

CONTENIDO

ÍNDICE DE TABLAS	9
ÍNDICE DE FIGURAS	10
RESUMEN	14
ABSTRACT	15
1. INTRODUCCIÓN	16
1.1. TOMATES DE INVERNADERO.....	18
1.1.1. <i>Ventajas del cultivo en invernadero</i>	18
1.1.2. <i>Ciclo de cultivo del tomate de invernadero</i>	20
1.1.3. <i>Condiciones climáticas</i>	22
1.1.3.1. <i>Condiciones climáticas favorables</i>	22
1.1.3.2. <i>Condiciones climáticas desfavorables</i>	22
1.1.4. <i>Enfermedades comunes en la producción de tomates en invernadero</i>	24
1.2. PROBLEMA.....	25
1.3. SOLUCIÓN PROPUESTA.....	27
1.4. SOLUCIONES ACTUALES	28
1.5. ALCANCES Y LIMITACIONES DEL PROYECTO.....	29
2. MARCO TEÓRICO	31
2.1. SENSORES.....	31
2.2. AGRICULTURA INTELIGENTE.....	32
2.3. SOFTWARE LIBRE.....	33
2.3.1. <i>Licencia GNU GPLv3</i>	34
2.4. HARDWARE LIBRE	34
2.4.1. <i>Arduino</i>	35
2.4.1.1. <i>Estructura de programación</i>	35
2.4.1.2. <i>Objetos, datos e interacciones</i>	36
2.4.1.3. <i>Aplicación en agricultura</i>	36
2.5. SERVICIO DE MENSAJERÍA CORTO (SMS)	37
3. HIPÓTESIS Y OBJETIVOS	38
3.1. HIPÓTESIS.....	38
3.2. OBJETIVO GENERAL	38
3.3. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	38

4. MATERIALES Y MÉTODOS.....	39
4.1. MODELO DE PROTOTIPOS (HARDWARE).....	39
4.1.1. <i>Planeación previa y análisis</i>	40
4.1.2. <i>Diseño rápido</i>	41
4.1.3. <i>Construcción del prototipo</i>	42
4.1.4. <i>Evaluación</i>	42
4.1.5. <i>Refinamientos</i>	42
4.2. MODELO DE DESARROLLO ITERATIVO (SOFTWARE).....	43
4.2.1. <i>Análisis y requerimientos</i>	44
4.2.2. <i>Diseño</i>	44
4.2.3. <i>Implementación</i>	45
4.2.4. <i>Pruebas</i>	45
5. DESARROLLO DE PROTOTIPOS.....	46
5.1. PROTOTIPO 1.....	46
5.1.1. <i>Planeación previa y análisis</i>	47
5.1.2. <i>Diseño rápido</i>	48
5.1.2.1. <i>Módulo de sensores</i>	48
5.1.2.2. <i>Módulo de almacenamiento</i>	49
5.1.2.3. <i>Módulo de alertas</i>	50
5.1.2.4. <i>Núcleo central</i>	51
5.1.3. <i>Construcción del prototipo</i>	52
5.1.3.1. <i>Circuito de sensores</i>	53
5.1.3.2. <i>Circuito de almacenamiento</i>	53
5.1.3.3. <i>Circuito de alertas</i>	54
5.1.3.4. <i>Contenedor</i>	54
5.1.4. <i>Evaluación</i>	55
5.1.5. <i>Refinamientos</i>	56
5.2. PROTOTIPO 2.....	56
5.2.1. <i>Planeación previa</i>	57
5.2.2. <i>Diseño rápido</i>	58
5.2.2.1. <i>Módulo de sensores</i>	58
5.2.2.2. <i>Módulo de almacenamiento</i>	59
5.2.2.3. <i>Módulo de Alertas</i>	60
5.2.2.4. <i>Módulo de información</i>	60
5.2.2.5. <i>Núcleo central</i>	61
5.2.3. <i>Construcción del prototipo</i>	62
5.2.3.1. <i>Circuito de sensores</i>	63
5.2.3.2. <i>Circuito de almacenamiento</i>	64

5.2.3.3.	Circuito de alertas	64
5.2.3.4.	Circuito de información	65
5.2.3.5.	Contenedor	65
5.2.4.	<i>Evaluación</i>	66
5.2.5.	<i>Refinamientos</i>	69
5.3.	PROTOTIPO 3	70
5.3.1.	<i>Planeación previa</i>	71
5.3.2.	<i>Diseño rápido</i>	72
5.3.2.1.	Módulo de sensores	72
5.3.2.2.	Módulo de almacenamiento	74
5.3.2.3.	Módulo de alertas	74
5.3.2.4.	Módulo de configuración	76
5.3.2.5.	Núcleo central	77
5.3.3.	<i>Construcción del prototipo</i>	79
5.3.3.1.	Circuito de sensores	79
5.3.3.2.	Circuito de almacenamiento	81
5.3.3.3.	Circuito de alertas	81
5.3.3.4.	Circuito de configuración	82
5.3.3.5.	Contenedor	82
5.3.4.	<i>Evaluación</i>	83
5.3.5.	<i>Refinamientos</i>	87
6.	DESARROLLO DE SOFTWARE	88
6.1.	ANÁLISIS Y REQUISITOS	88
6.1.1.	<i>Especificación de requerimientos</i>	88
6.1.1.1.	Funciones del sistema	88
6.1.1.2.	Atributos del sistema	94
6.1.1.3.	Atributos por función	95
6.1.2.	<i>Actores</i>	113
6.1.3.	<i>Casos de uso</i>	114
6.1.3.1.	Casos de uso esenciales	115
6.1.3.2.	Diagrama de casos de uso	131
6.1.3.3.	Modelo conceptual	132
6.1.3.4.	Diagramas de secuencia	132
6.1.3.5.	Contratos	140
6.1.4.	<i>Priorización</i>	153
6.1.5.	<i>Modelo de dominio</i>	155
6.1.5.1.	Entidades reconocidas	155
6.1.5.2.	Modelo de dominio	157
6.1.5.3.	Matriz de rastreabilidad	158

6.2.	DISEÑO	160
6.2.1.	<i>Diagramas de interacción</i>	160
6.2.1.1.	Iniciar Medición	161
6.2.1.2.	Medir temperatura interna	162
6.2.1.3.	Medir humedad interna	162
6.2.1.4.	Medir temperatura externa	163
6.2.1.5.	Medir humedad externa	163
6.2.1.6.	Almacenar datos	164
6.2.1.7.	Enviar alertas	164
6.2.2.	<i>Diagramas de clases</i>	165
6.2.3.	<i>Diagrama de paquetes</i>	166
6.2.3.1.	Descripción de paquetes	166
6.2.4.	<i>Diagrama de arquitectura de software</i>	167
6.2.5.	<i>Diagrama de estado</i>	169
6.3.	IMPLEMENTACIÓN	170
6.3.1.	<i>Desarrollo del modelo en Arduino</i>	170
6.3.2.	<i>Implementación iterativa</i>	171
6.3.2.1.	Prototipo 1	172
6.3.2.2.	Prototipo 2	175
6.3.2.3.	Prototipo 3:	180
7.	PRUEBAS Y TESTING	186
7.1.	ADECUACIÓN DE SENSORES	186
7.1.1.	<i>Climatización</i>	186
7.1.2.	<i>Extensión</i>	187
7.2.	PRUEBAS DE INTERVALOS DE MEDICIÓN	188
7.3.	CONFIGURACIÓN INICIAL DEL EQUIPO	189
7.4.	PRUEBAS DE CAJA NEGRA	190
8.	ESCENARIO DE PRUEBAS	192
8.1.	INVERNADEROS	192
8.1.1.	<i>Materiales</i>	192
8.1.2.	<i>Dimensiones</i>	193
8.1.3.	<i>Cortinas de ventilación</i>	194
8.2.	PLANTAS	195
8.2.1.	<i>Acolchado de plástico</i>	196
8.3.	RIEGO	197
8.4.	CASETA	198
8.4.1.	<i>Motor de riego</i>	198

8.5.	SOLUCIÓN IMPLEMENTADA.....	199
9.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	200
9.1.	VARIACIÓN DE TEMPERATURA INTERNA Y EXTERNA.....	200
9.2.	VARIACIÓN DE HUMEDAD INTERNA Y EXTERNA.....	203
9.3.	DETERMINACIÓN DE HORARIOS CRÍTICOS DE VENTILACIÓN.....	206
9.4.	GENERACIÓN DE ALERTAS.....	208
9.5.	IMPACTO DEL EQUIPO EN EL CULTIVO.....	209
10.	CONCLUSIONES.....	211
10.1.	PRINCIPALES APORTES.....	211
10.2.	TRABAJO FUTURO.....	213
10.2.1.	<i>Ventilación en dos fases (Nueva hipótesis)</i>	213
10.2.2.	<i>Modificaciones al equipo</i>	214
11.	REFERENCIAS.....	216
12.	ANEXOS.....	220
12.1.	ANEXO 1: LISTADO DE ENFERMEDADES DEL CULTIVO DE TOMATES EN INVERNADERO.....	220
12.2.	ANEXO 2: TIPOS DE SENSORES.....	222
12.3.	ANEXO 3: HARDWARE DISPONIBLE EN EL MERCADO NACIONAL.....	223
12.3.1.	<i>Sensores</i>	223
12.3.2.	<i>Shields</i>	225
12.3.3.	<i>Módulos de comunicación</i>	225
12.3.4.	<i>Tarjetas de desarrollo Arduino</i>	226
12.3.5.	<i>Otros componentes</i>	228
12.4.	ANEXO 4: MATERIALES PARA LA CONSTRUCCIÓN DE LOS INVERNADEROS.....	229

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1: CICLO DEL CULTIVO DE TOMATE.....	20
TABLA 2: CICLO DE CULTIVO DEL TOMATE DE INVERNADERO EN LA ZONA DE UNIHUE.....	21
TABLA 3: CONDICIONES CLIMÁTICAS FAVORABLES.....	22
TABLA 4: CONDICIONES CLIMÁTICAS DESFAVORABLES.....	23
TABLA 5: PRINCIPALES ENFERMEDADES QUE AFECTAN EL CULTIVO DE TOMATES EN INVERNADERO.....	25
TABLA 6: COMPARACIÓN ENTRE SOLUCIONES ACTUALES Y EL EQUIPO IMPLEMENTADO.....	29
TABLA 7: COMPONENTES Y NÚMERO DE CONEXIONES PROTOTIPO 1.....	51
TABLA 8: LISTA DE REFINAMIENTOS, PROTOTIPO 1.....	56
TABLA 9: COMPONENTES Y NÚMERO DE CONEXIONES PROTOTIPO 2.....	61
TABLA 10: LISTA DE REFINAMIENTOS, PROTOTIPO 2.....	70
TABLA 11: COMPONENTES Y NÚMERO DE CONEXIONES PROTOTIPO 3.....	78
TABLA 12: REFINAMIENTOS, PROTOTIPO 3.....	87
TABLA 13: REQUERIMIENTOS FUNCIONALES ASOCIADOS AL CONTROL DE MEDICIONES.....	91
TABLA 14: REQUERIMIENTOS FUNCIONALES RELACIONADOS AL ALMACENAMIENTO.....	91
TABLA 15: REQUERIMIENTOS FUNCIONALES RELACIONADOS A LA GENERACIÓN DE NOTIFICACIONES.....	92
TABLA 16: REQUERIMIENTOS FUNCIONALES RELACIONADOS A LAS CONFIGURACIONES.....	93
TABLA 17: REQUERIMIENTOS FUNCIONALES RELACIONADOS AL INGRESO DE DATOS.....	94
TABLA 18: LISTADO DE ATRIBUTOS DEL SISTEMA.....	95
TABLA 19: LISTADO DE ACTORES DEL SISTEMA.....	114
TABLA 20: TABLA DE PUNTAJES DE PRIORIZACIÓN.....	153
TABLA 21: TABLA DE CUALIDADES PARA LA CLASIFICACIÓN DE LOS CASOS DE USO.....	154
TABLA 22: TABLA DE PRIORIZACIÓN DE LOS CASOS DE USO.....	154
TABLA 23: IDENTIFICACIÓN DE ENTIDADES DEL SOFTWARE.....	158
TABLA 24: MATRIZ DE RASTREABILIDAD DEL SOFTWARE.....	159
TABLA 25: ACCIONES Y TIEMPOS EMPLEADOS.....	188
TABLA 26: CONFIGURACIONES INICIALES DEL EQUIPO.....	189
TABLA 27: PRUEBAS DE CAJA NEGRA (ENTRADAS Y SALIDAS).....	191
TABLA 28: FRECUENCIAS Y TIEMPOS DE RIEGO.....	197
TABLA 29: COMPARATIVA ENTRE LA TEMPERATURA EXTERNA REGISTRADA POR LOS EQUIPOS Y LA REPORTADA POR LA DIRECCIÓN METEOROLÓGICA DE CHILE.....	201
TABLA 30: HORARIOS CRÍTICOS DE VENTILACIÓN RELACIONADOS A LA TEMPERATURA.....	206
TABLA 31: HORARIOS CRÍTICOS DE VENTILACIÓN RELACIONADOS A LA HUMEDAD.....	207
TABLA 32: HORARIOS CRÍTICOS IDENTIFICADOS PARA LAS CONDICIONES DE TEMPERATURA Y HUMEDAD.....	207

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1: RANKING NACIONAL DE HORTALIZAS POR SUPERFICIE EN EL AÑO 2013. (FUENTE: ELABORADO POR LA ODEPA CON INFORMACIÓN DEL INE, 2013).....	16
FIGURA 2: SUPERFICIE PLANTADA CON TOMATE PARA CONSUMO FRESCO POR REGIÓN. (FUENTE: ELABORADO POR LA ODEPA CON INFORMACIÓN DEL INE 2013).	17
FIGURA 3: ESTRUCTURA Y DIMENSIONES DE LOS INVERNADEROS (SECTOR DE UNIHUE, MAULE).....	18
FIGURA 4: DIAGRAMA DEL PROBLEMA.....	26
FIGURA 5: DIAGRAMA DE SOLUCIÓN PROPUESTA.....	27
FIGURA 6: TRANSFORMACIÓN DE DATOS EN INFORMACIÓN PARA LA GESTIÓN.....	32
FIGURA 7: EJEMPLO DE APLICACIÓN DE LA LICENCIA GPLv3.....	34
FIGURA 8: PRIMERAS INTERACCIONES CON ARDUINO.....	46
FIGURA 9: VISIÓN TOP-DOWN DEL PROTOTIPO 1.....	47
FIGURA 10: SENSOR LDR ENCARGADO DE LA PERCEPCIÓN DE LA LUZ, PROTOTIPO 1.....	48
FIGURA 11: SENSOR HS1101 ENCARGADO DE MEDIR LA HUMEDAD AMBIENTAL, PROTOTIPO 1.....	49
FIGURA 12: SENSOR ZX-THERMOMETER ENCARGADO DE MEDIR LA TEMPERATURA DENTRO DE LOS INVERNADEROS, PROTOTIPO 1.....	49
FIGURA 13: ARDUINO LOGGER SHIELD, ENCARGADO DEL ALMACENAMIENTO DE INFORMACIÓN, PROTOTIPO 1.....	50
FIGURA 14: ARDUINO UNO R3, NÚCLEO CENTRAL DEL PROTOTIPO 1.....	52
FIGURA 15: DISEÑO TOP-DOWN DE LOS CIRCUITOS Y COMPONENTES DEL PROTOTIPO 1.....	52
FIGURA 16: CIRCUITO DE SENSORES, PROTOTIPO 1.....	53
FIGURA 17: CIRCUITO DE ALMACENAMIENTO, PROTOTIPO 1.....	53
FIGURA 18: CIRCUITO DE ALERTAS, PROTOTIPO 1.....	54
FIGURA 19: PROTOTIPO 1.....	54
FIGURA 20: PROTOTIPO 1 FUNCIONANDO DENTRO DE LOS INVERNADEROS.....	55
FIGURA 21: VISIÓN TOP-DOWN DEL PROTOTIPO 2.....	57
FIGURA 22: SENSOR SHT15 ENCARGADO DE MEDIR LAS CONDICIONES INTERNAS DE TEMPERATURA Y HUMEDAD, PROTOTIPO 2.....	59
FIGURA 23: SENSOR DE HUMEDAD HIH4030 ENCARGADO DE MEDIR LA HUMEDAD FUERA DE LOS INVERNADEROS, PROTOTIPO 2.....	59
FIGURA 24: PANTALLA LCD DE 16x2 CARACTERES (IZQUIERDA) Y SERIAL LCD BACKPACK V2 (DERECHA), PROTOTIPO 2.....	61
FIGURA 25: ESQUEMA TOP-DOWN DE LOS CIRCUITOS Y COMPONENTES DEL PROTOTIPO 2.....	62
FIGURA 26: CIRCUITO DE SENSORES, PROTOTIPO 2.....	63
FIGURA 27: CIRCUITO DE ALMACENAMIENTO, PROTOTIPO 2.....	64
FIGURA 28: CIRCUITO DE ALERTAS, PROTOTIPO 2.....	64
FIGURA 29: CIRCUITO DE INFORMACIÓN, PROTOTIPO 2.....	65

FIGURA 30: GABINETE METÁLICO (EXTERNO) Y CAJA ESTANCA (INTERNA) PARA LA PROTECCIÓN DEL PROTOTIPO 2.	66
FIGURA 31: INSTALACIÓN DEL PROTOTIPO 2.	66
FIGURA 32: SENSOR SHT15 EXTENDIDO 50 METROS DENTRO DE LA ESTRUCTURA DE LOS INVERNADEROS....	67
FIGURA 33: POSICIONAMIENTO DE LOS SENSORES EXTERNOS, PROTOTIPO 2.	67
FIGURA 34: PANEL LED (SUPERIOR) Y PANTALLA LCD (INFERIOR), PROTOTIPO 2.	68
FIGURA 35: PROTOTIPO 2 FUNCIONANDO A UN COSTADO DE LOS INVERNADEROS.....	69
FIGURA 36: VISIÓN TOP-DOWN DEL PROTOTIPO 3.....	71
FIGURA 37: SENSOR SEN92355P ENCARGADO DE OBTENER LA HUMEDAD DEL SUELO, PROTOTIPO 3.	73
FIGURA 38: MÓDULO GPRSBEE ENCARGADO DEL ENVÍO DE LAS ALERTAS TEMPRANAS, PROTOTIPO 3.	75
FIGURA 39: XBEE SHIELD, ENCARGADO DE ESTABLECER LA COMUNICACIÓN ENTRE EL MÓDULO GSM Y LA PLACA ARDUINO, PROTOTIPO 3.	75
FIGURA 40: PANTALLA LCD DE 20x4 CARACTERES, PROTOTIPO 3.	76
FIGURA 41: TECLADO DE MEMBRANA, PROTOTIPO 3.	77
FIGURA 42: ARDUINO MEGA, NÚCLEO CENTRAL DEL PROTOTIPO 3.	78
FIGURA 43: ESQUEMA TOP-DOWN DE LOS CIRCUITOS Y COMPONENTES DEL PROTOTIPO 3.	79
FIGURA 44: CIRCUITO DE SENSORES, PROTOTIPO 3.	80
FIGURA 45: CIRCUITO DE ALMACENAMIENTO, PROTOTIPO 3.	81
FIGURA 46: CIRCUITO DE ALERTAS, PROTOTIPO 3.	81
FIGURA 47: CIRCUITO DE CONFIGURACIÓN, PROTOTIPO 3.	82
FIGURA 48: GABINETE METÁLICO (EXTERNO) Y CAJA ESTANCA (INTERNA) PARA LA PROTECCIÓN DEL PROTOTIPO 3.	83
FIGURA 49: INSTALACIÓN DEL PROTOTIPO 3.	83
FIGURA 50: INSTALACIÓN DE LOS SENSORES DE SUELO Y AGUA, PROTOTIPO 3.	84
FIGURA 51: POSICIONAMIENTO DE LOS SENSORES EXTERNOS (IZQUIERDA) Y GPRSBEE (DERECHA), PROTOTIPO 3.	84
FIGURA 52: PANEL LED, PANTALLA Y TECLADO (IZQUIERDA) Y CONFIGURACIÓN DE PARÁMETROS (DERECHA) DEL PROTOTIPO 3.....	85
FIGURA 53: PUNTOS DE CONEXIÓN EXTERNOS, PROTOTIPO 3.	86
FIGURA 54: PROTOTIPO 3 FUNCIONANDO A UN COSTADO DE LOS INVERNADEROS.....	86
FIGURA 55: DIAGRAMA GENERAL DE CASOS DE USO.	131
FIGURA 56: MODELO CONCEPTUAL.	132
FIGURA 57: DIAGRAMA DE SECUENCIA CASO DE USO "CU01: INICIAR MEDICIÓN".....	133
FIGURA 58: DIAGRAMA DE SECUENCIA CASO DE USO "CU02: MEDIR TEMPERATURA INTERNA".....	133
FIGURA 59: DIAGRAMA DE SECUENCIA CASO DE USO "CU03: MEDIR HUMEDAD INTERNA".....	134
FIGURA 60: DIAGRAMA DE SECUENCIA CASO DE USO "CU04: MEDIR TEMPERATURA EXTERNA".....	134
FIGURA 61: DIAGRAMA DE SECUENCIA CASO DE USO "CU05: MEDIR HUMEDAD EXTERNA".....	135
FIGURA 62: DIAGRAMA DE SECUENCIA CASO DE USO "CU06: MEDIR TEMPERATURA SUELO".....	135