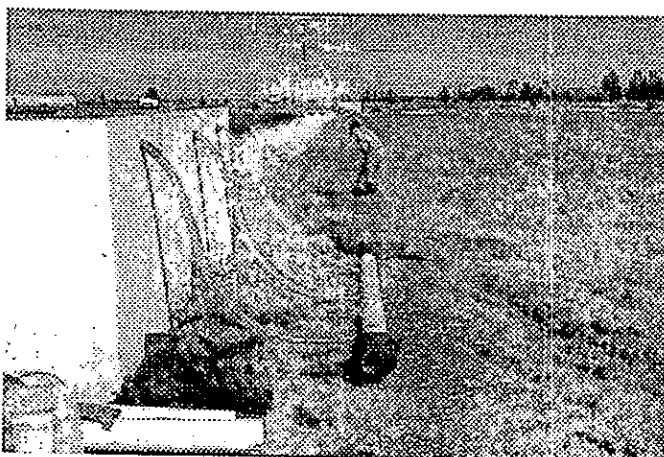
Como la eficiencia del riego con regadera y melgas es muy baja, por la gran cantidad de agua infiltrada, se ha propuesto utilizar el Diabeto en parcelas con surcos. Aquí se tiene el problema de que si se utiliza una regadera la distribución uniforme del agua a los surcos es prácticamente imposible. Por tanto, aprovechando la experiencia del riego con tubería de compuerta en el Tanque de Descargas de Fondo se hicieron las adecuaciones al Diabeto. De esta forma es posible distribuir en partes iguales el volumen descargado en los surcos a regar.

El 10 de agosto de 1995, se realizaron las primeras pruebas del Diabeto con tubería de compuerta, los resultados preliminares fueron:

Tabla 2-3 Operación del Diabeto con tubería de compuerta.

Prueba:	1	2	3	2
Q_e , lps	4.4	4.4	4.8	4.8
t_L , minutos	19	19	18	18
t_v , minutos	25	21	21	18
Compuertas abiertas	5	10	15	20
Abertura compuerta	1/3	1/3	1/3	1/3

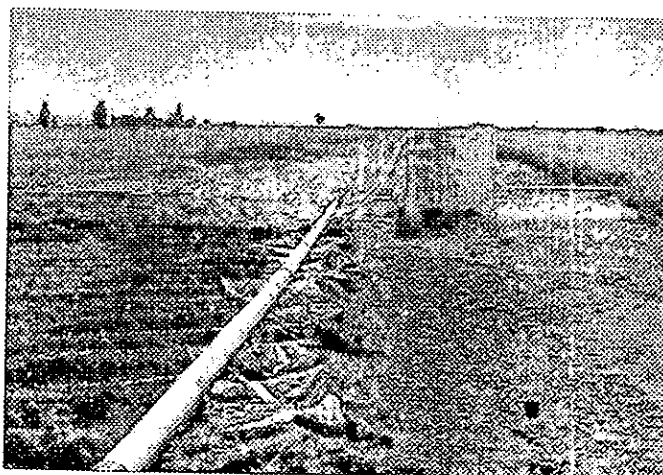
Como los resultados fueron alentadores, se decidió sustituir la regadera por tubería de compuerta de 6 pulgadas en la parcela regada con el Diabeto.



Fotografía 2-4 *Diabeto con tubería de compuerta*

La operación del sistema presentó ventajas respecto a la regadera, siendo las más importantes, la eliminación de las pérdidas por conducción y una distribución más uniforme del agua, y en consecuencia un mayor rendimiento potencial en la producción de la cosecha, además de mejorar la distribución de agua y facilitar la operación del sistema.

Aquí es importante hacer notar que el diseño visto anteriormente está basado en la descarga libre de los sifones, por esta razón para el riego con tubería de compuerta es necesario corregir las ecuaciones descritas en este capítulo.



Fotografía 2-5 *Riego con Diabeto y tubería de compuerta.*

2.7 Ventajas:

- Es un sistema automatizado que aprovecha eficientemente los caudales pequeños para riego (1 a 10 l/s), aplicable al semidesierto.

- No requiere de energía externa ni partes mecánicas para generar las descargas intermitentes, ya que las intermitencias se generan bajo el principio de cebado y descebado de sifones que descargan hacia un canal regadera.
- Es de fácil operación, por lo que los usuarios no requieren capacitación previa
- Cumple con los requisitos mínimos del riego intermitente (Tiempo del llenado, vaciado, etc.)
- Se tiene ahorros de agua significativos respecto al riego continuo, por lo que se reducen la cantidad de agua bombeada y los requerimientos de energía.
- Es la configuración más simple para dar el riego intermitente.
- El requerimiento de personal que opere el sistema es mínimo.

2.8 Desventajas

- No es posible utilizar el Diabeteo en parcelas alimentadas con gastos que sufren variaciones de $\pm 10\%$ al de diseño, como sucede en las norias o aerobombas.

TANQUE DE DESCARGAS DE FONDO

3.1 Descripción del Tanque de Descargas de Fondo

En la figura 3-1 se muestra un esquema simplificado del Tanque de Descargas de Fondo, propuesto por García, 1994, que está constituido por tres partes fundamentales; Tanque de Almacenamiento, Sistema de apertura/cierre y la Tubería de compuerta.

En el tanque de almacenamiento, inicialmente vacío, se descarga constantemente el caudal disponible para riego (Q_e); de esta manera, mientras el dispositivo de apertura/cierre está en su posición original (sistema cerrado), el tirante dentro del tanque se incrementa gradualmente hasta alcanzar el nivel de apertura previsto (h_a), en este momento el flotador superior gira rápidamente abriendo la tapa del fondo e inicia la descarga hacia la tubería de compuerta que vierte a los surcos.

La apertura de la tapa de fondo se da en forma suave e instantánea y el sistema es disparado hacia arriba ya que el flotador superior al quedar sumergido produce un empuje vertical ascendente superior a la carga hidráulica actuante sobre la tapa.

Como el gasto descargado (Q_s) a través de la tubería de compuertas siempre es mayor que el gasto de entrada (Q_e) al sistema, el nivel del tanque desciende paulatinamente (y con ello el flotador superior gira volviendo a su posición inicial), hasta que por efecto de la succión a que está sometida la tapa se produce el cierre del sistema, (carga sobre el codo de 13-16 cm), iniciando con ello un nuevo ciclo de llenado y vaciado. La figura

3-2 muestra una secuencia ilustrativa del funcionamiento del TDF.

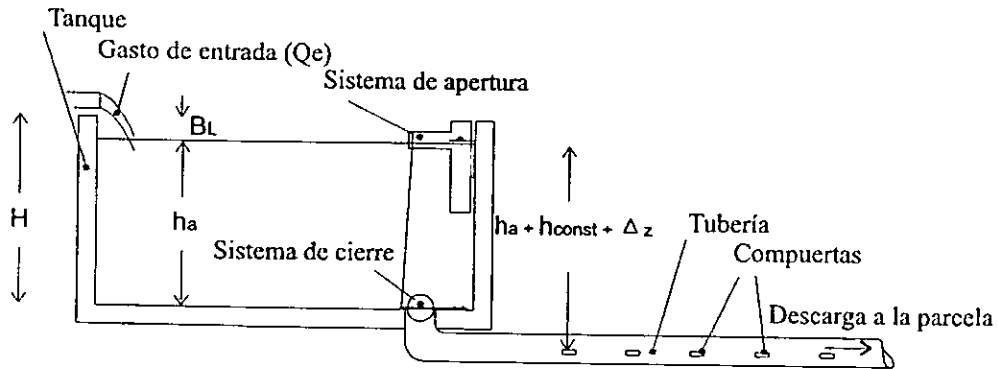


Figura 3-1 Tanque de Descargas de Fondo

donde h_{const} es la distancia entre la salida del tanque y la primera compuerta, y Δz es el desnivel transversal promedio de la parcela respecto a la primera compuerta (parcelas con pendiente transversal).

3.2 Consideraciones para el diseño del tanque de descarga

3.2.1 Tanque

El Tanque puede ser fijo o portátil, en el primer caso por ser una obra permanente en la parcela se recomienda que sea construido de tabique, para un Tanque portátil debe construirse de lámina soldada con tensores para reforzarlo.

Por razones económicas y estructurales, el tanque debe tener las siguientes características:

Con el fin de establecer dimensiones estandarizadas, se propone adoptar secciones de fondo cuadradas con una superficie no mayor a 16 m^2

$$A_t \leq 16 \text{ m}^2 \quad (3.1)$$

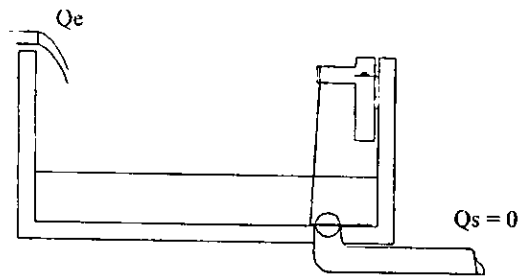
Por cuestiones económicas relacionadas con refuerzo estructural, el tanque no debe tener una altura mayor a 1.3 m, ($h_t \leq 1.3 \text{ m}$)

Para evitar derrames generados por efecto de la acción del viento, se recomienda un bordo libre de 5 cm ($B_L = 0.05 \text{ m}$). El tirante máximo de apertura está dado por;

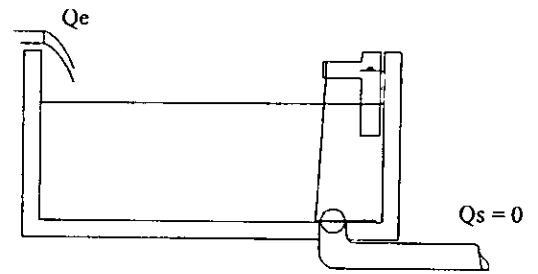
$$h_{a \text{ máx}} \leq H - B_L \quad (3.2)$$

por lo que debe satisfacer la condición;

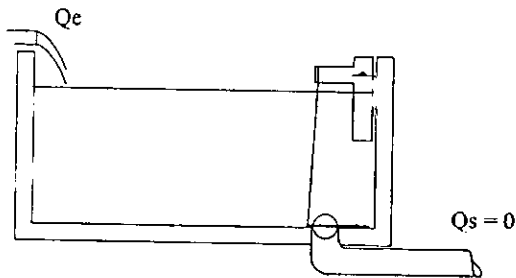
$$h_{a \text{ máx}} \leq 1.2 \text{ m} \quad (3.3)$$



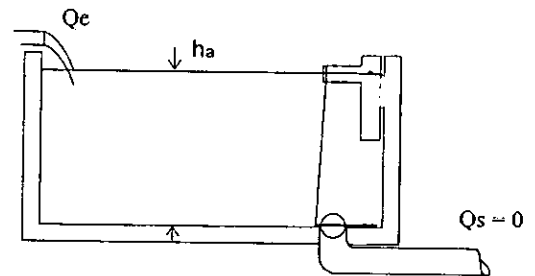
A) Sistema cerrado, el nivel del agua se incrementa gradualmente.



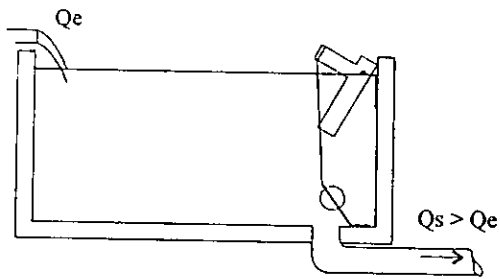
B) Conforme se incrementa el nivel, el flotador superior queda sumergido.



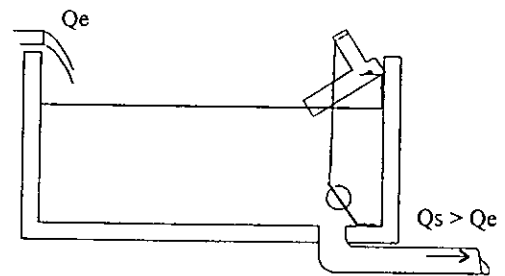
C) La fuerza de flotación se incrementa.



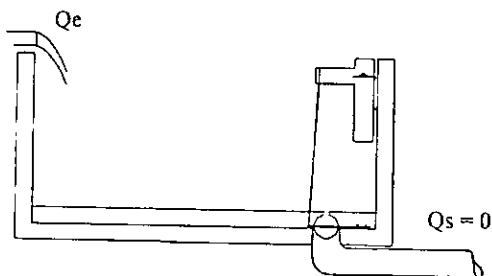
D) Se alcanza el nivel máximo en el tanque.



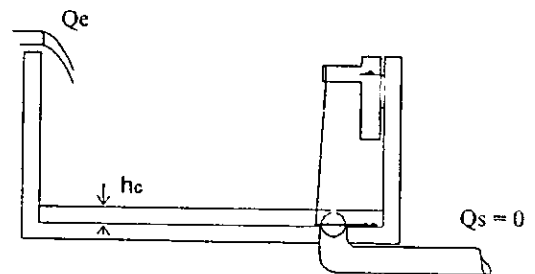
E) El flotador superior gira, abriendo la tapa del fondo. Inicia el vaciado.



F) Sistema abierto. Descarga hacia la parcela. Nivel del agua descende.



G) El flotador superior vuelve a su posición original.



H) El flotador inferior cierra el sistema. Inicia ciclo de llenado y vaciado.

Figura 3- 2 Funcionamiento del Tanque de Descargas de Fondo

3.2.2 Caudal suministrado Q_e

Como se indica anteriormente; el dispositivo está concebido para aplicar el riego intermitente en zonas donde se dispone de caudales pequeños (0.05-10 lps)

$$0.05 \text{ lps} \leq Q_e \leq 10 \text{ lps} \quad (3.4)$$

3.2.3 Gasto máximo suministrado al surco (Q_o)

Generalmente se considera conocido; se determina considerando el tipo de suelo y pendiente del surco. García, 1994, considera la relación de Criddle, (USDA, 1956):

$$Q_{\max} = \frac{0.75}{S_o} \quad (3.5)$$

donde Q_{\max} está en litros por segundo; S_o la pendiente longitudinal del surco en %.

3.2.4 Velocidad máxima no erosiva

Existen varios criterios para determinar la velocidad máxima no erosiva en surcos;

En la Figura 3-3 (García, 1994) permite determinar el gasto máximo no erosivo que se puede suministrar al surco en función de la velocidad máxima no erosiva, la pendiente y el coeficiente de la rugosidad de Manning (0.03-0.04 para suelos agrícolas).

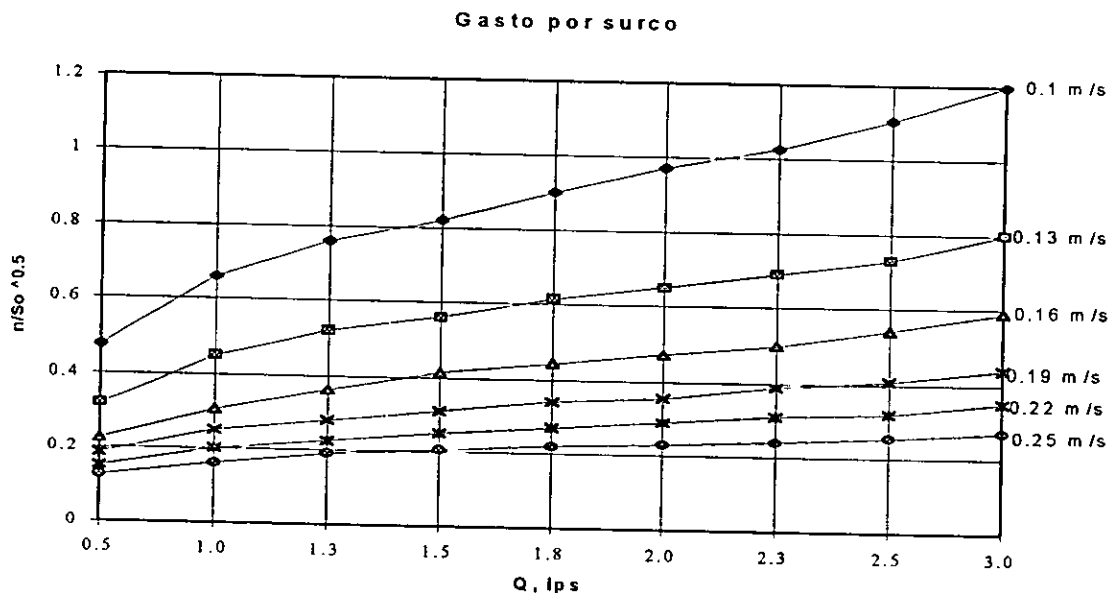


Figura 3- 3 Gasto máximo no erosivo en surcos.

Es recomendable verificar en todos los casos la relación siguiente:

$$Q_{\max} \leq 3 \text{ l/s} \quad (3.6)$$

Existen varios criterios empíricos para determinar la velocidad máxima no erosiva en surcos, por ejemplo, Walker (1987), reporta la siguiente relación;

$$0.13 < v_{\max} < 0.22 \text{ m/s} \quad (3.7)$$

donde el límite inferior se recomienda para suelos limosos y el superior para suelos más estables (arcillosos y arenosos). Debe verificarse que la velocidad del flujo, calculada con una ecuación derivada de la de Chezy sea menor a 0.2 m/s.

3.2.5 Tiempo de vaciado del tanque

Este es uno de los más importantes parámetros que se requieren para el diseño adecuado del TDF. De la selección correcta de este dato dependerá la eficiencia del riego con que operará el sistema.

García (1994) recomienda obtener este parámetro dando al suelo un riego previo para humedecerlo y con ello bajar la velocidad de infiltración a condiciones similares que las que se tendrá durante los últimos ciclos de riego.

Tiempo de vaciado del TDF

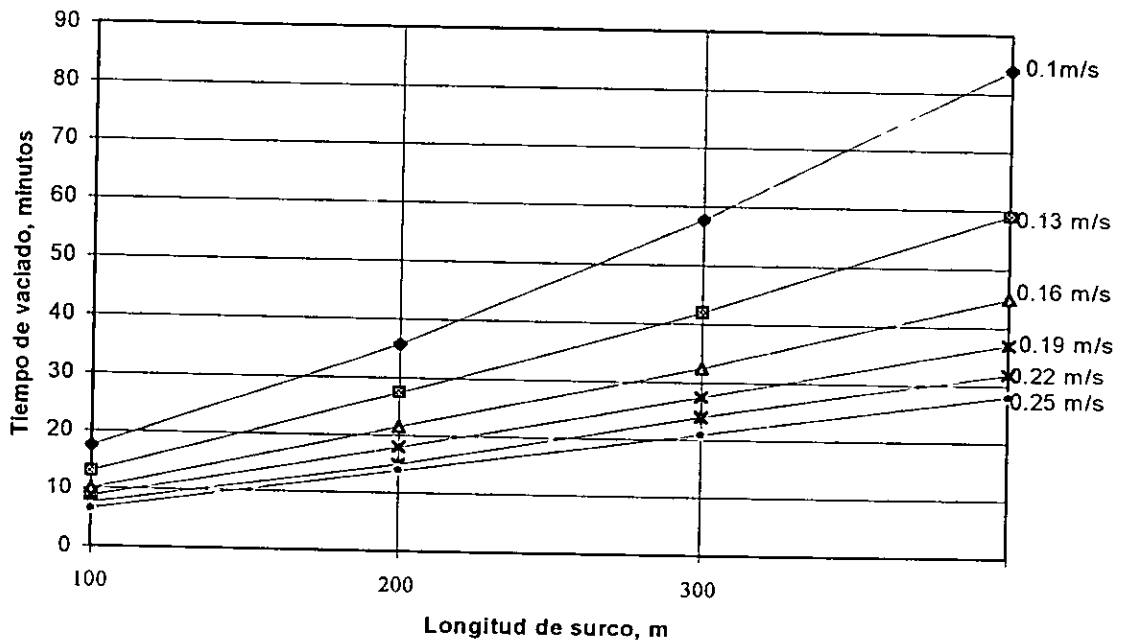


Figura 3-4 Selección del Tiempo de Vaciado del TDF

Se aplica el gasto medio descargado por la compuerta (ecuación 3.48), se mide el tiempo que tarda el agua en avanzar desde la cabecera hasta el final del surco. Este tiempo será aproximadamente el tiempo de vaciado del tanque.

García (1994) recomienda como primera aproximación en el diseño del TDF utilizar la Figura 3-4; esta permite seleccionar el tiempo de vaciado en función de la longitud del surco y la velocidad máxima no erosiva. Esta gráfica es aplicable para cualquier tipo de suelo.

2.2.6 Tubería de compuerta

En el riego intermitente se necesita contar con una tubería que contenga aberturas o compuertas que regulen la salida del agua hacia los surcos. Estos tubos, fabricados por materiales plásticos son ligeros, flexibles y resistentes a sobrepresiones, existen en el mercado en tramos de 6m con diámetros de 6" y 8". Ver anexo B.

Estas características hacen muy atractivo el uso de la tubería de compuerta. Sobre la cabecera de la parcela se tiende la tubería, uniendo los tubos, estos tienen pequeñas compuertas para regular el gasto descargado en forma manual, equidistantes a la distancia entre surcos (0.75-1.0 m). Este sistema reduce considerablemente las pérdidas de agua en la cabecera y requiere una inversión en material, aproximadamente \$ 60 el metro lineal.

3.3 Fundamentación físico-matemática

3.3.1 Tiempo de llenado

Durante el proceso de llenado del tanque (figura 3-2), por efecto del suministro del gasto de entrada (Q_e), tiempo en el cual no hay descarga hacia la tubería de compuertas, el volumen almacenado (V_t) se incrementa respecto al tiempo como:

$$\frac{dV_t}{dt} = Q_e \quad (3.8)$$

Expresando el volumen en función del área y del tirante. Denominando t_{LL} al tiempo de llenado que transcurre para que el tirante (h) se incremente desde el tirante de cierre (h_c) hasta el tirante de apertura (h_a), que al integrar;

$$t_{LL} = \frac{A_t(h_a - h_c)}{Q_e} \quad (3.9)$$

3.3.2 Numero de compuertas

El proceso de vaciado del tanque por efecto de la descarga Q_s de la tubería de compuerta, se cuantifica como:

$$A_1 \frac{dh}{dt} = Q_e - Q_s \quad (3.10)$$

Considerando n compuertas, el gasto de descarga Q_s se puede calcular con la siguiente relación:

$$Q_s = n \mu A_c \sqrt{2gh_p} \quad (3.11)$$

donde A_c es el área (abertura) de cada compuerta, h_p es la carga hidráulica promedio respecto a las existentes a cada compuerta. Se puede suponer que h_p es directamente proporcional a la carga hidráulica h existente en el tanque sobre la tubería de compuertas:

$$h_p = \beta h \quad (3.12)$$

donde β es un factor que depende de las pérdidas de carga que se presentan en el sistema (pérdidas locales más pérdidas por fricción), por lo que beta se expresa como,

$\beta = 1$ - Pérdidas promedio en el sistema respecto a h .

Para fines prácticos, García (1994) considera una pérdida de carga del 20%, para cualquier caso, por lo que las pérdidas promedio en el sistema son del 10% ($\beta = 0.9$).

Lara (1995) determina que β permanece constante durante el proceso de vaciado del tanque, al reemplazar la ecuación (3.12) en (3.11) y despejando h ,

$$h = \frac{1}{2g\beta} \left(\frac{Q_s}{n\mu A_c} \right)^2 \quad (3.13)$$

y reemplazando (3.13) en (3.10),

$$\frac{Q_s}{Q_s - Q_e} dQ_s = -\beta g \frac{(n\mu A_c)^2}{A_1} dt \quad (3.14)$$

Para obtener una solución general, se introducen las siguientes variables adimensionales:

gasto adimensional

$$Q^* = \frac{Q_s}{Q_e}$$

tiempo adimensional

$$t^* = \frac{t}{t_v}$$

La ecuación (3.14) se puede expresar como:

$$\frac{Q^* dQ^*}{Q^* - 1} = -K dt^* \quad (3.15)$$

donde

$$K = \beta g \frac{(n \mu A_c)^2 t_v^2}{Q_e A_t} \quad (3.16)$$

Para que ocurra el vaciado deben satisfacerse las siguientes condiciones:

$$Q_i^* = \frac{Q_{sa}}{Q_e} > 1$$

$$Q_c^* = \frac{Q_{sc}}{Q_e} > 1$$

donde Q_i^* es el gasto máximo adimensional al iniciar el vaciado del tanque, Q_c^* es el gasto mínimo adimensional al momento de cierre del sistema, Q_{sa} el gasto descargado al momento de la apertura, y Q_{sc} el gasto al momento del cierre.

García (1994) propone $Q_c^* = 1.1$, para cualquier TDF y desarrolla las ecuaciones con este valor. Como se demostrará posteriormente, este valor no es constante, sino que depende de las siguientes variables: tipo del sistema de apertura/cierre utilizado, gasto de entrada al tanque, número de compuertas abiertas y el diámetro de la tubería. Como no se conoce de antemano, se utilizará el valor genérico para Q_c^* , a continuación se desarrollan las ecuaciones considerando esta variable.

Para que ocurra el cierre del sistema por eliminación del empuje ascendente en el flotador que lo mantiene abierto, es necesario que cuando $t^* = 1$, se continúe cumpliendo la desigualdad anterior.

Bajo las consideraciones anteriores, integrando la ecuación (3.15) entre los límites indicados resulta:

$$Q_c^* + \ln(Q_c^* - 1) - Q_i^* - \ln(Q_i^* - 1) = -K \quad (3.17)$$

considerando las ecuaciones (3.11) y (3.12), y despejando $n \mu A_c$,

$$n \mu A_c = \frac{Q_e Q^*}{\sqrt{2 \beta g h}} \quad (3.18)$$

reemplazando (3.13) y (2.16) y simplificando resulta;

$$K = \frac{Q_o Q^{*2} t_v}{2 h A_t} \quad (3.19)$$

Durante el vaciado del tanque K permanece constante, por lo que se cumplen las siguientes relaciones,

$$K = \frac{Q_o Q_i^{*2} t_v}{2 h_a A_t} \quad (3.20)$$

$$K = \frac{Q_o (Q_c^*)^2 t_v}{2 h_c A_t} \quad (3.21)$$

Igualando (3.20) con (3.21) y despejando Q_i^*

$$Q_i^* = Q_c^* \frac{h_a}{h_c} \quad (3.22)$$

Considerando que el tiempo de vaciado (t_v) es proporcional al tiempo de llenado (t_{LL}), $t_v = f t_{LL}$ de la ecuación (3.9),

$$t_v = f \frac{A_t (h_a - h_c)}{Q_o} \quad (3.23)$$

Reemplazando (3.23) en (3.20) y la expresión resultante en (3.22) se obtiene;

$$K = Q_i^{*2} \frac{f}{2} - Q_c^{*2} \frac{f}{2} \quad (3.24)$$

Sustituyendo (3.23) en (3.17);

$$Q_i^{*2} - \frac{2}{f} Q_i^* - \frac{2}{f} \ln(Q_i^* - 1) - Q_c^{*2} + \frac{2}{f} Q_c^* + \frac{2}{f} \ln(Q_c^* - 1) = 0 \quad (3.25)$$

Por otra parte, despejando Q_o de la ecuación (3.9) y reemplazando en (3.21) resulta;

$$K = \frac{Q_c^{*2}}{2} \left(\frac{h_a}{h_c} - 1 \right) \frac{t_v}{t_{LL}} \quad (3.26)$$

Igualando con (3.16) y despejando $(n \mu A_c)^2$

$$(n \mu A_c)^2 = \frac{Q_o^2 Q_i^{*2}}{2 g \beta h_a} \quad (3.27)$$

Reemplazando (3.9) en (2.27) y despejando el número de compuertas (n);

$$n = \frac{Q_o Q_i^*}{\mu A_c} \sqrt{\frac{1}{2 g \beta h_a}} \quad (3.28)$$

Es común encontrar ecuaciones empíricas de la descarga de compuertas. Para fines prácticos, es posible adoptar

$$q = C h^{1/2} \quad (3.29)$$

Por otra parte, teóricamente se acepta que el gasto que descarga una compuerta es,

$$q = \mu A_c \sqrt{2 g h} \quad (3.30)$$

igualando (3.30) con (3.29) resulta

$$C = \mu A_c \sqrt{2 g} \quad (3.31)$$

Tomando en cuenta la relación (3.31), la ecuación (3.28) se puede reescribir como:

$$n = \frac{Q_o Q_i^*}{C \sqrt{\beta h_a}} \quad (3.32)$$

esta ecuación considera que el nivel máximo en el tanque es igual a la carga sobre las compuertas. Para sistemas como el de la figura 3-1 (codo 90° en la salida) y con parcelas con pendiente, la ecuación (3.32) es;

$$n = \frac{Q_o Q_i^*}{C \sqrt{\beta (h_a + h_{const} + \Delta_z)}} \quad (3.33)$$

para tubería de 6 pulgadas de diámetro $h_{const} = 0.2$ metros.

3.3.3 Diámetro de la tubería

Como el control de la descarga lo tiene el grupo de compuertas, la capacidad de la tubería debe ser mayor que la capacidad de descarga de las compuertas;

$$n q < Q_{tub} \quad (3.34)$$

Aceptando que la tubería tiene una capacidad de descarga dada por una relación del tipo

$$Q_{\text{tub}} = \mu_t A_{\text{tub}} \sqrt{2g(h - h_c)} \quad (3.35)$$

y considerando por simplificación que la carga sobre las compuertas es proporcional a la que existe en el tanque, resulta que al reemplazar las ecuaciones (3.11), (3.12) y (3.30) en (3.34) y despejando A_{tub} , se obtiene

$$A_{\text{tub}} > \frac{n \mu A_c}{\mu_t} \sqrt{\frac{\beta h}{h - h_c}} \quad (3.36)$$

como n , μ y μ_t son invariantes respecto a h , se puede adoptar de la ecuación anterior $h = h_a$ y un factor de seguridad del 20%, resulta:

$$A_{\text{tub}} = \frac{1.2 n \mu A_c}{\mu_t} \sqrt{\frac{\beta h_a}{h_a - h_c}} \quad (3.37)$$

Lara (1995) determina que $\mu_t = 0.6$, de aquí que el diámetro del tubo es:

$$D_{\text{tub}} = \left(\frac{8 n \mu A_c}{\pi \sqrt{\frac{1}{\beta} \left(1 - \frac{h_c}{h_a} \right)}} \right)^{1/2} \quad (3.38)$$

Si de la ecuación (3.23) se despeja h_c/h_a y se reemplaza en (3.38), se obtiene

$$D_{\text{tub}} = \left(\frac{8 n \mu A_c}{\pi \sqrt{\frac{1}{\beta} \left(1 - \frac{Q_c^{*2}}{Q_i^{*2}} \right)}} \right)^{1/2} \quad (3.39)$$

La ecuación (3.39) determina el diámetro de la tubería con una capacidad mayor a la descarga de las compuertas.

3.3.4 Hidrograma de descarga

Para determinar el gasto descargado por el conjunto de compuertas, es necesario conocer el hidrograma de descarga del tanque durante la intermitencia.

Partiendo de la ecuación (2.15), e integrando desde Q_i^0 a Q^* para el gasto; y de 0 a t^* para el tiempo;

$$Q^* + \ln(Q^* - 1) - Q_i^* - \ln(Q_i^* - 1) = -K t^* \quad (3.40)$$

Sustituyendo (3.24) en (2.40), se tiene;

$$Q^* + \ln(Q^* - 1) = Q_i^* + \ln(Q_i^* - 1) - (Q_i^{*2} - Q_c^{*2}) \frac{f}{2} t^* \quad (3.41)$$

Como Q_i^* y f son conocidos, la ecuación (3.41) representa el hidrograma de descarga ($Q^* - t^*$). Sin embargo, es deseable tener una relación explícita de Q^* en función de t^* , la cual no se puede obtener directamente de la expresión. García 1994, soluciona este problema al realizar un análisis de regresión no lineal para obtener una función que sea numéricamente equivalente a la expresión $Q^* + \ln(Q^*-1)$, obteniendo la siguiente:

$$Q^* + \ln(Q^* - 1) = -0.95 + 4.24 \ln Q^* \quad (3.42)$$

Con un coeficiente de correlación de 0.998,

Por lo anterior la ecuación (3.41) puede ser representada como:

$$-0.95 + 4.24 \ln(Q^*) = Q_i^* + \ln(Q_i^* - 1) - (Q_i^{*2} - Q_c^{*2}) \frac{f}{2} t^* \quad (3.43)$$

Despejando Q^* de (2.43):

$$Q^* = \frac{e^{\left(\frac{Q_i^* + \ln(Q_i^* - 1) + 0.95}{4.24} \right)}}{e^{\left(\frac{(Q_i^{*2} - Q_c^{*2}) \frac{f}{2} t^*}{4.24} \right)}} \quad (3.44)$$

Asumiendo que se satisface el valor máximo $Q^* = Q_i^*$ para $t^* = 0$, debe cumplirse;

$$Q_i^* = e^{\left(\frac{Q_i^* + \ln(Q_i^* - 1) + 0.95}{4.24} \right)} \quad (3.45)$$

Por otra parte (3.44) debe satisfacer el valor más pequeño de $Q^* = Q_c^*$ para $t^* = 1$, por lo que se debe cumplir:

$$\frac{(Q_i^{*2} - Q_c^{*2}) \frac{f}{2}}{4.24} = \ln \left(\frac{Q_i^*}{Q_c^*} \right) \quad (3.46)$$

que al sustituirla en (3.45) resulta;

$$Q^* = \frac{Q_i^*}{\left(\frac{Q_i^*}{Q_c^*}\right)^t} \quad (3.47)$$

La expresión (3.47) representa el hidrograma de descarga del tanque a través de la tubería de compuertas.

García realiza el análisis numérico entre las ecuaciones (3.47) y (3.41), donde obtiene un coeficiente de correlación de 0.99, por lo que (3.47) es numéricamente representativa del hidrograma de descarga.

Aceptando que la descarga de cada compuerta es prácticamente igual, su hidrograma de descarga será ;

$$q = \frac{Q_i^* \left(\frac{Q_e}{n}\right)}{\left(\frac{Q_i^*}{Q_c^*}\right)^t} \quad (3.48)$$

Esta relación representa el ingreso de gasto a cada surco durante el tiempo de descarga.

Al integrar la ecuación (3.47), se obtiene el gasto medio ($Q_{S_{medio}}$) descargado por el conjunto de compuertas;

$$Q_{S_{medio}} = \frac{Q_e (Q_i^* - Q_c^*)}{\ln\left(\frac{Q_i^*}{Q_c^*}\right)} \quad (3.49)$$

y el gasto medio descargado por cada compuerta es;

$$q_{o_{medio}} = \frac{\left(\frac{Q_e}{n}\right) (Q_i^* - Q_c^*)}{\ln\left(\frac{Q_i^*}{Q_c^*}\right)} \quad (3.50)$$

3.4 Estudio experimental

Lara (1995), realiza el estudio experimental del TDF para calibrar el modelo numérico, además de validar el hidrograma de descarga. El estudio comprendió varias pruebas con diferentes condiciones de operación, tales como la carga de apertura del tanque,

gasto de entrada y el número de compuertas abiertas. Para todos los casos revisó las pérdidas locales y de fricción además de revisar el tiempo de vaciado.

Se construyó un tanque de lámina de 4 m^3 , con una obra de excedencia para mantener el nivel constante en el Tanque. El gasto de entrada fue controlado por una válvula.

Se instaló la tubería de compuerta, a la cual se le colocaron piezómetros para medir la carga antes y después de cada compuerta. De esta forma es posible evaluar la pérdida de carga por la presencia de las compuertas.

La tubería utilizada fue de 6", 8" con una longitud de 36 m de largo, se emplearon dos diámetros para compara la influencia en los resultados obtenidos. La abertura de las compuertas fue calibrada a $\frac{1}{2}$ y $\frac{1}{4}$.

Los resultados de mayor relevancia obtenidos fueron:

Estudiar experimentalmente las pérdidas locales y de fricción que se presentan en la tubería de compuerta.

Para diferentes cargas, diámetros y aberturas de las compuertas, el parámetro β se mantiene prácticamente constante en el tiempo, o sea, para diferentes cargas la pendiente de fricción es aproximadamente la misma.

Tabla 3-1 Diseño de la pila. $A_t = 12 \text{ m}^2$. $h_a = 1 \text{ m}$. $Q_e = 3 \text{ l/s}$

t_{LL} , minutos	t_v , minutos	h_c , metros	Q_s , l/s	n	D_{min} , pulg.	$q_{m\acute{a}x}$, l/s
61.613	52.371	0.076	11.986	7	4	1.71
62.075	49.662	0.069	12.575	8	4	1.57
62.492	46.869	0.063	13.188	8	4	1.65
62.928	44.049	0.056	13.93	8	4	1.74
63.335	41.168	0.051	14.76	9	4	1.64
63.727	38.236	0.044	15.71	9	4	1.75
64.104	35.257	0.038	16.83	10	6	1.68
64.464	32.232	0.033	18.15	11	6	1.65
64.805	29.162	0.028	19.75	12	6	1.65
65.128	26.051	0.023	21.71	13	6	1.67
64.428	22.9	0.019	24.21	15	6	1.61
65.711	19.713	0.014	27.54	17	6	1.62
65.961	16.49	0.011	32.06	19	6	1.69
66.182	13.236	0.007	38.72	23	8	1.68
66.371	9.956	0.004	49.56	30	8	1.65
66.552	6.652	0.002	70.91	43	10	1.65

Abertura de la compuerta: $\frac{1}{3}$

Desarrolla dos tipos de Tablas de diseño:

La primera se refiere al número máximo de compuertas por abrir, el diámetro mínimo de la tubería, teniendo como datos el gasto de entrada, el tirante de abertura, el área del tanque y la abertura de la compuerta. Para realizar el diseño se tiene como datos de selección el tiempo de vaciado y el gasto máximo no erosivo. Estas Tablas son para tres gastos de entrada 1, 2 y 3 lps; tres tirantes (0.75, 1.00 y 1.25 m); dos áreas de tanque 4 y 8 m², y para dos aberturas de compuerta (½ y ¼).

La segunda se refiere al número máximo de grupos de compuertas por abrir y la longitud máxima de cabecera, teniendo como datos el número de compuertas abiertas, la pendiente transversal del terreno y el diámetro de la tubería. Un ejemplo se muestra en la Tabla 3-1.

3.5 Metodología de diseño

Considerando las ecuaciones anteriores, se describe el diseño del TDF para fines prácticos.

Datos : Gasto disponible para el riego (Q_e), Características de la parcela (longitud (L_s) y espaciamiento del surco, pendientes longitudinal (S_o) y transversal (S_t), ancho de cabecera, tipo de suelo, coeficiente de rugosidad de Manning (0.03-0.04), lámina de riego (L_r), gasto máximo no erosivo (Criterio de Criddle o Figura 3-3), tiempo de vaciado del tanque (Figura 3-4 o mediciones en campo).

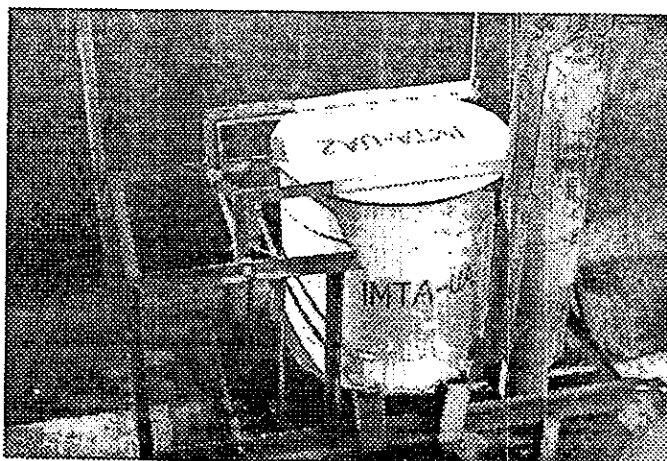
1. Se propone la carga de apertura del sistema.
2. Se selecciona la abertura de las compuertas, debe verificarse que el gasto máximo descargado para esa abertura sea igual o menor al máximo no erosivo.
3. Se propone el área del tanque en planta.
4. Se determina el tiempo de llenado de la pila.
5. Se determina la relación tiempo de llenado/tiempo de vaciado (f).
6. Se calcula el gasto máximo adimensional, Q_i ecuación (3.25).
7. Se determina el número de surcos a regar. Ecuación (3.32).
8. Se calcula el diámetro de la tubería de compuerta. Ecuación (3.39).

Los pasos 4 al 8 están resumidos en las tablas de diseño desarrolladas por Lara.

3.6 Dispositivo de apertura/cierre

Para generar las intermitencias en el TDF se requiere de un dispositivo con un mecanismo de apertura y cierre que opere en forma automática. Este dispositivo no debe utilizar energía externa, sino aprovechar la carga hidráulica disponible, debe ser de fácil diseño, construcción y bajo costo.

En 1994 se diseñó, fabricó y operó el primer sistema de apertura/cierre (Barrios y Aguilar, 1994) en parcelas productivas (Fotografía 3-1). El funcionamiento hidráulico de este sistema fue satisfactorio, la apertura y cierre se presentaba en los niveles preestablecidos, las fugas eran mínimas y no requería ajustes mecánicos. Como este dispositivo tenía la tapa que cancelaba el flujo hacia la tubería de compuerta en posición vertical, se tenía el mayor volumen útil posible.



Fotografía 3-1 Sistema de apertura/cierre (1994)

Este dispositivo tenía dos inconvenientes: la gran cantidad de articulaciones mecánicas necesarias para su fabricación y su elevado costo. Estas razones volvieron poco viable al sistema para uso masivo.

En 1995 se desarrolló otro sistema de apertura/cierre (Barrios, 1995) sin articulaciones mecánicas, de fácil construcción y bajo costo (Figura 3.5). Este sufrió varias modificaciones y simplificaciones en su diseño y fabricación siendo utilizado durante el ciclo primavera-verano. El funcionamiento hidráulico fue satisfactorio, la apertura y cierre se presentaba en los niveles preestablecidos, sin fugas ni requerimiento de ajustes mecánicos. Este dispositivo presentó dos inconvenientes: La primera, durante su fabricación, las guías de cierre y el vástago para que cierre completamente debían quedar alineados perfectamente, haciendo laborioso el proceso; la segunda, durante la operación, según transcurría el ciclo, el flotador inferior se iba deformando gradualmente, hasta que se despegaba del vástago. Como estos problemas no pudieron ser eliminados se probaron otros materiales y procedimientos constructivos.

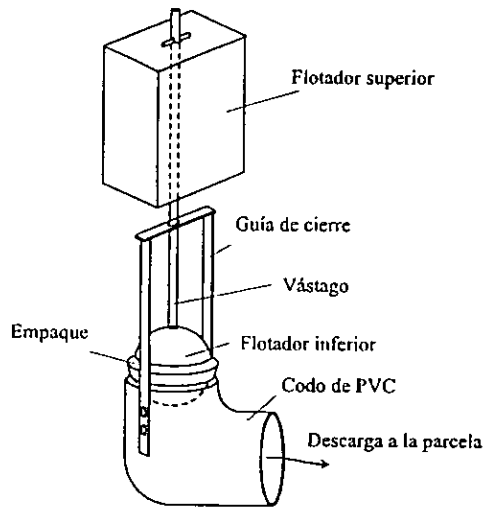


Figura 3- 5 Sistema apertura/cierre (1995)

Para el siguiente año (1996) se utilizó una versión modificada, en el cual se eliminaron los problemas descritos anteriormente (figura 3-6).

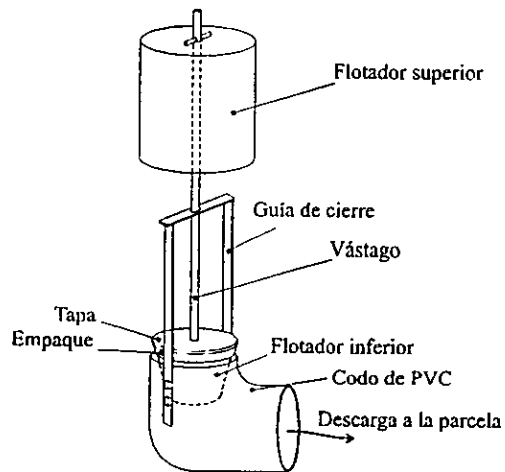


Figura 3- 6 Sistema de apertura/cierre (1996)

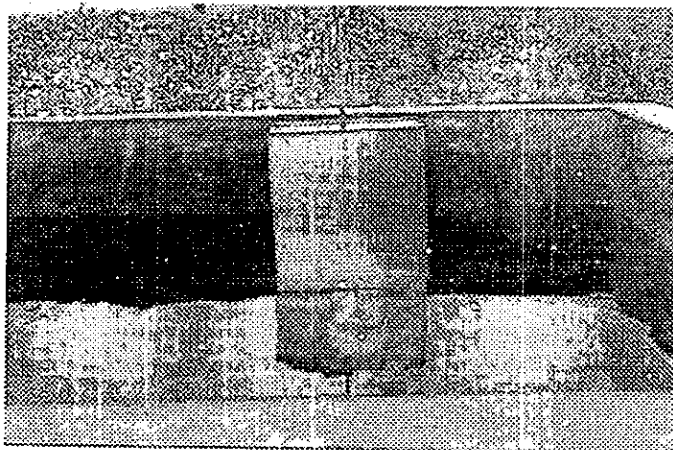
Durante ese año el sistema de apertura/cierre funcionó correctamente. En el ciclo primavera-verano se estuvo vigilando al dispositivo continuamente ya que podían presentarse problemas no previstos en el que fuera necesario hacer ajustes o

reparaciones menores, además, se tenían que descartar los tres posibles problemas de funcionamiento que se podrían presentar para el sistema de apertura/cierre :

- que no dispare y con ello se derrame la pila.
- quede abierto, y no se produzcan las intermitencias.
- quede abierto parcialmente y se presente el gasto de equilibrio, y por lo tanto, no se produzcan las intermitencias.

Los dos primeros casos pueden ser eliminados durante la fabricación del sistema de apertura/cierre, para el primer caso, diseñando el flotador superior con volumen suficiente para disparar; y para el segundo, que los elementos que guían al flotador inferior durante el cierre sean perpendiculares al codo.

Para el tercer caso fue necesario determinar el gasto de equilibrio. El sistema de apertura/cierre opera con gastos tan pequeños como se dispongan (en pruebas el sistema dispara con $Q_e = 0.001$ l/s), Barrios, 1995, por lo que se descarta la posibilidad de que el sistema quede abierto parcialmente y se presente el gasto de equilibrio.

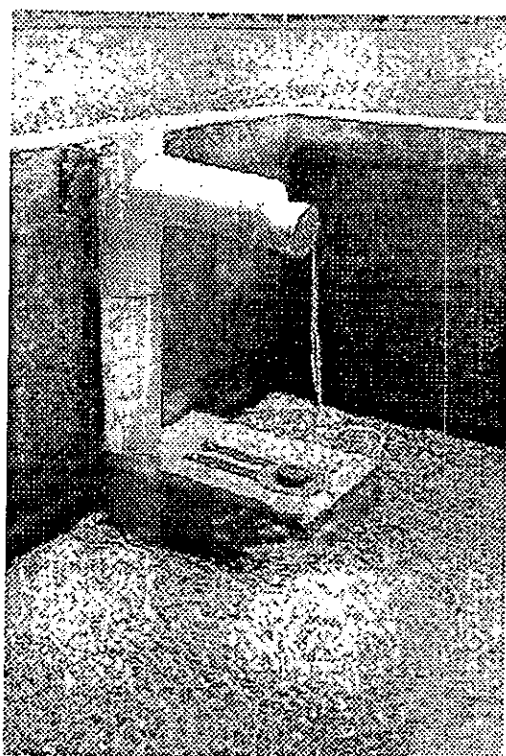


Fotografía 3-2 Sistema de apertura/cierre (1996).

Durante los riegos cada TDF descargó en promedio 550 veces sin presentarse alguno de los problemas antes mencionados. Este sistema de apertura/cierre puede utilizarse confiablemente en el TDF, además, por lo robusto de su diseño y los materiales utilizados en su mantenimiento solo requiere una limpieza periódica (cada tres meses).

Uno de los principales objetivos al desarrollar el TDF es que el agricultor sea capaz de realizar cualquier reparación al sistema de flotación sin asesoría, por lo que el IMTA en coordinación con la UAZ han desarrollado y probado otros sistemas de apertura/cierre de diversos materiales, como el PVC que es más fácil de obtener en el mercado nacional, así como las ventajas de fabricación y mantenimiento respecto a los de fierro.

Por la sencillez en su fabricación y operación, actualmente se utiliza el sistema de apertura/cierre de PVC que se muestra en la fotografía 3-3.



Fotografía 3-3 Sistema apertura/cierre (1997)

3.7 TDF de la Facultad de Veterinaria de la UAZ.

Desde 1994 en convenio con el IMTA, la Universidad Autónoma de Zacatecas (UAZ) ha desarrollado y probado en su parcela experimental en la Facultad de Veterinaria tres TDF. Como la parcela no disponía de la infraestructura necesaria para aplicar el riego intermitente fue necesario equiparla. En el anexo A se describe la planeación y diseño del sistema experimental.

Para mostrar las ventajas de los TDF a diferentes condiciones de operación, se planeó regar tres parcelas de 1 Ha c/u con gastos de ingreso a los tanques de 1, 2 y 3 l/s. Las características de las parcelas para los TDF son:

Tabla 3-2 Características de los TDF de las parcelas experimentales.

Parcela con :	TDF 1	TDF 2	TDF 3
Gasto de entrada Q_e , l/s	1	2	3
Ancho de cabecera L_c , m	83	83	83
Longitud de surco L_s , m	124	105	108
Pendiente longitudinal S_o	0.007	0.007	0.007
Pendiente transversal S_t	0.005	0.005	0.005
Tipo de suelo	franco-arcillo-arenoso		

3.7.1 Diseño de los TDF.

A continuación se describe el diseño del TDF de la parcela regada con 1 l/s. Se utiliza como dispositivo de apertura/cierre el construido de PVC. Partiendo con los datos del Cuadro 3-2.

3.7.1.1 Velocidad máxima no erosiva

Utilizando la propuesta de Walker (Ecuación 3.7), el tipo de suelo es franco-arcillo-limoso; la velocidad máxima no erosiva es;

$$V_{\max} \approx 0.16 \text{ m/s}$$

3.7.1.2 Gasto máximo no erosivo

Aplicando el criterio de Criddle (Ecuación 3.5) ;

$$Q_{\max} = \frac{0.75}{S_o} = \frac{0.75}{0.7} = 1.07 \text{ l/s}$$

La Figura 3-3 selecciona el Q_{\max} no erosivo en función de la $V_{\max} = 0.16 \text{ m/s}$, $S_o = 0.007$ y $n = 0.04$.

$$\frac{n}{\sqrt{S_o}} = 0.47$$

Por tanto, $Q_{\max} = 1.5 \text{ l/s}$ que es el gasto que se adoptó finalmente.

3.7.1.3 Tiempo de vaciado

Para los datos $L_s = 124 \text{ m}$, y $V_{\max} = 0.16 \text{ m/s}$ de la Figura 3-4; el tiempo de vaciado es 13 minutos.

3.7.1.4 Carga de apertura

La apertura del sistema se presenta a una altura $h_a = 0.85 \text{ m}$ sobre la salida del tanque.

3.7.1.5 Carga de cierre

Para determinar h_c , se hicieron pruebas de vaciado del tanque , con el dispositivo de apertura/cierre, ocurriendo a $\pm 15 \text{ cm}$ de carga sobre la salida.

3.7.1.6 Tubería de compuerta

Del anexo B, la tubería de compuerta utilizada es de 6 m de longitud, separación de compuertas 0.75 m, dimensiones de la compuerta de 4.5 x 3.4 cm.

3.7.1.7 Gasto descargado por la compuerta.

De mediciones en laboratorio se determinó el gasto descargado para los tirantes de apertura ($h_a = 0.85 \text{ m}$) y cierre ($h_c = 0.15 \text{ m}$) con diferentes aberturas de la compuerta. Las aberturas que presentaron gastos similares al de diseño fueron los que se muestran en la Tabla 3-3.

Tabla 3-3. Gasto descargado para diferentes aberturas de compuerta

Abertura de Compuerta	q descargado l/s	
	$h_a = 0.85 \text{ m}$	$h_c = 0.15 \text{ m}$
(1.2/4.5)*	1.30	0.62
(2/4.5)	1.75	0.86

* Relación de abertura de 1.2 cm a la abertura total.

Se seleccionó la abertura de las compuertas 2/4.5, ya que el gasto descargado al iniciar la descarga, el tanque es similar al gasto máximo no erosivo. En campo esta abertura se obtiene al colocar la yema del dedo pulgar en la compuerta.

3.7.1.8 Tanque

Sección de fondo del tanque

Para estandarizar dimensiones del tanque para el gasto de entrada de 1 lps, se propuso las dimensiones del tanque de 2 x 2 x 1.3 m.

Tiempo de llenado

De la ecuación (3.9), el tiempo de llenado del tanque es de 47 minutos

Cálculo de f.

Se determina la relación del tiempo de llenado al tiempo de vaciado del tanque,

$$f = t_v / t_{LL} = 0.2766$$

Cálculo del gasto máximo adimensional Q_i^*

Partiendo de la relación de vaciado a llenado, $f = 0.2766$ y un valor de $Q_c^* = 1.1$ para cualquier TDF (propuesto por García); que sustituidas en la ecuación (3.25) y resolviéndola numéricamente se tiene;

$$Q_i^* = 9.839$$

Número de compuertas abiertas.

$$n = \frac{(0.001)(9.839)}{0.0018072 \sqrt{0.9(0.85 + 0.2)}} \approx 6$$

Diámetro de la tubería de compuerta.

$$D_{\text{tub}} = \left(\frac{8(6 \text{ compuertas})(0.6)(0.02)(0.034)}{\pi \sqrt{\frac{1}{0.9} \left(1 - \frac{1.1^2}{9.839^2} \right)}} \right)^{1/2} = 0.08 \text{ m}$$

ajustando al diámetro comercial disponible

$$D_{\text{tub}} = 6''$$

De forma análoga se diseñan los TDF2 y TDF 3. Resumiendo para las tres parcelas:

Parcela con TDF 1: gasto de ingreso de 1 l/s, 6 compuertas abiertas a 2/4.5 de su área. 19 grupos de compuertas. Tubería de compuerta de 6" Ø.

Parcela con TDF 2: gasto de ingreso de 2 l/s, 16 compuertas abiertas a 2/4.5 de su área. 7 grupos de compuertas. Tubería de compuerta de 6" Ø.

Parcela con TDF 3: gasto de ingreso de 3 l/s, 20 compuertas abiertas a 2/4.5 de su área. 6 grupos de compuertas. Tubería de compuerta de 6" Ø.

3.7.2 Construcción de los TDF.

Sobre la línea del subsistema se construyeron los TDF (Anexo A). En la figura 3.7 se muestran los detalles constructivos principales que deben tener los tanques.

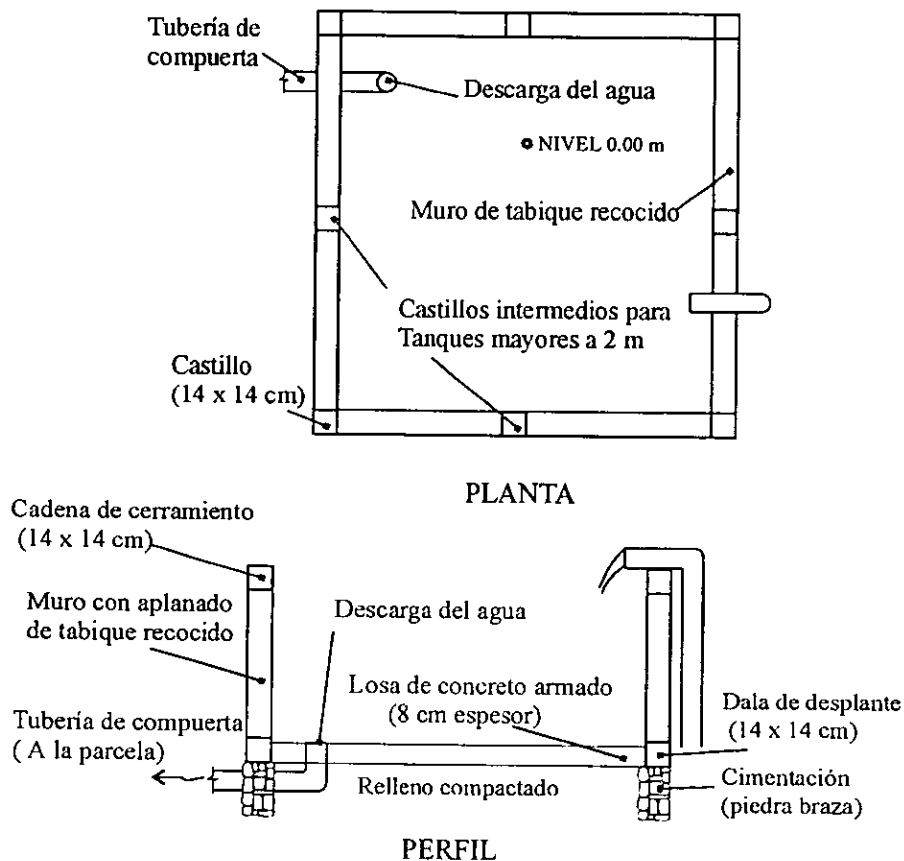


Figura 3-7 Detalles constructivos del TDF

Las cantidades de obra se presentan a continuación; así como los costos de materiales y mano de obra.

Tabla 3-4. Materiales y mano de obra para el TDF 1

Materiales :	Unidad	Cantidad	P.U.	Importe
Acero en castillos	m	5.20	\$ 12.00	\$ 62.40
Acero en cadenas	m	24.00	\$ 12.00	\$ 288.00
Acero en firme	m2	4.84	\$ 4.00	\$ 19.36
Alambre recocido	kg	2.00	\$ 5.00	\$ 10.00
Arena en cadenas y castillos	m3	1.16	\$ 55.00	\$ 63.80
Arena en losa	m3	0.50	\$ 55.00	\$ 27.50
Arena en aplanado	m3	0.40	\$ 55.00	\$ 22.00
Ladrillos en muros	millar	0.35	\$ 375.00	\$ 131.25
Cemento	ton	0.50	\$ 950.00	\$ 475.00
Calhidra	ton	0.18	\$ 380.00	\$ 68.40

Subtotal \$ 1167.71

Mano de obra en:	Unidad	Cantidad	P.U.	Importe
Castillos	m	5.20	\$ 12.00	\$ 62.40
Cadenas	m	24.00	\$ 12.00	\$ 288.00
Firme	m2	4.84	\$ 12.00	\$ 58.08
Tabique	m2	7.0	\$ 12.00	\$ 84.00
Aplanado	m2	14.40	\$ 12.00	\$ 172.80

Subtotal \$ 665.28

Total TDF 1 \$ 1832.99

Tabla 3-5. Materiales y mano de obra para el TDF 2

Materiales :	Unidad	Cantidad	P.U.	Importe
Acero en castillos	m	7.80	\$ 12.00	\$ 93.60
Acero en cadenas	m	33.00	\$ 12.00	\$ 396.00
Acero en firme	m2	8.64	\$ 4.00	\$ 34.56
Alambre recocido	kg	3.00	\$ 5.00	\$ 15.00
Arena en cadenas y castillos	m3	1.63	\$ 55.00	\$ 89.65
Arena en losa	m3	0.86	\$ 55.00	\$ 47.30
Arena en aplanado	m3	0.62	\$ 55.00	\$ 34.10
Ladrillos en muros	millar	0.60	\$ 375.00	\$ 225.00
Cemento	ton	1.00	\$ 950.00	\$ 950.00
Calhidra	ton	0.20	\$ 380.00	\$ 76.00

Subtotal \$ 1961.21

Mano de obra en:	Unidad	Cantidad	P.U.	Importe
Castillos	m	7.80	\$ 12.00	\$ 93.60
Cadenas	m	33.00	\$ 12.00	\$ 396.00
Firme	m2	8.64	\$ 12.00	\$ 103.68
Tabique	m2	12.0	\$ 12.00	\$ 144.00
Aplanado	m2	30.80	\$ 12.00	\$ 369.60

Subtotal \$ 1106.88

Total TDF 2 \$ 3068.09

Tabla 3-6. Materiales y mano de obra para el TDF 3

Materiales :	Unidad	Cantidad	P.U.	Importe
Acero en castillos	m	10.40	\$ 12.00	\$ 124.80
Acero en cadenas	m	42.00	\$ 12.00	\$ 504.00
Acero en firme	m2	13.44	\$ 4.00	\$ 53.76
Alambre recocido	kg	4.00	\$ 5.00	\$ 20.00
Arena en cadenas y castillos	m3	2.10	\$ 55.00	\$ 115.50
Arena en losa	m3	1.35	\$ 55.00	\$ 74.25
Arena en aplanado	m3	0.77	\$ 55.00	\$ 42.35
Ladrillos en muros	millar	0.85	\$375.00	\$ 318.75
Cemento	ton	1.50	\$950.00	\$1425.00
Calhidra	ton	0.50	\$380.00	\$ 190.00

Subtotal \$ 2868.41

Mano de obra en:	Unidad	Cantidad	P.U.	Importe
Castillos	m	10.40	\$ 12.00	\$ 124.80
Cadenas	m	42.00	\$ 12.00	\$ 504.00
Firme	m2	13.44	\$ 12.00	\$ 161.28
Tabique	m2	17.0	\$ 12.00	\$ 204.00
Aplanado	m2	38.48	\$ 12.00	\$ 461.76

Precios noviembre 1997

Subtotal \$ 1455.84

Total TDF 3 \$ 4324.25

3.7.3 Sistema de apertura/cierre

A continuación se describen las listas de materiales y el procedimiento constructivo del Sistema de apertura/cierre.

Tabla 3-7 Materiales del Flotador y ménsulas para fijarlo al tanque

MATERIAL	COSTO
1.2 m de tubo de 6" (sanitario)	\$ 40.00
1 Tee de PVC de 6" (sanitario)	\$ 35.00
2 Tapones de inserción de PVC de 6" (sanitario)	\$ 80.00
2 Ménsulas de fierro de 20 cm	\$ 30.00
0.3 m de fierro galvanizado de ¾"	\$ 8.00
4 Tornillos de ¼" x 1" (Para fijar ménsulas en tanque)	\$ 2.00
4 rondanas de ¼"	\$ 1.00
4 Taquetes de 1"	\$ 1.00
2 Abrazadera de ¾"	\$ 6.00
4 tornillos de 5/16" x ¾" (Para fijar flotador en las ménsulas)	\$ 2.00
4 rondanas de 5/16"	\$ 1.00
4 tuercas de 5/16"	\$ 1.00
2 m de hilo	\$ 1.00

Subtotal \$ 208.00

Tabla 3-8 *Materiales del sapo*

MATERIAL	COSTO
0.5 m x 0.3 x 1/4" de poliuretano	\$ 18.00
1 tapa circular de fierro de 6" de diámetro (Calibre 18)	\$ 4.00
1 Molcajete de plástico de 6" de diámetro	\$ 7.00
1 cilindro de unicel de 5" diámetro (relleno para molcajete)	\$ 1.00
0.15 m de varilla roscada de 1/4"	\$ 1.00
2 rondanas de 1/4"	\$ 1.00
2 tuercas de 1/4"	\$ 1.00
4 Tornillos de 1/4" x 1" (Para fijar y sapo en tanque)	\$ 2.00
4 rondanas de 1/4"	\$ 1.00
4 Taquetes de 1"	\$ 1.00
Subtotal	\$ 37.00
TOTAL	\$ 245.00

Las Herramientas requeridas son; Taladro, Serrucho, Escofina, Cinta de 3 m, Guía de corte, Estufa, 0.5 m de fo fo y Cemento para PVC.

Deben atenderse las siguientes indicaciones durante la construcción del TDF.

Corte. Para cortar el tubo de PVC a escuadra y evitar imperfecciones, se utiliza el serrucho y la guía de corte tal como se muestra en la figura 3-8.

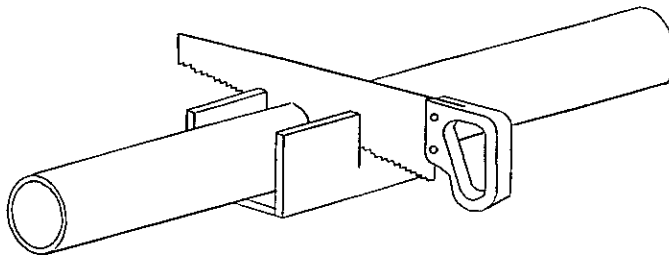


Figura 3-8 *Corte de tubo de PVC.*

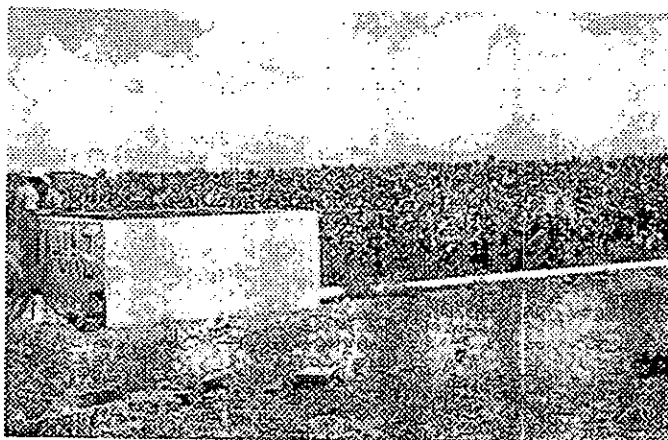
De esta operación dependerá la efectividad de la unión. Embonar las piezas previamente para garantizar la unión de las piezas. Con un trapo limpio y seco eliminar todo rastro de grasa o cualquier otra impureza.

Acoplamiento de las piezas. Aplicar el pegamento con brocha en las piezas por unir. La brocha debe estar en buenas condiciones, libre de residuos. Esta operación debe realizarse lo mas rápidamente posible para garantizar la mayor adhesión entre las piezas. Se recomienda no mover las piezas cementadas durante 15 minutos.

Orificios en la tubería. Se calienta un extremo del tubo de fo fo y se inserta en los lugares donde se desean los orificios y se afinan con la escofina.

3.7.4 Operación del sistema

El sistema ha operado durante 5 ciclos vegetativos, tres de primavera-verano y dos de otoño invierno. Para el ciclo primavera-verano el cultivo establecido fue maíz forrajero, y avena para los ciclo otoño-invierno.



Fotografía 3-4 TDF de la Facultad de Veterinaria (UAZ)

3.7.5 Pruebas del TDF.

Durante la operación del sistema se midieron las variables consideradas en el diseño del TDF, los resultados obtenidos (Dzul y Trinidad, 1997) en resumen fueron:

3.7.5.1 v_{max} y Abertura máxima de la compuerta.

De mediciones, cerca de la cabecera de la parcela el frente de onda recorre 20 metros en un tiempo promedio de 135 segundos; por tanto, su velocidad es;

$$v = 20 \text{ m} / 135 \text{ seg.} = 0.15 \text{ m/s}$$

Para el gasto descargado por la compuerta al inicio del vaciado ($Q=1.75 \text{ l/s}$) en la cabecera de la parcela, en un tramo de $\pm 5 \text{ m}$, existe un arrastre de las partículas mas finas, fuera de esta zona el suelo no es erosionado. Como este gasto se presenta durante 2 o 3 minutos, sería válido aceptar que esta es la abertura máxima de la compuerta sin que se presente erosión en el resto del surco.

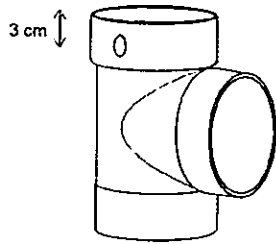
3.7.5.2 Tiempo de llenado

El tiempo de llenado en las pilas (47 minutos) fue similar al modelo numérico.

3.7.5.3 Tiempo de vaciado

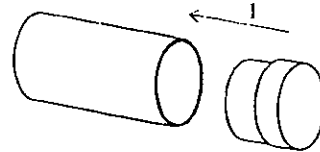
El vaciado de las pilas fue de 6 minutos, que difiere al propuesto (13 minutos). Esto se explica porque en el diseño original se consideró que el eje de la tubería de compuertas coincide con el nivel del fondo del tanque, situación que no se respetó en campo y que por otro lado con el sistema de apertura/cierre actual cierra con una carga h_c mayor que

A ORIFICIOS EN TE



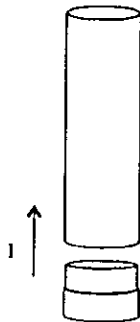
1. Hacer 2 orificios de 1" de diámetro, afinar con escofina

B FLOTADOR



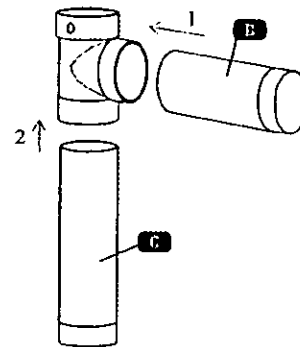
1. Calentar un extremo del tubo de 0.4 m para insertar la tapa. Utilizar cemento.

C CUERPO DEL FLOTADOR



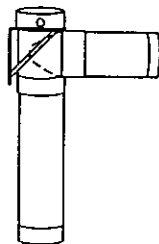
1. Calentar extremo del tubo de 0.8 m para insertar la tapa. Utilizar cemento.

D FLOTADOR



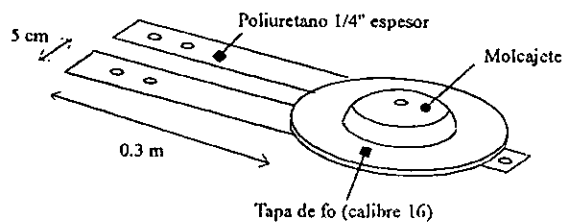
1. Pegar B en Te de 6".
2. Pegar C en Te de 6".

E FLOTADOR EN TANQUE



1. Fijar dos ménsulas a la pared del Tanque.
2. Con un tubo de 3/4" se atornillado en las ménsulas se fija el flotador.

F SAPO



1. Se coloca el Poliuretano, la tapa de fo fo y el molcanete relleno de unicel. Se atornillan con una varilla roscada de 3/4.
2. El sapo se coloca en la salida del TDF y se atornilla en el piso.
3. Se amarra un hilo entra el sapo y el flotador.

Figura 3-9 Construcción del sistema de apertura/cierre para el TDF.

la original, en consecuencia se tiene una mayor carga sobre las compuertas y una diferencia de carga disponible ($h_a - h_c$) menor a la prevista.

Se hicieron mediciones en campo de las variables involucradas en las ecuaciones de diseño encontrando que Q_c^* tiene un valor mayor al propuesto por García. Este valor no es constante para las tres pilas.

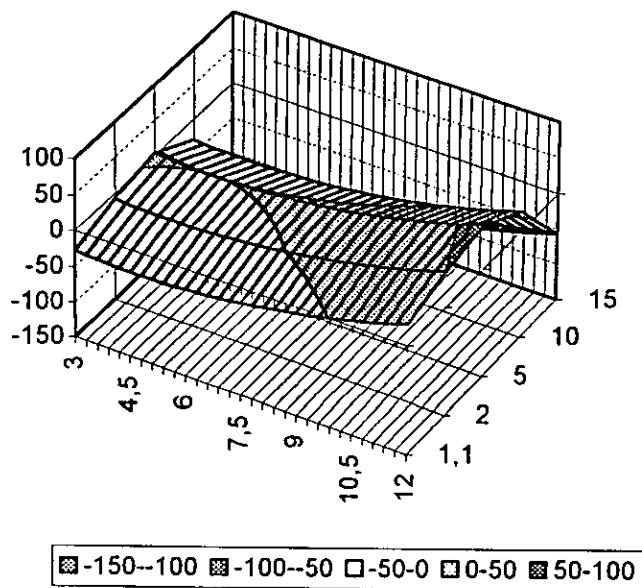
3.7.5.4 Carga de apertura y cierre

No se presentaron variaciones apreciables en el nivel previsto en la apertura del sistema (± 0.5 cm); para el cierre existe una variación de ± 1 cm debido al oleaje en el tanque.

3.7.5.5 Obtención de las curvas de avance y recesión.

En los riegos de presiembra y auxilio se realizaron mediciones del avance del flujo en el surco, tanto para riego continuo como para riego intermitente. Para el riego intermitente en los 3 TDF se encontró que el frente de onda (para los últimos ciclos) no alcanza el final del surco sino que se estaciona en promedio a los 85 metros de la cabecera, quedando sin regar 20 metros. Esto se debe a que el tiempo de vaciado de diseño (13 minutos) es muy diferente al medido (6 minutos), Dzul y Trinidad, 1997.

Figura 3-10 Valores de Q_c^* vs Q_i^* para el TDF 1



Como el hidrograma de descarga del tanque es función del gasto mínimo adimensional (considerado constante para cualquier TDF), y este es menor que el medido en campo, para que se cumpla la igualdad (3.25) el gasto máximo dimensional debe adquirir un valor mayor. Esto trae como consecuencia una sobrestimación del hidrograma, del número de compuertas abiertas, el diámetro de la tubería y en consecuencia un tiempo de vaciado menor al propuesto. Como la eficiencia del riego depende de la selección correcta de esta variable fue necesario corregir las ecuaciones de diseño.

En la Figura 3-10 se muestra la ecuación (3.25) para el TDF 1, con los datos del tiempo de llenado y vaciado ($f = 13/47 = 0.2766$). La figura muestra que Q_c no es constante respecto a Q_i , sino que esta debe aumentar y Q_c disminuir para mantener la igualdad.

Es importante hacer notar que este tipo de problema ya había sido identificado por Lara (1995) en los estudios de laboratorio y realizó las correcciones pertinentes en la validación del modelo numérico con respecto a los datos medidos, de esta manera se demostró la validez del modelo de descarga. Desgraciadamente en la práctica no siempre es posible forzar la descarga para cumplir con $Q_c = 1.1$.

3.7.5.6 Correcciones adicionales

De comparaciones entre el número de compuertas abiertas y sus tiempos de vaciado (medidos en campo), se determinó que la pendiente de la cabecera influye en el número de compuertas abiertas. Se midieron los tiempos de vaciado para grupos de compuertas (mismo número y abertura) cerca del TDF, en la parte media de la cabecera y al final de ella, encontrando que la ecuación (3.33) proporciona resultados más apegados que la ecuación (3.32). Para fines de diseño se considera el número de compuertas en la parte media de la cabecera. Para todos los casos se comprobó que parámetro β es prácticamente constante durante el vaciado, por lo que para fines prácticos no es necesario estimar este parámetro.

3.7.6 Diseño del sistema con las ecuaciones corregidas

Considerando que el tiempo de vaciado es uno de los parámetros más importantes para el diseño adecuado del TDF, ya que la eficiencia del riego depende en gran medida de este parámetro, es necesario que el hidrograma teórico de descarga sea similar al medido en campo. Como el diseño anterior estima un valor Q_c constante, se tiene un tiempo de vaciado menor, por lo que se debe considerar a Q_c como otra variable a evaluar. Se presenta el diseño del TDF con las ecuaciones corregidas (Dzul 1997).

1. Determinar la carga de apertura del tanque (h_a) y la carga de cerrado (h_c).
2. Seleccionar la fracción de la abertura de las compuertas ($1/4$, $1/3$ ó $1/2$ por ejemplo). El gasto descargado para la abertura seleccionada debe ser igual o menor al gasto máximo no erosivo.
3. Proponer sección de fondo del tanque (4, 8, 12 ó 16 m²).
4. Se calcula el tiempo de llenado del tanque

$$t_{LL} = \frac{A_t (h_a - h_c)}{Q_e}$$

5. Se determina el valor de f , relación entre el tiempo de vaciado y de llenado del tanque.

$$f = \frac{t_v}{t_{LL}}$$

- Se propone un número de compuertas abiertas. Para ello se requiere determinar el gasto descargado por la compuerta al cerrar el sistema, es recomendable realizar mediciones de esta variable en campo. Se calcula Q_i^* a partir de Q_c^* (ecuación 3.22). Estos valores preliminares serán corregidos posteriormente.
- Se revisa el valor de Q_i^* , para ello se resuelve la ecuación (3.25) por algún método numérico (Secante, Bisección por ejemplo). Una alternativa de solución es utilizar la siguiente ecuación recursiva.

$$Q_i^* = \sqrt{\frac{2}{f} Q_i^* + \frac{2}{f} \ln(Q_i^* - 1) + Q_c^* - \frac{2}{f} Q_c^* - \frac{2}{f} \ln(Q_c^* - 1)}$$

- Se determina el número de compuertas abiertas, para fines prácticos $\beta = 0.9$.

$$n = \frac{Q_o Q_i^*}{C \sqrt{\beta(h_a + h_{const} + \Delta_z)}}$$

donde $h_{const} = 0.2$ m para tubería de 6" de diámetro, Δ_z representa el desnivel topográfico medio de la cabecera de la parcela.

- Una vez conocido el número de compuertas abiertas, debe revisarse el valor de Q_c^* , en caso de que exista una variación apreciable entre el valor propuesto y el calculado, deben repetirse los pasos 7) y 8) tantas veces sea necesario hasta que el número de compuertas abiertas no se modifique en dos iteraciones sucesivas.
- Se determina el diámetro de la tubería de compuerta

$$D_{tub} = \left(\frac{8 n \mu A_c}{\pi \sqrt{\frac{1}{\beta} \left(1 - \frac{Q_c^{*2}}{Q_i^{*2}} \right)}} \right)^{1/2}$$

- Se calcula el gasto medio descargado por cada compuerta.

$$q_{o_{medio}} = \frac{\left(\frac{Q_o}{n} \right) (Q_i^* - Q_c^*)}{\ln \left(\frac{Q_i^*}{Q_c^*} \right)}$$

Con esta nueva metodología y las consideraciones, se rediseñó el riego para los tres Tanques.

3.7.7 Rediseño del TDF

Partiendo con los datos de la Tabla 3-2.

Velocidad máxima no erosiva

$$V_{\max} \approx 0.16 \text{ m/s}$$

Gasto máximo no erosivo

$$Q_{\max} = 1.5 \text{ l/s}$$

Carga de apertura

$$h_a = 0.85 \text{ m}$$

Carga de cierre

$$h_c = \pm 15 \text{ cm.}$$

Tubería de compuerta

Tubería de compuerta de 6 m de longitud, separación de compuertas 0.75 m, dimensiones de la compuerta de 4.7x3.3 cm.

Abertura de compuertas

Se seleccionó la apertura de las compuertas 2/4.7

Gasto descargado por las compuertas.

El gasto en las compuertas al momento del cierre con la apertura indicada, en la parte media de la cabecera de la parcela es de 0.86 l/s. (Cuadro 3-3).

Tanque

Sección de fondo del tanque

$$A_f = \text{de } 2 \times 2 \times 1.3 \text{ m.}$$

Tiempo de llenado

$$t_{LL} = 47 \text{ minutos.}$$

Tiempo de vaciado

$$t_v = 13 \text{ minutos.}$$

*Cálculo de Q_i^**

Partiendo de la relación de vaciado a llenado, $f = t_v / t_{LL} = 0.2766$ y considerando un valor inicial de 5 compuertas abiertas se tiene que $Q_c^* = 4.3$; y la ecuación recursiva;

$$Q_i^* = \sqrt{7.2306 Q_i^* + 7.2306 \ln(Q_i^* - 1) + 21.2344}$$

Con Q_c^* y la ecuación (3.22) se obtiene el valor $Q_i^* = 10.236$. Proponiendo este valor inicial en la ecuación recursiva anterior, que al resolverse, se tiene ;

$$Q_i^* = 4.958$$

Número de compuertas abiertas

$$n = \frac{(0.001)(4.958)}{0.0018072 \sqrt{0.9 (0.85 + 0.2 + 0.2125)}} = 2$$

*Revisión de Q_c^**

El gasto descargado por el grupo de compuertas abiertas al momento del cierre es ;

$$Q_s = (2 \text{ compuertas})(0.86 \text{ l/s}) = 172 \text{ l/s}$$

por lo que ;

$$Q_c^* = \frac{Q_s}{Q_e} = 1.72$$

diferente al propuesto ($Q_c^* = 4.3$).

Utilizando ahora $Q_c^* = 1.72$, que al sustituir en la ecuación (3.25),

$$Q_i^* = \sqrt{7.2306 Q_c^* + 7.2306 \ln(Q_c^* - 1) + 7.1029}$$

que al resolverla ;

$$Q_i^* = 8.104$$

Número de compuertas abiertas

$$n = \frac{(0.001)(8.104)}{0.0018072 \sqrt{0.9 (0.85 + 0.2 + 0.2125)}} = 4$$

*Revisión de Q_c^**

El gasto descargado por el grupo de compuertas abiertas al momento del cierre es ;

$$Q_s = (4 \text{ compuertas})(0.86 \text{ l/s}) = 3.44 \text{ l/s}$$

por tanto;

$$Q_c^* = \frac{Q_s}{Q_e} = 3.44$$

diferente al previamente calculado ($Q_c^* = 1.72$).

Utilizando ahora $Q_c^* = 3.44$, que al sustituir en la ecuación (2.25),

$$Q_i^* = \sqrt{7.2306 Q_c^* + 7.2306 \ln(Q_c^* - 1) + 19.489}$$

que al resolverla ;

$$Q_i^* = 5.852$$

Número de compuertas abiertas

$$n = \frac{(0.001)(5.852)}{0.0018072 \sqrt{0.9(0.85 + 0.2 + 0.2125)}} = 3$$

Revisión de Q_c^*

El gasto descargado por el grupo de compuertas abiertas al momento del cierre es ;

$$Q_s = (3 \text{ compuertas})(0.86 \text{ l/s}) = 2.58 \text{ l/s}$$

por tanto;

$$Q_c^* = \frac{Q_s}{Q_e} = 2.58$$

diferente al previamente calculado ($Q_c^* = 3.44$).

Utilizando ahora $Q_c^* = 2.58$, que al sustituir en la ecuación (3.25),

$$Q_i^* = \sqrt{7.2306 Q_i^* + 7.2306 \ln(Q_i^* - 1) + 15.306}$$

que al resolverla ;

$$Q_i^* = 6.864$$

Número de compuertas abiertas

$$n = \frac{(0.001)(6.864)}{0.0018072 \sqrt{0.9(0.85 + 0.2 + 0.2125)}} = 3$$

Revisión de Q_c^*

El gasto descargado por el grupo de compuertas abiertas al momento del cierre es;

$$Q_s = (3 \text{ compuertas})(0.86 \text{ l/s}) = 2.58 \text{ l/s}$$

por tanto;

$$Q_c^* = \frac{Q_s}{Q_e} = 2.58$$

igual al previamente calculado, y en consecuencia Q_i^* no se modificará, por lo que el número de compuertas abiertas para un tiempo de vaciado de 13 minutos es :

$$n = 3 \text{ compuertas}$$

Diámetro de la tubería.

$$D_{\text{tub}} = \left(\frac{8 (3 \text{ compuertas})(0.6)(0.02)(0.034)}{\pi \sqrt{\frac{1}{0.9} \left(1 - \frac{2.58^2}{6.864^2} \right)}} \right)^{1/2} = 0.06 \text{ m}$$

ajustando al diámetro comercial disponible

$$D_{\text{tub}} = 6''$$

y el gasto medio descargado por compuerta es ;

$$q_{\text{compuerta}} = \frac{\left(\frac{0.001}{3} \right) (6.864 - 2.58)}{\ln \left(\frac{6.864}{2.58} \right)} = 146 \text{ l/s}$$

3.7.8 Tablas para el diseño de los TDF.

Basados en la metodología descrita anteriormente se desarrolló un programa de cómputo.

Tanque de Descargas de Fondo

Archivo Edición Ayuda

Gasto alimentación

Qa (l/s)

Características del Tanque

At (m²)

Ha (m)

Hc (m)

Tubería de compuerta

Longitud (m)

Apertura (cm)

St (milésimas)

Ceros de campo

Tv (minutos)

q_{min} (l/s)

n	Q _o	Q _i	Q _c	Diám. cm
3 comp	1.46 l/s	6.864	2.583	6

CALCULAR

GASTO DESCARGADO POR LA COMPUERTA AL CERRAR EL SISTEMA (litros/segundo)

Con este programa se desarrollaron tablas de diseño (Tablas 3-10, 3-11) considerando como parámetros las características de las pilas (Area, Carga de apertura, Tirante de cierre), Gasto de aplicación, Número de compuertas y diámetro de la tubería de compuerta.

Se entra a tabla, con los datos de Q_e , h_a y t_v , se determina el número de compuertas por abrir, el diámetro mínimo de la tubería y el gasto medio descargado por compuerta.

3.7.9 Verificación en campo de las ecuaciones corregidas

Para verificar que las ecuaciones corregidas de diseño para los TDF determinan a partir del tiempo de vaciado el número de compuertas abiertas, se compararon los medidos en campo contra los obtenidos con las ecuaciones de diseño. La Tabla 3-9 muestra los datos de campo vs los del modelo para los TDF 2 y 3.

Tabla 3-9 Pruebas de vaciado del TDF (Datos de campo vs Modelo numérico)*

Parcela con :	TDF 2	TDF 2	TDF 3	TDF 3	TDF 3	TDF 3	TDF 3
Q_e , l/s	3	5	2	2	2	2	2
h_a , m	0.85	0.85	0.875	0.88	0.88	0.88	0.88
h_c , m	0.15	0.14	0.14	0.13	0.13	0.12	0.13
Ubicación compuertas, m	0	0	42	42	42	42	42
Q_{min} , l/s	1.12	1.3	0.91	0.90	0.95	0.88	0.86
t_v , min.	12	11	5:11	6:10	8:40	11:20	18:31
n_{campo}	9	12	16	12	8	6	4
$n_{teórico}$	10	11	15	12	8	6	4

Dzul y Trinidad, 1997.

Comparando los valores medidos en campo con el modelo teórico resulta ser el mismo o en su defecto hay una diferencia de una compuerta.

Para fines prácticos se acepta que la nueva metodología proporciona el número de compuertas abiertas para un tiempo de vaciado predeterminado.

Para el TDF 1 del Cuadro 3-10, con $Q_e = 1$ l/s, para una carga de abertura de 0.85 m con tiempo de vaciado de 13 minutos deben abrirse 5 compuertas a 2/4.5, con diámetro mínimo de la tubería de compuerta de 6 cm. Como el diámetro superior disponible en el mercado es de 6", este será el utilizado.

Tabla 3-10 Ayuda de diseño para el Tanque de Descargas de Fondo

Q = 1.00 lps A _t = 4 m ² Abertura de compuerta: 2/4.5					
h _A , m	t _{LL} minutos	t _v , minutos	n	d _{min} , cm	Q _{omed} lps
0.8	43	5	7	9	1.31
		10	4	7	1.38
		15	3	6	1.41
		20	2	5	1.51
0.85	47	5	7	9	1.40
		10	4	7	1.36
		15	3	6	1.33
		20	2	5	1.53
0.9	50	5	8	10	1.35
		10	4	7	1.42
		15	3	6	1.38
		20	2	5	1.65
0.95	53	5	8	10	1.37
		10	4	7	1.48
		15	3	6	1.44
		20	2	5	1.71
1.0	57	5	8	9	1.45
		10	5	8	1.37
		15	3	6	1.51
		20	2	5	1.57
1.1	63	5	9	10	1.42
		10	5	7	1.46
		15	3	6	1.61
		20	2	5	1.66
1.2	70	5	10	10	1.49
		10	5	7	1.47
		15	4	6	1.45
		20	3	6	1.42

* Carga sobre el codo de descarga del Tanque.

Tabla 3-11 Ayuda de diseño para el Tanque de Descargas de Fondo

Q = 2.00 lps A _t = 7.5 m ²					
Abertura de compuerta: 2/4.5					
h _A , m	t _{LL} minutos	t _v , minutos	n	d _{min} , cm	Q _{omed} lps
0.8	41	5	13	12	1.35
		10	7	9	1.39
		15	5	8	1.43
		20	4	7	1.47
0.85	44	5	14	13	1.34
		10	8	10	1.35
		15	6	8	1.34
		20	5	8	1.34
0.9	47	5	14	13	1.37
		10	8	10	1.36
		15	6	8	1.40
		20	5	7	1.39
0.95	50	5	15	13	1.38
		10	8	8	1.42
		15	6	8	1.38
		20	5	7	1.35
1.0	53	5	16	14	1.37
		10	9	10	1.38
		15	6	8	1.43
		20	5	8	1.40
1.1	59	5	17	14	1.41
		10	9	10	1.44
		15	7	9	1.41
		20	5	7	1.50
1.2	66	5	18	10	1.49
		10	10	7	1.47
		15	8	6	1.45
		20	8	6	1.42

* Carga sobre el codo de descarga del Tanque.

3.7.10. Diseño del riego

3.7.10.1 Riego de presiembra

Para el riego de presiembra se aplica una lámina de 6 cm.

Area regada por grupo. Conocido el número de compuertas por abrir, la separación entre estas y la longitud de los surcos por regar, se tiene:

$$A_r = n \cdot s_c \cdot L_s$$

$$A_r = 3 \cdot 0.75 \cdot 124 = 279 \text{ m}^2$$

Volumen neto aplicado. Es el área regada por set por la lámina aplicada :

$$V_{n_a} = A_r \cdot L_r$$

$$V_{n_a} = (279)(0.06) = 16.74 \text{ m}^3$$

Volumen bruto aplicado, es la relación del volumen neto por ciclo entre la eficiencia de aplicación.

$$V_{b_a} = \frac{V_{n_a}}{\eta}$$

La eficiencia de aplicación en el riego intermitente oscila entre 80 y 9% (Espiegel, 1987), siendo comparable a los sistemas presurizados. Por lo anterior considerando una eficiencia de aplicación del 80%.

$$V_{b_a} = \frac{16.74}{0.8} = 20.925 \text{ m}^3$$

Volumen descargado por ciclo. Es el volumen disponible por descarga mas el volumen de ingreso al tanque durante el vaciado, o sea;

$$V_{d_c} = A_t(h_a - h_c) + Q_e \cdot t_v$$

$$V_{d_c} = 2 \times 2 (0.85 - 0.15) + 0.001 (780) = 3.58 \text{ m}^3 / \text{ciclo}$$

Número de ciclos. Es la relación del volumen bruto aplicado entre el volumen descargado por ciclo.

$$N_c = \frac{V_{b_a}}{V_{d_c}}$$

$$N_c = \frac{20.925}{3.58} = 6 \text{ ciclos}$$

Tiempo de riego para el grupo de compuertas.

$$t_r = N_c(t_v + t_{LL})$$

$$t_r = 6(13 + 47) = 6 \text{ horas}$$

Grupos de compuertas.

$$G_c = \frac{L_c}{n \cdot s_c}$$

$$G_c = \frac{83}{(3)(0.75)} = 37 \text{ grupos}$$

Grupos regados por día

$$G_r = \frac{24}{t_r}$$

$$G_r = \frac{24}{6} = 4 \text{ grupos}$$

Tiempo de riego para la parcela

$$T_r = \frac{G_c}{G_r}$$

$$T_r = \frac{37}{4} = 9 \frac{1}{4} \text{ días}$$

3.7.10.2 Riego de auxilio

Para el riego de auxilio se aplica una lámina de 5 cm.

Volumen neto aplicado.

$$V_{n_a} = (279)(0.05) = 13.95 \text{ m}^3$$

Volumen bruto aplicado.

$$V_{b_a} = \frac{13.95}{0.8} = 17.4375 \text{ m}^3$$

Número de ciclos.

$$N_c = \frac{17.4375}{3.58} = 5 \text{ ciclos}$$

Tiempo de riego para el grupo de compuertas.

$$t_r = 5 (13 + 47) = 5 \text{ horas}$$

Grupos regados por día

$$G_r = \frac{24}{5} = 4 \text{ grupos}$$

Tiempo de riego para la parcela

$$T_r = \frac{37}{4} = 9 \frac{1}{4} \text{ días}$$

De forma análoga se diseñan los TDF2 y TDF 3, en resumen:

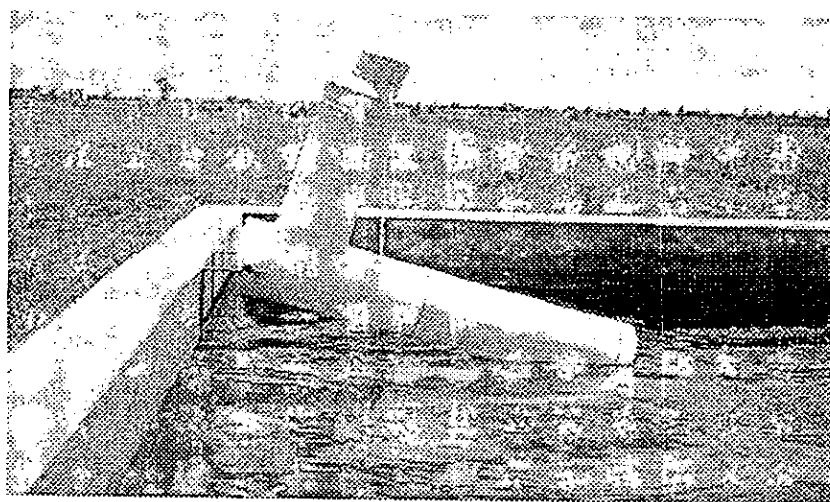
Parcela con TDF 1: gasto de ingreso de 1 l/s, 3 compuertas abiertas a 2/4.7 de su área. 37 grupos de compuertas. Riego de resiembra: 10 días, aplicación de 6 ciclos para cada grupo de compuertas. Riegos de auxilio: 10 días, aplicación de 5 ciclos para cada grupo de compuertas. Tubería de compuerta de 6" \varnothing .

Parcela con TDF 2: gasto de ingreso de 2 l/s, 7 compuertas abiertas a 2/4.7 de su área. 16 grupos de compuertas. Riego de resiembra: 5 días, aplicación de 7 ciclos para cada grupo de compuertas. Riegos de auxilio: 4 días, aplicación de 6 ciclos para cada grupo de compuertas. Tubería de compuerta de 6" \varnothing .

Parcela con TDF 3: gasto de ingreso de 3 l/s, 9 compuertas abiertas a 2/4.7 de su área. 13 grupos de compuertas. Riego de resiembra: 4 días, aplicación de 6 ciclos para cada grupo de compuertas. Riegos de auxilio: 4 días, aplicación de 5 ciclos para cada grupo de compuertas. Tubería de compuerta de 6" \varnothing .

3.7.11 Funcionamiento del sistema de apertura/cierre

En el ciclo primavera-verano 97 el sistema de apertura/cierre de PVC funcionó correctamente. Durante este período se descartaron las fallas de operación e imprevistos en el que fuera necesario hacer ajustes o reparaciones menores.



Fotografía 3-5 Operación del TDF con sistema de apertura de PVC

3.7.12 No de ciclos para aplicar la lámina de riego

De acuerdo con el plan de riegos con base a la simulación numérica del riego intermitente se dieron los ciclos necesarios para aplicar la lámina requerida. En

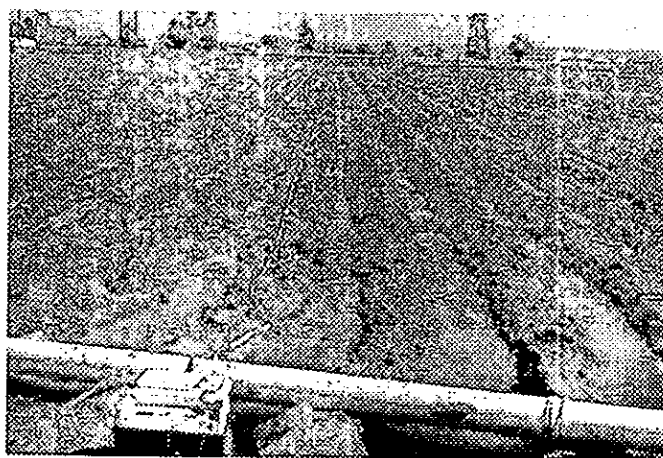
general, el frente de onda llega al final del surco en el ciclo penúltimo o antepenúltimo, esto por variaciones locales del suelo. Los ciclos restantes se aplican para uniformizar el riego al final del surco.

3.7.13 Obtención de las curvas de avance y recesión.

Para validar el equipo de avance y recesión, en los riegos de presiembra y auxilio se realizaron mediciones del avance del flujo en el surco, tanto con el equipo electrónico y con personal de campo. (Dzul, Trinidad y Elías, 1997).

3.7.14 Determinación de la distribución de la humedad en la zona radicular

Se estuvo monitoreando la humedad en las parcelas (cada tercer día) antes y durante el riego con el equipo electrónico (Medidor de humedad) y obteniendo muestras de suelo para calibrar el medidor de humedad.



Fotografía 3- 6 Equipo de Avance y Recesión en parcela regada con TDF

3.7.15 Perdidas por coleos

Como el gasto vertido al final del ciclo es menor comparado al iniciar la descarga, similar al *método de corte atrás*, las pérdidas por coleos fueron mínimas. Se presentó solo en los surcos compactados por el tractor donde se realizaron labores de escarda o fumigación.

3.7.16 Requerimientos de mano de obra

Durante la preparación del sistema para aplicar el riego (preparación de los surcos y el tendido de la tubería de compuerta) se requieren de dos regadores durante un día. Durante la operación sólo se requiere de una persona que haga el cambio de las compuertas al inicio y al final del riego de cada grupo de compuertas. Esta es una de las grandes ventajas que presenta el TDF para aplicar riegos nocturnos.



Fotografía 3- 7 Cambio del grupo de compuertas por regar

3.7.17 Rendimiento del cultivo en riego intermitente.

El riego intermitente no mejora el rendimiento en producción respecto al riego continuo. En la Fotografía 3-8, se muestra el desarrollo del maíz para riego continuo (izquierda) y para riego intermitente (derecha). El lograr ahorros de agua, trae como consecuencia mejorar el rendimiento potencial de la cosecha.



Fotografía 3- 8 Parcelas regadas en forma tradicional y con TDF

3.7.18 Producción obtenida

La producción para el ciclo primavera-verano 94 fue de 5 ton/Ha de maíz en grano, en el ciclo primavera-verano 95 de 55 ton/Ha en silo, en otoño-invierno 95 de 180 pacas/Ha de avena y en el ciclo primavera-verano 96 de 95 ton/Ha de sorgo en silo (Trinidad, 1994, 1995, 1996).

3.8 Variantes del TDF

3.8.1 TDF portátil

Con fines demostrativos la UAZ diseñó y construyó un tanque portátil provisto de llantas, con un sistema retráctil de suspensión. Con este sistema se han realizado demostraciones a productores de los estados de Guanajuato y Chihuahua.

3.8.2 TDF en huertos familiares

Aprovechando los pequeños caudales en zonas urbanas se ha desarrollado el TDF para huertos familiares con un tanque de fierro de 200 l de capacidad, dos tramos de 4" de diámetro de PVC con perforaciones, es posible regar pequeños huertos, tal como se ha implementado en forma masiva en El Carrizo en Sinaloa. De esta forma una familia puede cubrir sus necesidades alimenticias con una inversión mínima. A continuación se listan los materiales y el procedimiento constructivo de un TDF para huertos familiares.

Tabla 3-12 *Materiales del Tanque*

MATERIAL	COSTO
1 Tanque de 200 l litros con tapa y cincho metálico.	\$ 150.00
1 Sapo para WC.	\$ 10.00
1 Base para sapo de WC	\$ 18.00
1 Codo de 90° de 2" (rosca interior).	\$ 25.00
1 Adaptador campana de 2" de rosca exterior de PVC	\$ 10.00
1.0 m de tubo de PVC de ½".	\$ 10.00
1.1 m de hilo.	\$ 2.00
Subtotal	\$ 225.00

Tabla 3-13 *Materiales de la Tubería de orificios.*

MATERIAL	COSTO
2 Tramos de PVC de 2"	\$ 60.00
1 Tapón de PVC de 2"	\$ 10.00
Subtotal	\$ 70.00

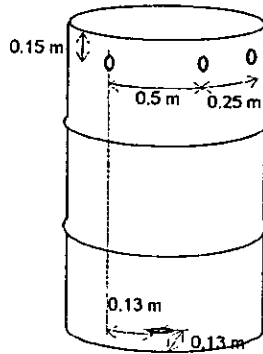
Tabla 3-14 *Materiales de la base para el Tanque*

MATERIAL	COSTO
1 Cruz de PVC de 4" (sanitario)	\$ 20.00
4 Tee de PVC de 4"	\$ 48.00
0.4 m de tubo de PVC de 4" (sanitario)	\$ 8.00
Subtotal	\$ 76.00

Tabla 3-15 *Materiales del Flotador*

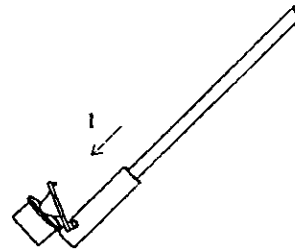
MATERIAL	COSTO
1 Ye de PVC de 4" (sanitario)	\$ 12.00
3 Tapones de PVC de 4" (sanitario)	\$ 24.00
0.3 m de PVC de 4" (sanitario)	\$ 7.00
Subtotal	\$ 43.00
TOTAL	\$ 414.00

A) ORIFICIOS EN TANQUE



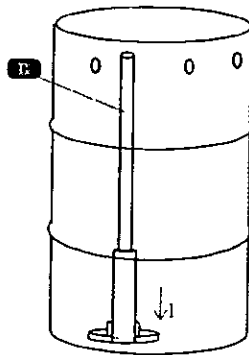
1. Hacer 3 orificios de 1" de diámetro, afinar con escofina.
2. Hacer 1 orificio de 2" de diámetro, en el fondo.

E) BASE SAPO CON TUBO RESPIRACION



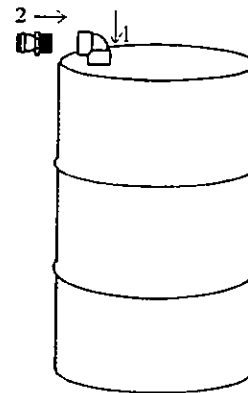
1. Pegar tubo de PVC de 1" y 0.5 m con la base del sapo.

C) BASE DE SAPO EN TANQUE



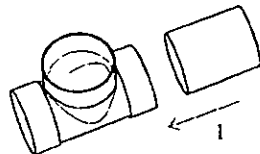
1. Pegar la base del sapo en tanque. La base y el tubo deben estar cerca de la pared del tanque...

D) CODO Y COPLÉ EN TANQUE



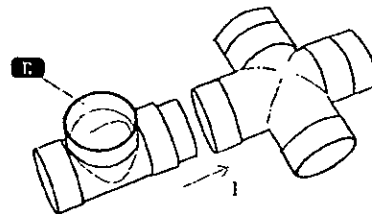
1. Pegar la base del sapo con el codo de 2".
2. Atornillar el adaptador campana de 2" con el codo (no pegar)

E) BASE PARA TANQUE



1. Pegar tubo de 0.1 m y 4" con la Tc (4 veces).

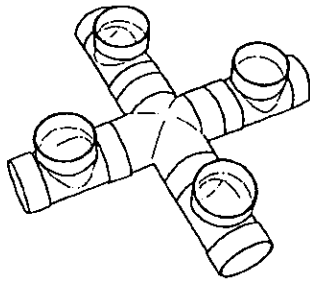
F) BASE PARA TANQUE



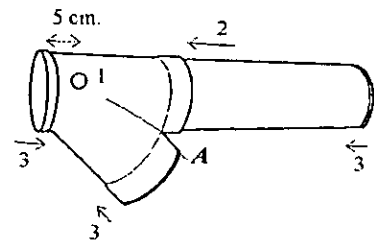
1. Pegar E en la cruz de 4" (4 veces).

Figura 3-11 Construcción del TDF para huertos familiares.

G BASE PARA TANQUE

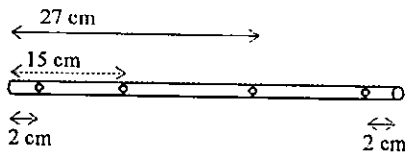


H FLOTADOR



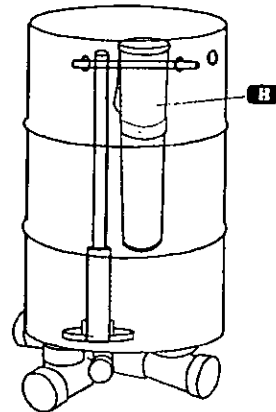
1. Hacer perforación de 1" de diámetro en Ye.
2. Pegar tubo de PVC de 0.3 m en Ye de 4".
3. Pegar tapones en los extremos abiertos del flotador.

I PERFORACIONES EN SOPORTE



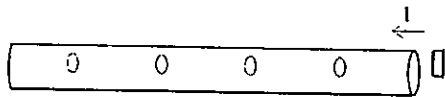
1. Perforaciones en tubo de 0.5 m y 1/4" con broca de 5/16" para fijar el bastón.

J FIJAR FLOTADOR EN EL TANQUE



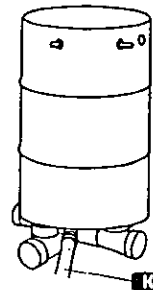
1. Colocar el flotador en el soporte. Colocar seguros para fijarlo
2. Se amarra hilo entre el sapo y el bastón alrededor del punto A. El hilo debe tener una longitud libre de 0.7 m.

K TUBERIA DE ORIFICIOS



1. Pegar el tapón en el tramo de 2".
2. Hacer perforaciones de 3/4" a cada 0.75 m.

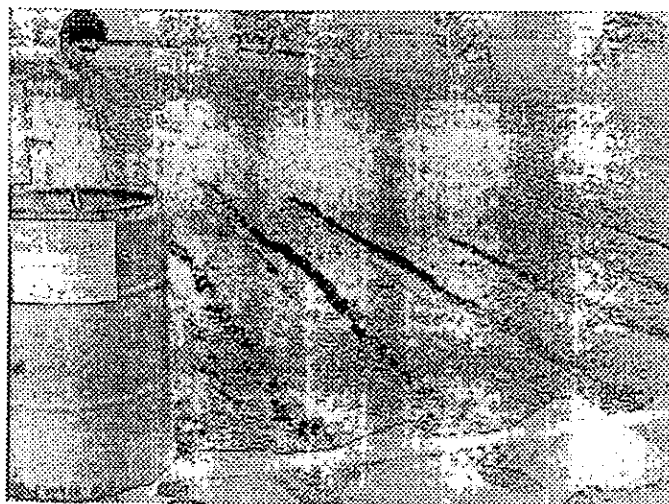
L TUBERIA DE ORIFICIOS EN TANQUE



1. Se coloca la tubería de orificios en la salida del tanque.

Figura 3- 11 Construcción del TDF para huertos familiares. (continuación)

Roscado de las piezas. Antes de ensamblar las piezas, se aplica el cemento sobre la rosca para garantizar el sellado. Se aprieta $\frac{1}{2}$ o 1 vuelta más. En la Figura 2-14 se muestra la secuencia de ensamblado de las piezas. En las ilustraciones se han omitido, por claridad, algunos detalles de las piezas.



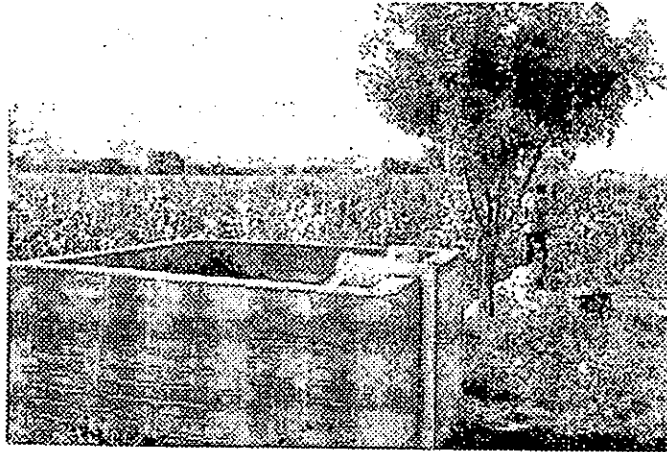
Fotografía 3-9 TDF para huertos familiares.

3.9 Transferencia del TDF a parcelas productivas

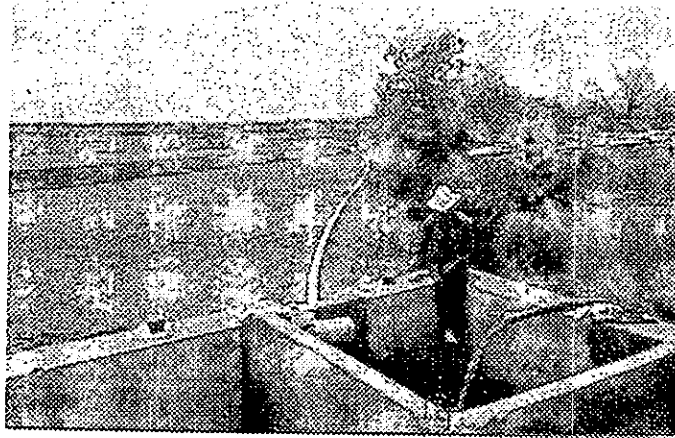
En 1997 con apoyo del CONACYT se inició la transferencia del TDF a agricultores del estado de Zacatecas (Barrios, et al, 1996), se instalaron 18 parcelas productivas en 8 municipios del semidesierto. Los resultados preliminares son muy alentadores, entre los más importantes son: gran aceptación entre los agricultores beneficiados, aprovechamiento de la poca agua disponible, ahorros substanciales en combustible o energía eléctrica, incremento en la producción potencial de los cultivos, requerimiento mínimo de mano de y el aumento del nivel de vida de los usuarios. Se muestran algunos de los sistemas implementados.



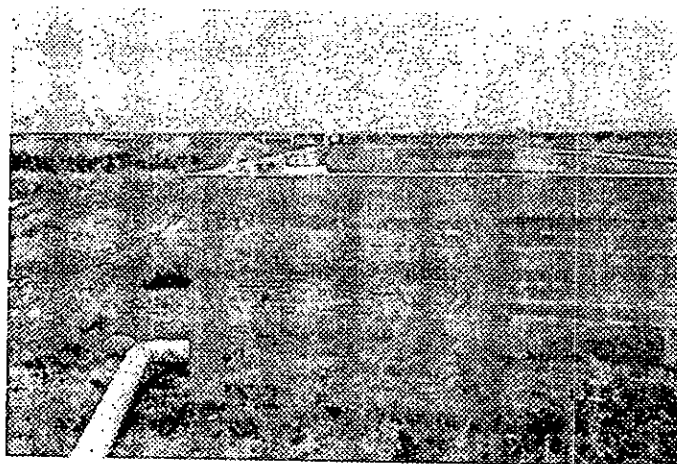
Fotografía 3-10 El Duraznillo, Pánuco, Zac.



Fotografía 3- 11 *San Gerónimo, Guadalupe, Zac.*



Fotografía 3- 12 *El Duraznillo, Pánuco, Zac.*



Fotografía 3- 13 *Calera, Zacatecas*



Fotografía 3- 14 *Noria de Angeles, Zac.*



Fotografía 3- 15 *Calera, Zac.*

Además, se ha transferido a agricultores de Guanajuato, Michoacán, Coahuila, Morelos y Sinaloa. En el extranjero (Cuba) se está implementando este sistema de riego.

Con estas transferencias se espera mostrar las ventajas del riego intermitente y sobre todo disponer de una alternativa para incrementar la producción de alimentos en las zonas más pobres del país.



Fotografía 3- 16 TDF en el semidesierto zacatecano.

3.10 Ventajas del TDF

- Es un sistema automatizado que aprovecha eficientemente los caudales pequeños para riego (0.05 a 10 l/s) en el semidesierto.
- No requiere de energía externa ni sistemas electrónicos de control para generar las descargas intermitentes, ya que la apertura y cierre del sistema funciona bajo el principio de flotación.
- Permite la aplicación de riegos ligeros y frecuentes con una alta eficiencia. Riegos ligeros para completar la lámina de riego cuando existen pequeñas precipitaciones y así poder aprovecharlas.
- El tiempo de riego con el TDF es 25% menor respecto al riego tradicional por gravedad, por lo que se reducen la cantidad de agua bombeada y los requerimientos de energía.
- Es posible aplicar los fertilizantes en un ciclo determinado previniendo el lavado o ensalitramiento de la parcela.
- Durante el riego no se requiere de personal que opere el sistema.
- Los usuarios no requieren capacitación previa.
- Es de sencilla operación y mantenimiento prácticamente nulo.
- Evita la dependencia tecnológica.

Se puede decir que este sistema de riego prácticamente no presenta desventajas, por el costo de inversión inicial, asociado a la tubería de compuertas, podría decirse que este sería el principal inconveniente.

ESTE LIBRO NO DEBE
SALIR DE LA BIBLIOTECA

VÁLVULA ELECTROMECAÁNICA PARA RIEGO INTERMITENTE

La primera válvula de riego intermitente fue desarrollada en la Universidad de Utah; inicialmente se usaban dos válvulas individuales de diafragma conectados a una Tee que se operaban alternadamente por controladores diseñados por los mismos investigadores.

El diseño más práctico y sofisticado de las válvulas evolucionó rápidamente modificando el sistema original, uniéndolas en una sola unidad desarrollando una válvula tipo Tee simplificada con un disco giratorio que asienta en contra del lado a ser cerrado, este modelo popularizó la aplicación del agua de riego por intermitencias.

La primera válvula de pulsos y el primer controlador comercial fueron fabricados y puestos en el mercado por la empresa Hasting Irrigation Company de Hasting, Nebraska.

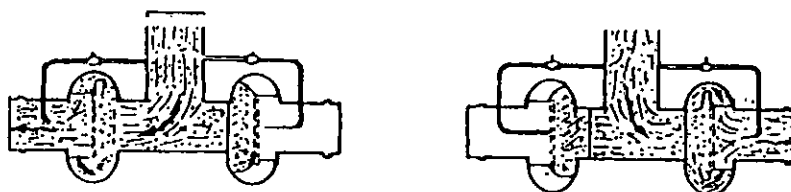
Hoy en día se comercializan dos tipos de válvulas de flujo para riego intermitente :

Válvulas de membrana operadas hidráulicamente.

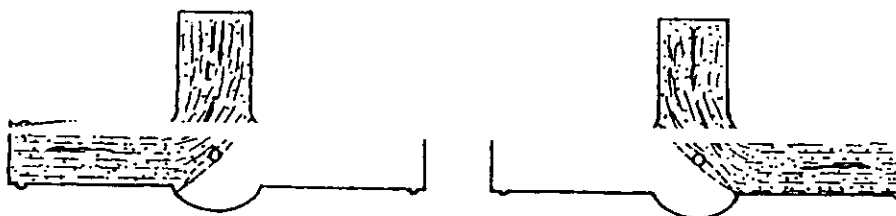
Válvulas mecánicas tipo mariposa.

La válvula de membrana es operada por la presión hidráulica de la línea de conducción. El controlador o regulador alterna la presión a cada membrana dentro de la válvula. Cuando una membrana está sujeta a la presión del agua, se expande y corta el paso del agua hacia ese lado ; la otra, estando expuesta a la atmósfera se desinfla, permitiendo el paso del agua a través de ese lado.

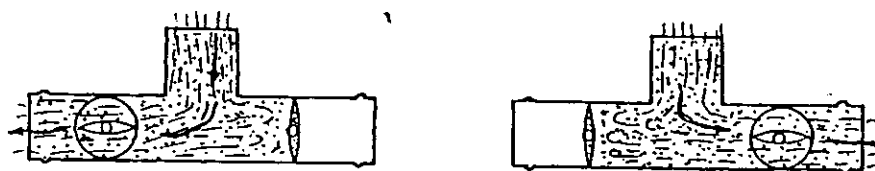
Las válvulas mecánicas tipo mariposa presentan varias configuraciones, las hay de uno o dos discos, mismos que cambian el paso del agua hacia la derecha o izquierda. Estas válvulas se unen a un controlador programable a través de engranes.



VALVULA DE VEJIGA



VALVULA MECANICA DE MARIPOSA



VALVULA MECANICA DE DOBLE MARIPOSA

Figura 4-1 Válvulas comerciales para riego intermitente.

4.1 Controladores

La mayoría de los controladores son electrónicos, permitiendo generar diferentes tiempos de riego. Actualmente existen controladores con la capacidad de utilizar tiempos de operación variables. En estos, sólo se coloca el tiempo de avance total y automáticamente el controlador genera el número y la duración de los ciclos para cada lado de la válvula. Una vez que se completa el número de ciclos, el controlador reduce la duración del último ciclo manteniendo constante este tiempo hasta finalizar el riego. Normalmente los controladores son operados por baterías convencionales o celdas solares ambos con una batería recargable. Los controladores están protegidos contra humedad y polvo.

Actualmente los controladores disponen de muy poca información para dar el riego intermitente, por ejemplo las válvulas comercializadas por la compañía "P&R Surge System" realizan la descarga de acuerdo con la información del tiempo en que el frente de onda alcanza el final del surco en riego continuo. Con esta información el microcontrolador selecciona los tiempos de descarga durante cada ciclo y posteriormente el tiempo de remojo para dar el riego. Esta programación presenta varios inconvenientes, el número de ciclos para alcanzar el final del surco está previamente definido y no especifica el número de ciclos para aplicar la lámina de riego.

En el país por el costo de inversión inicial (mayor a 1000 dólares) y de mantenimiento, las válvulas importadas son poco utilizadas, además, cuando la válvula presenta fallas de operación y se requieren reparaciones de ella es necesario traer técnicos de Estados Unidos o mandarla a dicho país, esto incrementa en gran medida los costos y crea dependencia tecnológica. Otra características de estas válvulas es que en su mayoría están energizadas por medio de celdas solares y su vida útil de 5 a 7 años, por lo que transcurrido este tiempo es necesario sustituir las celdas o adquirir una nueva válvula.

Considerando las características de las válvulas comerciales y su operación a través de recetas de riego, el IMTA y la UAZ en convenio desarrollaron una válvula electromecánica para riego intermitente que opera confiablemente a través de un programa el cual contiene los criterios de operación del riego intermitente considerando las características propias de las parcelas.

Esta característica es importante en la válvula desarrollada, la posibilidad de almacenar en la memoria del microcontrolador las variables para el diseño del riego (Tipo de suelo, Parámetros de infiltración, características de la parcela, tipo de cultivo, etc.). Con esta información el controlador de la válvula diseñaría el riego (la duración del ciclo, el número de ciclos para aplicar la lámina requerida y el número de compuertas por abrir).

A continuación se describe el diseño, construcción y validación en campo de una válvula electromecánica para riego intermitente, esta es programable, de fácil operación y bajo costo.

4.2 Bases de diseño

El sistema esta formado por dos subsistemas que interactúan entre sí (Aguilar 1994, Elías 1994) y que son:

Subsistema mecánico el cual forma la estructura de la válvula.

Subsistema electrónico que regula las funciones de control y programación.

Los requisitos que debe cubrir la válvula en su mecánica y electrónica son:

SUBSISTEMA MECANICO

- a) debe ser capaz de soportar presiones hasta de 20 metros de columna de agua.
- b) debe direccionar el flujo en dos sentidos, izquierda, derecha y centro para dividir el flujo en ambos sentidos.
- c) no debe tener fugas hacia el exterior
- d) su peso debe ser reducido para facilitar su transporte.
- e) que permita la adaptación de un sistema de motorización para generar los movimientos requeridos sin intervención del operario.

SUBSISTEMA ELECTRONICO

- f) debe operar en forma manual o en modo programa.
- g) en modo de operación manual, debe la mariposa colocarse en las posiciones

Izquierda

Centro

Derecha

- h) en modo programa, debe contar con las siguientes funciones:

- fecha y hora de inicio del riego.
- posición inicial en el riego.
- número de ciclos en el riego.
- tiempo de cada ciclo en minutos.
- tiempo de remojo en minutos.

- i) debe operar en forma automática para evitar el uso de personal durante su funcionamiento.
- j) el equipo debe disponer de un suministro propio de energía.
- k) debe ser de fácil operación para el usuario.
- l) debe ser lo mas estándar posible, de vanguardia y de bajo costo
- m) debe contar con indicadores que muestren la posición de la mariposa.

4.2.1 Método de solución

Debe ser capaz de soportar presiones hasta de 20 metros de columna de agua. Se utiliza tubo de PVC hidráulico de 6" de diámetro (espesor de 8 mm) el cual soporta hasta 70 mca.

Debe direccionar el flujo en dos sentidos, izquierda, derecha y centro para dividir el flujo en ambos sentidos. El arreglo ideal es una válvula de mariposa que desvíe el flujo en dos direcciones. La válvula en forma de "T" se adapta al riego en tubería de compuerta, la Tee se forma uniendo tres tubos cortos a un cilindro central, en este se aloja la mariposa. La dirección del flujo se logra girando la mariposa hacia la salida deseada.

No debe tener fugas hacia el exterior ni en el interior. Para descartar las fugas en los tubos cortos se unen con soldadura en caliente. En la parte superior e inferior del cilindro es necesario instalar dos tapas con ranuras periféricas y sellos. Para fijar las tapas al

cilindro central se utilizan tirantes para compensar la presión hidrostática a que están sometidas las tapas. Para eliminar las fugas en el interior la mariposa debe contar con un sello flexible.

Su peso debe ser reducido para facilitar su transporte. El material de PVC es ligero y resistente a golpes, la mariposa y la motorización deben ser ligeras y de tamaño reducido.

Permita la adaptación de un sistema de motorización para generar los movimientos requeridos sin intervención del operario. Para cumplir el inciso d) la motorización debe ser la más pequeña que se disponga, pero debe garantizarse que tenga la suficiente potencia para generar el movimiento de la mariposa.

El mecanismo para girar la compuerta está compuesto por un motor eléctrico que está conectado mecánicamente a una flecha y este a un sistema de reducción que disminuye la velocidad de giro pero aumenta el par de arranque; con este arreglo mecánico se tiene la suficiente fuerza y velocidad de giro para mover la compuerta.

Para que el sistema electrónico identifique las posiciones de la válvula, el sistema mecánico debe contar con tres interruptores que se activen por contacto de una paleta de lámina fija en el engrane principal. Cada interruptor se colocan de tal forma que se activan de acuerdo a la posición de la compuerta. Estas posiciones se determinan de acuerdo al sentido del flujo, si se riega a la derecha debe activarse el interruptor correspondiente, así para la izquierda, y el tercer interruptor para cuando se descarga hacia ambos lados. Con estos interruptores, el microcontrolador identifica en que momento ha girado la válvula a la posición deseada y detener el motor que la mueve.

Debe operar en forma automática para evitar el uso de personal durante su funcionamiento. Para que el equipo ejecute todas las funciones para que fue diseñado en forma automática (control de la mariposa, operación del sistema, etc.), debe disponer de un controlador programable. El que se utiliza es el microcontrolador MC68HC11E2.

Las funciones que realiza la válvula se definen en el programa, este controla los tiempos y posiciones de la válvula durante el riego. Para tener una referencia de la posición de la válvula cada vez que se activa el equipo, la mariposa gira hacia el lado derecho.

El equipo debe disponer de un suministro propio de energía. El equipo electrónico será alimentado por una batería de efecto electrólisis (batería automovilística) de 12 Volts c.d. y 40 Amper/hora.

Debe ser de fácil operación para el usuario. El equipo dispondrá de un teclado (el operador puede introducir la fecha, hora y las condiciones de operación del equipo) y

una pantalla, display, facilitando el intercambio de la información entre el equipo y el operador.

La pantalla utilizada es de Cristal Líquido (LCD) activado por frecuencia de 4 1/2 dígitos, con siete segmentos cada uno.

Debe contar con indicadores que muestren la posición de la mariposa. Para indicar la posición de la mariposa, se utilizan 3 diodos emisores de luz (LEDS) uno para cada posición, encendiéndose el correspondiente según la posición derecha, centro o izquierda.

Debe ser lo mas estándar posible, de vanguardia y de bajo costo. Para facilitar su diseño y fabricación se divide en módulos. Esto presenta varias ventajas, facilita la fabricación, y actualización del sistema, abatiendo los costos.

4.2.2 Diseño mecánico

Considerando las características descritas anteriormente se muestran los principales componentes de la válvula.

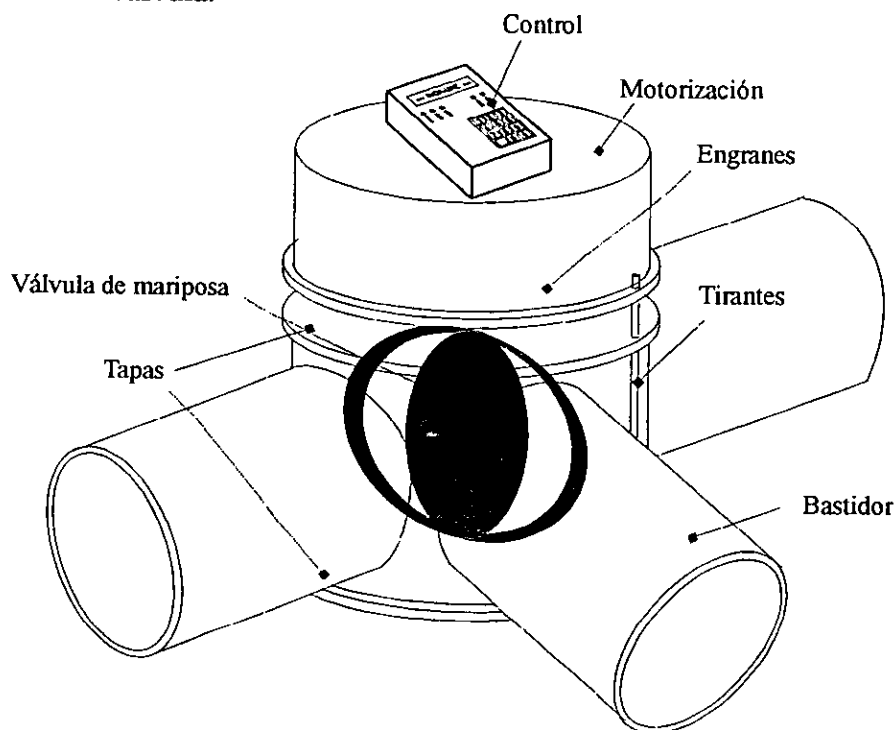


Figura 4-2 Características de la válvula electromecánica.

4.2.3 Diseño de la mariposa

La mariposa está formada por dos paletas de acero soldadas a un eje, en su periferia tiene adheridos sellos de hule (similar al de las puertas de los automóviles) para eliminar las fugas en el interior.

4.2.4 Diseño de la motorización

Por no disponer en el mercado de una gran variedad de motores se seleccionó un motor con las siguientes características :

$$E = 6 \text{ volts}$$

$$I_v = 40 \text{ mA en vacío}$$

$$I_c = 200 \text{ mA con carga}$$

$$n = 7000 \text{ rpm con carga}$$

La diferencia de corrientes es de 160 mA, por tanto, la potencia bajo carga es :

$$P = (I_c - I_v)E = (0.02 - 0.04)6 = 0.96 \text{ W}$$

La torsión a la salida es ;

$$T_s = \frac{60 \pi P}{2n} = \frac{60 \pi 0.96}{2 \cdot 7000} = 0.0013 \text{ N-m}$$

En pruebas realizadas con los sellos instalados en la mariposa, se encontró que la torsión requerida para girar la mariposa bajo carga es de 15 Kg en 10 cm,

$$T_n = 15(0.1) = 1.5 \text{ kg-m} = 15 \text{ N-m}$$

igualando la torsión de la mariposa con la torsión del motor con un factor de proporcionalidad (K_r), el factor de reducción es ;

$$K_r = \frac{T_n}{T_s} = \frac{15}{0.0013} = 11538$$

Los reductores del motor es $K_1 = 40$ y $K_2 = 60$. El factor de reducción es ;

$$K = 40 \cdot 60 = 2400$$

entonces es necesaria una reducción extra es ;

$$K_{\text{extra}} = \frac{K_r}{K} = \frac{11538}{2400} = 4.8$$

esta reducción se provee por dos engranes que conectan la motorización con el eje de la mariposa, el factor de reducción es de 5 por lo que la reducción total es 12000. Las revoluciones en el eje de la mariposa son :

$$n_{\text{mariposa}} = \frac{n}{K_r} = \frac{7000}{12000} = 0.583 \text{ rpm}$$

equivalente a 209 grados por minuto

El giro de la mariposa es de 90 grados para cambiar el sentido del flujo, el tiempo para realizarlo es; $t=90/209 = 0.43$ minutos = 26 segundos. Este tiempo de giro de la válvula parecería excesivo para realizar el cambio, pero como los tiempos de riegos son del orden de horas es válido despreciar este tiempo. Este tiempo de cambio es benéfico para el sistema, ya que el cambio del flujo es gradual y suave, y, por tanto, reduciendo las sobrepresiones a los elementos mecánicos.

4.2.5 Diseño electrónico

Aprovechando la experiencia obtenida al desarrollar el Medidor de Humedad y el Equipo de Avance y Recesión, los módulos de la Válvula son similares con pequeñas variantes (Elías, 1994):

- Fuente de energía
- Microcontrolador
- Control de puertos
- Fuente de sensores
- Control de energía

Se describen a continuación las características principales de los módulos.

4.2.5.1 Fuente de energía

Su función principal es proporcionar los voltajes adecuados que requieren los diversos componentes electrónicos para su funcionamiento.

La fuente de energía principal es una batería automotriz de 12 V c.d. a 40 Amperes/hora.

4.2.5.2 Microcontrolador

Es el módulo que controla el funcionamiento electrónico de la válvula. El modulo seleccionado es el microcontrolador MC68HC11E2 para que sea la unidad de proceso central. Este dispositivo contiene el programa que electrónicamente controla el funcionamiento de los módulos, el teclado, la pantalla, y el control de la mariposa. En el Anexo C se describen las características del MC68HC11E2.

4.2.5.3 Control de puertos

Este módulo direcciona el envío y recepción de datos entre el microcontrolador el teclado, monitor y los sensores.

4.2.5.4 Control de sensores

Este módulo controla la posición de la mariposa. Se instalaron tres interruptores para las posiciones correspondientes. Estos son activados por el movimiento del engrane principal del sistema mecánico, enviando la información al microcontrolador para que

ejecute las decisiones programadas. La posición de los interruptores indica al microcontrolador la posición de la mariposa y en consecuencia el sentido del flujo.

4.2.5.5 Control de energía

Por criterios mecánicos se determinó utilizar un motor de corriente continua que invierta su polaridad para que la mariposa gire de izquierda a derecha y viceversa, por medio de relevadores, que son controlados por el microcontrolador.

4.2.6 Programación del microcontrolador

Para que la válvula opere en forma automática, es necesario programar al microcontrolador. A continuación se describen las funciones que ejecuta.

1. Las funciones principales consideradas que debe realizar el sistema son:
 - presentar en la pantalla las siglas de las instituciones que contribuyeron en la realización del mismo.
 - presentar en la pantalla los datos introducidos correspondientes a la válvula.
 - al presionar cada tecla, se presente en la pantalla el numero correspondiente.
 - en caso de introducir un dato incorrecto, sea posible corregirlos.
 - se muestre en la pantalla el estado de operación de la válvula.
2. Considerando los requerimientos anteriores se desarrolla el diagrama de flujo lógico de operación de la válvula.
3. Se edita el diagrama de flujo en un lenguaje de programación (ensamblador).
4. Una vez editado el programa, se codifica a código máquina, en formato hexadecimal.
5. Se transfiere el programa desde la computadora al puerto serial de la tarjeta EVBU, por medio de un cable DB25, almacenándose en la memoria EEPROM del circuito. Una vez almacenado el programa en el microcontrolador, este se ejecuta cada vez que el equipo es encendido.

En caso de que se presenten errores de ejecución del programa debe repetirse el procedimiento descrito previamente desde el paso 1.

4.2.7 Descripción del sistema

Un diagrama que describe las características del sistema se muestra en la figura 4-3:

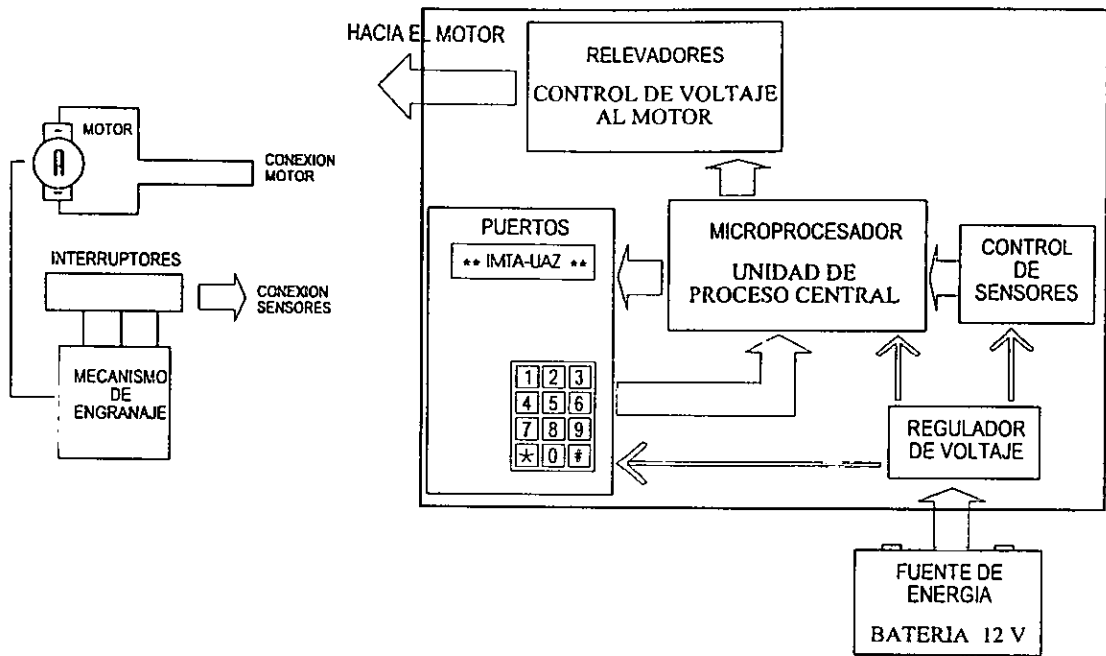
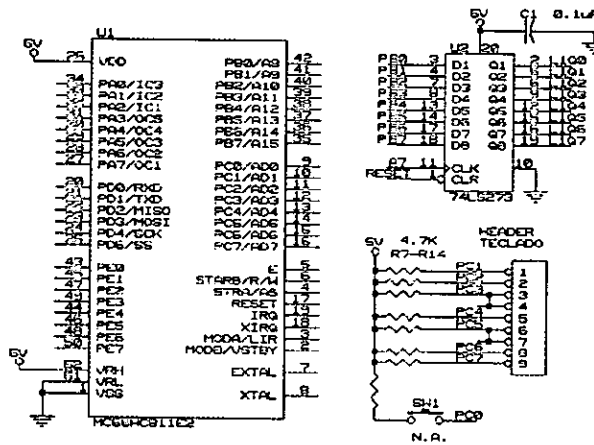


Figura 4-3 Módulos de la válvula electromecánica.

El diagrama del circuito eléctrico y el sistema de control se muestran en la figura 4-4 :



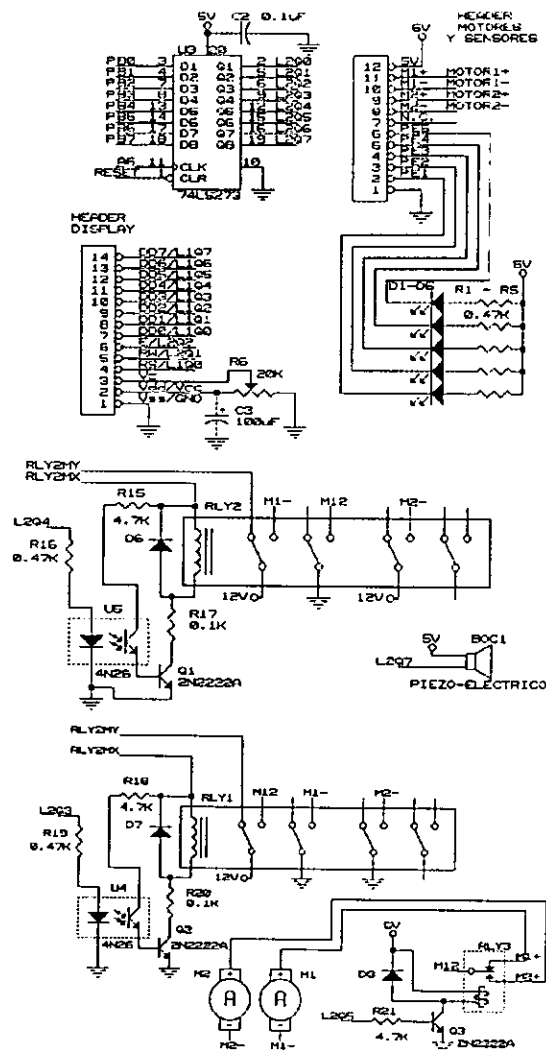


Figura 4-4 Diagrama eléctrico del sistema de control de la válvula.

4.2.8 Fabricación

Con las especificaciones anteriores se fabricó el equipo electrónico y mecánico de la válvula.

4.3 Funcionamiento

Los pasos fundamentales para mostrar el funcionamiento del equipo son:

- 1.- Instalación.
- 2.- Activación del equipo.
- 3.- MODO DE OPERACION

Modo manual

Modo automático.

Se describen a continuación la secuencia de operación de la válvula electromecánica :

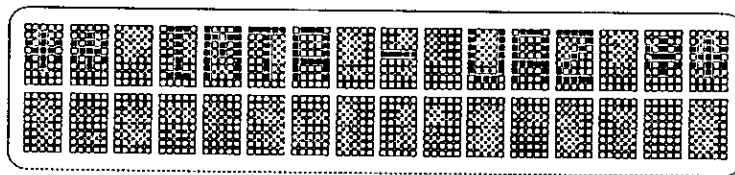
4.3.1 Instalación.

Consiste en conectar la válvula a la tubería de alimentación y a la tubería de compuerta en ambos extremos. Una vez instalado, se conecta la batería a la válvula.

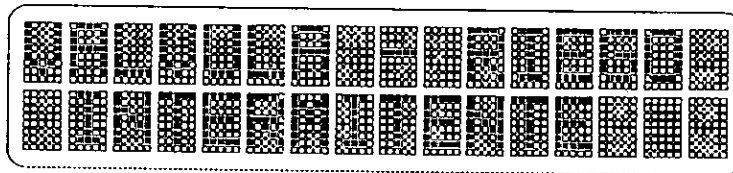
4.3.2 Activación del equipo.

Una vez conectado la batería, el control electrónico posiciona la compuerta de la válvula para que el agua descargue a la derecha, esto para que el microcontrolador tenga una referencia de la posición de la compuerta. Una vez que la compuerta está en posición, se enciende la luz indicadora de esa posición.

Mientras esto ocurre, en la pantalla aparecen las siglas de las instituciones que participaron en el desarrollo de la válvula.



Este letrero permanece durante 5 segundos, para mientras el microcontrolador evalúa el sistema electrónico. Posteriormente se presenta el letrero :

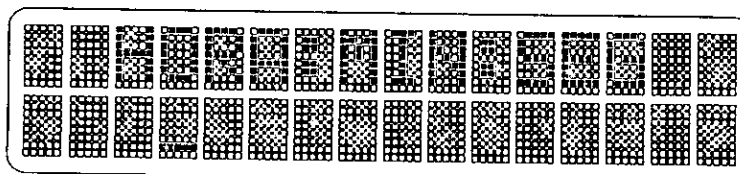


Después de esto aparece el mensaje para introducir los datos de la fecha,

Por medio del teclado se introducen los datos correspondientes. El formato es 01-31 : 01-12 : 0-99. En caso de introducir un dato fuera de formato, se presentará un error acompañado de una señal auditiva.

En caso de error al teclear los datos, se pueden introducir nuevamente presionando la tecla de cancelación (*). Si los datos son correctos se oprime la tecla de aceptación (#).

Una vez aceptado los datos para la fecha, se indican los datos para la hora.

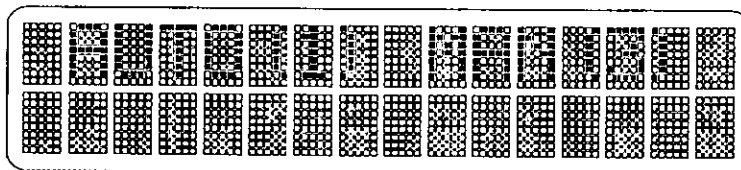


para introducir los datos se sigue un procedimiento similar para la fecha. El formato es 00-23 : 00-59 : 00-59.

Una vez presionado la tecla de aceptación para la hora el equipo listo para programarse para el modo automático o trabajarse en forma manual.

4.3.2.1 Modo de operación

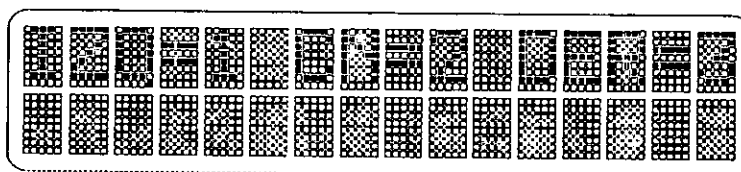
Una vez introducido los datos aparece el mensaje:



Se indica el modo de operación, se debe oprimir la tecla con el numero 1 para la operación en forma automática, y la 3 para operación en forma manual.

4.3.2.1.1 Operación manual.

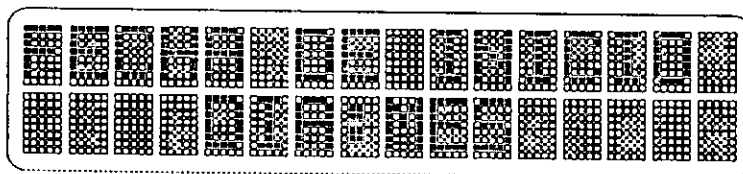
Una vez seleccionado el modo de operación manual, el mensaje siguiente que aparece es:



Se selecciona la posición que se desee regar. El 1 para la izquierda, el 3 para la derecha, y el 2 para ambos lados. Al presionar la tecla seleccionada, la compuerta se moverá a la posición correspondiente, y una vez llegado a esa posición, se enciende el LED correspondiente el indicando la posición. Se presenta nuevamente el mensaje que permite seleccionar el modo de operación. Para hacer otro cambio en operación manual, se repite el procedimiento anterior.

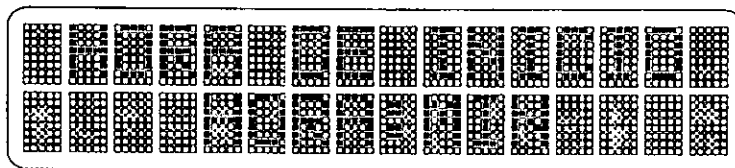
4.3.2.1 Operación modo automático.

Seleccionado el modo de operación automático, el usuario debe programar la fecha y hora de inicio del riego, el numero y duración de los ciclos de riego.

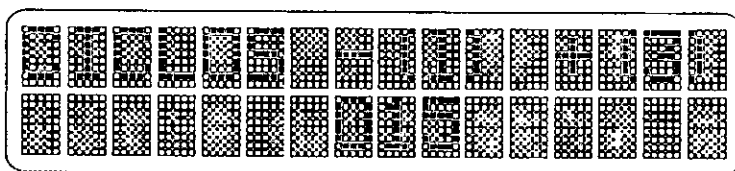


Se debe introducir los datos del día y mes en que desea iniciar el riego, seguido de la tecla aceptar. En caso de iniciar el riego inmediatamente solo se oprime la tecla aceptar.

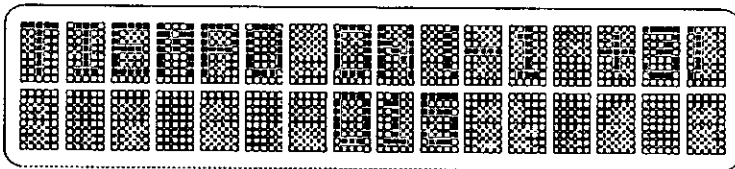
Se introducen la hora de inicio del riego.



Se indica el numero de ciclos para dar el riego, en el mensaje aparece un numero inicial de 15, para aumenta el numero de ciclos se presiona la tecla 3, o disminuirlo con la tecla 1. Cuando se ha indicado el numero de ciclos deseado, se presiona la tecla aceptar.

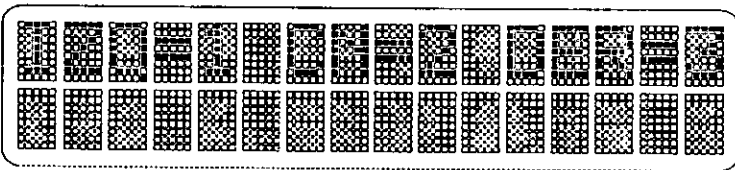


Posteriormente se debe indica el tiempo de riego por ciclo, en minutos,

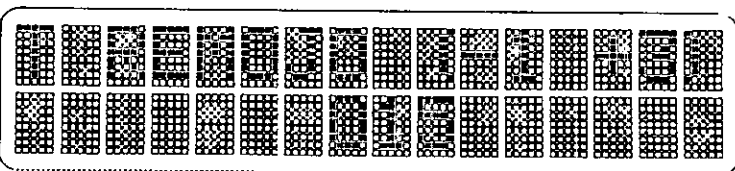


el tiempo inicial es de 15 minutos, para aumentarlo se presiona la tecla 3 y para disminuirlo la tecla 1.

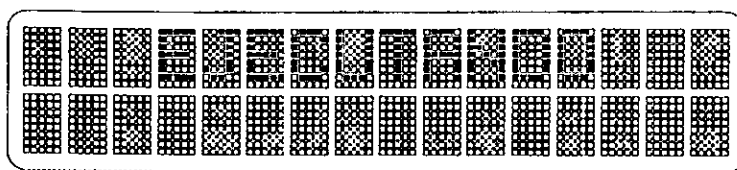
Se indica la posición inicial del riego, ya sea el lado derecho, al izquierdo o al centro.



Por último, se indica el tiempo de remojo, en forma similar a los anteriores pasos:



Una vez que inicia el riego, en ese momento inicia la operación de la válvula y en la pantalla se tiene el mensaje:



Al terminar de ejecutar el programa, se muestra nuevamente el menú de operación de la válvula.

En ocasiones se desea interrumpir la operación de la válvula, esta se puede detener en cualquier momento al presionar la tecla cancelar.

4.4 Operación de la Válvula en parcelas

Durante 1994 y 1996 se probó la válvula electromecánica en la parcela experimental de la UAZ. Como se describe en el Anexo A, la parcela 5 fue seleccionada para ser regada con este sistema (Figura A-1). Para mostrar las ventajas que presenta el uso de este equipo en el riego intermitente, se estableció una franja testigo de 20 surcos para regarse en forma continua para determinar las eficiencias reales y los tiempos de aplicación para los dos tipos de riego.

Para detectar las posibles fallas de operación tales como errores de ejecución del programa, fallas en los componentes electrónicos o mecánicos, se realizó un seguimiento permanente durante 5 riegos. En este período se revisó a los componentes electrónicos y principalmente a las partes mecánicas que pudieran sufrir desgaste, descartándose estas últimas.



Fotografía 4-1 Instalación de la válvula.

Una vez que se descartaron las posibles fallas de operación, la válvula se utilizó para regar la parcela sin la asistencia de personal de campo. Para garantizar que la válvula opera para las condiciones mas variadas, se dieron riegos en forma manual y programada. Esta última se programó para diferentes duraciones, números de ciclos, tiempos de remojo, etc. Como no presentó fallas de operación se decidió dar riegos nocturnos

Después de 1 año de operación de la válvula durante el ciclo Otoño-Invierno 95 se detectaron fugas entre el sello de la mariposa y el cuerpo de la válvula y posteriormente falla en el engrane de la mariposa. Este problema se debió a que el sello se fue desgastando paulatinamente y por la falta de cilindridad del cuerpo de la válvula, el ajuste de los sellos durante el giro de la mariposa no era constante. Esto trajo como consecuencia variación en el voltaje de alimentación y, por tanto, una variación en el torque sobre los engranes produciendo su desgaste. Para resolver los problemas descritos, se sustituyó el material utilizado como empaque, para el engrane se utilizaron materiales mas resistentes.

Corregidas estas fallas, la válvula no presentó problemas en su funcionamiento y operación durante los riegos en la parcela experimental.

4.5 Diseño del riego con Válvula.

El diseño del riego con válvula generalmente se realiza a través de una serie de criterios empíricos obtenidos a partir de datos de campo. Estos criterios consideran que el flujo alcanza el final del surco en un tiempo menor que en el riego continuo, pero no consideran la lámina suministrada y en consecuencia la eficiencia de aplicación y distribución.

4.5.1 Métodos empíricos

Estos consideran que el gasto descargado al surco es el máximo no erosivo, por lo que la única variable es la duración del ciclo. Para determinar este tiempo se ha propuesto a partir de datos de riego continuo.

Cuando se desea que el frente de onda alcance el final del surco en cuatro ciclos (menores a 400 m) o seis ciclos (surco mayor a los 400 m) y que el tiempo real de suministro de agua sea la mitad del que necesita en riego continuo; la duración por ciclo se determina como:

Para surcos menores a 400 m, es el tiempo para alcanzar el final del surco con riego continuo/8

Para surcos mayores a 400 m, es el tiempo para alcanzar el final del surco con riego continuo/12

Por otra parte, García (1994) analiza la problemática del diseño y propone la siguiente metodología:

4.5.2 Diseño con ciclo fijo

Para el diseño del riego en surcos de longitud definida, es necesario seleccionar el gasto descargado al surco y la duración del ciclo de tal forma que se obtengan las mínimas pérdidas por percolación y escorrentía y a partir del modelo numérico desarrollado por este autor se determina la duración y número de ciclos que presenten mayor eficiencia de aplicación y distribución.

4.6 Duración de la batería

La corriente consumida por el sistema electrónico y mecánico son:

Microcontrolador (suministrado por una de sus líneas de salida): 10 mili-Amperes.
Motor (corriente nominal): 150 mili-Amperes.
Bobina del relevador (corriente nominal): 20 mili-Amperes.
Pantalla (vización): 10 mili-Amperes
50 mili-Amperes

La compuerta requiere un tiempo de 30 segundos para cambiar de posición derecha a izquierda y viceversa.

Con estos consumos se determina la duración de batería. Considerando que se está regando continuamente con ciclos de una hora.

La corriente continua consumida por el motor y la válvula sería de:

$$I_{cmr} = \frac{(150mA + 20mA) \times (30seg)}{3600seg} = 1.416667mA$$

y por lo tanto el tiempo que duraría la batería cargada sería de:

$$\text{Tiempo} = \frac{40A - \text{Hora}}{(50mA + 10mA + 1.416667mA)} = 650 \text{ horas}$$

correspondiente a 27 días.

4.7 Costo de la válvula electromecánica

El costo para la el prototipo es de \$ 5000 (650 dólares), este en producción masiva disminuye en un 30% aproximadamente. La operación y mantenimiento son menores respecto a la válvula importada.

4.8 Riego continuo e intermitente en la parcela.

Para evaluar los tiempos de riego totales entre el riego continuo e intermitente. Se diseñaron los riegos para cada uno de ellos. Para riego continuo se utilizó una franja de 20 surcos con abertura de compuerta a 1/3. Para riego intermitente se utilizó el modelo numérico desarrollado por García, 1994, los resultados obtenidos fueron 20 compuertas abiertas a 1/3, con ciclos de 1.5 horas.

Los riegos se realizaron en condiciones similares.

A continuación se muestran en la tabla 4-1 los principales resultados para los dos tipos de riego.

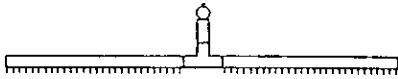
Tabla 4-1 Operación de la parcela regada con válvula.

Tipo de riego	CONTINUO	INTERMITENTE
Riego de presiembra, horas	9	7.5
Lámina de presiembra, cm	12	10
Eficiencia de aplicación, %	54	70
Número de riegos	5	5
Riego de auxilio, horas	7.5	6
Lámina de auxilio, cm	10	8
Número de riegos	4	4
Rendimiento en silo *	55 Ton/Ha	55 Ton/Ha
Rendimiento avena **, pacas	200	200
Rendimiento avena **, pacas	180	180

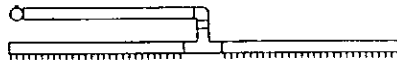
* Ciclo Primavera-Verano 94

** Ciclo Otoño-Invierno 96

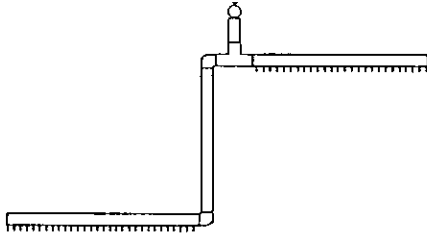
El tiempo de riego para el grupo de 20 compuertas abiertas en continuo es de 9 horas y de 7.5 horas para intermitente en presiembra. Con estos tiempos para el grupo, el tiempo total de riego para la parcela es de 64 horas en continuo y de 53 horas en riego intermitente, por lo que se tiene un ahorro de 11 horas que representa un ahorro de energía y agua del 20 %. Para el riego de auxilio requieren 7.5 horas en continuo y de 6 horas en intermitente para el grupo, lo que implica regar la parcela con 54 horas en continuo y de 42 horas en intermitente, implicando un ahorro de 12 horas, que representa un ahorro del 25 % en agua y energía. De esta manera la reducción total de bombeo en la parcela es de 2.4 días en riego intermitente respecto al continuo.



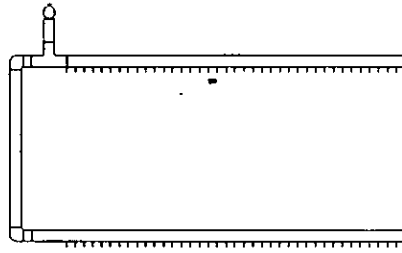
Parcela rectangular, con hidrante al centro.



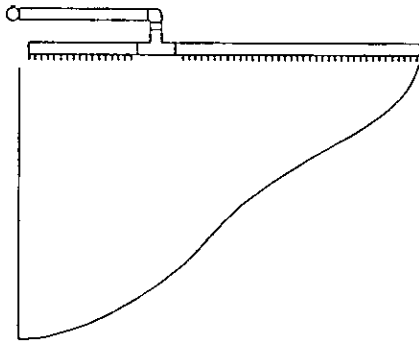
Parcela rectangular con hidrante en un extremo.



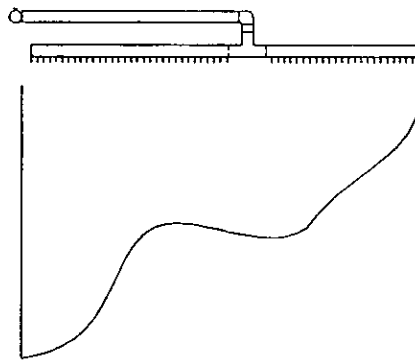
Riego simultaneo de diferentes parcelas.



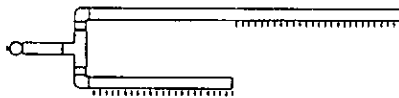
Riego simultaneo de diferentes parcelas con pendiente pronunciada.



Parcelas irregulares con tiempo de avance constante.



Parcelas irregulares con diferente tiempo de avance (izquierda y derecha).



Parcela rectangular con pendiente transversal pronunciada..

Figura 4- 5 Riego en parcelas de diferente configuración con la válvula electromecánica.

4.9 Trazo del sistema de riego

El trazo consiste en determinar la posición de la válvula y la tubería de compuerta de tal manera que sea posible colocarla después en otra posición y que pueda dividir el gasto para regar simultáneamente dos parcelas. En la figura 4-5 se muestran algunos casos típicos.

4.10 Desarrollo futuro

Actualmente se está desarrollando una válvula mas eficiente y de operación mas sencilla (Aguilar 1997, Elías 1997) siendo las principales adiciones:

- Dispone de dos mariposas que pueden ser operadas en forma independiente. Esto permite dividir el flujo o cancelarlo de la fuente de alimentación.
- El sistema de motorización es mas robusto.
- Es alimentada con una pila de menor tamaño y peso que está alojada dentro de la válvula.
- Dispone de mas prestaciones en su operación (hasta 999 ciclos, 999 minutos de aplicación del agua, posibilidad de reducir el caudal una vez que el frente de avance llega al final de la parcela, etc.).

Se está probando las nuevas características de funcionamiento y operación en laboratorio y en la parcela experimental de la UAZ.

4.11 Ventajas

- Tiene un costo de 5000 pesos vs los 3000 dólares de la importada.
- Disminuye sustancialmente el trabajo del regador.
- La válvula electromecánica cuenta con mas prestaciones en operación respecto a la importada.
- Está fabricada con materiales comerciales.
- El equipo es económicamente viable.
- Las reparaciones se realizan en el país.
- Evita dependencia tecnológica.

4.12 Limitaciones

- Requiere una batería de alimentación de 12 volts, la cual debe ser energizada cada semana durante 36 horas.

EQUIPO DE AVANCE Y RECESION

5.1 Introducción

Para el diseño óptimo del riego por gravedad se debe considerar y evaluar cada una de las variables involucradas (Características del suelo, Caudal suministrado, Pendiente de la parcela, Parámetros de infiltración, Curvas de avance, recesión del flujo, etc.).

Los dos últimos parámetros requieren información precisa para cada parcela en particular, ya que una sobreestimación de la infiltración del suelo resulta en un diseño del sistema con una longitud de surco menor a la real, teniéndose tiempos de riego mayor. Esto origina mayores pérdidas por coleos. Por el contrario, al subestimar los parámetros de infiltración conduce a un surco con una longitud mayor a la real, y, por tanto, se tienen mayores pérdidas por infiltración a las estimadas. El comportamiento del avance y recesión del flujo en riego por gravedad es otra de las características que se deben conocer con precisión ya que esta variable determina el tiempo de oportunidad del riego, permitiendo evaluar la eficiencia de aplicación y de distribución. Para evaluar las ventajas del riego intermitente respecto al riego tradicional, la UAZ y el IMTA han desarrollado y probado un equipo electrónico como apoyo a la investigación que mida estos parámetros en forma sencilla y confiable.

5.2 Medición del avance y recesión

Por lo general el avance y recesión del flujo en el surco se registra con personal de campo.

El avance se mide por una persona que sigue el frente de onda del flujo, con el gasto de diseño, anotando los tiempos de paso en puntos previamente establecidos.

La recesión es registrada por otra persona que sigue la desaparición del flujo y registra los tiempos en que sucede en los puntos donde se midió el avance.

Para riego continuo existe una sola fase de avance, por tanto, la persona que registra los tiempos, recorre una sola vez las estaciones, en orden secuencial. Como el avance del personal se realiza en suelo seco, la superficie del suelo, la geometría del surco y el cultivo no son dañados en gran medida.

Para la fase de recesión no ocurre lo mismo, ya que ésta se presenta de acuerdo a las condiciones locales del suelo (grado de compactación, tiempo de oportunidad, cobertura vegetal y grietas existentes). Para tener mediciones confiables, ahora, se requieren varias personas para llevar los registros en los puntos considerados. Como ahora el personal se mueve en un suelo lodoso, la geometría del surco es alterada completamente, y el cultivo es dañado permanentemente.

Para riego intermitente o en parcelas con longitud de surcos grande y tiempos de riego mayores a las 8 horas el método se vuelve poco práctico.

Para riegos nocturnos, este método se vuelve impráctico.

La experiencia obtenida en el proceso de la información indica que los registros por este método resultan deficientes por las razones antes expuestas.

Considerando lo anterior, es deseable disponer de un equipo automático que registre en cada estación el avance y la recesión, sin la necesidad de recursos humanos, evitando con ello alterar los surcos y dañar al cultivo de la parcela.

En el presente capítulo se describe el diseño, construcción y validación de un equipo electrónico que registra, en cada estación el avance y recesión del frente de onda, y almacena la información para su posterior proceso e interpretación

5.3 Bases de diseño

Considerando los problemas descritos, el equipo de avance y recesión debe cumplir las siguientes características (Elías, 1994):

1. El equipo debe hacer mediciones a cada 20 metros en parcelas de hasta 500 m de longitud.
2. Debe operar en forma automática para evitar el uso de personal durante su funcionamiento.
3. Las mediciones deben ser almacenadas para su posterior proceso.
4. El equipo debe disponer de un suministro propio de energía.

5. Debe ser de fácil operación para el usuario.
6. Debe ser lo mas estándar posible, de vanguardia y de bajo costo

5.3.1 Método de solución

Con las características que debe cumplir el equipo de avance y recesión, se analizaron diferentes alternativas, en el Anexo B se describen en detalle las características mínimas para el equipo electrónico. En forma resumida:

El equipo debe hacer mediciones a cada 20 metros en parcelas de hasta 500 m de longitud. Para censar la información se analizaron las siguientes alternativas:

- Transmisión de señales de radio.
- Transmisión de señales ópticas
- Transmisión de señales ultrasónicas
- Transmisión de señales eléctricas por medio de un conductor

La primera alternativa se descartó principalmente por el alto costo de los transmisores de radio.

La opción de señales ópticas se rechazó, debido a que es necesario contar con una línea visual entre el transmisor y el equipo, debido a la cobertura vegetal.

Se descartó la opción de señales ultrasónicas, ya que se requiere de una fuente de poder de gran tamaño para transmitir las señales, siendo costoso y poco viable.

Por tanto, la opción más viable fue la transmisión de señales eléctricas por medio de un conductor. Esta solo requiere un cable con sensores colocados a cada 20 m.

Para detectar el avance o la recesión se aprovecha la conductividad eléctrica del agua. En cada estación se colocan dos sensores, los cuales en ausencia de agua están aislados eléctricamente, presentándose un voltaje similar al de alimentación, siendo registrado por el equipo como la recesión (R). Cuando el frente de onda llega a una estación, la conductividad eléctrica del agua cierra el circuito entre los sensores, presentando una baja en el voltaje, siendo detectado por el equipo como el avance (A).

Debe operar en forma automática para evitar el uso de personal durante su funcionamiento. Para que el equipo ejecute todas las funciones para que fue diseñado en forma automática (control de las mediciones, almacenamiento de la información, etc.), debe disponer de un controlador programable. El que se utiliza es el microcontrolador MC68HC11E2.

Las mediciones deben ser almacenadas para su posterior proceso. Para almacenar la información generada durante el riego, se utiliza la memoria EPROM 27512.

El equipo debe disponer de un suministro propio de energía. El equipo electrónico será alimentado por una batería de efecto electrólisis (batería automovilística) de 12 Volts c.d. y 40 Ampers/hora, además de una fuente auxiliar de 8 pilas de 1.5 V.

Debe ser de fácil operación para el usuario. El equipo dispondrá de un teclado (el operador puede introducir la fecha, hora y las condiciones iniciales de operación del equipo) y una pantalla, display, esto facilita el intercambio de la información entre el equipo y el operador, además de mostrar la información generada durante los riegos.

La pantalla utilizada es de Cristal Líquido (LCD) activado por frecuencia de 4 1/2 dígitos, con siete segmentos cada uno.

Debe ser lo mas estándar posible, de vanguardia y de bajo costo. Para facilitar su diseño y fabricación se divide en módulos. Esto presenta varias ventajas, estandariza la fabricación, facilita la actualización, abatiendo los costos.

5.3.2 Descripción del sistema

El equipo está compuesto por módulos, los cuales se muestran en la figura 5-1.

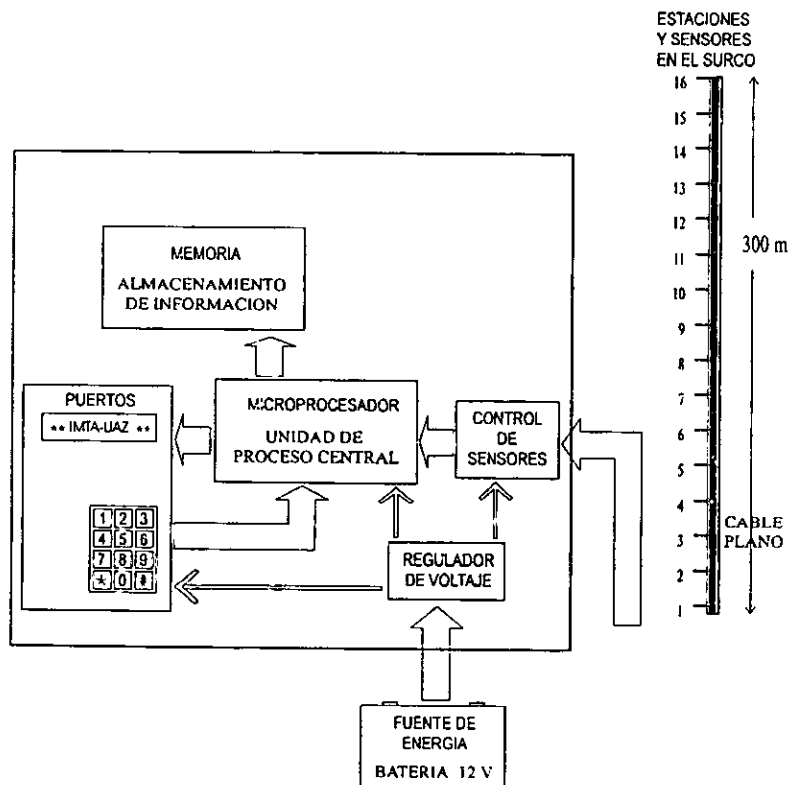


Figura 5-1 Módulos del Equipo de Avance y Recesión.

Los módulos principales son:

- Fuente de energía
- Microcontrolador
- Memoria
- Control de puertos
- Fuente de sensores

Se describe a continuación las características principales de los módulos.

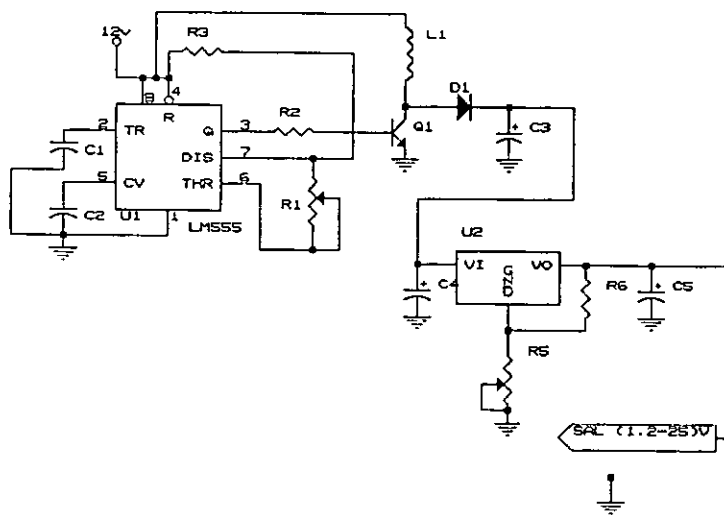
5.3.2.1 Fuente de energía

Su función principal es proporcionar los voltajes adecuados que requieren los diversos componentes electrónicos para su funcionamiento.

La fuente de energía principal es una batería automotriz de 12 V c.d. a 40 Amperes/hora, o de una fuente secundaria de 8 pilas de 1.5 Volts.

Como la mayoría de los componentes operan a 5 V c.d., este módulo contiene un regulador de 5 V formado por un circuito integrado y componentes pasivos (resistencias, capacitores y un disipador de calor).

La memoria EPROM requiere dos voltajes, 6 V c.d. en modo pasivo y 13 V c.d. al grabar los datos. Para obtener los 6 V, se regula directamente de la fuente de 12 Volts; en el caso de los 13 V, es necesario elevar los 12 V a 24 V, para después regularla a 13 V. En ambos casos se utilizan circuitos integrados (un transformador y un regulador de voltaje). Este módulo contiene además, un diodo de protección al sistema en caso de que se invierta la polaridad (batería conectada incorrectamente); Un fusible que protege al sistema de sobrevoltajes y componentes pasivos. Se muestra el diagrama eléctrico del módulo de fuente de energía.



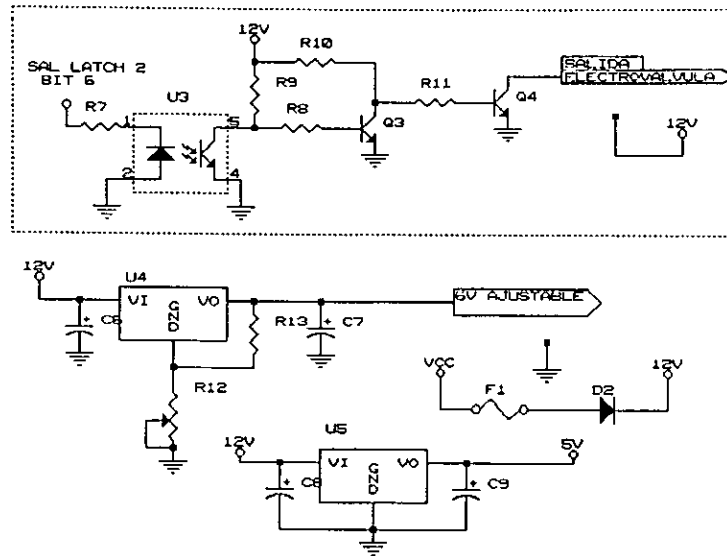


Figura 5-2 Diagrama eléctrico de la Tarjeta Fuente de Energía

5.3.2.2 Microcontrolador

Es el módulo que controla el funcionamiento electrónico del equipo de avance y recesión. El módulo seleccionado es el microcontrolador MC68HC11E2 para que sea la unidad de proceso central. Este dispositivo contiene el programa que electrónicamente controla el funcionamiento de los módulos, el teclado, la pantalla, y la lectura/almacenamiento de los datos.

En el Anexo C se describen las características del MC68HC11E2.

5.3.2.3 Memoria

Como se describe en el Anexo C para almacenar la información se utiliza una memoria 27512. Este módulo está conectado eléctricamente al microcontrolador, ya que este, además de procesar la información introducida desde el teclado y de los sensores, debe direccionar la lectura/escritura de los datos en la memoria (la grabación de un dato ocurre en un tiempo de 1 milisegundo).

Este módulo debe estar localizado en una zona que facilite su colocación y extracción de la memoria sin desarmar el equipo de avance y recesión. Se muestra el diagrama eléctrico.

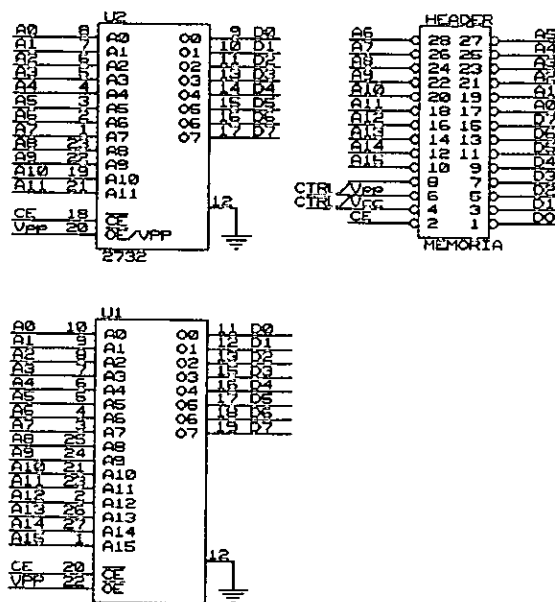
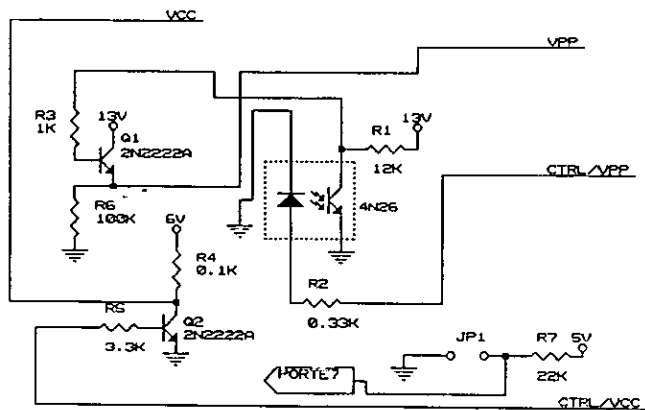


Figura 5-3 Diagrama eléctrico de la Tarjeta de Memoria

5.3.2.4 Control de puertos

Este módulo direcciona el envío y recepción de datos entre el microcontrolador y el teclado, monitor y sensores, además del almacenamiento de la información en la memoria.

Si el microcontrolador controlara simultáneamente todas estas actividades, tendría que estar operando a una velocidad muy alta de proceso. Para evitar tener que utilizar un microcontrolador con una velocidad alta de proceso, para reducir costos. Se implementan circuitos auxiliares que atienden exclusivamente al teclado y a la pantalla,

mientras el microcontrolador procesa los datos y los almacena en la memoria a una baja velocidad de proceso (2 Mhz), que es de bajo costo. Estos circuitos auxiliares se conocen como puertos. Se muestra el diagrama eléctrico.

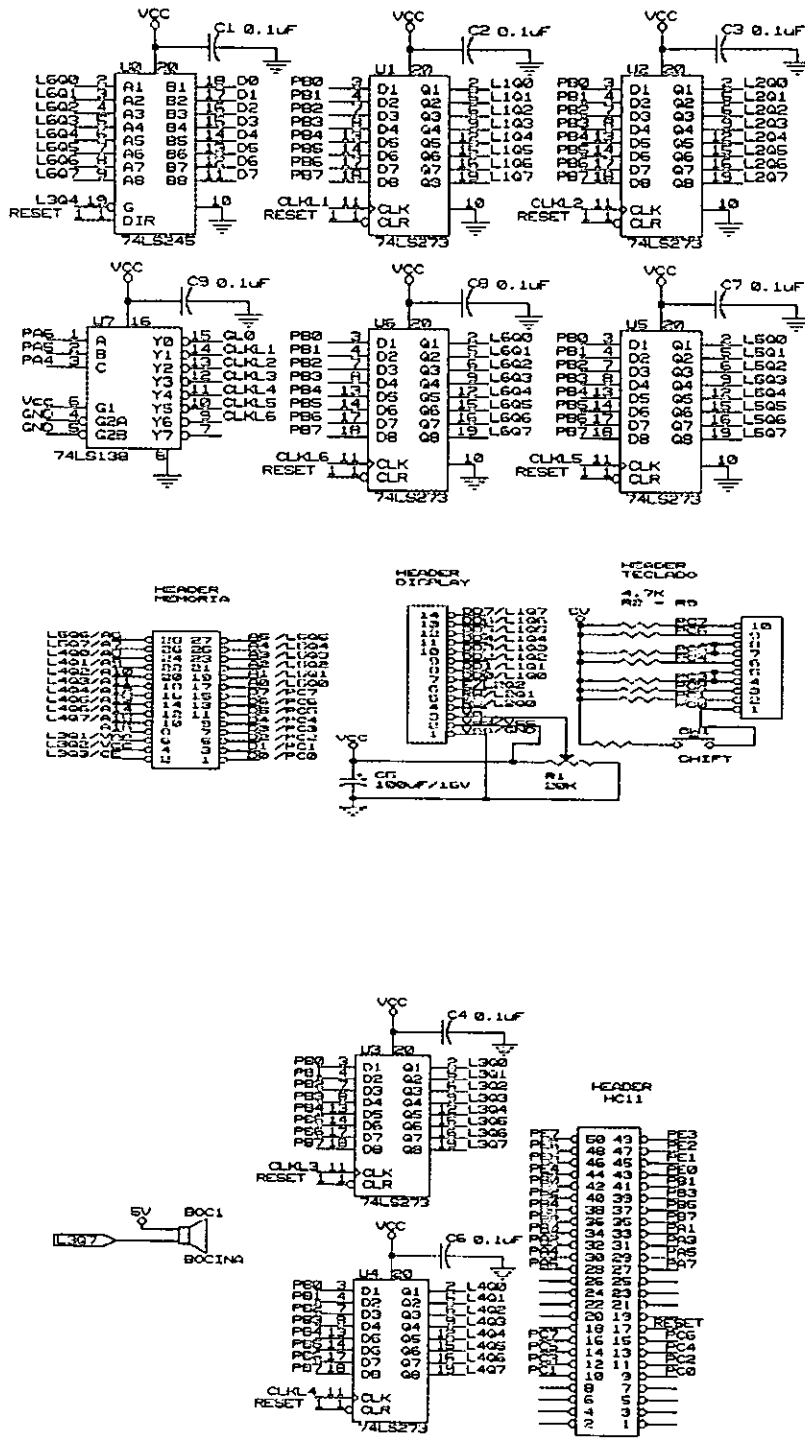


Figura 5-4 Diagrama eléctrico de la Tarjeta Control de Puertos

5.3.2.5 Control de sensores

Este módulo controla la recepción de los datos de los sensores a través del cable DB. Como la información para cada sensor es transmitida en forma independiente es necesario disponer de un circuito que procese la información y la transmita al microprocesador a través de un solo canal. Este circuito se denomina multiplexor. De esta manera, el microcontrolador lee la información proveniente de los diferentes canales y los almacena en la memoria en forma separada.

Como el microprocesador lee cada canal en forma independiente (400 veces por segundo), es imposible que dos o más lecturas de diferentes sensores se superpongan y no sean registrados en la memoria. En el mercado se dispone solo de multiplexores de cuatro canales. El diagrama eléctrico de la tarjeta es;

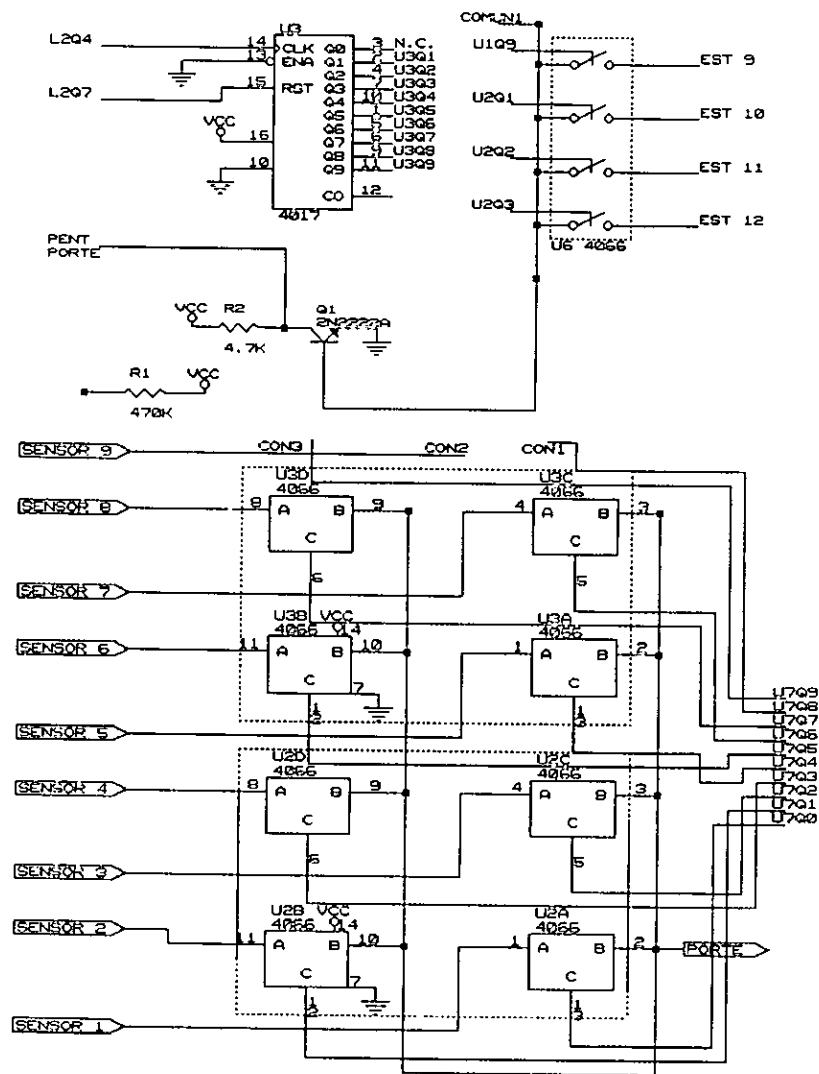


Figura 5-5 Diagrama eléctrico de la Tarjeta Control de Sensores

5.3.3 Programación del microcontrolador

Para que el equipo de avance y recesión opere en forma automática, es necesario programar al microcontrolador. Enseguida se describen las funciones que debe ejecutar el equipo de avance y recesión, el diagrama de flujo y la programación de la tarjeta EVBU.

1. Las funciones principales consideradas que debe realizar el sistema son:
 - presentar en la pantalla las siglas de las instituciones que contribuyeron en la realización del mismo.
 - presentar en la pantalla los datos introducidos correspondientes a la fecha y hora.
 - al presionar cada tecla, se presente en la pantalla el numero correspondiente.
 - en caso de introducir un dato incorrecto para la fecha y la hora, sea posible corregirlos.
 - una vez aceptada la fecha y hora, estos deben ser almacenados en la memoria EPROM.
 - se muestre en la pantalla en forma continua la hora.
 - al detectar un cambio de voltaje en una estación, se muestre en la pantalla el número de estación, la hora en que se presentó, y su estado (Avance o Recesión).
 - almacenar en la memoria EPROM los datos presentados en la pantalla.
2. Considerando los requerimientos anteriores se desarrolla el diagrama de flujo lógico mostrado en la figura 5-6.
3. Se edita el diagrama de flujo en un lenguaje de programación (ensamblador). Para ello se utiliza el compilador de Pascal.
4. Una vez editado el programa, se codifica a código máquina, en formato hexadecimal. El fabricante del microcontrolador proporciona el programa AS11 para codificar el programa en ensamblador a código máquina.
5. Con el software PCBUG (proporcionado por el fabricante) se transfiere el programa desde la computadora al puerto serial de la tarjeta EVBU, por medio de un cable DB25, almacenándose en la memoria EEPROM del circuito. Una vez almacenado el programa en el microcontrolador, este se ejecuta cada vez que el equipo es encendido.

En caso de que se presenten errores de ejecución del programa debe repetirse el procedimiento descrito previamente desde el paso 1.

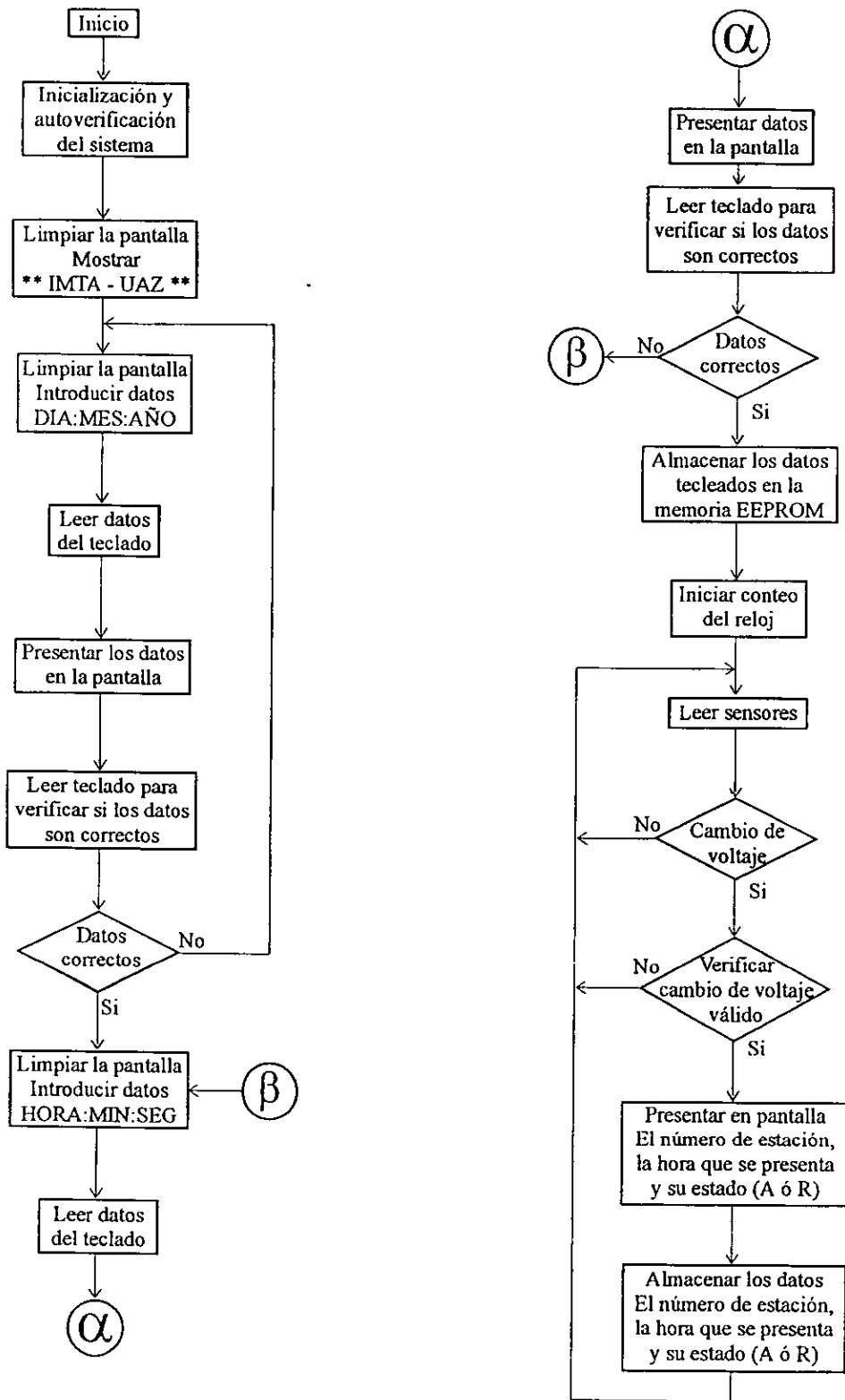
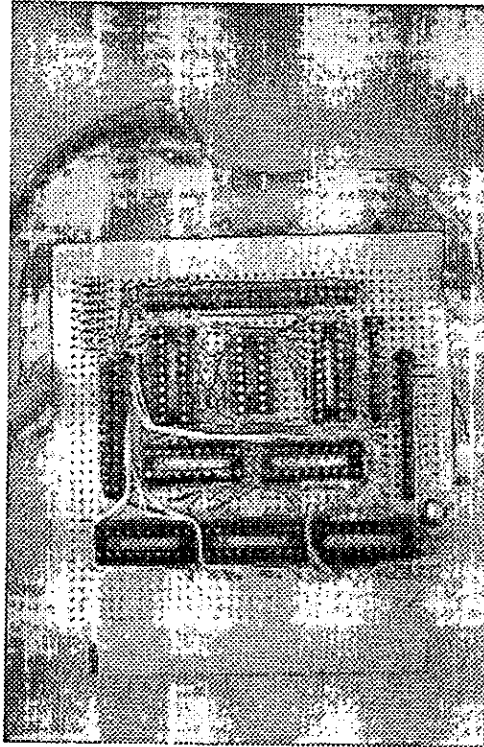


Figura 5-6 Funcionamiento electrónico del Equipo de Avance y Recesión.

5.3.4 Fabricación del sistema

Basados en los diagramas eléctricos se fabrican los módulos. Los componentes electrónicos de cada módulo se implementan en una tarjeta perforada de baquelita. Esto facilita el montaje de los componentes y considerando que se pueden presentar cambios en los circuitos diseñados, se decidió alambrear y soldar los componentes a la tarjeta (Fotografía 5-1).

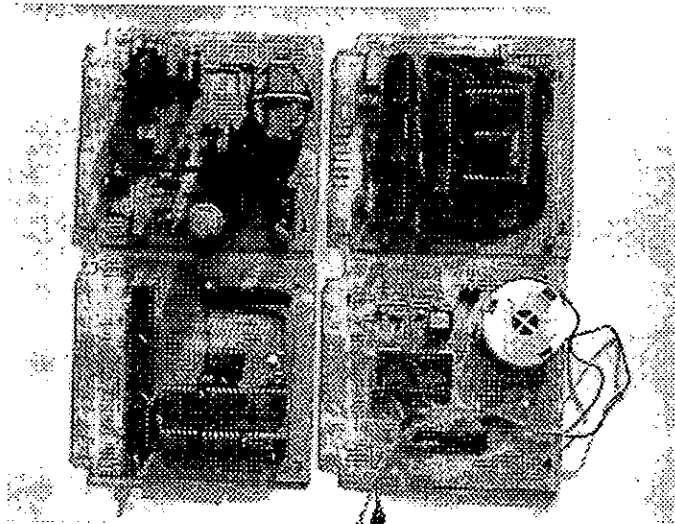


Fotografía 5-1 *Fabricación de la Tarjeta.*

Para el equipo se requieren las siguientes tarjetas:

- Pantalla
- Teclado
- Fuente de energía
- Memoria
- Control de sensores
- Control de puertos

Se muestran los módulos construidos en la fotografía 5-2.



Fotografía 5-2 Tarjetas del Equipo de Avance y Recesión.

Una vez fabricados los módulos, estos se montan en un soporte de aluminio. Para conectar los módulos a la tarjeta EVBU se utilizan conectores a las terminales (tipo peine) atornillados al soporte de aluminio.

El espacio que ocupan los módulos una vez montados es de 11x11x17 cm.

Para evitar dañar al sistema electrónico debido a oxidación, falsos contactos producidos por insectos o polvo, el equipo debe estar alojado en una caja impermeable y sellada. Después de analizar diferentes alternativas se decidió utilizar una hielera (de las utilizadas para transportar medicinas) marca COLEMAN, con tapa deslizable, el cual cumple las características deseadas para alojar el equipo electrónico.

5.3.5 Selección del cable

Una vez determinado la forma de transmisión de las señales (cable), buscando entre diferentes tipos se seleccionó un cable plano (utilizado en las comunicaciones internas de las computadoras). Esta es la mejor opción ya que es resistente, flexible y cuenta hasta 50 con hilos independientes y su forma plana permite enrollar cables de 300 metros de longitud en carretes de medio metro de diámetro.

Los hilos utilizados por los sensores son dos, uno común, que es el polo negativo (tierra) y otro independiente para cada estación correspondiente al polo positivo. De esta forma la información leída por cada sensor es enviada en forma independiente de las estaciones restantes. Para un cable de 300 m de longitud con estaciones a cada 20 metros, se requieren 16 hilos. Para conectar el cable a los sensores, se soldaron pequeños contactos a los hilos, de esta forma es posible conectar en forma rápida el sensor al cable.

5.3.6 Sensores

Para evitar fallas en las mediciones debido a problemas de funcionamiento de los sensores (queden enterrados o permanezcan flotando) debe fabricarse un sensor que permanezca en contacto con el agua cuando esté presente, y que no quede enterrado cuando se haya infiltrado; además, debe ser de fácil fabricación e instalación. Considerando lo anterior y después de probar diferentes propuestas se eligió el siguiente arreglo mecánico.

El sensor consiste de un alambre de cobre esmaltado, el cual está enrollado en su parte superior a una varilla de alambroón de 50 cm longitud (colocado en los lomos del surco) y en su parte inferior tiene un pequeño flotador (esfera de unicel de 1.5 cm de diámetro). Ver fotografía 5-3.

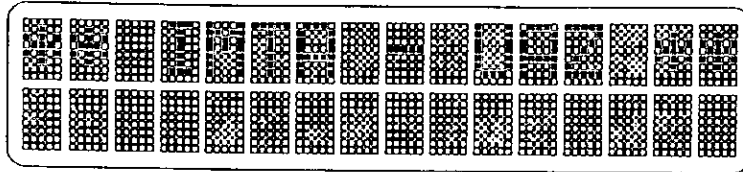
De esta manera, cuando el agua está presente en el surco, el alambre gira y el flotador sube hasta la superficie del agua, cerrando el sensor el circuito (registrándose el avance). Cuando desciende el nivel del agua, el flotador y el sensor descienden también. Una vez que se infiltra completamente el agua, el flotador se apoya en el suelo, quedando el sensor 0.7 cm arriba del piso del surco, abriendo el circuito y, por tanto, registrándose la recesión.



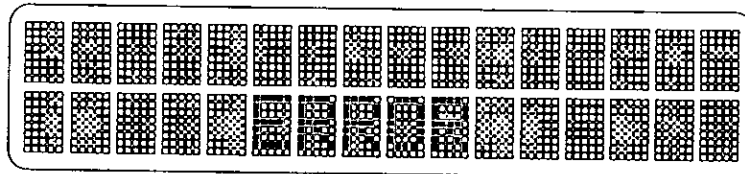
Fotografía 5-3 *Sensores del EAR*

5.4 Activación del equipo

Para activar el sistema, basta con mover el interruptor de encendido a la posición correspondiente, e inmediatamente aparecen las siglas de las instituciones que participaron en la realización del equipo.

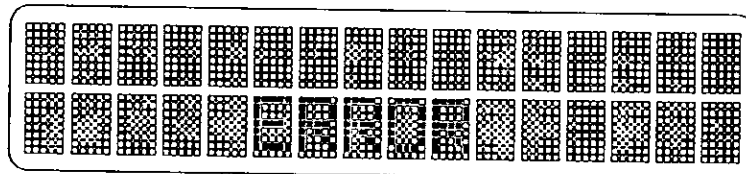


Este letrero permanece durante 5 segundos, mientras el microcontrolador evalúa al sistema electrónico (Autoverificación, módulos, memoria, teclado, pantalla, sensores y voltaje de la batería). En caso de que un módulo esté dañado, la batería no tenga el voltaje adecuado (12 V) o el microcontrolador tenga un problema de operación, en el segundo renglón de la pantalla se mostrará el siguiente mensaje acompañado de un tono preventivo.

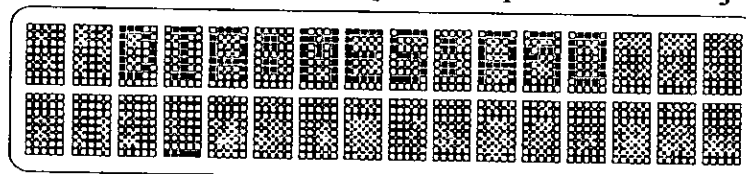


Si el equipo funciona correctamente, en la pantalla aparece el mensaje

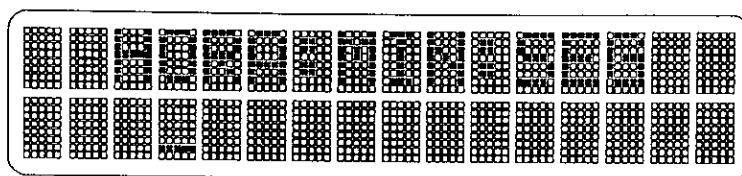
Este letrero permanece durante 5 segundos, mientras el microcontrolador evalúa al sistema electrónico (Autoverificación, módulos, memoria, teclado, pantalla, sensores y voltaje de la batería). En caso de que un módulo esté dañado, la batería no tenga el voltaje adecuado (12 V) o el microcontrolador tenga un problema de operación, en el segundo renglón de la pantalla se mostrará el siguiente mensaje acompañado de un tono preventivo.



Si el equipo funciona correctamente, en la pantalla aparece el mensaje

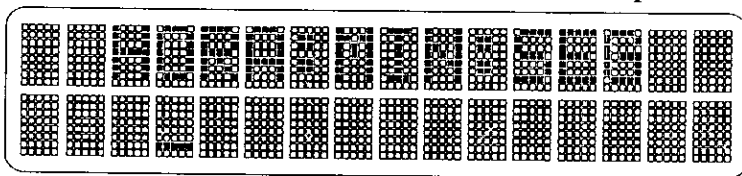


Por medio del teclado se introducen los datos correspondientes a la fecha. El formato es 01-31: 01-12 : 0-99. En caso de introducir un dato fuera de formato, se presentará un error acompañado de una señal auditiva.



En caso de error al teclear los datos, se pueden introducir nuevamente presionando la tecla de cancelación (*). Si los datos son correctos se oprime la tecla de aceptación (#).

Una vez aceptado los datos para la fecha, se indican los datos para la hora.



para introducir los datos se sigue un procedimiento similar para la hora. El formato es 00-23: 00-59 : 00-59.

Una vez presionado la tecla de aceptación para la hora, en el renglón inferior se muestra la hora continuamente, el cual cambia cada segundo.

El equipo está listo para registrar y almacenar las mediciones que se tengan durante el riego.

5.5 Funcionamiento del equipo de avance y recesión

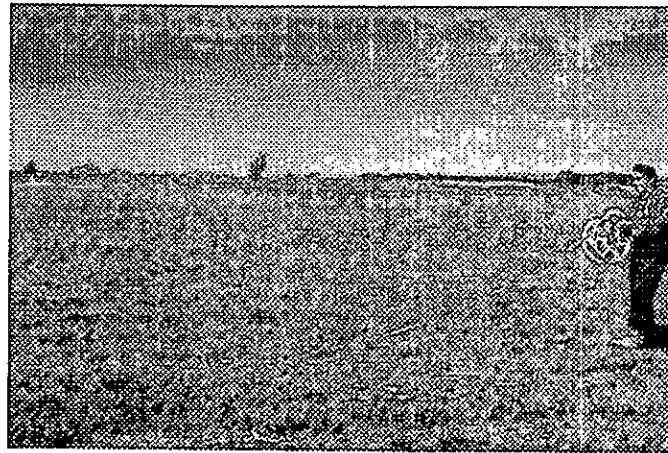
El proceso de instalación y operación del medidor de avance y recesión se resume en las siguientes etapas (Dzul, Trinidad y Elías, 1997):

- 1) Selección del surco
- 2) Tendido del cable plano
- 3) Colocación y prueba de los sensores
- 4) Medición
- 5) Traslado de la información
- 6) Interpretación de la información

5.5.1 Selección del surco

Para obtener curvas de avance y recesión representativas al grupo de surcos que se va a regar, debe seleccionarse un surco con características similares a la mayoría de los surcos de ese grupo (trazo, geometría del surco, características físicas, cobertura

vegetal, etc.). Deben evitarse los surcos alterados debido al paso de las llantas del equipo agrícola o a labores culturales; ya que compactan la superficie del suelo, reduciendo la velocidad de infiltración y, por tanto, la velocidad de avance se incrementaría dando como resultado una subestimación del tiempo de riego.



Fotografía 5-4 *Tendido del cable plano*

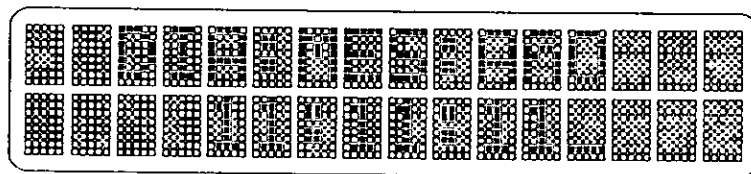
5.5.2 Tendido del cable DB

Una vez seleccionado el surco, se extiende el cable a lo largo del lomo desde la cabecera hasta el final de la parcela (Fotografía 5-4). La persona que tiende el cable debe evitar en todo momento pisar el surco seleccionado para no alterar la superficie del suelo. El tendido debe hacerse con cuidado para no dañar el cable o los hilos de los contactos a los sensores.

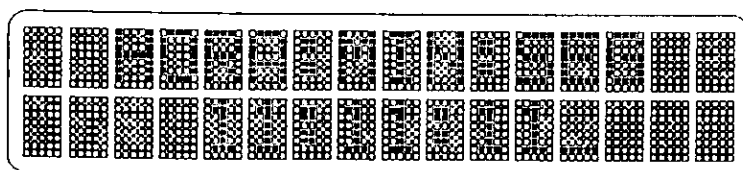
5.5.3 Colocación y prueba de los sensores.

Una vez tendido el cable, ahora, desde la ultima estación hasta la primera, se colocan los sensores. Para evitar fallas en las lecturas del medidor, los sensores se colocan en el sentido del flujo del agua, con esto se evita que los sensores puedan quedar enterrados.

Para verificar que el equipo funciona y el cable plano no presenta roturas, debe hacerse una prueba a los sensores. Para ello se enciende el equipo y se introducen para la fecha;

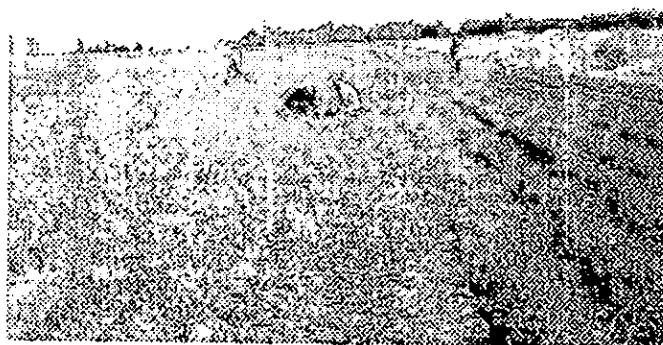


y para la hora,



Esto permitirá al momento de leer los datos de la memoria, identificar la información correspondiente a la prueba de sensores y no a los de un riego.

Se unen los contactos de los sensores un tiempo mínimo de 7 segundos, si el cable está intacto, el equipo indicará con una señal auditiva y presentará en la pantalla del equipo el avance de la estación. Es recomendable que una persona esté observando la pantalla del equipo para indicar a la persona que coloca los sensores el correcto funcionamiento de la estación (Fotografía 5-5).



Fotografía 5-5 Verificación de funcionamiento del EAR.

Una vez comprobado el correcto funcionamiento, se conectan los hilos a los sensores. El procedimiento anterior se repite para las estaciones restantes.

Una vez verificado el funcionamiento de los sensores, se apaga el equipo y se enciende nuevamente para introducir los datos correctos de la fecha y hora. El equipo está listo para hacer mediciones confiables durante el riego.

5.5.4 Medición

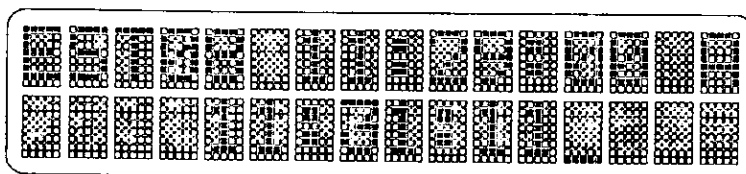
Al inicio del riego o de un ciclo (en riego intermitente), el avance del agua es detectado por los sensores en orden secuencial, almacenándose y mostrándose en la pantalla el número de estación y la hora en que es detectado.

Al termino del riego o de un ciclo, después de cierto tiempo, el nivel del agua desciende paulatinamente por efecto de la infiltración, hasta que desaparece de la superficie del suelo. Localmente los sensores quedan aislados eléctricamente, siendo detectado por el equipo electrónico como la recesión, siendo almacenando y mostrado en la pantalla el número de estación y la hora en que ocurre. Como la infiltración

depende de las condiciones locales del suelo, la recesión se presentará en las estaciones en forma desordenada.

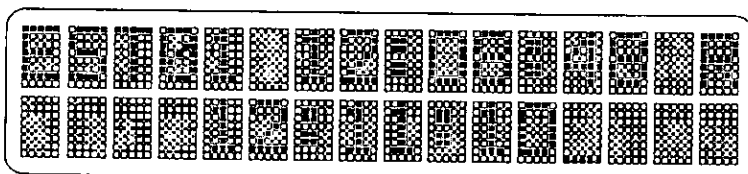
La pantalla tendrá la siguiente presentación cada vez que se detecte un avance o una recesión, a continuación se muestran dos ejemplos:

En el primer ejemplo se muestra la información que aparece en el caso de que en la estación 8 se detecte el avance a las 11:29:00 horas.

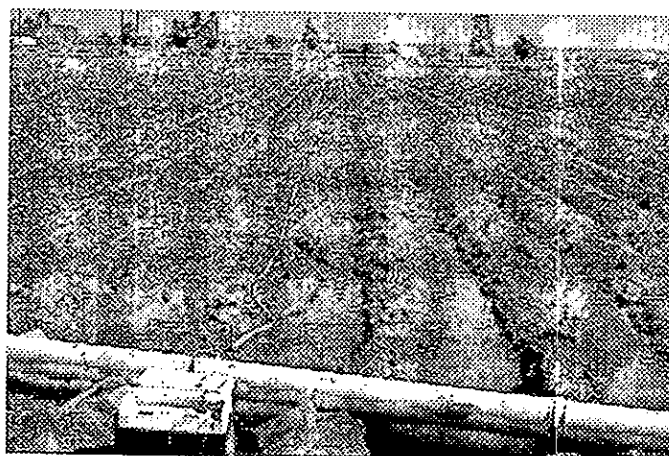


En el renglón inferior se muestra la hora con contador al segundo.

En el segundo ejemplo se muestra el caso de la recesión en la estación 1 a las 12:08:48 horas.



Cuando los datos aparecen en la pantalla, estos fueron almacenados previamente en la memoria (el proceso de grabación dura 100 milisegundos).



Fotografía 5-6 *Equipo de Avance y Recesión en parcela*

Una vez concluido el riego, el equipo electrónico debe dejarse encendido durante varias horas para que las recesiones sean registradas y almacenadas por el equipo.

5.5.4 Levantado del equipo

Para evitar dañar al surco o cultivo, es conveniente dejar el equipo 12 horas más después de que concluyó el riego, esto dará tiempo para que el agua superficial sea drenada y que la superficie del surco se endurezca facilitando el paso del personal.

Se desconecta el cable plano del equipo para evitar dañar al conector y se amarra en la tubería de compuerta esto previene que el conector sea arrastrado en del surco evitando con ello que el lodo entre en los orificios del conector.

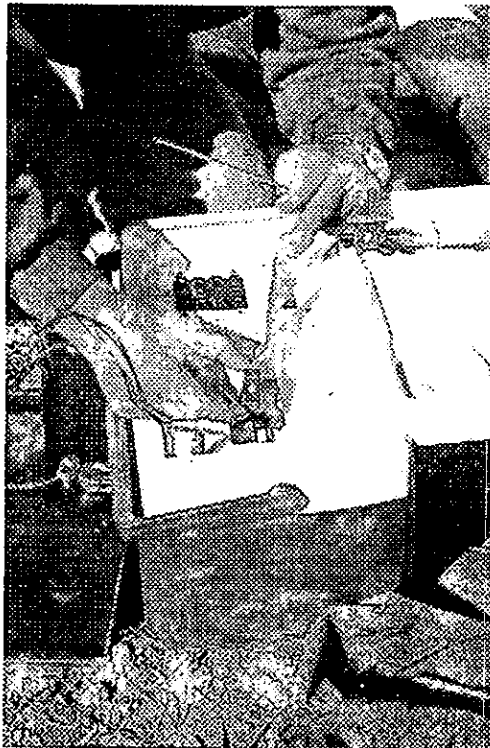


Fotografía 5-7 Levantado del EAR

Una persona desconecta y recoge los sensores, mientras otra persona enrolla el cable en el carrete desde el extremo hasta la cabecera de la parcela (Fotografía 5-7).

5.5.6 Traslado de la información

Para procesar la información almacenada en el circuito se requiere retirar la memoria del equipo. Se retira la tapa en la carátula principal del medidor y se extrae el circuito (Fotografía 5-8). Debe tenerse cuidado durante su manipulación, ya que las terminales no deben tocarse en ningún momento porque la estática podría dañar la información almacenada. Para el traslado del circuito se deben insertar las terminales en un cartón corrugado para evitar doblar las terminales y almacenarlo en una bolsa de plástico.



Fotografía 5-8 Memoria del EAR

Para recuperar la información almacenada en el circuito, se inserta en el lector de memoria que está conectado al puerto serial de la computadora (descrito en el Anexo C), y se ejecuta el programa RM. Este permite leer los datos almacenados en la memoria.

```

Buffer S   D   C   H   E
-----
System Status
Current Path : C:\RM
EMS memory : 3678016 byte
Base memory : 382320 byte
Free disk : 328651264 byte

Loaded file : C:\RM\17-11-95.AUF
Macro file :

Device address
Start : 00000000
End : 0000FFFF

Buffer address
Start : 00000000
End : 0000FFFF

Device Information
Manufacture : National-Semiconductor
Device Type : NM27C512
Chip size : 10000h
Uccp : 6.25V
Upp : 12.75V
Trmp : 100us

Option
Socket : 1
Split: Byte
Checksum: 3503
Base Port: 2A0h
Enc Mode: Off
H/W Rev.: 1.1
S/W Rev.: 1.2H

```

Figura 5-7 Programa RM para lectura de la memoria.

Para el almacenamiento de la información en la memoria se utiliza el formato hexadecimal. Por tanto, la fecha, hora, número de estación y el estado (avance o recesión) están almacenados en dicho formato. Para facilitar la lectura de los datos, además, están almacenados indicadores que separan las mediciones. También se cuenta con un indicador de inicio de medición y otro indicador en caso de que se presente un error en la grabación de los datos en la memoria.

Enseguida se muestran los valores para los indicadores:

- CC Inicio de grabación
- BB Separador de medición
- AA Avance
- 00 Recesión
- EE Error de grabación
- FF Dirección de memoria vacío

El formato de grabación de los datos es:

Estación-Segundos-Minutos-Horas-Día-Mes-Año-Estado-Separador

El siguiente ejemplo muestra los datos leídos de la memoria (riego del 17 de noviembre de 1995) con el programa RM

Address	00	01	02	03	04	05	06	07	08	09	0A	0B	0C	0D	0E	0F	ASC II
00006a0:	08	00	29	11	17	11	95	AA	BB	09	04	36	11	17	11	95	.)
00006b0:	AA	BB	0A	08	49	11	17	11	95	AA	BB	0B	23	02	12	17	.)
00006c0:	11	95	AA	BB	01	48	08	12	17	11	95	00	BB	01	57	15	.)
00006d0:	12	17	11	95	AA	BB	01	15	17	12	17	11	95	00	BB	05	.)
00006e0:	09	19	12	17	11	95	00	BB	0C	21	19	12	17	11	95	AA	.)
00006f0:	BB	04	48	19	12	17	11	95	00	BB	06	02	20	12	17	11	.)
0000700:	95	00	BB	04	06	23	12	17	11	95	AA	BB	04	33	26	12	.)
0000710:	17	11	95	00	BB	0A	46	31	12	17	11	95	00	BB	08	39	.)
0000720:	32	12	17	11	95	00	BB	07	55	32	12	17	11	95	00	BB	.)
0000730:	09	41	33	12	17	11	95	00	BB	0C	15	34	12	17	11	95	.)
0000740:	00	BB	03	38	34	12	17	11	95	00	BB	0B	28	35	12	17	.)
0000750:	11	95	00	BB	02	43	38	12	17	11	95	00	BB	01	34	39	.)
0000760:	13	17	11	95	AA	BB	02	15	41	13	17	11	95	AA	BB	03	.)
0000770:	04	44	13	17	11	95	AA	BB	04	59	46	13	17	11	95	AA	.)
0000780:	BB	05	56	50	13	17	11	95	AA	BB	06	13	54	13	17	11	.)
0000790:	95	AA	BB	07	42	56	13	17	11	95	AA	BB	08	05	01	14	.)
Home. End PgUp PgDn ^E ^Z ^PgUp ^PgDn . . Max buffer size : 20000h . . .																	

Figura 5- 8 Lectura de los datos de la memoria.

La interpretación de los datos es:

- Estación 08 en avance a las 11:29:00 del 17 de noviembre de 1995
- Estación 09 en avance a las 11:36:04 del 17 de noviembre de 1995
- Estación 10 en avance a las 11:49:08 del 17 de noviembre de 1995
- Estación 11 en avance a las 12:02:23 del 17 de noviembre de 1995
- Estación 01 en recesión a las 12:08:48 del 17 de noviembre de 1995

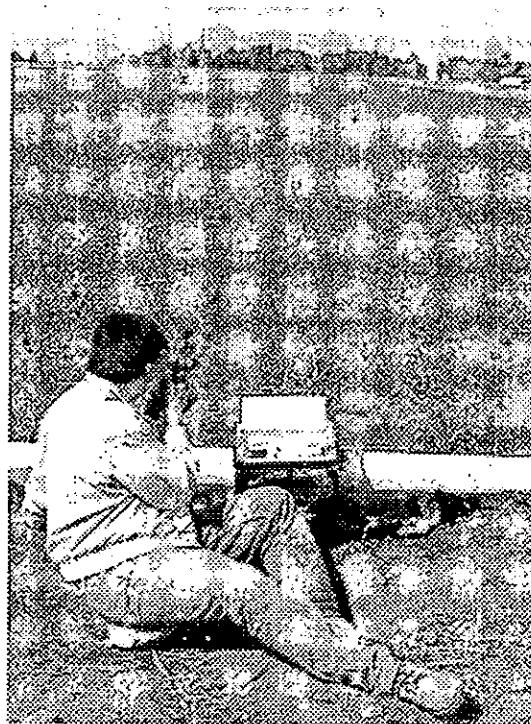
Como se aprecia, el procedimiento de lectura es muy sencillo, pero presenta varios inconvenientes. Se requiere una persona que lea y procese la información, esto se vuelve lento y cansado cuando se editan archivos con gran cantidad de datos. Otra desventaja que presenta es que se requiere introducir los datos a una hoja electrónica (Excel o Quattro Pro por ejemplo) para facilitar su manejo e interpretación.

Próximamente se desarrollará un programa en C el cual lee, procesa la información de la memoria y la presenta en formatos de fácil interpretación con opciones de graficación e impresión.

5.6 Operación del Equipo de Avance y Recesión en parcelas

Durante 1995 y 1996 se probó en campo el equipo de avance y recesión en la parcela experimental de la UAZ. Como se describe en el Anexo A, se tienen parcelas con diferentes características (longitud de surco, gasto aplicado, etc.) regadas por medio de la Válvula para riego intermitente, TDF y el Diabeto.

El equipo de avance y recesión se instaló en las parcelas antes mencionadas. Para mostrar las ventajas que presenta el riego intermitente respecto al continuo, se hicieron mediciones para los dos tipos de riego.



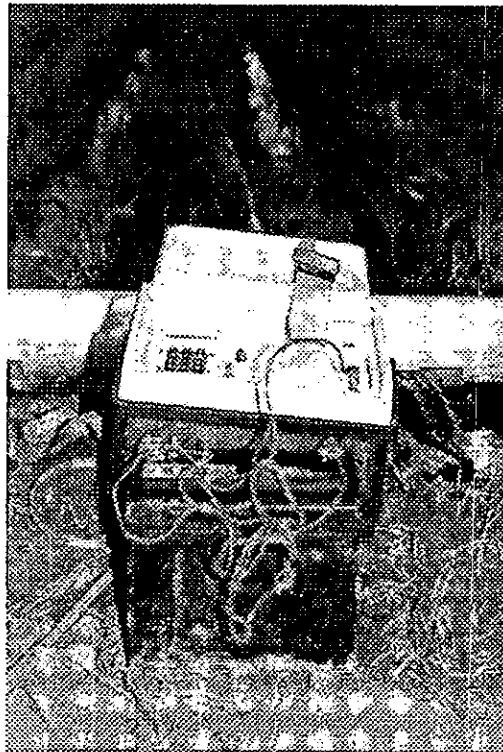
Fotografía 5-9 Pruebas del EAR en campo

Para detectar los posibles problemas de funcionamiento (errores de ejecución del programa, errores al momento de hacer las lecturas o en el almacenamiento de la información en la memoria durante los riegos), se instaló el equipo electrónico, el cable plano y los sensores, a los que en todo momento se daba seguimiento. Esto se realizó

durante 5 riegos. En este período el equipo electrónico no presentó errores de lógica u operación. Una vez que se descartaron las fallas de funcionamiento, se procedió a obtener mediciones del avance y recesión del frente de onda en las diferentes parcelas con personal de campo y el equipo electrónico.

Previamente a la instalación del equipo, se seleccionaron los surcos con características similares a los del grupo a regar. Se instaló el equipo, el cable y los sensores. Se activó el equipo, actualizó la fecha, hora y se cubrió con polietileno para protegerlo de humedad, polvo e insectos.

Para los dos tipos de riego, se registró el avance y la recesión con personal de campo y equipo electrónico (Dzul, *et al*, 1997) en los surcos seleccionados (el gasto descargado fue previamente calibrado). El personal de campo registró el tiempo de avance y recesión de la onda por estación (separación entre sensores 20 metros). Como el equipo electrónico opera confiablemente, se dejó funcionando sin supervisión durante el día y en riegos nocturnos.



Fotografía 5-11 EAR en riego nocturno.

Una vez terminado las mediciones, el equipo se dejó en el surco 12 horas más para dar tiempo a que el suelo se seque en su superficie y evitar, con ello, alterarlo y dañar al cultivo por las pisadas del personal que levanta el equipo. Se obtuvieron mediciones para riego continuo e intermitente en la parcela regada con la válvula electromecánica, en los Tanques de Descargas de Fondo y en el Diabeto.

Una vez terminado los riegos, para el proceso de la información se extrajo y leyó la memoria. A continuación, se muestran los datos del riego del 19 de noviembre de 1995 en la parcela regada con la válvula electromecánica (longitud de surco 513 m). Se muestran los datos obtenidos con el personal de campo (Tabla 5-1) y el obtenido con el equipo electrónico (Tabla 5-2).

Tabla 5-1 Mediciones con el personal de campo.

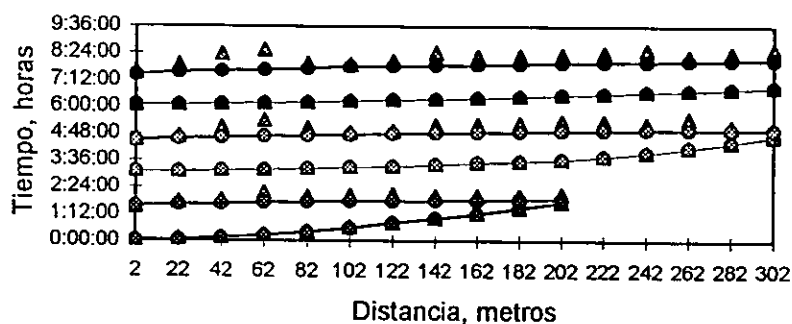
ESTAC	DISTANCIA Metros	CICLO UNO		CICLO DOS		CICLO TRES	
		inicio	10:40:00	Inicio	13:40:00	inicio	16:40:00
		AVANCE	RECESION	AVANCE	RECESION	AVANCE	RECESION
		Hora/Min/s	Hora/Min/s	Hora/Min/s	Hora/Min/s	Hora/Min/s	Hora/Min/s
1	2	10:41:56	12:11:20	13:45:12	15:08:32	16:43:56	18:07:20
2	22	10:44:14	12:17:20	13:46:14	15:14:35	16:45:06	18:13:12
3	42	10:48:43	12:19:30	13:48:38	15:17:20	16:47:18	18:16:25
4	62	10:55:24	12:22:00	13:50:32	15:20:40	16:49:45	18:20:09
5	82	11:04:10	12:24:00	13:54:26	15:22:50	16:52:16	18:23:50
6	102	11:14:44	12:25:00	13:57:36	15:25:02	16:54:51	18:28:40
7	122	11:27:57	12:26:00	13:59:36	15:27:15	16:57:49	18:30:50
8	142	11:39:07	12:27:00	14:04:40	15:29:40	16:59:58	18:32:05
9	162	11:51:54	12:28:00	14:08:56	15:31:09	17:03:50	18:33:58
10	182	12:07:04	12:31:00	14:13:31	15:32:58	17:07:24	18:35:42
11	202	12:22:21	12:31:00	14:18:39	15:34:07	17:11:20	18:38:02
12	222			14:25:55	15:36:05	17:15:00	18:40:32
13	242			14:37:05	15:37:48	17:20:20	18:41:08
14	262			14:50:22	15:38:53	17:24:31	18:43:40
15	282			15:04:38	15:38:55	17:29:36	18:44:50
16	302			15:21:06	15:38:30	17:34:09	18:45:56

Tabla 5-2 Mediciones con el equipo electrónico.

ESTAC	DISTANCIA Metros	CICLO UNO		CICLO DOS		CICLO TRES	
		inicio	10:40:00	inicio	13:44:00	inicio	16:40:00
		AVANCE	RECESION	AVANCE	RECESION	AVANCE	RECESION
		Hora/Min/s	Hora/Min/s	Hora/Min/s	Hora/Min/s	Hora/Min/s	Hora/Min/s
1	2	10:43:52	12:12:00	13:47:08	15:12:45	16:45:32	18:13:16
2	22	10:46:10	12:23:49	13:48:10	15:21:43	16:46:42	18:33:03
3	42	10:50:39	12:28:27	13:50:34	15:44:32	16:48:54	19:02:05
4	62	10:57:20	12:50:13	13:52:28	16:04:36	16:51:21	19:12:38
5	82	11:06:06	12:36:45	13:56:22	15:43:09	16:53:52	18:36:35
6	102	11:16:40	12:40:43	13:59:32	15:31:33	16:56:27	18:34:26
7	122	11:29:53	12:44:05	14:01:32	15:35:06	16:59:25	18:42:31
8	142	11:41:03	12:38:29	14:06:36	15:50:22	17:01:34	19:05:29
9	162	11:53:50	12:38:44	14:10:52	15:51:35	17:05:26	18:56:07
10	182	12:09:00	12:39:35	14:15:27	15:55:57	17:09:00	18:57:03
11	202	12:24:17	12:44:38	14:20:35	16:00:57	17:12:56	18:59:00
12	222			14:27:51	16:01:08	17:16:36	19:04:01
13	242			14:39:01	15:53:10	17:21:56	19:12:33
14	262			14:52:18	16:09:14	17:26:07	18:54:42
15	282			15:06:34	15:46:10	17:31:12	19:04:06
16	302			15:23:02	15:39:10	17:35:45	19:12:45

Comparando la información de las dos tablas, para todas las mediciones en el avance registrados por el equipo respecto al medido por el personal, se tiene un retardo en el registro de uno a dos minutos, esto debido a que el sensor está 0.5 cm arriba del suelo. Como este retardo es constante para todos los sensores, las mediciones no se ven alteradas, sino que solo está desfasada a los tiempos obtenidos por el personal. Podría pensarse en hacer una corrección, pero como los tiempos de riego son del orden de horas, el ajuste toma un valor muy pequeño y, por tanto, es válido despreciarlo.

Figura 5-9 Curvas de avance y recesión
mediciones a pie vs equipo



Las mediciones para el avance con el equipo (triángulos) son aceptables respecto a las mediciones con personal (círculos).

Para las mediciones de la recesión con el equipo, en su mayoría los resultados están desfasados de 5 a 10 minutos respecto a las mediciones con el personal. En ciertos casos se presentan variaciones hasta de 30 minutos. Esto se debe principalmente a los siguientes factores:

- Los flotadores de los sensores pueden quedar semienterrados y, por tanto, registrando el avance, esto ocurre hasta que el agua en la superficie se percola a una profundidad mayor al diámetro del sensor (15-25 minutos aproximadamente). Para evitar que los sensores queden enterrados y se siga registrando el avance, deben colocarse en el sentido del flujo, esto permite que al descender el nivel del agua, los flotadores se apoyen en el suelo.
- La recesión medida con personal es subjetiva, ya que para dos o más personas, ocurre a diferentes tiempos, (5 a 10 minutos).

Para mejorar el funcionamiento de los sensores durante la recesión, se están estudiando otras alternativas y arreglos mecánicos para obtener mediciones más confiables que no requieran hacer ajustes o correcciones.

5.7 Análisis de la información

Para mostrar las ventajas del riego intermitente respecto al continuo, Enseguida se comparan los resultados de las mediciones en los dos tipos de riego.

5.7.1 Función de avance

En la Tabla 5-3 se muestran los datos del avance del riego continuo e intermitente del 19 y 20 de noviembre de 1995 respectivamente, en la parcela regada con la válvula electromecánica. Ver Anexo C y capítulo 4.

Tabla 5-3 Medición del avance con en la parcela de 500 m.

ESTACION	DISTANCIA Metros	CONTINUO	INTERMITENTE		
		Hora/Min/seg	CICLO 1 Hora/Min/seg	CICLO 2 Hora/Min/seg	CICLO 3 Hora/Min/seg
1	2	10:02:20	10:41:40	13:43:18	16:42:07
2	22	10:06:40	10:44:20	13:45:33	16:44:18
3	42	10:12:27	10:47:00	13:47:45	16:46:30
4	62	10:18:12	10:50:10	13:49:47	16:48:00
5	82	10:23:50	10:55:00	13:51:55	16:50:10
6	102	10:31:00	11:00:00	13:53:17	16:52:20
7	122	10:39:26	11:07:10	13:56:45	16:54:35
8	142	10:49:45	11:13:20	13:59:20	16:56:52
9	162	11:02:42	11:22:15	14:03:15	16:59:32
10	182	11:19:30	11:37:45	14:05:05	17:03:00
11	202	11:42:37	+ 15 m	14:07:35	17:04:20
12	222	12:04:02		14:10:42	17:06:50
13	242	12:43:20		14:13:20	17:09:25
14	262	13:03:40		14:16:47	17:12:15
15	282	13:25:41		14:20:10	17:15:00
16	302	13:38:45		14:24:01	17:18:15
17	322	13:56:00		14:29:00	17:21:15
18	342	14:13:33			17:25:00
19	362	14:36:00			17:29:35
20	382	14:57:39			17:34:40
21	402	15:16:49			17:38:00
22	422	15:37:03			17:42:00
23	442	15:58:18			17:47:47
24	462	16:16:00			17:53:15
25	482	17:04:15			18:01:20
26	502	17:27:10			18:15:20

En la figura 5-10 se muestra una comparación del avance para los dos tipos de riego, bajo las mismas condiciones.

6

MEDIDOR DE HUMEDAD

En la agricultura para un uso y manejo eficiente del riego se debe tener un balance adecuado de aire y agua en el perfil del suelo. Asimismo, la eficiencia del uso del agua, (relación rendimiento/cm de agua utilizada) está fuertemente ligada a nuestra capacidad para manejar y entender de manera integra al sistema agua-suelo-atmósfera, que son la base para la toma de decisiones de cuando regar.

Como la agricultura en zonas áridas del país depende totalmente del riego, es importante conocer cuanto regar y cuando regar.

Uno de los parámetros más importantes en el riego es la estimación de la cantidad de agua requerida por el cultivo. Actualmente los métodos de medición de esta variable son caros o imprácticos en su aplicación.

En el presente capítulo se describe un equipo electrónico que mide el agua contenida en el suelo, hasta la profundidad de 1 metro, con la información obtenida es posible tomar la decisión de cuando regar. El costo de este sistema es pequeño comparado con otros métodos o equipos de medición de la humedad del suelo.

6.1 Medición de la humedad

Para medir la humedad del suelo se utilizan varios métodos entre los que destacan:

6.1.1 Métodos directos.

Estos métodos de medición son los que se aplican en el terreno y están basados en el muestreo. Su exactitud depende del número de muestras tomadas, en la destreza y en el manejo de las muestras.

- METODO AL TACTO. Es uno de los métodos mas antiguos, consiste en su inspección ocular y su tacto.
- METODO GRAVIMETRICO. En este método se extraen muestras de suelo mediante una barrena, se pesa la muestra (W_{sm}), se seca durante 24 horas en un horno a 105-110° C. Se pese el suelo seco (W_{ss}) y el contenido de humedad se obtiene por la ecuación:

$$P_s = \frac{W_{sm} - W_{ss}}{W_{ss}} \cdot 100 \quad (6.1)$$

Para obtener las muestras se divide la zona radicular en varios espesores, en cada uno de ellos se recoge una muestra de suelo representativa. La muestra se obtiene por medio de una barrena. Debe tenerse ciertos cuidados durante su manipulación, no deben exponerse al sol o al aire para no alterar el contenido de agua y obtener datos erróneos de humedad. Las muestras deben colocarse inmediatamente después de extraerlas en frascos de vidrio, estos deben marcarse con el valor de la profundidad a la que se obtuvieron. Los recipientes deben cerrar herméticamente.

Este método muestra varias desventajas;

El tiempo que transcurre entre la obtención de la muestra y su secado es muy largo; para parcelas de gran extensión es preciso tomar gran cantidad de muestras en diferentes lugares para lograr una buena estimación de la humedad.

6.1.2 Métodos indirectos

Estos métodos no dan resultados tan exactos como el gravimétrico, ya que no miden directamente la humedad, sino que basados en ciertas propiedades físicas, eléctricas o químicas del suelo se infiere el contenido del agua del suelo.

6.1.2.1 Tensiómetros

La tensión de la humedad del suelo es una medida de la tenacidad con que el agua es retenida por el suelo y representa la unidad de fuerza por unidad de área que debe aplicársele para extraerla. Por lo general se expresa en atmósferas, o sea, la presión del aire al nivel del mar a una temperatura de 21° C. Basados en este concepto Richards y Gardner inventaron el tensiómetro.

El tensiómetro más sencillo se ilustra en la figura 6-1 compuesto por una copa de arcilla porosa conectada a un tubo del cual sale un tubo capilar de vidrio que penetra a un recipiente de mercurio.

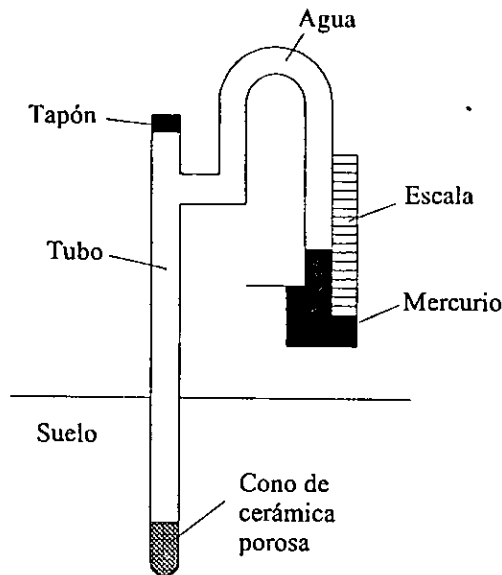


Figura 6-1 Tensiómetro de mercurio

Si se llena de agua el sistema y se tapa el extremo superior del tubo, se tiene un sistema cerrado. Así el agua solo puede entrar o salir del sistema a través de la copa de arcilla, la que se coloca en el suelo; Entonces la humedad puede pasar fácilmente entre la copa y el suelo. Si el suelo está seco, extrae agua de la copa y a su vez el mercurio asciende en el tubo, el cual está graduado. Esto continúa hasta que la succión producido por el suelo iguala al peso de la columna de mercurio. Por ejemplo, si el mercurio asciende hasta 20 cm se dice que la fuerza con que el agua es extraída es igual a la tensión necesaria para sostener la columna de mercurio de 20 cm de alto.

Actualmente el recipiente de mercurio y el tubo capilar han sido sustituidos por un manómetro, el cual mide directamente la tensión en atmósfera por medio de un mecanismo de engrane.

Este dispositivo tiene una desventaja. Cuando se hacen mediciones a tensiones mayores a 0.8 atmósferas, las mediciones pierden precisión, ya que el aire penetra en el dispositivo de la copa porosa.

6.1.2.2 Bloques de yeso

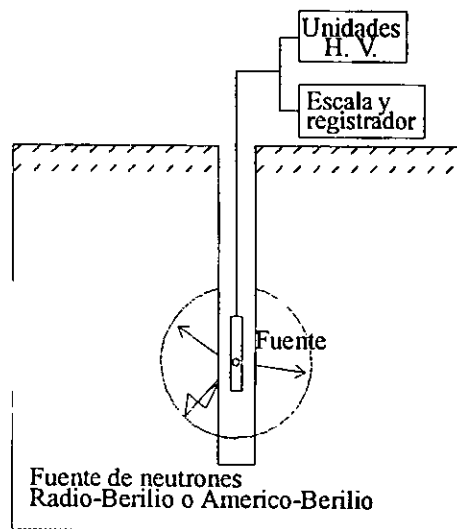
Este método está basado en que la conductividad eléctrica del suelo depende de la cantidad de agua que hay en él. Consiste en colocar dos electrodos dentro de un bloque de yeso. El agua existente en el suelo penetra en el bloque hasta que se forma un equilibrio. Se mide la resistencia al paso de la corriente que se opone en el suelo. Este método presenta varios inconvenientes:

i) se requiere calibrar los bloques de yeso. ii) en suelos salinos el material de los bloques de yeso se destruye rápidamente dando resultados poco precisos. iii) para valores altos de humedad la exactitud el método es baja.

6.1.2.3 Aspersor de neutrones

Este método está basado en la colisión de neutrones con átomos con lo que se produce dispersión de los primeros y así los neutrones lanzados desde una fuente de emisión regresarán al foco luego de chocar con átomos del medio que los rodea. Basados en el

concepto anterior se ha propuesto una técnica que emplea una fuente de neutrones para medir el contenido de agua en el suelo.



El equipo consiste de un tubo metálico de 1 a 1.5 m de longitud y de 5 cm de diámetro que se instala verticalmente en el suelo. Por la parte superior se desliza una fuente de pequeña radiactividad y un detector. La emisión de neutrones atraviesa el tubo y penetra en el suelo, si hay humedad, chocarán contra los núcleos del hidrógeno, disminuyendo su velocidad. Esta disminución de la velocidad determina la medida directa del contenido del agua en el suelo.

Los neutrones amortiguados a su regreso a la sonda emisora son identificados por el detector a través de las paredes del tubo, y al penetrar envían una pulsación eléctrica a un contador de pulsaciones. El

Figura 6-2 Dispersor de neutrones.

número de pulsaciones por minuto se relaciona con el contenido de humedad. Se busca la relación existente entre el número de pulsaciones y el contenido de humedad del suelo.

Este método tiene como ventajas su exactitud y la rapidez de lectura sin alterar al suelo o cultivo.

Entre las desventajas se tiene su alto costo inicial, el mantenimiento y las precauciones a tomar para manejar los materiales radioactivos.

Existen otros métodos para medir la humedad, por ejemplo los químicos (MEDIDOR RAPIDO DE HUMEDAD SPEEDY). Por su concepción no son de interés práctico.

Considerando las características propias de los métodos y las ventajas y desventajas que presentan, es deseable disponer un equipo automático mida el contenido de humedad del suelo que funcione en las condiciones mas variadas sin el requerimiento de recursos humanos, a bajo costo y sin alterar el suelo o al cultivo.

En el presente capítulo se muestran los criterios de diseño, construcción y validación de un equipo electrónico que registra la variación a tiempo real de la humedad en un perfil de 1 m de suelo, almacenando la información para su posterior proceso e interpretación

6.2 Bases de diseño

Considerando los problemas descritos, el medidor de humedad debe cumplir las siguientes características (Elías, 1994):

1. El equipo debe medir la humedad del suelo a cada 10 cm en un perfil de 1 m.
2. Debe operar en la parcela en forma automática durante el ciclo vegetativo del cultivo.
3. Las mediciones deben ser almacenadas, todos los días a las ocho de la mañana para su posterior análisis y proceso.
4. El equipo debe disponer de una gráfica luminosa donde muestre el perfil de humedad del suelo.
5. El equipo debe disponer de un suministro propio de energía.
6. Debe ser de fácil operación para el usuario.
7. Debe ser lo mas estándar posible, de vanguardia y de bajo costo

6.2.1 Método de solución

Con las características que debe cumplir el medidor de humedad, se analizaron diferentes propuestas, en el Anexo B se describen en detalle las características mínimas para el equipo electrónico. Resumiendo:

El equipo debe medir la humedad del suelo a cada 10 cm en un perfil de 1 m.

El problema más importante a solucionar fue seleccionar un dispositivo que permitiera interpretar por medio de señales eléctricas las variaciones de humedad del suelo. Como se trata de un equipo electrónico, se seleccionaron los elementos que permitan la variación de las características fundamentales de una señal eléctrica, que son:

Resistencia eléctrica
Voltaje
Corriente eléctrica

Los elementos que permiten la variación de estas características debido a cambios de humedad son:

GRAFITO. Este material es utilizado en la medición de la humedad de la atmósfera. En placas de plástico se recubren placas de grafito (la cual presenta un alto grado de porosidad) de 3 mm de espesor se mide la resistencia eléctrica en los extremos. Como la humedad que penetra en los poros del grafito tiende a reducir la resistencia eléctrica, y esta puede ser medida fácilmente, este es uno de los métodos mas utilizados. Esta alternativa de fácil concepción tiene un gran inconveniente. El grafito es un material muy frágil para ser utilizado en el suelo, la fricción con el suelo destruye la capa de grafito hasta que se desprende de la placa de plástico.

LUZ INFRARROJA Este método aprovecha el efecto de la descomposición de un haz que choca con una superficie. La luz que incide sobre el agua existente en una superficie sólida se descompone en un espectro (similar a un prisma) en mayor proporción que en un suelo seco.

Actualmente se dispone en el mercado de componentes que emiten luz infrarroja (diodos emisores de luz) y que la detectan (fototransistores). Este método es aplicable solo a suelos que no contienen gran cantidad de piedras (estos difractan el haz de luz); además de que para mediciones a profundidades mayores a 10 cm se requiere de un emisor de gran potencia, aumentando considerablemente el costo de los componentes. Por estas razones se desecha esta alternativa.

MEDICIÓN DE LA RESISTENCIA ELÉCTRICA DEL SUELO CON ELEMENTOS DE BUENA CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA. Este método aprovecha directamente la resistencia eléctrica del suelo. Se entierran dos placas conductoras en las que se hace pasar una corriente eléctrica, como la resistencia del suelo varía proporcionalmente con el contenido de humedad del suelo, se dispone de un método sencillo de medición. En pruebas realizadas se observó que la variación de la resistencia eléctrica no tenía buena estabilidad. Para salvar este problema, se implementó un circuito eléctrico que transforme la variación de resistencia eléctrica en variación de ganancia de voltaje (amplificador basado en transistor). Utilizando el suelo como uno de los resistores del circuito el cual determina la ganancia del amplificador, fluye una pequeña corriente eléctrica (del orden de μ amperes) en el suelo, logrando una respuesta más estable.

Ajustando el amplificador para medir la variación de voltaje en el suelo se puede utilizar este método para medir la humedad del suelo, esta alternativa por sus características es la más viable. Aprovechando la experiencia obtenida en el diseño del equipo de avance y recesión utilizando el microcontrolador MC68HC11 como unidad de procesamiento central, éste dispone de un convertidor Analógico a Digital (Anexo C) que convierte voltajes a números binarios, se puede ajustar la ganancia a las características del convertidor. Los límites de voltaje del convertidor son de 0 a 5 voltios, para lograr una mejor resolución en la medición se ajusta el amplificador para que se obtengan cero volts en suelo saturado, y cinco volts en suelo seco.

Considerando las características de diseño y funcionamiento con el equipo de Avance y Recesión, se tiene que el funcionamiento y la electrónica son muy similares. De este modo aprovechando la experiencia obtenida se tiene un gran avance en el desarrollo de equipo.

Debe operar en la parcela en forma automática durante el ciclo vegetativo del cultivo. Para que el equipo ejecute todas las funciones para que fue diseñado en forma automática (control de las mediciones, almacenamiento de la información, etc.), debe disponer de un controlador programable. El que se utiliza es el microcontrolador MC68HC11E2 (Anexo C).

Las mediciones deben ser almacenadas, todos los días a las ocho de la mañana para su posterior análisis y proceso. Para almacenar la información generada durante el tiempo que esté operando el equipo, se utiliza la memoria EPROM 27512.

El equipo debe disponer de una gráfica luminosa donde muestre el perfil de humedad del suelo. Para facilitar la interpretación en campo de la información generada por los sensores, el equipo debe contar con una gráfica luminosa que muestre el perfil de humedad del suelo.

El equipo debe disponer de un suministro propio de energía. El equipo electrónico será alimentado por una batería de efecto electrólisis (batería automovilística) de 12 Volts c.d. y 40 Amper/hora, además de una fuente auxiliar de 8 pilas de 1.5 V.

Debe ser de fácil operación para el usuario. El equipo dispondrá de un teclado (el operador puede introducir la fecha y hora para indicar las condiciones iniciales de operación) y una pantalla (display) esto facilita el intercambio de la información entre el equipo y el operador, además de mostrar la información a tiempo real generada por los sensores. La pantalla utilizada es de Cristal Líquido (LCD) activado por frecuencia de 4 1/2 dígitos, con siete segmentos cada uno.

Debe ser lo mas estándar posible, de vanguardia y de bajo costo. Para facilitar su diseño y fabricación el equipo se divide en módulos. Esto presenta varias ventajas, estandariza la fabricación, facilita la actualización, y por lo tanto, reduciendo los costos.

6.2.2 Descripción del sistema

Para facilitar el diseño y fabricación del medidor de humedad, el equipo está compuesto por módulos, los cuales se muestran en la figura 6-3.

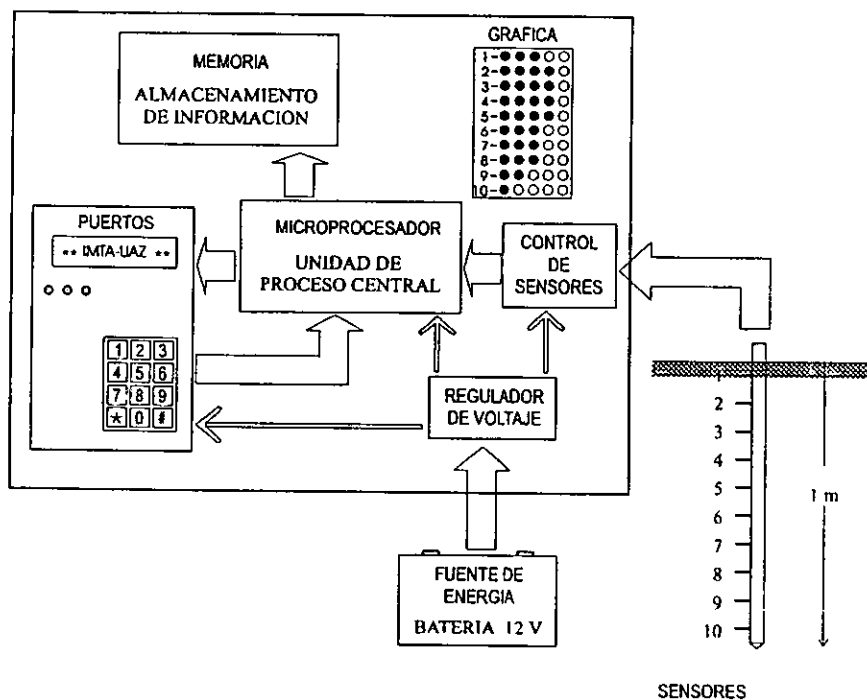


Figura 6-3 Módulos del Medidor de Humedad.

Los módulos principales son:

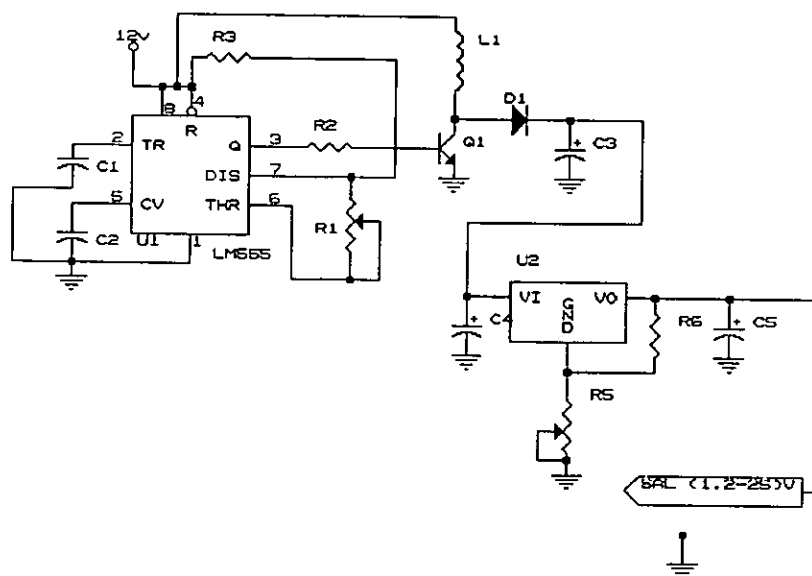
- Fuente de energía
- Microcontrolador
- Memoria
- Control de puertos
- Fuente de sensores
- Gráfica

Se describe a continuación las características principales de los módulos.

6.2.2.1 Fuente de energía

Su función principal es proporcionar los voltajes adecuados que requieren los diversos componentes electrónicos para su funcionamiento.

La fuente de energía principal es una batería automotriz de 12 V c.d. a 40 Amperes/hora. (o de una fuente secundaria de 8 pilas de 1.5 Volts). Como la mayoría de los componentes operan a 5 V c.d., este módulo contiene un regulador de 5 V formado por un circuito integrado y componentes pasivos (resistencias, capacitores y un disipador de calor).



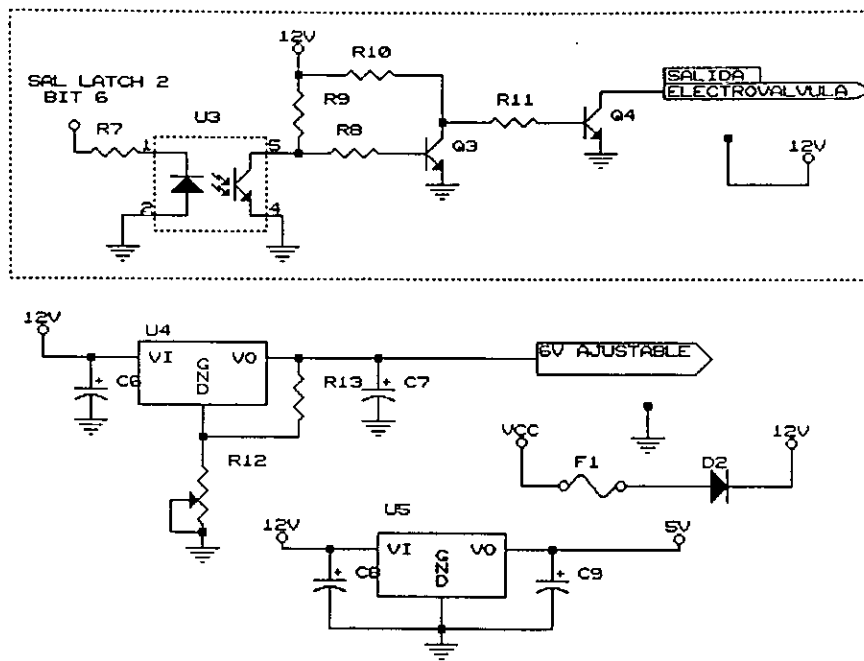


Figura 6-4 Diagrama eléctrico de la tarjeta de fuente de energía.

La memoria EPROM requiere dos voltajes, 6 V c.d. en modo pasivo y 13 V c.d. al grabar los datos. Para obtener los 6 V, se regula directamente de la fuente de 12 Volts; en el caso de los 13 V, es necesario elevar los 12 V a 24 V, para después regularla a 13 V. En ambos casos se utilizan circuitos integrados (un transformador y un regulador de voltaje). Este módulo contiene, además; un diodo de protección al sistema en caso de que la batería sea conectada incorrectamente, un fusible de protección a sobrevoltajes y componentes pasivos. Se muestra el diagrama eléctrico del módulo de fuente de energía.

6.2.2.2 Microcontrolador

Es el módulo que controla el funcionamiento electrónico del equipo. Como en el equipo de avance y recesión, él modulos seleccionado es el microcontrolador MC68HC11E2 para que sea la unidad de proceso central. Este dispositivo contiene el programa que electrónicamente controla el funcionamiento de los módulos, el teclado, la pantalla, y la lectura/almacenamiento de los datos.

6.2.2.3 Memoria

Como se describe en el Anexo C para almacenar la información se utiliza una memoria 27512. Este modulos está conectado eléctricamente al microcontrolador, ya que este, además de procesar la información introducida desde el teclado y de los sensores, debe direccionar la lectura/escritura de los datos en la memoria (la grabación de un dato en la ocurre en un tiempo de 1 milisegundo).

Este modulo está localizado en una zona que facilita la colocación y extracción de la memoria sin desarmar el medidor de humedad. Se muestra el diagrama eléctrico.

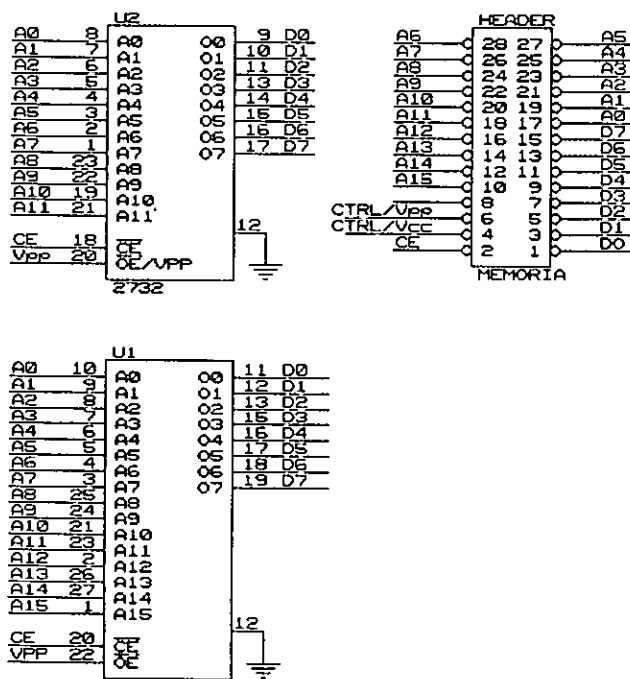
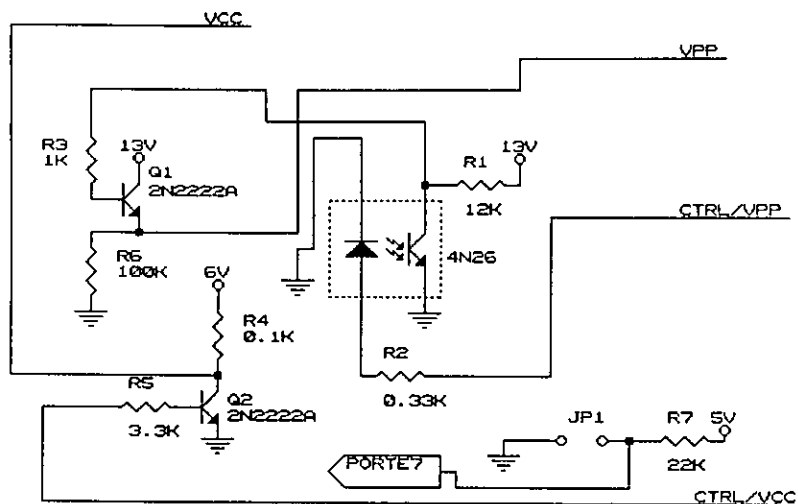
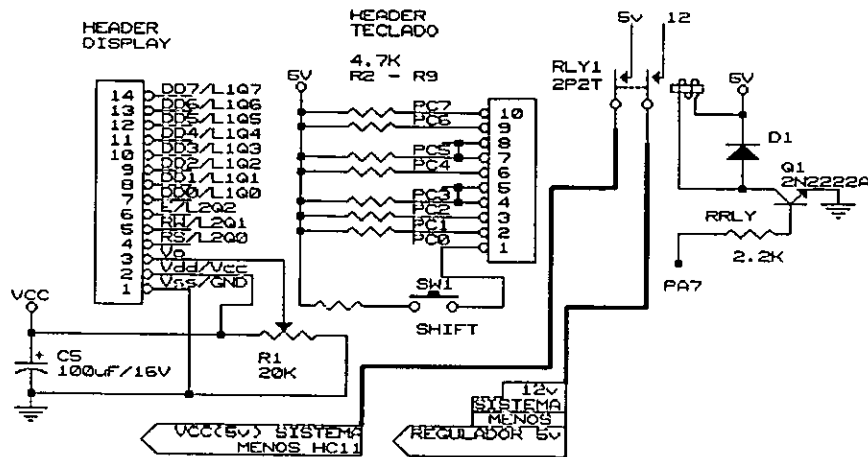
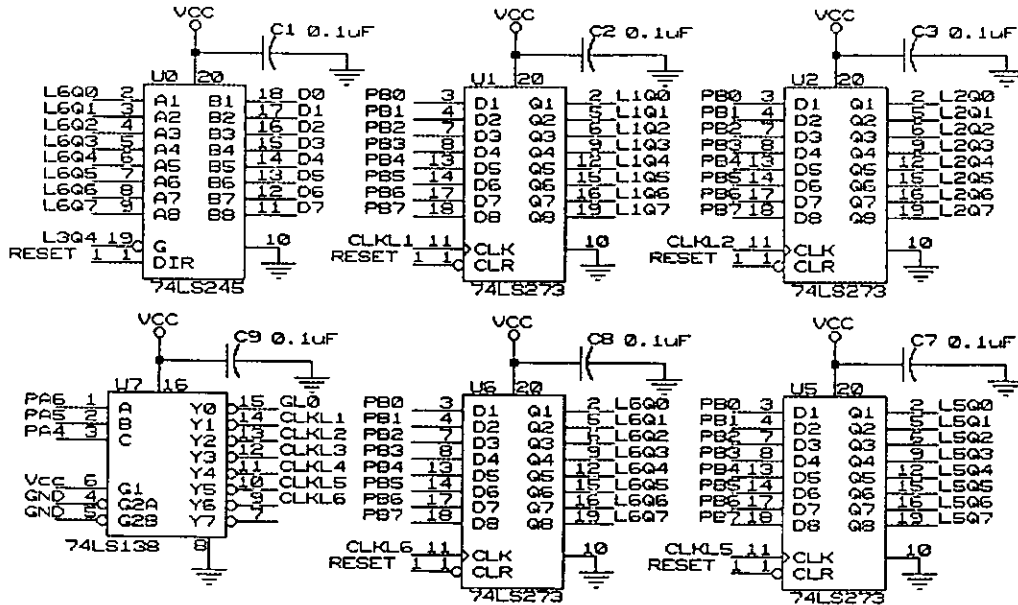


Figura 6-5 Diagrama eléctrico de la tarjeta de memoria.

6.2.2.4 Control de puertos

Este módulo direcciona el envío y recepción de datos entre el microcontrolador y el teclado, monitor y sensores, además del almacenamiento de la información en la memoria. Si el microcontrolador controlara simultáneamente todas estas actividades, tendría operar a una velocidad muy alta de proceso. Para evitarlo, se tiene circuitos auxiliares que atienden exclusivamente al teclado y a la pantalla, mientras el microcontrolador procesa los datos y los almacena en la memoria a una baja velocidad de proceso (2 Mhz). Estos circuitos se conocen como puertos. Se muestra el diagrama eléctrico.



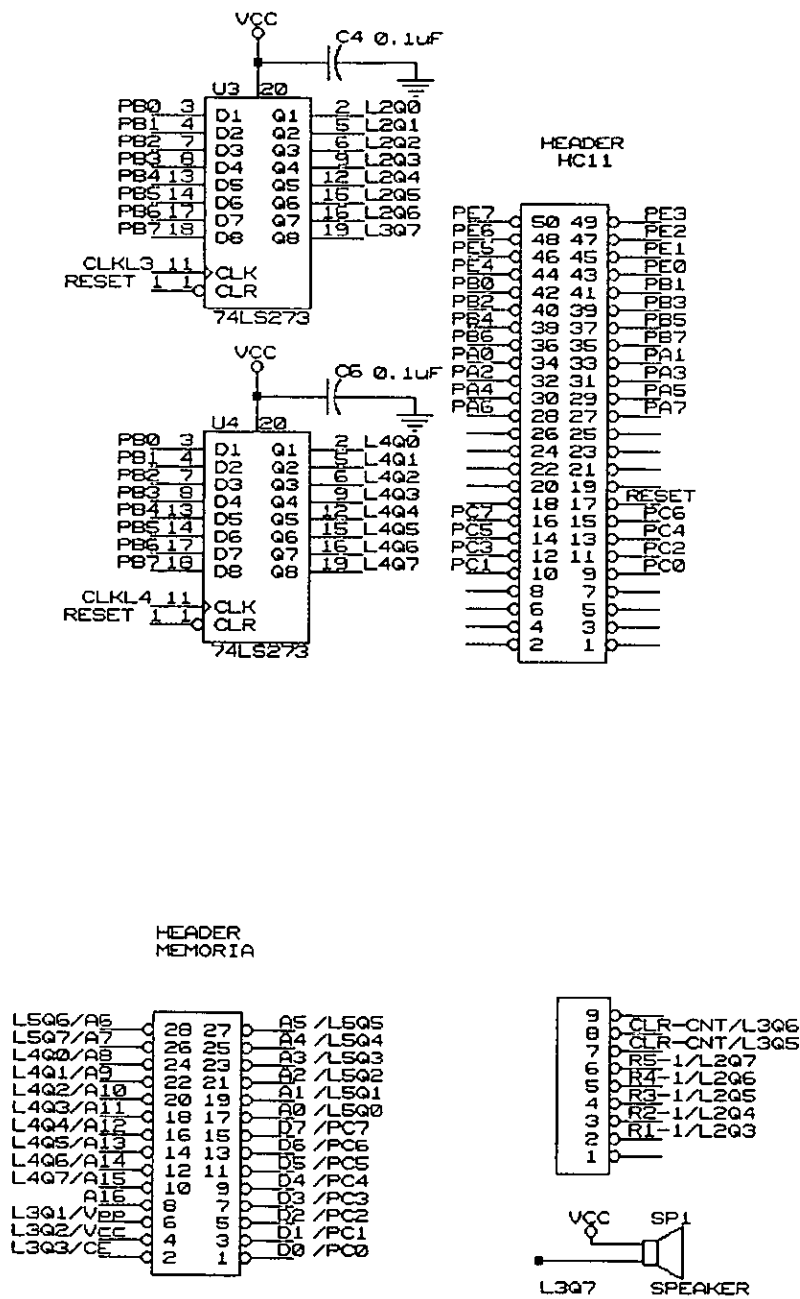
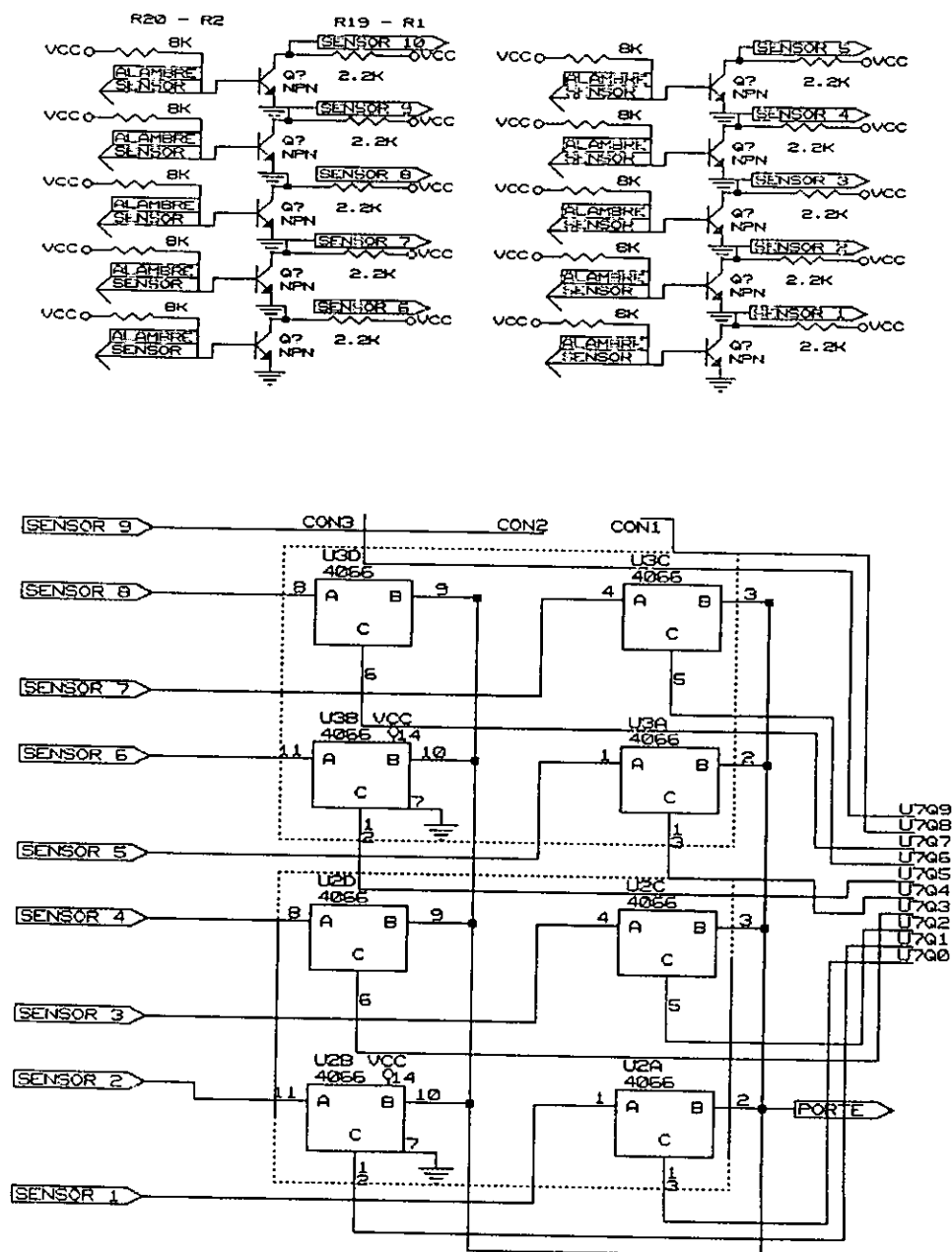


Figura 6-6 Diagrama eléctrico de la tarjeta control de puertos.

6.2.2.5 Control de sensores

Este módulo controla la recepción de los datos de los sensores por medio de un cable plano (DB). Como la información para cada sensor es transmitida en forma independiente es necesario disponer de un circuito que procese la información y la transmita al microprocesador a través de un solo canal. Este circuito se denomina multiplexor. De esta manera, el microcontrolador lee la información proveniente de los diferentes canales y los almacena en la memoria en forma separada. El microprocesador lee los canales en forma secuencial (400 veces por segundo). El diagrama eléctrico de la tarjeta es;



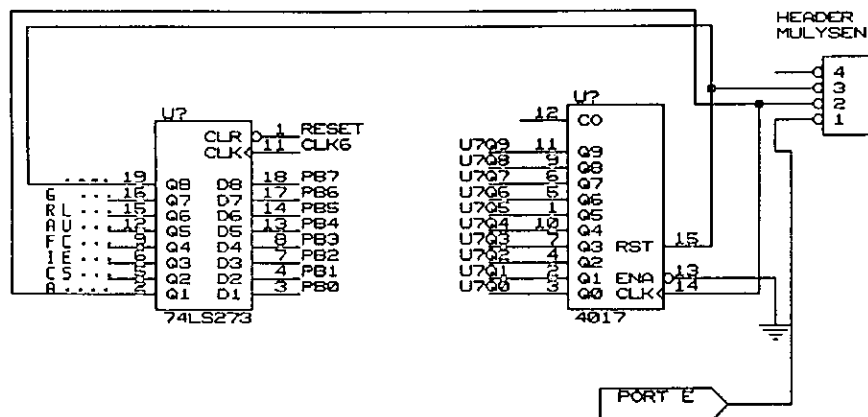


Figura 6-7 Diagrama eléctrico de la tarjeta control de sensores.

6.2.2.6 Gráfica

Se cuenta con una gráfica luminosa que visualiza el perfil de humedad del suelo, donde se muestran los diez sensores simultáneamente.

La gráfica está compuesta por diodos emisores de luz (LEDS) en formando una matriz de (10x5), o sea, diez LEDES que verticalmente representan a los sensores y cinco LEDES en la horizontal que representan el porcentaje de humedad para cada sensor.

Para ahorro de energía, la gráfica se activa solo cuando el operador presiona un botón de visualización. La gráfica tiene un tamaño de 6x2.5 cm.

6.2.3 Programación del microcontrolador

Para que el medidor de humedad opere en forma automática, es necesario programar al microcontrolador. A continuación se describen las funciones que debe ejecutar el equipo.

1. Las funciones principales consideradas que debe realizar el sistema son:

- presentar en la pantalla las siglas de las instituciones que contribuyeron en la realización del mismo.
- presentar en la pantalla los datos introducidos correspondientes a la fecha y hora.

- al presionar cada tecla, se presente en la pantalla el número correspondiente.
 - en caso de introducir un dato incorrecto para la fecha y la hora, sea posible corregirlos.
 - una vez aceptada la fecha y hora, estos deben ser almacenados en la memoria EPROM.
 - almacenar los datos a las 8:00 AM en la memoria EPROM.
 - para ahorro de energía, el sistema debe contar con un circuito que apague a los componentes excepto al microcontrolador y encenderse a las 8:00 AM para grabar los datos y apagarse nuevamente.
2. Considerando los requerimientos anteriores se desarrolla el diagrama de flujo.
 3. Se edita el diagrama de flujo en un lenguaje de programación (ensamblador). en este caso, se utilizó el compilador de Pascal.
 4. Se codifica el programa a formato binario o hexadecimal.
 5. Se transfiere el programa desde la computadora al puerto serial de la tarjeta EVBU, siendo almacenado en la memoria EEPROM del circuito. Una vez almacenado el programa en el microcontrolador, este se ejecuta cada vez que el equipo es encendido.

En caso de que se presenten errores de ejecución del programa debe repetirse el procedimiento descrito previamente desde el paso 1.

6.2.4 Fabricación del sistema

Basados en los diagramas eléctricos se fabrican los módulos. Los componentes electrónicos de cada módulo son implementados en una tarjeta perforada de baquelita. Esto facilita el montaje de los componentes y considerando que se pueden presentar cambios en los circuitos diseñados, se decidió alambrear y soldar los componentes a la tarjeta.

Para el equipo se requieren tarjetas para:

- Pantalla
- Teclado
- Fuente de energía
- Memoria
- Control de sensores
- Control de puertos
- Gráfica

Una vez fabricados los módulos, estos se fijan a un soporte de aluminio. Para conectar los módulos a la tarjeta EVBU se utilizan conectores a las terminales (tipo peine) atornillados al soporte de aluminio.

El espacio que ocupan los módulos una vez montados es de 12x12x18 cm.

Para evitar dañar al sistema electrónico debido a oxidación ó falsos contactos producidos por insectos o polvo, el equipo debe estar alojado en una caja impermeable y sellada. Después de analizar diferentes alternativas se decidió utilizar una hielera (de las utilizadas para transportar medicinas) marca COLEMAN, con tapa deslizable, el cual cumple las características deseadas para alojar el equipo electrónico. Su peso es de 2 Kg

6.2.5 Selección de los sensores

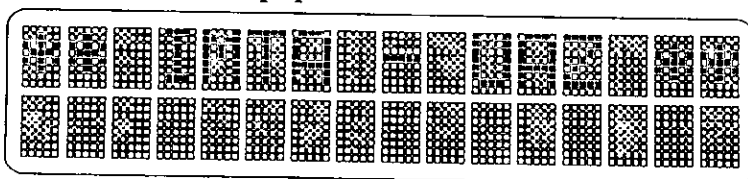
Buscando entre diferentes alternativas se determinó fijar los sensores a un tubo de cobre de 2" Ø en el cual en su parte superior se atornillará la caja que contiene el equipo electrónico. Un cable plano (utilizado en las comunicaciones internas de las computadoras) será el utilizado para transmitir las señales en los sensores y el equipo electrónico. Los hilos utilizados por los sensores son dos, uno común, que es el polo negativo (tierra) y otro independiente para cada sensor correspondiente al polo positivo. De esta forma la información leída por cada sensor es enviada en forma independiente de las restantes.

Se utilizaron los hilos del cable plano como sensores, después de 2 meses de estar enterrados se observó que tienden a oxidarse y a desprenderse del cable. Para salvar este problema se probaron diferentes materiales para utilizarlos como sensores, se deseaba conocer sus ventajas, su vida útil e inconvenientes de su uso en condiciones reales; se probaron diferentes materiales, dos de ellos presentaron ventajas respecto a los demás, el plomo y el acero inoxidable. Los demás se desecharon ya que la mayoría se oxidaban con facilidad.

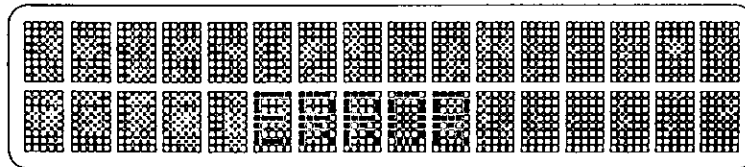
Para probar los materiales en largos períodos de tiempo y a condiciones similares se decidió fabricar dos grupos de sensores, cinco de plomo y cinco de acero inoxidable y se montaron en el tubo en orden alternado.

6.3 Activación del equipo

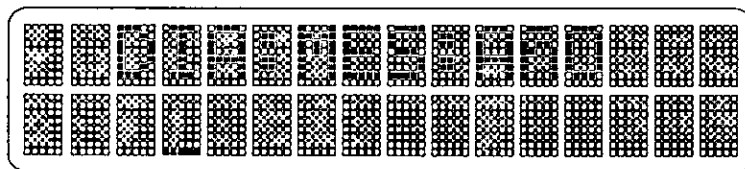
Para activar el sistema, basta con mover el interruptor de encendido a la posición correspondiente, e inmediatamente aparecen las siglas de las instituciones que participaron en la realización del equipo.



Este letrero permanece durante 5 segundos, mientras el microcontrolador evalúa al sistema electrónico (Autoverificación, módulos, memoria, teclado, gráfica, pantalla, sensores y voltaje de la batería). En caso de que un módulo esté dañado, la batería no tenga el voltaje adecuado (12 V) o el microcontrolador tenga un problema de operación, en el segundo renglón de la pantalla se mostrará el siguiente mensaje acompañado de un tono preventivo.



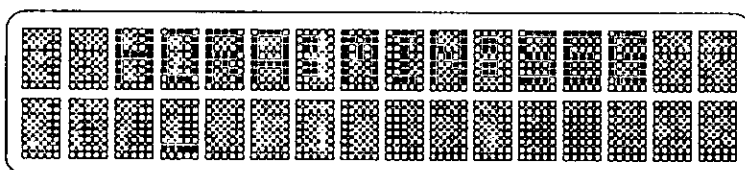
Si el equipo funciona correctamente, en la pantalla aparece la pantalla para la fecha.



Por medio del teclado se introducen los datos correspondientes a la fecha. El formato es 01-31: 01-12: 0-99. En caso de introducir un dato fuera de formato, se presentará un error acompañado de una señal auditiva.

En caso de error al teclear los datos, se pueden introducir nuevamente presionando la tecla de cancelación (*). Si los datos son correctos se oprime la tecla de aceptación (#).

Una vez aceptado los datos para la fecha, se indican los datos para la hora.



para introducir los datos se sigue un procedimiento similar para la hora. El formato es 00-23:00-59:00-59.

Una vez presionado la tecla de aceptación para la hora, el equipo está listo para registrar y almacenar las mediciones que se tengan durante el ciclo vegetativo.

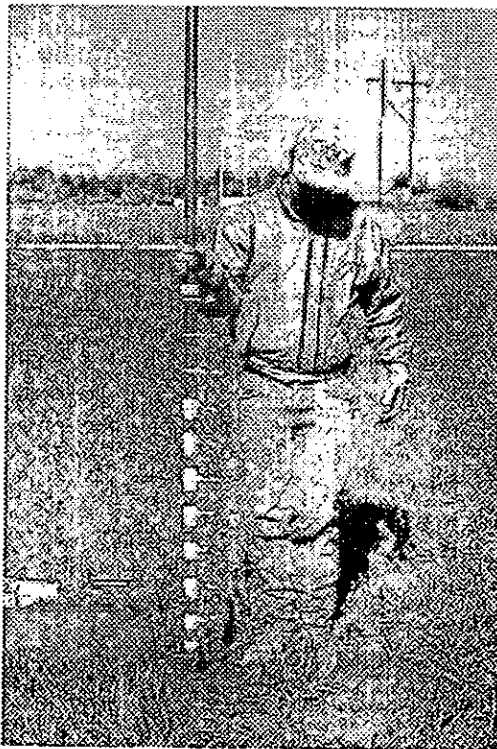
6.4 Funcionamiento del medidor de humedad

El proceso de instalación y operación del medidor de humedad se resume en las siguientes etapas (Trinidad, 1996):

- 1) Selección del lugar donde se instala el equipo
- 2) Instalación del equipo
- 3) Medición
- 4) Traslado de la información
- 5) Interpretación de la información

6.4.1 Selección del lugar donde se instala el equipo

Para obtener mediciones de humedad representativas a la parcela o al grupo de surcos que se va a regar, el equipo debe instalarse en una zona con características similares a la parcela o grupo de surcos (tipo de suelo, grado de compactación, cobertura vegetal, etc.). El equipo no debe instalarse en zonas alteradas debido al paso de las llantas del equipo agrícola o labores culturales; ya que la superficie del suelo tiene un mayor grado de compactación, y, por tanto, se tendrá una reducción en la velocidad de infiltración, dando como resultado condiciones de humedad muy diferentes a la del resto de la parcela.



Fotografía 6-1 Instalación de los sensores del medidor de humedad en la parcela.

6.4.2 Instalación del equipo

Una vez seleccionado la zona donde se va a instalar el medidor de humedad, se excava un pozo de 20 cm de diámetro y una profundidad de 1 metro, se coloca el tubo con los sensores, se rellena el pozo y se compacta la superficie para evitar que el tubo se mueva lateralmente. Se atornilla el equipo electrónico al tubo, se energiza por medio de

la batería automotriz, y se hace una prueba al equipo para verificar el correcto funcionamiento del equipo.

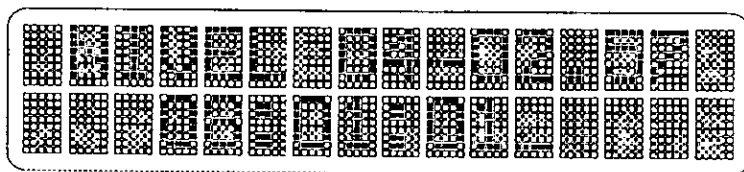
6.4.3 Medición

Como el equipo está en la parcela durante períodos de tiempo largos y como la información que se requiere es leída y grabada en la memoria, no tiene caso mantener todos los componentes del sistema energizados todo el día. Por tanto, para ahorro de energía el equipo se enciende cuando se graba la información o cuando el usuario requiera leer información.



Fotografía 6-2 Conexión del equipo electrónico a los sensores.

Cuando el equipo es activado por el agricultor, se muestra en la pantalla en orden secuencial (cada tres segundos) la información de cada sensor. Por ejemplo, la pantalla presenta la siguiente información para el sensor 4 leído el 15 de marzo de 1996 a las 8 :00 AM.



En la parte inferior se muestra la hora en forma continua.

Para ver la información en la gráfica, se presiona el botón de activación, y se observa a través de un lente los LEDS que están encendidos para cada sensor, de esta forma es posible tener una idea aproximada del perfil de humedad en el suelo.

A las 8 :00 AM de cada día se graba la información de los sensores en la memoria.

6.4.4 Traslado de la información

Para procesar la información almacenada en el circuito se retira la tapa en la carátula principal del medidor y se extrae la memoria. Deben tenerse los cuidados descritos en el capítulo 4 para garantizar la integridad de la información.

6.4.5 Interpretación de la información

Para la recuperación y manipulación de la información se sigue un procedimiento similar al del Equipo de Avance y Recesión.

El formato de almacenamiento en la memoria es sencillo de interpretar, ya que solo se graban los datos de la fecha, hora, número de sensor, y el valor del voltaje correspondiente al porcentaje de humedad. Contiene, además, algunos indicadores que separan los datos entre sensores. Para facilitar el proceso se desarrollará un programa en C el cual lea, procese la información de la memoria y la presente en formatos de fácil interpretación con opciones de graficación e impresión.

6.5 Medición de la humedad con el equipo en parcelas

Durante los ciclos otoño-invierno de 1995 y 1996 se probó en campo el medidor de humedad en la parcela experimental de la UAZ. Como se describe en el Anexo A, se tienen parcelas con diferentes características (longitud de surco, gasto aplicado, etc.) regadas por medio de la Válvula para riego intermitente, Tanque de Descargas de Fondo y el Diabeto; para cada ciclo el medidor se instaló en un sistema diferente.

En el ciclo otoño-invierno de 1995 el medidor de humedad se instaló en la parcela regada con la Válvula electromecánica. Para detectar los posibles problemas de funcionamiento (errores de ejecución del programa, errores al momento de hacer las lecturas o en el almacenamiento de la información en la memoria durante los riegos), se instaló y se operó el equipo. Esto se realizó durante 5 riegos. En este ciclo el equipo no grabó los datos en la memoria, después de revisar el programa, se encontró que el tiempo de acceso a la memoria para almacenar los datos (definido por el programador), no correspondía al tiempo de acceso de grabación a la memoria (definido por el fabricante del circuito). Una vez detectado el problema, se actualizó el programa con el nuevo tiempo de acceso a la memoria.

Para el siguiente ciclo (primavera-verano 1996) se instaló el medidor de humedad en la parcela regada con el Diabeto. Durante este período no se presentaron fallas de funcionamiento, por lo que se procedió a obtener mediciones de humedad en la parcela con el equipo electrónico y personal de campo.

Para el ciclo otoño-invierno (1996) se instaló en la parcela regada con el Tanque de Descargas de Fondo 1.

En los sistemas antes mencionados, previamente a la instalación del equipo, se seleccionó una zona con características similares a los de la parcela. Se instaló y se activó el equipo, actualizó la fecha, hora y se cubrió con polietileno para protegerlo de humedad, polvo e insectos.



Fotografía 6-3 *Lectura de voltajes*

6.5.1 Calibración del medidor de humedad

Es deseable que el medidor de humedad muestre porcentajes de humedad en vez de los voltajes. Para ello es necesario correlacionar las mediciones de los voltajes a los obtenidos con el método gravimétrico (este es el método utilizado para calibrar cualquier equipo electrónico por dar los resultados más confiables). Para lograrlo es necesario disponer de gran cantidad de mediciones que estén dentro del rango de operación del equipo, y ajustar los datos del voltaje vs humedad a una ecuación de predicción que describa el contenido de humedad respecto al voltaje. Enseguida se describe la metodología utilizada:

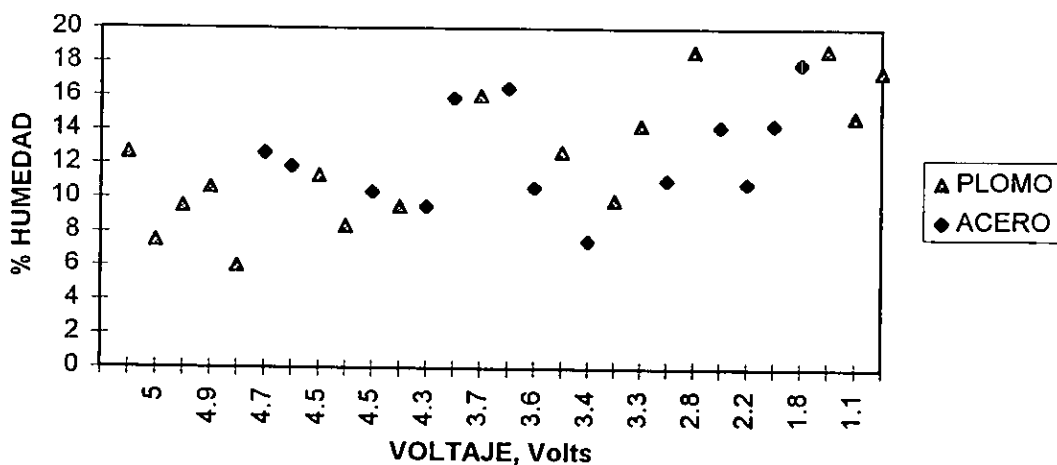
Realizar lecturas y obtener muestras de suelo cada tercer día. Con un barreno se obtuvieron muestras de suelo a profundidades de 0-0.15, 0.15-0.30, 0.30-0.45, y 0.45-0.60 cm de profundidad, almacenándolas en frascos de vidrio.

Evaluar el contenido de humedad del suelo con el método gravimétrico. Las muestras

recolectadas se secaron en laboratorio durante 24 horas a una temperatura de 110° C. Transcurrido el tiempo necesario, se pesó el suelo seco y se utilizó la ecuación 5.1 para determinar la humedad del suelo:

Para correlacionar los datos a una ecuación de predicción, se compararon datos de voltaje vs humedad en una gráfica con escala aritmética. Se muestran a continuación la gráfica de voltaje vs. % de humedad de suelo.

Figura 6-8 Calibración del medidor de humedad.



Analizando los datos:

Para suelo seco, existe cierta tendencia, el voltaje es cercano a 5 Volts. Al incrementarse la humedad del suelo disminuye la resistencia del suelo y, por tanto, el voltaje registrado.

Considerando la totalidad de los datos, los valores son independientes al tipo de material que están fabricados los sensores.

Con los datos obtenidos no es posible obtener el modelo ajustado, ya que no se tiene una correlación aceptable entre el voltaje y la humedad. Con esta información no es posible concluir si los contenidos de humedad obtenidos por el método gravimétrico son correctos, ya que se requieren hacer mas mediciones.

En el ciclo primavera-verano 97 se realizarán mas mediciones de voltaje a humedad para calibrar el medidor de humedad. Las posibles causas de la no aparente relación pueden ser a las condiciones en la parcela, que se tengan diferentes condiciones de humedad de los sensores y de las muestras obtenidas, ya que la medición en ambos casos es puntual; otra causa podría ser que al realizar el muestreo constante en la misma zona se ha observado que según transcurre el ciclo, el suelo es compactado por el paso de las personas y, por tanto, se tienen diferentes condiciones. Para mediciones

posteriores se deben tomar en cuenta estas posibles causas de la no aparente relación entre el contenido de humedad y el voltaje registrado por el equipo electrónico.

6.5.1.1 Medición de la humedad en el perfil del suelo

Con la información obtenida hasta el momento es posible describir la variación de la humedad en el perfil del suelo. En la tabla se muestran los voltajes medidos el día 15 y 16 de marzo de 1996. El día 14 de marzo se regó la parcela.

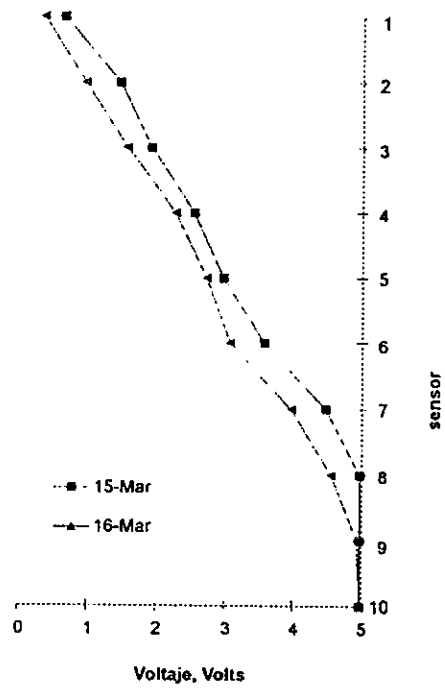
Cuadro 6-2 Medición de la humedad en el perfil del suelo.

Nivel Sensor	Voltaje	
	15 de marzo	16 de marzo
01	0.70	0.40
02	1.50	1.00
03	1.95	1.60
04	2.57	2.30
05	3.00	2.76
06	3.60	3.10
07	4.50	4.00
08	5.00	4.58
09	5.00	4.96
10	5.00	5.00

Comparando los voltajes para el día 15 y 16, el voltaje desde el sensor 01 hasta el 10 aumenta, o sea, cerca de la superficie el suelo está casi saturado y al incrementarse la profundidad, la humedad es menor.

Comparando la información para los mismos sensores en días consecutivos, el voltaje disminuye en mayor proporción cerca de la superficie, respecto a los estratos inferiores. Esto se explica por una sola razón. El agua que estaba cerca de la superficie del suelo se ha desplazado hacia abajo hasta una profundidad de 90 cm. En 48 horas el agua todavía no ha llegado a 1.0 metro de profundidad. Esta es una de las ventajas que presenta el equipo diseñado respecto a las existentes en el mercado, se puede conocer en todo momento el perfil de humedad del suelo y su variación. Puede aplicarse para fines de investigación, esto posibilita la validación de modelos numéricos de infiltración o flujo en medios porosos a bajo costo sin alterar las condiciones del suelo ni al cultivo.

Figura 6-9 Variación de la humedad en el perfil del suelo



CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En México existen cerca de 6.3 millones de hectáreas bajo riego, en el 92 % de dicha superficie se aplica el riego por gravedad. Sin embargo, a pesar de que estos sistemas de riego son los más utilizados (y los más arraigados por razones de herencia y tradición histórica) y los que más baja eficiencia tienen en el manejo y aprovechamiento del agua. Ante este panorama resulta claro que estos sistemas deben ser modernizados y tecnificados considerando la infraestructura de riego existente en el país.

Una técnica para mejorar la eficiencia del riego parcelario es el riego intermitente.

En este trabajo se presentó la descripción de tres dispositivos acordes a las condiciones económicas y sociales para la aplicación del riego intermitente que mejoran la eficiencia del riego (70-80%) y reducen el tiempo del riego (20-25%), respecto al método tradicional.

El primero de ellos se denomina Diabeto y es el sistema más económico para mejorar la eficiencia del riego en melgas alimentadas por caudales pequeños (1-10 l/s). Se completó la metodología de diseño y operación en parcelas productivas. Este sistema, además, puede ser utilizado para regar surcos por medio de tubería de compuerta con mejores resultados que en melgas y regadera.

El segundo dispositivo, Tanque de Descargas de Fondo, aprovecha pequeños caudales para riego (0.05 a 10 l/s) aplicable en el semidesierto. Este sistema está constituido por

un tanque de almacenamiento en el que se aloja un dispositivo basado en automatización fluidica, que permite hacer la apertura y cierre de una compuerta de fondo para descargar por medio de una tubería de compuertas a la parcela. Se presentaron las características y correcciones a las ecuaciones de diseño. Se presentó una nueva metodología que proporciona el número de compuertas a regar a partir de una de las variables más importantes en el diseño, la duración del ciclo de vaciado.

Se desarrolló un programa que simplifica el diseño del TDF.

Se presentaron dos variantes del TDF, el portátil y el utilizado en huertos familiares, este último proporciona una alternativa de producción agrícola con fines de autoconsumo.

El tercer dispositivo, la Válvula electromecánica para riego intermitente es un sistema para regar en parcelas de longitud mayor a los 250 metros alimentadas con gastos de 10 hasta 50 l/s. La válvula es un sistema programable que sustituye a las de importación, evitando con ello la dependencia tecnológica. Se presentó una descripción del diseño, construcción y operación en parcelas productivas, mostrando sus bondades respecto a las de importación.

Con estos dispositivos, se demuestra que es posible modernizar el riego por gravedad en forma masiva, principalmente en las regiones semiáridas del país. Donde se pueden aprovechar caudales tan bajos que con el riego tradicional no sería posible. Además, de los ahorros de agua, recursos humanos y energía.

Se presentaron dos equipos como apoyo al diseño y evaluación de los sistemas de riego por gravedad.

El primero de ellos, el Equipo de Avance y Recesión puede utilizarse confiablemente en la medición del avance y recesión del flujo durante el riego. De esta forma es posible caracterizar de una manera rápida y sencilla los parámetros de infiltración del suelo sin tener que hacer mediciones con personal de campo.

El otro equipo, Medidor de Humedad, puede ser utilizado para determinar la variación de la humedad en un perfil de suelo de 1 metro de profundidad.

Se recomienda realizar más mediciones en condiciones más controladas para calibrar el Medidor de Humedad.

Se recomienda desarrollar programas de fácil manejo, para procesar la información generada por el Equipo de Avance y Recesión, y el Medidor de Humedad en formatos gráficos para su mejor interpretación.

ANEXOS

A

PARCELA EXPERIMENTAL DE LA UAZ

En 1989 el IMTA y la UAZ celebraron el Convenio General de Colaboración para el desarrollo de programas específicos de Investigación experimental en uso eficiente del agua para la agricultura.

Uno de los objetivos principales de este convenio, fue el desarrollo y transferencia de tecnología para la aplicación del riego intermitente. Para ello fue necesario establecer un sistema experimental para validar y evaluar en parcelas productivas el riego intermitente y la tecnología generada por el IMTA y la UAZ. Para llevar a cabo lo anterior, fue necesario localizar una parcela donde se implementara el sistema experimental (Barrios y Trinidad, 1993).

Localización de la parcela.

La parcela debía cumplir las siguientes características:

- que tuviera la suficiente extensión para dividirlo en subparcelas donde se implementara los diferentes sistemas de riego intermitente.
- que se dispusiera de un gasto superior a los 30 l/s.
- que tuviera surcos de longitud superior a 400 m.
- que el propietario estuviera de acuerdo en facilitarla el tiempo necesario para desarrollar los trabajos.
- que tuviera la pendiente adecuada para el riego por gravedad.
- que se localizara a poca distancia de la Ciudad de Zacatecas.

Al disponer de un sistema experimental con las características anteriores, es posible validar los dispositivos de riego intermitente (Diabeto, Tanque de Descargas de Fondo y Válvula electromecánica) en parcelas de diferentes características. Por lo anterior se dispone de parcelas con diferentes condiciones de operación para probar el equipo electrónico diseñado por la UAZ (Equipo de Avance y Recesión, el Medidor de Humedad y el Pluviógrafo).

Después de analizar diferentes alternativas, se acordó implementar el sistema experimental en una parcela de la Facultad de Veterinaria de la UAZ. Como la parcela no disponía de la infraestructura necesaria para aplicar el riego intermitente fue necesario equiparla. A continuación se describe la planeación y diseño del sistema experimental establecido.

Planeación del sistema experimental.

La planeación consistió en las siguientes etapas:

- levantamientos topográficos
- análisis agrológico del suelo
- diseño del sistema experimental
- construcción del sistema
- diseño de los riegos

Levantamiento topográfico

El levantamiento topográfico lo realizó una brigada de técnicos especializados con equipo de tránsito y material complementario, se obtuvieron en una cuadrícula la configuración del terreno. Se dibujaron con los datos de campo los planos topográficos, en los que se plasmó la altimetría y planimetría de la parcela.

Análisis agrológico del suelo

En esta etapa, se determinaron las características agrológicas del suelo, como: textura, capacidad de campo, punto de marchitamiento permanente, nutrientes, salinidad, etc. Para ello se tomaron muestras de suelo en diferentes puntos de la parcela. Al comparar los resultados de los estudios, se encontró que las características del suelo son prácticamente iguales en toda el área de la parcela.

Uno de los parámetros más importantes en el riego es la capacidad de infiltración del suelo. Una sobreestimación de la capacidad de infiltración del suelo, resulta en un sistema de riego con una longitud de surco menor y tiempo de riego menor a lo estimado, originando mayores pérdidas por coleos.

Por el contrario, subestimar la capacidad e infiltración resulta un sistema de riego con una longitud de surco mayor; en el que se tendrán pérdidas por infiltración mayores a

las estimadas. De acuerdo con los resultados de textura de suelo, se realizaron pruebas de infiltración en lugares escogidos aleatoriamente.

Curvas de avance de flujo en el surco

Se realizaron pruebas de avance del flujo en el surco tanto para riego continuo como para riego intermitente, estas variables serían utilizadas para diseñar el riego en las diferentes parcelas.

Diseño del sistema experimental

Con la información de los planos de la parcela se definieron las subparcelas y sus características (longitud de surco y ancho de cabecera). Se localizaron las cotas altas y bajas para determinar la cabecera y drenes de las parcelas. Se determinaron las zonas altas y bajas del terreno para definir la nivelación. Esta se programó para determinar las pendientes longitudinal y transversal (variables que se deben tomar en cuenta para aplicarlas al proyecto de riego. La superficie total levantada fue de 12 Ha.

De acuerdo con las necesidades, así como a los planos topográficos se seleccionaron cinco parcelas, ver figura A-1.

Con base a las dimensiones y pendiente de las parcelas se proyectaron las líneas de conducción. Después de analizar diferentes alternativas se decidió ubicarlos según se muestran en la figura A-1. Desde la pila de 17 x 17 m se conectaron dos líneas de 8" \varnothing ; una de 140 m de longitud a la parcela regada con la válvula. Al final de la tubería se instaló un hidrante provisto de una válvula para regular el flujo (30 l/s).

Otra línea de 450 m de longitud a las parcelas regadas con los TDF y Diabeto, con tomas de 4" en cada tanque para descargar 1, 2, 3 y 5 l/s respectivamente.

Para investigar las eficiencias reales entre el riego intermitente y el tradicional, en la parcela regada con la válvula se estableció una franja de 20 surcos para regarse en forma continua.

En la Tabla A-1 se resumen las características generales de las parcelas y los dispositivos.

Tabla A-1 Características de las parcelas experimentales.

Parcela	1	2	3	4	5
Dispositivo	TDF	TDF	TDF	Diabeto	Válvula
Gasto de entrada, l/s	1	2	3	5	30
Características del dispositivo	2x2x1.38m	2.5x3x1.38m	4x3x1.38m	1x4.3x1.3m	electromecánica
Longitud de surco, m.	124	105	108	110	513
Ancho de cabecera, m.	83	83	83	114	106
Pendiente longitudinal, S_o	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007
Pendiente transversal, S_t	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005

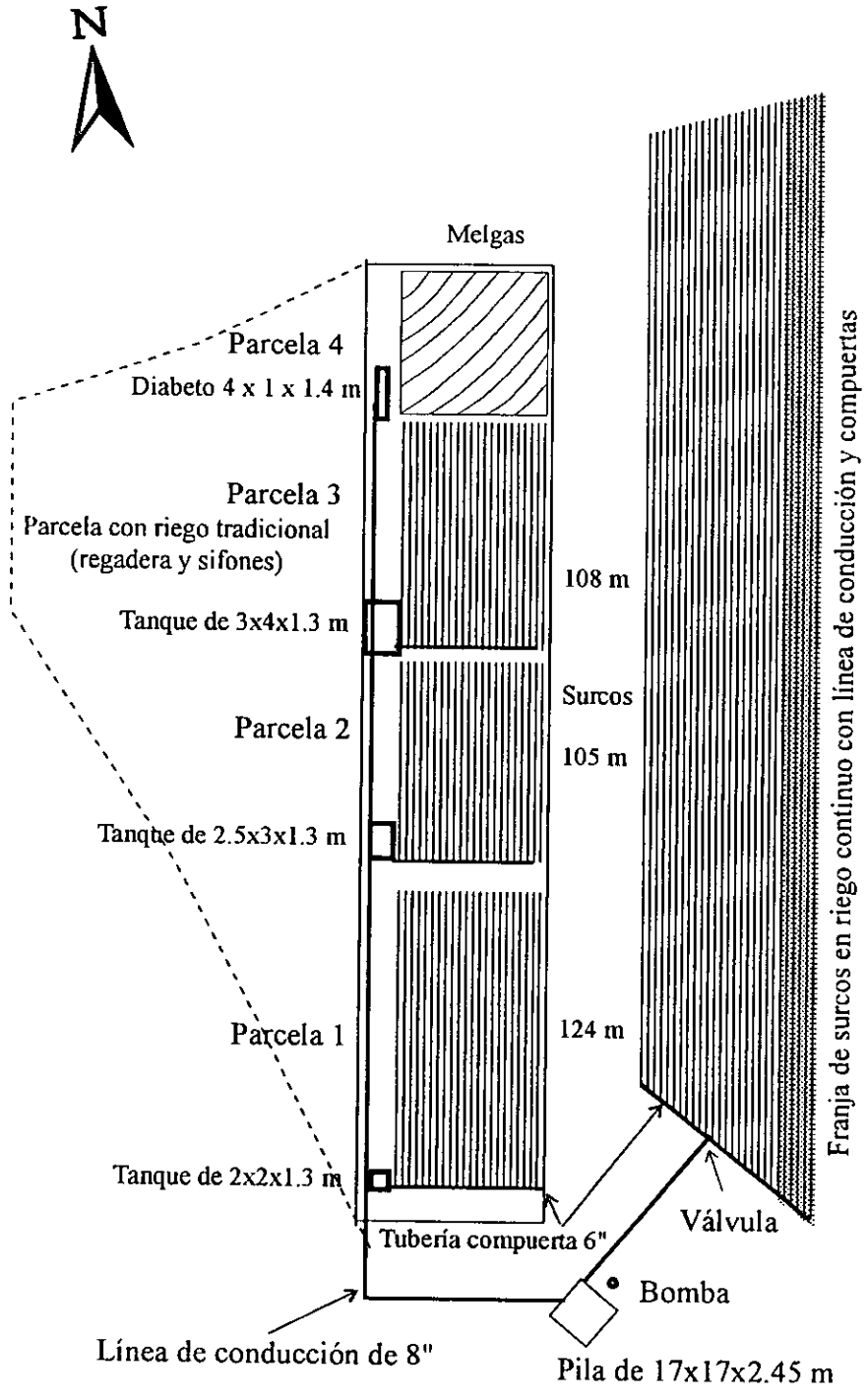
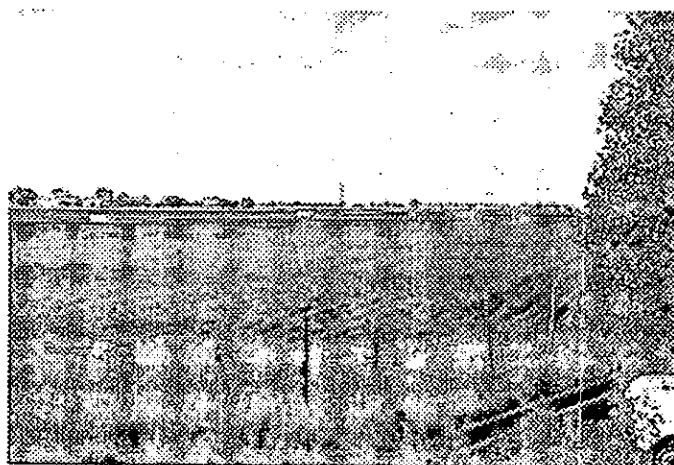
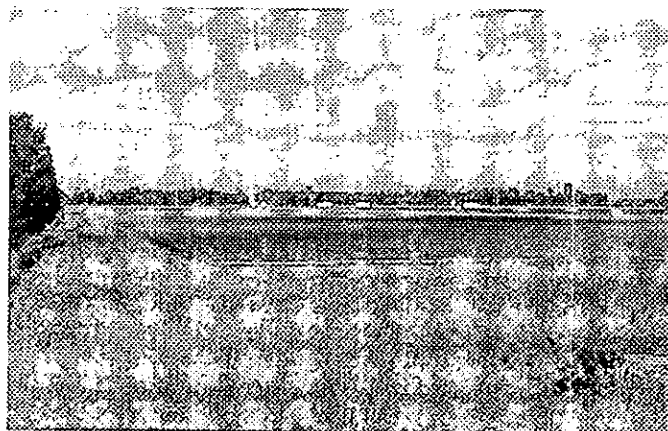


Figura A-1 Sistema de riego intermitente en parcelas experimentales de la Facultad de Veterinaria de la UAZ

En las fotografías A-1 y A-2 se muestran las parcelas regadas con el TDF y la Válvula electromecánica.



Fotografía A-1 Parcelas regadas con TDF



Fotografía A-2 Parcela regada con tubería de compuerta y Válvula Electromecánica

Programación de los riegos.

Con la información generada en los estudios previos; longitud y pendiente de los surcos, estudio agrológico y curvas de infiltración se diseñó el riego en las parcelas. Este se aplicaría cuando la humedad en el suelo alcanzara 20, 60 y 30% en las etapas vegetativa, floración y maduración respectivamente. El tipo de cultivo establecido para los ciclos primavera-verano fue maíz, y avena para los ciclos otoño-invierno.

El manejo del cultivo fue de acuerdo a las sugerencias del INIFAP, densidad de siembra, separación entre surcos y profundidad de siembra. Se programaron las fechas de fertilización, así como las labores culturales, y las medidas de control de plagas y enfermedades del cultivo.

B

TUBERIA DE COMPUERTA

En forma tradicional el riego por gravedad se aplica por medio de regaderas y sifones. Con este sistema se tienen problemas que hacen muy ineficiente el riego (grandes pérdidas por infiltración, necesidad de nivelar la regadera, requerimiento constante de mano de obra, etc.).

Para aplicar el riego en forma eficiente es necesario contar con un sistema de conducción que elimine las pérdidas, aplique el gasto deseado y que sea fácil de operar.

En el país se está popularizando el uso de la tubería de compuerta para riego (PVC) por sus características que lo hacen muy atractivo para el riego intermitente:

- existe en diferentes diámetros comerciales.
- dispone de compuertas equidistantes (0.75 - 1.00 m) donde el gasto descargado puede ser regulado en forma manual, abriendo o cerrando la compuerta.
- son ligeros comparados a los tubos de aluminio o acero.
- son flexibles, lo cual permite un mejor comportamiento a sobrepresiones momentáneas o cargas externas. Dicha flexibilidad, unida a su poco peso facilita su manejo, instalación y mantenimiento, lo que permite un ahorro en tiempo, transporte y mano de obra.
- es inerte y resistente a la corrosión.
- el acoplamiento espiga-campana facilita su montaje.
- es inerte y resistente a la corrosión.

Transporte, manejo y almacenamiento.

Transporte. Los tubos deben colocarse en superficies planas durante su transporte para evitar dañarlos o deformarlos.

Carga y descarga. Durante la carga y descarga, estos no deben arrojarse al suelo, golpearlos o someterlos a peso excesivo. Es recomendable que por lo menos dos personas se encarguen de la operación.

Manejo de los tubos. Los tubos no deben arrastrarse, golpearlos contra el suelo o con herramientas. Si no se dispone de un remolque en la parcela, los tubos deben transportarse individualmente según se muestra en la figura B-1.

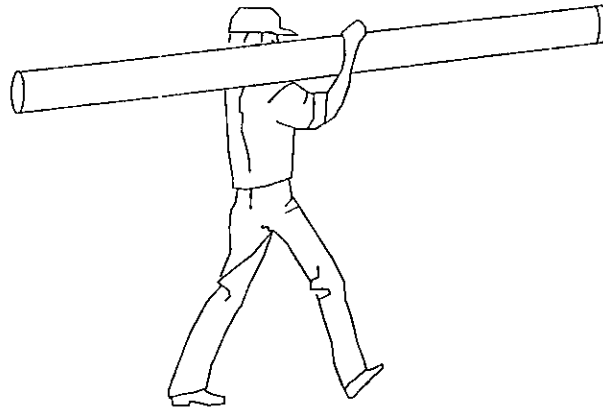


Figura B-1 *Transporte de los tubos en la parcela*

Para zonas con temperaturas bajas, el tubo de PVC reduce su resistencia a los golpes. En tales circunstancias debe procederse con más cuidado durante su manejo.

Almacenamiento. Es recomendable no tender los tubos en la cabecera de la parcela durante un largo período, sino almacenarlos en un lugar plano y nivelado.

Los tubos no deben cubrirse con lonas o hules, pues esto provoca un sobrecalentamiento que puede causar deformaciones permanentes.

Debido a que los empaques de hule son los elementos para sellar la unión entre tubos es deseable que tengan deformaciones mínimas para ello deben almacenarse en lugares frescos y sombreados. Deben entregarse en cajas o bolsas, nunca atados.

Instalación de la tubería.

La tubería de compuerta debe tenderse a lo largo de la cabecera de la parcela, desde el dispositivo de intermitencias (TDF o válvula) hasta el extremo de la parcela. Se recomienda que la campana de la tubería se coloque en el sentido contrario al flujo del agua.

Antes de acoplar los tubos es conveniente revisar el interior de cada uno de ellos, a fin de eliminar cualquier obstrucción.

Inserción de los tubos.

La inserción de los tubos se lleva a cabo desde el dispositivo de intermitencia (TDF o válvula) hasta el extremo de la parcela, empujando la espiga dentro de la campana en un movimiento rápido. Cualquier resistencia que se oponga al paso del tubo dentro de la campana indicará que el anillo está mal colocado o mordido, por ello es recomendable desmontar la unión y colocar correctamente el anillo.

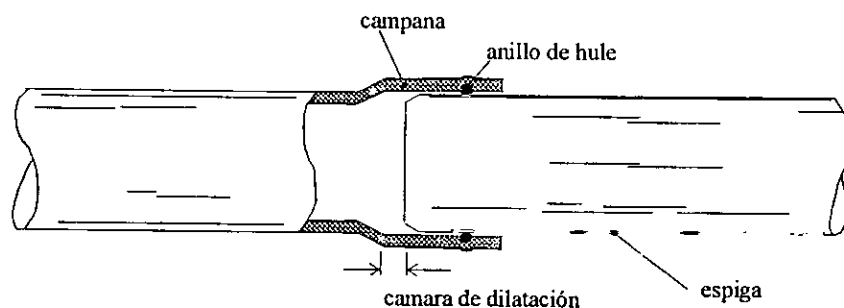


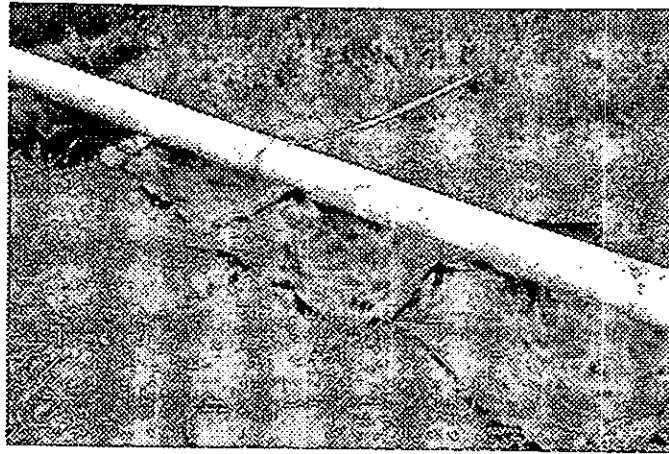
Figura B-2 Conexión espiga-campana

Una forma sencilla de comprobar que el anillo está colocado correctamente, el tubo debe girar con cierta facilidad; si no es así, el anillo está mordido.

Ya que la tubería trabaja a presión interna y tiene un extremo cerrado, se producen esfuerzos axiales apreciables. Por ello es necesario colocar un atraque para evitar que los empujes producidos en cada descarga muevan la tubería y se afecten los acoplamientos.

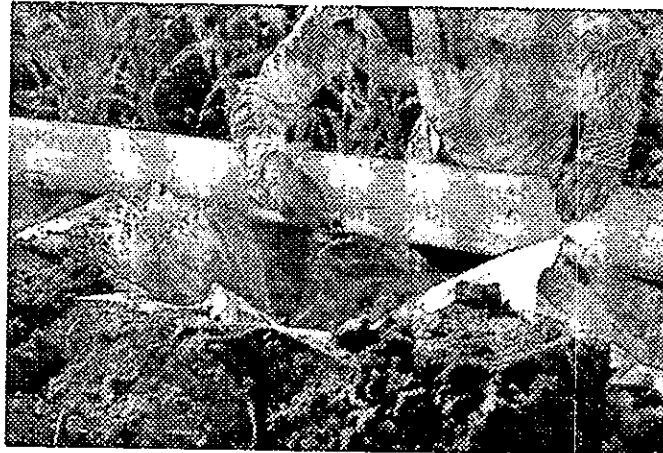
Cuando no se aplique el riego, las compuertas deben cerrarse para evitar la introducción de tierra o roedores que pueden dañar al sistema. Solo deben abrirse las compuertas correspondientes a los surcos seleccionados donde se vaya a regar.

Durante el riego para evitar erosionar el suelo por el impacto del flujo descargado, se debe cubrir con polietileno la cabecera del surco (fotografía B-1).



Fotografía B- 1 *Protección de la cabecera de la parcela*

Al aplicar el riego en el grupo de compuertas, deben abrirse a una fracción del total para descargar el gasto de diseño, Fotografía B-2.



Fotografía B- 2 *Calibración de las compuertas*

Una vez aplicado el riego en la parcela debe desmontarse la tubería y almacenarse en un lugar previamente seleccionado, o instalarse en otra parcela para aplicar el riego intermitente. Deben tomarse los cuidados en el transporte y almacenamiento descritos anteriormente.

C

CONSIDERACIONES PARA EL DISEÑO DEL EQUIPO ELECTRÓNICO

Durante el diseño y fabricación del equipo electrónico se deben presentar ciertas características desde el punto de vista de programación, electrónico, mecánico e hidráulico, en general deben cumplir las siguientes características básicas:

- los equipos deben de tener un suministro propio de energía
- los equipos deben hacer mediciones continuas durante períodos de tiempo variables, que van desde horas hasta jornadas
- los equipos deben operar en forma automática para evitar el uso de personal durante su funcionamiento
- las mediciones deben ser almacenadas para su posterior proceso.
- deben de ser fácil manejo para el operador
- su costo debe ser competitivo a los existente comercialmente
- deben de ser lo mas estándar posible y a la vez deben de vanguardia en medición y almacenamiento

Fuente de energía. Como las mediciones se realizan en lugares donde no se dispone de energía eléctrica, es necesario disponer de un-sistema de suministro propio de energía.

Se analizaron diferentes alternativas tales como generadores, celdas solares y baterías. Las dos primeras alternativas se descartaron como solución por su elevado costo, optando por las baterías, ya que los dispositivos electrónicos consumen poca energía durante su operación. Existen diferentes tipos de baterías como los del tipo:

- Niquel-Cadmio
- Carbón
- Electrolítico
- Efecto electrólisis

De las anteriores, la batería que presenta mejores características es la de efecto electrólisis (batería automovilística), ya que es recargable, tiene un voltaje de 12 V y su costo es bajo.

El equipo electrónico será alimentado por una batería de efecto electrólisis (batería automovilística) de 12 Volts CD y 40 Ampers/Hora. Considerando esta corriente se determinará el número de horas que alimentará la batería a cada equipo en forma continua.

Los equipos deben hacer mediciones continuas durante períodos de tiempo variables, que van desde horas hasta jornadas, por lo tanto es necesario contar con un reloj electrónico o un dispositivo programable (microcontrolador) que realice la función de reloj.

Se determinó utilizar un microcontrolador debido a que el sistema debe realizar otras funciones.

Los equipos deben operar en forma automática para evitar el uso de personal durante su funcionamiento. Para evitar el uso de personal durante el funcionamiento del equipo, este debe realizar en forma automática todas las funciones para que fue diseñado, ejecutando un programa, además, de:

- Leer, procesar y almacenar la información generada.
- Atender el teclado para comunicación con el operador.
- Mostrar datos en el monitor (display).
- Controlar las comunicaciones internas del circuito electrónico.

Para que un circuito ejecute estas funciones debe ser un dispositivo programable, de los más comunes son:

- μC (Microcontrolador)
- PLC (Controlador Lógico Programable)

Los PLC son dispositivos para aplicaciones específicas donde interactúan circuitos lógicos con circuitos de potencia, su costo es relativamente alto.

El μ C es un circuito integrado donde interactúan circuitos lógicos con circuitos de baja potencia, siendo más económico que el PLC.

Los μ C más comerciales son los de Motorola e Intel, los de vanguardia para cada marca son:

- MC68HC811E2 de Motorola
- 8049 de Intel

Se optó por utilizar el microcontrolador de Motorola, ya que es de menor costo, y se dispone de mayor información técnica que el de Intel. A continuación se describe el MC68HC11 de Motorola.

El Microcontrolador MC68HC811E2 (Fotografía C-1) es un dispositivo construido con tecnología HCMOS (tecnología de alta densidad complementario metal-óxido semiconductor), con capacidades periféricas integradas en un solo circuito integrado que combina un tamaño pequeño y una alta velocidad de operación con un consumo bajo de potencia. El microcontrolador es un dispositivo programable, así que por medio de una secuencia de instrucciones controlar las mediciones y el almacenamiento de datos obtenidos.

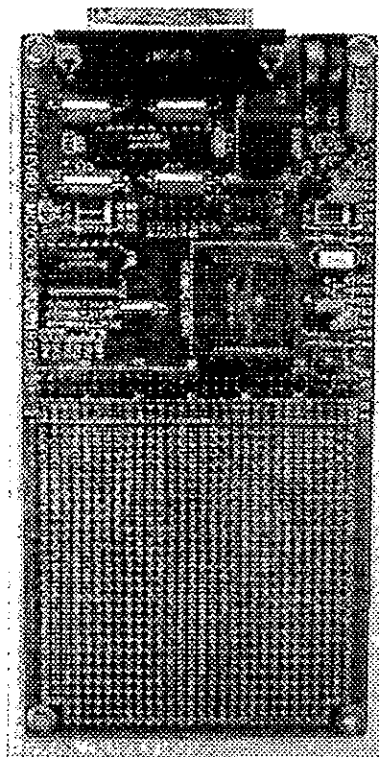
Para que el microcontrolador MC68HC811E2 (Fotografía C-1) ejecute el programa, controle las mediciones y almacene los datos medidos en campo, se requieren ciertas características de software y de algunos componentes auxiliares. En el mercado es posible adquirir una tarjeta que contiene el microcontrolador y los componentes auxiliares necesarios. Su nombre comercial es Tarjeta de Evaluación para los microcontroladores MC68HC811E2 (EVBU). Su costo es de 65 dólares.

Las siguientes son algunas de las características principales de hardware y software que presenta la tarjeta EVBU:

Microcontrolador MC68HC811E2. Es la Unidad de Proceso Central (CPU) de la tarjeta con tecnología LSI (Large Sale Integration) lo que permite al microcontrolador estar formado por 10,000 transistores impresos.

512 bytes de memoria RAM (Memoria de Acceso Aleatorio). Memoria disponible por el microcontrolador durante el tiempo que está en modo standby el equipo, para ahorro de energía.

2 kb de EEPROM (Memoria Eléctricamente Programable y Borrable de solo Lectura). Memoria donde es almacenado el programa que controla el funcionamiento del equipo.



Fotografía C-1 *Microcontrolador
MC68HC11E2*

512 Kb de ROM (Memoria de solo lectura).

Un circuito oscilador de cristal de cuarzo, el cual establece la velocidad de operación del microcontrolador (2Mhz).

Reloj de tiempo real/calendario con formato segundos, minutos, horas (AM y PM), día, mes y año, además de una alarma programable.

Interfase de comunicación serial (MC145407). El programa que ejecuta el microcontrolador generalmente se elabora en computadora. Para transferir el programa al microcontrolador o leer los datos de la memoria, la tarjeta de evaluación está equipada con un circuito de comunicación serial, a 9600 bps, que conectado al puerto serial de la computadora por medio de un cable DB25 se transfiere el programa o se leen los datos almacenados en la memoria (el software necesario es proporcionado por el fabricante).

Interfase de comunicación serial SCI. de 8 canales. Por esta interfase se realiza la recepción y transmisión de los datos que requiere el microcontrolador para que funcione el sistema (control de las tarjetas, lectura del teclado, visualización de los datos en el display, lectura y almacenamiento de los datos de los sensores)

Un convertidor analógico/digital de 8 canales.

Un circuito de automonitoreo para protección contra errores al sistema.

Un sistema guardián de Computadora Operando Apropiadamente (COP) que protege contra fallas de software.

Un sistema de monitoreo de reloj genera un reset del sistema en caso de que el reloj corra demasiado lento o se pierda.

Un circuito de detección de código de operación ilegal provee una interrupción no enmascarable si se detecta un código de operación ilegal.

Requiere de 5 Volts de corriente directa.

Dispone de dos modos de operación controlados por software, WAIT y STOP, para ahorro de energía.

En la fotografía se muestra la tarjeta EVBU de Motorola.

Programación del Microcontrolador

El procedimiento para cargar el programa en el Microcontrolador es;

1. Realizar un diagrama de flujo el cual representa la secuencia lógica de funcionamiento del equipo.
2. Editar el diagrama de flujo en un lenguaje programación (en ensamblador). Para ello es posible utilizar el editor de DOS, Turbo Pascal o C.
3. Una vez editado el programa, se codifica en código máquina, es decir, en forma binaria o hexadecimal. El fabricante del Microcontrolador (Motorola) proporciona el programa AS11 para codificar el programa en ensamblador a código máquina.
4. Con el programa PCBUG (proporcionado por el fabricante) se transfiere el programa desde la computadora al puerto serial de la Tarjeta, a través de un cable DB25, almacenándose en la memoria EEPROM del circuito.
5. Una vez almacenado el programa en la Tarjeta, este se ejecutará cada vez que se encienda el equipo.
6. Se valida el programa en su lógica para verificar el correcto funcionamiento del sistema.

En caso de que se presenten errores de ejecución del programa debe repetirse el procedimiento desde el paso 1.

Las mediciones deben ser almacenadas para su posterior proceso. Como los equipos deben hacer mediciones continuas, es necesario almacenar la información obtenida para su posterior proceso. Para ello los equipos deben contar con un dispositivo de almacenamiento de información. En el mercado nacional existen diferentes dispositivos electrónicos que realizan esta función, denominados memorias, entre los cuales están:

- RAM (Memoria de Acceso Aleatorio)
- EPROM (Memoria Programable y Borrable de solo lectura)
- EEPROM (Memoria Eléctricamente Programable y Borrable de solo lectura)

Cada una de ellas tiene sus ventajas y desventajas respecto a las demás:

RAM. La facilidad de lectura y escritura en ellas, su costo es menor respecto al otro tipo de memorias; su principal desventaja es la pérdida de la información al retirar la fuente de alimentación. No se dispone de RAM de gran capacidad en el mercado.

Las EPROM (su tamaño es de 2 x 5 x 0.5 cm) retienen la información aún sin fuente de alimentación por más de 50 años. La memoria se puede grabar y borrar más de 10 000 veces. Existen EPROM de gran capacidad a un bajo costo (10 dólares). Su principal desventaja es el requerimiento de voltajes específicos al grabar los datos, además de un procedimiento a la luz ultravioleta para borrar la información almacenada.

La EEPROM presenta características de las memorias RAM y EPROM como son:

- Se pueden grabar y borrar fácilmente
- La información no se pierde al retirar la fuente de alimentación
- La información almacenada puede ser recuperada en cualquier momento o transferirse a un disquete para su posterior proceso.
- Puede borrarse la información almacenada para rehuso de la memoria.

Las principales desventajas son su alto costo, dificultad de conseguir el mercado y su baja capacidad de almacenamiento. Analizando las características que presenta cada memoria, se decidió utilizar la memoria EPROM para almacenamiento de los datos. Las memorias EPROM de mayor capacidad disponibles en el mercado fueron la 27512 y la 27256. El 27 significa el tipo de memoria (EPROM) y el 512 y el 256 representan la capacidad en Kb, siendo 1 k en datos binarios, 1024 bits. Así pues la memoria 27512 puede almacenar 524288 datos binarios y la 27256 almacena 2621434 datos binarios. Memorias con capacidad suficiente para almacenar la información generada durante períodos largos de tiempo.

Se decidió utilizar las memorias 27512.

Deben de ser fácil manejo para el operador. Uno de los principales objetivos es que la operación del equipo no requiera personal especializado, sino que por medio de un teclado y un monitor se facilite el intercambio de la información entre el equipo y el operador. Por tanto, es conveniente adaptar un teclado y un monitor (display) al equipo electrónico.

Por medio del teclado el operador puede introducir la fecha, hora y las condiciones iniciales de operación del equipo para ser almacenadas en la memoria. El teclado utilizado fue del tipo malla de 16 teclas.

Para facilitar la verificación de los datos introducidos por el operador la información se muestran en un monitor (display), esto previene errores en la programación.

Otra función del display es mostrar la información generada y almacenada en las memorias.

El display es de Cristal Líquido (LCD) activado por frecuencia de 4 ½ dígitos, siendo de siete segmentos cada dígito.

Deben de ser lo mas estándar posible y a la vez deben de vanguardia en medición y almacenamiento. Para facilitar el diseño y fabricación del sistema electrónico, se decidió dividirlo en módulos. Cada modulo contiene los circuitos activos y pasivos que realizan una función específica del sistema eléctrico. Esta configuración presenta varias ventajas.

- Estandariza la fabricación de los módulos.
- En caso de reparaciones, solamente se desmonta el modulo dañado y sustituye, evitando con ello revisar cada elemento del sistema eléctrico ahorrando tiempo y dinero.
- En caso de modificar o actualizar el equipo se desmontan los módulos de interés y se hacen los cambios correspondientes sin modificar a todo el sistema eléctrico.
- Facilita el ensamblado y desmontaje del equipo eléctrico.

Los equipos por sus características propias deben considerarse otros requisitos para su diseño y construcción, en los capítulos correspondientes se enumeran y describen en detalle.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Aguilar, H.E. *Reporte interno "Diseño de Válvula intermitente"*. Maestría en Planeación de Recursos Hidráulicos. Facultad de Ingeniería. UAZ, México, 1994.
- Aguilar, H.E. *Reporte interno "Diseño de Válvula intermitente de doble mariposa"*. Maestría en Planeación de Recursos Hidráulicos. Facultad de Ingeniería. UAZ, México, 1997.
- Barrios, D.J.N. y Aguilar, H.E. *Reporte interno "Sistema de apertura y cierre del TDF"*. Maestría en Planeación de Recursos Hidráulicos. Facultad de Ingeniería. UAZ, México, 1994.
- Barrios, D.J.N. *Reporte interno "Sistema de apertura y cierre del TDF"*. Maestría en Planeación de Recursos Hidráulicos. Facultad de Ingeniería. UAZ, México, 1995.
- Barrios, D.J.N. et al. *"Sistemas de riego para zonas áridas y semiáridas del estado de Zacatecas"*. CONACYT, Sistema de Investigación "Francisco Villa" Maestría en Planeación de Recursos Hidráulicos. Facultad de Ingeniería. UAZ, México, 1996.
- Dzul, G.O.A. *Reporte interno "Correcciones a las ecuaciones de diseño del TDF"*. Maestría en Planeación de Recursos Hidráulicos. Facultad de Ingeniería. UAZ, México, 1997.
- Dzul, G.O.A., Trinidad, J.G. y Elías, M.E.G. *Reporte interno "Calibración del Equipo de Avance y Recesión del Flujo"*. Maestría en Planeación de Recursos Hidráulicos. Facultad de Ingeniería. UAZ, México, 1997.
- Dzul, G.O.A. y Trinidad, J.G. *Reporte interno "Validación de una nueva metodología de diseño de los TDF"*. Maestría en Planeación de Recursos Hidráulicos. Facultad de Ingeniería. UAZ, México, 1997.
- Elías, M.E.G. *Reporte interno "Diseño electrónico de los equipos: Medidor de Avance y Recesión, Válvula electromecánica y Medidor de Humedad"*. Maestría en Planeación de Recursos Hidráulicos. Facultad de Ingeniería. UAZ, México, 1994.
- Elías, M.E.G. *Reporte interno "Construcción de una nueva Válvula para riego intermitente"*. Maestría en Planeación de Recursos Hidráulicos. Facultad de Ingeniería. UAZ, México, 1997.
- Espiegel, M.A. *"Análisis y evaluación del riego por descargas intermitentes"*. Tesis Profesional, U.A.CH. Edo de México. 1987.
- García, V.N. *"Simulación numérica de flujo intermitente para diseño de riego parcelario por gravedad"*; México, Tesis Doctoral, DEPMI-UNAM. 1995.
- Trinidad, J.G. *Reporte interno "Sistema experimental de riego intermitente"*. Maestría en Planeación de Recursos Hidráulicos. Facultad de Ingeniería. UAZ, México, 1994.
- Trinidad, J.G. *Reporte interno "Sistema experimental de riego intermitente"*. Maestría en Planeación de Recursos Hidráulicos. Facultad de Ingeniería. UAZ, México, 1995.

Trinidad, J.G. *Reporte interno "Sistema experimental de riego intermitente"*. Maestría en Planeación de Recursos Hidráulicos. Facultad de Ingeniería. UAZ, México, 1996.

Trinidad, J.G. *Reporte interno "Calibración del Medidor de Humedad"*. Maestría en Planeación de Recursos Hidráulicos. Facultad de Ingeniería. UAZ, México, 1996.

Trinidad, J.G. y Dzul, G.O.A. *Reporte interno "Operación del Diabeto con tubería de compuerta"*. Maestría en Planeación de Recursos Hidráulicos. Facultad de Ingeniería. UAZ, México, 1996.

Lara, L.B. *"Estudio hidráulico de un Tanque de Descargas de Intermitentes"*. Tesis de maestría, DEPFI-UNAM. 1995.

Maestría en Planeación de Recursos Hidráulicos. *"Informe general del Anexo 2 del Convenio IMTA-UAZ"*. Facultad de Ingeniería. UAZ, México, 1992.

Maestría en Planeación de Recursos Hidráulicos. *"Informe general del Anexo 3 del Convenio IMTA-UAZ"*. Facultad de Ingeniería. UAZ, México, 1993.

Maestría en Planeación de Recursos Hidráulicos. *"Informe general del Anexo 4 del Convenio IMTA-UAZ"*. Facultad de Ingeniería. UAZ, México, 1994.

Martínez, A. P. y Aldama, R. A., 1990. *"Dispositivo fluidico para riego intermitente"*. Serie de Divulgación IMTA. Cuernavaca, Morelos, México, 1990.

Motorola. *"HC11. Technical Data"*. 1991

Motorola. *"M68HC11EVBU, Universal Evaluation Board. Users"*. 1992