

# UNIVERSIDAD PÚBLICA DE EL ALTO

## CARRERA INGENIERÍA DE SISTEMAS



### PROYECTO DE GRADO

“SISTEMA DE CONTROL DE RIEGO AUTOMATIZADO PARA UN USO EFICIENTE DEL AGUA”

CASO: VIVERO FORESTAL MUNICIPAL DE EL ALTO

Para optar al título de Licenciatura en Ingeniería de Sistemas

**Mención: GESTIÓN Y PRODUCCIÓN**

**Postulante:** Guido Alvaro Lopez Mamani  
**Tutor Metodológico:** Ing. Maricel Yarari Mamani  
**Tutor Especialista:** Ing. Adelaida Pastrana Arcani  
**Tutor Revisor:** Ing. Gregorio Mamani Mamani

**EL ALTO – BOLIVIA**

**2020**

## **DEDICATORIA**

*A todas las personas que me apoyaron incondicionalmente en la elaboración y culminación de este proyecto*

## **AGRADECIMIENTOS**

*A la Universidad Pública de El Alto, especialmente a la carrera de Ingeniería de Sistemas por acogerme y enseñarme el emocionante mundo de los sistemas informáticos con su aplicación en las áreas de la electrónica y eléctrica*

*A la tutora especialista del proyecto, Ing. Adelaida Pastrana Arcani, por todo el conocimiento compartido, por su paciencia y por la predisposición. Este trabajo no hubiera sido posible sin su generosa y académica ayuda.*

*Al tutor revisor del proyecto, Ing. Gregorio Mamani Mamani, por todo el conocimiento compartido y por sus sugerencias oportunas.*

*A los tutores metodológicos, Ing. Maricel Yarari Mamani e Ing. Dionicio Henry Pacheco Rios, por sus sugerencias oportunas a lo largo de todo el desarrollo del proyecto.*

## RESUMEN

La automatización es una tarea que ayuda a resolver o mejorar una necesidad, ya que permite tener diferentes caminos para la aplicación de nuevas tecnologías. Por ello, vivimos con todo tipo de procesos que podemos estudiar, pero la falta de conocimiento del problema y, por ende, la solución nos acostumbra a no hacer nada. Es así que analizando el sistema actual de riego del Vivero Forestal Municipal y sus dependencias (viveros, jardines botánicos y huertos escolares), se concluyó que este sigue utilizando las técnicas de riego manual sin ningún tipo de registro, heredados de nuestros antepasados

Por ello, el cuestionamiento que surgió fue cómo mejorar el actual sistema de riego en el Vivero Forestal Municipal de El Alto a través de una propuesta enfocada a la tecnificación de la misma para un uso controlado y eficiente del agua. En consecuencia, la respuesta a esta interrogante, presentada como objetivo del proyecto, es el de presentar una propuesta de diseño y automatización para el control de riego con un sistema Scada y una Base de datos con el fin de mejorar el actual manejo del agua.

Para el desarrollo se consideró la aplicación de la metodología Gemma, superando sus fases denominadas como automatización, supervisión, interacción, implementación y pruebas. El resultado de ello fue la puesta de funcionamiento de un diseño de control de riego automatizado, con un sistema Scada y una base de datos, que captura registros según el sector de riego. Este resultado denota que si fue posible alcanzar los objetivos planteados, presentando una alternativa seria con tecnologías industriales.

Por consiguiente se concluye que el proyecto de control de riego automatizado respondió a los planeamientos formulados. Por lo que se recomienda considerar las tecnologías reales tanto en hardware como en software para desarrollos similares. Esto ya que el nivel de aprendizaje e inmersión al campo aplicativo resulta ser muy provechoso.

## ÍNDICE GENERAL

	Página
DEDICATORIA.....	i
AGRADECIMIENTOS .....	ii
RESUMEN .....	iii
ÍNDICE GENERAL .....	iv
ÍNDICE DE FIGURAS .....	vii
ÍNDICE DE TABLAS .....	viii

### 1. MARCO PRELIMINAR

	Página
1.1. Introducción.....	9
1.2. Antecedentes de proyectos similares .....	10
1.3. Planteamiento del problema.....	12
1.3.1. Problema principal.....	13
1.3.2. Problemas secundarios .....	13
1.4. Objetivos .....	14
1.4.1. Objetivo general .....	14
1.4.2. Objetivos específicos.....	14
1.5. Justificación .....	15
1.5.1. Justificación técnica.....	15
1.5.2. Justificación económica.....	15
1.5.3. Justificación social.....	16
1.6. Metodología.....	17
1.6.1. Método científico .....	17
1.6.2. Método de ingeniería.....	17
1.7. Herramientas y tecnologías para la automatización .....	20
1.7.1. Sección del operador.....	20
1.7.2. Sección de equipo de control .....	21
1.7.3. Sección de riego.....	22
1.8. Límites y alcances del proyecto .....	22
1.8.1. Límites del proyecto .....	22

1.8.2. Alcances del proyecto .....	23
1.9. Aportes .....	24

## 2. MARCO TEÓRICO

	Página
2.1. Automatas programables .....	25
2.1.1. Definición de los automatas programables.....	26
2.1.2. Antecedentes y evolución de los PLC's.....	26
2.1.3. Estructura general de los PLCs.....	30
2.1.4. Principio de funcionamiento de un PLC.....	32
2.2. Grafcet.....	34
2.2.1. Definición del Grafcet .....	34
2.2.2. Estructura del Grafcet.....	34
2.2.3. Principales elementos del Grafcet.....	35
2.2.3.1. Etapas .....	35
2.2.3.2. Acciones.....	36
2.2.3.3. Transiciones .....	36
2.2.4. Reglas de evolución en el Grafcet.....	37
2.2.5. Estructuras básicas el Grafcet.....	37
2.2.5.1. Secuencia lineal .....	38
2.1.5.2. Divergencia .....	38
2.2.5.3. Convergencia .....	39
2.2.5.4. Divergencia simultanea .....	40
2.2.5.5. Convergencia simultanea .....	40
2.2.5.6. Salto de etapas.....	41
2.2.5.7. Repetición de secuencia .....	42
2.3. Gemma.....	43
2.3.1. Definición de la guía Gemma .....	43
2.3.2. Descripción de la guía Gemma .....	43
2.3.2.1. Grupo F: Procedimientos de funciones .....	46
2.3.2.2. Grupo A: Procedimientos de parada .....	47
2.3.2.3. Grupo D: Procedimientos de defecto.....	48

2.4. Sistema de riego .....	48
2.4.1. Relación suelo-agua- planta.....	48
2.4.1.1. Porosidad del suelo .....	49
2.4.1.2. Contenido del agua del suelo .....	50
2.4.1.3. Estados de humedad del suelo .....	52
2.4.1.4. Umbral de riego e infiltración .....	53
2.4.2. Necesidad de riego.....	54
2.4.2.1. Volumen del suelo mojado y frecuencia de aplicación de riego .....	55
2.4.2.2. Riego por goteo .....	57
2.5. Diseño de un sistema de riego por goteo .....	59
2.5.1. Diseño agronómico.....	60
2.5.2. Diseño hidráulico .....	61

### **3. MARCO APLICATIVO**

	Página
3.1. Análisis institucional del proyecto.....	62
3.2. Desarrollo del proyecto.....	66
3.2.1 Descripción del proceso de control.....	66
3.2.2 Diagrama funcional de primer y segundo nivel.....	68
3.2.3 Diagrama de contactos PLC.....	70
3.2.4. Supervisión, control y registro de proceso.....	73
3.3. Estimación de diseño agronómico e hidráulico .....	79
3.4. Estimación de rentabilidad .....	85
3.5. Costos de implementación del diseño .....	86

### **4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

	Página
4.1. Conclusiones.....	89
4.2. Recomendaciones.....	90
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	93
ANEXOS .....	96

## ÍNDICE DE FIGURAS

	Página
Figura 1.1: Metodología de automatización .....	18
Figura 1.2: Esquema general de herramientas necesarias .....	20
Figura 1.3: Dispositivos de operación .....	21
Figura 1.4: PLC de la marca Enron modelo CP1L-L20DT1-D .....	21
Figura 2.1: Esquema de un autómeta programable .....	25
Figura 2.2: Historia de los PLC's.....	27
Figura 2.3: Diagrama general de un PLC.....	30
Figura 2.4: Modo de operación de un PLC .....	32
Figura 2.5: Estructura del Grafcet .....	35
Figura 2.6: Representación de una etapa en Grafcet .....	35
Figura 2.7: Distinción entre comienzo y fin en Grafcet.....	36
Figura 2.8: Representación de una acción en Grafcet.....	36
Figura 2.9: Representación de una transición en Grafcet.....	37
Figura 2.10: Representación de una secuencia lineal en Grafcet.....	38
Figura 2.11: Representación de una divergencia en Grafcet.....	39
Figura 2.12: Representación de una convergencia en Grafcet.....	39
Figura 2.13: Representación de una divergencia simultánea en Grafcet.....	40
Figura 2.14: Representación de una convergencia simultánea en Grafcet.....	41
Figura 2.15: Representación de un salto de etapas en Grafcet .....	41
Figura 2.16: Representación de una repetición de secuencia en Grafcet.....	42
Figura 2.17: Representación parcial de la guía Gemma .....	44
Figura 2.18: Representación completa de la guía Gemma .....	45
Figura 2.19: Suelo mineral .....	49
Figura 2.20: Porosidad del suelo.....	50
Figura 2.21: Curvas de retención de humedad en diferentes suelos .....	51
Figura 2.22: Velocidad de infiltración .....	53
Figura 2.23: Distribución de raíces en el perfil del suelo .....	55
Figura 2.24: Aplicación del riego .....	56
Figura 2.25: Cinta de goteo.....	57

Figura 2.26: Formas de bulbo según tipo de suelo .....	57
Figura 2.27: Perdida de presión según longitud de cinta portagotero .....	58
Figura 2.28: E+T = Evapotranspiracion.....	60
Figura 3.1: Organigrama de la Dirección de Áreas Verdes y Forestación .....	63
Figura 3.2: Visita autorizada a la carpa solar que es el referente para el proyecto	65
Figura 3.3: Diagrama pictórico del diseño a controlar .....	65
Figura 3.4: Descripción general del proceso de control de riego automatizado....	66
Figura 3.5: Tablero de control .....	67
Figura 3.6: Diagrama funcional de primer nivel para el control de riego .....	68
Figura 3.7: Diagrama funcional de segundo nivel para el control de riego automatizado.....	70
Figura 3.8: Divergencia Y aplicada al control del proyecto .....	71
Figura 3.9: Divergencia OR para la selección del sector de riego.....	72
Figura 3.10: Convergencia OR para rearme de procesos.....	73
Figura 3.11: Representación SCADA el sistema de control de riego .....	74
Figura 3.12: Extracto de algoritmo de animación para el sistema Scada.....	76
Figura 3.13: Extracto de código VB.Net para generación de llenado de tubería ...	77
Figura 3.14: Registro de riego capturado en distintos momentos .....	78
Figura 3.15: Reporte generado según sector de riego .....	78
Figura 3.16: Ubicación de estación meteorológica.....	80
Figura 3.17: Índice de evapotranspiración en la ciudad de El Alto.....	80
Figura 3.18: Esquema referencial de tuberías para sistema de riego .....	84
Figura 3.19: Diseño esquemático de control de riego automatizado.....	88

## ÍNDICE DE TABLAS

	Página
Tabla 3.1: Cuadro descriptivo del tablero de control .....	67
Tabla 3.1: Esquema de los principales puntos según I/O del PLC .....	75
Tabla 3.2: Cuadro de costos de dispositivos para implementación de prototipo..	86
Tabla 3.3: Cuadro de costos para la red de distribución de agua .....	87

## **1. MARCO PRELIMINAR**

### **1.1. Introducción**

En todas sus formas y estados, el agua es un elemento primordial e insustituible para la vida (Diario de Huila, p. 3B). De la misma forma, esta importancia también está claramente contemplada en la Constitución Política del Estado (CPE) de Bolivia, donde el agua no solo es vislumbrado como un servicio o un bien de dominio público, sino que “se lo reconoce como un derecho fundamental” (Art. 16). Asimismo, la FAO (Food and Agriculture Organization), a nivel internacional, insta a los países a intensificar sus esfuerzos para aumentar la eficiencia hídrica y ofrecer acceso al agua potable a toda la población (iagua, 2019).

Así por ejemplo, dentro del ámbito agronómico, la demanda de los recursos hídricos y la optimización en los sistemas de riego es cada vez mayor a nivel nacional y mundial. Los usos agrícolas tradicionales y los crecientes usos industriales y urbanos, más el deterioro del medio ambiente han provocado que se busque una adecuada gestión de los recursos hídricos. Una de las principales medidas para conseguir una gestión adecuada de los recursos hídricos en la agricultura es la automatización de los sistemas de riego (Canales y Molina, 2010, p. 411).

Por tanto, el presente apartado presenta un bosquejo de todos aquellos planteamientos que involucran al desarrollo del proyecto, según el orden estructurado de la misma universidad. Así, el tema que se persigue es presentar una propuesta concreta a través de un diseño para el control de riego automatizado al Vivero Forestal, producto de un análisis y un desarrollo del mismo con el objeto de mejorar el manejo del recurso hídrico como es el agua. Por ello, a continuación se detallan todos los pormenores referentes al mismo trabajo y con especificaciones detalladas de su estructura.

## 1.2. Antecedentes de proyectos similares

Para la selección de proyectos similares se consideró, por un lado, una semejanza en relación al proyecto y, por otro, una semejanza en cuanto a las instituciones públicas que los publican. Por, ello, se consideró dos proyectos de universidades públicas y un proyecto proveniente de una institución de formación técnica superior también de carácter pública. Así, a continuación se procede a detallar cada una de ellas:

- I. Proyecto de grado presentado por Feliberto Uturuntu Mayta en la carrera de Informática Industrial del Instituto Superior de Electrónica, Informática y Telecomunicaciones ISEIT con el denominativo de “Sistema de Riego Programado”, con el caso de estudio de la Unidad Técnica Luis Espinal Camps de Collpani. El objetivo principal del mismo fue diseñar y construir un sistema de riego programable tecnificado por aspersión y goteo en una parcela demostrativa ubicado en la zona Luis Espinal Camps de Collpani. El procedimiento que se siguió consistió en una investigación, planificación y desarrollo del proyecto, donde según el diagrama de Gantt del proyecto se demoró siete meses en su conclusión. Para la implementación se utilizó herramientas tecnológicas referentes a Arduino Mega, así como dispositivos de riego como aspersores, bombas y válvulas. La conclusión generada por el técnico fue que se diseñó y construyó un sistema de riego por aspersión y goteo que cumplió los objetivos, siguiendo las condiciones climatológicas, (Uturuntu, 2016).
- II. Tesis de grado presentado por Elvith Eddy Conde Pérez en la Carrera de Informática de la Universidad Mayor San de Andrés con el denominativo de “Diseño de un prototipo para el control y automatización de un sistema hidropónico en un invernadero”. El objetivo principal fue desarrollar un prototipo de un invernadero utilizando Arduino con sensores que permitan controlar y automatizar los

procesos de riego de las plantas en los cultivos. En el proceso metodológico pueden distinguirse cuatro pasos esenciales: la observación de los hechos para su registro; la clasificación y el estudio de los hechos; la derivación inductiva que parte y permite llegar a una generalización, y la contrastación. La conclusión generada por el licenciado fue que al utilizar Arduino y sensores se ha logrado mejorar el rendimiento de los elementos que afectan el sistema hidropónico (Conde, 2016).

- III. Proyecto de grado presentado por Hugo Quisbert Machaca en la Carrera de Ingeniería de Sistemas de la Universidad Pública de El Alto con el denominativo “Diseño de un sistema de control automatizado de invernadero aplicando lógica difusa”. El objetivo principal fue implementar un sistema de control de intervalos de temperatura difusa para la eficiencia de producción de hortalizas en el invernadero de la Escuela Industrial Pedro Domingo Murillo de la Ciudad de La Paz. El autor considera necesario la aplicación de diversos métodos y técnicas para el desarrollo del proyecto. Entre ellos se encuentra el método científico y método de ingeniería. Dichas metodología le permitieron obtener conclusiones generales a partir de premisas particulares. En el proceso de desarrollo el ingeniero presenta un diseño propio a través de Arduino y todos los dispositivos accesibles que se adapten a esta tecnología, asimismo, toma en cuenta ciertas herramientas de control con un enfoque de modelo o prototipo. En otras palabras, se realizó una maqueta de prueba donde se gestiona los aspectos esenciales de un invernadero, humedad y temperatura. La conclusión que manifiesta al aplicar lógica difusa en producción de cultivos es la eficiencia, dando un rendimiento en la cosecha de mayor porcentaje al esperado. Por otro lado, también se genera algunas recomendaciones relevantes que son la utilización de energía renovable y simular condiciones óptimas para el cultivo de hortalizas, (Quisbert, 2000).

### **1.3. Planteamiento del problema**

Cuando se piensa en las especies vegetales, no se puede evitar pensar en sus colores, aromas, dimensiones entre otras características, sin embargo, muchas veces no se considera la importancia que tienen estas formaciones vegetales para los seres vivos. Las especies vegetales son importantes en la naturaleza porque permiten que toda la variedad de especies verdes siga perpetuándose en el tiempo, extendiéndose y proporcionando los servicios que en innumerables ocasiones se aprovechan, como la alimentación. Otra característica importante que resaltar es el uso medicinal. Son importantes en la naturaleza porque no solo sirven como remedios a través de su manipulación para obtener medicamentos, sino que para los animales también tienen su importancia, pues muchos de ellos saben distinguir unas flores de otras según el efecto que producen en su organismo.

Es así, las actuales administraciones públicas referentes al cuidado de las plantas destinan, para su tratamiento, ciertos ambientes con características específicas para su manejo. La ciudad de El Alto cuenta con diferentes espacios (viveros, jardines botánicos y huertos escolares) destinados para este fin. Sin embargo, las visitas realizadas permitieron percibir un uso similar, con respecto al agua, en todas ellas. Es decir, la mayoría no dispone de mecanismos para un uso eficiente de agua y recurre a un riego manual, destinando un número limitado de personal capacitado. Asimismo no se evidencia sistemas que controlen los riegos para comprobar si algún área fue atendida.

Estos detalles sobresalientes con respecto al actual tratamiento de riego en nuestros espacios de jurisdicción municipal en la ciudad de El Alto, permitieron generar diferentes propuestas para su tecnificación. Es por ello, que surge la propuesta principal de establecer un sistema de control de riego automatizado (a través de un análisis, desarrollo y presentación de una propuesta) para mejorar el uso eficiente de agua y responder a la interrogativa principal que se genera:

¿Cómo mejorar el actual sistema de riego en el Vivero Forestal Municipal de El Alto a través de una propuesta enfocada a la tecnificación de la misma para un uso controlado y eficiente del agua?

### 1.3.1. Problema principal

- Carencia de propuestas concretas para establecer un nuevo sistema de control de riego tecnificado, y así lograr un uso eficiente de agua por medio de registros de riego, no solo en el Vivero Municipal, sino también en sus diferentes dependencias (viveros, jardines botánicos y huertos escolares).

### 1.3.2. Problemas secundarios

A continuación se detallan aquellos problemas secundarios identificados en el caso de estudio que permitieron identificar el problema principal (**Anexo A**):

- **Personal limitado**, los actuales espacios (viveros, jardines botánicos y huertos escolares) de la jurisdicción de la Alcaldía de El Alto no disponen de personal suficiente para el riego. Es decir, si bien se tiene cierto personal para realizar las plantaciones, no se da esa misma importancia a los periodos de riego. Tanto que en ciertos espacios como los huertos escolares, son abandonados al cuidado de los estudiantes.
- **Ausencia de propuestas concretas**, la alcaldía a pesar de todas sus funciones y actividades, no realiza talleres de socialización ni divulga información de su estado actual. Por ello, no existe un plan de proyectos de mejora en esta entidad. Este hecho genera una permanencia de las actuales prácticas, manteniéndose un manejo de espacios en función a una simple sostenibilidad.
- **Ausencia de registro**, los registros de riego tanto como reportes de estos son inexistentes, así como una propuesta tecnificada para el manejo de información con las actuales herramientas computacionales. Es por ello que se encuentra en un estado propio de años pasados sin innovación.

## **1.4. Objetivos**

### **1.4.1. Objetivo general**

- Elaborar una propuesta de automatización del sistema de control de riego para el Vivero Forestal Municipal de El Alto, que pueda optimizar el registro y control del uso del agua, basado en equipos y herramientas de control industrial.

### **1.4.2. Objetivos específicos**

- Exponer la fundamentación teórica necesaria que permita la precisión en la comprensión y manejo de términos conceptuales referentes al ámbito de la automatización y, en específico, a su aplicabilidad en el control de riego.
- Analizar la situación actual del Vivero Forestal Municipal de El Alto y de sus dependencias jurisdiccionales (viveros, jardines botánicos y huertos escolares), para generar caminos de mejora en el proceso de control de riego con herramientas tecnificadas.
- Diseñar una propuesta de automatización para el actual control de riego, a través de la metodología Gemma con sus diferentes etapas que son la automatización, supervisión, interacción, implementación y pruebas.
- Desarrollar un sistema Scada para gestionar los procesos tanto de almacenamiento como de distribución de agua con tecnologías propias de automatización industrial como ser CX-Programmer y CX-Supervisor.
- Registrar los tiempos de riego, considerando el sector o área de la plantación, en una base de los datos, permitiendo contar con un seguimiento de las operaciones realizadas y coadyuvar de esta forma en el aprovechamiento de este recurso hídrico.

## **1.5. Justificación**

### **1.5.1. Justificación técnica**

La principal razón de automatizar, según Velázquez (2004, p. 7), es **el incremento de la productividad**. Esto se logra a través de la aplicación de un conjunto de técnicas basadas en sistemas capaces de recibir información del proceso sobre el cual actúan, para realizar acciones de análisis, organizarlas y controlarlas apropiadamente con el objetivo de optimizar los recursos. Es así que el actual sistema de control de riego tecnificado podría ser aprovechado no solo en el vivero forestal municipal, sino que en jardines botánicos y huertos escolares.

Otro beneficio que se busca con la automatización del control sobre el sistema de riego es, en términos industriales, **ofrecer productos de mejor calidad**. Al contar con una tecnología de control, esto permite que se amplíen sus características como el seguimiento de acciones a través y bases de datos que muestren los aspectos suscitados. Estos beneficios permiten que los productos finales, que en este caso son las especies vegetales, tengan un seguimiento en su producción a través de registros y reportes.

### **1.5.2. Justificación económica**

En cuanto a los beneficios económicos que se producen al automatizar el sistema de control de riego están:

- En corto plazo, el seguimiento inmediato del recurso hídrico como es el agua sobre los riegos producidos al momento del funcionamiento del sistema a través de mecanismos de supervisión y control.
- En mediano plazo, a través de los registros generar cuadros estadísticos y considerar los tiempos de riego versus la producción de especies vegetales.
- A largo plazo, la toma de decisiones sobre los reportes que se podrían generar por medio de los cuadros estadísticos en relación con los tiempos de riego y especies vegetales producidas.

Si bien todo equipo requiere mantenimiento, los equipos industriales tienen la característica de estar diseñados para prestar un alto rendimiento en condiciones muy adversas. Es decir, que comparado a los dispositivos que en la etapa de práctica se usan como el Arduino, los autómatas programables garantizan un funcionamiento continuo. Por ello, el presente proyecto tiene la iniciativa de utilizar estos automatatas, tomando en cuenta como producto final una propuesta seria presentada al Vivero Forestal Municipal de la ciudad de El Alto.

### **1.5.3. Justificación social**

No es un secreto que toda innovación contempla un prejuicio en la sociedad, para unos podría ser una innovación innecesaria y para otras muy necesaria. Sin embargo, el objetivo que pretende el proyecto actual, es presentar una **propuesta con el mayor número de equipos** que se utilizan en un entorno de trabajo real. En otros términos, se contemplan el uso de un autómata programable para generar un aporte real de propuesta seria.

La **seguridad laboral** es otro beneficio que se produce con la automatización. Este especifica que los implementos necesarios como botas, guantes e inhaladores no serán utilizados por ninguna persona, generándose un ahorro en la compra de los mismos y brindando seguridad a los trabajadores, esto principalmente a la hora de exponerse a algún tipo de solución. Es por tanto que la seguridad se presenta como uno de los principales beneficios de todo tipo de automatización y no puede ser ignorado por el actual trabajo.

Otro aspecto relevante a tomar en cuenta en la propuesta de control de riego es **la fuente de energía que contempla el proyecto**. Si bien se pretende utilizar la energía eléctrica que las empresas distribuidoras de electricidad proveen, también se pretende exponer una posibilidad a una energía renovable por el bajo consumo del mismo. La energía renovable que surge como opción es la energía fotovoltaica, misma que se logra a través de un banco de baterías con paneles solares. Esto porque el autómata programable funciona con solo 24 Voltios.

## **1.6. Metodología**

### **1.6.1. Método científico**

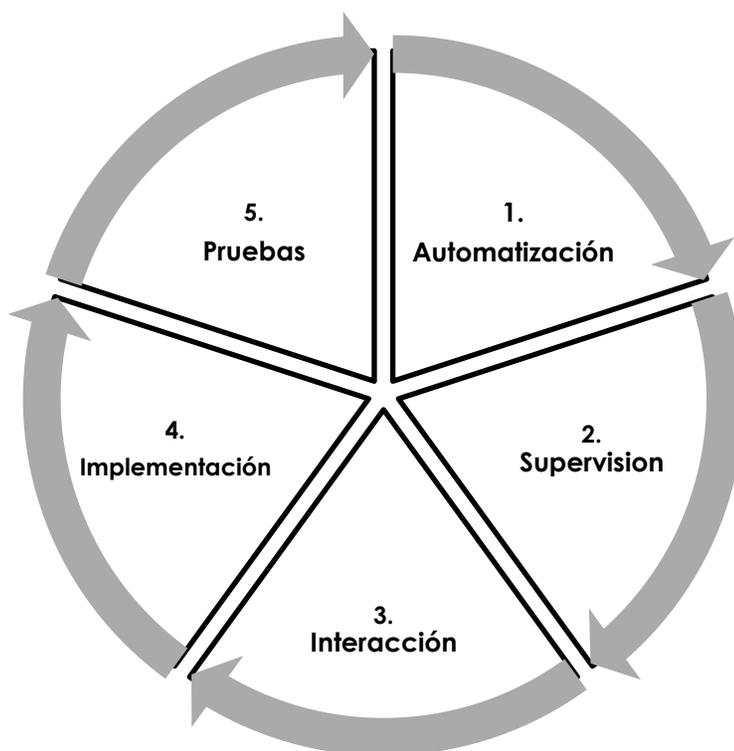
Las técnicas que se utilizaron a lo largo del proyecto, con respecto al método científico, incluyeron la investigación documental, la observación no participante directa, la observación participante directa y la entrevista de profundidad. La investigación documental proporcionó la base del estudio con material escrito y grabado. La observación no participante directa ayudó a entender los actuales sistemas de riego y mantenimiento. La observación participante directa proporcionó información relevante al formar parte de cursos de capacitación tanto en sistemas de riego como en el cultivo vegetal. Finalmente, la entrevista de profundidad, al ser un intercambio verbal, ayudó a reunir datos de problemas específicos con más profundidad y flexibilidad. Por medio de estas técnicas cualitativas, se obtuvieron supuestos para formular una propuesta de mejora del actual sistema de riego en diferentes espacios (viveros, jardines botánicos y huertos escolares) de la jurisdicción de la Alcaldía de El Alto.

### **1.6.2. Método de ingeniería**

Según Castro, G., Padilla, J. y Romero, E. (2005, p. 19), si se pretende que una automatización no solamente cause una mejora de la producción, sino que además resulte una inversión rentable en cuanto a la adquisición de una tecnología adecuada, es necesario contar con una metodología para llevar a cabo dicha automatización. Por ello, dos métodos, que también poseen un enfoque metodológico, propios de la automatización utilizados para este tipo de proyecto son la guía **Gemma** (Ponsa y Granollers, 2009, p. 6 ) y el **Grafcet**. Por un lado la guía Gemma es una metodología para prever todos los estados de un automatismo y, por otro, el Grafcet describe gráficamente los diferentes comportamientos de un automatismo secuencial. Ambos métodos, entre otros existentes de menor popularidad, coadyuvan a presentar una propuesta concreta de automatización.

Para ampliar y especificar la metodología, a continuación se expone las fases de desarrollo del proyecto sustentados por la guía Gemma. Según Ponsa y Granollers (2009, p. 6) el marco metodológico constara de las fases de **automatización, supervisión, interacción, implementación y pruebas**. Los mismos autores señalan que “en el caso de llevar a la practica un proyecto de automatización, es necesario seguir las fases de la metodología presentada, así como indicar el tipo de operarios” (p. 7).

**Figura 1.1:** Metodología de automatización



**Fuente:** Ponsa y Granollers (2009, p. 6)

La metodología gema es ampliamente expuesta a través de Ponsa y Vilanova (2005, pp. 39-43), donde se detalla, de sobremanera, en qué consisten cada una de estas fases. Esto para tener una mayor claridad a lo largo de todo el proceso de desarrollo del proyecto. Es así, que a continuación se detallan las mismas considerando su descripción en cada fase para el proyecto:

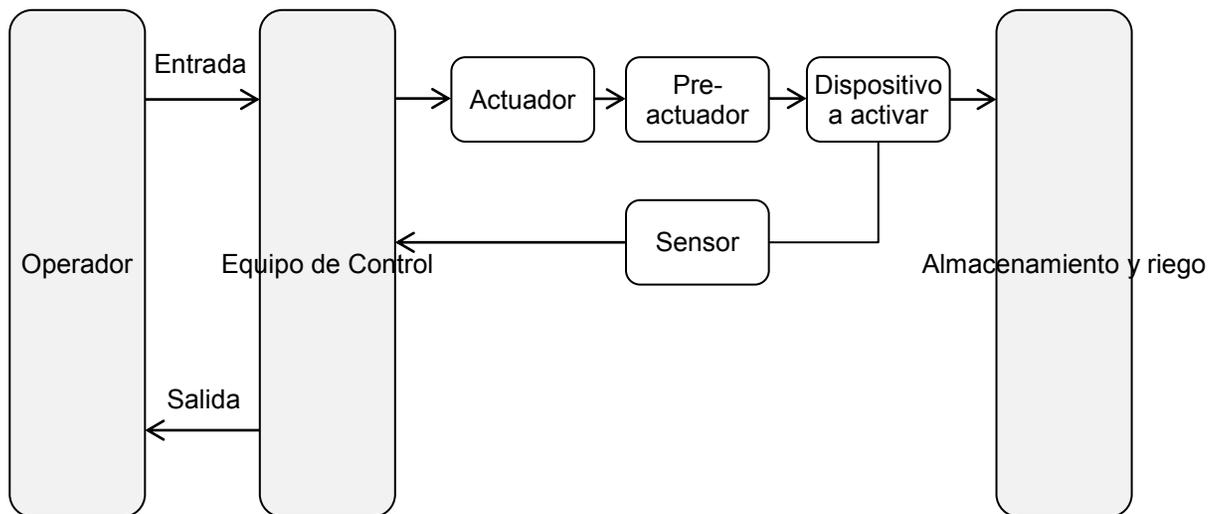
- En la fase de **automatización**, se procede a: i) observar los proceso a controlar generar Grafcet de primer nivel, ii) seleccionar un tipo de automatismo, iii) seleccionar el físico de sensores con actuadores y iv) generación del Grafcet de segundo nivel.
- En la segunda fase, sobre la **supervisión**, los pasos a seguir son: i) Reunir el máximo de especificaciones sobre los estados posibles en las que se puede encontrar el proceso, ii) definir los módulos a utilizar según la complejidad del problema y representarlos gráficamente y iii) los Grafcet parciales se en un solo Grafcet general que contemple todos los módulos enunciados en función de la complejidad del problema
- En la fase de **interacción** se concreta la intervención del operario mediante el diseño del panel de mando en función de las acciones físicas sobre dispositivos y la recepción de señales informativas visuales o acústicas.
- La penúltima fase de **implementación** contempla tanto la selección del lenguaje de programación del automatismo como traducción del Grafcet al lenguaje de programación.
- En la última fase de **prueba**, el operario puede verificar el algoritmo general sobre el automatismo, vigilando la evolución del proceso o interactuar con el proceso mediante el panel de mando, e incluso se podría emular situaciones de emergencia para analizar cómo responde el sistema.

Asimismo, al inmiscuirnos en el campo de producción vegetal, no podemos omitir aquellos métodos propios de la ingeniería agronómica en los diseños de sistemas de riego. Aquellos obligatorios a considerar en sistemas de riego son el **diseño agronómico** y el **diseño hidráulico**. Donde el primero responde determina la cantidad de agua que ha de transportar la instalación, correspondiente a las necesidades de riego. Y el diseño hidráulico se determina los componentes, dimensiones de la red.

## 1.7. Herramientas y tecnologías para la automatización

A continuación se presenta un esquema general (Figura 1.2) de los elementos mínimos necesarios para analizar un proceso a automatizar. Estos elementos están clasificados según su funcionamiento en cuanto a un enfoque sistemático. Es decir, están agrupados según el tipo de acción que realizarán. Las secciones que se pueden apreciar están divididas en tres etapas: Sección del operador, Sección del equipo de control y Sección del almacenamiento y riego del agua al sector o área destinada.

**Figura 1.2:** Esquema general de herramientas necesarias



**Fuente:** Elaboración propia (2020)

### 1.7.1. Sección del operador

En esta sección están involucrados los pulsadores, selectores y pilotos (Figura 1.3) que no son otra cosa que operadores eléctricos. Estos se encargan de enviar consignas al equipo de control para que este realice una determinada acción con la consigna. **Un pulsador**, es interruptor y/o habilitador que, cuando se oprime, permite el paso de la corriente eléctrica y, cuando se deja de oprimir, lo interrumpe.

**Figura 1.3:** Dispositivos de operación



**Fuente:** [www.weg.net](http://www.weg.net)<sup>1</sup> (2018)

Un **selector**, al igual de un pulsador nos permitirá elegir entre un estado y el otro, así como el estado 1 y el estado 0 ó habilitar y deshabilitar. El **piloto**, no es otra cosa que un dispositivo de señalización que nos indica en qué estado está el proceso o alguna consigna. Por último, el **paro de emergencia** deshabilita todo el proceso.

### 1.7.2. Sección de equipo de control

**Figura 1.4:** PLC de la marca Enron modelo CP1L-L20DT1-D



**Fuente:** <https://www.omron.com/> (2020)

<sup>1</sup> Imágenes capturadas del apartado de Home/Automatización Industrial del sitio [weg.net](http://weg.net).

El **Autómata Programable** (o PLC en inglés) es el dispositivo por defecto en este sector. Su masificación en la industria lo hace una herramienta imprescindible para la automatización actualmente. El PLC es un dispositivo electrónico que se programa para realizar acciones de control automáticamente. El autómata programable CP1L es un PLC compacto disponible con 10, 14, 20, 30, 40 o 60 puntos de E/S. Este equipo pasó a ser un equipo de instrucción y pruebas a un equipo de implementación; por tanto, se lo considera como el autómata de elección para la aplicación del sistema de control de riego. El **Anexo B** especifica las características fundamentales de este dispositivo, obtenidas de su misma hoja técnica (o *datasheet*).

### **1.7.3. Sección de riego**

El conjunto de dispositivos de riego hace posible que una determinada área pueda ser cultivada con la aplicación del agua necesaria. Dicho conjunto consta de una serie de cálculos fundamentales como son el diseño agronómico e hidráulico. Asimismo esto dependerá del tipo de riego que se especifique ya que podría ser tanto riego por aspersión como riego por goteo. Por tanto es en este sector de la automatización donde se toma en cuenta aquellos mecanismos que responderán al análisis, desarrollo e implementación para llegar al objetivo principal que es presentar una propuesta de riego tecnificado.

## **1.8. Límites y alcances del proyecto**

### **1.8.1. Límites del proyecto**

El objetivo principal del proyecto consiste en presentar una propuesta a través de un modelo o prototipo de tecnificación al sistema de control de riego al Vivero Forestal Municipal, esto para lograr un uso eficiente de agua a través de los registros de distribución de agua. De tal modo, este proyecto cuenta con ciertos limitantes que son detallados a continuación.

- Con relación a la principal limitación técnica del proyecto, el mismo está enfocado en proponer un uso eficiente en el riego con agua, pero no contempla en otro aspecto técnico que sería el fertirriego. Esto porque la mayor parte de los espacios del Vivero Forestal Municipal de la jurisdicción de la alcaldía de El Alto, tiene una tendencia a no utilizar fertilizantes.
- En relación con a la principal limitación económica, este proyecto no cuenta con una subvención de ningún tipo, sin embargo, se hizo el esfuerzo para la obtención de los diferentes dispositivos electrónicos para presentar una propuesta seria de implementación en el control de riego tecnificado.
- Con relación a la principal limitación social del proyecto, si bien el marco de trabajo dentro de la jurisdicción de la alcaldía de El Alto es amplia, la misma otorga los permisos pertinentes solo en algunas de ellas. Es decir que se trabajó en función de la disponibilidad de los ambientes.

### **1.8.2. Alcances del proyecto**

Más allá de los objetivos puntuales que persigue el proyecto, este proyecto pretende desarrollar, según un enfoque de automatización industrial, una sección del operador y una sección de control, tomando en cuenta la sección de producción limitada al conocimiento conceptual sustentado. Estas secciones permiten tener una representación del sistema completo. Es por ello que a continuación se describen los mismos:

- La sección del operador consiste en la incorporación de los diferentes mecanismos para la asignación de consignas y supervisión de estados, necesarias para las siguientes etapas. Es decir, el proyecto tiene la finalidad de implementar pulsadores, luces piloto, selectores y paradas de emergencia. Estos, en relación a los mecanismos necesarios para un correcto funcionamiento.

- La sección de control, está comprendida en su totalidad por un autómata programable (o PLC en inglés). Este, realiza las tareas de acuerdo a las instrucciones establecidas en la sección del operador. En otras palabras, el proyecto contempla el uso de un PLC para la automatización y de los conceptos que este involucra como ser el uso de diagrama escalera, Grafcet y la guía Gemma como metodología de implementación de un prototipo.
- En la sección de producción, según el caso específico del proyecto, comprende el funcionamiento del mismo para espacios agrícolas, florales y forestales. Siendo, de esta forma, un proyecto adaptativo para la institución con modificaciones en cantidades de aparatos operativos y no en el funcionamiento mismo del proyecto.

Estas secciones específicas no solo permitirán alcanzar los objetivos planteados, sino que permitirán generar conclusiones valiosas para futuras implementaciones en base al control de procesos de riego. Es por tanto, que su seguimiento está especificado no solo como alcance, sino como modelo de análisis de futuros proyectos. Por ello, el aporte académico está latente para los interesados en su información.

### **1.9. Aportes**

Todo proyecto establecido que pasa desde un **análisis**, a través de un **desarrollo**, para llegar a una **implementación en prototipo**, brinda a la humanidad avances y descubrimientos en nuevas tecnologías. Es así que la aplicación de los conceptos técnicos no solo favorecerá al desarrollador, sino que beneficiará a las instituciones en las cuales el proyecto se presente. Es por tanto que el actual proyecto contribuye tanto al Vivero Forestal Municipal de El Alto como a la Universidad Pública de El Alto. El vivero obtiene una propuesta concreta de como poder controlar el sistema de riego a través de herramientas de automatización. La universidad obtiene para su comunidad estudiantil y profesional un respaldo sobre cómo se podría aplicar un sistema automatizado.

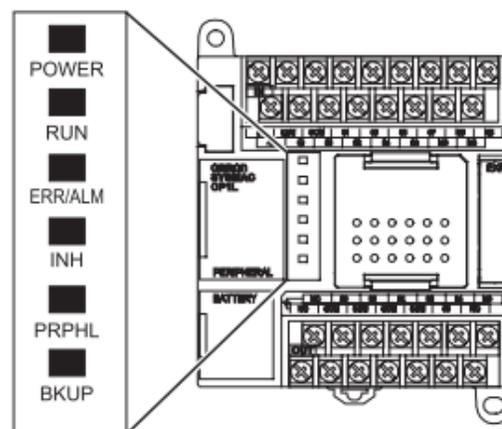
## 2. MARCO TEÓRICO

### 2.1. Autómatas programables

Según afirma Aguilera (2002, p.13), hasta no hace mucho tiempo el control de procesos industriales se hacía de forma cableada por medio de contactores y relevadores. Al operario que se encontraba a cargo de este tipo de instalaciones, se le exigía tener altos conocimientos técnicos para poder realizarlas y posteriormente mantenerlas en funcionamiento. Además cualquier variación en el proceso suponía modificar físicamente gran parte de las conexiones de los montajes siendo necesario dedicar mucho tiempo además de un gran esfuerzo técnico, por lo que se incide directamente un mayor desembolso económico.

En la actualidad no se puede entender un proceso complejo de alto nivel desarrollado para técnicas cableadas. La computadora y los autómatas programables han intervenido de una forma considerable para que este tipo de instalación se haya visto sustituida por otras de forma programada. Esta forma programada puede tener un gran nivel de practicidad en el ámbito industrial, ya que puede ser modificado de forma inmediata.

**Figura 2.1:** Esquema de un autómata programable



**Fuente:** omron.eu<sup>2</sup> (2020)

<sup>2</sup> <https://industrial.omron.eu/en/products/CP1L-L20DT-D>

El Autómata Programable Industrial (API, ver **Figura 2.1**) nació como solución al control de circuitos complejos de automatización. Por lo tanto se puede decir que un API no es más que un aparato electrónico que sustituye los circuitos auxiliares o de mando de los sistemas automáticos. A él se le conectan los captadores (transductores botones) por una parte, y los actuadores (bobinas de contactores, lámparas) por otra.

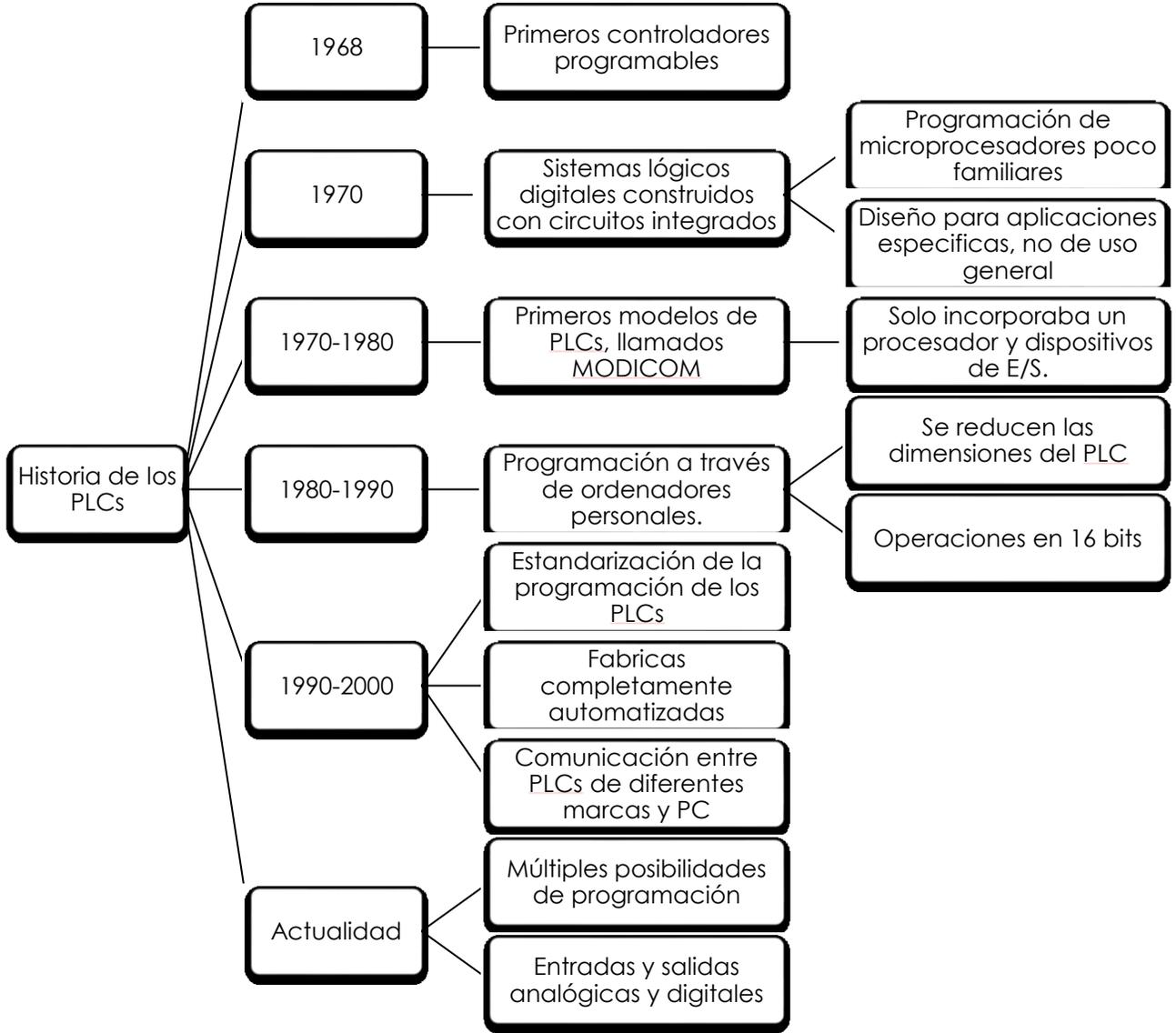
### **2.1.1. Definición de los autómatas programables**

Se entiende por Controlador Lógico Programable (PLC), o Autómata Programable, a toda máquina electrónica diseñada para controlar en tiempo real y en medio industrial procesos secuenciales (Aguilera, 2002, p.14). Por tanto, un automatismo programable es un dispositivo electrónico que puede controlar un proceso y que tiene la capacidad de ser programado o reprogramado rápidamente según la demanda de la aplicación. Este equipo funciona monitoreando sus entradas, y dependiendo de su estado, activa o desactiva sus salidas. El usuario introduce al automatismo un programa, usualmente vía Software, para ocasionar que este se comporte de la manera deseada.

### **2.1.2. Antecedentes y evolución de los PLC's**

Desde el comienzo de la industrialización, el hombre ha buscado cómo hacer que los trabajos se realizasen de la forma más ágil y menos tediosa para el operador en cuestión. Los PLCs han sido un mecanismo clave en este proceso puesto que permiten, entre otras cosas, que ciertas tareas se realicen de forma más rápida y que el hombre evite su aparición en trabajos peligrosos tanto como para él, como para su entorno más próximo (Marioz, 2019). De este modo, hoy en día estamos rodeados de estos mecanismos que, rebasando la frontera de lo industrial, pueden encontrarse en semáforos; gestión de iluminación en parques, jardines y escaparates; control de puertas automáticas; e incluso en el control de dispositivos del hogar como ventanas, toldos, climatización, etc.

**Figura 2.2: Historia de los PLC's**



**Fuente:** Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y control de la UNED (2011, p.8)

El departamento de electrónica de la Universidad Nacional de Educación a Distancia (UNED) conocida como DIEEC, presento en 2011 una descripción por demás aceptable con respecto a los antecedentes del PLC. Esta institución afirma que el desarrollo de los PLC's fue dirigido originalmente por los requerimientos de los fabricantes de automóviles. Estos cambiaban constantemente los sistemas de control en sus líneas de producción de modo que necesitaban un modo más económico para realizarlo puesto que, en el pasado, esto requería un extenso re-alambrado de bancos de relevadores (procedimiento muy costoso). De este modo, a finales de los años 60, la industria necesitaba cada vez más un sistema de control económico, robusto, flexible y fácilmente modificable.

Así, en 1968 aparecieron los primeros autómatas programables (APIs o PLCs). La compañía americana Bedford Associates sugirió así un Controlador Modular Digital (MODICON) para su utilización en una compañía de automoción y **MODICON 084** fue el primer PLC con una aplicación industrial (1968). Los nuevos controladores debían ser fácilmente programables por ingenieros de planta o personal de mantenimiento, su tiempo de vida debía ser largo y los cambios de programa tenían que realizarse de forma sencilla. También se imponía que pudiera trabajar sin problemas en entornos adversos. Para ello se utilizó una técnica de programación familiar y se reemplazó el uso de relevadores mecánicos por otros de estado sólido.

A principios de los 70, los PLC ya incorporaban el microprocesador. En 1973 aparecieron los PLCs con la capacidad de comunicación, Modbus de MODICON. De este modo, los PLCs eran capaces de intercambiar información entre ellos y podían situarse lejos de los procesadores y los objetos que iban a controlar. Así se incorporaron también más prestaciones como manipulación de datos, cálculos matemáticos, elementos de comunicación hombre-máquina, etc. A mediados de los años 70, apareció la tecnología PLC, basada en microprocesadores bit-slice (ej. AMD 2901/2903). Los principales productores de PLCs en esos tiempos se convirtieron en compañías como: Allen-Bradley, Siemens, Festo, Fanuc, Honeywell, Philips, Telemecanique, General Electric etc.

Además, se realizaron mejoras como el aumento de su memoria; la posibilidad de tener entradas/salidas remotas tanto analógicas como numéricas, funciones de control de posicionamiento; aparición de lenguajes con mayor número de funciones y más potentes; y el aumento del desarrollo de las comunicaciones con periféricos y ordenadores. Por ese entonces, las tecnologías dominantes de estos dispositivos eran máquina de estados secuenciales y con CPUs basadas en el desplazamiento de bit. Los PLC más populares fueron los AMD 2901 y 2903 por parte de Modicon. Los microprocesadores convencionales aportaron la potencia necesaria para resolver de forma rápida y completa la lógica de los pequeños PLCs. Así, por cada modelo de microprocesador, existía un modelo de PLC basado en el mismo, aunque fue el 2903 uno de los más utilizados. Sin embargo, esta falta de estandarización generó una gran variedad de incompatibilidades en la comunicación debido a la existencia de un maremágnum de sistemas físicos y protocolos incompatibles entre sí.

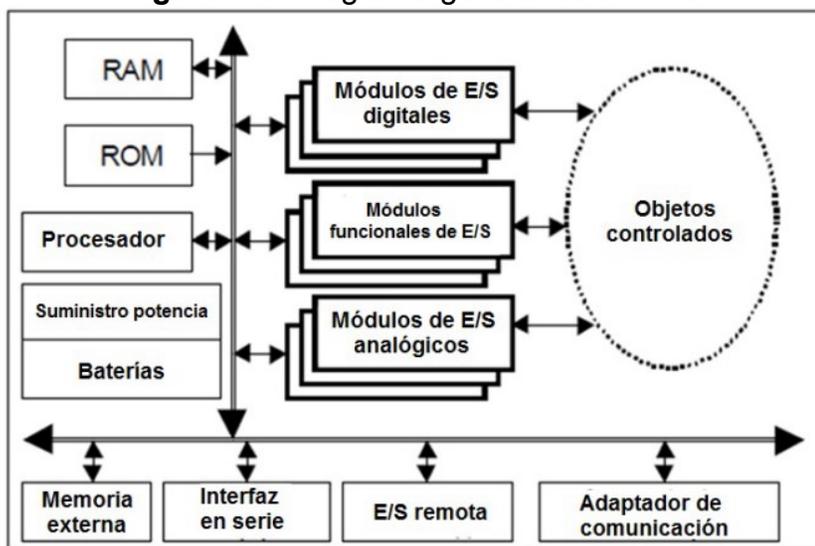
Fue en los años 80 cuando se produjo un intento de estandarización de las comunicaciones con el protocolo MAP (Manufacturing Automation Protocol) de General Motors. Se consiguió también reducir las dimensiones de los PLC y se pasó a programar con una programación simbólica a través de ordenadores personales en vez de los terminales clásicos de programación. De hecho, hoy en día, el PLC más pequeño es del tamaño de un simple relevador. Así, en la década de los 80 se mejoraron las prestaciones de los PLCs referidas a: velocidad de respuesta, reducción de las dimensiones, concentración del número de entradas/salidas en los respectivos módulos, desarrollo de módulos de control continuo, PID, servo controladores, control inteligente y fuzzy.

Los años 90 mostraron una reducción gradual en el número de protocolos nuevos y en la modernización de las capas físicas de los protocolos más populares que lograron sobrevivir a los años 80. El último estándar, IEC 1131-3, trata de unificar el sistema de programación de todos los PLC en un único estándar internacional. Hoy en día disponemos de PLCs que pueden ser programados en diagramas de bloques, listas de instrucciones o incluso texto estructurado al mismo tiempo.

Hoy en día, la tendencia actual es dotar al PLC de funciones específicas de control y canales de comunicación para que pueda conectarse entre sí y con ordenadores en red, creando así una red de autómatas. Como ya se ha comentado, las primeras aplicaciones de los autómatas programables se dieron en la industria automotriz para sustituir los complejos equipos basados en relés. Sin embargo, la disminución de tamaño y el menor costo han permitido que los autómatas sean utilizados en todos los sectores de la industria. A modo de ejemplo, los autómatas tienen múltiples campos de aplicación como automóvil, petroquímica, metalurgia, alimentación, producción de energía, tráfico entre otros.

### 2.1.3. Estructura general de los PLCs

**Figura 2.3:** Diagrama general de un PLC



**Fuente:** Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y control de la UNED (2011, p.9)

Como puede observarse en la Figura 2.3, para que el sistema funcione es necesario que exista un suministro de potencia cuyo propósito principal es garantizar los voltajes de operación internos del controlador y sus bloques (Pérez, 2016, p. 11). Los valores más frecuentemente utilizados son  $\pm 5V$ ,  $\pm 12V$  y  $\pm 24V$  y existen principalmente dos módulos de suministro de potencia: los que utilizan un voltaje de entra de la red de trabajo los que utilizan suministradores de potencia operacionales para el control de los objetos.

La parte principal es la denominada “unidad central de procesamiento” o CPU que contiene la parte de procesamiento del controlador y está basada en un microprocesador que permite utilizar aritmética y operaciones lógicas para realizar diferentes funciones. Además, la CPU, testea también frecuentemente el PLC para lograr encontrar errores en su debido tiempo. Los primeros PLCs utilizaron chips que habían sido procesados mediante la técnica denominada “bit-slice”, como el AMD2901, 2903, etc.

La transferencia de datos y/o direcciones en los PLCs es posible gracias a cuatro tipos de buses diferentes:

- bus de datos, para la transferencia de datos de los componentes individuales.
- bus de direcciones, para aquellas transferencias entre celdas donde se habían guardado datos.
- bus de control, para las señales de control de los componentes internos.
- bus de sistema, para conectar los puertos con los módulos de E/S.

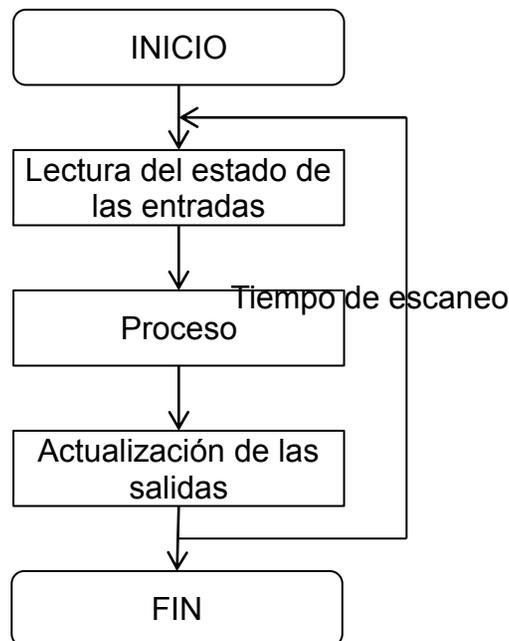
El lugar donde se guardan los datos y las instrucciones es la memoria que se divide en memoria permanente, PM, y memoria operacional, conocida como memoria de acceso aleatorio o RAM. La primera, la PM, se basa en las ROM, EPROM, EEPROM o FLASH; es donde se ejecuta el sistema de operación del PLC y puede ser reemplazada. Sin embargo, la RAM, es donde se guarda y ejecuta el programa en cuestión utilizado y es la de tipo SRAM la que se utiliza habitualmente. La condición común para las entradas de dos componentes digitales de un PLC se guarda en una parte de la RAM y se denomina tabla PII o entrada imagen de proceso. La salida controlada, o el último valor de la salida calculado por las funciones lógicas, se guardan en la parte de la RAM denominada tabla PIO, salida de la imagen del proceso. El programa utilizado también puede guardarse en una memoria externa permanente (EPROM o EEPROM) que, para ciertos PLCs, puede ser un módulo externo que se coloca en una toma del panel frontal.

Finalmente, los módulos de E/S, son aquellos módulos de señal (SM) que coordinan la entrada y salida de las señales, con aquellas internas del PLC. Estas señales pueden ser digitales (DI, DO) y analógicas (AI, AO), y provienen o van a dispositivos como sensores, interruptores, actuadores, etc. Los SMs analógicos utilizan en general un voltaje en DC y una corriente directa. De este modo, opto acopladores, transistores y relés son empleados en la salida digital del SMs para cambiar los estados de la señal de salida con el fin de proteger a estos dispositivos de situaciones como un cortocircuito, una sobrecarga o un voltaje excesivo. Finalmente, los términos “Sinking” y “Sourcing” explican cómo se realiza la conexión de las PLC a los sensores y actuadores:

- Sinking = Línea GND común (-) – tierra común
- • Sourcing = Línea VCC común (+) – suministro de potencia común

#### 2.1.4. Principio de funcionamiento de un PLC

**Figura 2.4:** Modo de operación de un PLC



**Fuente:** Ferrero (2020)

Según el Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y control de la UNED (2011, p. 19) un PLC funciona cíclicamente, y a continuación se describe en la Figura 2.4. Ferrero (2020) sostiene que el programa que ejecuta un PLC trabaja en forma de “escaneo” (to scan= explorar, registrar, examinar) secuencial, o sea que ejecuta secuencialmente las órdenes: verifica el último estado que se observó en las entradas, realiza un proceso con los datos obtenidos y con el programa cargado, finalmente actualiza el estado de las salidas físicas y lógicas. Veamos los tres pasos:

1. Lectura del estado de las entradas, donde lo primero que hace el PLC es verificar el estado de las entradas y asociarlo a variable que serán utilizadas durante el resto del programa. Si la entrada es digital, el PLC ASOCIA UN “1” o un “0” a la variable respectiva, de acuerdo al estado del sensor que se encuentre instalado en dicha entrada, es decir que se encuentra activado o no.
2. Proceso, donde una vez que se han leído las entradas, el PLC ejecuta las órdenes de acuerdo al programa que se tenga en la memoria. Durante este paso se ejecutan operaciones matemáticas, se verifica el estado de los temporizadores al igual que el de los contadores, y se toman decisiones que finalmente han de llegar a los módulos de salida.
3. Actualización de las salidas, donde una vez concluido el procesamiento del programa cargado en memoria, la CPU ordena la actualización de los valores que deben tener las salidas, o sea la activación (ON) o desactivación (OFF) si se trata de salidas digitales, o un voltaje proporcional si se trata de salidas analógicas.
4. Tiempo de escaneo, donde el tiempo de escaneo (scan time), también llamado tiempo de respuesta, es determinado por el lapso que hay entre la ejecución por parte del PLC del primer paso, ir hasta el tercero y de nuevo llegar al primero (ver diagrama anterior) o sea realizar un ciclo completo. Cuanto más pequeño sea el tiempo de escaneo, mayor será la velocidad de respuesta del PLC.

## **2.2. Grafcet**

En el mundo de la automatización se han conocido diversos métodos para programar y desarrollar flujos lógicos. En las primeras etapas de la automatización industrial, lo relacionado a la programación estaba limitado a un experto en la materia (Gandhi, 2019). Hoy en día, sin embargo, hay otras posibilidades para implementar estos mismos diagramas lógicos, uno muy popular y sencillo es el Grafcet.

Este diagrama funcional surgió en Francia a mediados de los años 70, debido a la colaboración entre fabricantes de autómatas (Telemecanique y Aper) y dos organismos oficiales, AFCET (Asociación Francesa de Cibernética, Economía y Técnica) y ADEPA (Agencia Nacional para el Desarrollo de la Producción Automatizada). Está homologado en Francia (NFC), Alemania (DIN) y por la Comisión Electrotécnica Internacional (IEC).

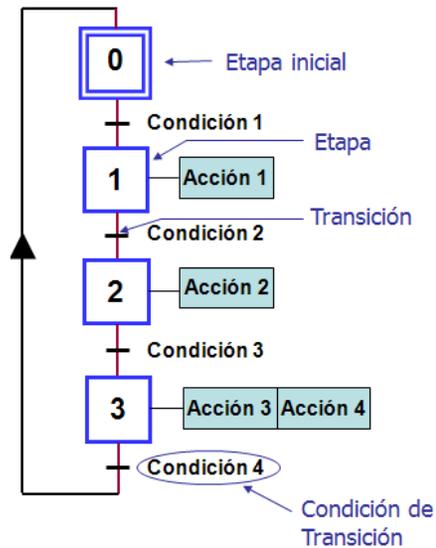
### **2.2.1. Definición del Grafcet**

Valverde (2000) afirma que el Grafcet “es un sistema (secuencial), de presentación de mandatos que provocan las sucesivas transiciones entre etapas” (p. 1). Asimismo, Aguilera (2002, p. 48) lo define como un diagrama funcional que describe la evolución del proceso que se quiere automatizar. Por tanto, el Grafcet está definido por elementos gráficos y reglas de evolución que reflejan la dinámica del comportamiento del sistema.

### **2.2.2. Estructura del Grafcet**

Una secuencia en GRAFCET se compone de una serie de etapas representadas por cajas rectangulares conectadas entre sí por líneas verticales (ver Figura 2.5). Cada etapa representa un estado particular del sistema. Cada línea vertical representa a su vez una transición. Una transición está asociada a una condición, que si se cumple, da paso a la desactivación de la etapa que la precede y la activación de la posterior.

**Figura 2.5:** Estructura del Grafcet



Fuente: Elaboración propia (2020)

### 2.2.3. Principales elementos del Grafcet

Los elementos principales que componen el GRAFCET son las ETAPAS por las que se pasa, las ACCIONES asociadas a las etapas y las CONDICIONES DE TRANSICIÓN para pasar de una etapa a otra.

#### 2.2.3.1. Etapas

Una ETAPA es una fase o estado de un sistema, que lleva asociada una o varias acciones a realizar sobre un proceso. La ETAPA se representa por un cuadrado o rectángulo numerado.

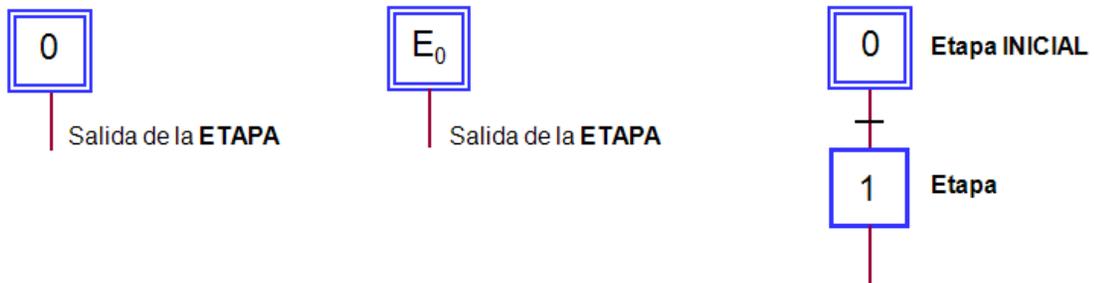
**Figura 2.6:** Representación de una etapa en Grafcet



Fuente: Elaboración propia (2020)

Para distinguir el comienzo del proceso, la primera ETAPA se representa con un doble cuadrado.

**Figura 2.7:** Distinción entre comienzo y fin en Grafcet

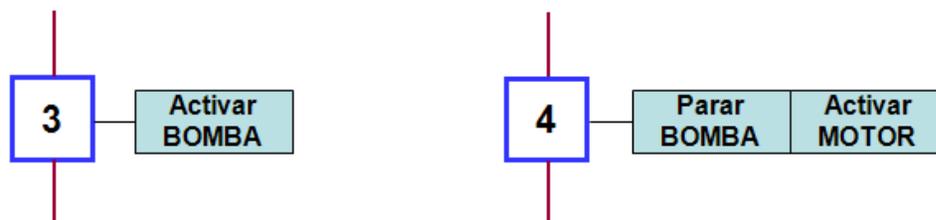


**Fuente:** Elaboración propia (2020)

### 2.2.3.2. Acciones

Son las ACCIONES a realizar en cada una de las etapas de un proceso. Las ACCIONES se describen en el interior de un rectángulo unido al símbolo de la ETAPA a la que van asociadas. Una ETAPA puede llevar asociada varias ACCIONES.

**Figura 2.8:** Representación de una acción en Grafcet



**Fuente:** Elaboración propia (2020)

### 2.2.3.3. Transiciones

La TRANSICIÓN es la condición que se ha de cumplir para pasar de una ETAPA a otra del GRAFCET. La TRANSICIÓN se representa por una línea vertical que une dos ETAPAS, y la CONDICIÓN de TRANSICIÓN por una línea horizontal que cruza la unión entre etapas.

Figura 2.9: Representación de una transición en Grafcet



Fuente: Elaboración propia (2020)

#### 2.2.4. Reglas de evolución en el Grafcet

Las reglas de evolución del Grafcet son las siguientes:

- El proceso se descompone en **ETAPAS**, que serán activadas de forma secuencial.
- Una o varias **ACCIONES** se asocian a cada **ETAPA**. Estas **ACCIONES** solo serán activas cuando la etapa esté activa.
- Una **ETAPA** se hace activa cuando la precedente lo está y la **CONDICIÓN de TRANSICIÓN** entre ambas ha sido activada.
- La activación de una **CONDICIÓN de TRANSICIÓN** implica la activación de la **ETAPA** siguiente y la desactivación de la **ETAPA** precedente.
- La **ETAPA INICIAL** tiene que ser activada antes de que se inicie el ciclo del **GRAF CET**. Un ciclo está formado por todas las **ETAPAS** posteriores a la inicial.

#### 2.2.5. Estructuras básicas el Grafcet

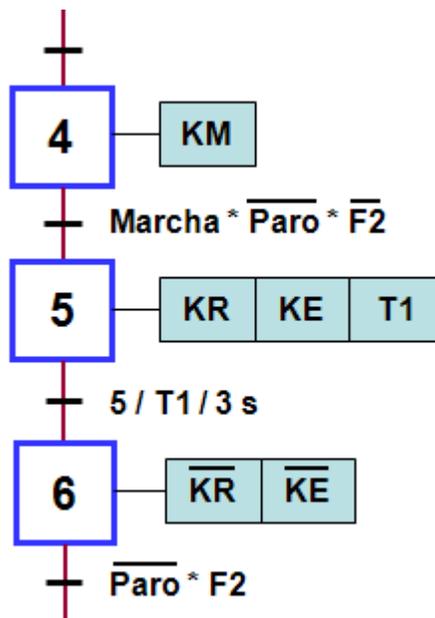
Las estructuras básicas que nos podemos encontrar en un **GRAF CET** son las siguientes:

- Secuencia lineal.
- Divergencia (OR).
- Convergencia (OR).
- Divergencia simultánea (AND).
- Convergencia simultánea (AND).
- Salto de etapas
- Repetición de secuencia

### 2.2.5.1. Secuencia lineal

En este tipo de secuencia el GRAFCET evoluciona en forma consecutiva sin ningún tipo de selección.

**Figura 2.10:** Representación de una secuencia lineal en Grafcet

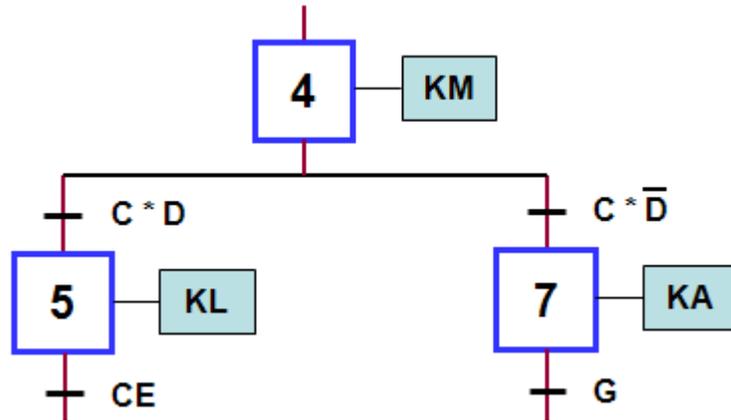


**Fuente:** Elaboración propia (2020)

### 2.1.5.2. Divergencia

En una DIVERGENCIA dependiendo de la condición de transición que se cumpla, el GRAFCET evoluciona hacia una secuencia de etapas u otra.

**Figura 2.11:** Representación de una divergencia en Grafcet



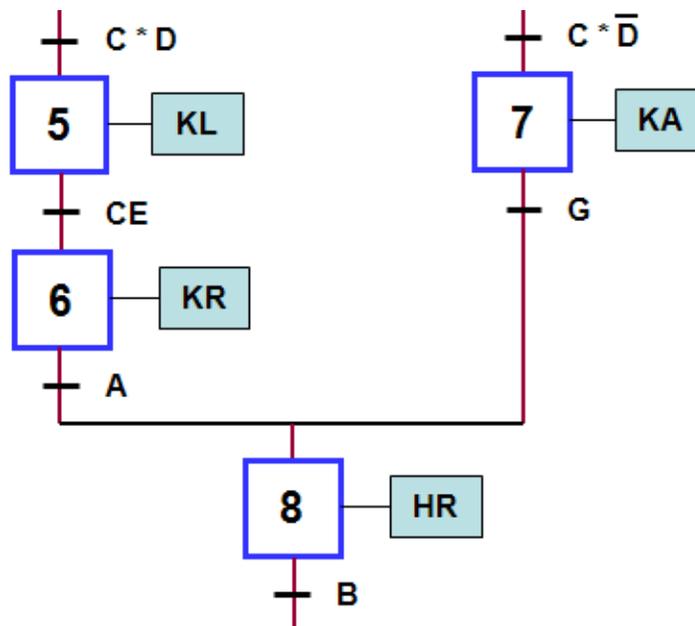
Fuente: Elaboración propia (2020)

De la Etapa 4 podemos seguir por la Etapa 5 si se cumple la condición de transición  $C * D$ , o por la Etapa 7 si se cumple la condición de transición  $C * \text{NOT } D$ .

### 2.2.5.3. Convergencia

Se produce una CONVERGENCIA cuando a una etapa se puede llegar por más de un camino.

**Figura 2.12:** Representación de una convergencia en Grafcet



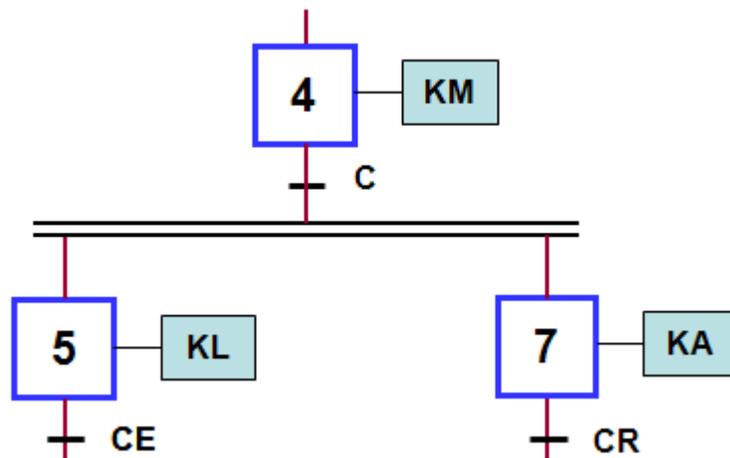
Fuente: Elaboración propia (2020)

La Etapa 8 se puede activar si venimos de la Etapa 6 y se cumple la condición de transición A o si venimos de la Etapa 7 y se cumple la condición de transición G.

#### 2.2.5.4. Divergencia simultanea

Se produce una DIVERGENCIA SIMULTÁNEA cuando el GRAFCET evoluciona simultáneamente hacia más de una etapa al cumplirse la condición de transición que da lugar a la divergencia.

**Figura 2.13:** Representación de una divergencia simultánea en Grafcet



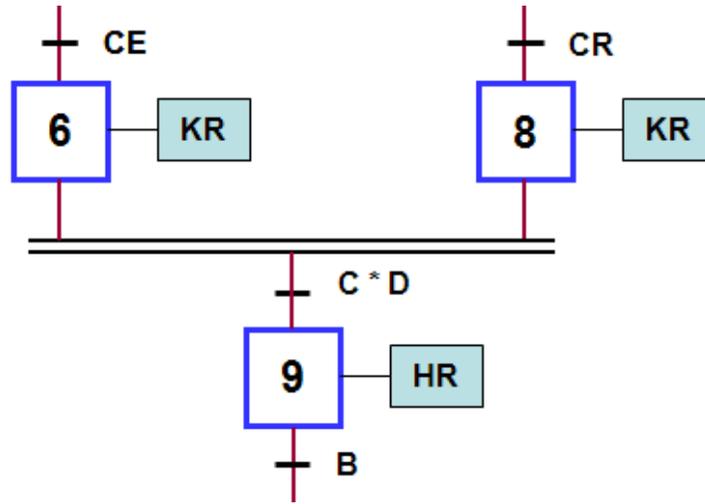
Fuente: Elaboración propia (2020)

Si está activa la Etapa 4 y se cumple la condición de transición C, se activan la Etapa 5 y la Etapa 7 simultáneamente.

#### 2.2.5.5. Convergencia simultanea

Se produce cuando una etapa solo evoluciona si las etapas anteriores están activas simultáneamente y se cumple la condición de transición. Si las Etapa 6 y Etapa 8, presentadas en la Figura 2.14, están activas simultáneamente y se cumple la condición de transición C\*D, se activará la Etapa 9.

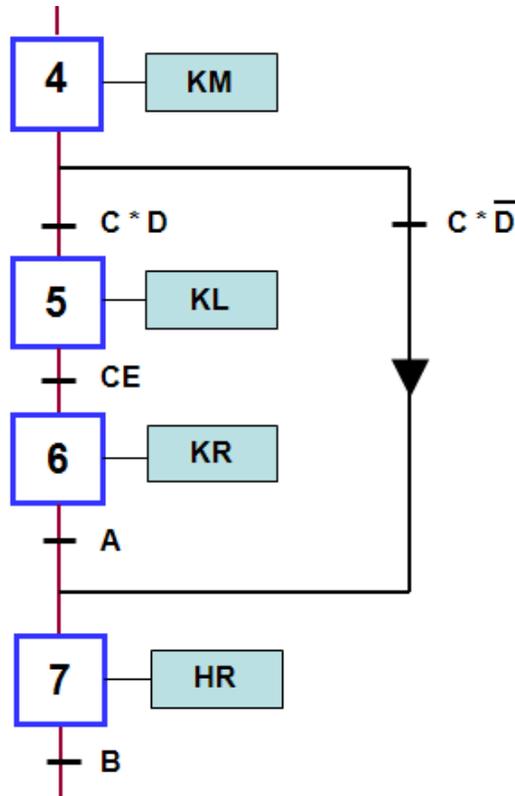
Figura 2.14: Representación de una convergencia simultánea en Grafcet



Fuente: Elaboración propia (2020)

#### 2.2.5.6. Salto de etapas

Figura 2.15: Representación de un salto de etapas en Grafcet



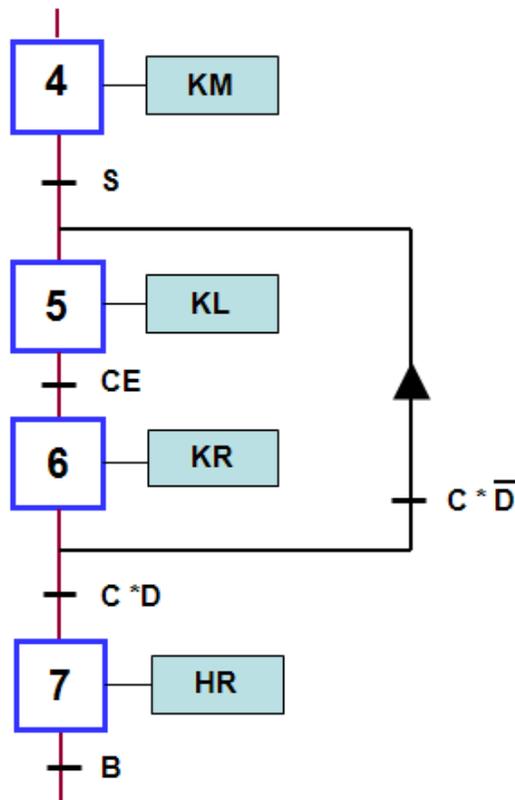
Fuente: Elaboración propia (2020)

Según la condición de transición que se cumpla, la evolución se produce hacia una serie de etapas o bien hace un salto hacia adelante, no activando estas etapas. Podría considerarse un caso particular de divergencia. Según la Figura 2.15 De la **Etapa 4** podemos seguir por la **Etapa 5** si se cumple la condición  $C * D$ , o saltamos a la **Etapa 7** si se cumple la condición  $C * \text{NOT } D$ .

### 2.2.5.7. Repetición de secuencia

Según la condición de transición que se cumpla, la evolución se produce hacia una serie de etapas o bien hace un salto hacia atrás, repitiendo las etapas anteriores.

**Figura 2.16:** Representación de una repetición de secuencia en Grafcet



**Fuente:** Elaboración propia (2020)

De la Etapa 6, Figura 2.16, podemos seguir por la Etapa 7 si se cumple la condición  $C * D$ , o volvemos a la Etapa 5 si se cumple la condición  $C * \text{NOT } D$ .

## 2.3. Gemma

En un proceso productivo una máquina no está siempre funcionando en modo automático, pueden surgir problemas que, por ejemplo, conlleven a una parada inmediata de la máquina o proceso (Recanzone, Sosa, Bender, Blet, Simon, 2013, p. 4). Por ello, en la automatización de una máquina es necesario prever todos los estados posibles: funcionamiento manual o semiautomático, paradas de emergencia, puesta en marcha, etc. Asimismo, el propio automatismo debe ser capaz para detectar defectos en la parte operativa y colaborar con el operario o técnico de mantenimiento para su puesta en marcha y reparación, entre otras. Para ello, la agencia ADEPA (Agence nationale pour le Développement de la Production Appliquée a l'industrie) desarrollo la guía Gemma.

### 2.3.1. Definición de la guía Gemma

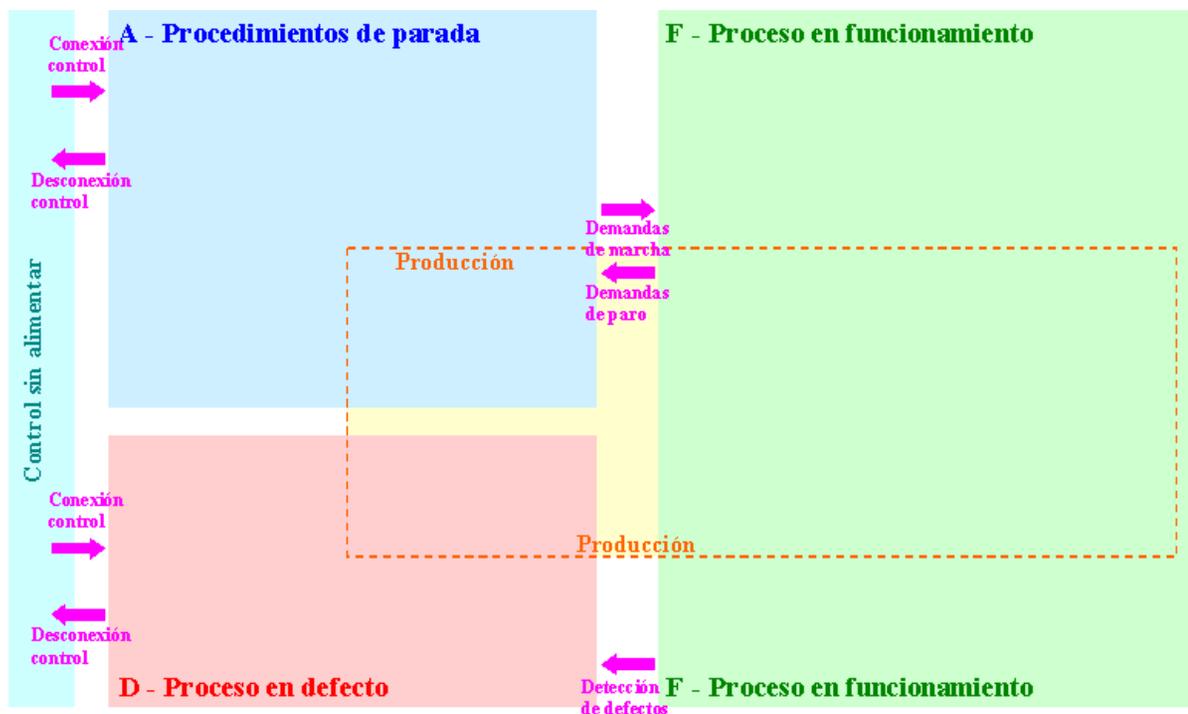
La guía Gemma (proveniente del francés Guide d'Etudes des Modes de Marches et d'Arrêts), "trata de una representación organizada de todos los modos o estados de marcha y paradas en que se puede encontrar un proceso de producción automatizado" (Modos de marcha y parado, 2003, p. 1), brindando una orientación sobre los saltos o transiciones que pueden darse de un estado a otro." Por tanto, podemos decir también, que la Gemma es una guía gráfica que permite seleccionar y describir de forma simple, los diferentes estados de marcha y paro, así como sus posibles evoluciones de un estado a otro.

### 2.3.2. Descripción de la guía Gemma

Tal como lo describe Boix (2020), un automatismo consta de dos partes fundamentales: el **sistema de producción** y el **control de este sistema** (ordenador, autómatas programables, etc.). Asimismo, el control puede estar alimentado o sin alimentar y se debe estudiar el paso de un estado a otro. Esto para tener una idea de cómo se producen los cambios en un procesos automatizado.

Cuando el control está alimentado, el sistema puede estar en tres situaciones: en **funcionamiento**, **parado** (o en proceso de parada) y en **defecto**. Puede haber producción en cada una de estas tres situaciones; en funcionamiento sin ninguna duda pero también se puede producir cuando la máquina está en proceso de parada y cuando la máquina está en ciertas condiciones de defecto. La guía Gemma representa cada una de las cuatro situaciones (sin alimentar, funcionamiento, parada y defecto) mediante sendos rectángulos y la producción mediante un quinto rectángulo que se interseca con los tres rectángulos principales, tal como muestra la figura siguiente.

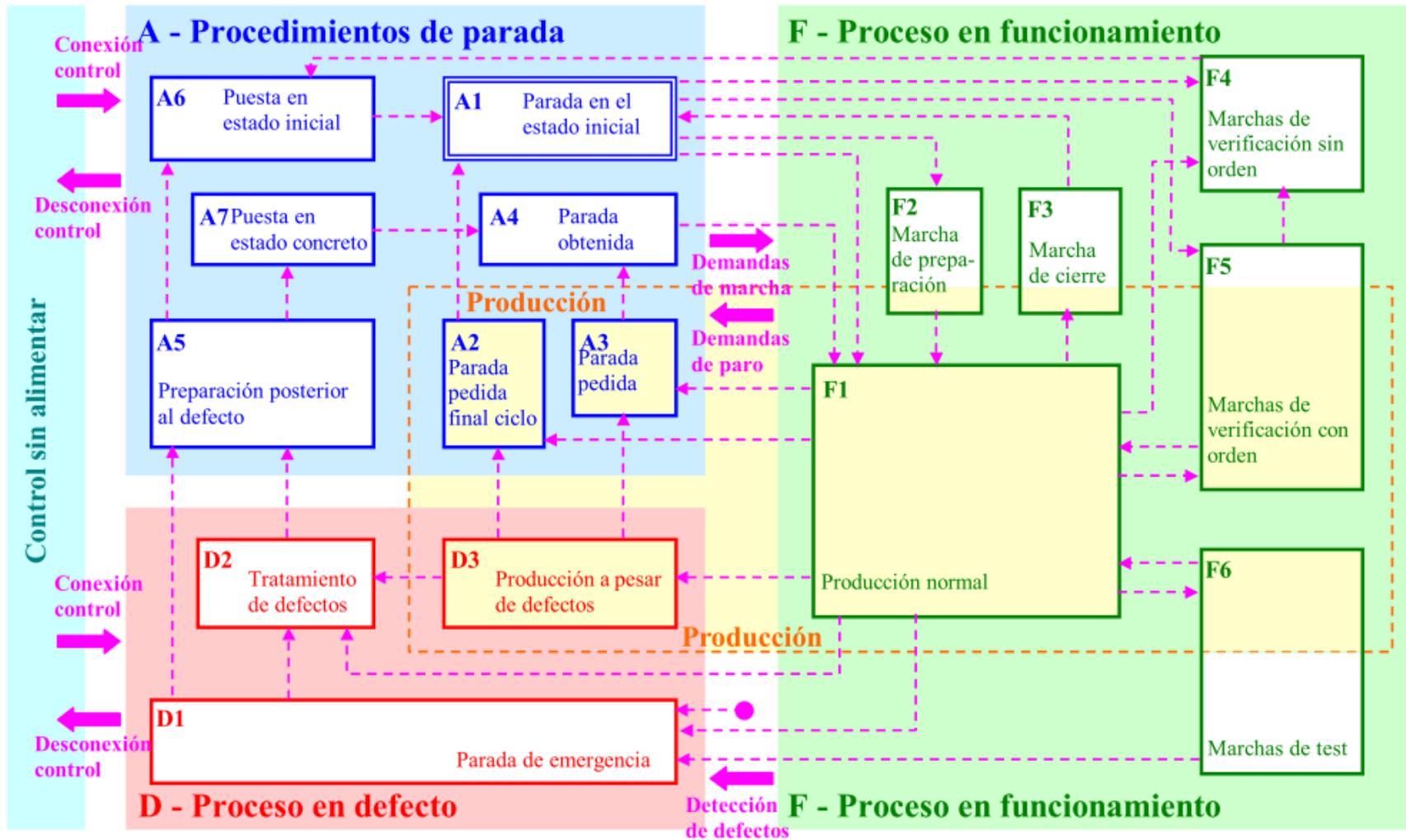
**Figura 2.17:** Representación parcial de la guía Gemma



**Fuente:** Boix (2020)

Cada una de las situaciones mencionadas se puede subdividir en varias de forma que, al final, hay 17 estados de funcionamiento posibles. De la misma forma, conviene mencionar que no todos los procesos precisarán todos estos estados pero podemos afirmar que los estados necesarios en cada proceso podrán fácilmente relacionarse con una parte de los que propone la GEMMA.

Figura 2.18: Representación completa de la guía Gemma



Fuente: Boix (2020)

### 2.3.2.1. Grupo F: Procedimientos de funciones

Como se muestra en la Figura 2.18, este grupo contiene todos los modos de funcionamiento necesarios para la obtención de la producción; es decir los de funcionamiento normal (F1 a F3) y los de prueba y verificación (F4 a F6). Es así, que a continuación se detallan cada uno de estos

- **F1** Producción normal. Es el estado en el que la máquina produce normalmente, es decir hace la tarea para la que ha sido concebida. Al funcionamiento dentro de este estado se le puede asociar un GRAFCET que llamaremos GRAFCET de base. Este estado no tiene porque corresponder a un funcionamiento automático.
- **F2** Marcha de preparación. Corresponde a la preparación de la máquina para el funcionamiento (precalentamiento, preparación de componentes, etc.).
- **F3** Marcha de cierre. Corresponde a la fase de vaciado y/o limpieza que muchas máquinas han de realizar antes de parar o de cambiar algunas características del producto.
- **F4** Marchas de verificación sin orden. En este caso la máquina, normalmente por orden del operador, puede realizar cualquier movimiento (o unos determinados movimientos preestablecidos). Se usa para tareas de mantenimiento y verificación.
- **F5** Marchas de verificación en orden. En este caso la máquina realiza el ciclo completo de funcionamiento en orden pero al ritmo fijado por el operador. Se usa para tareas de mantenimiento y verificación. En este estado existe la posibilidad de que la máquina produzca.
- **F6** Marchas de prueba. Permiten realizar las operaciones de ajuste y de mantenimiento preventivo.

### 2.3.2.2. Grupo A: Procedimientos de parada

Este grupo contiene todos los modos en los que el sistema está parado (A1 y A4, ver Figura 2.18), los que llevan a la parada del sistema (A2 y A3) y los que permiten pasar el sistema de un estado de defecto a un estado de parada (A5 a A7). Corresponden a todas las paradas por causas externas al proceso.

- **A1** Parada en el estado inicial. Es el estado normal de reposo de la máquina. Se representa con un rectángulo doble. La máquina normalmente se representa en este estado (planos, esquema eléctrico, esquema neumático, etc.) que se corresponde, habitualmente, con la etapa inicial de un GRAFCET.
- **A2** Parada pedida a final de ciclo. Es un estado transitorio en el que la máquina, que hasta aquel momento estaba produciendo normalmente, debe producir sólo hasta acabar el ciclo actual y pasar a estar parada en el estado inicial.
- **A3** Parada pedida en un estado determinado. Es un estado transitorio en el que la máquina, que hasta aquel momento estaba produciendo normalmente, debe producir sólo hasta llegar a un punto del ciclo diferente del estado inicial.
- **A4** Parada obtenida. Es un estado de reposo de la máquina diferente del estado inicial.
- **A5** Preparación para la puesta en marcha después del defecto. Corresponde a la fase de vaciado, limpieza o puesta en orden que en muchos casos se ha de hacer después de un defecto.
- **A6** Puesta del sistema en el estado inicial. El sistema es llevado hasta la situación inicial (normalmente situación de reposo); una vez realizado, la máquina pasa a estar parada en el estado inicial.
- **A7** Puesta del sistema en un estado determinado. El sistema es llevado hasta una situación concreta diferente de la inicial; una vez realizado, la máquina pasa a estar parada.

### 2.3.2.3. Grupo D: Procedimientos de defecto

Como se puede apreciar en la Figura 2.18, este grupo contiene todos los modos en los que el sistema está en defecto tanto si está produciendo (D3), está parado (D1) o está en fase de diagnóstico o tratamiento del defecto (D2). Corresponden a todas las paradas por causas internas al proceso.

- **D1** Parada de emergencia. No tan solo contiene la simple parada de emergencia sino también todas aquellas acciones necesarias para llevar el sistema a una situación de parada segura.
- **D2** Diagnóstico y/o tratamiento de los defectos. Permite, con o sin ayuda del operador, determinar las causas del defecto y eliminar-las.
- **D3** Producción a pesar de los defectos. Corresponde a aquellos casos en los que se debe continuar produciendo a pesar de que el sistema no trabaja correctamente. Incluye los casos en los que, por ejemplo, se produce para agotar un reactivo no almacenable o aquellos otros en los que no se sigue el ciclo normal dado que el operador sustituye a la máquina en una determinada tarea a causa de una avería.

## 2.4. Sistema de riego

### 2.4.1. Relación suelo-agua- planta

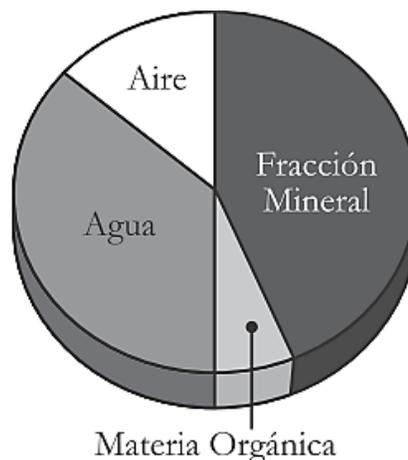
No es un secreto que “las plantas **transpiran** grandes cantidades de agua como mecanismo para equilibrar su balance de energético” (Villafáfila y Wyss, 2009, p. 7). La cantidad de agua transpirada es aportada por el suelo y absorbida por las raíces. El suelo, además de proporcionar **anclaje** para la planta, es el medio en el cual se almacena el **agua**, el **oxígeno** y el **dióxido de carbono** que absorben las raíces; en su estructura existen partículas muy pequeñas que constituyen un depósito de nutrientes, los cuales se intercambian con la solución del suelo, pudiendo llegar así, a ser absorbidas por las raíces de los vegetales (Ecología y enseñanza rural, 1996).

### 2.4.1.1. Porosidad del suelo

Los suelos están constituidos por tres fases: **sólida**, **líquida** y **gaseosa** (García, 2005). La fase sólida está compuesta por partículas minerales y materia orgánica (Figura 2.19). Los espacios no ocupados por la fase sólida, constituyen los poros del suelo (porosidad), ocupados por aire y agua con sustancias en disolución (solución del suelo). Se relaciona directamente con el tamaño y forma de las partículas sólidas y el modo en que estas partículas pueden agregarse. Esta propiedad es muy importante para el crecimiento de las plantas, ya que la retención de agua y su balance con el aire, dependen en gran medida de esta característica.

Según García (2005), en el suelo, como en cualquier otro cuerpo físico, la densidad se define como la masa por unidad de volumen. Ahora bien, dado su carácter poroso, conviene distinguir entre la densidad de sus componentes sólidos y la del conjunto del suelo, incluyendo los huecos, por ello nos referiremos a dos tipos de densidad. Al primero se denomina densidad aparente al resultado de dividir la masa de un suelo seco por el volumen del mismo. La densidad aparente de los suelos varía entre 1 y 1,8 gr./cm<sup>3</sup>. Para un mismo suelo la densidad aparente varía en función de la compactación.

**Figura 2.19:** Suelo mineral

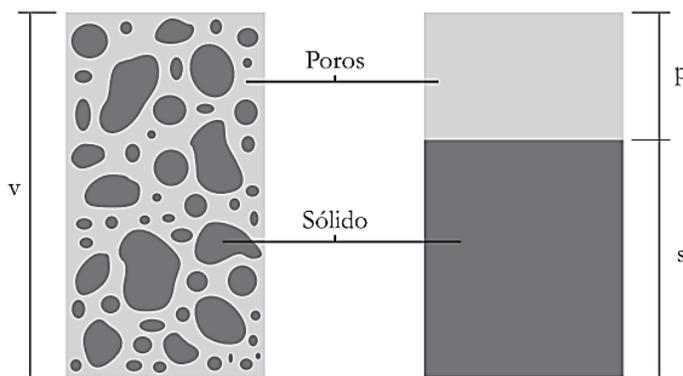


**Fuente:** Villafáfila y Wyss (2009, p. 7)

La densidad real, como lo manifiestan Villafáfila y Wyss (2009, p. 7), es el cociente de dividir la masa de un suelo seco por el volumen de las partículas sólidas y depende fundamentalmente del material original. En general los suelos presentan densidades reales que varían entre  $1,5 \text{ gr. /cm}^3$  y  $2,6 \text{ gr. /cm}^3$ .

Otro concepto relevante es el que se refiere al espacio poroso o porosidad. Según Villafáfila y Wyss (2009, p. 8) y Garcia (2005), este es el porcentaje de volumen de suelo no ocupado por el material sólido. Es el cociente entre el volumen de poros ( $v_p$ ) y el volumen total ( $v_t$ ) que ocupa el suelo. La porosidad varía en un amplio intervalo de valores, desde el 30 % al 50 % (Figura 2.20). Puede suceder que las partículas sólidas posean poros internos, por lo cual la porosidad total aumenta.

**Figura 2.20:** Porosidad del suelo



**Fuente:** Villafáfila y Wyss (2009, p. 8)

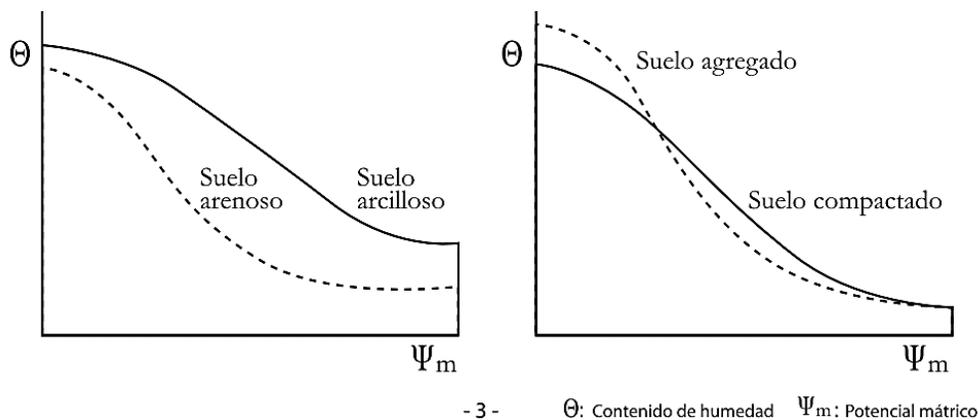
#### **2.4.1.2. Contenido del agua del suelo**

En condiciones naturales el espacio poroso del suelo está ocupado en parte por la solución del suelo y en parte por aire (incluyendo vapor de agua). Esta característica del espacio poroso, relacionado al tamaño de partícula, determina que con “alta presencia de partículas pequeñas (suelos arcillosos) disminuya el contenido de aire y aumente la cantidad de agua retenida, incrementándose el número de microporos que retienen el agua” (Garcia, 2005). En estas circunstancias se reducen los macroporos, básicamente ocupados por aire.

En general en los suelos, cuando el tamaño de las partículas desciende por debajo de 0,5 mm, se produce un brusco descenso de la porosidad y aumento de la retención de agua (Villafáfila y Wyss 2009, p. 9). Existen diferentes formas de expresar el contenido de agua del suelo, pero la más usual es la llamada **humedad gravimétrica**, que se expresa como la masa de agua en relación con la masa de suelo seca (gr. /gr.). Se calcula por la diferencia de peso entre la muestra de suelo húmedo y la secada a estufa a 105° -110°, hasta peso seco constante. Otra forma directa de medir el contenido de humedad del suelo es la llamada **humedad volumétrica** que es el porcentaje de suelo ocupado por el agua (Lopez et al., 2016).

Además de cuantificar el contenido de agua del suelo es necesario conocer la energía con la cual está retenida en el suelo, ya que de poco sirve determinar la cantidad de agua retenida, si las raíces de las plantas no tienen la fuerza necesaria para extraerla. Para englobar todos estos factores que actúan sobre el agua del suelo, se utiliza el concepto de **potencial agua**, que se define como la cantidad de trabajo que es preciso aplicar, para transportar en forma irreversible una determinada cantidad de agua de un punto a otro. El agua se mueve de sitios de mayor potencial (mayor capacidad de realizar trabajo o mayor disponibilidad de agua libre) a otros de menor potencial (menor capacidad de realizar trabajo o menor disponibilidad de agua libre).

**Figura 2.21:** Curvas de retención de humedad en diferentes suelos



**Fuente:** Villafáfila y Wyss (2009, p. 8)

Conforme a los diferentes tipos de suelo, ya sean con mayor porcentaje de arena o de arcilla, el agua será retenida con menor o mayor fuerza respectivamente. Se pueden observar estas características (Figura 2.21), en las llamadas **curvas de retención de humedad**, que relacionan la fuerza con la cual está retenida el agua en el suelo y los porcentajes extraídos (Flores y Alcalá, 2010, p. 21). De manera que los suelos predominantemente arenosos, requieren una reposición más frecuente dada su menor capacidad de almacenamiento.

#### **2.4.1.3. Estados de humedad del suelo**

Villafáfila y Wyss (2009, p. 8) sostienen que el agua del suelo se encuentra retenida de diferentes maneras. Cuando se riega un suelo, los poros más grandes son ocupados por el agua, si ésta puede drenar libremente, comienza a descender por acción de la gravedad, y el espacio libre de los poros, es ocupado ahora por el aire. Esta agua se denomina **agua gravitacional**, la cual se pierde rápidamente. Si el drenaje continúa, llega un momento en el cual el suelo no pierde más agua, conteniendo una determinada cantidad ubicada en los poros más finos, retenida contra la fuerza de la gravedad.

Ésta es la llamada **agua capilar** que constituye la principal fuente para las plantas, cuya fuerza de retención es fácilmente superada por la succión de las raíces de las plantas. Al mismo tiempo el suelo debe encontrarse suficientemente aireado para permitir la respiración radicular. Finalmente existe una pequeña cantidad de agua que es adsorbida en la superficie de las partículas sólidas del suelo y que no puede ser extraída por las raíces de las plantas, debido a que se encuentra fuertemente adherida al suelo; se trata del agua higroscópica.

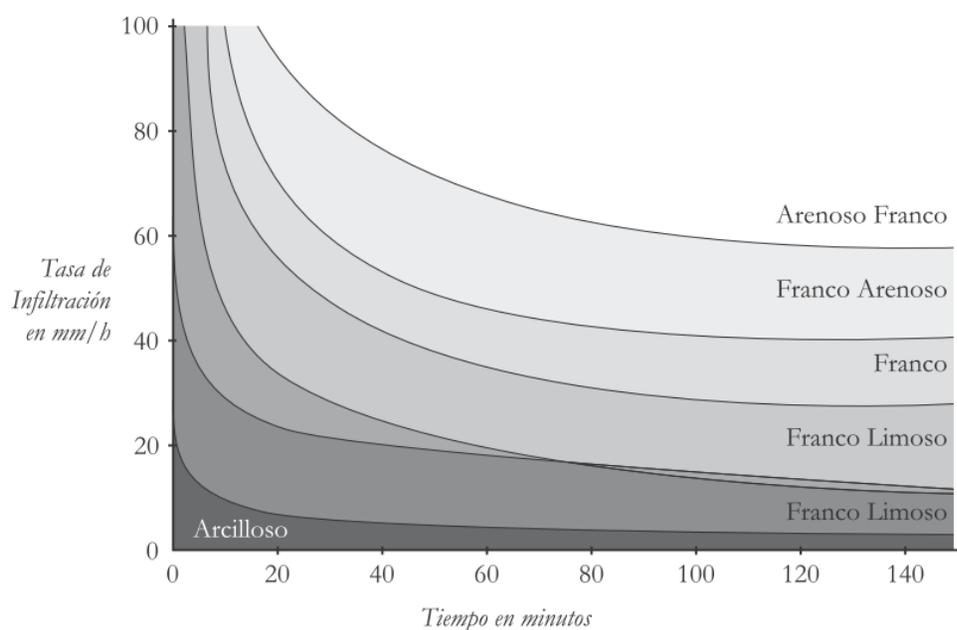
Luego de efectuado el riego (o luego de una lluvia) y habiendo drenado todo el agua gravitacional, el contenido de humedad existente en el suelo se conoce como **capacidad de campo**. Pero si el aporte de agua por riego o lluvia disminuye o desaparece, el contenido de agua del suelo comienza a reducirse paulatinamente, como consecuencia de la evaporación del suelo y la transpiración.

A medida que este contenido de humedad se reduce, se hace cada vez más difícil la absorción de agua por las raíces, hasta que se alcanza un estado denominado punto de marchitez permanente, caracterizada porque las plantas ya no pueden absorber agua del suelo y experimentan una marchitez irreversible. Se denomina agua disponible a aquella parte del agua del suelo que puede ser absorbida por las plantas a un ritmo adecuado, para permitir su crecimiento normal. Esta agua disponible es la comprendida entre capacidad de campo y punto de marchitez.

#### 2.4.1.4. Umbral de riego e infiltración

La aplicación correcta del agua de riego tiene como objetivo no dejar descender el contenido de humedad del suelo, por debajo de un valor que afecte el crecimiento de las plantas. En horticultura, en la práctica se trata de mantener los niveles de humedad en capacidad de campo, con el objeto de disminuir los gastos de energía, por parte de la planta, para absorber agua. Si bien existen instrumentales para determinar el momento de reposición de agua, habitualmente el horticultor a través de su experiencia, lo puede resolver sin demasiados inconvenientes.

**Figura 2.22:** Velocidad de infiltración



**Fuente:** Villafáfila y Wyss (2009, p. 10)

Asimismo, respecto a la **infiltración**, se denomina así al ingreso de agua en el perfil de suelo. Es la velocidad de infiltración la que determina la cantidad de agua que puede aplicarse a un suelo en un determinado tiempo, sin que se produzcan encharcamientos o escurrimientos superficiales. De manera que las características del suelo a cultivar, determinarán los volúmenes de agua aplicar por unidad de superficie y de tiempo (Figura 2.22.). Esto es importante, ya que si la intensidad del riego (pluviometría) es mayor que la velocidad de infiltración, se formarán láminas de agua en la superficie del suelo (encharcamiento), lo cual genera un ambiente favorable para la difusión de enfermedades fúngicas y bacterianas.

#### **2.4.2. Necesidad de riego**

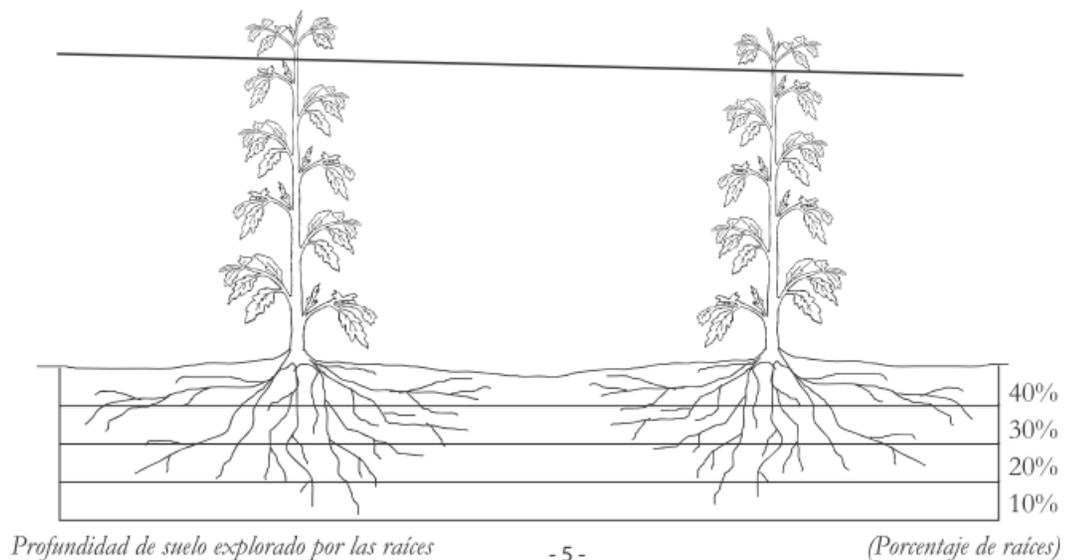
Tener una buena estimación de las necesidades hídricas de un cultivo es fundamental para el diseño de cualquier equipo de riego (INTAGRI, 2020). Tomando en cuenta de que se trata por lo general de actividades de producción continua, la necesidad de riego no es similar a lo largo de todo el año, por lo que es fundamental establecer el consumo en el período crítico, tomando en cuenta que las instalaciones deben calcularse para satisfacer la máxima demanda. En la actualidad los cultivos intensivos tienen riego por equipos que lo efectúan, conforme a la modalidad de riego localizado.

Los sistemas convencionales de riego localizado incluyen una serie de variantes, pero las más empleadas en los cultivos son el **riego por goteo y microaspersión** (los más importantes). También se emplea el riego por manga con perforaciones láser. El riego por aspersión y por cinta perforada (inclusive por microaspersión), si bien en las áreas rurales no se emplean como riego localizado, se efectúa con alta frecuencia y son utilizados habitualmente en huertas e invernáculos. En estos sistemas de riego la capacidad de retención de agua por el suelo pierde de alguna manera importancia, atento a que se provee de agua en intervalos cortos.

### 2.4.2.1. Volumen del suelo mojado y frecuencia de aplicación de riego

En esta parte es importante mencionar el **volumen del suelo mojado**. Según Villafáfila y Wyss (2009, p. 11), este constituye la parte de suelo que puede ser explorada por las raíces (Figura 2.23). La forma y dimensiones del bulbo húmedo dependen de las características físicas del suelo; para un suelo determinado, va a depender del volumen de agua aplicado y la topografía del terreno.

**Figura 2.23:** Distribución de raíces en el perfil del suelo

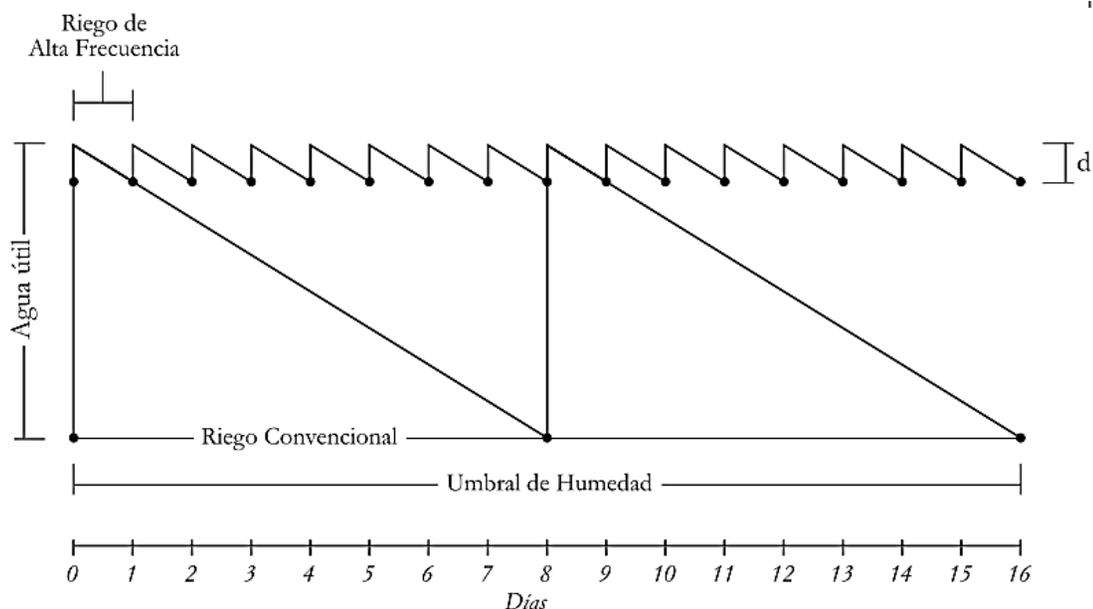


**Fuente:** Villafáfila y Wyss (2009, p. 11)

Otro factor importante a considerar es el referido a la frecuencia de aplicación del riego. Las plantas no responden directamente a la frecuencia de aplicación del agua, sino a la disponibilidad de la misma en el suelo. Si las aplicaciones no son frecuentes, esta disponibilidad desciende entre riego y riego; si el intervalo es aún más extenso, los niveles de agua disponibles pueden situarse por debajo de determinado umbral; en estos casos puede producirse “stress hídrico” que según sea la duración, intensidad de esta situación y estado fisiológico de la planta, puede tener influencia sobre la producción. El aumento de la frecuencia de riego tiene por objeto mantener los niveles de humedad del suelo, por encima del nivel crítico.

La aplicación correcta del agua de riego tiene como objetivo no dejar descender el contenido de humedad del suelo por debajo de un valor que afecte el crecimiento de las plantas (Figura 2.24). El fraccionamiento de las aplicaciones de agua, hace más eficiente el suministro y permite una mejor oxigenación del suelo, fundamental para el desarrollo de las plantas. La frecuencia no sólo dependerá del tipo de planta y su estado de desarrollo, sino de un complejo suelo-planta-clima.

**Figura 2.24:** Aplicación del riego



**Fuente:** Villafáfila y Wyss (2009, p. 12)

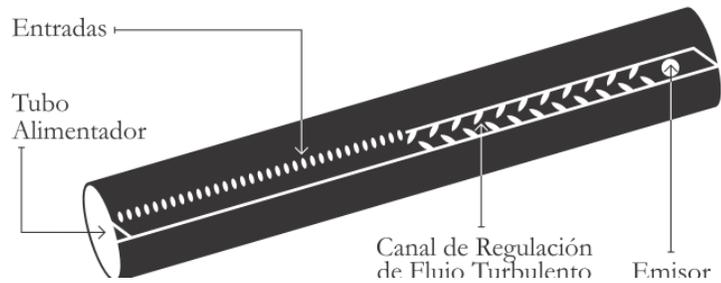
En los términos que describen Villafáfila y Wyss (2009) se describe que

*“cuanto más reducido es el volumen explorado por las raíces, menor retención de humedad tendrá el suelo y se presenten condiciones ambientales que demanden un mayor transporte de humedad hacia la atmósfera (temperatura elevada, viento, sequedad, etc.), más frecuente deberán ser las aplicaciones”.*

(p.12)

### 2.4.2.2. Riego por goteo

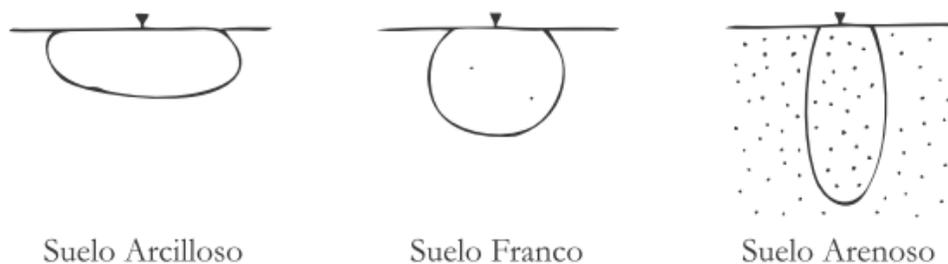
**Figura 2.25:** Cinta de goteo



**Fuente:** Villafáfila y Wyss (2009, p. 40)

Se llama así, a los sistemas que aplican el agua con caudales no superiores a los 16 litros/hora por punto de emisión o por metro lineal de manguera de goteo y utilizan el suelo para el desplazamiento del agua (Sela, 2020). En nuestro medio, el riego más común es el de cinta (Figura 2.25), empleado aun cuando el marco de plantación sea muy estrecho y requiera una gran densidad de goteros. Trabajan con bajas presiones aún por debajo de los 10 m.c.a. el caudal por emisor varía entre 1 y 4 litros/ hora.

**Figura 2.26:** Formas de bulbo según tipo de suelo

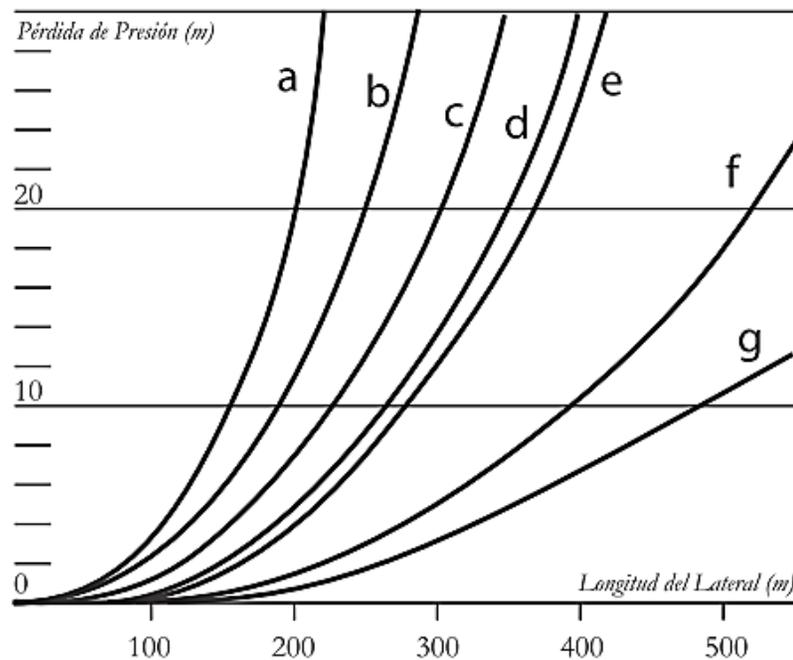


**Fuente:** Villafáfila y Wyss (2009, p. 40)

El espaciamiento de los goteros en estas cintas varía entre 10 y 33 cm y la densidad puede cambiar desde 1/4 gotero/m<sup>2</sup> en melón, 3 goteros/m<sup>2</sup> en tomate o pimiento y 20-25 goteros/m<sup>2</sup> en lechuga. Los parámetros para la separación de los goteros, están función del tipo de suelo, el caudal del emisor y la separación de las filas (Figura 2. 26).

**Figura 2.27:** Pérdida de presión según longitud de cinta portagotero

Espaciamiento del gotero: 100 cm



**Fuente:** Villafáfila y Wyss (2009, p. 41)

Cuando se instalan las cintas de riego por goteo, es fundamental que las líneas no superen los 100 metros de longitud para evitar una entrega desigual de agua entre el primer y último gotero (Figura 2.27). Siempre es conveniente medir el caudal de distintos goteros para determinar la uniformidad de los mismos. La medición de los caudales entregados por los goteros puede determinarse en forma sencilla con:

- Un pequeño recipiente (tapa de frasco, etc.)
- .- Reloj cronómetro
- .- Probeta graduada de 100 cm<sup>3</sup>

Inicialmente puede muestrearse un 1% del total de goteros, efectuando una elección aleatoria al comienzo, al medio y al final de cada línea seleccionada. Se coloca el recipiente abajo del gotero, por debajo del nivel del suelo, se establece un tiempo, por ejemplo de 2 minutos, se mide el volumen en la probeta y se lleva a caudal horario.

Se observan los caudales de todos los goteros que no debieran tener una variación mayor al 7%. Si así ocurriese se debe corregir esta falla, que puede deberse a defectos de fabricación del gotero, o a problemas de diseño, como escasa presión, bajo caudal, excesiva longitud de la línea, filtrado defectivo con obturación de goteros, etc. Esta prueba posibilita, además, conocer el caudal horario entregado en la unidad de riego (por ejemplo 2.000 m<sup>2</sup>) y determinar con precisión -y eventualmente corregir- el tiempo de riego necesario.

## **2.5. Diseño de un sistema de riego por goteo**

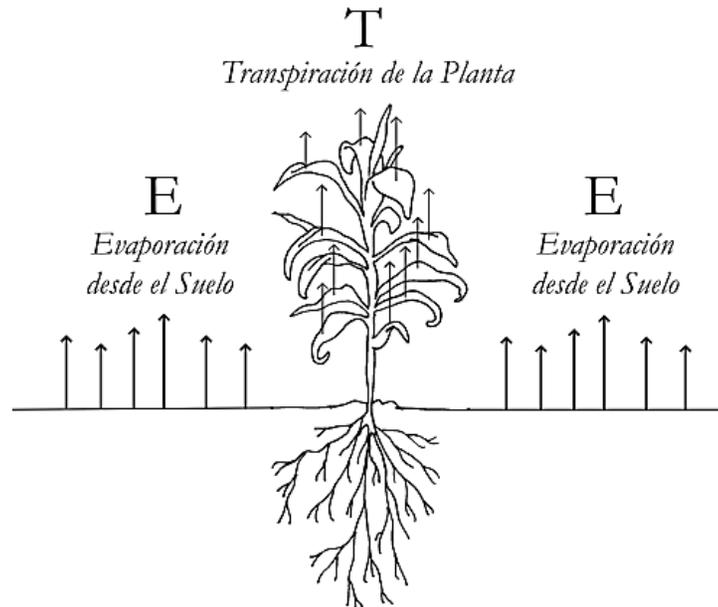
Según Jiménez (2017), proyectar un sistema de riego localizado y que además funcione correctamente es ante todo una labor complicada, propia de ingenieros agrícolas y agrónomos. No obstante, las pautas necesarias pueden ser comprendidas con un poco de esfuerzo, ya que muchos de estos conocimientos son más prácticos que teóricos. Es así que a la hora de dimensionar un sistema de riego localizado se distinguen dos fases:

- **Diseño agronómico**, que basándose en factores de producción vegetal permitirá conocer el caudal de agua necesario para cubrir las necesidades hídricas del cultivo.
- **Diseño hidráulico**, que garantice una óptima distribución del caudal arriba determinado, mediante un dimensionado óptimo de la red de riego y de los elementos que la componen.

A continuación se presenta un modelo por demás explicativo de los pasos necesarios para realizar tanto un diseño agronómico como hidráulico, tomando en cuenta los conceptos fundamentales. Este ejemplo fue enfocado a realizar un proyecto auténtico de riego para el cultivo de naranjo en una provincia de España por el equipo por un equipo de especialistas (Agrológica 2012).

### 2.5.1. Diseño agronómico

**Figura 2.28:** E+T = Evapotranspiracion



**Fuente:** Villafáfila y Wyss (2009, p. 13)

La planta solo utiliza una pequeña parte del agua disponible en sus procesos metabólicos, el resto se pierde por la transpiración del propio vegetal y por evaporación en el suelo, fenómeno conocido como **Evapotranspiración** (ET, Figura 2.28) del cultivo. Por ello, la cantidad de agua a aportar deberá ser igual a la **Evapotranspiración del cultivo** (ET<sub>c</sub>) para así compensar dichas pérdidas. El cálculo se lo obtiene de la siguiente forma:

$$ET_c = ET_0 \times K_c$$

**ET<sub>0</sub>** es la evapotranspiración de referencia, dato que se puede obtener de las **estaciones meteorológicas** más cercanas de cada proyecto. Asimismo, **K<sub>c</sub>** es un coeficiente propio de cada cultivo, dato que se puede consultar en multitud de referencias, una de ellas es FAO. Así como también se puede utilizar recursos informáticos para su cálculo.

### 2.5.2. Diseño hidráulico

Sobre la base del diseño agronómico se procede a efectuar el diseño hidráulico, que consiste en determinar, las características del equipo de riego, que pueda entregar el caudal y la presión necesaria, para el sistema, en las condiciones que exige el diseño agronómico. Veamos ahora, algunos aspectos técnicos, que permitan avanzar en el conocimiento del comportamiento del agua (como fluido) dentro de las tuberías. Uno de estos es el concepto de caudal.

El caudal es la cantidad de agua (fluido) que pasa por determinado elemento (en nuestro caso en tuberías) en la unidad de tiempo. Se expresa también como el volumen que pasa por un área dada (sección de la tubería o cañería) en la unidad de tiempo. En otras palabras, se define caudal como el volumen de agua que atraviesa una superficie en un tiempo determinado. Si denominamos al caudal  $Q$ , al volumen  $V$  y al tiempo  $t$ , entonces:  $Q = A \times V$

$$Q = V/t$$

Normalmente el volumen se mide en litros y el tiempo en segundos, por tanto el caudal vendría expresado en:

$$Q = V/t = \text{Litros (l)/segundos}$$

### 3. MARCO APLICATIVO

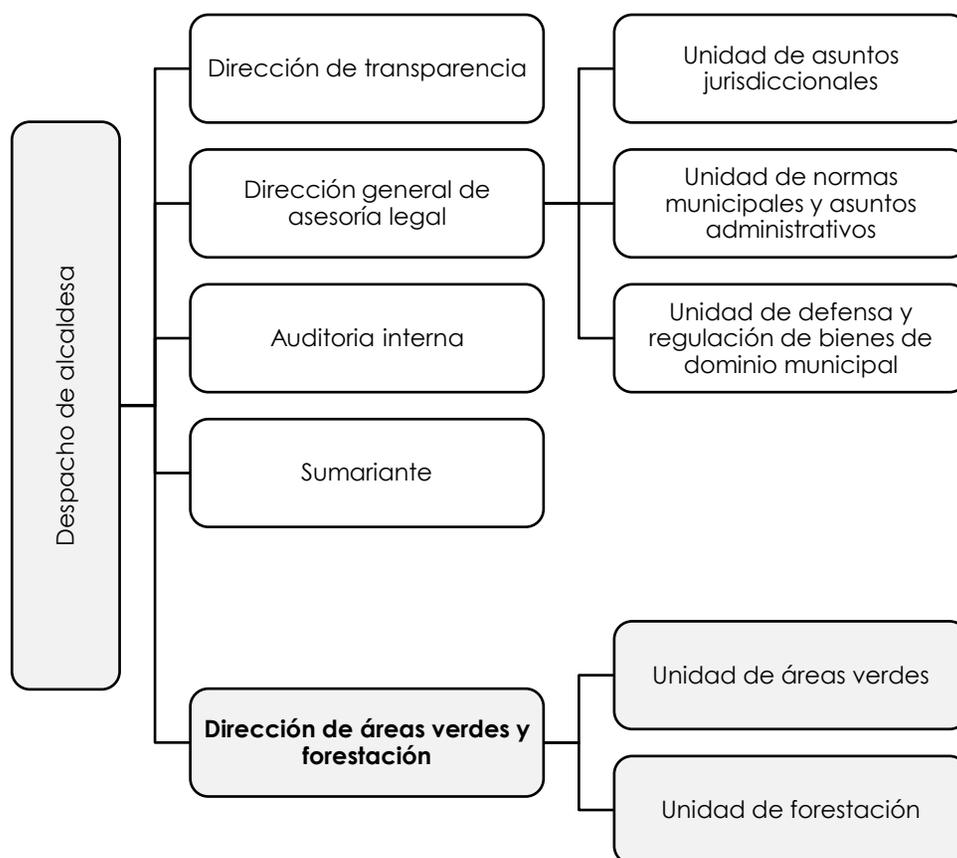
#### 3.1. Análisis institucional del proyecto

La historia del municipio de El Alto refiere que fue creado el 6 de marzo de 1985 como cuarta sección de la provincia Murillo. Según Garfias, (2005, p.15), en los años 40, desde una perspectiva poblacional, la población era de aproximadamente 11000 personas, distribuidas en diferentes Villas. En 1960, esta población subió a 30000 habitantes para llegar a 98690 habitantes en el censo de 1976 y a 405492 en 1992. El crecimiento más fuerte se registra entre 1976 y 1986 (9% anual) como consecuencia de varios factores de nivel social: la re-localización o despido de mineros por efecto del descalabro económico de las minas de estaño principalmente; las sequías e inundaciones (por el efecto de El Niño 1982) que causaron una ola de migración desde el Altiplano norte.

Estos datos, por demás importantes, presentan la gran expansión de esta joven ciudad, siendo considerada la segunda ciudad con mayor número de habitantes de Bolivia. Es por ello, que surge la necesidad de un sector administrativo. Por ello, como primer alcalde la ciudad de El Alto en su historia figura el señor Juan Polo Maguiña. Esta autoridad y las que siguieron hasta la fecha, son las que paso a paso fueron consolidando todo lo que la alcaldía representa en su conjunto como una institución municipal

Con el fin de contar con una parte administrativa en cuanto a las áreas verdes, la alcaldía cuenta con la **Dirección de Áreas Verdes y Forestación**. Esta entidad tiene como propósito **promover el uso responsable de los recursos naturales**, formulando y ejecutando programas, proyectos y actividades para la forestación y restauración de áreas verdes con especies nativas y otras que se adapten al ecosistema en el Municipio de El Alto. Según el actual Manual de Organizaciones y Funciones (2017, p.149), aprobado por decreto supremo municipal N° 70/2018, presenta la dependencia de la Secretaría Municipal de Agua, Saneamiento, Gestión Ambiental y Riesgos, **Figura 3.1**.

**Figura 3.1:** Organigrama de la Dirección de Áreas Verdes y Forestación



**Fuente:** Manual de Organizaciones y Funciones (2017, p.10)

Esta institución, Dirección de Áreas Verdes y Forestación, posee las siguientes funciones y atribuciones:

- Generar políticas y directrices que permitan la conservación del medio ambiente, mediante la forestación y restauración de Áreas Verdes.
- Promover y facilitar la participación activa de la sociedad civil, en la implementación de políticas y acciones referidas al cuidado y forestación de áreas verdes, mediante la promoción, difusión y capacitación.
- Mejorar los espacios o áreas verdes en plazas, avenidas, jardineras centrales y otros espacios públicos en el Municipio de El Alto.
- Producir especies florales, ornamentales, arbustivas y arbóreas para su implantación en las áreas verdes del Municipio de El Alto.

- Supervisar la producción de especies florales, ornamentales, arbustivas y arbóreas en los Distritos Municipales.
- Realizar el mantenimiento adecuado de todas las áreas verdes de los distritos del Municipio de El Alto.

Por tanto, el presente proyecto contempla presentar una propuesta para el actual sistema de riego del Vivero Forestal de Municipal de El Alto, dependiente de la Unidad de Áreas Verdes y Forestación. Dicho vivero se encuentra ubicado en la Avenida Costanera, en la zona Pedro Domingo Murillo 4ta Sección del Distrito 4. Con este fin, las autoridades mostraron su aceptación y/o colaboración para el desarrollo del proyecto que tiene como propósito específico analizar, desarrollar e implementar un prototipo del mismo, así:

- Se entiende por analizar, al estudio del sistema de riego actual del mismo Vivero Forestal de Municipal de El Alto, como de las diferentes dependencias de la alcaldía de El Alto (viveros, jardines botánicos y huertos escolares).
- Se comprende por desarrollar, seguir toda una secuencia de pasos, propios de la automatización, para poner en evidencia real las ventajas y desventajas de un proyecto de tal envergadura.
- Se interpreta por implementar una propuesta, al producto del análisis y desarrollo del automatismo en el sistema de riego.

Una vez visitado los diferentes espacios de la institución (viveros, jardines botánicos y huertos escolares), y considerando la factibilidad técnica, es que se optó por un espacio con dos sectores de riego. La fotografía en la **Figura 3.2** muestra una de las visitas realizadas a este espacio, con el consentimiento de los funcionarios, para recabar información. De esta forma, la institución generó grandes expectativas respecto al desarrollo del proyecto y se pudo recabar los datos pertinentes.

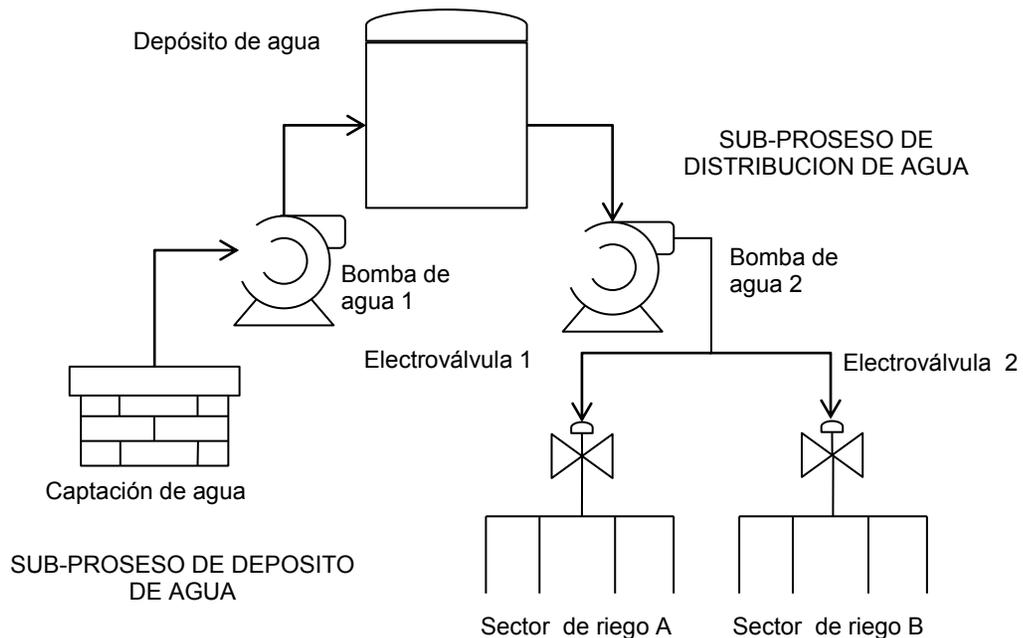
**Figura 3.2:** Visita autorizada a la carpa solar que es el referente para el proyecto



**Fuente:** Captura propia (2020)

Con el referente del para las estimaciones del proyecto, se procede a esquematizar un diagrama pictórico de la futura propuesta de sistema de control automatizado (**Figura 3.3**). El cual muestra claramente dos sub-procesos. Un sub-proceso para el control del depósito de agua y otro para la distribución.

**Figura 3.3:** Diagrama pictórico del diseño a controlar



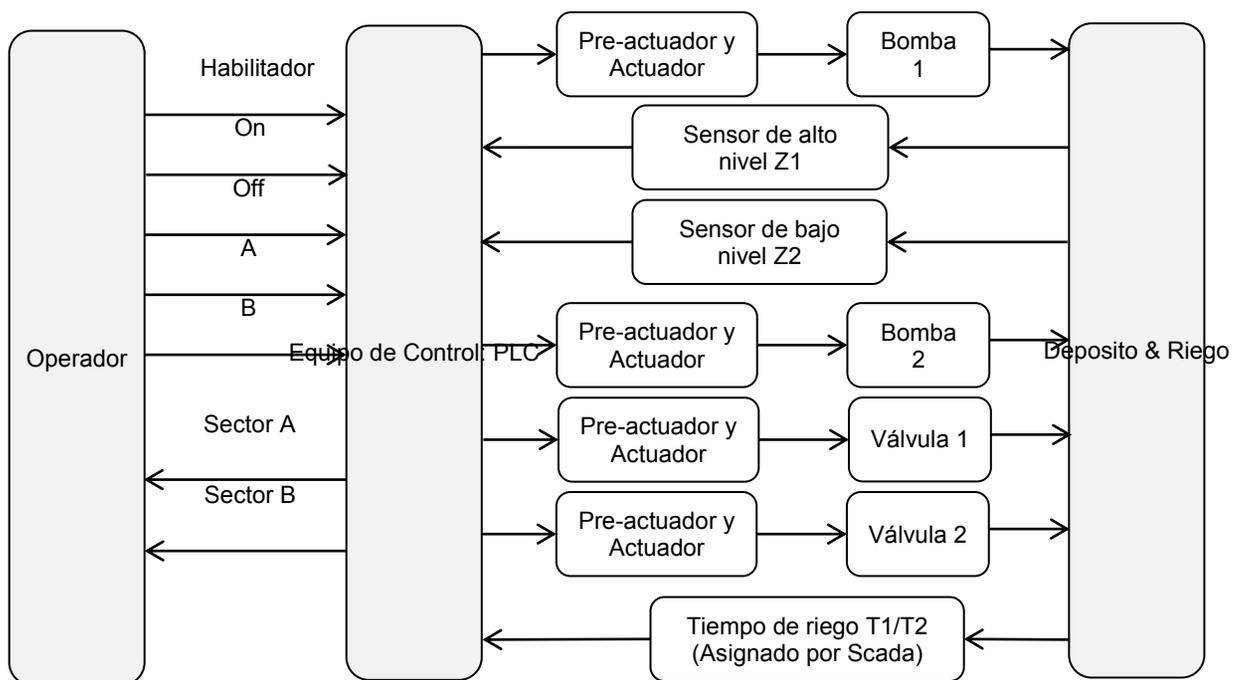
**Fuente:** Elaboración propia (2020)

## 3.2. Desarrollo del proyecto

### 3.2.1 Descripción del proceso de control

Como se mencionó en el Capítulo I (1.7. **Herramientas y tecnologías**), el proceso específico a automatizar es aquel que involucra al depósito de agua y a su distribución. Es decir, que se toma en cuenta desde la captación del recurso hídrico hasta la disposición del mismo en el área o sector predispuesto. Por ello se presenta a continuación una descripción desde un punto de vista de la automatización para un mejor comprensión.

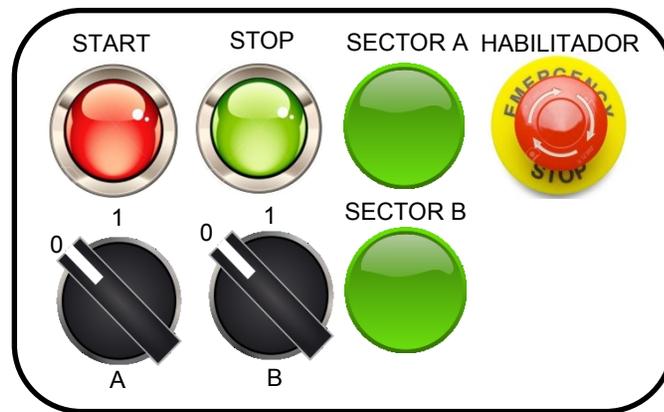
**Figura 3.4:** Descripción general del proceso de control de riego automatizado



**Fuente:** Elaboración Propia (2020)

La **Figura 3.4** presenta la serie de pasos contemplados con las fases y etapas del proyecto. Así también, se puede apreciar las direcciones tanto de **Salida** como de **Entrada** de las consignas. Las etapas que involucran al equipo de control o PLC son las que se trabajan en este proyecto de automatización con una mayor prioridad. Sin embargo, aquello no quiere decir que se descuida las otras fases.

**Figura 3.5:** Tablero de control



**Fuente:** Elaboración propia (2020)

La Figura 3.5 presenta el tablero de control que el operador tiene a su disposición para enviar las consignas al Autómata. La Tabla 3.1 muestra un cuadro descriptivo del mismo para el operador. Si bien este panel es necesario en la operación manual, lo que permite el sistema SCADA es que el mismo se pueda controlarse de forma remota.

**Tabla 3.1:** Cuadro descriptivo del tablero de control

Dispositivo	Descripción	Detalle de funcionamiento
Pulsador verde	Start	Normalmente inicia en deshabilitado, cuando se activa arranca ambas subprocesos, donde primero llena el tanque de agua según los sensores de nivel y luego procede a regar el sector.
Pulsador rojo	Stop	Normalmente está activo, permitiendo que el proceso de riego se produzca en los sectores programados, si se activa detiene el riego específico que se está ejecutando.
Piloto	Sector A	Cuando esta activado, el sector A se riega. Cuando está apagado, no se realiza ninguna acción.
Piloto	Sector B	Cuando esta activado, el sector B se riega. Cuando está apagado, no se realiza ninguna acción.
Selector	A	Elegir/Rechazar sector de riego A
Selector	B	Elegir/Rechazar sector de riego A
Selector	A y B	Se procede a regar, según el tiempo especificado, primero A y luego B
Parada emergencia	Habilitador	Habilita/Deshabilita completamente ambos subprocesos (almacenamiento de agua y riego)

**Fuente:** Elaboración propia (2020)



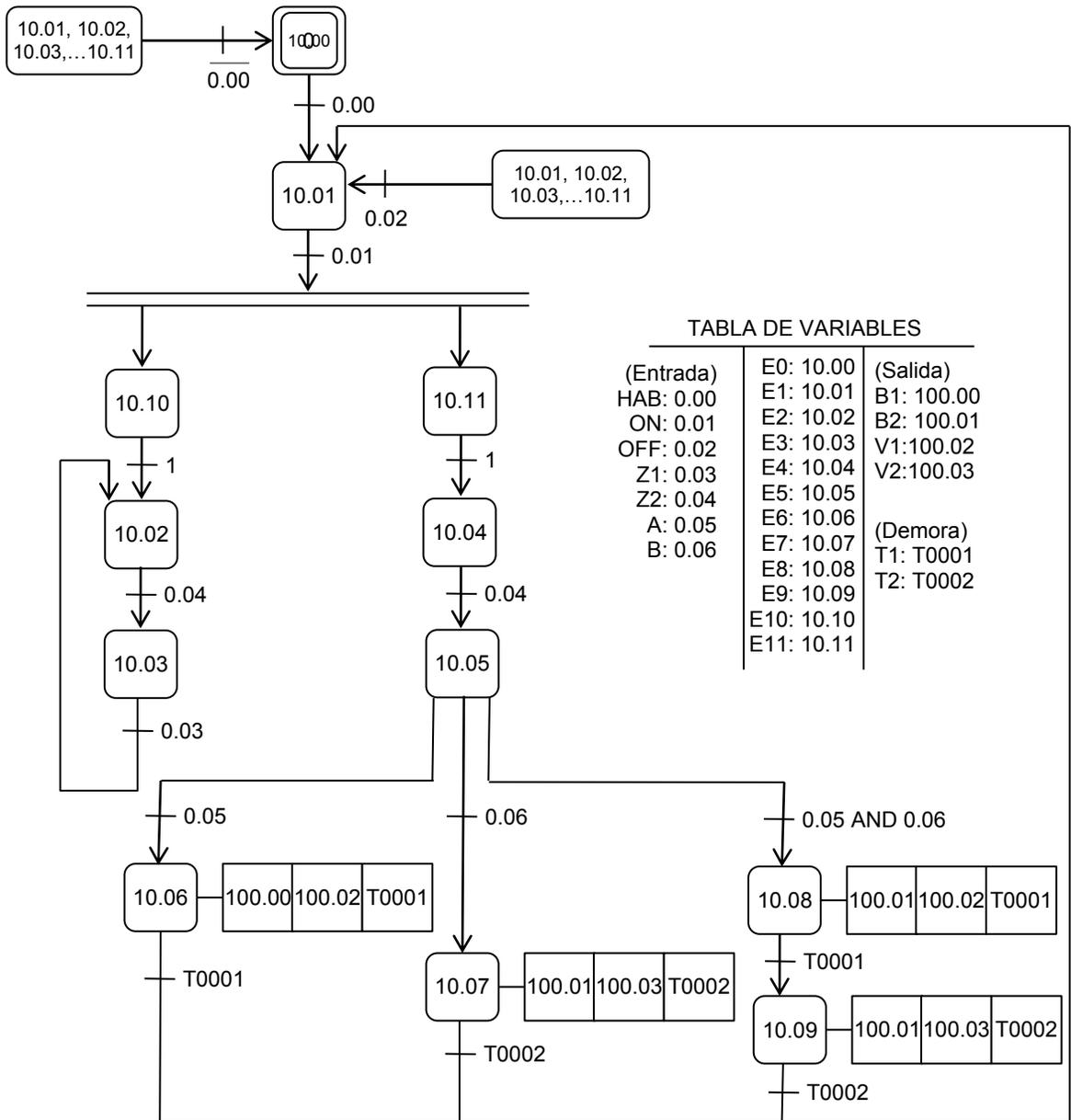
- La primera característica sobresaliente es que el proceso general involucra dos sub-procesos: una que controla el depósito de agua y el otro la distribución. Ello implica, como se vio en el Capítulo II (2.2. Grafcet), el uso de la estructura lógica **Divergencia Y**, en las etapas 1, 2 y 3.
- También se puede apreciar el uso de la estructura de **Divergencia OR** en las etapas 5, 6, 7 y 8. Esto para el selector de riego según las condiciones tanto manuales como remotas.
- La **Convergencia OR** también es necesaria en las etapas 6, 7, 9 y 1 para aglutinar todas las acciones de riego en una sola etapa y rearmar el proceso principal.

La propuesta final del sistema de control de riego, es el producto de varios pre-diseños realizados, los cuales fueron estudiados desde un punto de vista de las necesidades de la institución. Es decir, se trabajó en base a la recolección de información del campo de estudio al cual se involucra el trabajo. Es por eso que una vez estudiado el contexto de automatización, se procedió a estudiar el proceso de riego para considerar el mejor manejo posible del mismo.

Una vez obtenido el Grafcet de nivel 1 se procedió a estudiar su aplicabilidad en el autómata programable CP1L-L20DT1-D (expuesto en el Capítulo I, 1.7 Herramientas y tecnologías). Para ello es importante resaltar que las áreas de memoria destinadas para este fin son predispuestas por la misma línea del autómata, siendo las entradas aquellas que comienzan con 0.00, las de salida cuyos valores comienzan con 100.00 y las de trabajo corresponden a los valores 10.00. Así, el siguiente paso es obtener un Grafcet de nivel 2 con estos datos.

La **Figura 3.6** muestra el resultado final de la aplicación de la teoría de funcionamiento en el Grafcet anterior (primer nivel) al segundo nivel con una orientación según el autómata programable. Aquí el diagrama funcional ya es más técnico y responde al paso previo para llevarlo al PLC. Como se puede apreciar el PLC solo entiende áreas de memoria, además que ya tiene espacios destinados para ello, con los cuales trabaja, siendo el trabajo enviarle la correcta instrucción.

**Figura 3.7:** Diagrama funcional de segundo nivel para el control de riego automatizado



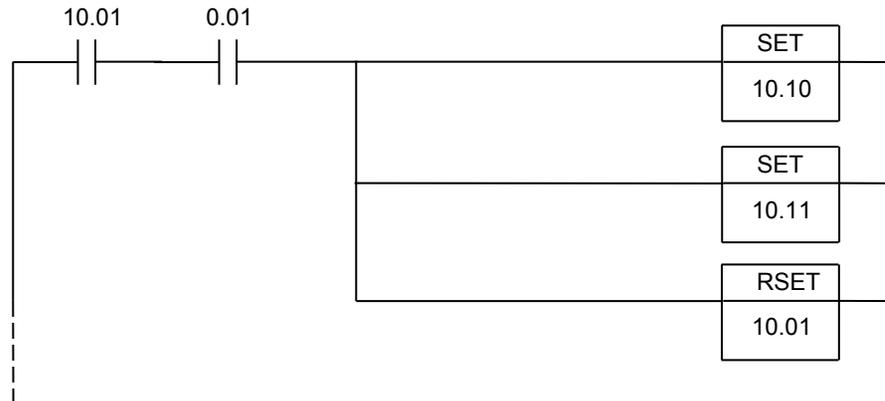
**Fuente:** Elaboración propia (2020)

### 3.2.3 Diagrama de contactos PLC

La tarea siguiente, una vez desarrollado el Graficet de primer y segundo nivel, es trasladar el ultimo al diagrama escalera (Ladder) o de contactos. Esto para que sea posible cargar el diagrama al autómata. Por ello, el software utilizado también es de la línea OMRON, **CX-Programmer**.

Por la relativa extensión del diagrama Ladder, el mismo se encuentra en el **Anexo C** de forma completa para su revisión y seguimiento con el trabajo. Por ello a continuación se presentan y explican aquellos de mayor relevancia para el proyecto por aglutinar estructuras lógicas fundamentales. Estas son la Divergencia Y, la Divergencia OR y la Convergencia OR.

**Figura 3.8:** Divergencia Y aplicada al control del proyecto

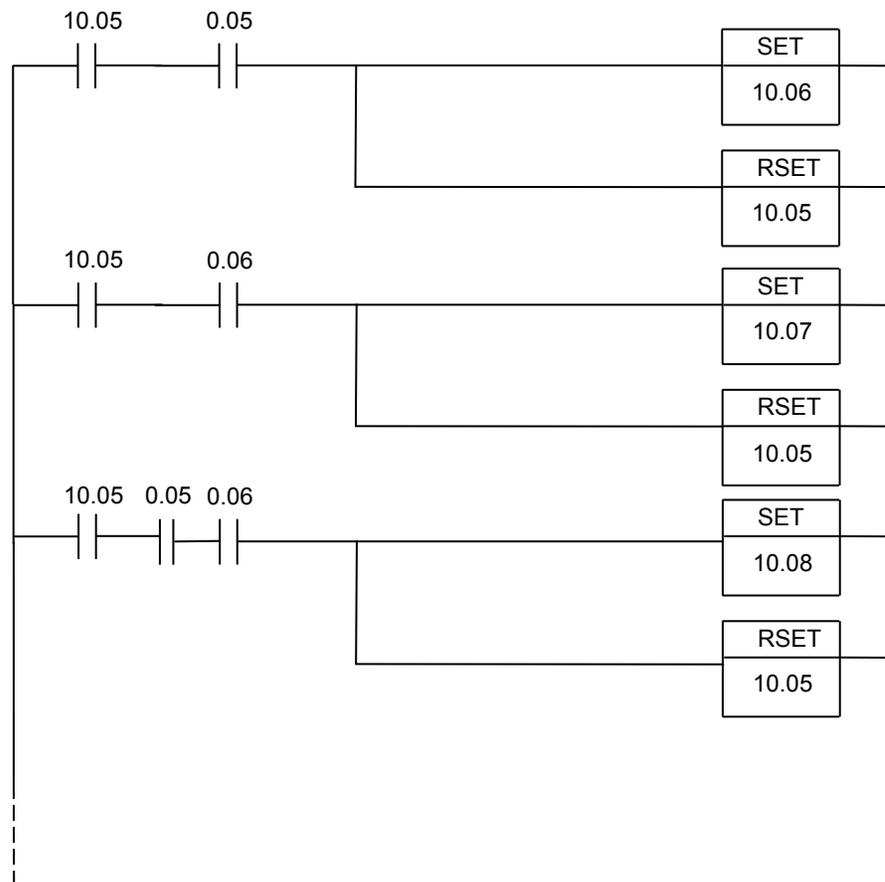


**Fuente:** Elaboración propia (2020)

Los estados que aglutinan los dos subprocesos son el 1,10 y 11 (Figura 3.8). Por ello se puede observar que requieren de un funcionamiento de igual importancia según sus estados. Es así, que al trasladar al diagrama Ladder, este usa dos funciones de Set y una de Rset. Las funciones de Set le indican al estado anterior (1) que evolucione a 10 y 11 al mismo tiempo, siendo puesto en Reset solo el estado 1. Esto permite la activación de ambos estados o subproceso en un mismo tiempo.

La Figura 3.9 muestra la estructura lógica de Divergencia OR en Ladder. Se puede apreciar que el autómatas OMRON a través de su aplicación CX-Programmer tiene una cierta accesibilidad intuitiva al momento de realizar tareas complejas como llevar esta estructura a diagrama escalera. Por ello, cada estado proveniente de la etapa 5 se relaciona directamente a un Set a las etapas correspondientes de selección que son 6, 7 y 8. Cada etapa, en su punto final de evolución, es reseteado para liberarse de la etapa anterior.

**Figura 3.9:** Divergencia OR para la selección del sector de riego

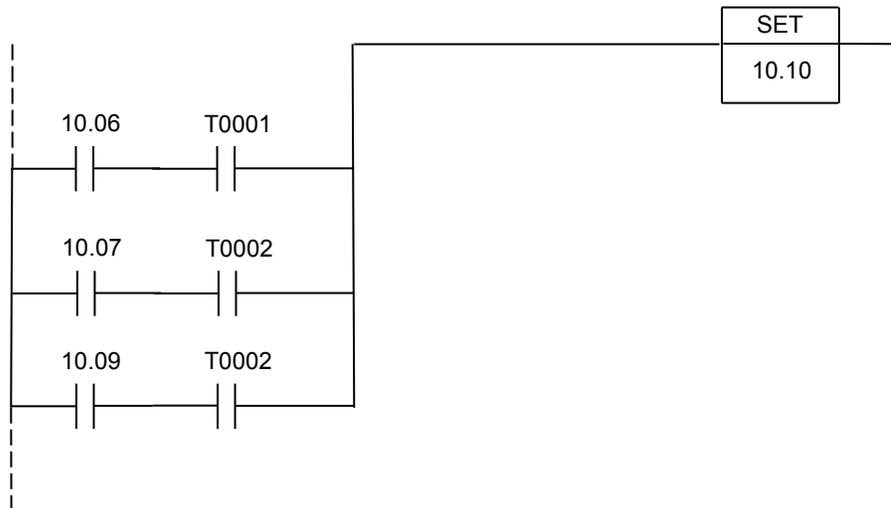


**Fuente:** Elaboración propia (2020)

La Convergencia OR que aglutina los finales de procesos en las posibilidades de A y B está reflejada en la Figura 3.10. Como se mencionó anteriormente, la totalidad del diagrama Ladder se encuentra en el **Anexo C**. La convergencia agrupa a los estados 6, 7 y 8 en uno solo que es el estado 1. Estas secuencias son necesarias para rearmar el sistema de control automatizado.

Las demás secuencias responden a las estructuras fundamentales en automatización de SET y RESET, utilizados en la mayoría de los PLCs. Estas estructuras no difieren en uso, sino en representación. Es decir, que según el autómatas programable pueden variar en la presentación en el programa. Como se vio en las figuras anteriores, Omron representa estas estructuras con dos rectángulos.

**Figura 3.10:** Convergencia OR para rearme de procesos



**Fuente:** Elaboración propia (2020)

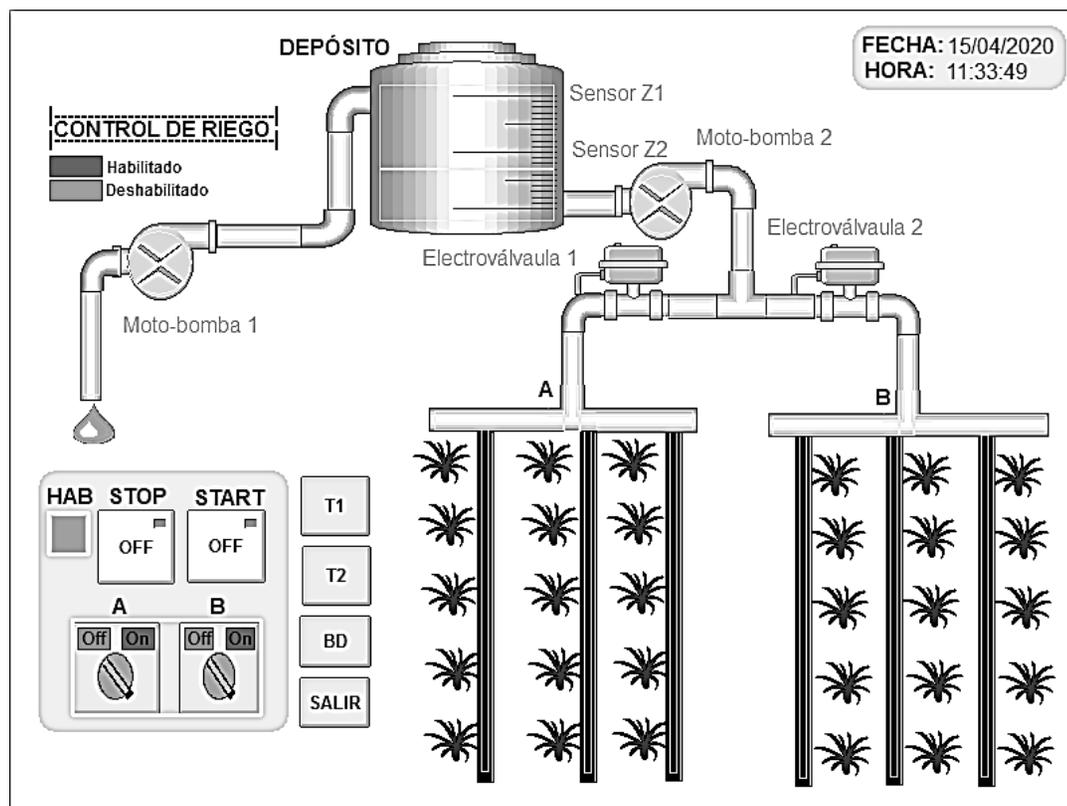
#### **3.2.4. Supervisión, control y registro de proceso**

Las tareas de supervisión, control y registro son realizadas a través de la tecnología **SCADA** (Supervisory Control and Data Acquisition) que significa Supervisión, Control y Adquisición de Datos. Como lo manifiesta Espert (2018), los SCADAs son programas de Software instalados en los equipos de los operarios con la finalidad de que una planta automatizada pueda ver y controlar desde dicha aplicación aquellos equipos integrados en el sistema. Es por ello que los SCADAs son cada vez más utilizados en distintos ámbitos.

El presente proyecto hace uso del aplicativo **CX-Supervisor** para el desarrollo del SCADA. Este software también pertenece al conjunto de aplicaciones propias de Omron, permitiendo que el desarrollo sea fluido y además compatible con el programa Ladder, desarrollado en CX-Programmer. Por estas razones se vio conveniente su uso. Sin embargo, cuando se introduce o se hace uso ya de tecnologías industriales, no se dispone de una amplia información en cuanto a los dispositivos electrónicos. Es así que la principal fuente de información son los manuales oficiales que las líneas de dispositivos autómatas ofrecen y que en su mayoría se encuentran en un idioma extranjero como es el inglés.

Una vez conocido los requerimientos de la institución y diseñado los dos sub-procesos, metodológicamente con un Grafcet de nivel 1 y de nivel 2, se asume que toda la resolución del proceso principal se encuentre en el autómatas programable. Es decir, que se parte desde una comunicación entre el PLC y un equipo de computación para todo el proceso que sigue. Por ello, aquí es importante aclarar que para que esta comunicación se realice tanto el PLC como el computador requieren tener un medio de comunicación que en el caso específico de la línea Omron, es a través de los módulos de comunicación. Así, el modelo específico corresponde al **CP1W-CIF41**, mismo que viene prediseñado para ser acoplado en la parte frontal del PLC. Por esto, y por distintas características técnicas, como el fácil manejo y cuestiones de compatibilidad, se eligió el uso del mismo.

**Figura 3.11:** Representación SCADA el sistema de control de riego



**Fuente:** Elaboración propia (2020)

La Figura 3.11 presenta el diseño del sistema SCADA para el control de riego. Sin embargo, el mismo no representa nada si no se lo entiende desde el punto de vista de la comunicación con el PLC y la programación destinada para su animación. Por tanto a continuación se detallan estos aspectos para una mejor comprensión de su desarrollo y funcionamiento.

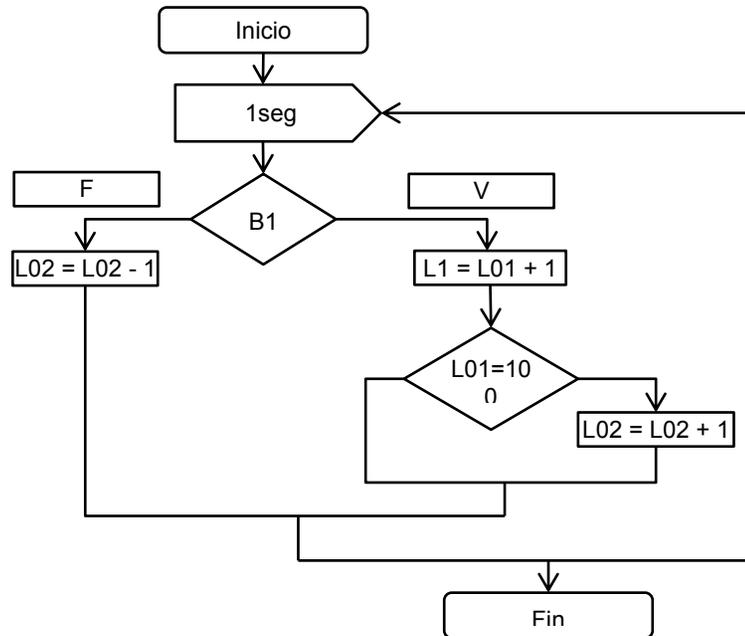
**Tabla 3.1:** Esquema de los principales puntos según I/O del PLC

<b>Punto</b>	<b>Tipo</b>	<b>E/S</b>	<b>Dirección</b>
A	Booleano	E/S	0.05
B	Booleano	E/S	0.06
B1	Booleano	E/S	100.00
B2	Booleano	E/S	100.01
HAB	Booleano	E/S	0.00
SW1	Booleano	E/S	0.02
V1	Booleano	E/S	100.02
V2	Booleano	E/S	100.03
Z1	Booleano	E/S	0.03
Z2	Booleano	E/S	0.04
T1	Entero	E/S	T1
T2	Entero	E/S	T2
L00 ... L55	Entero	Memoria	-
\$Time	Texto	Sistema	-
\$Date	Texto	Sistema	-

**Fuente:** Elaboración propia (2020)

El Automata al ser un dispositivo programable, usa los denominados **Points** o puntos (en español) para comunicarse con el Scada. Es por ello, que estos puntos son tan importantes para la programación como para el sistema de control. La Tabla 3.1 presenta aquellos puntos creados para el sistema Scada en el control de riego. Es importante, denotar que aquellos que corresponden a L00, L01, ..., L55, son los mismos que se usan para la animación. Dicha animación está presente según las características de todo Scada que muestra el actual estado de los dispositivos de control y permite la manipulación del mismo.

**Figura 3.12:** Extracto de algoritmo de animación para el sistema Scada

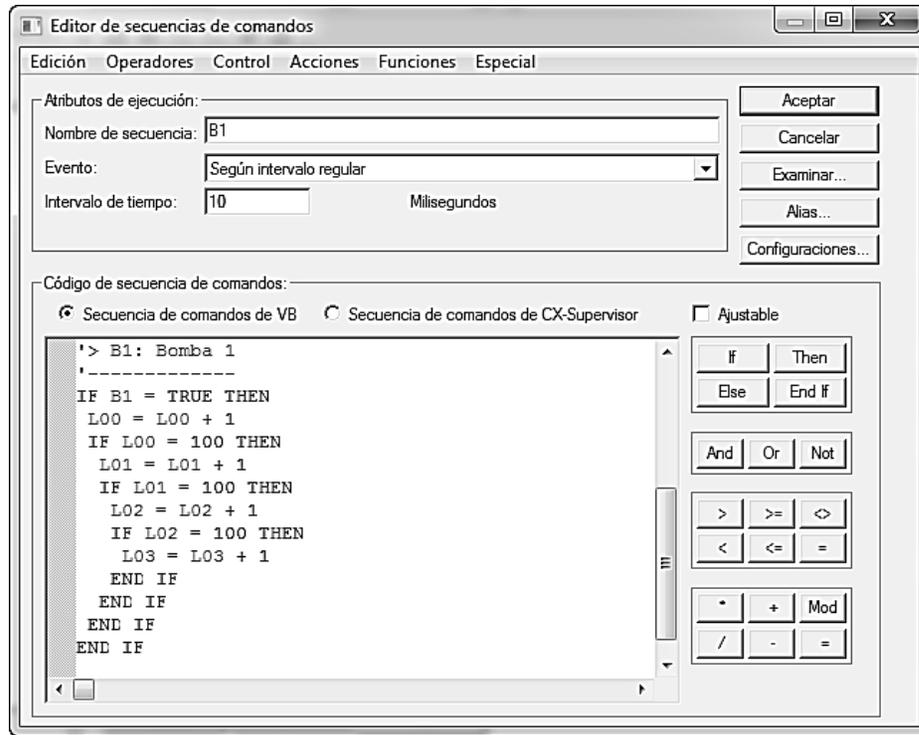


**Fuente:** Elaboración propia (2020)

La línea Omron hace uso de dos lenguajes de programación, una nativa como script **Cx-Supervisor** y la otra script **VB.Net**. La primera corresponde a una adaptación del lenguaje de programación de Visual Basic pero con características propias del autómeta. La segunda, VB.Net, es el mismo lenguaje de programación, pero con limitaciones de carácter aplicativo. Es decir, que no contempla todas las funcionalidades de Visual Basic.

El software desarrollador Scada de Omron, tiene la peculiaridad de estar en una ejecución según un evento, el cual puede ser según un intervalo regular, una condición o una subrutina entre los más frecuentes. Esto quiere decir que si se escoge según un intervalo este hace suponer que se está dentro de un While. La Figura 3.12 presenta el algoritmo fundamental para generar el llenado de líquido en las tuberías. Asimismo, la captura en la Figura 3.13 muestra la implementación de este algoritmo en forma de código. El proyecto hace uso de esta técnica para simular la parte más reiterativa que se muestra en el Scada.

**Figura 3.13:** Extracto de código VB.Net para generación de llenado de tubería



**Fuente:** Elaboración propio en CX-Supervisor (2020)

El actual proyecto, denominado Sistema de Control de Riego Automatizado, presenta la necesidad de almacenar los momentos de riego en los sectores para manejar de esta forma un aprovechamiento según el tipo de cultivo. Es así que estudiando los manuales de usuario se averiguo que el Developer de Scada permite una comunicación con Excel, Access y otras tecnologías que soporten la tecnología **ADO** (Activex Data Object). Por lo tanto, luego de un estudio de campo se vio que la mayoría, por no decir todos los equipos, cuentan con sistemas operativos Windows y por tanto cuentan con Access por defecto. Por ello, se consideró el uso de esta herramienta de base de datos para almacenar la información pertinente a:

- Sector de riego, este refiere al registro del sector de riego.
- Fecha de riego, el cual identifica el día de riego considerando el anterior dato de sector de riego.
- Tiempo de riego, refiriéndose a tiempo de riego que se produjo.

**Figura 3.14:** Registro de riego capturado en distintos momentos

Id	Data	Time	Sector	Haga clic para agregar
10	15	10:00:01 a.m.	1	
11	20	10:19:09 a.m.	1	
12	30	10:20:14 a.m.	2	
13	15	11:26:03 a.m.	2	
14	15	11:27:18 a.m.	1	
15	15	11:27:32 a.m.	2	
16	15	02:21:42 a.m.	2	
17	20	02:25:19 a.m.	1	
18	20	02:25:39 a.m.	2	
19	20	02:27:29 a.m.	1	
20	20	02:27:38 a.m.	1	
21	20	02:27:47 a.m.	1	
22	20	02:28:05 a.m.	1	
23	15	02:32:15 a.m.	1	
24	15	02:32:31 a.m.	2	
25	15	02:36:59 a.m.	2	
26	15	02:45:43 a.m.	2	
*	(Nuevo)			

**Fuente:** Registro generado según SCADA de riego (2020)

Una vez obtenidos los datos de riego, la generación de reporte se hace más accesible y rápida. Este reporte puede ser ordenado según el dato de interés. La Figura 3.15 muestra el reporte generado según el sector de riego. Esta información coadyuvara al análisis y toma de decisiones en cuanto al riego. Asimismo, provoca un seguimiento al proceso.

**Figura 3.15:** Reporte generado según sector de riego

<b>Reporte de riego</b>			
Sector de riego	Tiempo de riego (Seg.)	Hora de riego	Id de registro
1	15	02:32:15 a.m.	23
	15	10:00:01 a.m.	10
	20	02:25:19 a.m.	17
	20	02:27:29 a.m.	19
	20	02:27:47 a.m.	21
2	15	02:32:31 a.m.	24
	15	02:36:59 a.m.	25
	15	02:45:43 a.m.	26
	30	10:20:14 a.m.	12

miércoles, 06 de mayo de 2020 Página 1 de 1

**Fuente:** Reporte generado con Access 2010

### 3.3. Estimación de diseño agronómico e hidráulico

El hecho de “proyectar un sistema de riego localizado y que además funcione correctamente es ante todo una labor compleja, propia de ingenieros agrícolas y agrónomos” (Agrológica, 2012). No obstante, este apartado pretende mostrar las estimaciones fundamentales con fines evaluativos al proyecto actual. Esto nos permitirá presentar cuan rentable podría ser la producción de un producto, ya sea una hortaliza, cuando este en producción tecnificada.

Es así que el presente proyecto considera a la lechuga para las siguientes proyecciones. Esto porque la lechuga (o *Lactuca sativa* L.), según el censo agropecuario de 2015 (INE, 2015, p. 34), está situada en el puesto 18 de principales cultivos con 172,1 hectáreas de cultivo solo en invierno en todo Bolivia. Asimismo, porque esta hortaliza es de un amplio consumo mundial por sus cualidades nutritivas y su fácil digestibilidad, y principalmente por los recursos nutricionales de bajo costo (Gonzales 1998, citado en Intipampa, 2014, p.1).

No es un secreto que los vegetales solo utilizan una pequeña parte del agua disponible en sus procesos metabólicos, el resto se pierde por la **transpiración del propio vegetal** y por **transpiración en el suelo**, fenómeno conocido como **evapotranspiración del cultivo (ETc)**. La cantidad de agua a aportar deberá ser igual a la ETc para así compensar dichas pérdidas. La Ecuación 3.1 muestra sus valores de cálculo.

$$ETc = ETC_0 \times K_C \qquad \text{Ecuación 3.1}$$

Dónde:

ETc = Evapotranspiración del suelo

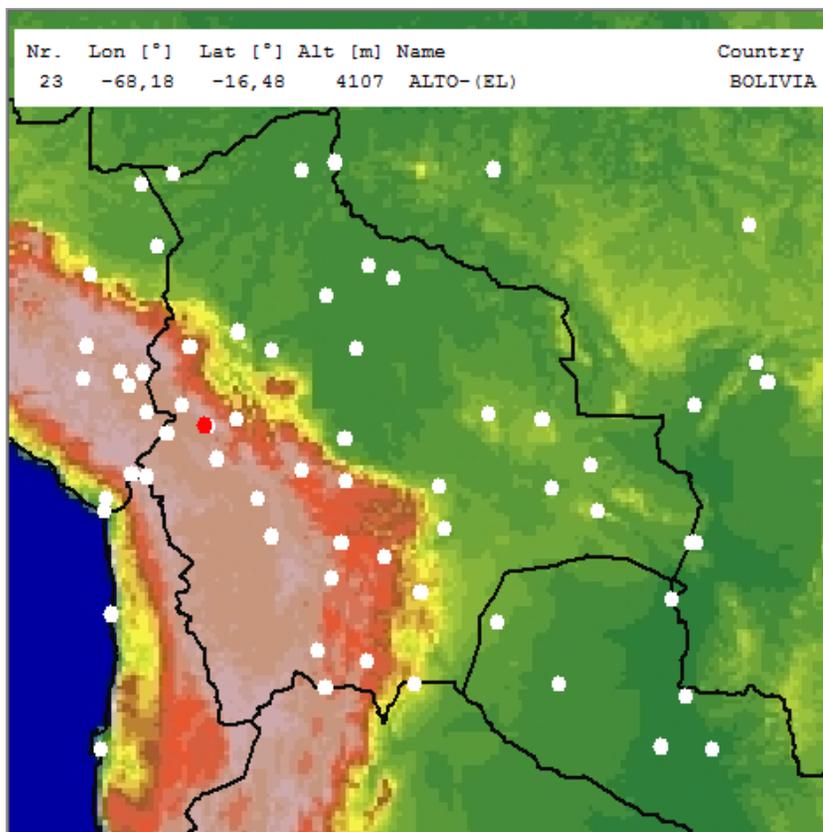
ETC<sub>0</sub> = Evapotranspiración de referencia

K<sub>C</sub> = Coeficiente propio de cada cultivo

Dos aplicaciones por demás recomendadas por Food and Agriculture Organization (FAO), para calcular la evapotranspiración, son el **Climwat** y **Cropwat**. El primero

consiste en una amplia de base de datos climáticos para ser utilizado en combinación con el segundo. La Figura 3.16 muestra la estación de la FAO para recabar información referente a la ciudad de El Alto.

**Figura 3.16:** Ubicación de estación meteorológica



**Fuente:** Generado con Climwat según la Ciudad de El Alto (2020)

Una vez identificada la estación meteorológica en la ciudad de El Alto, esta información es utilizada con el Cropwat. La Figura 3.17 muestra la información meteorológica relevante a la evapotranspiración ( $ETC_0$ ). Específicamente, esta información se encuentra en la octava columna con el denominativo  $ET_0$ . El dato que recomienda tomar Agrológica (2012), es aquel cultivo en las condiciones más desfavorables, siendo este en noviembre.

**Figura 3.17:** Índice de evapotranspiración en la ciudad de El Alto

ETo PenMon Mensual

País: Location 23      Estación: ALTO-(EL)

Altitud: 4107 m.      Latitud: 16.48      Longitud: 68.18

Month	Min Temp °C	Max Temp °C	Humidity %	Wind km/day	Sun hours	Rad MJ/m <sup>2</sup> /day	ETo mm/day
January	5.2	13.0	71	181	7.4	22.1	3.64
February	4.6	13.0	73	181	7.1	21.3	3.45
March	4.0	14.0	70	181	7.1	20.1	3.33
April	3.8	14.0	66	181	6.9	17.8	3.02
May	3.2	13.0	52	181	9.5	19.0	3.07
June	1.6	13.0	45	225	8.3	16.3	2.96
July	1.2	13.0	52	225	8.1	16.5	2.86
August	1.8	14.0	48	225	7.8	18.1	3.31
September	2.8	14.0	56	225	7.2	19.4	3.46
October	3.8	16.0	61	225	8.2	22.5	3.99
November	4.4	16.0	60	225	7.3	21.7	4.05
December	5.2	14.0	64	225	8.2	23.4	4.01
Average	3.5	13.9	60	207	7.8	19.9	3.43

Fuente: Generado con Cropwat (2020)

El último dato pendiente para calcular la evapotranspiración del cultivo es el coeficiente de cultivo ( $K_c$ ). El cual es el coeficiente propio de cada cultivo. Según el manual de la FAO de **Evapotranspiración del Cultivo** (s.f., p. 110), la lechuga tiene el valor de 0,7. Con estos datos la estimación en un primer momento sería:

$$ET_c = ETC_0 \times K_c$$

$$ET_c = 3.43 \times 0.7$$

$$ET_c = 2.401 \text{ mm/día}$$

El siguiente paso es calcular las necesidades brutas de riego ( $N_b$ ). Para el cual se tiene la siguiente definición.

$$N_b = \frac{N_n}{E_a} \times 100 \quad \text{Ecuación 3.2}$$

Dónde:

$N_b$  = Necesidad bruta de riego

$N_n$  = Necesidad neta de riego

$E_a$  = Eficiencia de riego

Según Agrologica (2012), las necesidades netas de riego, corresponden a resultado de la diferencia entre el ETc y las ganancias por lluvias con las precipitaciones. Por la naturaleza de las carpas solares o viveros este valor suele ser despreciable. Así, las necesidades netas de riego (Nn) sería igual a la evapotranspiración del cultivo (ETc).

$$\mathbf{Nn = ETc}$$

$$Nn = 2.401 \text{ mm/d}$$

Se sabe que ningún sistema de riego es perfecto, por lo que el anterior valor se multiplica por la eficiencia de riego (Ea) del sistema empleado para obtener las necesidades brutas (Nb) de riego. Se considera una Ea del 90% en riego por goteo (y del 75% en aspersión). Entonces, realizando los cálculos en la Ecuación 3.2 tenemos:

$$Nb = (2.401/90) \times 100$$

$$Nb = 2.66 \text{ mm/d}$$

Ahora, tomando en cuenta el marco de plantación recomendado para la lechuga que es de 40 cm (0.4 m) x 30 cm (0.3 m) se tendrá:

$$2.66 \times 0.4 \times 0.3 = 0.3192 \text{ mm/d (ó 319.2 ml/d)}$$

Así se obtiene el requerimiento de aproximadamente **1/3 litro de agua por planta en cada día.**

Una de las ventajas del riego por goteo es el ahorro de agua, precisamente porque no es necesario mojar todo el terreno como ocurre en el riego por aspersión. Así, el área mojada por el gotero varía según el **caudal del mismo**, y de la **textura del suelo**. Para evitar cálculos innecesarios, propios de la ingeniería agronómica, nos servimos de las tablas normalizadas en producción, diseñadas para tal efecto.

Según Agrícola (2012), respecto a la textura del suelo, y considerando el suelo franco de El Alto, se deberá regar una vez por día, si se usa el sistema de riego por goteo. Asimismo, para calcular el tiempo de riego se debe considerar los caudales de cada gotero que es 1,14 L/h, con la siguiente ecuación:

$$t = \frac{Nb * T}{C} \quad \text{Ecuación 3.3}$$

Dónde:

Nb = Necesidad bruta de riego

T = Tiempo (usualmente en hora)

C = Caudal

Reemplazando valores se tendrá:

$$t = \frac{Nb * T}{C}$$

$$t = (0.3192 \text{ Litros} \times 1 \text{ Hora}) / 1.14 \text{ Litros}$$

$$t = 0.28 \text{ H (16.8 min)}$$

Entonces, para el cultivo en la ciudad de El Alto, a un caudal de 1.14 L/H, se requiere aproximadamente 17 minutos de riego cada día.

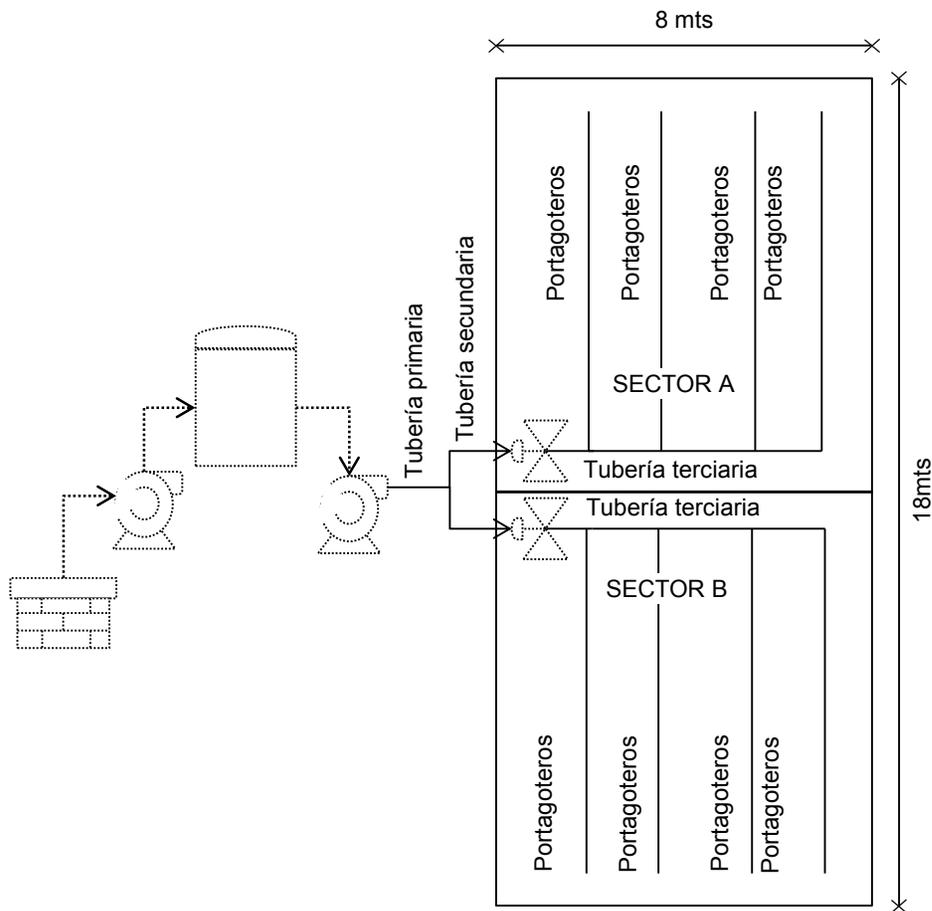
Una vez que se calculó la cantidad de agua y el tiempo de riego necesario para la el modelo de producción de lechuga, el siguiente paso es diseñar la red de distribución de agua, diseño hidráulico. Para lo cual se considerara los siguientes componentes:

- Tubería primaria. Es la encargada de conducir el agua hasta el sector de riego.
- Tuberías secundarias. Conducen el agua que circula por la primaria a cada unidad de riego.

- Tuberías terciarias. Dispuestas en superficie, en perpendicular a las líneas de cultivo.
- Tuberías portagoteros. Son las tuberías sobre las que se insertan los goteros. Se disponen en paralelo a las líneas de cultivo.

Así, El tamaño del invernadero determinará cuantas ramificaciones deberá contener. Tomando en cuenta que estas nunca deben superar los 140 metros de longitud. Para fines de proyección y con el modelo perseguido del proyecto, se tiene el siguiente diagrama en la Figura 3.18. Las dimensiones fueron tomadas de manera directa en el mismo espacio del invernadero, para realizar las estimaciones necesarias.

**Figura 3.18:** Esquema referencial de tuberías para sistema de riego



**Fuente:** Elaboración propia (2020)

### 3.4. Estimación de rentabilidad

Según uno de expertos en producción de lechuga en la región del altiplano de Bolivia (Torrez, 2017 pp. 13 – 18), esta tiene un ciclo vegetativo de 1 a 2 meses. Asimismo, se recomienda ser producida desde agosto hasta abril, pero no se desestima su producción en todo el año. Durante esos nueve meses se puede tener una producción diferentes cosechas según la organización del productor o de la institución que lo produce.

Tomando en cuenta un marco de plantación de 40 cm (0.4m) por 30 cm (0.3m), tendríamos en 8 mts **20 hileras para plantar**. En cada hilera tendríamos **30 plantaciones de lechuga**. Es decir, que se tendría **600 lechugas por sector**. Tomando ambos sectores, **se estima 1.200 lechugas en total**. Pero siguiendo el margen de desprecio o de no producción que tiene la lechuga de 87% tendríamos **1044 unidades finales de producción**.

El precio total al cual se comercializa la lechuga (Altagro, 2013), considerando una aproximado de 700 – 900 gramos, es de 1.50 Bs cada unidad. Por ello, la rentabilidad **según el margen de producción de 1.044 lechugas es de 1.566 Bs**. Asimismo. Según el Instituto de desarrollo Rural con sede en La Paz (s.f., p. 55), la cantidad de cosechas anuales asciende a siete, lo cual indica que esta cifra en el ciclos recomendados podría elevarse a **10.962 Bs anual**.

Por todo ello, se considera, según la proyección de rentabilidad, que un vivero con las características para la producción de lechuga, genera ingresos que en futuro puedan cubrir los gastos de materiales e insumos. Generando utilidades para la sustentación ya sea de la institución particular o en general. Es así, que su implantación se deja a la consideración tanto de la misma institución donde se presenta el proyecto así como de la comunidad universitaria y productiva que desee aventurarse en dicha labor.

### 3.5. Costos de implementación del diseño

Un prototipo nos permite aterrizar una idea y, con su análisis y puesta en práctica, detectar falencias y todo lo que permita mejorar su desempeño. Así, este apartado presenta los costos en cuanto a valoración monetaria del prototipo. En otras palabras, aquí se pretende exponer los precios de los componentes utilizados en el armado del prototipo según criterios de agrupación.

La Tabla 3.2, muestra el primer cuadro de estimaciones según las descripción del proceso presentado en el apartado de este tema (3.2.1 Descripción del proceso de control automatizado). A simple vista, se puede evidenciar que los componentes industriales tienen un elevado costo por la naturaleza de su funcionamiento. Sin embargo, no se puede negar, que esta práctica acerca al prototipo lo más posible al ámbito de la industria.

**Tabla 3.2:** Cuadro de costos de dispositivos para implementación de prototipo

Descripción		Cantidad	Precio/unidad (Bs)	Precio total (Bs)
Operador	Pulsador*	2	20	40
	Selector*	2	25	50
	Piloto*	2	15	30
	Parada* emergencia	1	35	35
Control	PLC Omron* (CP1WCIF41)	1	2000	2000
	Módulo* Ethernet (CP1L20DT1)	1	1000	1000
	RIF 24V*	4	75	300
Riego	Bomba 24V	2	50	100
	Electroválvula 12V	2	50	100
<b>Total</b>				<b>3.655</b>

\*Componentes industriales

**Fuente:** Elaboración propia propia (2020)

El total asciende a Bs. 3.655, solo considerando la parte de componentes mínimos necesarios para el prototipo. Desde un enfoque formativo podría resultar costoso, pero se debe tomar en cuenta que desde el enfoque industrial el mayor interés es la garantía de funcionamiento a las mayores exigencias, por ello su elevado costo. Asimismo, toda inversión industrial tiende a considerar una **recuperación de inversión** a mediano o largo plazo.

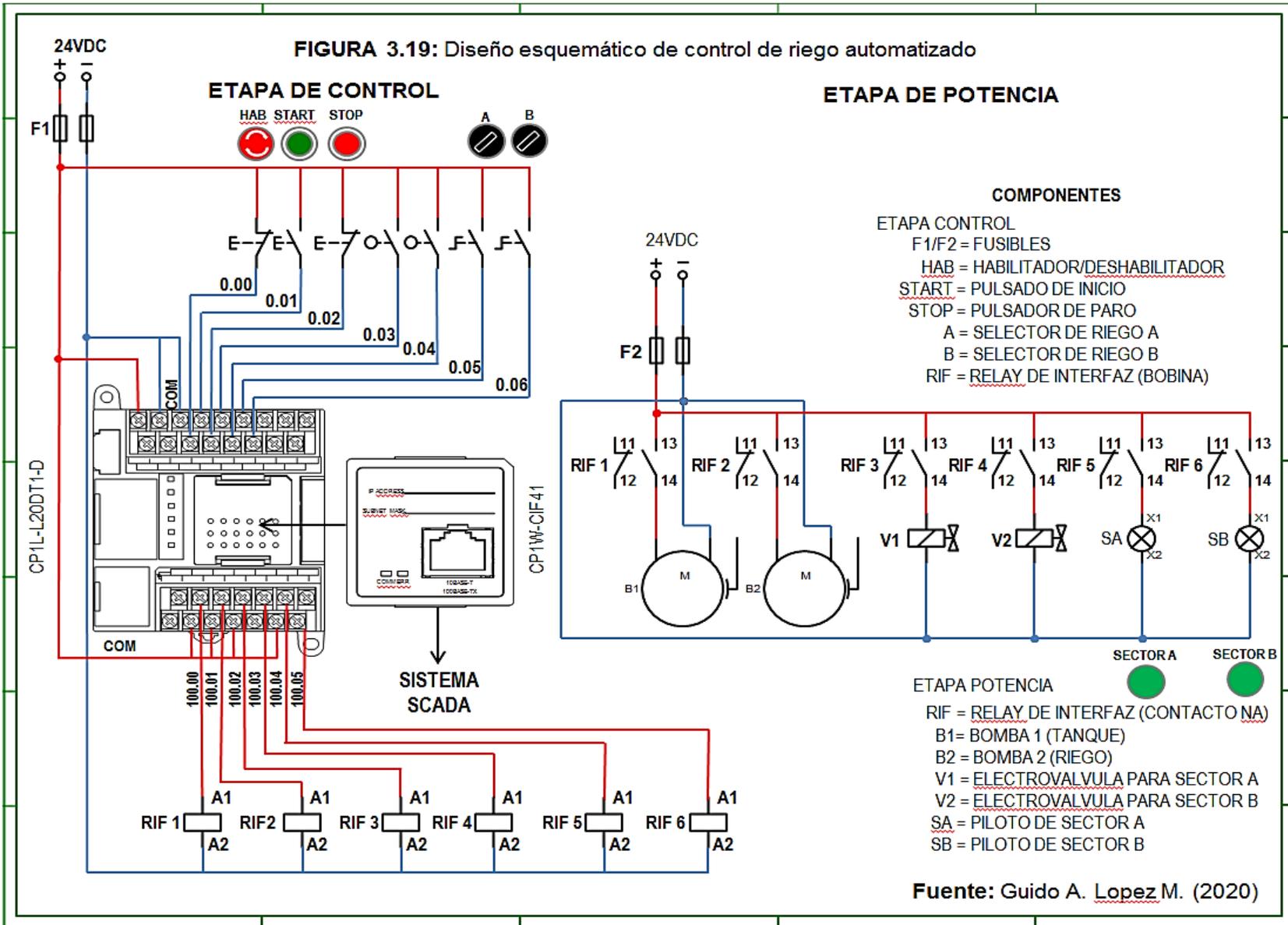
Como se vio en el apartado de rentabilidad (3.4. Estimación de rentabilidad), en un año de cosecha se estima obtener 10.962 Bs. Estas cifras hacen saber que el proyecto si augura una rentabilidad sostenible. Recuperándose el costo de la automatización en la primera cosecha, obviamente esto al margen de los demás gastos. Siguiendo la implementación de la propuesta, la Tabla 3.3, presenta los costos en cuanto a la red de distribución del agua. Asimismo, la Figura 3.19 presenta el diseño esquemático del circuito, según el presupuesto estimado.

**Tabla 3.3:** Cuadro de costos para la red de distribución de agua

Descripción	Cantidad	Precio x unidad (Bs)	Precio total (Bs)
Tubo PVC 1/2"	5m	32	32
Ts PVC 1/2 "	6	6	36
Codo PVC 1/2"	4	6	24
Empalme externo PVC 1/2"	4	3	12
Empalme interno PVC 1/2"	2	3	6
Tapon interno PVC 1/2"	2	3	6
Tapon externo PVC 1/2"	6	2	12
Bandejas	2	15	30
Total			158

**Fuente:** Elaboración propia (2020)

FIGURA 3.19: Diseño esquemático de control de riego automatizado



## 4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Este apartado tiene la finalidad de exponer las conclusiones y recomendaciones a las cuales se llegaron una vez concluido el presente proyecto. Estas conclusiones vertidas están relacionadas de manera directa a los objetivos planteados a lo largo del desarrollo. Por ello también representan, en su conjunto, las consecuencias generadas del planteamiento del problema.

### 4.1. Conclusiones

El objetivo general del presente proyecto fue **elaborar una propuesta de automatización del sistema de control de riego para el Vivero Forestal Municipal de El Alto**. Al culminar el presente trabajo se resuelve que el mismo se logró alcanzar gracias a una evaluación institucional, un diseño metodológico, y un desarrollo tecnificado para el registro y control de riego. Estos hechos potenciaron la aceptación del proyecto tanto en la institución municipal como en la casa superior de formación.

**Analizar la situación actual del Vivero Forestal Municipal de El Alto y de sus dependencias jurisdiccionales (viveros, jardines botánicos y huertos escolares)**, fue uno de los objetivos específico que también se alcanzaron. Para ello se realizaron una serie de visitas a los diferentes espacios dentro de la jurisdicción del Gobierno Municipal de El Alto. Esto provoco, una inmersión en las distintas dependencias, lográndose conocer sus virtudes y necesidades para una posterior evaluación.

El siguiente objetivo específico se refirió a **desarrollar una propuesta de automatización para el actual control de riego, a través de la metodología Gemma**. El mismo fue la tarea más extensa del proyecto. Esto porque contemplo, al margen de conocer el área de trabajo, conocer y aplicar los conocimientos propios de gestión y producción automatizada.

Este desarrollo partió desde analizar los datos recolectados, para luego generar propuestas que mejoren el proceso de control de riego. Una vez que una propuesta fue aceptada, el trabajo estuvo en superar los pasos de la metodología de automatización para contar con un producto final. Este producto fue un diseño general, controlando dos sub-procesos que son el de almacenamiento y el de riego.

Para el siguiente objetivo específico se tuvo el fin de **elaborar un sistema Scada para gestionar los procesos tanto de almacenamiento como de distribución de agua**. Por lo cual, el mismo también se logró alcanzar a través de la utilización de herramientas propias de Omron (CX-Supervisor). Sin embargo la escasa información, al tratarse de productos específicos, si genero una cierta dificultad ya que la mayor parte de los manuales se encontraban en inglés.

**Registrar los tiempos de riego, considerando el sector de la plantación, en una base de los datos, permitiendo contar con un seguimiento de las operaciones realizadas**, fue uno de los últimos objetivos específicos. Para llegar al mismo, se estudió tanto las posibilidades del autómatas y de la institución. Por ello se resolvió en adicionar un módulo de comunicación Ethernet y utilizar una base de datos Access. Estas tecnologías, tanto de hardware y software, resultaron ser sumamente relevantes al proyecto ya que permitieron tener el anhelado registro y control de riego, para así mejorar las actuales disposiciones de agua.

#### **4.2. Recomendaciones**

Todo proyecto posee recomendaciones que son fruto de las experiencias con el análisis y diseño del propósito. Así, esta labor cumple con aportes, en cuanto a valoraciones subjetivos, para futuros trabajos en la comunidad estudiantil o sociedad en su conjunto. En otras palabras estas recomendaciones no son otra cosa que un conjunto de sugerencias respecto a los objetivos alcanzados para ser considerados por los interesados.

- Al presentar una **propuesta** seria de diseño para controlar el sistema de riego en su conjunto al Vivero Forestal Municipal, se pudo percibir, por medios impresos, que la actual institución si cuenta con las posibilidades de la ejecución del mismo. Es más, el proyecto puede ser potenciado de diferentes formas. Una de ellas es la utilización de sensores de humedad. Estos dispositivos electrónicos permitirían realizar un riego en base a las condiciones del terrero, pero para ello, se deberá estimar aspectos de reingeniería y costos.
  
- Una vez realizado un **análisis** institucional, se pudo percibir que las instalaciones que manejan producciones relacionadas a floricultura y horticultura, por parte de la Alcaldía, son bastantes. Entre los diferentes espacios que administran están Viveros, Jardines Botánicos, Huertos Escolares y espacios sin funcionamientos destinados para los mismos propósitos. Sin embargo muchos de estos, especialmente los huertos escolares están abandonados o sin funcionamiento, por una carencia de asignación de funciones. Por ejemplo, el portero de un colegio no tiene la obligación de regar un huerto ya que no es su función. Y, por otro lado, los funcionarios públicos no cubren esa tarea, pese que son los encargados de su mantenimiento.
  
- Respecto al **desarrollo** de la propuesta en su conjunto, se pudo advertir que al ingresar al campo real de la automatización la mayor parte de los conocimientos con dispositivos educativos no se adaptan al mundo industrial. Es decir, los obstáculos parten desde los mismos dispositivos electrónicos y sus guías o manuales oficiales. Los cuales están en su mayoría en Ingles y no existe tanta información en Internet como para dispositivos de practica como Arduino o PIC. Esto si bien es una dificultad superable, al finalizar el desarrollo, se generó una gran confianza en poder aplicar otras soluciones automatizadas.

- Al realizar un **sistema Scada** para el control de procesos se logró por fin entender como funcionan las tecnologías de automatización cuando existe una supervisión remota en redes industriales. El hecho de trabajar con dispositivos compatibles de la misma línea facilitó en gran medida la comunicación, pero se tuvo que superar la parte de capacitación técnica de manejo de los mismos. La programación también fue aplicada con gestiones de animaciones según las instrucciones del PLC. Por ello se logró tener un resultado satisfactorio del uso de estas herramientas tecnológicas de supervisión y control.
- Respecto al **registro de datos** según las exigencias institucionales, se logró almacenar los mismos en una base de datos Access de fácil manejo para cualquier institución. Esto permitió conocer el trabajo de comunicación del Autómata programable con un módulo de comunicación Ethernet dentro de una red para capturar dichos datos. La tecnología usada corresponde a ADO y no solo se limita a Access, sino a cualquier base de datos que lo acepte como MySQL, Oracle, DBMaria, entre otros. Sin embargo el trabajo no fue crear la tabla de registro, sino conocer como enlazar el mismo con un PLC y un Scada.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguilera, M. (2002). *Programación de PLC's* (Tesis de post-grado) Universidad Autónoma de Nuevo Leon, México.
- American Psychological Association (2010). *Publication Manual of the American Psychological Association (Sixth edition)*. London: American Psychological Association.
- Canales, A. y Molina, J. (2010). *Automatización y telecontrol de sistemas de riego*. Barcelona: Marcombo
- Castro, G., Padilla, J. y Romero, E. (2005). Metodología para realizar una automatización utilizando PLC. *Revista de electrónica, eléctrica y sistemas computacionales*, 1 (1), 18- 21.
- Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y control (DIEEC). (2011). *Ingeniería de sistemas industriales* [Material de post-grado]. Universidad Nacional de Educación a Distancia. Madrid: España.
- Diario del Huila. (13 de junio de 2011). Medio ambiente. *Como evitar el calentamiento global*, p. 3B.
- FAO (s.f.). *Evapotranspiración del cultivo: Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos*.
- G.A.M.E.A. (2017) *Manual de Organización y funciones*. Aprobado por Decreto Supremo No. 70/2017
- Garfias, S. (2005). *El Alto: Desde una perspectiva poblacional*. La Paz: CODEPO – IRD
- INE (2015). *Censo agropecuario 2013 Bolivia*.
- Intipampa, J. (2014). Evaluación del *comportamiento agronómico de tres cultivares de lechuga (lactuca sativa l.) en dos comunidades del municipio de Caranavi de La Paz*. Proyecto de grado. UMSA.
- Pérez, E. (2016). *Características y funciones avanzadas de un PLC*. México: Universidad Tecnológica de Campeche, Dirección de Ingeniería en Mecatrónica.
- Ponsa, P. y Granollers, A. (2009). *Diseño y automatización industrial*. España: Universidad Politécnica de Cataluña
- Ponsa, P. y Vilanova, R. (2005). *Automatización de procesos mediante la guía Gemma*. España: Edicions UPC
- Recanzone, R., Sosa, I., Bender, C., Blet, N., y Simon, J. (2013). *Experiencias en la enseñanza de la Informática Industrial en una carrera de Ingeniería Electrónica*. Argentina: Universidad Nacional de Rosario
- Ribiere & Ribiere (2017). *¿Qué es un diagrama de Gantt?* Independently published

- Torrez, I. (2017). Centro de educación alternativa Radio San Gabriel.  
*Nuestras hortalizas*. Cooperación Suiza en Bolivia.
- Valverde, P. (2000). *Grafcet: Diagrama para el diseño de automatismos*.  
 España: I.E.S Miguel de Cervantes.
- Villafáfila, E. y Wyss, F. (2009) *Riego en horticultura: Guía para la instalación de pequeños sistemas de riego*. Argentina: Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA).

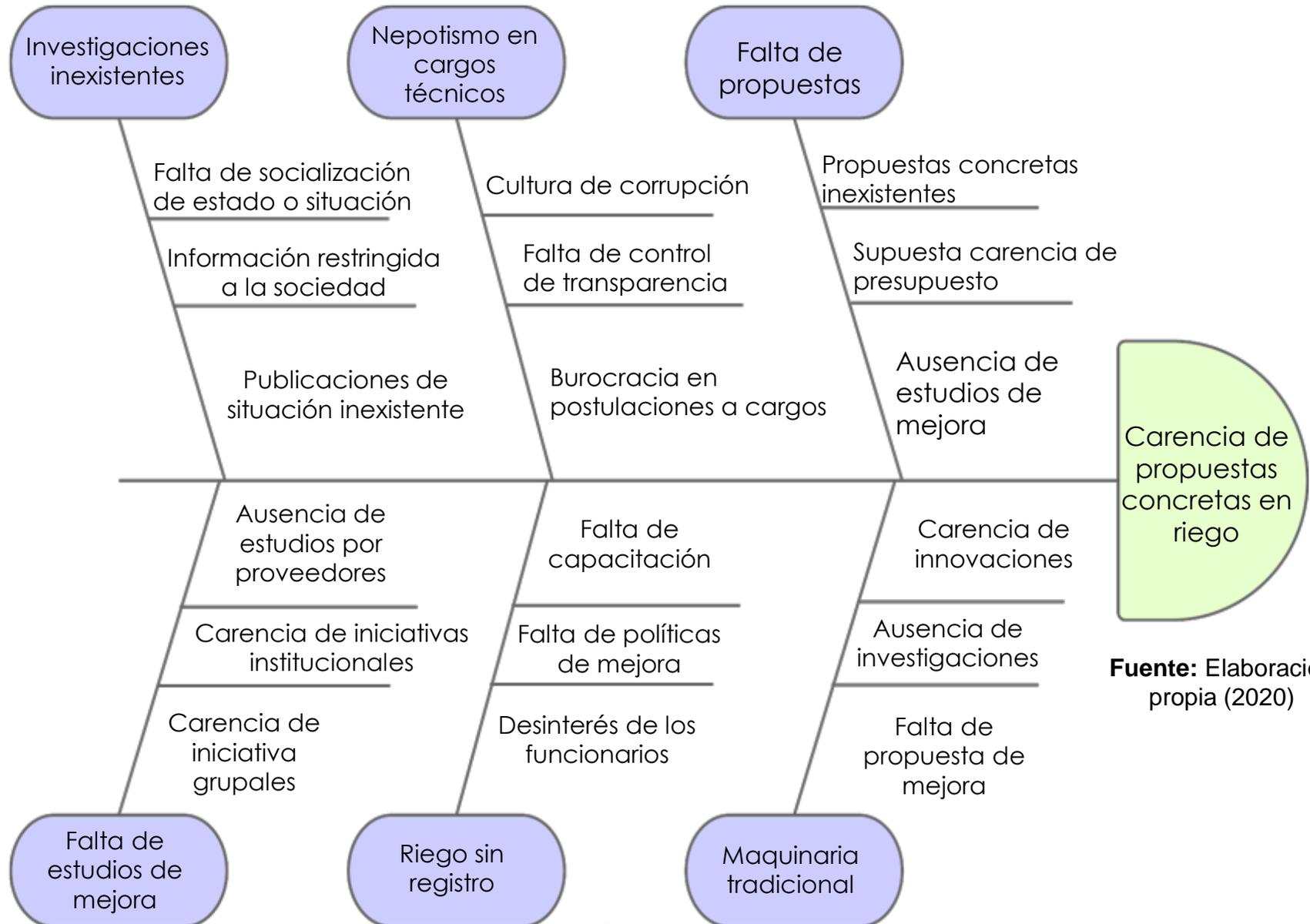
## REFERENCIAS ONLINE

- Agrologica (26 de junio de 2012) *Diseño paso a paso de un sistema de riego por goteo en una parcela real*. Recuperado de <http://blog.agrologica.es/disenopaso-a-paso-de-un-sistema-de-riego-por-goteo-en-una-parcela-real/>
- Altagro (2013). *Cultivo y costos de producción de lechuga*. Recuperado de <http://altagro.org/img/CARTILLAS/7.%20Cultivo%20y%20costo%20de%20produccion%20de%20lechuga.pdf>
- Boix, O. (7 de febrero de 2020). *Descripción de la guía Gemma*. Recuperado de <https://recursos.citcea.upc.edu/grafcet/gemma/descrip.html>
- Ecología y enseñanza rural (1996). *Nociones ambientales básicas para profesores rurales y extensionistas* [Curso online]. Recuperado desde <http://www.fao.org/3/w1309s/w1309s00.htm#TopOfPage>
- El Alto es noticia (20 de febrero de 2020). *Ejecución financiera de la Alcaldía de El Alto llegó a 81% el 2019*. Recuperado desde <https://www.elaltoesnoticia.com/elalto-es-noticia/ejecucion-financiera-de-la-alcaldia-de-el-alto-llego-a-81-el-2019.html>
- Elvira, C. (11 de marzo de 2014). *Método Grafcet: Elementos* [Video]. Disponible en: <https://www.youtube.com/watch?v=hv0w-D5cdls>
- Espert, A. (22 de mayo de 2018) *SCADA: ¿Que es y qué permite hacer?* Recuperado desde <https://www.sothis.tech/scada-que-es-y-que-permite-hacer/>
- Ferrero, J. (2020). *Controladores lógicos programables*. Recuperado desde <https://profesormolina1.webcindario.com/tecnologia/plc/plc.htm>
- Flores, L. y Alcalá, J. (2010). *Manual de procedimientos analíticos*. Mexico: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Gandhi, M. (2 de octubre de 2019). *¿Qué es Grafcet y para qué sirve?* Recuperado desde <https://www.autycom.com/que-es-grafcet/>
- García, A. (3 de octubre de 2005) *Curso de Ciencias Ambientales* [Curso online]. Recuperado de <https://www.eweb.unex.es/eweb/edafo/CAEdProgTeor.html>
- lagua (25 de marzo de 2019). *El acceso al agua potable para toda la población es esencial para el desarrollo sostenible*. Recuperado de

- <https://www.iagua.es/noticias/fao/acceso-al-agua-potable-toda-poblacion-es-esencial-desarrollo-sostenible>
- Instituto para la Innovación Tecnológica en Agricultura, INTAGRI. (24 de febrero de 2020). *El riego, la importancia de su programación y los parámetros de humedad en el suelo*. Recuperado de <https://www.intagri.com/articulos/agua-riego/El-riego-la-importancia-de-su-programacion-y-los-parametros-de-humedad-en-el-suelo>.
- Jimenez, S. (2 de agosto de 2017). Diseño de sistemas de riego [Video]. Disponible en <https://www.youtube.com/watch?v=1dympA0-bUA>
- Lopez, A., Alcobendas, P., Nuñez, J., y Morales, P. (13 de septiembre de 2016). *Relación Agua-Suelo-Planta* [Material de asignatura]. Recuperado de [https://previa.uclm.es/area/ing\\_rural/Trans\\_hidr/Tema14.pdf](https://previa.uclm.es/area/ing_rural/Trans_hidr/Tema14.pdf)
- Marioz (28 de septiembre de 2019) *Características y concepto del PLC*. Recuperado desde <https://electroprojecs.blogspot.com/>
- Modos de marcha y parado: La guía Gemma (17 de marzo de 2003) Recuperado de <http://isa.uniovi.es/~vsuarez/Download/GemmaTelemecanique.PDF>
- Produccion de ortalizas (s.f.). *Centro de investigación y promoción del campesinado*. Recuperado desde <http://www.del.org.bo/info/archivos/produccionhortalizas2.pdf>
- Produccion semi-tecnicada de lechuga. (s.f.). *Instituto de Desarrollo Regional – Universidad Mayor de San Andres*. Recuperado desde <http://idr.umsa.bo/documents/545245/0/PROYECTO+CHICANI+reformulado+2018.pdf/c38dff44-b636-4670-b98f-ef17aa816145>
- Sela, G. (24 de febrero de 2020). *Los Sistemas de Riego por Goteo*. Recuperado de <https://www.smart-fertilizer.com/es/articles/drip-irrigation/>
- Velásquez, J. (2004). Industrial Data. Vol. (1). *Cómo justificar proyectos de automatización*. Recuperados desde <http://revistasinvestigacion.unmsm.edu.pe/index.php/idata/issue/view/380>

## ANEXO A: IDENTIFICACIÓN DE LA CARENCIA DE PROPUESTAS CONCRETAS PARA EL CONTROL DE RIEGO A TRAVÉS DEL DIAGRAMA ISHIKAWA

Caso: Vivero Forestal Municipal de El Alto



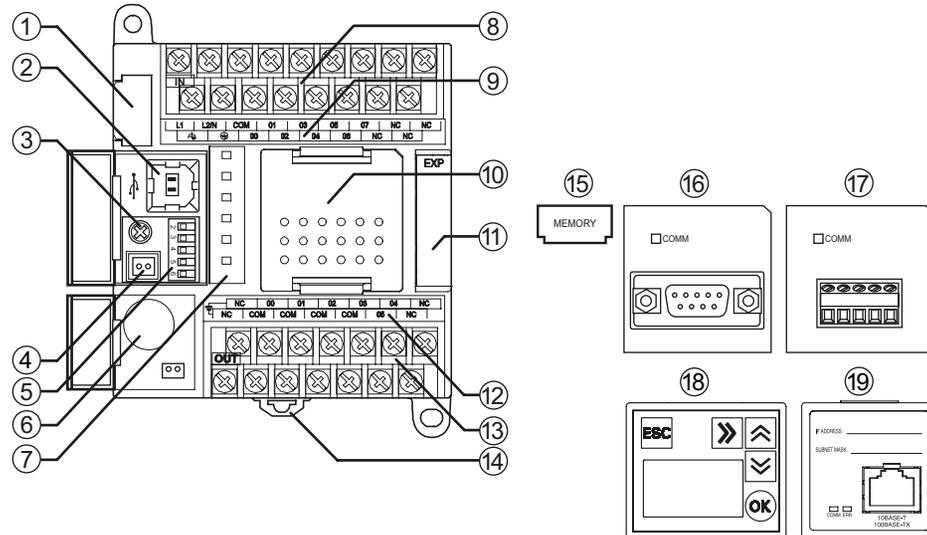
**Fuente:** Elaboración propia (2020)

## ANEXO B: CARACTERISTICAS GENERALES DEL CP1L-L20DT1-D

Fuente: SYSMAC CP1/CP1 Manual de Introducción, pp. 17 y 18

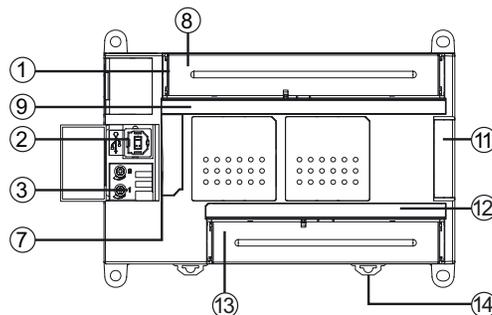
La presente sección describe el nombre y funciones de los componentes, utilizando como ejemplos la unidad CP1L de 14 puntos de E/S y la unidad CP1E de 40 puntos de E/S.

### ■ Unidad CP1L de 14 puntos E/S

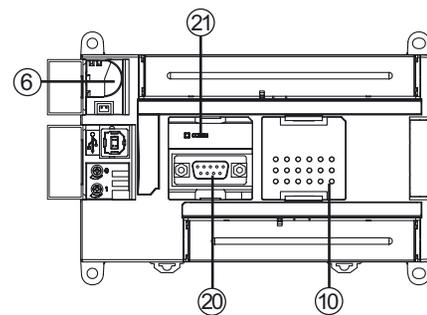


### ■ Unidad CP1E de 40 puntos E/S

Unidad CPU tipo E  
CP1E-E40DR-A



Unidad CPU tipo N  
CP1E-N40DR-□-□

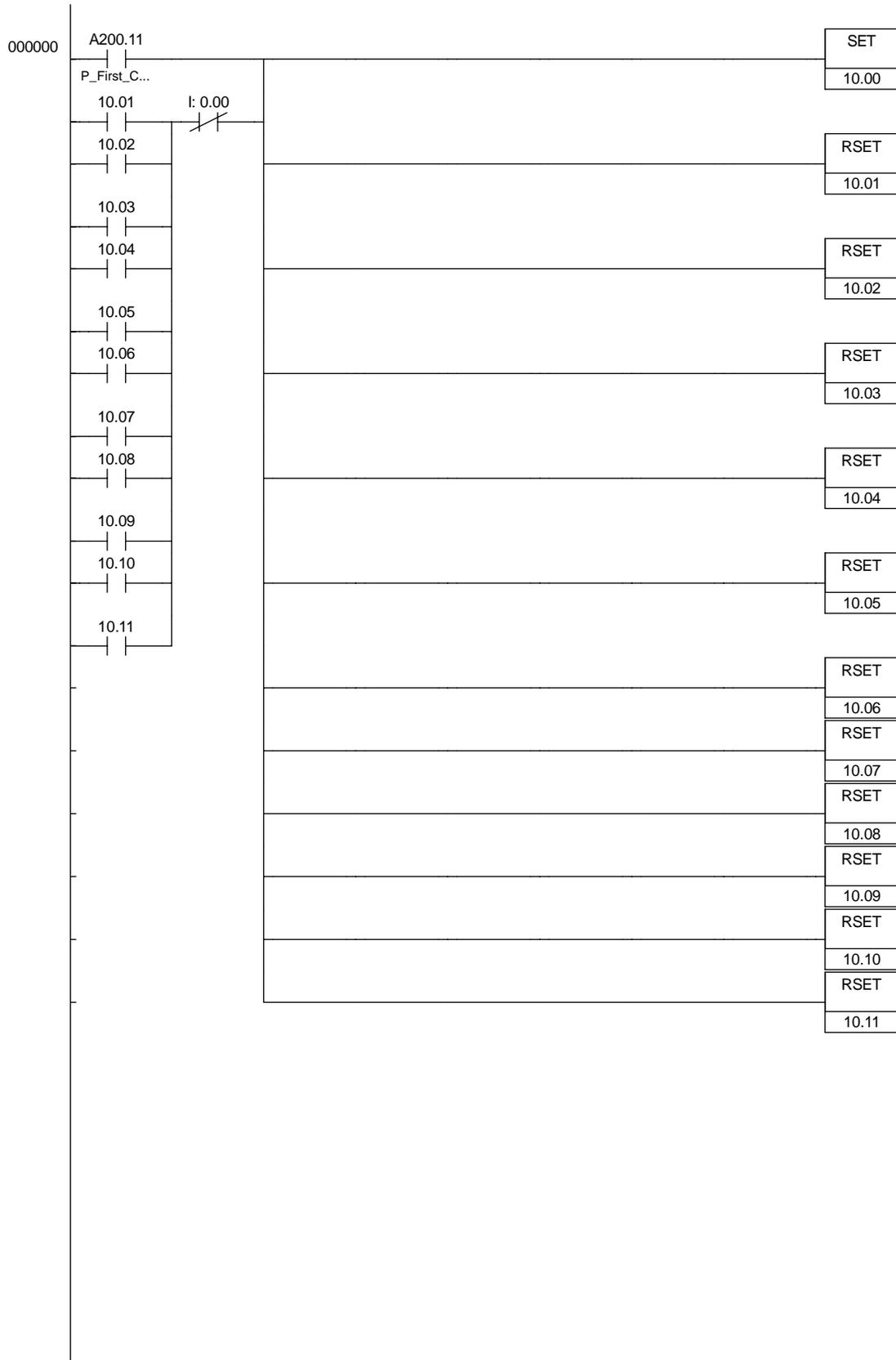


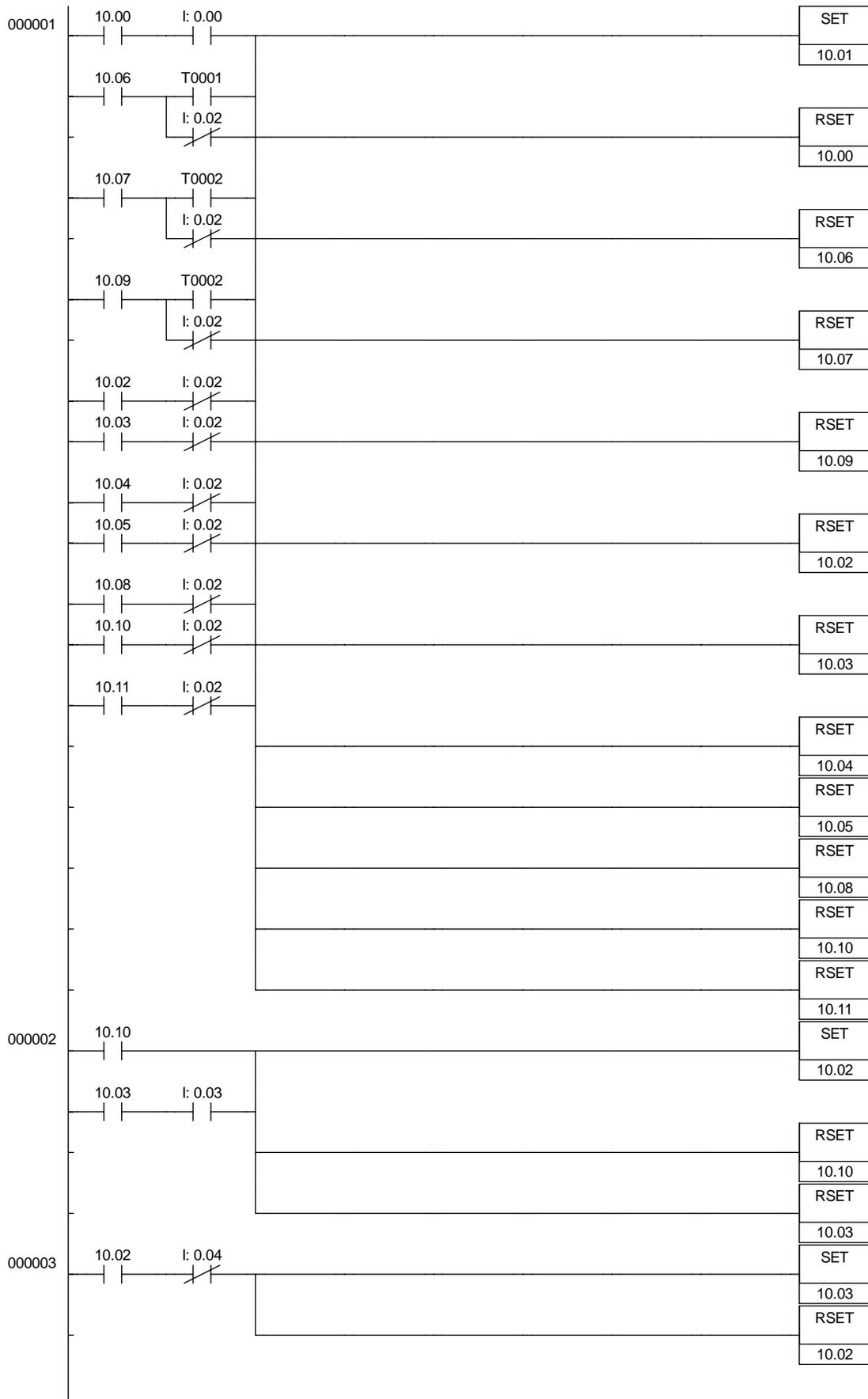
- (1) Ranura del cassette de memoria (sólo CP1L)  
Se utiliza para la inserción de un cassette de memoria (15). Estos cassettes pueden emplearse para guardar copias de seguridad de los programas, los parámetros y la memoria de datos del CP1L. Asimismo, permiten copiar datos a otras unidades CP1L sin necesidad de utilizar una herramienta de programación (software).
- (2) Puerto USB de periféricos  
Se utiliza para establecer una conexión a un ordenador. Los ordenadores pueden emplearse para la programación y monitorización.

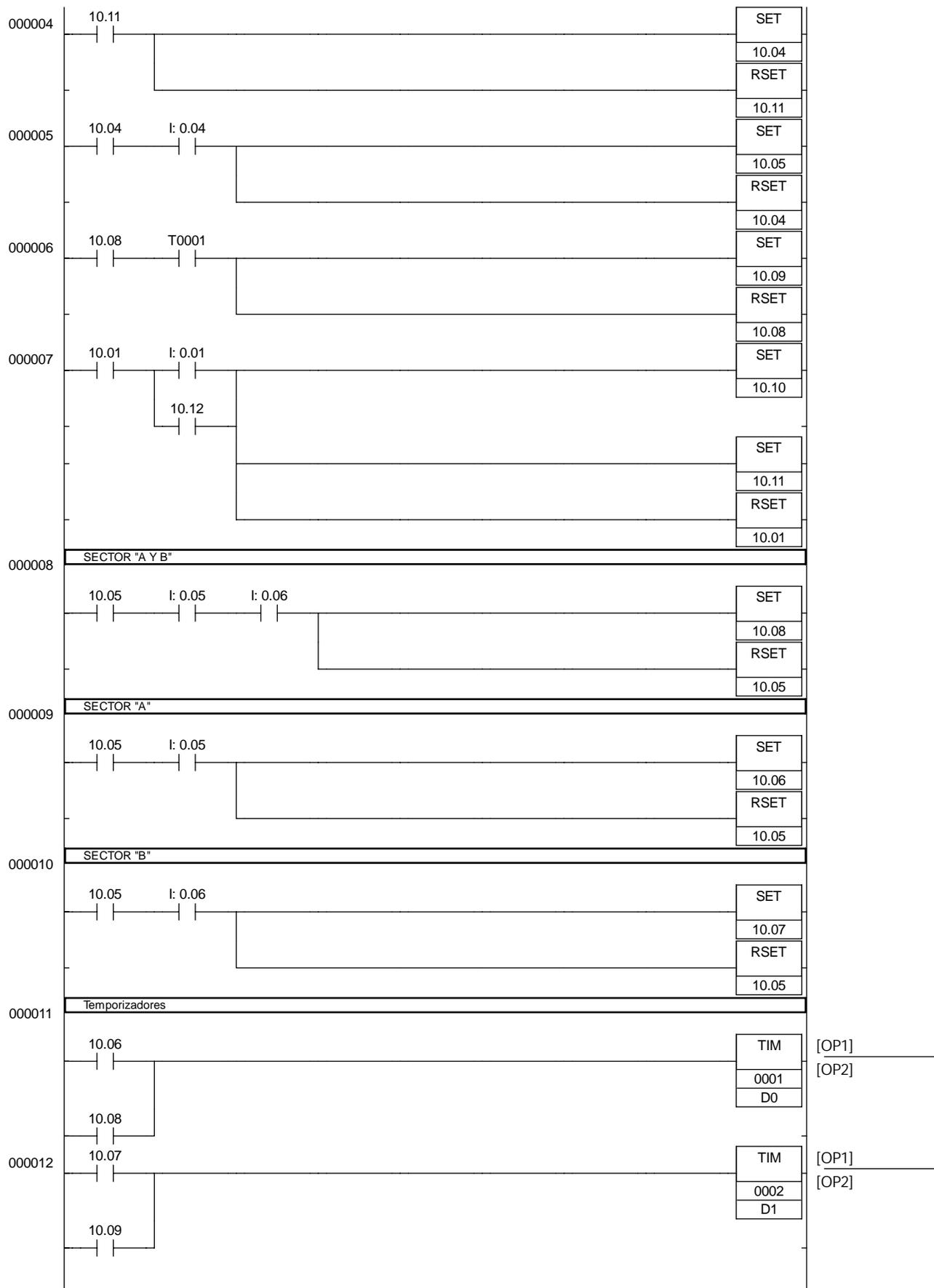
- (3) Potenciómetro analógico  
Gire el switch rotativo para ajustar el valor del área auxiliar A642CH (CP1E: A642CH/A643CH) en cualquier valor del rango 0 a 255. Se emplea para cambiar los ajustes del temporizador y del contador sin necesidad de utilizar una herramienta de programación (software).
- (4) Conector de configuración de la entrada analógica externa (sólo CP1L)  
Toma una entrada externa de entre 0 y 10 V, y cambia el valor del área auxiliar A643CH a un valor entre 0 y 256. Esta entrada no está aislada.
- (5) Interruptores DIP (sólo CP1L)  
Se emplea para configurar opciones tales como permisos de escritura en la memoria del usuario, transferencias automáticas desde cassettes de memoria y utilización de tool bus para programación.  
Consulte información detallada en la sección *2-1 Denominaciones y funciones de los componentes* del *Manual de usuario de la CPU CP1L Serie CP (W462)*.
- (6) Batería (sólo CP1L y CP1E tipo N)  
Alimenta el reloj interno y mantiene el contenido de la RAM cuando la fuente de alimentación está desconectada.
- (7) Indicadores de funcionamiento  
Indican el estado de funcionamiento de la unidad CP1L. Entre los estados indicados se incluyen el de alimentación, modo de operación, errores y comunicaciones del puerto USB de periféricos.
- (8) Bloque de terminales de fuente de alimentación, puesta a tierra y entradas  
Se emplea para conectar las líneas de fuente de alimentación eléctrica, conexión a tierra y entradas.
- (9) Indicadores de entrada  
Se ilumina cuando el contacto del terminal de la entrada correspondiente está en ON.
- (10) Ranura de módulo opcional  
Se emplea para instalar un módulo opcional RS-232C (16) ó RS-422A/485 (17).
  - Unidades CPU CP1L  
Las unidades de 14 y 20 puntos de E/S pueden tener instalado un módulo opcional de comunicaciones serie. Las unidades de 30, 40 y 60 puntos de E/S pueden tener instalados hasta dos módulos opcionales de comunicaciones serie.
  - Unidades CPU CP1E  
Las unidades de 30 y 40 puntos de E/S pueden tener instalado un módulo opcional de comunicaciones serie. Las unidades de 20 puntos de E/S no tienen ranura.
- (11) Conector de unidad de E/S de expansión  
Se emplea para conectar las unidades de E/S de expansión de la Serie-CP.
  - Unidades CPU CP1L

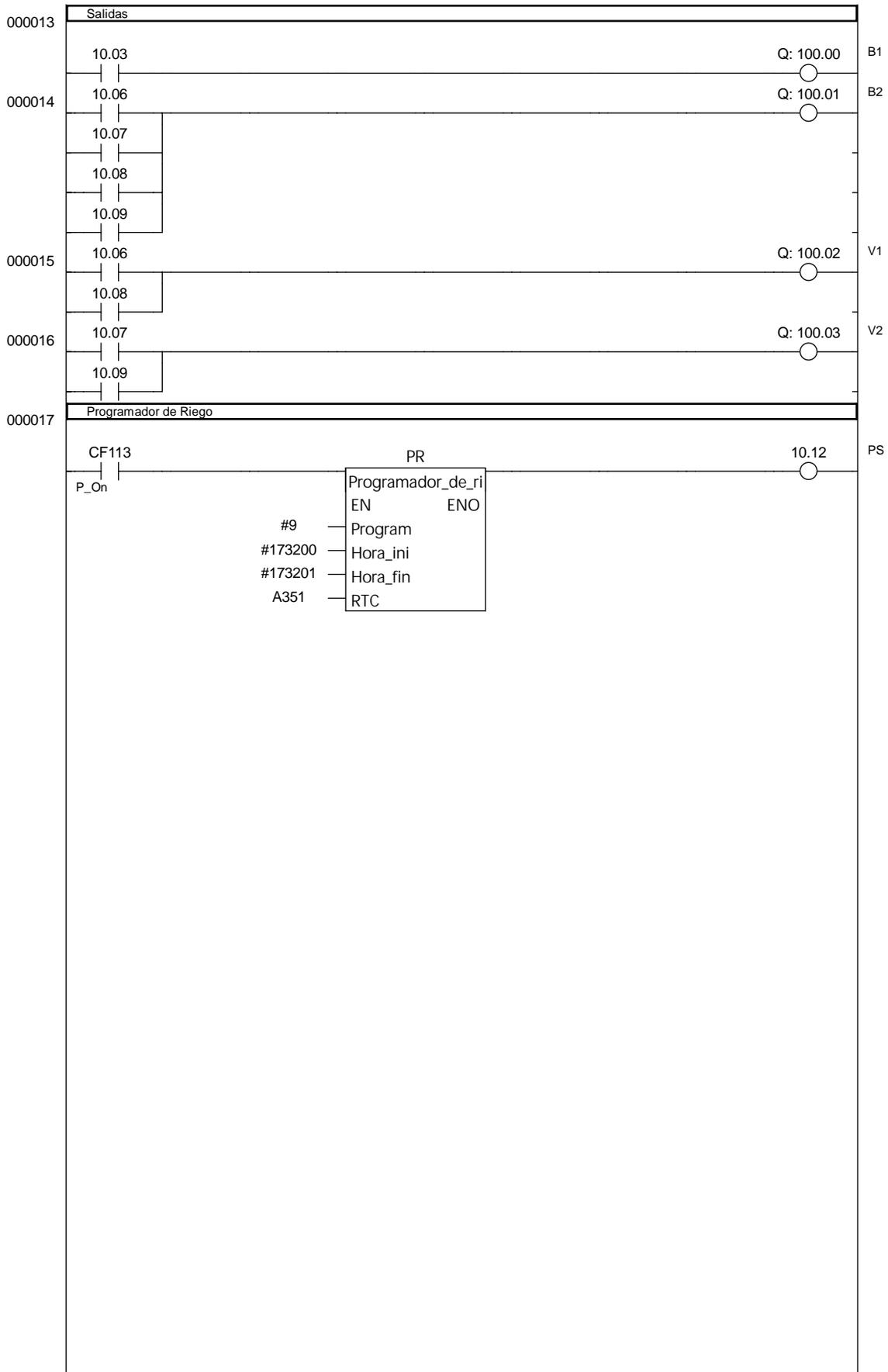
# ANEXO C: DIAGRAMA ESCALERA PARA EL CONTROL DE RIEGO

Fuente: Generado según proyecto por CX-Programmer (2020)









# **USO DE SISTEMA SCADA**

**1. INSTALACIÓN**

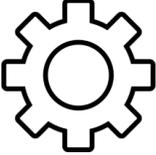
**2. CONFIGURACIÓN**

**3. USO**



## PRECAUCIONES Y RECOMENDACIONES DE SEGURIDAD

Lea atentamente las precauciones y recomendaciones de seguridad para garantizar un uso correcto tanto del sistema SCADA como del Tablero de Control que lo complementa.

 <p>No encienda el dispositivo cuando su uso esté prohibido, suponga algún tipo de peligro.</p>	 <p>No intente desmontar el Tablero de control o sus accesorios. El mantenimiento del mismo solo podrá ser realizado por personal cualificado.</p>
 <p>Cumpla la normativa sobre el uso del tablero de control y el sistema SCADA.</p>	 <p>No permita que los niños utilicen el dispositivo tanto el Tablero de Control como el sistema SCADA.</p>
 <p>Utilice sólo dispositivos aprobados de reemplazo. Esto para evitar cualquier mal funcionamiento.</p>	 <p>Tome en cuenta que el equipo interno (Autómata Programable) tiene un reloj interno que permite el funcionamiento del reloj. Su reemplazo debe ser considerado cada 4 años aproximadamente</p>

### ANTES DE INSTALAR

CX-Supervisor opera en los siguientes sistemas operativos y hardware:

#### Requerimientos de Hardware

La siguiente configuración son los requisitos mínimos del sistema para ejecutar CX-Supervisor:

- Procesador Pentium II de 600 MHz compatible con PC de IBM o superior.
- 512Mbytes de RAM mínimo.
- 650Mbyte de espacio disponible en el disco duro.
- Pantalla XGA de 1024 x 768.

Se requiere una unidad de CD ROM para instalar el software CX-Supervisor.

**Nota:** La siguiente configuración es el entorno recomendado, pero podría ser superior, para ejecutar CX-Supervisor de manera efectiva:

- Procesador Pentium II de 1.0 GHz compatible con PC de IBM
- 1Gbyte de RAM.
- 650Mbyte de espacio disponible en el disco duro.
- Pantalla XGA de 1024 x 768.

#### Sistemas operativos y entornos

Los sistemas operativos en los que se debe ejecutar este software son:

- Microsoft Windows XP Professional (SP2 o superior)
- Microsoft Windows Vista (32 bits y 64 bits)
- Microsoft Windows7 (32 bits y 64 bits)
- Microsoft Windows10 (32 bits y 64 bits)

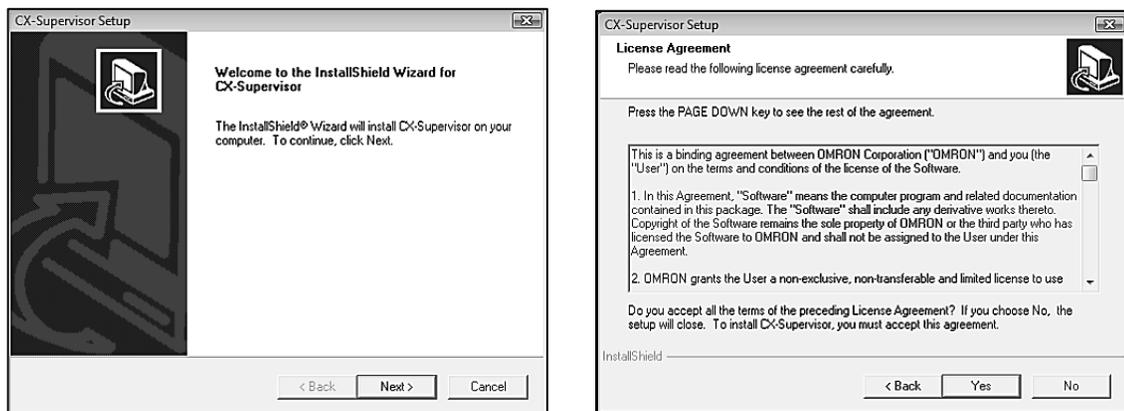
**Nota:** Este producto no se instala ni ejecuta en Windows NT, Windows ME, Windows95, Windows 98 o Windows2000

**Nota:** No se garantiza que CX-Supervisor sea compatible con computadoras que ejecutan Emulación de Windows (por ejemplo, Apple Macintosh o VMWare).

## 1. INSTALACIÓN

### Instalación de CX-Supervisor

El software CX-Supervisor se suministra en CD-ROM y se instala fácilmente desde Windows. Para instalar CX-Supervisor, cargue el disco en la unidad de CD-ROM. Inicie automáticamente el programa de instalación y la instalación de CX-Supervisor no debería demorar más de unos minutos. Si se ha deshabilitado, consulte el archivo README.TXT en el CD-ROM para obtener instrucciones.



Después de la instalación, el archivo de texto README.HTML en el directorio CX-Supervisor contiene información actualizada sobre el software. Lea este archivo para obtener detalles sobre cualquier cambio o nuevas características en CX-Supervisor realizadas desde que se produjo este manual.

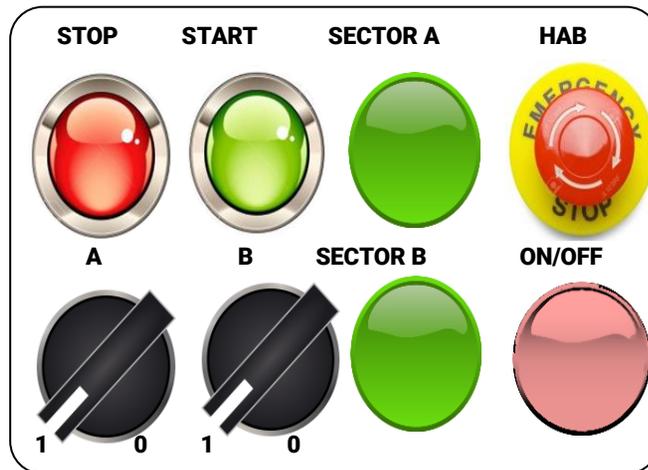
### Ejecución del Sistema SCADA

install.bat	5/7/2020 18:44	Archivo por lotes ...	1 KB
readme.txt	5/7/2020 18:44	Documento de tex...	1 KB
Setup.CDM	5/7/2020 18:44	Archivo CDM	31 KB
Setup.REC	5/7/2020 18:44	REC Video File (VL...	1 KB
Setup.SR2	5/7/2020 18:44	CX-Supervisor.Ap...	610 KB
SETUP.UEL	5/7/2020 18:45	Archivo UEL	2 KB

Una vez instalado el software de Cx-Supervisor, ya se puede ejecutar el Sistema SCADA creado. Para ello, la captura anterior muestra los archivos mínimos generados para ejecutar el mismo. El archivo a ejecutar se denomina como **Setup.SR2**. Este contiene todo el programa y se encuentra listo para su ejecución.

## 2. CONFIGURACIÓN

La configuración está presente en el Tablero de Control y es reconocido por el Sistema SCADA. Los **selectores A, B** y la **parada de emergencia**, son los dispositivos de configurados por defecto.



**Nota:** Los selectores y la parada de emergencia reciben la configuración especificada por temas de seguridad y de importancia.

La disposición de los selectores según la configuración, se corresponde de la siguiente forma:

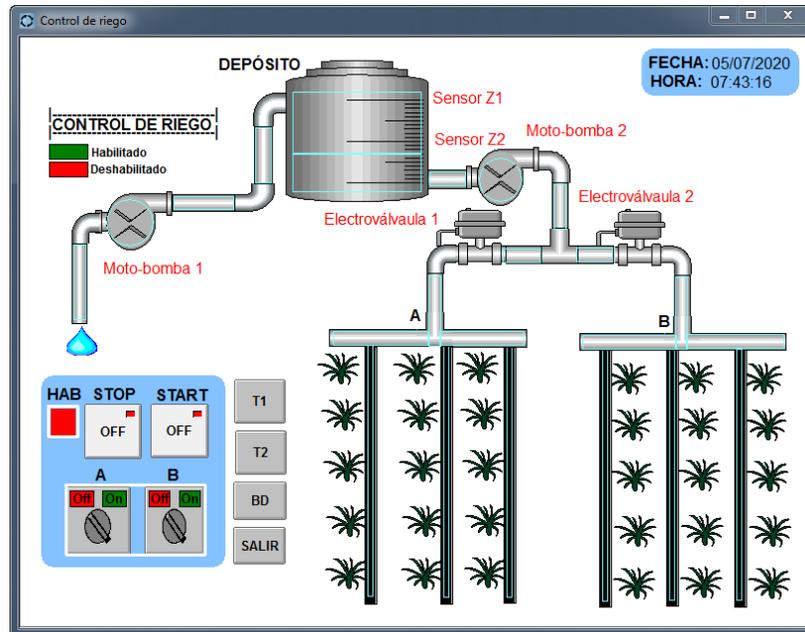
Selector A	Selector B	Descripción
1	0	Solo se ejecuta el riego programado, al sector A, según el tiempo requerido.
0	1	Solo se ejecuta el riego al sector B, según el tiempo requerido.
1	1	Si ambos Sectores están configurados para su ejecución, se procederá de manera correlativa.

El Sistema SCADA tiene la característica de ejecutar el selector tanto A como B. Sin embargo, esta ejecución será solo por una vez, volviendo a un rearme con prioridad que se le asigna a la configuración manual.

**Nota:** El HAB nunca será ejecutado de manera remota por el SCADA, pero el STOP sí. Esto por temas de seguridad.

### 3. USO

El sistema SCADA una vez instalado, puede ser ejecutado desde un equipo de computación cercano o remoto. Por lo mismo, este puede ser visualizado tanto en un monitor como en un HMI (Interfaz Hombre-Máquina) que son pantallas táctiles usadas para este propósito en específico.



#### Descripción de operatividad del Sistema SCADA

##### Sobre la notificación

- Se tiene principalmente como elemento de notificación el color mismo de Sistema SCADA. Donde, el color **ROJO** representa inactividad y el color **VERDE** la ejecución.
- Las bombas y las tuberías tienen una animación según su operatividad y/o estado. Es decir, que estos están animados según la acción que se está realizando.

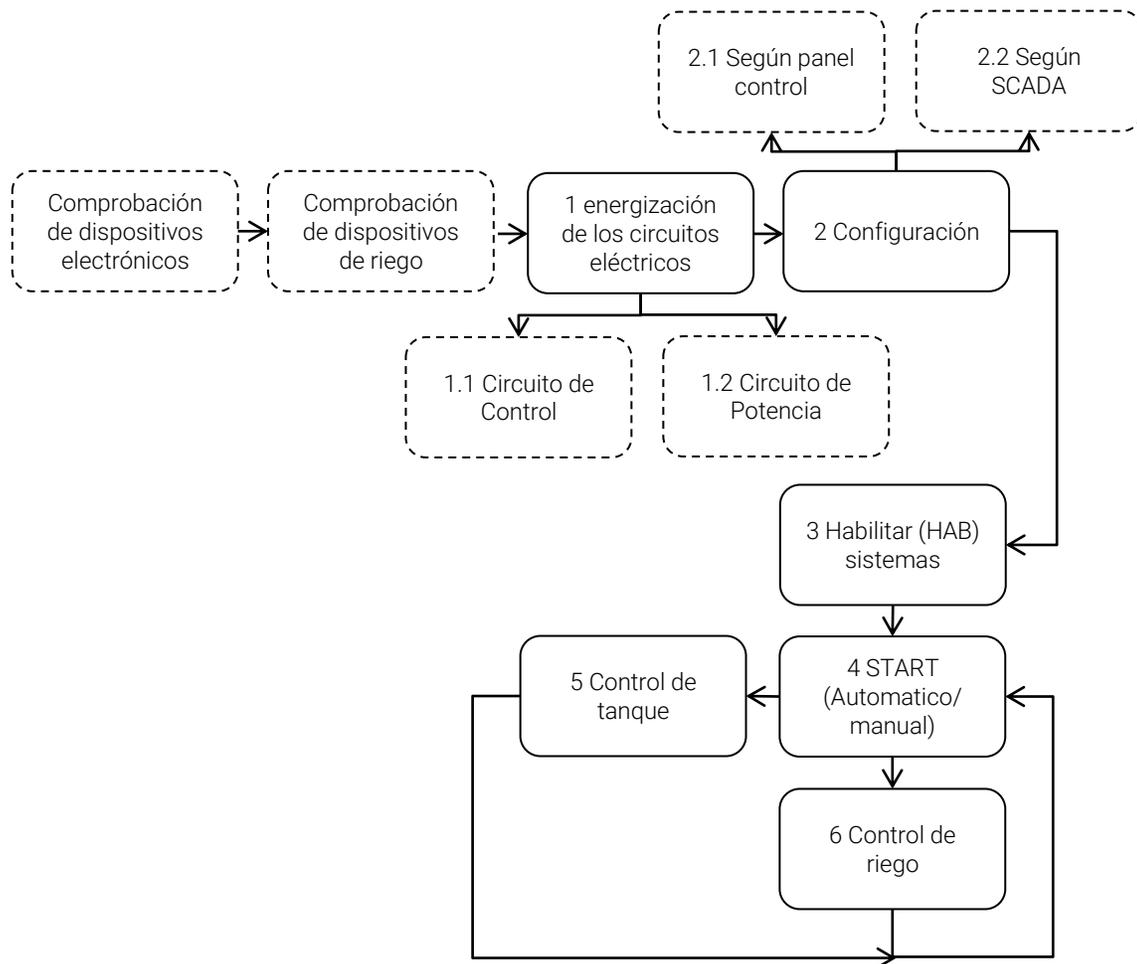
##### Sobre la operatividad

- **HAB**, notifica si el sistema ya se encuentra habilitado y en espera de la ejecución.
- **STOP**, inicia en un estado de Normalmente Cerrado (NC) y detiene el circuito de riego en cualquier momento, si se activa.
- **START** es el iniciador por default. Esta consigna hace que ambos subprocesos se inicialicen.

- **A o B**, estas consignas de selección están dispuestas para configurar el sector de riego una vez este se encuentre inicializado (START).
- **T1 ó T2** son las opciones de configuración de tiempo de riego. El operación tiene la opción de seleccionar el tiempo de riego según el tipo de plantación que se este cultivando.
- **BD**, el reporte es presentado en un reporte Access una vez presionado esta opción. El mismo se actualiza según según el subproceso de riego, capturando: Sector de riego, tiempo de riego y fecha de riego entre otros.
- **Salir**, esta opción permite cerrar el SCADA, sin embargo, en sistemas HMI esta opción podría ser inhabilitada por motivos de que no se requiera esta operación.

### Sobre la secuencia de operatividad

La secuencia de operatividad sugerida se presenta de la siguiente forma:



En cuanto al control del tanque (5), este tiene la característica de ser automático desde su primera ejecución. Por otro lado, el control del riego (6) tiene dos funcionalidades tanto manual como automático.