



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica

DISEÑO DE UNA RED INDUSTRIAL PARA INYECTORAS DE PLÁSTICO

Carlos Estuardo Mazariegos Orellana

Asesorado por el Ing. MsEE. PhD. Enrique Edmundo Ruiz Carballo

Guatemala, enero de 2010

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DISEÑO DE UNA RED INDUSTRIAL
PARA INYECTORAS DE PLÁSTICO**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR:

CARLOS ESTUARDO MAZARIEGOS ORELLANA

ASESORADO POR EL ING. MSEE. PHD. ENRIQUE EDMUNDO RUIZ
CARBALLO

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE
INGENIERO ELECTRÓNICO

GUATEMALA, ENERO DE 2010

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL I	Inga. Glenda Patricia García Soria
VOCAL II	Inga. Alba Maritza Guerrero de López
VOCAL III	Ing. Miguel Ángel Dávila Calderón
VOCAL IV	Br. José Milton De León Bran
VOCAL V	Br. Isaac Sultán Mejía
SECRETARIA	Inga. Marcia Ivonne Véliz Vargas

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Guillermo Antonio Puente Romero
EXAMINADOR	Ing. Francisco Javier González López
EXAMINADOR	Ing. Luis Manuel Ramírez Ramírez
SECRETARIA	Inga. Marcia Ivonne Véliz Vargas

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

Cumpliendo con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

DISEÑO DE UNA RED INDUSTRIAL PARA INYECTORAS DE PLÁSTICO,

tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, con fecha 13 de julio de 2007.


Carlos Estuardo Mazariegos Orellana

Guatemala 14 de Noviembre de 2009

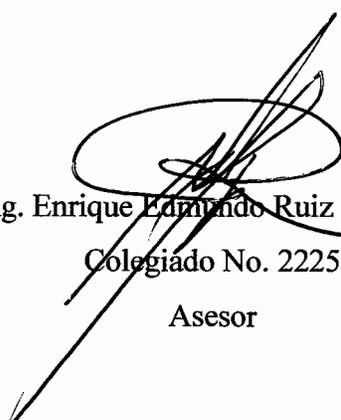
Ingeniero
Julio César Solares Peñate
Coordinador de Área de Electrónica
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica
Universidad de San Carlos de Guatemala
Presente.

Estimado Ingeniero Solares:

Por este medio hago de su conocimiento que habiendo asesorado el trabajo de graduación del estudiante Carlos Estuardo Mazariegos Orellana titulado: “Diseño de una red industrial para inyectoras de plástico”, considero que el mismo cumple con los objetivos propuestos para su desarrollo y con los requisitos establecidos.

Por lo tanto, el autor de este trabajo y yo como asesor, nos hacemos responsables del contenido y conclusiones del mismo.

Sin otro particular, me suscribo atentamente,


Ing. Enrique Armando Ruiz Carballo
Colegiado No. 2225
Asesor





FACULTAD DE INGENIERIA

Escuelas de Ingeniería Civil, Ingeniería Mecánica Industrial, Ingeniería Química, Ingeniería Mecánica Eléctrica, Técnica y Regional de Post-grado de Ingeniería Sanitaria.

Ciudad Universitaria, zona 12
Guatemala, Centroamérica

Guatemala, 20 de noviembre de 2009

Señor Director
Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica
Facultad de Ingeniería, USAC.

Señor Director:

Por este medio me permito dar aprobación al Trabajo de Graduación titulado: **"DISEÑO DE UNA RED INDUSTRIAL PARA INYECTORAS DE PLÁSTICO"**, desarrollado por el estudiante **Carlos Estuardo Mazariegos Orellana**, ya que considero que cumple con los requisitos establecidos.

Sin otro particular, aprovecho la oportunidad para saludarlo.

Atentamente,

ID Y ENSEÑAD A TODOS

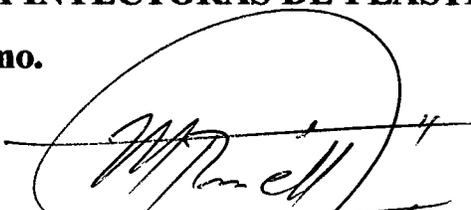

Ing. Julio César Solares Peñate
Coordinador de Electrónica





REF. EIME 78. 2009.

El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, después de conocer el dictamen del Asesor, con el Visto Bueno del Coordinador de Área, al trabajo de Graduación del estudiante; Carlos Estuardo Mazariegos Orellana titulado: “DISEÑO DE UNA RED INDUSTRIAL PARA INYECTORAS DE PLÁSTICO”, procede a la autorización del mismo.


Ing. Mario Renato Escobedo Martínez



GUATEMALA, 26 DE NOVIEMBRE 2,009.



El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, al trabajo de graduación titulado: **DISEÑO DE UNA RED INDUSTRIAL PARA INYECTORAS DE PLÁSTICO**, presentado por el estudiante universitario **Carlos Estuardo Mazariegos Orellana**, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE

Ing. Murphy Olimpo Paiz Recinos
Decano

Guatemala, enero 2010



AGRADECIMIENTOS A:

Dios, fuente de toda sabiduría, por sus gracias y bendiciones.

Mis padres, por su ejemplo, apoyo y motivación a lo largo del camino de mi vida como estudiante.

Mi hermana, por su apoyo incondicional.

Mis compañeros de estudio (de cursos profesionales, área común y colegio), por los gratos momentos compartidos durante muchos años.

Mis abuelos y tío abuelo (Q.E.P.D) por su ejemplo de valores y servicio a los demás.

Mis tíos, tías, primos y primas, por su afecto y cariño.

Mis amigos en general.

El Ing. Ricardo Cordón y al Ing. Enrique Ruiz, por su significativa ayuda durante el desarrollo de este trabajo de graduación.

Mis profesores, por sus consejos y dedicación.

La Universidad de San Carlos de Guatemala, por su labor como casa de estudio y por su dedicación a la enseñanza superior en el país.

DEDICATORIA

“Necesitamos más libertad que independencia
más formación que información
más creatividad que producción en serie
y más cualidades que cantidades.

Necesitamos más autenticidad que aceptación
más opciones que programaciones
y más instantes que eternidades.

Necesitamos más de nuestra humanidad vulnerable,
que de todas las artificiales seguridades.”

Dr. Jorge Carvajal

Dedico este trabajo a la juventud guatemalteca, futuro de nuestro país,
para que juntos construyamos un país digno y próspero.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	V
GLOSARIO	IX
RESUMEN	XV
OBJETIVOS	XVII
INTRODUCCIÓN	XIX
1. INYECTORAS DE PLÁSTICO	1
1.1. El plástico	2
1.1.1. Definición	2
1.1.2. Ventajas	3
1.1.3. Clasificación	4
1.1.4. Plásticos comunes	5
1.1.5. Procesos de moldeo	6
1.1.5.1. Procesos primarios	7
1.1.5.2. Procesos secundarios	12
1.2. Máquina de Moldeo por Inyección (MMI)	13
1.2.1. Moldeo por inyección	13
1.2.2. Partes de una MMI	16
1.2.3. Ciclo de trabajo	19
1.2.4. Presión, volumen y temperatura	20
1.2.5. Defectos de moldeo	23
1.2.6. Clasificación de las MMI	24

2. SCADA	25
2.1. Definición	26
2.2. Objetivos	28
2.3. Prestaciones	30
2.4. Ventajas	31
2.5. El entorno	33
2.6. Arquitectura	35
2.6.1. Hardware	37
2.6.1.1. Interfaz hombre-máquina (HMI)	38
2.6.1.2. Unidad terminal maestra (MTU)	39
2.6.1.3. Unidad terminal remota (RTU) y elementos de campo	41
2.6.1.4. Sistema de comunicaciones	44
2.6.2. Software	50
2.6.2.1. Comunicación entre aplicaciones	53
2.6.2.2. Almacenamiento de datos	60
3. REDES INDUSTRIALES	67
3.1. Fundamentos	68
3.1.1. Terminología y conceptos básicos	71
3.1.2. Modelo OSI	72
3.2. Protocolos y estándares industriales de comunicación	75
3.2.1. Estándar de interfaz EIA-232	77
3.2.2. Estándar de interfaz EIA-485	79
3.2.3. Modbus	81
3.2.4. Modbus Plus	82
3.2.5. DeviceNet	84
3.2.6. Profibus	85
3.2.7. Foundation Fielbus	88
3.2.8. Ethernet Industrial	89

4. DISEÑO DE UNA RED INDUSTRIAL	91
4.1. Rendimiento de un protocolo de comunicación de datos industrial en una red Ethernet	91
4.1.1. Comunicación Modbus	92
4.1.2. Ethernet y Modbus TCP/IP	94
4.1.3. Protocolo CSMA p -Persistente y Predictivo	95
4.1.4. Metodología para prueba de rendimiento	100
4.1.5. Medición de latencia	101
4.2. Uso de algoritmos genéticos en el diseño de red	107
4.2.1. Diseño de red	107
4.2.1.1. Problema del diseño de red	107
4.2.1.2. Problema de partición de grafos	109
4.2.1.3. Criterio de optimización	111
4.2.2. Algoritmos genéticos	112
4.2.2.1. Representación de hipótesis	114
4.2.2.2. Operadores genéticos	115
4.2.2.3. Función idoneidad y selección	116
4.2.3. Optimización de la topología mediante algoritmos genéticos	117
4.2.3.1. Resultados experimentales	121
CONCLUSIONES	125
RECOMENDACIONES	127
REFERENCIAS	129
BIBLIOGRAFÍA	131

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Codificación de los termoplásticos	6
2.	Etapas clave del procesamiento de plástico	6
3.	Proceso de inyección	7
4.	Proceso de extrusión	8
5.	Proceso de soplado	9
6.	Proceso de calandrado	10
7.	Proceso de moldeo por vacío	10
8.	Proceso de compresión	11
9.	Proceso de rotomoldeo	12
10.	Proceso de elaboración de productos de plástico	13
11.	Comparación del crecimiento de productos y árboles	14
12.	Máquina de inyección genérica	18
13.	Ciclo de moldeo (Presión vs. Tiempo)	20
14.	Líneas genéricas isobáricas	21
15.	Pirámide de la automatización CIM	34
16.	Estructura básica de un sistema de supervisión y mando	36
17.	Arquitectura básica de hardware de un sistema SCADA	37
18.	Sistema HMI/SCADA (<i>LabView, National Instruments</i>)	39
19.	Jerarquía de elementos básicos de hardware	40
20.	Arquitectura general de una RTU	44
21.	Idea básica de un sistema SCADA	46
22.	Topologías básicas	47
23.	Seguridad en redes SCADA	49

24.	Concepto de driver o controlador	51
25.	Representación del modelo OSI	73
26.	Estructura básica de una trama de información	76
27.	Enlace de comunicación de datos serial típico	78
28.	Red típica para EIA-485	80
29.	Formato de mensaje de Modbus	81
30.	Red típica para Modbus Plus	83
31.	Múltiples redes Modbus Plus interconectadas	83
32.	DeviceNet y el modelo OSI	84
33.	Arquitectura típica de un sistema ProfiBus	85
34.	Topología en Estrella 100BaseTX	90
35.	Capacidad del canal para CSMA p -Persistente	97
36.	Tiempo de retraso aleatorio	98
37.	Capacidad del canal para CSMA p -Persistente y Predictivo	99
38.	Análisis de tiempo para prueba de loop-back	101
39.	Configuración del 1er experimento	102
40.	Configuración del 2do experimento	102
41.	Configuración del 3er experimento	102
42.	Configuración de latencia para el 1er experimento	103
43.	Configuración de latencia para el 2do experimento	103
44.	Configuración de latencia para el 3er experimento	104
45.	Resultado del 1er experimento	104
46.	Resultado del 2do experimento	105
47.	Resultado del 3er experimento	105
48.	Topología jerárquica de dos niveles	107
49.	Ejemplo de distribución de dispositivos	108
50.	Operadores genéticos	116
51.	Partición de grafos y la representación de su solución genética	118
52.	Operador cruce de dos puntos con reparación	119

53.	Operador mutación por intercambio de bits	119
54.	Matriz de tráfico	121
55.	Repartición de dispositivos obtenidos mediante AG	122
56.	Tiempo de retardo punto a punto	124

TABLAS

I.	Tipos de termoplásticos	5
II.	Defectos comunes de moldeo	23
III.	El Modelo OSI y los cortafuegos	50
IV.	Sistemas aplicados a negocios vs. plantas de producción	69
V.	Ejemplo de representación de atributos	115
VI.	Ejemplo de definición de una regla	115
VII.	Distribución de los subgrupos	123
VIII.	Carga en los enlaces (Kbps)	123
IX.	Carga en los switches (Kbps)	124

GLOSARIO

Polimerización	Proceso químico en el cual varios monómeros (moléculas de pequeña masa molecular) se agrupan entre sí para formar moléculas de gran peso llamadas polímeros.
Capacidad calorífica	Razón de la cantidad de energía calorífica transferida a un cuerpo. Indica el grado de dificultad que presenta un cuerpo para experimentar cambios de temperatura bajo el suministro de calor. Depende de la cantidad de masa del cuerpo. No debe confundirse con la capacidad calorífica específica de una sustancia la cual indica la capacidad de un material para almacenar energía interna en forma de calor y se define como la razón de la capacidad calorífica entre la masa del objeto.
Calor latente de fusión	Energía absorbida por las sustancias al cambiar de un estado sólido a un estado líquido.
Curvas isobáricas	Curvas que representan una presión constante.
Sistema abierto	Sistema que proporciona los medios para poder funcionar correctamente con otros sistemas que operen bajo las mismas especificaciones del mismo, siendo éstas especificaciones de dominio público.

Modelo OSI	Modelo de referencia de Interconexión de Sistemas Abiertos (<i>Open System Interconnection</i>). Es un modelo de red descriptivo creado por la Organización Internacional para la Estandarización (ISO) con propósitos educativos.
ISO	ISO no es un acrónimo; proviene del griego <i>iso</i> , que significa igual. Es una organización internacional no gubernamental cuya función principal es buscar la estandarización de normas de productos y seguridad para las empresas u organizaciones a nivel internacional.
Ethernet	Estándar IEEE 802.3. Tecnología de redes de computadoras de área local (LAN) basada en tramas de datos. Define las características a nivel físico y a nivel de enlace de datos en una red.
Fieldbus	Estándar para la comunicación de buses de campo industriales y control distribuido en tiempo real. Es independiente de cualquier fabricante, cuenta con varios perfiles y se adapta a las condiciones de las aplicaciones de automatización industrial.
Router o ruteador	Dispositivo de hardware para interconexión de red de computadoras que opera en la capa tres (nivel de red) del modelo OSI. Este dispositivo permite asegurar el enrutamiento de paquetes entre redes o determinar la ruta que debe tomar el paquete de datos.

Switch o conmutador	Dispositivo digital de lógica de interconexión de redes de computadores que opera en la capa 2 (nivel de enlace de datos) del modelo OSI. Su función es interconectar dos o más segmentos de red pasando datos de un segmento a otro de acuerdo con la dirección MAC de destino de las tramas en la red.
Token	En telecomunicaciones <i>token passing</i> se refiere a un método de acceso de canal, en donde una señal llamada <i>token</i> es pasada a través de varios nodos para dar autorización a cada nodo a usar los recursos de la red. En este esquema, solamente quien tenga el <i>token</i> puede comunicarse. Posee las ventajas de evitar colisiones y aprovechar el ancho de banda. La desventaja es que cada nodo que desee comunicarse deberá esperar por el <i>token</i> .
PDU	Información enviada como una unidad entre unidades parejas que contiene información de datos o control. Es el acrónimo de <i>Protocol Data Unit</i> .
Peer to peer	La red de pares es una red en la que todos o algunos participantes funcionan sin clientes ni servidores fijos, sino una serie de nodos que se comportan como iguales entre sí y actúan simultáneamente como clientes y servidores respecto a los demás nodos de la red.
TCP/IP	Conjunto de protocolos de red en la que se basa Internet y que permiten la transmisión de datos entre redes de computadoras.

MAC	Acrónimo de <i>Media Access Control</i> . Es el conjunto de mecanismos y protocolos mediante los cuales varios dispositivos en una red se coordinan entre sí para compartir un medio de transmisión común.
CSMA	Acrónimo de <i>Carrier Sense Multiple Access</i> o Acceso Múltiple por Detección de Portadora. Protocolo mediante el cual un nodo verifica la ausencia de tráfico en un canal compartido antes de iniciar su transmisión.
Cadenas de Markov	Herramienta para analizar el comportamiento y el gobierno de determinados tipos de procesos estocásticos, es decir, procesos que evolucionan de forma no determinista a lo largo del tiempo en torno a un conjunto de estados.
Loopback	Forma de conexión en la cual un puerto de salida de un dispositivo se conecta a un puerto de entrada del mismo dispositivo.
Grafo	Representación abstracta de un conjunto de objetos conectados por medio de enlaces. Un grafo $G = (V, E)$ es un par ordenado donde V es un conjunto de vértices o nodos, y E es un conjunto de arcos o aristas, que relacionan estos nodos.
Circuito VLSI	Acrónimo de <i>Very Large Scale Integration</i> . Proceso de integración en escala muy grande, mediante el cual se crean circuitos integrados combinando miles de transistores en un solo chip.

Problema NP completo

En la teoría de complejidad computacional, un problema NP completo cumple con la propiedad de que para cualquier solución dada, es posible verificar en tiempo polinómico si dicha solución es válida para el problema. La característica más notable es que no existe ninguna solución rápida conocida para este tipo de problemas. *NP* se refiere a tiempo polinómico no determinista (por sus siglas en inglés).

RESUMEN

El propósito del presente trabajo es proporcionar un diseño óptimo de un sistema de red industrial, aplicado a inyectoras de plástico, considerando las principales necesidades de este tipo de redes.

Se describen las máquinas de moldeo por inyección y el proceso de moldeo incluyendo el procedimiento o pasos necesarios para elaborar el producto final, identificando así las variables y elementos esenciales en dicho proceso.

Los sistemas de adquisición de datos y control son descritos. Se identifican los componentes que conforman dicho sistema y se analiza en forma detallada.

Además se exponen los fundamentos y modelos propios de las redes industriales, así como los protocolos de comunicación industriales disponibles actualmente y el entorno de aplicación de cada uno.

Finalmente, tomando en cuenta las características propias de los sistemas descritos previamente y en base a modelos de tráfico aplicables a dichos sistemas, se sugieren algunas consideraciones de diseño y el uso de métodos heurísticos para el diseño final de la red.

OBJETIVOS

General

Analizar las características propias de las redes industriales y proponer un método de diseño funcional para este tipo de redes. Se busca proporcionar conocimientos y herramientas para el diseño de redes industriales a estudiantes y profesionales.

Específicos:

1. Comparar el rendimiento de distintos tipos de topologías de redes industriales.
2. Analizar el rendimiento de distintos protocolos de acceso al medio para ambientes industriales.
3. Plantear el diseño de una topología de red como un problema combinatorio de partición de grafos.
4. Describir el empleo de un algoritmo heurístico para encontrar la mejor solución en el diseño de una red, utilizando un modelo de tráfico característico de una red industrial.

INTRODUCCIÓN

Los nuevos requerimientos en redes industriales tales como flexibilidad, escalabilidad y tecnologías basadas en TCP/IP hacen posible hacer uso de Ethernet a un nivel de control en este tipo de redes. Hoy en día los dispositivos industriales tales como controladores, sensores y actuadores incluyen cada vez más interfaces Ethernet. Ethernet fue desarrollado principalmente para redes de información orientadas a oficina, sin embargo se está convirtiendo en una tecnología dominante para redes de control interconectando los dispositivos industriales a un nivel de instrumentación más bajo.

Las redes industriales poseen la característica de ser intrínsecamente no deterministas, además de no proveer garantía alguna para asegurar un retraso predefinido en la transmisión. Debido a esto muchos estudios se centran en la mejora de Ethernet para cumplir con los requerimientos necesarios por aplicaciones críticas de tiempo real en ambientes industriales.

Entre los protocolos de comunicación de datos industriales más utilizados se encuentra Modbus TCP/IP. Mediante su uso muchos de los problemas de automatización pueden ser resueltos. Para analizar el rendimiento de un protocolo de comunicación de datos industrial es necesario compararlo con otros protocolos y probarlo en diferentes topologías. Un cuidadoso análisis de la infraestructura, protocolos y tráfico puede dar lugar a un mayor rendimiento y confiabilidad en una red.

Para optimizar la organización de una red industrial se busca encontrar la mejor distribución de los dispositivos industriales en una arquitectura Ethernet.

Para lograr una topología eficiente, el diseño de la red se plantea como un problema combinatorio de partición de grafos. Con el fin de encontrar la mejor solución y en base a modelos de tráfico correspondientes a escenarios de comunicación industrial, se propone el uso de métodos heurísticos, específicamente de algoritmos genéticos.

1. INYECTORAS DE PLÁSTICO

En los últimos años a nivel mundial se ha incrementado la demanda de productos cuya materia prima es el plástico. Este fenómeno ha tomado cada vez mayor fuerza, muchos productos que eran fabricados de otras materias primas en la actualidad son fabricados de plástico, debido a su mejor comportamiento y costo; dentro de las múltiples formas de transformación de esta materia prima en productos útiles para el hombre una de las más representativas es la inyección de termoplásticos.

Cuando se aplica calor a un material termoplástico para fundirlo se dice que se plastifica. El material ya fundido o plastificado por calor puede hacerse fluir mediante presión y llenar un molde donde el material se solidifica y toma la forma del molde. A este proceso se le nombra moldeo por inyección.

Cada vez más el mercado exige piezas con diseños atractivos, precisión y resistencia. Con el fin de lograr un producto final que cumpla estas exigencias, es necesario tener un amplio conocimiento de elementos tales como el proceso de inyección, la materia prima y la maquinaria utilizada.

1.1. El plástico

1.1.1. Definición

El término plástico se refiere a las sustancias de distintas estructuras y naturalezas que carecen de un punto fijo de ebullición y poseen durante un intervalo de temperaturas propiedades de elasticidad y flexibilidad que permiten moldearlas y adaptarlas a diferentes formas y aplicaciones. Se refiere a ciertos tipos de materiales sintéticos obtenidos mediante fenómenos de polimerización.

La palabra plástico se usó originalmente como adjetivo para denotar un cierto grado de movilidad y facilidad para adquirir cierta forma. De hecho, el término se refiere a un estado del material y no al material en sí.

Los plásticos son un gran grupo de materiales orgánicos compuestos por una mezcla de varios ingredientes; el carbono es el elemento principal y está combinado con otros ingredientes como el hidrógeno, el oxígeno y el nitrógeno los cuales aparecen en menor proporción.

En su estado final el plástico es sólido pero durante su manufactura se consigue que sea lo suficientemente suave para poder ser moldeado mediante calor y/o presión.

La industria de plástico inició su desarrollo cuando el plástico se comenzó a utilizar para reemplazar otros materiales y hacer imitaciones de madera, metal, cerámica y vidrio. Actualmente la industria de los plásticos es una de las más importantes y próspera de todo el mundo. Su producción se incrementa a razón de 10% al año.

1.1.2. Ventajas

Entre las propiedades favorables que ofrecen los plásticos en relación a otros materiales se encuentran:

- **Ligereza.** Son poco pesados y de baja densidad.
- **Elasticidad.** Soportan esfuerzos sin fractura, y recobran su forma original y dimensiones cuando la fuerza es removida.
- **Resistencia a la fatiga.** Soportan esfuerzos mecánicos y regresan a su posición original.
- **Bajo coeficiente de fricción.** No se calientan mucho ante la fricción.
- **Aislamiento térmico.** Como la conductividad térmica de los plásticos no es buena, éstos pueden ser utilizados para envases o mangos de utensilios que trabajan a altas temperaturas.
- **Resistencia a la corrosión.** Soportan ácidos débiles y soluciones saladas.
- **Bajo costo.** Son muy económicos. Considerablemente más barato que el metal.
- **Facilidad de fabricación.**
- **Absorción de la vibración y el sonido.**
- **Reciclables.**

1.1.3. Clasificación

Según su comportamiento frente al calor, los plásticos pueden clasificarse de la siguiente manera:

- **Termoplásticos.** Materiales que al ser calentados pueden ser moldeados y al enfriarse se endurecen adoptando la forma del molde. Al ser recalentados tienen la capacidad de poder ser moldeados nuevamente.
- **Termoestables.** Conocidos también como termorrígidos. Son materiales que, al igual que los termoplásticos, pueden ser moldeados al calentarse y se solidifican al enfriarse. La diferencia radica en que al recalentarse éstos no pueden ser moldeados nuevamente.

1.1.4. Plásticos comunes

Entre los termoplásticos comúnmente utilizados se encuentran los siguientes:

Tabla I. Tipos de termoplásticos

Nombre	Abreviatura	Usos comunes
Polipropileno	PP	Recipientes de comida, electrodomésticos y defensas de los automóviles.
Poliestireno	PS	Embalajes de espuma, recipientes de comida, platos, vasos y cubiertos desechables, cajas para CD.
Politereftalato de etileno	PET	Botellas de bebidas carbonatadas, jarras, películas plásticas, envasados.
Polietileno de baja densidad	PE-BD / PE-LD	Bolsas, envasado de alimentos y productos industriales, tuberías para riego.
Polietileno de alta densidad	PE-AD / PE-HD	Envases para detergentes, pintura y aceites, tuberías para telefonía, gas y agua.
Policloruro de vinilo	PVC	Envases, marcos de ventanas, tuberías, cables, juguetes, calzados.
Acrilonitrilo butadieno estireno	ABS	Estuches para equipo electrónico (monitores, impresoras, teclados).
Policarbonato	PC	Lentes, CD, DVD, cristales antibalas, escudos antidisturbios.
Poliamida	PA	Lana y seda (poliamidas naturales), nylon y kevlar (poliamidas sintéticas).
Polimetilmetacrilato	PMMA	Industria del automóvil, iluminación, cosméticos, construcción, óptica, prótesis óseas y dentales.

Debido a que existe una gran variedad de plásticos, para clasificarlos se utiliza un sistema de codificación en el cual los productos llevan una marca que consiste en el símbolo internacional de reciclado con el código correspondiente en medio según el material específico.

Figura 1. Codificación de los termoplásticos

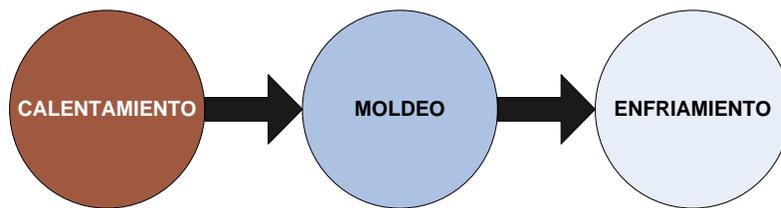


1.1.5. Procesos de moldeo

El moldeo de los plásticos consiste en dar la forma y medida deseada a un polímero. A partir del tipo de polímero utilizado y de acuerdo con el tipo de artículo que se desea confeccionar se emplean distintos procedimientos.

Básicamente el procesamiento de plásticos involucra 3 etapas claves las cuales se resumen como *Calentamiento*, *Moldeo* y *Enfriamiento*.

Figura 2. Etapas clave del procesamiento de plástico



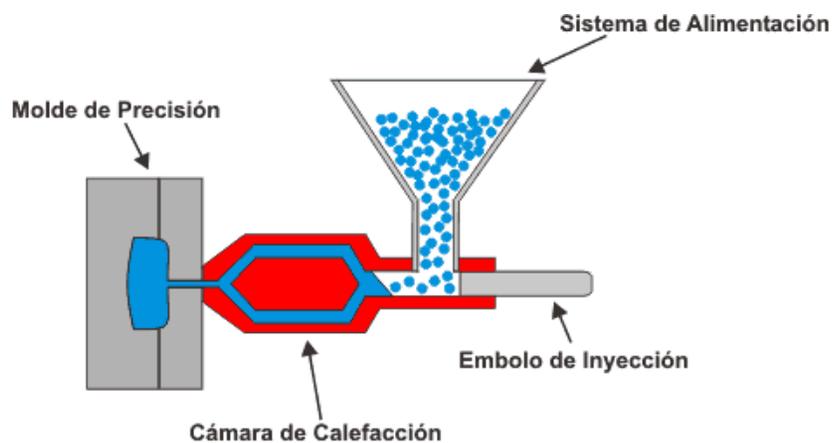
Tanto los termoplásticos como los termoestables tienen distintos procesos de moldeo. Durante los distintos procesos existentes de transformación el material puede cambiar de estado dentro de la maquinaria.

1.1.5.1. Procesos primarios

El plástico es moldeado a través de un proceso térmico donde el material pasa por el estado líquido y finalmente se solidifica. Dentro de este grupo se encuentran los siguientes procesos:

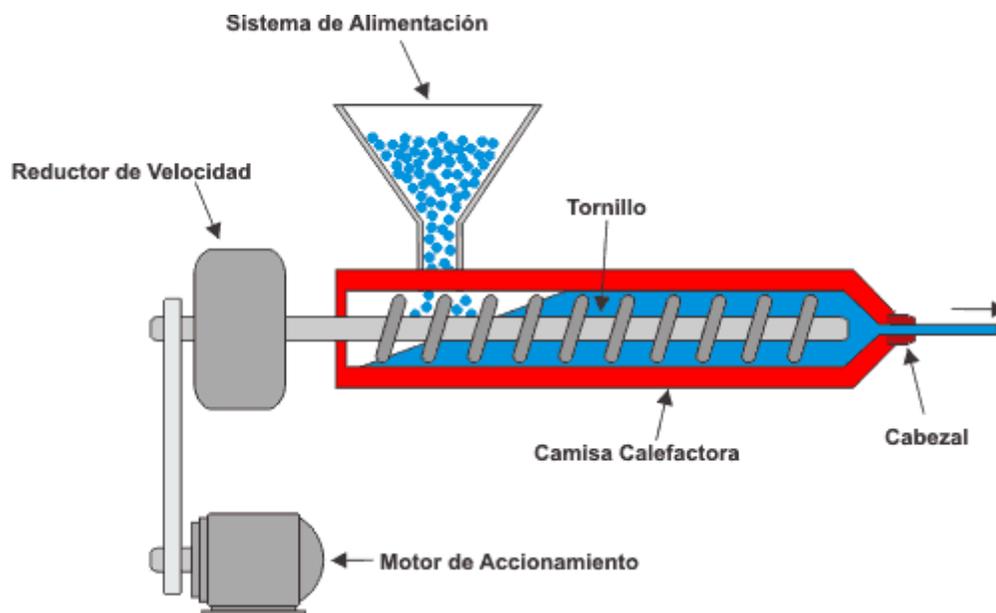
- **Inyección.** El moldeo por inyección consiste en un sistema de mezclado y fusión de una resina plástica, diseñado para expulsarla a alta presión una vez que se encuentre fundida, hacia un molde metálico en cuya cavidad o cavidades se encuentra la forma de la pieza deseada. Este molde permanece cerrado por el sistema de alta presión de la máquina que evita que se abra al recibir el plástico fundido. Una vez lleno el molde, transcurre un lapso de tiempo para enfriar la pieza. Cuando la pieza está lista es expulsada del molde. Mediante este procedimiento se fabrican palanganas, cubos, carcasas, componentes del automóvil, etc.

Figura 3. Proceso de inyección



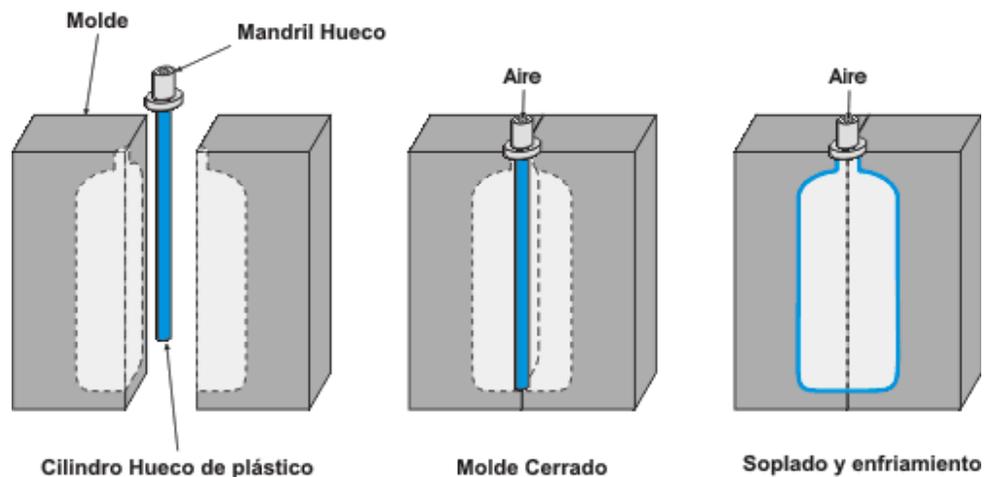
- **Extrusión.** Consiste en moldear productos de manera continua, ya que el polímero (gránulos sólidos) es empujado por un tornillo helicoidal a través de un cilindro que acaba en una boquilla, lo que produce una tira de longitud indefinida. Cambiando la forma de la boquilla se pueden obtener barras de distintos perfiles. Como la abertura de la boca de la matriz tiene la forma del producto que se desea obtener, el proceso es continuo. Posteriormente se corta en la medida adecuada. También se emplea este procedimiento para la fabricación de tuberías, inyectando aire a presión a través de un orificio en la punta del cabezal. Regulando la presión del aire se pueden conseguir tubos de distintos espesores.

Figura 4. Proceso de extrusión



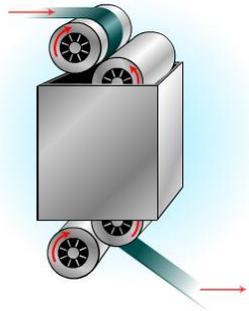
- **Soplado.** Es un proceso usado para hacer formas huecas (botellas, recipientes). Un cilindro plástico de paredes delgadas es extruido y luego cortado en el largo que se desea. Luego el cilindro se coloca en un molde que se cierra sobre el polímero ablandado y le suprime su parte inferior cortándola. Una corriente de aire o vapor se aplicada por el otro extremo y expande el material hasta llenar la cavidad, adaptándose así el plástico al molde. Finalmente el molde es enfriado para el fraguado. Se emplea para la fabricación de cúpulas, piezas huecas, etc.

Figura 5. Proceso de soplado



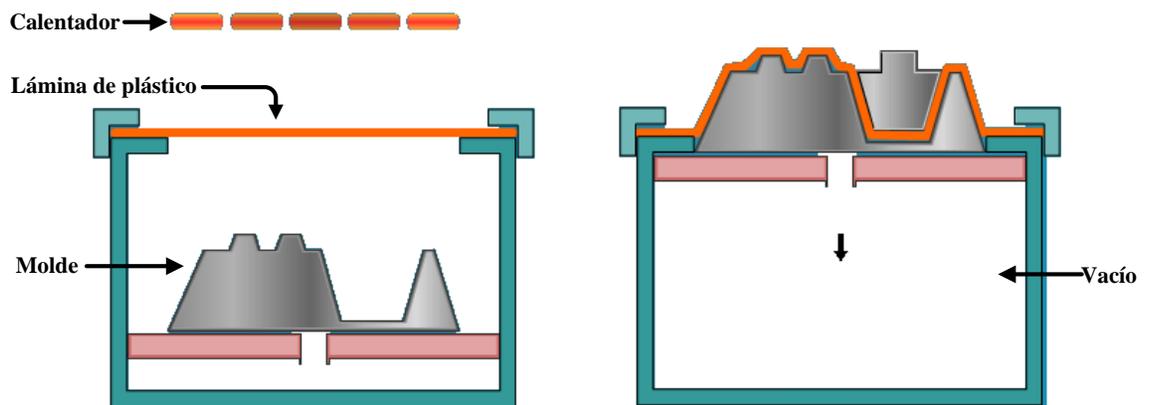
- **Calandrado.** El proceso se emplea para la fabricación de chapas y películas plásticas. Consiste en pasar un polímero convertido en una masa blanda entre una serie de rodillos calentados. A medida que el polímero pasa a través de los rodillos se forma un producto uniforme. El último par de rodillos se ajustan para dar el espesor deseado. El sistema de rodillos de enfriamiento da a las chapas o películas su estructura molecular permanente. Este método se utiliza para fabricar hules, impermeables o planchas de plástico de poco grosor.

Figura 6. Proceso de calandrado



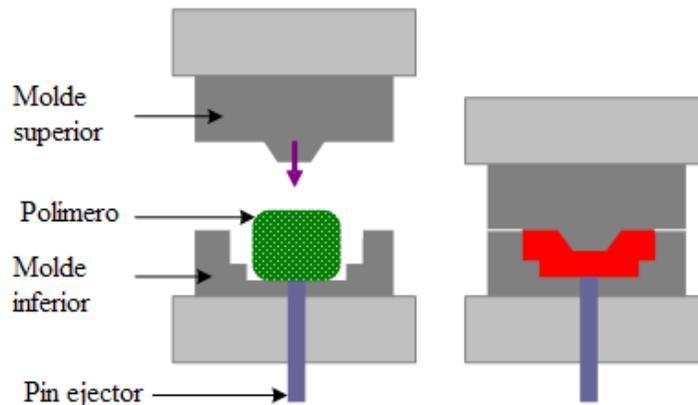
- **Moldeo por vacío.** Mediante este proceso se absorbe el aire que hay entre una lámina de plástico ablandada mediante calor y un molde frío. El polímero toma y conserva la forma del molde. Este tipo de moldeo se emplea para la obtención de envases de productos alimenticios que reproducen la forma de los objetos que han de contener.

Figura 7. Proceso de moldeo por vacío



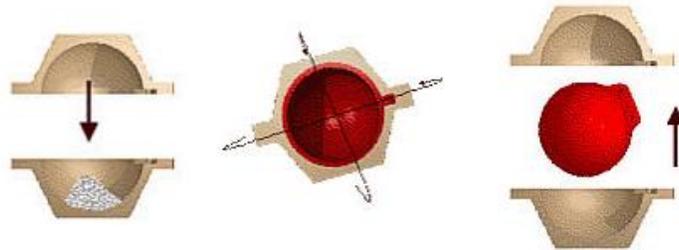
- **Compresión.** Se emplea para los polímeros termoestables, los cuales se endurecen permanentemente por medio de calentamiento y presión. En el moldeado por compresión, el material se coloca en un molde abierto. El plástico en polvo es calentado y comprimido entre las dos partes del molde mediante la acción de una prensa hidráulica; la presión requerida en este proceso es muy grande. Este proceso se usa para obtener pequeñas piezas de baquelita, como los mangos aislantes del calor de los recipientes y utensilios de cocina.

Figura 8. Proceso de compresión



- **Rotomoldeo.** Proceso de transformación de materiales plásticos en el que no existe presión. Una resina líquida o en polvo es introducida en la cavidad de un molde. Una vez cerrado, el molde es introducido en un horno donde comienza una lenta rotación biaxial. La transmisión térmica a través de las paredes del molde provoca la fusión y adhesión del material, produciendo una película de plástico fundido uniformemente repartida. Posteriormente, el molde es desplazado a la zona de enfriamiento para provocar la solidificación.

Figura 9. Proceso de rotomoldeo



1.1.5.2. Procesos secundarios

En estos procesos se utilizan medios mecánicos o neumáticos para formar el artículo final sin pasar por la fusión del plástico. Se pueden mencionar:

- Termoformado
- Doblado
- Corte
- Torneado
- Barrenado

En general, para que un material pase de su estado crudo al producto final, necesita pasar por una serie de pasos, los cuales se detallan a continuación:

Figura 10. Proceso de elaboración de productos de plástico



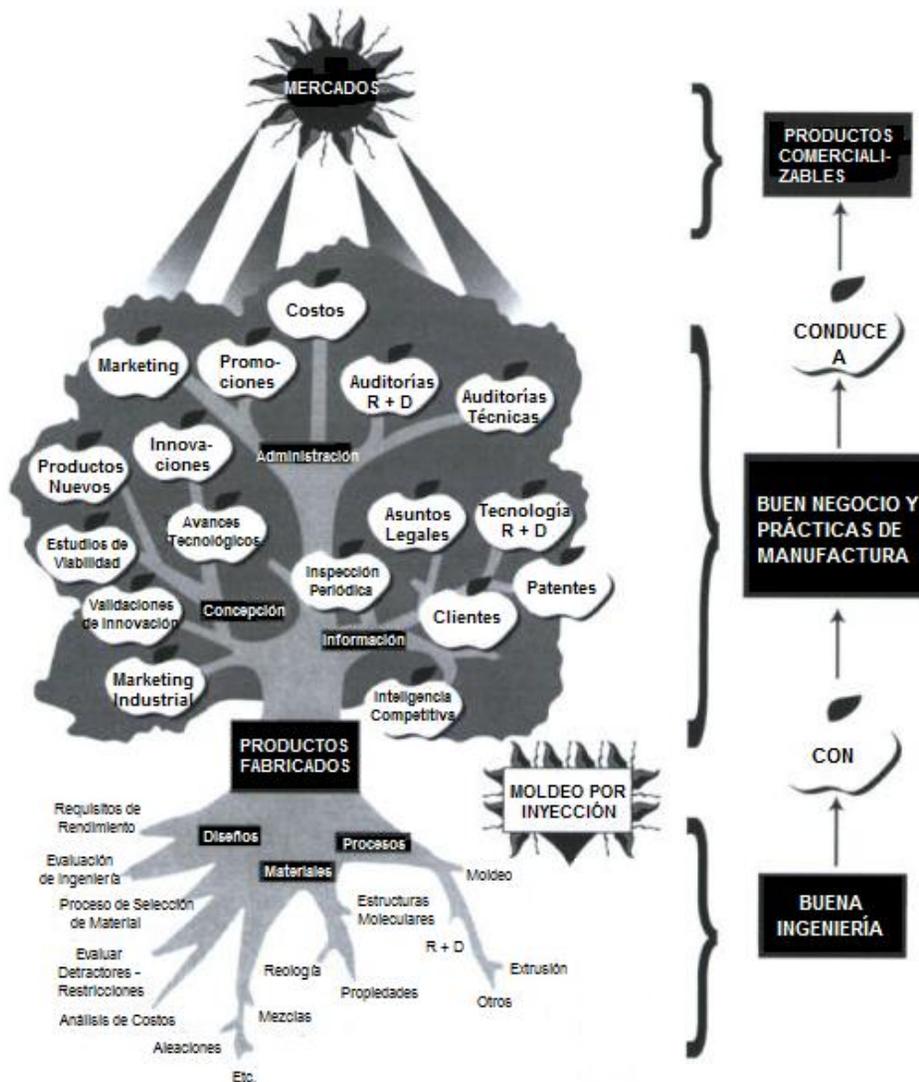
1.2. Máquina de Moldeo por Inyección (MMI)

1.2.1. Moldeo por inyección

A través de los años el moldeo por inyección se ha convertido en una técnica muy popular en la industria de plástico, consumiendo aproximadamente la tercera parte de todos los tipos de plástico. Es el segundo proceso de moldeo más utilizado después de la técnica de extrusión. La diferencia de entre ambas técnicas radica en que el moldeo por inyección puede producir artículos mucho más complejos que el moldeo por extrusión pero no es un proceso continuo. En la industria una máquina de moldeo por inyección (MMI) es básicamente una máquina de moldeo por extrusión discontinua.

El moldeo por inyección es un método de procesamiento de plástico importante. Para que el moldeo sea exitoso y rentable son necesarios varios elementos. La siguiente figura los resume.

Figura 11. Comparación del crecimiento de productos y árboles



El primero en comercializar un nuevo producto captura el 80% del mercado. Un árbol joven no puede crecer si se encuentra a la sombra de otro árbol o si no se mantiene al mismo nivel que la competencia. Es necesario mantenerse en la copa del árbol mirando sobre otros árboles. [1]

Factores como una buena ingeniería y un buen control de procesos son importantes al igual que el área de mercadeo y ventas. Son indispensables todos y cada uno de los elementos mostrados en el árbol para lograr un éxito comercial. Ya que el moldeo forma parte de estos elementos, es necesaria una buena comprensión del proceso de moldeo y la maquinaria utilizada para maximizar el rendimiento y minimizar los costos de producción al mismo tiempo que se cumplen con los requerimientos de diseño, todo esto haciéndolo de una manera simple.

El moldeo por inyección es un proceso semi-continuo de manufactura que consiste en inyectar a alta presión un polímero granulado (ya sea termoplástico o termoestable) el cual, absorbiendo suficiente calor para facilitar su viscosidad, entra en un molde metálico cerrado a presión y de baja temperatura. El material luego se cristaliza, adoptando la forma del molde. La pieza final se obtiene al abrir el molde y sacar de la cavidad la pieza moldeada.

Es un proceso ambientalmente más favorable comparado con la fabricación de otros productos como el papel, ya que no contamina el ambiente de forma directa, no emite gases ni desechos acuosos y tiene bajos niveles de ruido. Sin embargo, no todos los plásticos pueden ser reciclados y algunos susceptibles de ser reciclados son depositados en el ambiente, causando daños a la ecología.

La popularidad de este método se explica con la versatilidad de piezas que pueden fabricarse, la rapidez de fabricación, los altos niveles de producción y bajos costos y las geometrías muy complicadas que serían imposibles por otras técnicas. Los productos fabricados utilizando esta técnica van desde los bloques interconectables LEGO y otros tipos de juguetes hasta componentes para automóviles, aviones y naves espaciales.

1.2.2. Partes de una MMI

La MMI tiene tres componentes básicos: la unidad de inyección, el molde y la unidad de sujeción.

- **Unidad de inyección.** Su función principal es fundir, mezclar e inyectar el plástico transferirlo al siguiente componente (el molde) haciendo uso de husillos. Las características de los husillos varían de acuerdo al tipo de polímero que se desee fundir.

Las tres condiciones termodinámicas que se deben tomar en cuenta son:

- La temperatura de procesamiento del polímero.
- La capacidad calorífica del polímero C [cal/ °C].
- El calor latente de fusión [cal/g].

El proceso de fusión involucra un incremento en el calor del polímero, que resulta del aumento de temperatura y de la fricción entre el barril y el husillo. La fricción y esfuerzos cortantes son básicos para una fusión eficiente, dado que los polímeros no son buenos conductores de calor. Un incremento en temperatura disminuye la viscosidad del polímero fundido; lo mismo sucede al incrementar la velocidad de corte. Por ello ambos parámetros deben ser ajustados durante el proceso. El esfuerzo mecánico, de corte y la compresión añaden calor al sistema y funden el polímero más eficientemente que si hubiera únicamente calor.

- **Molde.** El molde es la donde se genera la pieza; para producir un producto diferente simplemente se cambia el molde, al ser una pieza intercambiable que se atornilla en la unidad de cierre.

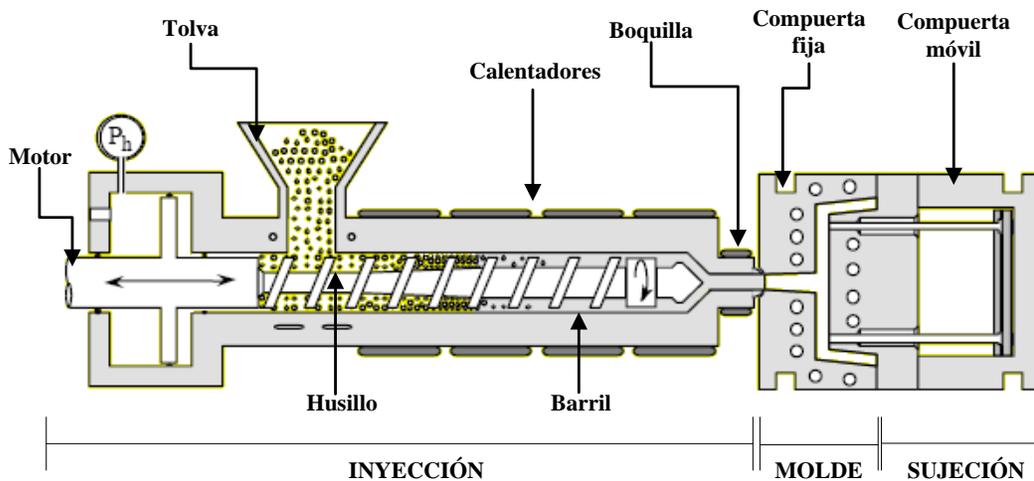
Un molde está formado por las siguientes partes:

- **Cavidad:** Es el volumen en el cual la pieza será moldeada.
- **Canales o ductos:** Son conductos a través de los cuales el polímero fundido fluye debido a la presión de inyección. El canal de alimentación se llena a través de la *boquilla*, los siguientes canales son los denominados *bebederos* y finalmente se encuentra la *compuerta*.
- **Canales de enfriamiento:** Son canales por los cuales circula refrigerante (e.g., agua) para regular la temperatura del molde. La refrigeración debe ser lo más homogénea posible en toda la cavidad para evitar los defectos en la pieza final; por esto su diseño es complejo y específico para cada pieza y molde.
- **Barras expulsoras:** Barras que expulsan la pieza moldeada fuera de la cavidad al abrir el molde; es posible contar con ayuda externa al sistema (humanos o robots) para realizar esta operación.

Un molde es muy caro por diversas razones. Se requieren amplios conocimientos del funcionamiento del mismo para su diseño. Además, el material utilizado para su fabricación es costoso porque se utilizan aleaciones para evitar deformaciones por el calor y frío y para retardar la oxidación y el desgaste prematuro.

- Unidad de sujeción.** Conocida también como *unidad de cierre*. Es la unidad encargada de abrir y cerrar el molde. Es una prensa hidráulica o mecánica, con una fuerza de cierre muy grande que contrarresta la fuerza ejercida por el polímero fundido al ser inyectado en el molde. Las fuerzas localizadas pueden generar presiones del orden de cientos de MPa, que sólo se encuentran en el planeta de forma natural únicamente en los puntos más profundos del océano. Si la fuerza de cierre es insuficiente, el material escapará por la unión del molde, causando así que el molde tienda a abrirse y que en la pieza final ocurran desperfectos.

Figura 12. Máquina de inyección genérica

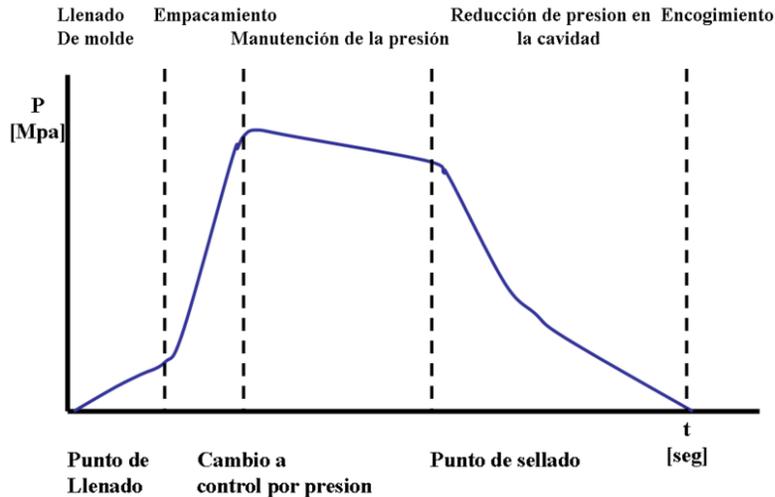


1.2.3. Ciclo de trabajo

En el ciclo de moldeo se distinguen los siguientes pasos principales:

- **Plastificación:** Se calienta y derrite el plástico dentro de la unidad de inyección.
- **Inyección:** Un volumen controlado de plástico es empujado a alta presión dentro del molde cerrado. La solidificación del material empieza en las paredes de la cavidad del molde.
- **Mantenimiento de la presión:** El material inyectado se mantiene bajo presión por un tiempo determinado para prevenir que el material regrese hacia la unidad de inyección y para compensar la disminución del volumen del material durante la solidificación.
- **Enfriamiento:** El material termoplástico dentro del molde se enfría (en el caso de un material termoestable se calienta) hasta que es lo suficientemente rígido para poder ser expulsado. Al enfriarse, las partes inyectadas se contraen, siendo su volumen menor que el de la cavidad. Este tiempo es el más caro pues es largo e interrumpe el proceso continuo.
- **Expulsión:** Se abre el molde, se expulsa la pieza y se cierra nuevamente para prepararse para el próximo ciclo.

Figura 13. Ciclo de moldeo (Presión vs. Tiempo)



Este ciclo es más complicado que otros procesos (como el de extrusión) ya que requiere mover el polímero dentro del molde y detenerlo, en lugar de tener un flujo constante. No obstante, el proceso de moldeo por inyección es extremadamente útil ya que permite fabricar una gran variedad de productos de distintas formas y tamaños. Si se requiere, estos productos pueden ser moldeados bajo tolerancias muy pequeñas, pueden ser muy delgados y pesar solo una fracción de un gramo.

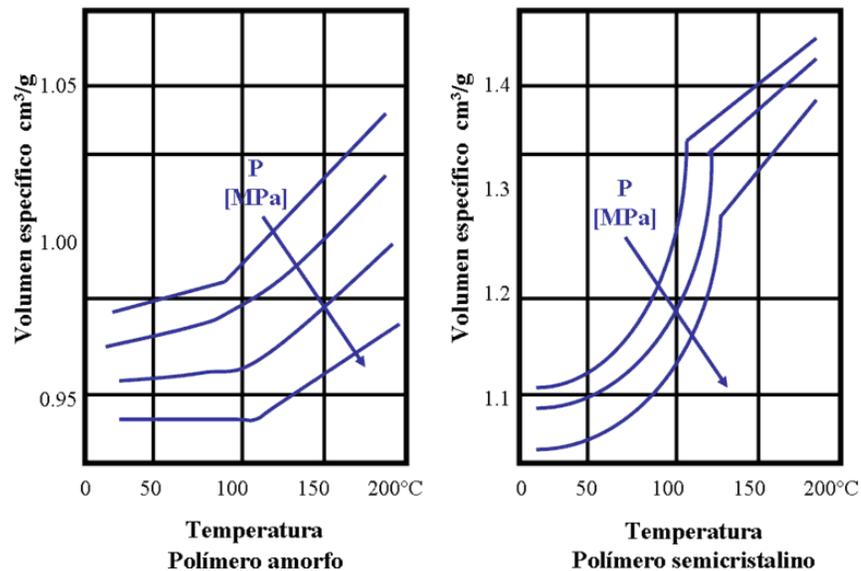
1.2.4. Presión, volumen y temperatura

Tanto en el moldeo por inyección como por extrusión se deben tomar en cuenta las relaciones de PVT (presión-volumen-temperatura), que ayudan a entender cómo se comporta un polímero al fundir.

Estos parámetros son importantes para obtener un proceso de inyección eficiente, ya que el volumen específico de un polímero aumenta al ascender la temperatura del mismo.

Las curvas isobáricas se utilizan para representar el comportamiento de los polímeros, el cual es diferente en el caso de los polímeros amorfos (aquellos con falta de regularidad en su estructura y que no pueden formar cristales) y los semicristalinos (aquellos que contienen dos regiones en su estado sólido: una amorfa y la otra cristalina).

Figura 14. Líneas genéricas isobáricas



Las relaciones de PVT se utilizan en ingeniería de polímeros para lograr un sistema técnico que, basado en la teoría molecular, proporcione datos aplicados a los polímeros en estado fundido en un amplio rango de presión y temperatura. Esto se logra con datos empíricos concretos y limitados. Para

determinar estas relaciones existen diversas ecuaciones como la de Simha-Somcynsky, el modelo para fluidos de Sanchez y Lacombe y, la de mayor éxito, la ecuación de Flory (Flory-Orwoll-Vrij).

Los parámetros más comunes para la determinación de las relaciones de PVT, basados en la ecuación de Flory son los siguientes:

$$\alpha = \frac{1}{V} \left(\frac{\partial V}{\partial T} \right)_P$$
$$\beta = - \frac{1}{V} \left(\frac{\partial V}{\partial P} \right)_T$$

donde

α = Coeficiente de expansión térmica

β = Compresibilidad isotérmica

La ecuación empírica de Flory se define como:

$$\beta (P, T) = \left\{ (P + B) \left[\frac{1}{0.0894} - \ln \left(1 + \frac{P}{B} \right) \right] \right\}^{-1}$$

donde

$$P = 0, \quad \beta(0, T) = 0.0895 / B(T)$$

1.2.5. Defectos de moldeo

Los defectos en partes moldeadas requieren experiencia tanto para ser identificados como para ser resueltos. Los operarios con años de experiencia en inyección son los mejores maestros de identificación y solución de problemas, ya que su experiencia les da las ideas y recursos necesarios. Además es posible utilizar sistemas supervisores y de adquisición de datos para llevar un mejor control sobre la producción y prevenir posibles problemas.

Tabla II. Defectos comunes de moldeo

Defecto	Causas
Enchuecamiento	Enfriamiento demasiado intensivo. Diseño inadecuado de la pieza. Tiempo de enfriamiento muy corto. Sistema de extracción inapropiado. Esfuerzos en el material.
Flash	Presión de cierre demasiado baja.
Líneas de flujo	Mala dispersión del concentrado de color o del pigmento. Temperatura demasiado baja.
Puntos negros	Hay carbonizaciones.
Parte incompleta	Insuficiente material en la cavidad. Temperatura demasiado baja. Tiempo de sostenimiento demasiado corto. Velocidad de inyección demasiado baja.
Rechupados y huecos	Presión de inyección demasiado baja. Tiempo de sostenimiento de presión muy corto. Velocidad de inyección baja. Material sobrecalentado. Humedad. Enfriamiento del molde no uniforme.
Líneas de unión	Temperatura general muy baja en el molde. Temperatura del fundido no uniforme. Presión de inyección muy baja. Velocidad de inyección muy baja. Insuficiente respiración en

	la zona de unión de los flujos encontrados. Velocidad de llenado no uniforme. Flujo no adecuado del material por los canales o la cavidad.
Fracturas o grietas en la superficie	Temperatura del molde demasiado baja. Sistema de eyección demasiado agresivo o inadecuado. Empacado excesivo.
Marcas de las barras eyectoras	Tiempo de enfriamiento muy corto. Temperatura del molde alta. Temperatura del polímero demasiado alta. Rapidez de eyección demasiado alta. Localización inadecuada de las barras eyectoras.
Color oscuro	La temperatura es demasiado alta. La compuerta es demasiado pequeña y se quema el polímero por presión.

1.2.6. Clasificación de las MMI

Las MMI se pueden clasificar de acuerdo a dos de sus características: el tamaño de la carga de inyección y la presión de sujeción.

- **Tamaño de la carga de inyección.** Es la cantidad máxima de material que inyecta la máquina en cada ciclo. Generalmente se mide en gramos o kilogramos.
- **Tonelaje de sujeción.** Es la fuerza máxima que puede aplicar una máquina a un molde. Comúnmente se mide en toneladas. Las máquinas se consideran pequeñas si tienen menos de 99 toneladas, medianas entre 100 y 999 toneladas y grandes entre 1,000 y 5,000 toneladas. Para tamaños mayores un pedido especial es necesario.

2. SCADA

La automatización industrial tiene como objetivo principal el poder gobernar la actividad y la evolución de los procesos sin la intervención continua de un operador humano.

Los sistemas SCADA son una aplicación para la integración de los procesos industriales, que ofrece nuevas expectativas en eficacia y optimización de los procesos.

Este tipo de sistemas permiten al usuario obtener datos de una o varias instalaciones distantes y enviar instrucciones de control a dichas instalaciones. Un sistema SCADA hace innecesario que un operador sea asignado para permanecer en lugares remotos o visitarlos frecuentemente cuando el sistema remoto opera normalmente. Incluye, aunque no se limita únicamente a eso, la interfaz del operador y la manipulación de información relacionada con la aplicación. Es necesario hacer énfasis en que algunos fabricantes desarrollan paquetes de software a los cuales llaman SCADA, y aún cuando éstos son a menudo apropiados para funcionar como parte de un sistema SCADA, no son sistemas SCADA completos, ya que carecen de enlaces de comunicación y otro equipo necesario.

2.1. Definición

El término SCADA es un acrónimo formado por las primeras letras del término en inglés *Supervisory Control And Data Acquisition* que en español se traduce como Control Supervisor y Adquisición de Datos. Aparte del hecho de que el término no se refiera al factor de distancia, el cual es muy común en este tipo de sistemas, el acrónimo SCADA es ampliamente aceptado.

Un sistema SCADA utiliza tecnologías de computación y comunicación para automatizar el monitoreo y control de procesos industriales, mejorando la eficacia de los mismos y proporcionando la información oportuna para poder tomar decisiones operacionales apropiadas.

Estos sistemas son parte integral de la mayoría de los ambientes industriales complejos o muy geográficamente dispersos, ya que pueden recoger la información de una gran cantidad de fuentes muy rápidamente, y la presentan a un operador en una forma amigable.

Así, no se trata solamente de un sistema de control sino de una utilidad de monitorización o supervisión, que realiza la tarea de interface entre los niveles de control y gestión a un nivel superior.

El sistema SCADA permite a un operador ubicado en un lugar céntrico a un proceso extensamente distribuido (como un yacimiento petrolífero o de gas, un sistema de canalización, de irrigación o hidroeléctrico) asignar parámetros en controladores de procesos distantes, con el fin de abrir o cerrar válvulas o interruptores, monitorear alarmas, o reunir información útil. Cuando las dimensiones del proceso aumentan a cientos o incluso miles de kilómetros de distancia entre las terminales, es posible apreciar los beneficios que SCADA

ofrece en términos de reducción de costos de visitas rutinarias para monitorear la operación en las instalaciones. El valor de estos beneficios se apreciará aún más si las instalaciones son muy remotas y se requiera de esfuerzo extremo para visitarlas (e.g., viajes en helicóptero).

Los sistemas de telemetría fueron los primeros en aparecer. Proporcionaban reportes periódicos de las condiciones de campo vigilando las señales que representaban medidas y/o condiciones de estado en ubicaciones de campo remotas. Una característica que distingue a los sistemas SCADA de los sistemas de telemetría es que SCADA es un sistema bidireccional. Así, con este tipo de sistema es posible no solamente monitorear lo que está ocurriendo en un lugar remoto sino que también hacer algo al respecto.

La complejidad de las funciones que son posibles con un sistema SCADA han madurado al lado de la tecnología. Actualmente, los proveedores de SCADA están diseñando sistemas que son pensados para resolver las necesidades de muchas industrias, con módulos de software específicos disponibles para proporcionar las capacidades requeridas comúnmente. Entre las industrias que manejan este tipo de sistemas se encuentran las de procesamiento de papel y celulosa, industrias de aceite y gas, de generación energética, de gerenciamiento y provisión de agua, de control de fluidos, etc.

Para alcanzar un nivel aceptable de tolerancia de fallas con estos sistemas, es común tener computadoras SCADA redundantes operando en paralelo en el centro primario del control, y un sistema de reserva del mismo situado en un área geográficamente distante. Este tipo de arquitectura permite transferir la responsabilidad del control de un ordenador a otro de reserva en línea, en caso de que el primero llegue a ser inasequible por alguna razón, evitando así una interrupción significativa en las operaciones.

Entre las señales típicas obtenidas de lugares remotos se incluyen alarmas, indicadores de estado, valores analógicos, entre otras. No obstante, un vasto rango de información puede reunirse con estos aparentemente limitados tipos de señales disponibles. Similarmente, las señales enviadas desde un punto central dentro de un sistema SCADA hacia sitios remotos están usualmente limitadas a señales digitales y analógicas. En base a señales simples como éstas es posible, con un poco de imaginación, llevar a cabo muchos cambios de control.

2.2. Objetivos

Los sistemas SCADA dan una nueva característica de automatización a los sistemas de control tradicionales: la supervisión. Lo que hace de estos sistemas una herramienta diferente es la característica de control supervisado.

En consecuencia, se supervisa el control de la planta y no solamente se monitorea a las variables que en un momento determinado están actuando sobre la planta, sino que también es posible actuar sobre las variables de control en tiempo real. La supervisión representa una tarea delicada y esencial desde el punto de vista normativo y operativo; de ésta acción depende en gran medida garantizar la calidad y eficiencia del proceso que se desarrolla.

A menudo, los sistemas SCADA son confundidos con otros sistemas de monitoreo. Aunque en los sistemas puramente de monitoreo existe una interfaz gráfica, estos comúnmente ofrecen una gestión de alarmas en formato rudimentario. En cambio, en los sistemas SCADA se utiliza una interfaz interactiva la cual permite, además de la detección de alarmas, la posibilidad de solucionar el problema mediante las acciones adecuadas en tiempo real,

otorgando una gran flexibilidad a este tipo de sistemas. Si bien es cierto que todos los sistemas SCADA ofrecen un monitoreo, no todos los sistemas de monitoreo tienen las características de un sistema SCADA.

Entre los objetivos de un sistema de este tipo se pueden destacar:

- **Economía.** Ahorro de tiempo, trabajo y dinero en los procesos.
- **Accesibilidad.** Mayor posibilidad de tener acceso a un sitio, independientemente de su ubicación.
- **Mantenimiento.** Posibilidad de programar rutinas en base a la adquisición de datos, en donde se almacenan los datos de un proceso y se presentan de manera inteligible para un usuario
- **Ergonomía.** Optimización del bienestar humano y del rendimiento global del sistema. Se pretende presentar la información sin aburrir ni fatigar al usuario.
- **Flexibilidad.** Facilidad del sistema para acomodarse a distintas situaciones sin incurrir en costos extras.
- **Conectividad.** Interconexión entre diferentes sistemas abiertos, aplicaciones y bases de datos, ya sea locales y distribuidas en redes de comunicación. Busca evitar la existencia de lagunas informativas que puedan causar fallos en el funcionamiento o en la seguridad.

2.3. Prestaciones

El paquete SCADA, en su vertiente de herramienta de interfaz hombre-máquina, comprende toda una serie de funciones y utilidades encaminadas a establecer una comunicación lo más clara posible entre el proceso y el operador.

Las prestaciones que se ofrecen en esta clase de sistemas eran impensables hace unos cuantos años y son las siguientes:

- **Monitorización.** Se provee de una presentación en tiempo real a los operadores de planta de toda la información relacionada con los procesos.
- **Supervisión.** Capacidad de modificar las variables de control en base al monitoreo de las mismas. Evita la continua supervisión humana. Útil para la toma de decisiones, como por ejemplo en mantenimiento predictivo.
- **Adquisición de datos.** Para recoger, procesar y almacenar información, en forma continua y confiable. Los valores almacenados son útiles para posteriores evaluaciones. Mediante el reconocimiento de eventos excepcionales acaecidos en la planta se les da a conocer de manera inmediata a los operarios para efectuar las acciones correctoras pertinentes. Cualquier tipo de incidencia queda registrada.
- **Mando.** Posibilidad de que los operadores puedan cambiar consignas y otros datos claves del proceso directamente desde el ordenador. Se escriben datos sobre los elementos de control.

- **Grabación de acciones o recetas.** En algunos procesos se utilizan combinaciones de variables que son siempre las mismas. Un sistema de recetas permite configurar toda una planta de producción ejecutando un solo comando.
- **Seguridad de los datos.** Tanto el envío como la recepción de datos deben de estar suficientemente protegidos de influencias no deseadas, intencionadas o no (fallos en la programación, intrusos, situaciones inesperadas, etc.).
- **Seguridad en los accesos.** Habilidad de restringir zonas de programa comprometidas a usuarios no autorizados, registrando todos los accesos y acciones llevadas a cabo por cualquier operador.
- **Programación numérica.** Permite realizar cálculos aritméticos de elevada resolución sobre la unidad de procesamiento de la computadora (generalmente lenguajes de programación de alto nivel son utilizados) y no sobre la del autómeta, menos especializado.

2.4. Ventajas

Cuando se habla de un sistema SCADA es necesario tener en cuenta que éste incluye además de la monitorización, también se incluyen elementos de regulación y control, sistemas de comunicaciones y múltiples utilidades de software que pretenden que el sistema funcione de forma eficiente y segura.

Las ventajas más evidentes de los sistemas de control supervisor y de adquisición de datos se listan a continuación:

- El actual nivel de desarrollo de los paquetes de visualización permite la creación de aplicaciones funcionales sin necesidad de ser un experto en la materia.
- El sistema está concebido para trabajar en condiciones adversas proporcionando robustez y fiabilidad.
- La modularidad de los autómatas permite adaptarlos a las necesidades actuales y ampliarlos posteriormente si es necesario.
- Se consigue una localización más rápida de errores gracias a las herramientas de diagnóstico. Esto permite minimizar los períodos de paro en las instalaciones y repercute en la reducción de costes de mantenimiento. En consecuencia, la calidad del producto aumenta.
- El concepto de mantenimiento a distancia permite realizar modificaciones de software en las estaciones remotas desde el centro de control.
- La documentación técnica se puede almacenar de manera que pueda ser fácilmente interpretada por otras personas. Además, la generación y distribución de la documentación puede ser automática y presentarse en formatos fácilmente exportables a otras aplicaciones de uso común, tales como hojas de cálculo.
- La integración de sistemas es rápida gracias a los sistemas de comunicación estandarizados.

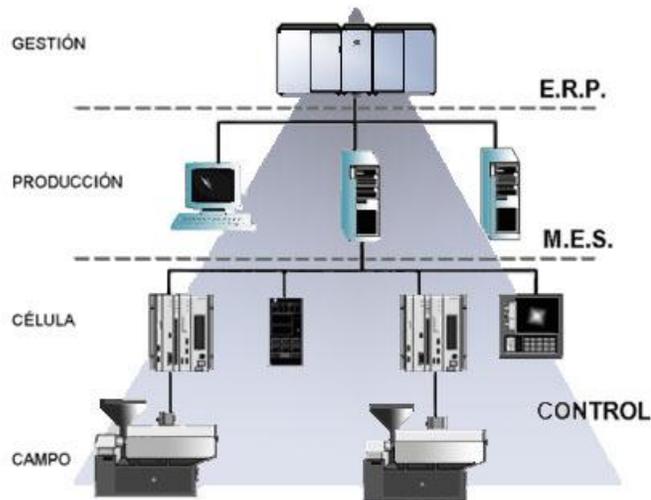
- Los protocolos de seguridad permiten una gestión segura y eficiente de los datos, limitando el acceso a personas no autorizadas.
- El nivel de descentralización aumenta, tendiendo a la modularidad. Esto permite una mayor disponibilidad, pues las funciones de control se pueden repartir y/o duplicar.
- Mediante las redes de comunicación el sistema se integra en la red corporativa, permitiendo la integración entre los niveles de campo y gestión.

2.5. El entorno

La automatización de sistemas, desde el estado inicial de aislamiento productivo, ha pasado a formar parte del ámbito corporativo y se engloba dentro del paquete empresarial con la finalidad de optimizar la productividad y mejorar la calidad.

El esquema que representa los flujos de información dentro de la empresa y representa cómo se realiza la comunicación a todos los niveles es similar a la Pirámide de la automatización *CIM (Computer Integrated Manufacturing)*.

Figura 15. Pirámide de la automatización CIM



La pirámide presenta la estructura corporativa dividida en tres niveles

- **ERP** (*Enterprise Resource Planning* o planificación de Recursos Empresariales): Incluye la parte de gestión: finanzas, compras, ventas, logística.
- **MES** (*Manufacturing Execution System* o Gestión de la Producción): Comprende la gestión de calidad, documentación, gestión de producción, mantenimiento y optimización.
- **CONTROL**: Engloba toda la parte de automatización de procesos.

Estos niveles muestran los diferentes flujos de información que se dan entre los elementos de cada uno de ellos (comunicación horizontal) y el intercambio de información que se da entre los diferentes niveles (comunicación vertical).

La finalidad del organigrama es disponer de la máxima información posible sobre el estado operativo global de la empresa para planificar acciones como:

- Planificar la producción a corto, mediano y largo plazo, y coordinar compras y logística en base a la demanda prevista (ERP).
- Planificar nuevas compras en base de las existencias de material disponible para aplicar en el proceso productivo o coordinar ciclos de mantenimiento preventivo para conocer la disponibilidad de maquinaria y la capacidad operativa (MES).
- Conocer el estado operativo de la planta (CONTROL).

Los tres niveles no tienen límites claramente definidos. Las herramientas ERP van asimilando capacidades propias del nivel MES de la misma manera que las aplicaciones de Control (SCADA) van adquiriendo prestaciones del nivel superior MES al disponer de herramientas de comunicación con bases de datos y con aplicaciones internas y externas.

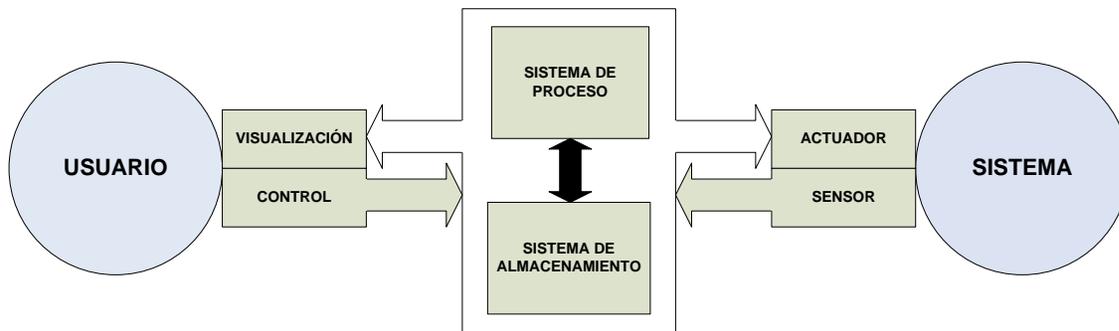
2.6. Arquitectura

El desarrollo del ordenador personal ha permitido su implantación en todos los campos del conocimiento y a todos los niveles imaginables.

En el campo de la automatización los sistemas, al tender progresivamente a la distribución del control, quedan divididos en tres bloques principales:

- Software de adquisición de datos y control (SCADA).
- Sistemas de adquisición y mando (sensores y actuadores).
- Sistema de interconexión (comunicaciones).

Figura 16. Estructura básica de un sistema de supervisión y mando



El estado del sistema es captado a través de los elementos de campo (sensores y actuadores). La transmisión de los datos hacia el Sistema de Proceso se lleva a cabo mediante los denominados buses de campo.

Basándose en la programación previa del usuario, el Sistema de Proceso inicia las acciones pertinentes para mantener el control del sistema. Toda la información generada durante la ejecución de las tareas de supervisión y control se almacena para disponer de los datos a posteriori.

Finalmente el usuario, mediante herramientas de visualización y control, tiene acceso al Sistema de Proceso y de Almacenamiento. Esta comunicación suele llevarse a cabo a través de redes de comunicaciones corporativas.

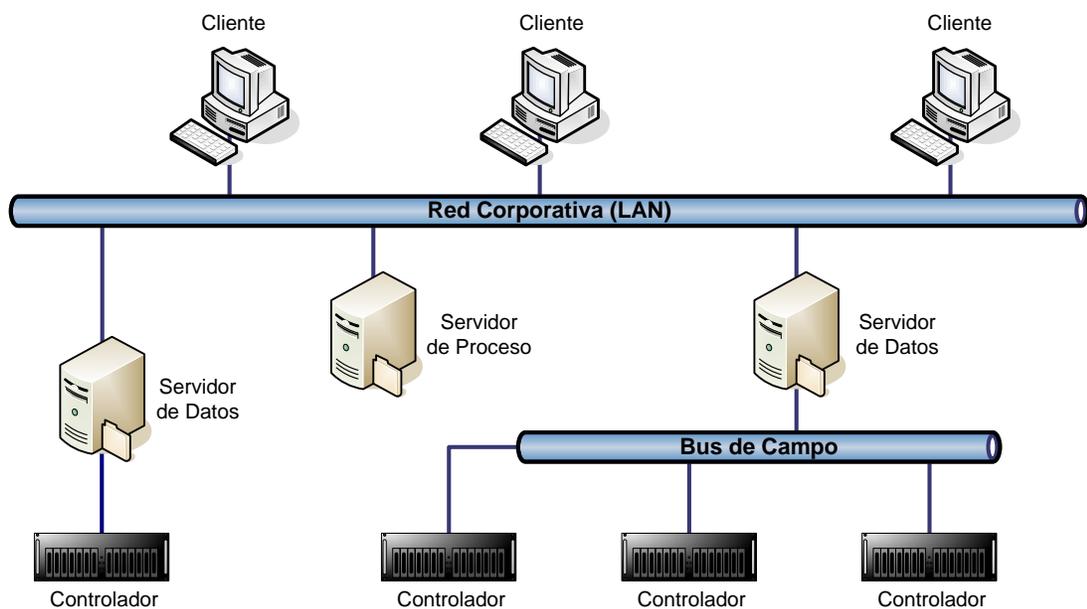
Así, el mundo de las máquinas se integra en la red empresarial mediante el software de adquisición de datos y control. Esto da lugar a una integración de los sistemas empresariales y permitirá crear estrategias de empresa globales.

2.6.1. Hardware

Un sistema SCADA, como aplicación de software industrial específica, necesita ciertos elementos básicos inherentes de hardware en su sistema para poder tratar y gestionar la información captada:

- HMI (*Human-Machine Interface*). Interfaz Hombre Máquina
- MTU (*Master Terminal Unit*). Unidad Terminal Maestra.
- RTU (*Remote Terminal Unit*). Unidad Terminal Remota.
- Instrumentos de Campo.
- Sistema de comunicaciones.

Figura 17. Arquitectura básica de hardware de un sistema SCADA



2.6.1.1. Interfaz hombre-máquina (HMI)

Comprende los sinópticos de control y los sistemas de presentación gráfica. Un panel sinóptico representa, de forma simplificada, el sistema bajo control.

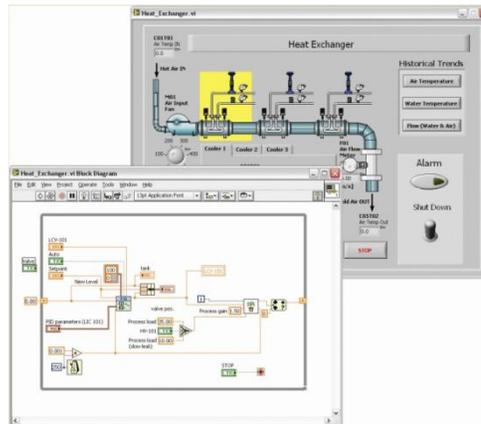
El operador ingresa al sistema por medio de una interfaz comúnmente conocida como consola. La consola funciona como la ventana del operador hacia el proceso. Consiste en una unidad de visualización que muestra datos en tiempo real sobre procesos.

Además se utilizan dispositivos de entrada que permiten introducir comandos de vuelta hacia el proceso. Estos pueden ser teclados, ratones, pantallas sensibles al tacto, etc.

La interfaz primaria al operador es una pantalla que muestra una representación de la planta o del equipamiento en forma gráfica. Los dispositivos y sus componentes se muestran como dibujos o esquemas en primer plano sobre un fondo estático. A medida que los datos recopilados cambian, el primer plano es actualizado.

La siguiente gráfica muestra un ambiente de desarrollo especializado, el cual proporciona la flexibilidad así como la lógica requerida por sistemas HMI/SCADA modernos.

Figura 18. Sistema HMI/SCADA (LabView, National Instruments)



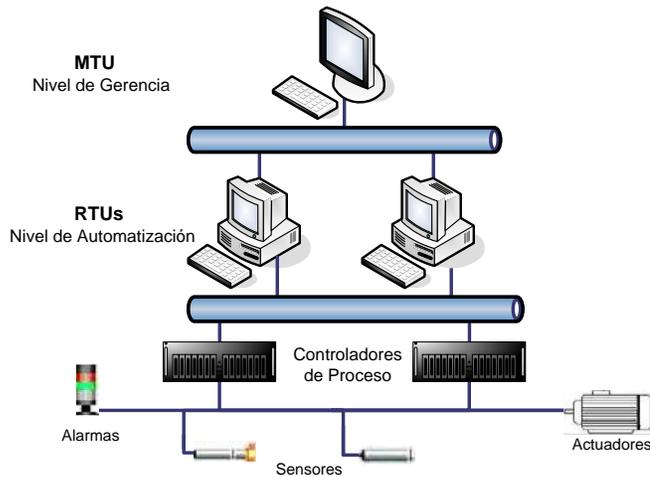
2.6.1.2. Unidad terminal maestra (MTU)

La unidad central o MTU es la controladora del sistema. Es la parte más visible de un sistema SCADA, con la cual interactúa el operador. En la MTU se centraliza el mando del sistema. Se supervisa e intercambia información en tiempo real con el resto de las subestaciones situadas en cualquier lugar.

Esta unidad es frecuentemente basada en una computadora, la cual soporta el HMI. Puede monitorear y controlar los procesos aún cuando el operador no esté presente mediante la programación de instrucciones a realizarse en intervalos definidos de tiempo.

Una unidad MTU se encuentra en el nivel superior de la jerarquía de elementos básicos de un sistema SCADA. A un nivel intermedio o de automatización está la unidad terminal remota (RTU) y a un nivel inferior los distintos instrumentos de campo que son los que ejercen la automatización física del sistema, es decir el control y adquisición de datos.

Figura 19. Jerarquía de elementos básicos de hardware



En muchas aplicaciones una MTU es requerida para enviar informes hacia otras computadoras o información de gestión hacia otros sistemas. Estas conexiones pueden ser mediante cables dedicados entre la MTU y otras computadoras, pero en los nuevos sistemas predominantemente se conectan mediante una red de área local (LAN). En la mayoría de los sistemas SCADA la MTU también recibe información desde otras computadoras. Esta es la manera que con frecuencia los programas de aplicación, operados en otras computadoras y conectados al sistema, proveen una forma de control supervisor sobre SCADA.

Entre las funciones principales de las unidades maestras se encuentran:

- **Adquisición de datos.** Recolección de datos de todas las terminales remotas (RTU).
- **Visualización.** Presentación de forma gráfica de los datos al operador.

- **Análisis.** Se analizan los datos recogidos de las RTUs para ver si han ocurrido condiciones anormales y alertar al personal de operaciones sobre las mismas.
- **Control.** Control a lazo cerrado.
- **Generación de informes.** Se producen reportes en base al funcionamiento del sistema.
- **Seguridad.** Control de acceso a los distintos componentes del sistema.
- **Administración de bases de datos.** Gestión y mantenimiento del sistema.
- **Administración de la red.** Monitoreo de la red de comunicaciones.
- **Aplicaciones especiales.** Es posible ejecutar software especializado que cumple con funciones específicas asociadas al proceso.

2.6.1.3. Unidad terminal remota (RTU) y elementos de campo

Las RTUs (*Remote Terminal Units*) o Unidades de Terminal Remota están situadas en nodos estratégicos del sistema, alejadas de la unidad central (MTU) y en comunicación con ésta mediante algún canal de comunicación. Estas unidades gestionan y controlan los Elementos de Campo, recopilando datos a la vez que los comandan.

La MTU debe comunicarse con las RTUs que se encuentran lejos del lugar central. Un sistema SCADA puede tener desde una única RTU hasta varios cientos de ellas.

Cada unidad RTU debe de tener la capacidad de entender que un mensaje en particular es enviado hacia ella, decodificar dicho mensaje, actuar según el mensaje, responder en caso fuera necesario, y esperar por nuevos mensajes. Actuar según el mensaje puede ser un procedimiento complejo, es por esto que se utilizan tecnologías de computación como base.

Usualmente las unidades RTU proveen de energía a los sensores y actuadores. Dependiendo del proceso y según los requerimientos de confiabilidad es posible necesitar una fuente ininterrumpida de energía UPS (*Uninterruptible Power Source*) para asegurar que fallas en el sistema eléctrico no afecte los procesos.

La adquisición de datos es lograda por las RTU que exploran los elementos de campo conectados a ellas. De la misma manera, la unidad MTU escanea cada unidad RTU. Sin embargo, el escaneo que hace cada RTU es hecho con mayor frecuencia que el escaneo que realiza la MTU.

El mercado propone varios modelos para responder de la manera más óptima posible a los diferentes casos de aplicación, desde un punto de vista técnico y económico. Así, las unidades remotas pueden variar en complejidad tanto en sus componentes como en las funciones que realiza:

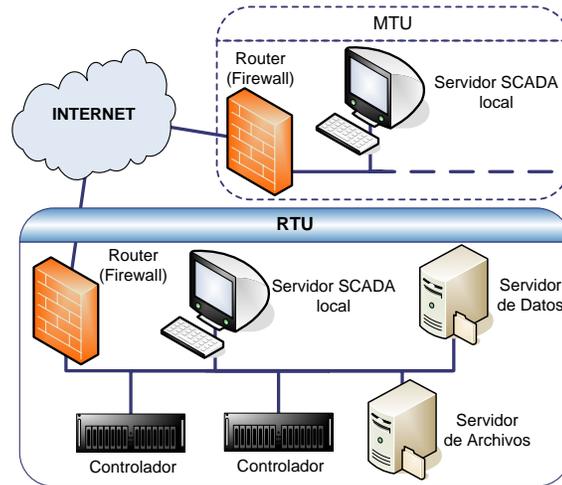
- La unidad remota con capacidades más limitadas puede recopilar datos de campo y transmitirlos hacia la unidad central al mismo tiempo que ejecuta órdenes de control sobre los dispositivos de campo. Este tipo de

unidades tienen una construcción más robusta permitiendo mayores transitorios de red, variaciones en la alimentación e interferencias electromagnéticas.

- Una unidad más compleja podría tener funciones de almacenamiento y procesamiento de datos, así como de seguridad ante accesos sin autorización o situaciones anómalas que puedan perjudicar al funcionamiento de la estación y provocar daños en sus componentes.
- Otro tipo de unidades, llamados periféricos inteligentes, poseen propiedades de decisión propias (programas) que se ocupan de tareas de control, regulación y comunicación. Es habitual encontrar que muchos de estos elementos utilizan protocolos propietarios y dan origen a las denominadas islas de automatización.
- Algunas estaciones remotas pueden incluso tener a su cargo una ciudad entera o controlar la distribución regional. En este caso se implementan funciones de control, interfaces de hombre-máquina (MHI), adquisición de datos, control de bases de datos, protocolos de seguridad y comunicaciones internas entre subsistemas.

Los componentes de los sistemas SCADA son diseñados por distintos proveedores, sin coordinación entre sí. Es posible que se tengan RTUs con elementos de diferentes proveedores en un mismo sistema.

Figura 20. Arquitectura general de una RTU



2.6.1.4. Sistema de comunicaciones

Una característica distintiva de los sistemas SCADA es su capacidad de comunicación. Estos sistemas generalmente cubren áreas geográficas más grandes y utilizan medios de comunicaciones diversos. Un aspecto importante de la tecnología de SCADA es la capacidad de garantizar confiablemente la salida de datos al usar estos medios.

Inicialmente los enlaces de comunicación eran lentos, sin embargo se han desarrollado sistemas más rápidos. La velocidad de transferencia de información utilizada depende de una previa evaluación de los volúmenes de datos probables esperados para asegurar que la red de comunicaciones sea capaz de resolver las demandas.

El sistema o red de comunicaciones es el nivel que gestiona la información que los instrumentos de campo envían a la red de ordenadores

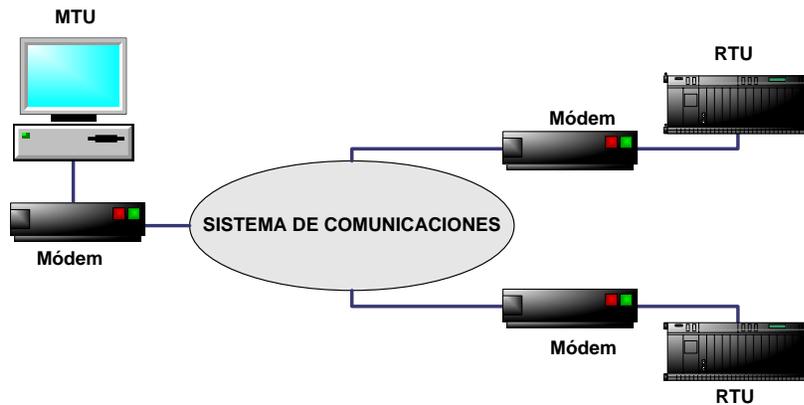
desde el sistema. Según las necesidades del sistema y según el software escogido para implementar el sistema SCADA se escoge un tipo de Bus específico. En un inicio no todos los instrumentos de campo ni los tipos de software podían trabajar con todos los tipos de Bus. Actualmente debido a la estandarización de las comunicaciones con los dispositivos de campo, es posible implementar un sistema SCADA sobre prácticamente cualquier tipo de Bus.

SCADA tiende a utilizar la mayoría de las redes de comunicación disponibles. Existen dos medios comunes de comunicación:

- **Líneas terrestres.** Pueden ser fibras ópticas, líneas telefónicas dedicadas o no dedicadas, cables coaxiales. Todos estos pertenecientes a la compañía o bien arrendadas por otra empresa.
- **Radio.** Incluye telefonía celular (GPRS, UMTS), enlaces VHF, UHF, microondas, satélites.

Se utiliza un MODEM para modular y demodular las señales. Algunos sistemas extensos utilizan una combinación de radio y líneas terrestres para la comunicación. Un rasgo distintivo de los sistemas SCADA es la simplicidad de sus procesos. Por esta razón, la cantidad de información que viaja a través del sistema tiende a ser más bien pequeña y, por tanto, la tasa de transferencia a la que el MODEM trabaja es pequeña.

Figura 21. Idea básica de un sistema SCADA



La mayoría de los sistemas SCADA se implementan sobre sistemas de red de área extendida WAN (*Wide Area Network*) ya que los distintos terminales RTU pueden estar localizados geográficamente dispersos.

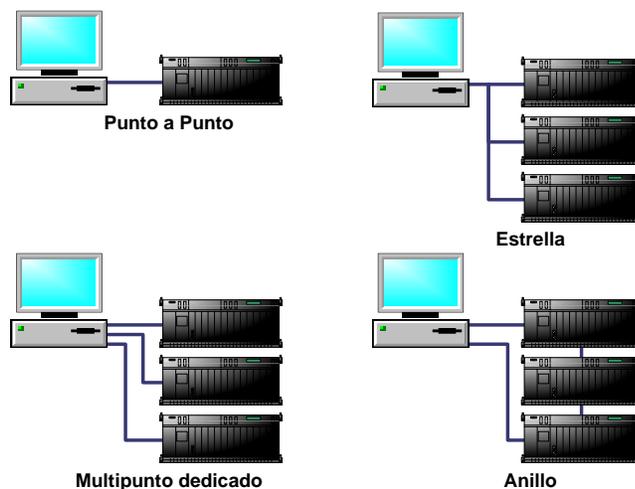
Las diversas combinaciones de los elementos que se comunican dan lugar a topologías determinadas, siendo las más comunes las siguientes:

- **Punto a punto.** La relación es del tipo Maestro-Esclavo. Un solo elemento remoto (RTU) está conectado al sistema de control (MTU) mediante una línea de comunicación.
- **Multipunto dedicado.** Es una variante del modelo Punto a Punto. Un solo sistema de control está conectado a varias estaciones remotas mediante enlaces directos permanentes. Todo el tráfico de la red se centra en un solo punto, la unidad central, que debe poder gestionar todo el tráfico generado por el resto de elementos.

- **Estrella.** Al igual que las topologías anteriores, es del tipo Maestro-Escavo. Esta configuración utiliza un solo puerto de comunicaciones, realizándose el intercambio de datos por turnos. Las estaciones remotas tienen identificadores únicos.
- **Anillo.** Es una topología más robusta al proporcionar dos caminos para la información. En caso de fallo de un nodo el tráfico no se interrumpe.

Generalmente cualquier aplicación de cierta envergadura utiliza varios métodos de comunicación de forma simultánea, tanto en medios de transmisión como en topologías. Esto permite su implantación de forma más eficiente, adaptando los recursos técnicos al terreno y optimizando los costes. Por ejemplo, cuando se requiere transmitir señales a grandes distancias se utiliza la comunicación radial, la cual sería muy costosa de utilizar para la transmisión de señales a cortas distancias, para lo cual el cable es más indicado.

Figura 22. Topologías básicas



Un sistema SCADA debe ser muy confiable. La aplicación de estándares a las comunicaciones permite una mayor integración y flexibilidad en las configuraciones.

Estos sistemas hacen uso típicamente de las técnicas tradicionales de paridad, chequeo de sumas polinómicas y códigos Hamming para la detección y corrección de errores. Sin embargo estas técnicas no son del todo confiables. La operación ideal del sistema es que la transmisión se transmita sin errores y que siempre sea reconocida.

La exactitud de la transmisión se considera tan importante como las demás actividades del sistema. A medida que se utilicen protocolos de comunicación más sofisticados, la probabilidad de error en una transmisión disminuirá.

Se han desarrollado técnicas para la transmisión confiable sobre medios pobres, y es así como muchas compañías alcanzaron una ventaja competitiva respecto a sus competidores debido al mérito técnico de sus protocolos. Estos protocolos tendieron a ser propietarios y celosamente guardados.

Los progresos recientes han permitido la aparición de un número apreciable de protocolos abiertos, con los cuales se elimina el problema de incompatibilidad entre equipos de varios fabricantes, permitiendo más bien una interoperabilidad entre ellos. Esto contribuye a la escalabilidad de un sistema.

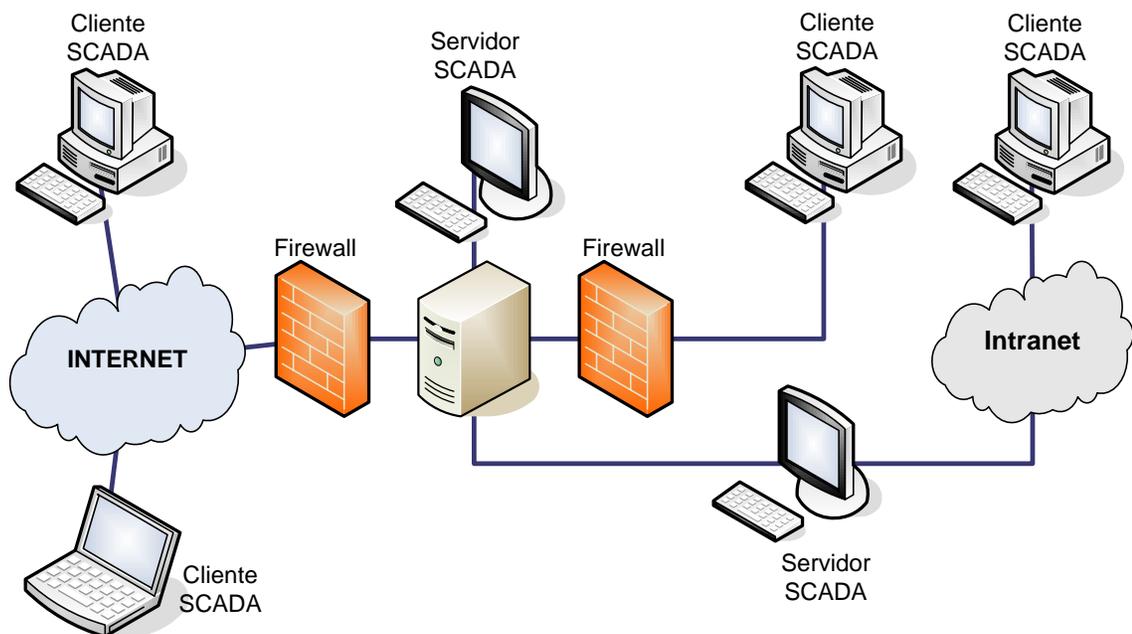
No hay que olvidar que el uso de estándares o protocolos de comunicación acarrea un problema, i.e., las carencias que estos estándares tienen. Ejemplos de estos casos son los problemas relacionados con la

seguridad en los accesos, los virus informáticos, la integridad de los datos y los problemas de comunicaciones.

Los *firewalls* o cortafuegos son utilizados para contrarrestar las deficiencias de los protocolos de comunicación. Su nombre tiene origen en la construcción civil. Se trata de las paredes divisorias, sin ventanas, que separan dos estancias, y cuya función es impedir que el fuego se propague de una estancia a otra en caso de incendio.

En informática, un cortafuego es una barrera física (hardware) o lógica (software) entre redes diferentes, dando protección a la red local contra accesos no deseados desde el exterior. Puede realizar las funciones de filtrado de paquetes y de gestión de tráfico de información.

Figura 23. Seguridad en redes SCADA



Según la tecnología que se utilice y el tipo de protección que se requiera, los firewalls pueden operar en diferentes capas del modelo OSI. En la Capa de Aplicación es posible interceptar todas las peticiones de las aplicaciones, verificando el cumplimiento de las normas de seguridad antes de permitir que se transmitan. En la Capa de Transporte se pueden establecer circuitos entre clientes y servidores. En la Capa de Red es posible controlar los paquetes en base a su dirección origen, su dirección destino y al protocolo de red utilizado.

Tabla III. El Modelo OSI y los cortafuegos

Nivel	Capa	Función	Usos comunes
7	Aplicación	Funciones de usuario y servicios de comunicación	HTTP, FTP (Firewall)
6	Presentación	Representación de los datos	ASCII, MIDI, MPEG
5	Sesión	Comunicación entre dispositivos de la red	NetBIOS
4	Transporte	Conexión extremo a extremo y fiabilidad de los datos	TCP, UDP (Firewall)
3	Red	Determinación de la ruta (direccionamiento lógico)	IP, ARP, ICMP (Firewall)
2	Enlace	Método de acceso (direccionamiento físico)	Ethernet, Token Ring
1	Física	Señal y transmisión binaria	RS-232, 100BaseT, V.35

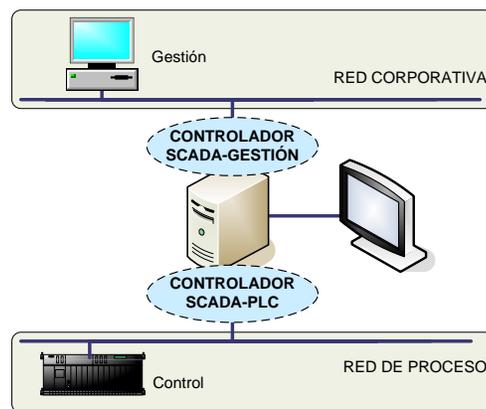
2.6.2. Software

El software de un sistema SCADA es el encargado de supervisar y controlar el proceso a través del hardware de control. El corazón de un sistema SCADA se encuentra en el software de dicho sistema.

Los programas que permiten la comunicación entre la interfaz HMI con los dispositivos de control de planta y los elementos de gestión son denominados controladores o *drivers*. El driver realiza la función de traducción

entre el lenguaje de programa SCADA y el del autómeta o entre el SCADA y la red de gestión de la empresa.

Figura 24. Concepto de driver o controlador



Generalmente la configuración del controlador de comunicaciones se realiza durante la instalación del software principal o como programa de acceso externo al ejecutar la aplicación principal.

Disponer del conjunto de drivers necesario para intercomunicar los diversos componentes de un sistema completo, configurarlos y activarlos de forma transparente, es un elemento esencial para disponer de una integración efectiva.

Una de las necesidades del resultado de la ampliación del entorno de aplicación ha sido la necesidad de disponer de herramientas cómodas, simples y potentes para la generación de interfaces de usuario que permitan acceder a la información que es de interés. Debido a que el medio generalizado de comunicación es Internet la mayoría de las aplicaciones actuales ya son capaces de comunicarse a través de este medio.

Es conveniente disponer de herramientas que ofrezcan a cualquier usuario la posibilidad de diseñar y configurar aplicaciones específicas que permitan dialogar con el sistema de información y obtener los datos necesarios.

Entre las principales funciones que realiza el software se encuentran las siguientes:

- Manejo del soporte o canal de comunicación.
- Manejo de uno o varios protocolos de comunicación.
- Manejo y actualización de una base de datos.
- Administración de alarmas.
- Generación de archivos históricos.
- Interfaz con el operador.
- Capacidad de programación.
- Transferencia dinámica de datos.
- Conexión a redes de comunicación.

La madurez de los productos de software para la adquisición y registro de datos en tiempo real y la supervisión y control de procesos ofrecen una evolución en los siguientes ámbitos:

- En la integración en entornos completos para la gestión del negocio disponiendo de información de planta en tiempo real, control y tratamiento de datos, y supervisión y gestión global de la empresa.
- En el tratamiento de los datos adquiridos en planta por parte de sistemas expertos que ofrecen funcionalidades de detección y diagnóstico de fallas. Al disponer de un sistema experto es posible, en base a un

conjunto de reglas, detectar fallas o situaciones delicadas, contar con un diagnóstico de las causas que lo provocan y conocer la manera correcta de proceder para su corrección.

- En la mejora de las interfaces con el usuario mediante el empleo de entornos gráficos de alta calidad, la incorporación de elementos multimedia de audio y video, la mejora de los sistemas operativos, todo ello soportado por un hardware cada vez más compacto, fiable, potente y rápido.

En los últimos años ha existido una evolución de los productos de software para los sistemas SCADA orientada a ampliar su campo de aplicación.

Una de las demandas más generalizadas y, al mismo tiempo una de las más críticas, es la capacidad de efectuar consultas trabajando con datos procedentes de diferentes fuentes, es decir, de diferentes aplicaciones y distintas bases de datos ubicadas en distintos puntos del sistema.

La adopción de forma generalizada de estándares por parte de la gran mayoría de proveedores ha facilitado que los datos adquiridos mediante una aplicación en particular esté disponible para otras aplicaciones.

2.6.2.1. Comunicación entre aplicaciones

Una vez los datos de planta se han procesado, pueden transferirse a otras aplicaciones de software, tales como hojas de cálculo o bases datos. A esto se le conoce como *gestión de datos* y permite analizar eventos, alarmas, emergencias, etc., ocurridos durante la producción.

Entre algunos de los métodos conocidos de intercambio entre aplicaciones informáticas se encuentran:

a) ASCII (*American Standard Code for Information Interchange*)

Código estadounidense estándar para el intercambio de información. Es un código de caracteres basado en el alfabeto latino tal como se usa en inglés moderno y en otras lenguas occidentales.

Especifica una correspondencia entre cadenas de bits y una serie de símbolos (alfanuméricos y otros), permitiendo de esta forma la comunicación entre dispositivos digitales así como su procesado y almacenamiento.

El formato ASCII es común a prácticamente todas las aplicaciones informáticas, por lo que se tiene un estándar básico de intercambio de datos.

b) COM (*Component Object Model*)

COM es un estándar de software introducido por Microsoft. Es utilizado para habilitar la comunicación entre procesos y en la creación de objetos dinámicos en cualquier lenguaje de programación que soporte dicha tecnología.

En la arquitectura COM un objeto no es más que un fragmento de código compilado que proporciona algún tipo de servicio al resto del sistema. COM se refiere tanto a la especificación como a la implementación desarrollada por Microsoft la cual provee una estructura para la integración de componentes.

Al igual que en los lenguajes de programación orientados a objetos, los componentes de COM suelen tener datos asociados, sin embargo, un

componente de COM nunca tendrá acceso directo a los datos de otro. El acceso de un componente de COM a otro se realiza siempre a través de punteros a interfaz, lo cual constituye una de las principales características de esta arquitectura y permite respetar en todo momento la encapsulación de los datos. Además permite la transparencia en el funcionamiento remoto, ya que el acceso a los datos se realiza transmitiendo la petición del componente cliente al componente servidor y devolviendo del mismo modo la respuesta.

Aplicando este estándar en el desarrollo de sistemas con componentes preexistentes, se espera obtener los beneficios de mantenimiento y adaptabilidad. Esta estructura soporta la interoperabilidad y reusabilidad de objetos distribuidos permitiendo a los desarrolladores construir sistemas reuniendo componentes reusables de diferentes proveedores los cuales se comunican a través de COM.

COM distribuido o DCOM es una extensión de COM que permite la comunicación entre objetos situados en diferentes máquinas a través de distintos tipos de redes. Los componentes que operan en una variedad de plataformas pueden interactuar, siempre y cuando DCOM esté disponible en todo el entorno.

c) OLE (*Object Linking and Embedding*)

OLE significa *Vinculación e Inserción de Objetos*. OLE es un sistema de objeto distribuido y un protocolo desarrollado por Microsoft. Permite la incrustación y vinculación de objetos (imágenes, clips de vídeo, sonido MIDI, animaciones, etc.) dentro de ficheros (documentos, bases de datos, hojas de cálculo, etc.).

OLE descansa sobre una arquitectura llamada COM (*Component Object Model*). Fue diseñado con el objetivo general de permitir un alto grado de integración entre sus componentes para poder gestionar documentos compuestos por elementos heterogéneos. Así, un documento de texto, por ejemplo, podría contener además otros tipos de datos como imágenes, sonido y video.

Un objeto OLE puede insertarse o vincularse. En caso de ser insertado forma parte física del documento, siendo el resultado un único archivo; se trata de una copia de la imagen original, que se integra al documento. En caso de ser vinculado, éste reside en un fichero propio creado por la aplicación; en el documento creado hay una referencia o vínculo al objeto en cuestión, el cual está almacenado aparte.

d) ACTIVEX

La tecnología ActiveX es la tercera versión de OLE y facilita la tarea de implementar servicios en redes de comunicación y controles en servidores Web.

No se trata de un lenguaje de programación, sino más bien de una serie de reglas establecidas para determinar cómo se debe compartir información.

Un objeto ActiveX es una instancia de una clase que ofrece propiedades, métodos y eventos a un cliente ActiveX. Un componente ActiveX es una aplicación o biblioteca (fichero .exe o .dll) capaz de crear objetos ActiveX.

Los controles ActiveX consisten en programas o aplicaciones que realizan tareas comunes en entornos como Windows o Macintosh (por ejemplo,

animaciones en páginas Web o enlaces entre sistemas de visualización y bases de datos).

La distinción entre varias tecnologías y productos de Microsoft muchas veces no es clara y con frecuencia es confundida. Mientras COM y DCOM representan una tecnología de bajo nivel que permite a componentes interactuar, OLE y ActiveX representan aplicaciones de alto nivel construidas sobre COM y DCOM expandiendo las capacidades de las últimas.

e) OPC (*OLE for Process Control*)

Estándar que especifica la comunicación de datos en tiempo real de la planta entre dispositivos de control de diferentes fabricantes. La especificación es basada en las tecnologías OLE, COM y DCOM.

OPC define un conjunto de objetos, interfaces y métodos para utilizarlos en el control de procesos y aplicaciones de automatización con el fin de facilitar su interoperabilidad. OPC fue diseñado para comunicar aplicaciones basadas en Windows y aplicaciones de control de procesos. Es un estándar abierto que permite un método fiable para acceder a los datos desde aparatos de campo. El método de acceso siempre es el mismo, independiente del tipo y origen de los datos.

Este estándar permite que diferentes clientes OPC (sin importar el fabricante) envíen datos a un mismo servidor OPC, al que a su vez podrán conectarse diferentes programas compatibles con dicho estándar. De este modo se elimina la necesidad de que todos los programas cuenten con drivers para dialogar con múltiples fuentes de datos, basta que tengan un driver OPC.

f) ODBC (*Open Data Base Connectivity*)

Estándar de acceso a bases de datos desarrollado por *Microsoft Corporation*. Permite acceder a cualquier dato desde cualquier aplicación, sin importar qué Sistema Gestor de Bases de Datos o DBMS (*Data Base Management Systems*) almacene los datos.

Una interfaz ODBC define librerías de llamadas a funciones, sintaxis, códigos de error, el método de conexión a un DBMS y el formato de presentación de los datos.

ODBC permite que una aplicación pueda acceder a varias bases de datos mediante el uso del controlador correspondiente. Este controlador es llamado Librería de Enlace Dinámico o DLL (*Dynamic Link Library*) en Windows y Objeto (OBJ) en UNIX.

ODBC define un estándar que permite el intercambio entre bases de datos y aplicaciones.

g) SQL (*Structured Query Language*)

Lenguaje declarativo de acceso a bases de datos relacionales que permite especificar diversos tipos de operaciones sobre las mismas.

Una de sus características es el manejo del álgebra y el cálculo relacional permitiendo lanzar consultas con el fin de recuperar información de interés de una base de datos, de una forma sencilla. Es un lenguaje de cuarta generación (4GL).

Es un lenguaje declarativo de alto nivel o de no procedimiento, especifica qué es lo que se quiere y no cómo conseguirlo, por lo que una sentencia no establece explícitamente un orden de ejecución. Gracias a su fuerte base teórica y su orientación al manejo de conjuntos de registros, y no a registros individuales, permite una alta productividad en codificación. De esta forma una sola sentencia puede equivaler a uno o más programas que utilicen un lenguaje de bajo nivel orientado a registro.

h) API (*Application Programming Interface*)

Interfaz de programación de aplicaciones. Es un conjunto de funciones y procedimientos que ofrece cierta biblioteca para ser utilizado por otro software como una capa de abstracción.

Una API representa una interfaz de comunicación entre componentes software. Se trata del conjunto de llamadas a ciertas bibliotecas que ofrecen acceso a ciertos servicios desde los procesos y representa un método para conseguir abstracción en la programación, generalmente entre los niveles o capas inferiores y los superiores del software.

Las herramientas API permiten que el usuario pueda adaptar el sistema a sus necesidades mediante rutinas de programa propias escritas en lenguajes estandarizados, lo cual les confiere mejor desempeño y versatilidad. Permiten el acceso a las bases de datos de los servidores.

2.6.2.2. Almacenamiento de datos

Inicialmente los ordenadores estaban muy limitados en sus capacidades de almacenamiento de variables, tanto en cantidad de información como en tiempo de acceso a dicha información.

En vista de la necesidad de poder disponer de datos almacenados sobre un sistema, y de realizar análisis de los mismos, se desarrollaron una serie de técnicas de almacenamiento de información. Las más destacadas se mencionan a continuación:

a) Ficheros

Antes de las bases de datos, se utilizaban ficheros como medio de almacenamiento. Estos eran accesibles por los programadores de las aplicaciones. Además, eran complicados de tratar debido a que tenían que estar perfectamente identificados y localizados en el disco, así como poseer un formato definido.

La primera revolución aparece con la técnica del indexado. Un archivo puede entonces estar ordenado por un criterio determinado, por ejemplo, la fecha o el nombre de la variable. De esta manera es fácil acceder a los datos si el nombre de la variable es conocido.

La limitación de este método radica en que la base de datos tiene un solo punto de acceso.

b) Bases de datos

Una base de datos o banco de datos es un conjunto de datos que pertenecen al mismo contexto almacenados sistemáticamente para su posterior uso.

Las bases de datos pueden clasificarse de varias maneras, de acuerdo al criterio elegido para su clasificación:

- **Según la variabilidad de los datos almacenados.** Aquí se incluyen bases de datos estáticas y dinámicas.
- **Según el contenido.** Comprenden las bases de datos bibliográficas, de texto completo y directorios.

Además de la clasificación por la función de las bases de datos, éstas también se pueden clasificar de acuerdo a su modelo de administración de datos. Un modelo de datos es básicamente una descripción de algo conocido como *contenedor de datos* (algo en donde se guarda la información), así como de los métodos para almacenar y recuperar información de esos contenedores. Los modelos de datos no son cosas físicas: son abstracciones que permiten la implementación de un sistema eficiente de base de datos; por lo general se refieren a algoritmos, y conceptos matemáticos.

Algunos modelos con frecuencia utilizados en las bases de datos:

- **Bases de datos jerárquicas.** Son bases de datos que almacenan la información en una estructura jerárquica. En este modelo los datos se

organizan en una forma similar a un árbol (visto al revés), en donde un *nodo padre* de información puede tener varios *hijos*. El nodo que no tiene padres es llamado *raíz*, y a los nodos que no tienen hijos se los conoce como *hojas*.

Las bases de datos jerárquicas permiten ordenar los elementos por jerarquías, en las cuales un tipo de datos consiste en un subconjunto de otro tipo de datos más genérico.

Las bases de datos jerárquicas son especialmente útiles en el caso de aplicaciones que manejan un gran volumen de información y datos compartidos permitiendo crear estructuras estables y de gran rendimiento.

Este modelo está limitado en prestaciones si se quiere acceder, por ejemplo, a variables pertenecientes a distintos grupos de datos situados en diferentes niveles del esquema de variables. Además, el modelo es incapaz de representar eficientemente la redundancia de datos.

- **Bases de datos de red.** Es un modelo que difiere con el anterior en la modificación del concepto de nodo: se permite que un mismo nodo tenga varios padres (posibilidad no permitida en el modelo jerárquico).

Las bases de datos de red son desarrolladas con el propósito de interpretar relaciones complejas entre los diversos tipos de variables. Aún así, los programas necesitan conocer las formas de acceso a los datos dentro de estas estructuras.

Este modelo fue una gran mejora con respecto al modelo jerárquico, ya que ofrecía una solución eficiente al problema de redundancia de datos; pero, aún así, la dificultad que significa administrar la información en una base de datos de red ha significado que sea un modelo utilizado en su mayoría por programadores más que por usuarios finales.

- **Base de datos relacionales.** El modelo relacional para la gestión de una base de datos es un modelo de datos basado en la lógica de predicado y en la teoría de conjuntos. Es el modelo más utilizado en la actualidad para modelar problemas reales y administrar datos dinámicamente. Su idea fundamental radica en el uso de *relaciones*. Cada relación se puede considerar como si fuese una tabla que está compuesta por *registros* (las filas de una tabla), y *campos* (las columnas de una tabla).

En una base de datos relacional, los datos se pueden considerar como un conjunto de tablas que contienen campos que sirven de nexo de unión (relación) y que permiten establecer múltiples combinaciones mediante la utilización de estos nexos. Las combinaciones posibles son ilimitadas, sólo es necesario configurar el método de búsqueda o el tipo de datos que se quiere consultar y aplicarlo a los datos.

En este modelo, el lugar y la forma en que se almacenen los datos no tienen relevancia (a diferencia de otros modelos como el jerárquico y el de red). Esto tiene la considerable ventaja de que es más fácil de entender y de utilizar. La información puede ser recuperada o almacenada mediante consultas que ofrecen una amplia flexibilidad y poder para administrar la información.

- **Bases de datos orientadas a objetos.** En este modelo la información se representa mediante *objetos* como los presentes en la programación orientada a objetos.

Incorpora todos los conceptos importantes del paradigma de objetos:

- **Encapsulación.** Propiedad que permite ocultar la información al resto de los objetos, impidiendo así accesos incorrectos o conflictos.
- **Herencia.** Propiedad a través de la cual los objetos heredan comportamiento dentro de una jerarquía de clases.
- **Polimorfismo.** Propiedad de una operación mediante la cual puede ser aplicada a distintos tipos de objetos.

En bases de datos orientadas a objetos, los usuarios pueden definir funciones sobre los datos como parte de la definición de la base de datos. Una función se especifica en dos partes: La *interfaz* de una operación incluye el nombre de la operación y los tipos de datos de sus argumentos o parámetros. La *implementación* (o método) de la operación se especifica separadamente y puede modificarse sin afectar la interfaz. Los programas de aplicación de los usuarios pueden operar sobre los datos invocando a dichas funciones a través de sus nombres y argumentos, sea cual sea la forma en la que se han implementado. Esto podría denominarse independencia entre programas y operaciones.

Algunas bases de datos convencionales no son adecuadas para los sistemas actuales de producción. En una instalación con miles de variables que supervisar, en donde se requiere almacenarlas cada segundo, es necesario el almacenamiento de millones de registros al cabo de unas cuantas semanas de trabajo.

Comúnmente se dan algunas limitaciones para la utilización de bases de datos en ambientes industriales, como por ejemplo la cantidad de datos a almacenar en un período de tiempo o el espacio necesario para almacenar tal cantidad de información.

Sistemas de información industriales se han desarrollado para solucionar el problema de procesamiento y almacenamiento de grandes cantidades de información en períodos cortos de tiempo, aumentando de esta manera el rendimiento general de los sistemas.

3. REDES INDUSTRIALES

La comunicación de datos implica la transferencia de información de un punto a otro. Muchos sistemas de comunicación manejan señales análogas como es el caso del teléfono, la radio y la televisión. La instrumentación moderna en su mayor parte se ocupa de transferir señales digitales.

Una red de control está formada por un grupo de nodos que se comunican sobre uno o más medios utilizando un protocolo estándar. Cada nodo puede contener numerosos sensores y actuadores, además de capacidades computacionales. El número de nodos en una red de control puede variar desde cientos hasta miles de ellos en un mismo sistema.

Comparando las redes de control con las redes de datos, a pesar de que ambas tienen mucho en común, tienen objetivos de diseño claramente diferentes. Una red de datos se ocupa fundamentalmente de la velocidad real de transporte de los datos, mientras que una red de control toma en cuenta la confiabilidad, la sensibilidad y la capacidad de predicción como factores de mayor importancia.

Como las redes de comunicación industrial juegan un papel crítico en los sistemas actuales de control, es de vital importancia que estas redes tengan el mayor grado de confiabilidad posible.

El incremento en el uso de protocolos para la comunicación con elementos de campo y la expansión de las redes de control hasta estos elementos finales (sensores y actuadores) implica que si las redes no alcanzan

los niveles esperados de confiabilidad, la confiabilidad de todo el proceso de producción será cuestionable. Un sistema que falla regularmente puede ser tan malo para la producción como un sistema que envía la información incorrecta.

Para satisfacer este objetivo, es necesario tener un adecuado conocimiento de los conceptos y herramientas para diseñar, implementar y mantener un sistema.

3.1. Fundamentos

Las redes de comunicaciones industriales tienen su origen en las Redes de Campo (FieldBus), cuando la Fundación FieldBus desarrolla un nuevo protocolo de comunicación para la medición y control de procesos donde todos los instrumentos puedan comunicarse en una misma plataforma.

Siempre que existan señales conectando diferentes dispositivos de control, también existirán retos asociados con mantener la confiabilidad de un sistema. En la industria se espera una confiabilidad de 100%, aunque esto nunca puede ser logrado. Sin embargo, se ha llegado a alcanzar niveles de confiabilidad bastante altos, i.e. 99.9999 %, lo que se traduce a un período de 30 segundos/año de fallas o inactividad.

Para mantener el alto grado de confiabilidad esperado distintos protocolos son diseñados para su aplicación en entornos industriales en donde las condiciones de trabajo son severas en comparación al de entornos de otros sistemas de información.

De hecho, se puede decir que la tecnologías de la información (TI) tienen una cultura distinta a las tecnologías aplicadas en la industria.

Algunas personas piensan que las técnicas utilizadas en TI pueden ser aplicadas a un ambiente industrial. Esto es parcialmente correcto: puede existir una participación activa entre TI y automatización, pero también existen diferencias significativas en el enfoque conceptual entre las operaciones de red en una planta de producción y en un ambiente de oficina.

Tabla IV. Sistemas aplicados a negocios vs. plantas de producción

	Sistemas de negocios	Plantas de producción
Fiabilidad	<ul style="list-style-type: none"> • Fallas ocasionales toleradas • Versiones de prueba aceptables 	<ul style="list-style-type: none"> • Intolerancia a los apagones • Rigurosas pruebas de aseguramiento de calidad esperadas
Impacto de riesgo	<ul style="list-style-type: none"> • Pérdida de datos 	<ul style="list-style-type: none"> • Pérdida de producción, equipos, vidas humanas
Rendimiento	<ul style="list-style-type: none"> • Exigencia de alto rendimiento • Retardos aceptados 	<ul style="list-style-type: none"> • Rendimiento modesto aceptable • Grandes retrasos son una preocupación seria
Manejo de riesgos	<ul style="list-style-type: none"> • Recuperación por reinicio • La seguridad no es problema 	<ul style="list-style-type: none"> • Esencial la tolerancia a fallos • Análisis explícito de riesgos esperado

Seguridad	<ul style="list-style-type: none"> • La mayoría de sitios inseguros • Poca separación entre intranets en el mismo sitio • El enfoque es la seguridad del servidor central 	<ul style="list-style-type: none"> • Rigurosa seguridad física • Red de sistema de información para los cuadros dirigentes aislada de la red de planta • El enfoque es la estabilidad del dispositivo de control, el cual está en la periferia
------------------	--	---

Las TI tienen una cultura y metas diferentes a las de las fábricas de producción. Esto quiere decir que, en términos de confiabilidad, se pueden permitir ser más experimentales. En las oficinas son tolerables tiempos cortos de inactividad en la red, situación que bloquearía la habilidad de producción de una planta de producción.

Como resultado, se paga un precio en términos de confiabilidad a menos que los profesionales de automatización hagan uso de ambientes diseñados para redes industriales o bien se aseguren que los profesionales de TI comprendan realmente los requerimientos industriales. Generalmente la cooperación entre TI y automatización es la mejor solución.

En el mundo de TI pequeñas fallas en el software son aceptables. La prioridad es el rendimiento y no la confiabilidad. Eso es lo que se acepta y se espera en el mercado. La cultura es completamente diferente en una planta de producción, donde el diseño es robusto y conservador. En este ambiente los problemas se enfrentan y se solucionan en un lapso muy corto de tiempo, garantizando su solución. Existen algunas áreas en TI que trabajan de manera similar al ambiente industrial. Tal es el caso de las compañías telefónicas, en donde el ambiente de trabajo se enfoca a la confiabilidad de los procesos.

3.1.1. Terminología y conceptos básicos

A pesar de que existen distintos tipos de redes de comunicación con propósitos específicos, todos ellos parten de una serie de ideas básicas que nunca cambian:

- Una red es un medio eléctrico de transmisión con limitantes impuestas por factores físicos.
- Existen transmisores y receptores que deben comunicar información entre ellos. Su administración se dificulta a medida que esta comunicación se hace a mayor distancia y a medida que la topología se vuelve más compleja.
- Siempre es necesario tener mecanismos de detección y corrección de los errores de transmisión.
- Los protocolos de comunicación establecen un lenguaje de comunicación entre los dispositivos. Por medio de su adopción es posible comprender el mensaje transmitido. Sin el uso de protocolos estándares de comunicación todo sería como una Torre de Babel.

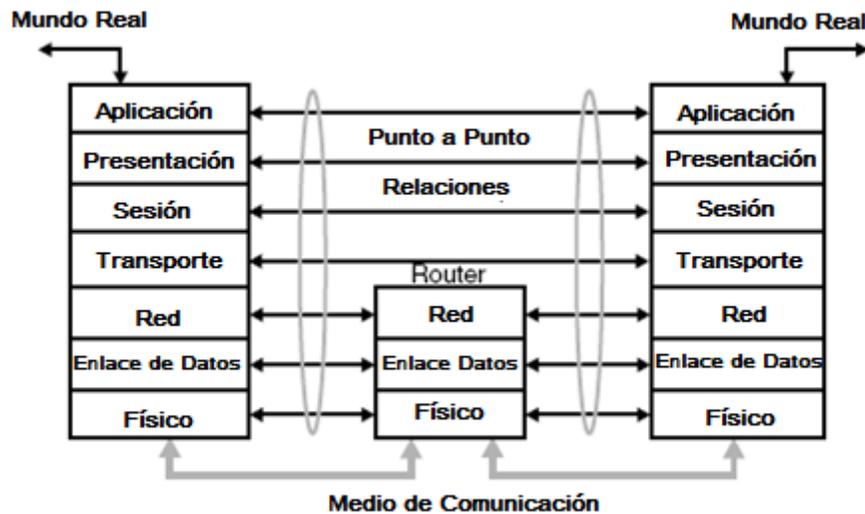
Todos los tipos de red tienen ciertas cosas en común. Ningún tipo de red en particular es la solución para todos los problemas de la actualidad. Aunque la tecnología es mucho más madura, la red ideal no está más cerca de ser alcanzada que hace dos décadas. En todos los tipos de redes, se debe de sacrificar alguna característica para obtener otra:

- **Determinismo vs. Rendimiento.** Es posible manejar más tráfico de información en una red si no se necesita garantizar que todos los dispositivos tenga igual posibilidad de acceso a toda hora.
- **Distancia vs. Ancho de banda.** Entre más grande es la red, mayor retraso de transmisión y mayor atenuación de altas frecuencias.
- **Gastos en hardware vs. Gastos en software.** El aumento de dispositivos de hardware aumenta el rendimiento pero aumenta al mismo tiempo los requerimientos de diseño y programación.
- **Funcionalidad vs. Costos.** Una amplia lista de características en un sistema generalmente requiere una compleja y costosa instalación.
- **Simplicidad vs. Flexibilidad.** Un sistema fácil y simple de usar con frecuencia posee limitada funcionalidad.
- **Apertura vs. Seguridad.** La interoperabilidad de algunos sistemas puede hacerlos vulnerables a ataques de piratas informáticos.

3.1.2. Modelo OSI

El modelo OSI desarrollado por ISO (Organización internacional para la Estandarización) rápidamente está ganando el respaldo de la industria. El modelo OSI simplifica los problemas de diseño y comunicación dividiéndolos en capas.

Figura 25. Representación del modelo OSI



Los mensajes generalmente son enviados en paquetes, los cuales son simplemente secuencias de bytes. El protocolo define la longitud del paquete. Con el fin de que el transmisor conozca hacia donde enviar un paquete y el receptor desde donde proviene éste, cada paquete requiere una dirección destino y una dirección origen.

Un paquete inicia desde la parte superior de la pila de capas (capa de aplicación) y continua hacia abajo a través de las otras capas llegando finalmente a la capa física. Es allí donde se envía a través del enlace físico. Al viajar descendentemente en la pila, cada paquete adquiere información adicional de cabecera (encabezado) en cada capa. Esta información le indica a las capas correspondientes en la siguiente pila qué hacer con el paquete. En el extremo receptor el paquete viaja ascendentemente por la pila en donde cada encabezado es suprimido a lo largo del viaje. La capa de aplicación en el receptor solamente recibe la información enviada por la capa de aplicación del transmisor.

Las flechas entre capas indican que cada capa interpreta el paquete que viaja hacia o desde la capa correspondiente en el extremo opuesto. Esto es conocido como comunicación *peer-to-peer*, aunque el paquete es transportado a través del enlace físico. La pila del medio en la figura anterior representa a un ruteador el cual consta solamente de las tres capas inferiores requeridas para la correcta transmisión de un paquete entre los dos dispositivos de este caso en particular.

El modelo OSI es útil proveyendo una estructura universal para todos los sistemas de comunicación, sin embargo no define el protocolo a usar en cada capa. Así, se espera que grupos de fabricantes en distintas áreas de la industria colaboren en la definición de estándares de software y hardware apropiados para su área en particular. Aquellos en busca de un marco general para sus requerimientos específicos de comunicación han acogido entusiastamente el modelo OSI y lo han usado como base para sus estándares específicos industriales.

3.2. Protocolos y estándares industriales de comunicación

Observando algunos de los problemas más comunes asociados con los sistemas de control a través de los años, es posible observar como cada nueva generación de las comunicaciones que ha ido surgiendo reduce el impacto de fallas previas pero agrega a la vez nuevas preocupaciones que necesitan ser atendidas.

En las redes de comunicación, debe de existir un acuerdo mutuo en como los datos son codificados, es decir que el receptor debe de entender lo que el transmisor el envía. La estructura en base a la cual los dispositivos se comunican es conocida como *protocolo*.

En las últimas décadas, muchos estándares y protocolos han sido establecidos, lo que permite en la industria usar de manera más efectiva las tecnologías de comunicación de datos. Los diseñadores y usuarios han comenzado a darse cuenta de las ventajas económicas y productivas que representa la integración de sistemas que ya están en uso.

Un protocolo es la estructura utilizada en un sistema de comunicación con el fin de que sus dispositivos se comuniquen. Tradicionalmente los desarrolladores de plataformas de software y de hardware han desarrollado protocolos que solamente sus productos pueden utilizar. Con el fin de desarrollar sistemas de control y de instrumentación más integrados, la estandarización de estos protocolos de comunicación ha sido requerida.

Los estándares pueden evolucionar desde el uso de un protocolo de solo un fabricante (un estándar *de facto*) o bien ser desarrollados específicamente por agrupaciones que representan industrias específicas. Los estándares

permiten a los fabricantes desarrollar productos que tengan la capacidad de comunicarse con otros productos ya en uso. Para el consumidor esto simplifica la integración de productos de diferentes fabricantes.

El mercado de comunicaciones industrial es caracterizado por la falta de estandarización. No obstante, existen algunos pocos estándares dominantes. Algunas áreas de aplicación incluso han generado considerable angustia e irritación entre vendedores y usuarios.

El modelo OSI provee un marco en base al cual un protocolo en específico puede ser definido. Un protocolo, en cambio, establece el formato de la trama de información definiendo campos como sincronización, dirección de destino, dirección de origen, datos y detección de errores.

Figura 26. Estructura básica de una trama de información

Byte de Sincronización	Dirección de Destino	Dirección de Origen	Datos	Byte de Detección de Error
-------------------------------	-----------------------------	----------------------------	--------------	-----------------------------------

Los protocolos pueden ser desde muy simples (e.g., protocolos basados en ASCII) hasta muy complicados (e.g., TCP/IP) operando a altas velocidades de transferencia.

En general no existen protocolos buenos y malos. La elección de un protocolo depende de la aplicación en particular.

Entre los estándares y protocolos usados en las redes de comunicación industriales se encuentran:

- RS-232 (EIA-232)
- RS-485 (EIA-485)
- Fiber optics
- Modbus
- Modbus Plus
- Data Highway Plus /DH485
- HART
- ASi
- DeviceNet
- Profibus
- Foundation Fieldbus
- Industrial Ethernet
- TCP/IP
- Radio and wireless communications

3.2.1. Estándar de interfaz EIA-232

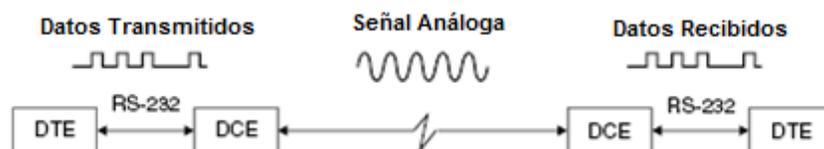
El estándar de interfaz EIA-232 fue desarrollado con el único propósito de interconectar el equipo terminal de datos (DTE, por su acrónimo en inglés) con el equipo terminal de comunicaciones (DCE, por su acrónimo en inglés). Se emplea un intercambio de datos seriales en forma binaria. Particularmente, EIA-232 fue desarrollado para proveer una interfaz entre los terminales de datos y los módems.

EIA-232 fue desarrollado en Estados Unidos en el año 1969 para definir los detalles eléctricos y mecánicos de la interfaz entre el DTE y el DCE empleando un intercambio binario serial de datos.

En las comunicaciones seriales de datos, un sistema puede consistir de lo siguiente:

- Una DTE, la terminal que envía los datos (e.g., una computadora). Es la fuente de los datos los cuales son usualmente codificados.
- Una DCE, que actúa como convertidor de datos (e.g., un módem) transformando la señal en una forma apropiada para el enlace de comunicaciones.
- El enlace o canal de comunicaciones.
- Un receptor (DCE) que convierte la señal análoga del canal de transmisión de vuelta en la forma adecuada para la terminal de recepción.
- Una terminal receptora de datos (DTE) la cual recibe la señal digital para su decodificación.

Figura 27. Enlace de comunicación de datos serial típico



El estándar EIA-232 describe la interfaz entre la terminal DTE y la terminal DCE específicamente para la transferencia de dígitos binarios seriales. Permite a los diseñadores de protocolos de hardware y software mucha flexibilidad. Con el pasar del tiempo este estándar ha sido adoptado para su uso en numerosos tipos de equipos (computadoras personales, impresoras,

controladores programables, programadores lógicos programables (PLC, instrumentos, etc.). Para reconocer estas aplicaciones adicionales el significado del acrónimo DCE se ha ampliado a *data circuit-terminating equipment* (equipo de terminación de circuitos de datos).

EIA-232 tiene ciertas debilidades que no lo hacen adecuado para la comunicación en instrumentación y control en ambientes industriales. Como consecuencia otros estándares de interfaz han sido desarrollados para superar algunas de estas limitaciones. De estos, los estándares más comúnmente usados en sistemas industriales son EIA-423, EIA-422 y EIA-485.

3.2.2. Estándar de interfaz EIA-485

EIA-485 es uno de los estándares de interfaz EIA más versátiles. Es una extensión de EIA-422 y permite la misma distancia y velocidad de transferencia, pero aumentando el número de transmisores y receptores en el enlace. Permite comunicación serial de datos confiable para:

- Distancia de hasta 1200 metros (al igual que EIA-422).
- Tasa de transferencia de datos de hasta 10 Mbps (al igual que EIA-422).
- Hasta 32 transmisores en el mismo enlace.
- Hasta 32 receptores en el mismo enlace.

La máxima distancia y velocidad, sin embargo, no pueden ser alcanzadas al mismo tiempo. Ambos parámetros son inversamente proporcionales. Por ejemplo, se puede transmitir a una distancia de 1200 m a 90 Kbps, mientras que solo es posible transmitir por menos de 6 metros a una velocidad de 10 Mbps.

maestra (e.g., una computadora) controla qué dispositivo estará activo en un tiempo determinado.

3.2.3. Modbus

Este protocolo fue desarrollado para sistemas de control de procesos. Este estándar solamente se refiere a la capa de red y de aplicación, por lo cual cualquier método físico de transporte puede ser utilizado. Es un estándar muy popular que opera en un ambiente esclavo-maestro con hasta 247 esclavos.

Figura 29. Formato de mensaje de Modbus

Campo de Dirección	Campo de Función	Campo de Datos	Campo de Verificación de Error
1 Byte	1 Byte	Variable	2 Bytes

El Campo de Dirección se refiere al número de un equipo esclavo en particular al cual se está accedendo. El Campo Función indica la operación que se está realizando, por ejemplo, lectura o escritura analógica o digital en el equipo esclavo. El Campo de Datos es la información que se está transfiriendo entre el maestro y el esclavo. Por último, el Campo de Revisión de Errores es para asegurar la integridad del mensaje.

3.2.4. Modbus Plus

Además del protocolo estándar Modbus, existen 2 estructuras más de protocolos Modbus:

- Modbus Plus
- Modbus II

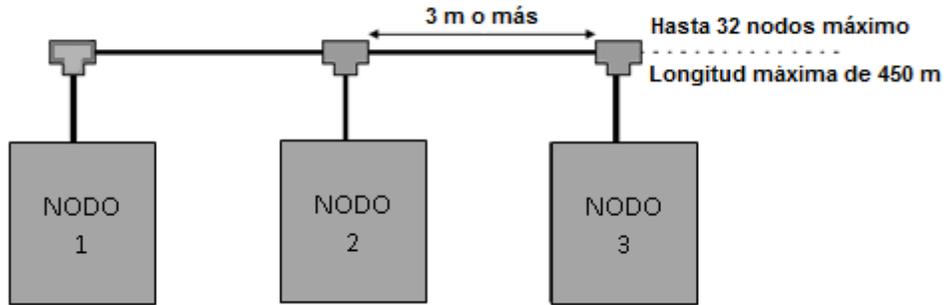
Modbus Plus es más popular y no es un estándar abierto, como es el caso de Modbus. Por su parte, Modbus II no es muy utilizado debido a requerimientos de cableado adicional y otras dificultades.

El protocolo Modbus Plus fue desarrollado para superar la limitación de Modbus de un solo servidor. Modbus Plus es un sistema de red de área local (LAN) diseñado para aplicaciones de control industriales.

Los dispositivos en red pueden intercambiar información para el control y monitoreo de procesos de lugares remotos en la planta industrial. La red Modbus Plus fue una de las primeras redes en hacer uso de *tokens*, que impulsó el desarrollo de protocolos deterministas más avanzados.

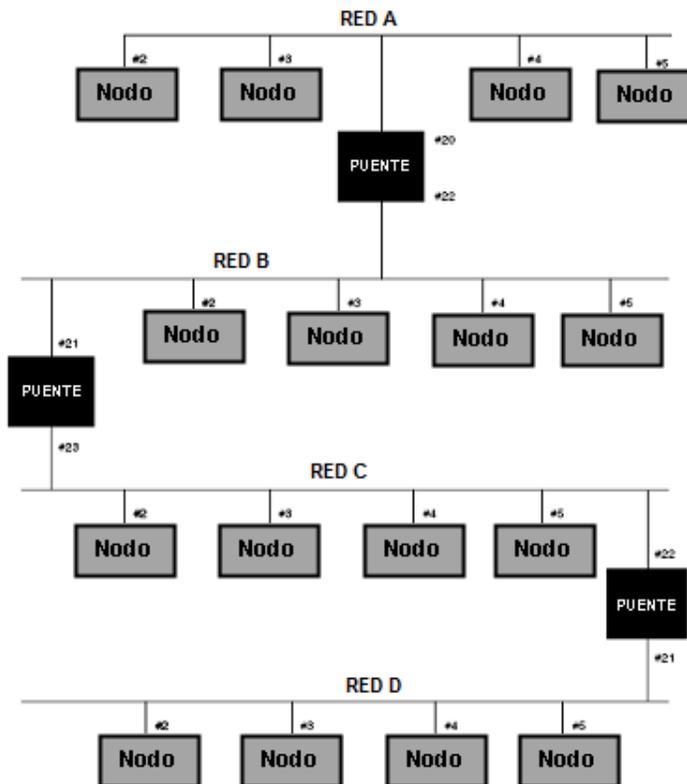
Hasta 64 dispositivos son permitidos en un segmento de red, en donde a cada dispositivo deberá de ser asignada una única dirección de red (comprendida entre 01 y 64). Hasta 32 nodos pueden ser directamente conectados directamente al cable de red a una distancia de 450 metros. Un repetidor puede extender la distancia del cable hasta 1800 metros y el número de nodos a 64. Repetidores de fibra óptica están disponibles para alcanzar mayores distancias.

Figura 30. Red típica para Modbus Plus



Múltiples redes pueden ser interconectadas por medio de Puentes o *Brigdes*. Cuando varias redes se interconectan de esta forma, los *tokens* no son pasados a través del Puente. Con una configuración adecuada, es posible implementar una red funcional Modbus Plus fácilmente.

Figura 31. Múltiples redes Modbus Plus interconectadas



3.2.5. DeviceNet

Desarrollado por Allen Bradley es una especificación abierta de red de bajo nivel diseñada para interconectar dispositivos de bajo nivel (sensores y actuadores) con dispositivos de alto nivel (controladores). DeviceNet está basado en el protocolo CAN (*Controller Area Network*) desarrollado para la industria automotriz por la compañía alemana Bosch.

DeviceNet puede soportar hasta 64 nodos, los cuales pueden ser removidos individualmente aún con la red energizada y sin dañar la línea de transmisión. De los 64 nodos soportados, cada uno puede tener hasta 2048 dispositivos. Un cable de 4 conductores provee la energía y la comunicación de datos. Las velocidades de transmisión son 125, 250 y 500 Kbps.

DeviceNet implementa solamente las capas 1, 2 y 7 del modelo OSI. Las capas 1 y 2 se refieren a la infraestructura de red básica, mientras que la capa 7 provee una interfaz para el software de aplicación. Debido a la ausencia de las capas 3 y 4, no es posible el ruteo y control de tráfico.

Figura 32. DeviceNet y el modelo OSI



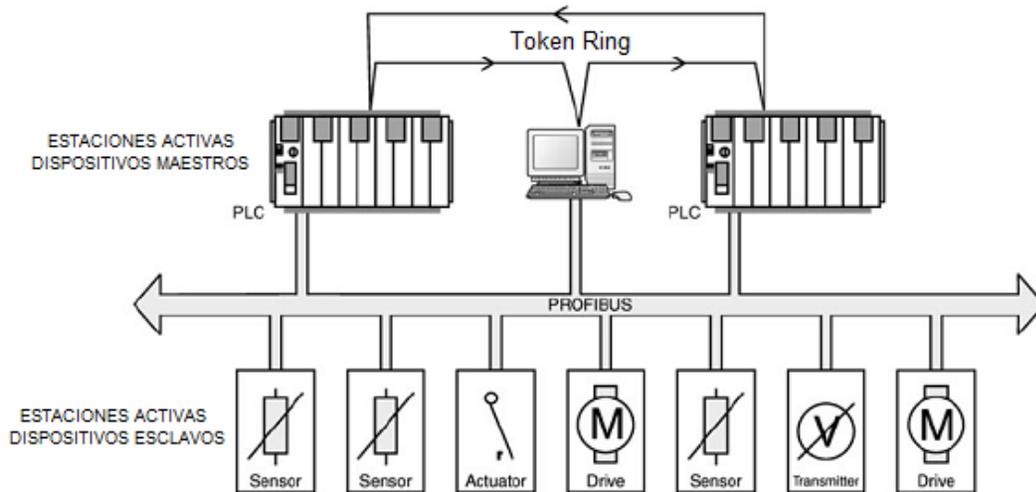
3.2.6. Profibus

Profibus (*PROcess Field BUS*) es un estándar abierto e independiente que se acopla al modelo OSI y asegura una comunicación efectiva y fácil entre dispositivos de diferentes vendedores.

Este estándar de red es aceptado internacionalmente y es aplicado comúnmente en procesos de control y en máquinas de manejo de material y ensamblaje de gran escala.

Se definen 3 capas del modelo OSI: Capa Física, Capa de Enlace de Datos y Capa de Aplicación.

Figura 33. Arquitectura típica de un sistema ProfiBus



El número de nodos está limitado a 127. La distancia máxima es de 24 km (haciendo uso de repetidores y transmisores de fibra óptica), con velocidades de entre 9600 bps a 12 Mbps. El tamaño del mensaje en un nodo

puede ser de hasta 256 bytes, mientras que el mecanismo de control de acceso al medio es *polling* o bien *token passing*.

Profibus soporta dos tipos principales de dispositivos:

- **Maestro.** Controla el bus y cuando tiene derecho de acceso en el bus, puede transferir mensajes sin ninguna solicitud remota. También es conocido como estación activa.
- **Esclavo.** Es típicamente un dispositivo periférico (i.e., transmisor, sensor y actuador). Solo puede recibir mensajes o, al ser solicitado por un dispositivo maestro, transmitir mensajes. También es conocido como estación pasiva.

Existen diferentes versiones de este estándar:

- **Profibus DP (*distributed peripheral*).** Permite el uso de múltiples dispositivos maestros, es donde cada dispositivo esclavo es asignado a un maestro. Esto significa que múltiples maestros pueden recibir información de un dispositivo, pero solamente un maestro podrá enviar información a dicho dispositivo. Profibus DP está diseñado para transferencia de datos de alta velocidad.
- **Profibus FMS (*Fieldbus message specification*).** Es un formato de mensaje punto a punto que permite a los dispositivos maestros comunicarse entre ellos. Hasta 126 nodos están disponibles (al igual que en Profibus DP) y, si se desea, todos pueden ser maestros. Los mensajes FMS consumen más espacio que los mensajes DP.

- **Modo COMBI.** Es una combinación de FMS y DP. Es comúnmente usado en situaciones en donde un PLC es usado en conjunto con una PC, y el dispositivo maestro principal se comunica con el maestro secundario vía FMS. Los mensajes DP son enviados en la misma red hacia los dispositivos E/S.
- **ProfiBus PA.** Es el mismo estándar que ProfiBus DP, con la excepción de que los niveles de voltaje y corriente son menores con el fin de cumplir los requerimientos intrínsecos de seguridad de la industria de procesos. Muchas tarjetas DP/FMS soportan ProfiBus PA, pero se necesita una conversión entre DP/FMS y PA.

Todas las variaciones de ProfiBus (FMS, DP y PA) utilizan el mismo protocolo de Enlace de Datos (capa 2). FMS y PA usan el mismo protocolo de Capa Física (capa 1), mientras PA utiliza una variación con la finalidad de acomodarse a los requerimientos intrínsecos de seguridad.

3.2.7. Foundation Fieldbus

Foundation Fieldbus toma ventaja de los nuevos dispositivos inteligentes y tecnología digital moderna, permitiendo a los usuarios beneficios tales como:

- Menor cableado.
- Comunicación de múltiples variables de proceso desde un solo instrumento.
- Diagnósticos avanzados.
- Interoperabilidad entre dispositivos de diferentes fabricantes.
- Control de nivel de campo mejorado.
- Tiempo de arranque reducido.
- Integración simple.

El concepto detrás de *Foundation Fieldbus* es preservar las características deseables del estándar 4-20 mA (como por ejemplo una interfaz estándar con el enlace de comunicación, el bus de poder derivado del enlace y las opciones de seguridad intrínsecas) mientras se aprovechan las nuevas tecnologías digitales.

El protocolo consiste de las siguientes capas del modelo OSI: Capa 1 (Capa Física), Capa 2 (Capa de Enlace de Datos) y Capa 7 (Capa de Aplicación). Además existe una Capa 8, que corresponde a la Capa de usuario, la cual provee una interfaz estándar entre el software de aplicación y los dispositivos de campo.

3.2.8. Ethernet Industrial

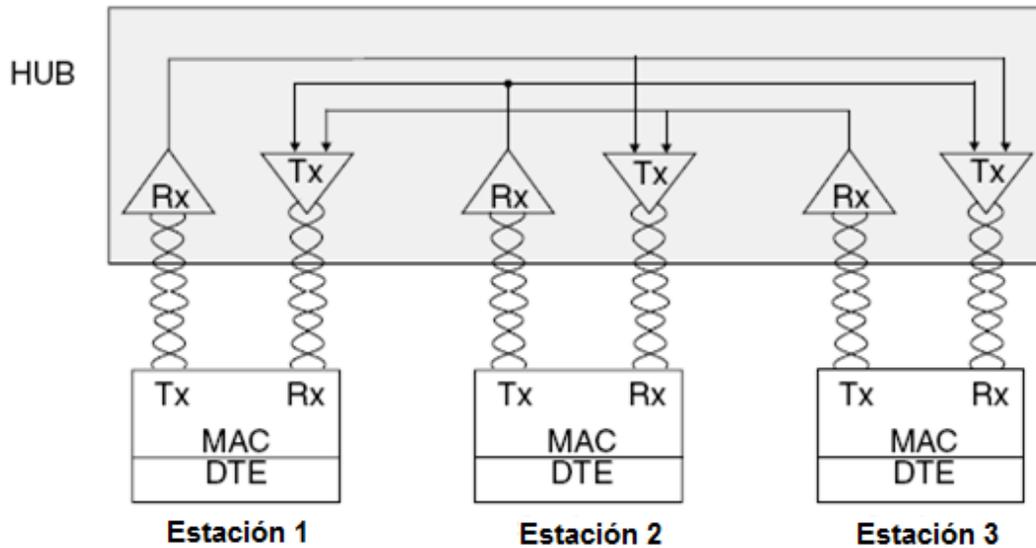
Al inicio, Ethernet Industrial fue rechazado por no ser considerado lo suficientemente confiable. A pesar de esto, su éxito radica en su simplicidad y bajo costo.

Originalmente, Ethernet usaba solamente CSMA/CD (*Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection*) como método de acceso al medio. Este es un método no determinista, no ideal para aplicaciones de procesos control de procesos.

Ethernet ha sido modificado para su uso industrial. Esto ha hecho posible avances en ambientes de control de procesos. Al inicio, Ethernet fue desarrollado principalmente para ambientes de oficina, sin embargo se han dado avances rápidos en los últimos años. Ha ganado mucha aceptación en el área industrial, hasta el punto de convertirse en la tecnología de bus por excelencia. Como indicador de esta tendencia se encuentra la incursión de Ethernet en los niveles 1 y 2 de la infraestructura para Modbus/TCP, Ethernet/IP, ProfiNet y Foundation Fieldbus.

La mayor parte de los sistemas Ethernet industriales modernos funcionan a 100 Mbps (*full-duplex*) y permiten prioridad en los puertos del conmutador, resultando un comportamiento determinista. Esto es mucho más simple que el método de comunicación *token-passing*. Un ejemplo típico de una topología 100BaseTX se muestra a continuación:

Figura 34. Topología en Estrella 100BaseTX



Ethernet Industrial ha superado los siguientes problemas relacionados a Ethernet:

- Cableado y conectores.
- Tamaño y encabezado de la trama Ethernet.
- Ruido e interferencia.
- Particionamiento de la red.
- Tecnología de conmutación.
- Confiabilidad y disponibilidad.

4. DISEÑO DE UNA RED INDUSTRIAL

4.1. Rendimiento de un protocolo de comunicación de datos industrial en una red Ethernet

Los sistemas de control industrial convencionales generalmente adoptan un enfoque de control centralizado maestro-esclavo. Un controlador central (maestro) realiza importantes decisiones de control sobre los dispositivos periféricos mediante conexiones punto a punto. Aunque esto es confiable, dicha arquitectura de control no es flexible para implementaciones y configuraciones de largo plazo. A los proveedores y usuarios de equipo industrial les preocupa principalmente el comportamiento no determinista de las características de las redes industriales de comunicación. En general no existe garantía alguna de que los datos enviados por una fuente a través de un canal de comunicación lleguen a su destino. Debido a esto nuevos protocolos y métodos han sido desarrollados para superar dichas limitaciones.

Con el desarrollo de la tecnología de redes de computadoras y de sensores y actuadores inteligentes, actualmente la tecnología Modbus TCP/IP es cada vez más utilizada. Modbus ha sido diseñada para conectar dispositivos de campo. Es un tipo de sistema de comunicación en tiempo real basado en la estructura de capas del modelo OSI. La reducción del retraso en la transmisión es una de las mayores consideraciones para sistemas de control en tiempo real. Para distintos sistemas de control, distintos enfoques son adoptados de acuerdo a los requerimientos del sistema.

Con el crecimiento en tamaño y complejidad de las redes de computadoras, el rendimiento en la administración de redes de datos se ha vuelto más importante. El monitoreo de cambios en la topología y en el flujo de tráfico son esenciales para administrar las redes de comunicación dinámicas. Un rendimiento determinista de Modbus es esencial para aplicaciones de adquisición de datos y control de supervisión. La implementación de las últimas tecnologías de conmutación puede no ser suficiente para asegurar el determinismo requerido, en caso de que dichas tecnologías no sean cuidadosamente diseñadas.

Una cuidadosa inspección de componentes de una red (e.g. tráfico, infraestructura, protocolos utilizados) puede ayudar a un mejor rendimiento y confiabilidad de la misma. Entre las ineficiencias que afectan a una red están las congestiones de tráfico, dispositivos o usuarios no autorizados en la red, uso innecesario de protocolos, colisiones excesivas, errores, retrasos, y tráfico excesivo generado por dispositivos de la red. Identificando y corrigiendo dichos problemas se producirá una red más efectiva, rápida y limpia.

Con el uso de Modbus TCP/IP muchos de los problemas en automatización pueden ser resueltos. Se logra así una nueva manera de desarrollar proyectos de automatización industrial.

4.1.1. Comunicación Modbus

Modbus es un protocolo de mensajería de capa de aplicación, ubicado en la capa 7 del modelo OSI. Contrario a otros protocolos, Modbus no define interfaz física de capa 1.

Este protocolo provee una comunicación cliente-servidor entre dispositivos conectados en diferentes tipos de buses o redes. Ha sido conocido como el estándar serial industrial de preferencia desde 1979 y aún continúa siendo utilizado en la comunicación de numerosos dispositivos de automatización. Modbus utiliza el puerto reservado 502 en la pila de protocolos TCP/IP. Es un protocolo de petición y respuesta que permite una comunicación fácil dentro de todos los tipos de arquitectura de red. Todos los tipos de dispositivos (controladores, HMI, actuadores, sensores, etc.) pueden usar este protocolo para inicializar una operación remota.

El protocolo serial Modbus es un protocolo maestro-esclavo ubicado en la capa 2 del modelo OSI. Un sistema de tipo maestro-esclavo tiene un nodo (nodo maestro) que envía comandos explícitos a unos de los nodos esclavos y procesa las respuestas. Típicamente los nodos esclavos no transmitirán datos sin un requerimiento previo del nodo maestro, y no se comunican con otros nodos esclavos.

El mapeo del protocolo Modbus en un bus o red específica incluye algunos campos adicionales en la unidad de datos de protocolo o PDU como se muestran en la Figura 29.

Con el fin de establecer una comunicación apropiada, el nodo que inicia una comunicación Modbus construye el PDU y agrega la información en los campos correspondientes.

La capa de enlace de red está compuesta por dos sub-capas:

1. El protocolo maestro-esclavo.
2. El modo de transmisión.

4.1.2. Ethernet y Modbus TCP/IP

Ethernet/IP utiliza una arquitectura *peer-to-peer* y productor-consumidor para el intercambio de datos, a diferencia de la arquitectura de maestro-esclavo y comando-respuesta. Esto permite una mayor flexibilidad en la red y en el diseño de sistema, lo cual encaja mejor en el modelo de redes Ethernet. Además, Ethernet/IP separa su comunicación en tráfico de configuración y tráfico de administración. El tráfico de configuración y administración utiliza TCP/IP, mientras que el tráfico de tiempo real utiliza UDP/IP.

El modelo productor-consumidor permite que múltiples modos de comunicación puedan ser elegidos para el intercambio de datos en tiempo real. El modo más común de generación de datos es llamado *producción cíclica*. Durante este modo, el productor envía información a una frecuencia particular llamado *Intervalo de solicitud de paquetes* (RPI, por su acrónimo en inglés). El RPI y el *Intervalo de aceptación de paquetes* establecen la velocidad de los datos generados en la red a pesar de la frecuencia a la cual el valor los datos cambia.

Ethernet/IP usa además un modelo orientado a objetos. Algunos objetos, tales como objeto de identidad, objeto TCP/IP y objeto de enlace Ethernet son requeridos por todos los dispositivos Ethernet/IP. Otros objetos son específicos a cada dispositivo, y aunque la definición básica de éstos pueda existir en la especificación, la información exacta contenida en el objeto es específica al dispositivo y a la aplicación.

Un sistema de comunicaciones sobre Modbus TCP/IP puede incluir diferentes tipos de dispositivos:

1. Dispositivos cliente y servidor Modbus TCP/IP conectados a la red TCP/IP.
2. Dispositivos de interconexión como puentes, enrutadores o puerta de enlace para la interconexión entre la red TCP/IP y la subred serial la cual permite comunicación entre clientes Modbus serial y servidores.

4.1.3. Protocolo CSMA p -Persistente y Predictivo

El algoritmo de control de acceso al medio MAC es ampliamente utilizado para controlar el acceso de un nodo a un medio o canal compartido. Existen muchas variantes derivadas del método de Acceso Múltiple por Detección de Portadora (CSMA), entre las que se encuentran CSMA no persistente, CSMA 1-persistente, CSMA p -persistente, CSMA/CD, etc. Estos algoritmos son exitosos en redes insensibles al tiempo, como por ejemplo Ethernet. En cambio para sistemas de control de tiempo real sensibles al tiempo, dichos algoritmos no son adecuados. Con el fin de satisfacer los requerimientos en tiempo real, el protocolo *CSMA p -persistente y predictivo* fue desarrollado.

Para evaluar el rendimiento en cada protocolo, se toman en cuenta varios parámetros. La *utilización del canal* se refiere a la fracción de tiempo utilizada para transmitir exitosamente paquetes en el canal. La máxima utilización del canal es llamada *capacidad del canal* y se da al maximizar la utilización con respecto a la carga ofrecida. La utilización del canal es maximizada al balancear el tiempo gastado en colisiones con el tiempo ocupado

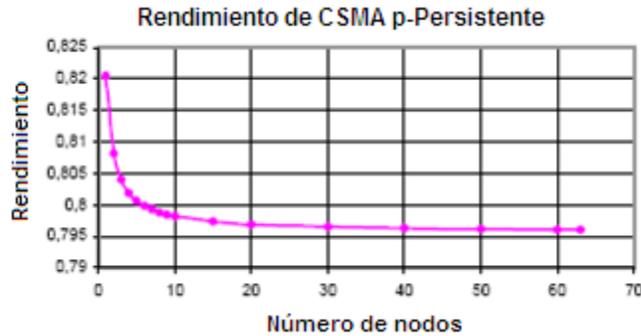
para monitoreo del canal. La capacidad de un protocolo es una de las medidas principales que caracterizan a los protocolos MAC. La capacidad equivale a 1 para un protocolo MAC ideal. La capacidad del canal depende de varios parámetros de red, principalmente del número de nodos activos y de su contribución a la carga total.

Para el caso de CSMA p -persistente, el cual es uno de los algoritmos CSMA más utilizados, un nodo compitiendo por el canal compartido transmite con probabilidad p si el canal está disponible y posterga la transmisión con una probabilidad $(1-p)$ en caso de que el canal esté ocupado. El uso de canal es fuertemente afectado por el valor p , el cual representa el *nivel de persistencia* del protocolo. En particular, p con valores grandes causa colisiones excesivas, mientras que p con valores pequeños degradan la utilización del ancho de banda forzando al canal a estar disponible. Con el fin de mantener la utilización del ancho de banda en un nivel satisfactorio, un equilibrio entre valores grandes y pequeños es necesario.

Para un nivel de persistencia p , se maximiza la utilización del canal solamente para un número predeterminado de nodos involucrados. Si el número de nodos no es conocido *a priori* o varía con el tiempo, el valor p no puede ser ajustado de manera óptima, por lo que el rendimiento del protocolo CSMA p -persistente puede ser degradado considerablemente.

En la siguiente figura se muestra la capacidad del canal (o rendimiento) obtenida por [2] de CSMA p -persistente en función del número de nodos activos en la red. Se observa que es una función decreciente debido al incremento de la probabilidad de colisiones. La capacidad del canal con un mínimo error puede ser asumida constante y aproximadamente 0.8 para longitudes de paquetes en el orden de 10 bytes (usados típicamente en redes de control).

Figura 35. Capacidad del canal para CSMA p -Persistente

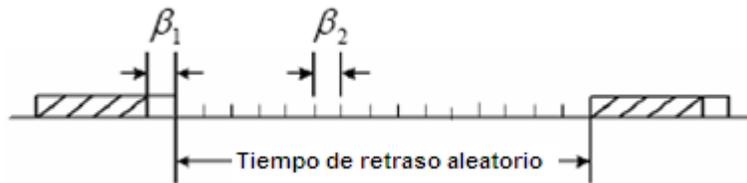


Por su parte, en el algoritmo *CSMA p -persistente y predictivo* la probabilidad p es variable y dinámicamente ajustada a la carga de tráfico esperada. Ha sido diseñado para redes de control en donde el tráfico producido por los dispositivos se puede dar por ráfagas. Dicho protocolo es implementado en la subcapa MAC del protocolo LonTalk registrado bajo los estándares ANSI/EIA 709.1 y ENV 13154-2 y es utilizado en la tecnología de Redes de Operación Local (LonWorks), para comunicación entre sensores inteligentes y actuadores, desarrollada por la empresa estadounidense Echelon Corporation.

La probabilidad p de que un mensaje sea transmitido cuando el canal de comunicación está disponible varía de acuerdo al estado del tráfico. Cuando el tráfico es alto, p es bajo. Cuando el tráfico decrementa, p incrementa. Esto disminuye las colisiones durante alto tráfico y mejora la utilización del canal cuando el tráfico es bajo. Para este protocolo, un nodo que está listo para transmitir un mensaje detectará el estado del canal antes de la transmisión. Si en el canal se detecta inactividad con la probabilidad p que varía con el actual retraso (i.e., el número de nodos listos para transmitir), entonces se transmitirá el mensaje. Con la probabilidad $1-p$ se retrasará la transmisión por una ranura de tiempo. Si en este nuevo punto el canal es detectado inactivo, se repetirá el

mismo proceso. En caso de que el canal esté ocupado, el nodo reprogramará la transmisión de acuerdo a un valor aleatorio de tiempo.

Figura 36. Tiempo de retraso aleatorio



En la implementación de CSMA p -persistente y predictivo en la subcapa MAC, la probabilidad p está dada por

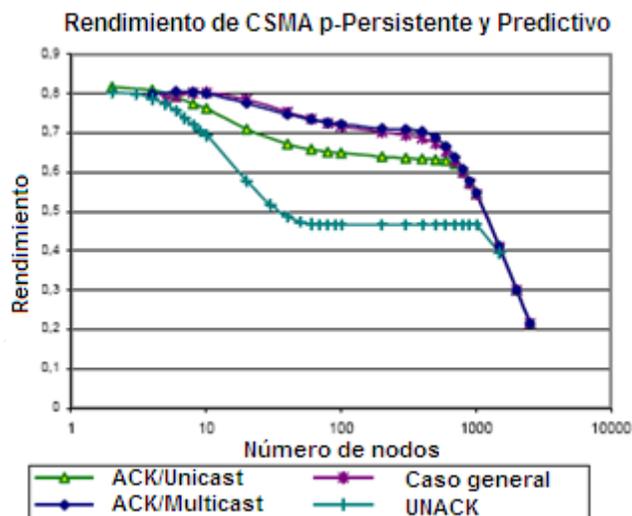
$$p = \frac{1}{16 BL}$$

donde BL es el número estimado de nodos listos para transmitir ($1 \leq BL \leq 63$). El *tiempo de retraso aleatorio* o RDT (por su acrónimo en inglés) es calculado según p .

Si el canal es detectado inactivo durante el período RDT, el nodo iniciará la transmisión cuando RDT expire. Si antes que RDT finalice el canal se detecta ocupado, el proceso se repetirá. Un nodo listo para transmisión monitorea el estado del canal y determina que el canal está inactivo si no detecta transmisión alguna durante el período β_1 . Los nodos sin necesidad de transmitir mensajes durante este período se mantendrán sincronizados durante la duración de los tiempos de retraso aleatorios. En caso de que algún mensaje esté listo para su transmisión después del período β_1 , se programará para ser transmitido en uno de las $(0 \dots BL-1)$ ranuras de tiempo con de duración β_2 .

En la siguiente gráfica se muestra el uso del canal en función del número de nodos activos para el algoritmo CSMA p -persistente y predictivo. Los resultados fueron obtenidos por [2] usando un enfoque analítico basado en las cadenas de Markov. Debido a que el rendimiento de CSMA predictivo (a diferencia de CSMA persistente) depende de la estructura del tráfico transmitido a través del canal, varios escenarios fueron considerados.

Figura 37. Capacidad del canal para CSMA p -Persistente y Predictivo



La gráfica muestra que para redes pequeñas (de hasta 10 nodos), el rendimiento o uso del canal es de 0.8 para cualquier escenario. Para redes grandes, el rendimiento disminuye pero se establece a un nivel constante para redes con más de 100 nodos. Esta medida representa un rendimiento sostenible y constituye el peor caso si la predicción en el protocolo es efectiva. El rendimiento de CSMA p persistente y predictivo se acerca más a CSMA p persistente solamente para redes con hasta 10 nodos.

La máxima utilización del canal para CSMA p persistente y predictivo es obtenida a costa de minimizar la parte del ancho de banda dedicada a la

transmisión de mensajes que transportan los datos de aplicación. En otras palabras, si el rendimiento es alto, muchos de los paquetes transmitidos a través del canal son acuse de recibo.

4.1.4. Metodología para prueba de rendimiento

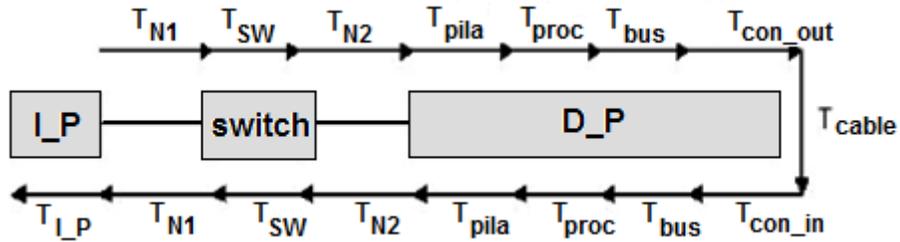
La latencia se define como el intervalo de tiempo que inicia cuando un dispositivo envía información y termina cuando un evento o acción correspondiente ocurre. Puede referirse al tiempo entre la recepción de un paquete de red y la ejecución de una acción, o bien, entre una acción física y el envío de la información. En el primer caso el dispositivo tiene a su cargo la ejecución de una acción, mientras que en el segundo el dispositivo produce datos.

Es posible medir la latencia haciendo uso de un *loop-back*, enviando información en el puerto de salida y esperar a que el dispositivo mida dicha información cuando llegue al puerto de entrada.

La prueba de *loop-back* está sujeta a diferentes tipos de errores y latencias. Las mayores fuentes de error y latencia son probablemente a causa de la conversión de energía física al crear una señal de salida o bien leer una señal de entrada. Esta información es especificada por cada proveedor. Otra fuente de error y latencia se puede dar debido al procesamiento de los encabezados y la pila de protocolos de red.

En la siguiente figura se muestra un análisis de tiempo de la prueba de *loop-back*.

Figura 38. Análisis de tiempo para prueba de loop-back



$$T_{D_LP} = 2 \times T_{pila} + 2 \times T_{proc} + 2 \times T_{bus} + T_{con_out} + T_{cable} + T_{con_in}$$

$$T_{LP} = 2 \times T_{red} + T_{D_LP} + T_{I_P}$$

T_{D_LP} = Latencia del dispositivo probado en la prueba de *loopback*

T_{pila} = Latencia de la pila de protocolos de red del dispositivo probado

T_{proc} = Latencia de procesamiento

T_{bus} = Latencia del bus interno del dispositivo probado

T_{con_out} = Latencia de la conversión de energía saliente

T_{cable} = Latencia de transmisión de la señal en el cable

T_{con_in} = Latencia de la conversión de energía entrante

T_{LP} = Latencia de la prueba de *loopback*

T_{red} = Latencia de sobrecarga de la red

T_{I_P} = Latencia del instrumento de prueba

4.1.5. Medición de latencia

El tiempo de retardo es un requerimiento importante para aplicaciones de tiempo real. El tiempo de respuesta puede estar afectado por las capas de red, la velocidad del procesador y en muchos casos por el sistema operativo.

Con la finalidad de medir el retraso de los paquetes entre un nodo emisor y uno receptor a través de una conexión TCP/IP, de acuerdo con [3] se han llevado a cabo una serie de experimentos en 3 distintos escenarios, según se muestra a continuación:

Figura 39. Configuración del 1er experimento



Figura 40. Configuración del 2do experimento

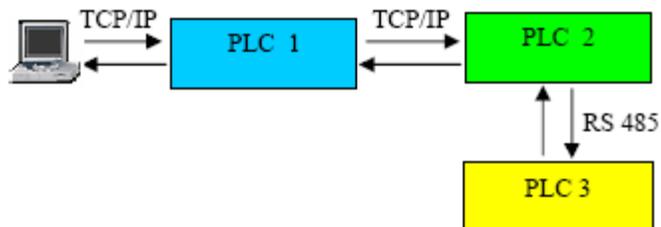
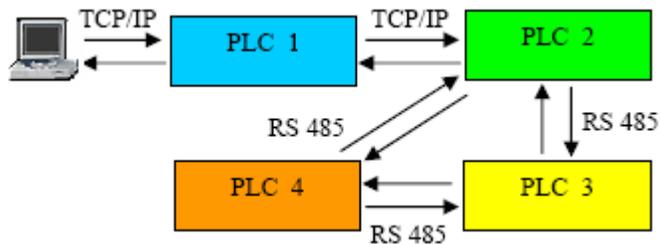


Figura 41. Configuración del 3er experimento



En el primer experimento se prueba la conexión entre HMI y PLC, a través de una conexión TCP/IP. Al agregar otro PLC por medio de una conexión RS-485 serial Modbus, se realizan los experimentos restantes. El 2do experimento utiliza una topología estrella mientras que el 3ro utiliza una

topología de anillo. En todos los escenarios el retraso se basa en el tiempo necesario para que un paquete enviado sea recibido de vuelta.

Del resultado de los experimentos, se concluye que no existe diferencia significativa entre el tiempo de respuesta de las topologías de estrella y anillo.

La comunicación a través de Ethernet es más rápida que RS-485 serial debido a que la comunicación en Ethernet es *full duplex*, mientras que la comunicación serial es *half duplex*. Aunque en los experimentos RS-485 se transmite también a través de Ethernet, la comunicación es más lenta que cuando solamente se usa Ethernet.

La latencia en cada uno de los experimentos se puede mostrar como sigue:

Figura 42. Configuración de latencia para el 1er experimento

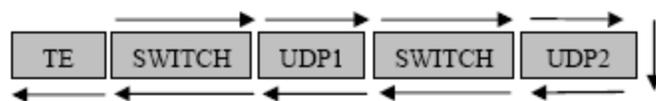


Figura 43. Configuración de latencia para el 2do experimento

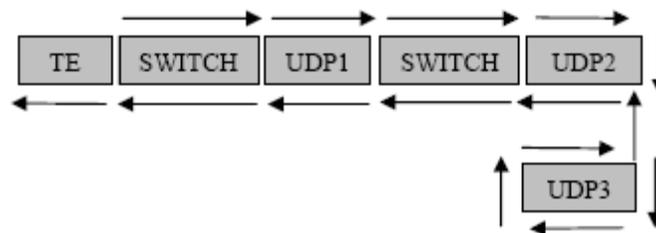
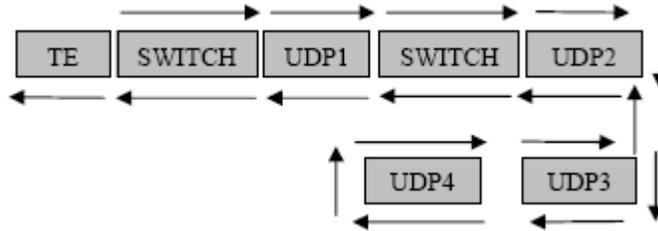


Figura 44. Configuración de latencia para el 3er experimento



En dichos escenarios, la longitud del cable Ethernet desde el equipo de prueba TE hacia el switch y desde UDP hacia el switch es de aproximadamente 5 metros, mientras que la longitud del cable serial RS-485 desde UDP hacia UDP es de aproximadamente 3.6 metros. Como resultado de los experimentos se observa que la longitud del cable tiene poco efecto en la comunicación de los datos.

En las siguientes gráficas se muestran los resultados obtenidos por medio de los experimentos:

Figura 45. Resultado del 1er experimento

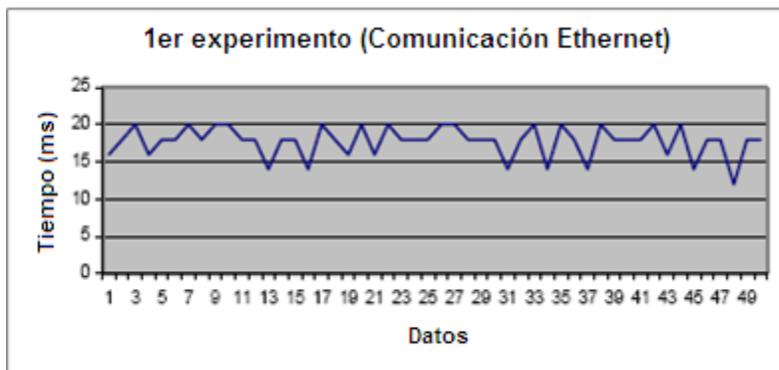


Figura 46. Resultado del 2do experimento

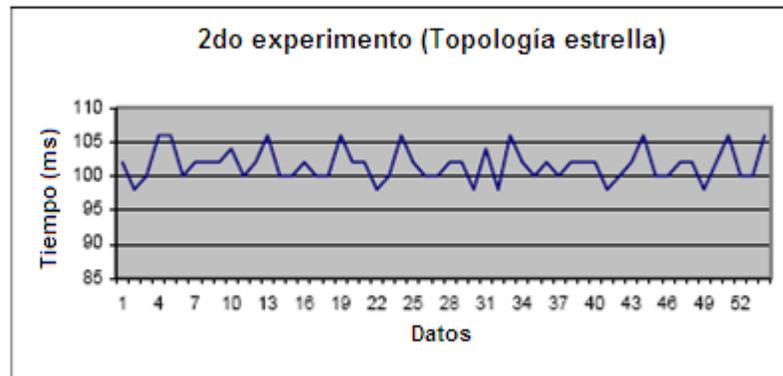
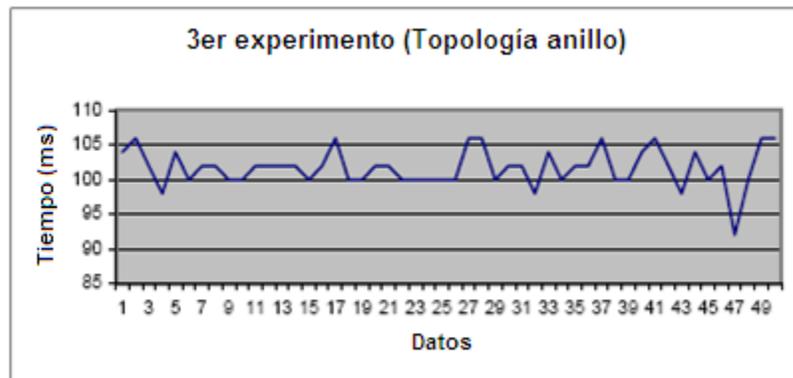


Figura 47. Resultado del 3er experimento



De acuerdo al resultado de los experimentos, en todos los paquetes transmitidos y recibidos ocurre un retardo en el tiempo, algunas veces es mayor y otras veces menor. Esto ocurre debido al fenómeno de latencia que usualmente está presente en las redes de comunicaciones. Básicamente hay 3 factores que contribuyen al retraso de un mensaje:

1. **Retraso por espera.** Tiempo que un nodo de origen tarda en ocupar el canal desde que está listo para transmitir un mensaje deseado.

2. **Retraso por transmisión.** Tiempo durante el cual se transmite desde el primer hasta el último bit.
3. **Retraso por propagación.** Tiempo que tarda el último bit transmitido por el nodo de origen en ser recibido por el nodo de destino.

Además, de acuerdo al modelo OSI, un mensaje debe de ser procesado en cada una de las diferentes capas. Esto produce cierto retardo. Sin embargo este valor es despreciable al compararlo con los retrasos mencionados anteriormente.

En base a los resultados de los experimentos anteriores, se observa que la comunicación a través de Ethernet es más rápida que la comunicación serial RS-485. El tipo de topología y la longitud del cable tienen poco impacto en el rendimiento de una red Modbus.

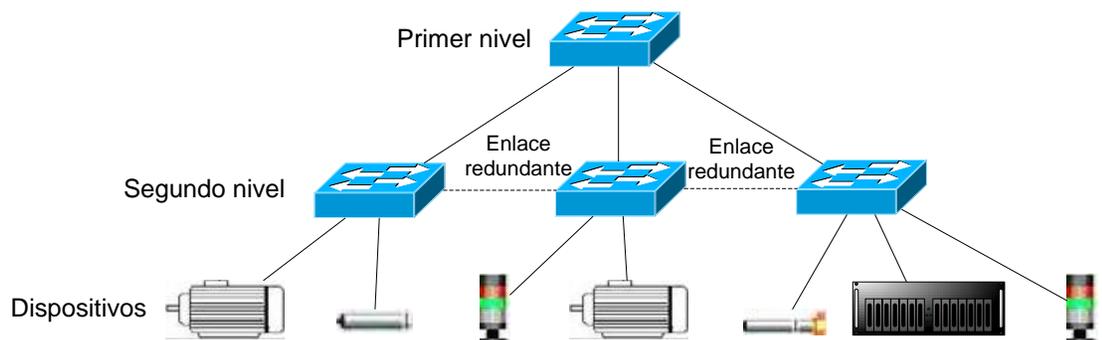
Ethernet es cada vez más utilizado en redes industriales, a pesar de ser no determinista y no garantizar valores de retraso adecuados para este tipo de redes. Sin embargo, en base al tráfico observado entre los distintos dispositivos industriales es posible diseñar redes de control industrial optimizando la disponibilidad y el rendimiento de las mismas.

4.2. Uso de algoritmos genéticos en el diseño de red

4.2.1. Diseño de red

Existen diferentes topologías comúnmente utilizadas en redes aplicadas a automatización industrial. Entre las más comunes se encuentran la topología jerárquica y la topología lineal. Una topología jerárquica redundante de dos niveles es la arquitectura a la cual se referirá de aquí en adelante. Se asume que cada dispositivo está conectado a través de un enlace punto a punto y que cada link es bidireccional (*full duplex*).

Figura 48. Topología jerárquica de dos niveles



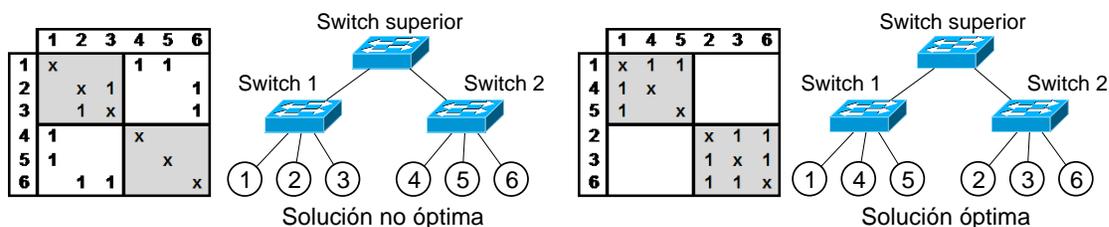
4.2.1.1. Problema del diseño de red

La cantidad de información intercambiada por aplicaciones industriales cada vez es mayor (voz, video, etc.). Estas aplicaciones requieren mayor ancho de banda el cual no está disponible en los sistemas industriales antiguos. Debido a que Ethernet permite velocidades de transmisión de hasta 1Gbps, sus características no deterministas pasan a un segundo plano, al considerar que el

flujo de datos es procesado lo suficientemente rápido comparado con el ciclo de procesamiento de las aplicaciones industriales.

Se puede hacer uso de Ethernet en aplicaciones críticas de tiempo, al combinar la segmentación de los switches con técnicas apropiadas de tiempo real y de tolerancia de fallas. Sin embargo, esto implica que la interconexión de los dispositivos de red debe de ser analizada. Una mala planificación en el diseño físico de la red puede generar congestión, retrasando el tráfico en la red. Esto se muestra en la siguiente figura:

Figura 49. Ejemplo de distribución de dispositivos



Se consideran 6 dispositivos asociados mediante una matriz de tráfico, en donde “1” localizado en la fila i y columna j se refiere a que el dispositivo i intercambia información con el dispositivo j . En la primera solución (dispositivos 1,2 y 3 conectados al switch 1 y dispositivos 4, 5 y 6 conectados al switch 2) se muestra una arquitectura en la cual existe un alto tráfico entre switches, ocasionando que el switch superior maneje alto tráfico. Una distribución óptima comprendería colocar los dispositivos 1, 4, y 5 en el switch 1 y los dispositivos 2, 3 y 6 en el switch 2. De esta manera se reduce el tráfico en el switch superior (siendo nulo para este caso).

La propuesta de diseño de una arquitectura de red eficiente se centra en el estudio del flujo de tráfico entre las distintas entidades que comprenden la red.

La distribución de los dispositivos se basa en dicho flujo. Técnicas de partición de grafos pueden ser utilizadas para encontrar la mejor distribución posible y minimizar el intercambio de información entre switches.

4.2.1.2. Problema de partición de grafos

En matemáticas, el problema de partición de grafos consiste en dividir un grafo en partes, de tal manera que las partes posean el mismo tamaño y que existan pocas conexiones entre las partes.

El problema de partición de grafos es un problema combinatorio fundamental el cual es aplicado en muchas áreas. La información de la aplicación es usada para generar un grafo en el cual cada entidad elemental es representada por un *vértice*, y las dependencias entre entidades son representadas por *aristas*.

La representación de un grafo es

$$G = (V, E)$$

donde V es un conjunto de vértices o nodos, y E es un conjunto de arcos o aristas que relacionan estos nodos.

Las entidades y dependencias pueden ser balanceadas en el grafo en base al peso en cada vértice y arista. Este problema se puede plantear de la siguiente manera:

Dado un grafo con pesos de vértices y aristas, dividir los vértices en particiones o subgrupos separados de manera que la suma de los pesos de los vértices en cada subgrupo sea aproximadamente igual, y que el costo total de las aristas de corte (aristas que conectan los vértices de distintos subgrupos) sea mínimo.

Como ejemplos de aplicaciones se pueden mencionar la partición de circuitos VLSI, la fragmentación de base de datos y el diseño de redes. Estos son problemas NP completos.

Si se considera un grafo G con n nodos en total y k subgrupos, el tamaño de una partición para un problema balanceado será

$$|P_i| = \frac{n}{k}$$

Así, el número de posibles soluciones para la primera partición será

$$\binom{n}{|P_i|}$$

Para la segunda partición

$$\binom{n - |P_i|}{|P_i|}$$

El número total de posibles soluciones estará dado entonces por

$$\frac{1}{k!} \binom{n}{|P_i|} \binom{n - |P_i|}{|P_i|} \cdots \binom{2|P_i|}{|P_i|} \binom{|P_i|}{|P_i|}$$

Para un grafo consistente en 100 nodos y 4 particiones, el número posible de soluciones será alrededor de $6.71753870565144375e+55$. Si se supone que el tiempo requerido para ejecutar cada operación es de 1ms, llevaría varios siglos evaluar todas las posibles soluciones. Debido a esto, el uso de métodos heurísticos es sugerido para resolver el problema. Se utilizará específicamente algoritmos genéticos.

4.2.1.3. Criterio de optimización

Con el fin de optimizar la solución, se busca minimizar el tráfico a través del switch superior y maximizarlo en los switches de segundo nivel. Cuando se dividen los nodos en subgrupos, es posible que algunos subgrupos tengan mayor tráfico que otros. Para evitar esto, se pueden dividir los subgrupos de manera que el tráfico de los mismos sea balanceado, es decir, lo más parecido posible en cada subgrupo. Esto implica maximizar el tráfico de cada subgrupo (el peso total de los vértices asignados a cada partición) y minimizar el tráfico entre cada subgrupo (el peso total de las aristas de corte).

4.2.2. Algoritmos Genéticos

Los algoritmos genéticos proveen un método de aprendizaje basado en la evolución de organismos biológicos. En estos algoritmos se generan hipótesis sucesoras mediante mutaciones y recombinaciones reiteradas de las mejores hipótesis conocidas.

En cada paso una colección de hipótesis llamada *población* es actualizada mediante el reemplazo de cierta fracción de la población con los descendientes de las hipótesis actuales más aptas. El proceso consta de una repetitiva generación, prueba y búsqueda de hipótesis, en donde variantes de las mejores hipótesis actuales son más probables de ser consideradas para el siguiente paso.

El problema referido en los algoritmos genéticos es el de la búsqueda de una población de hipótesis candidatas y la identificación de la mejor hipótesis, la cual es la más apta de acuerdo a una medida numérica predefinida llamada *función idoneidad*.

La población evoluciona mediante iteraciones del algoritmo, formando *generaciones*. En cada iteración cada miembro de la población es evaluado de acuerdo a la función idoneidad. Una nueva población es generada seleccionando probabilísticamente los individuos más aptos de la población actual. Cada individuo corresponde a un candidato y es representado por una cadena de caracteres llamada *cromosoma*. Algunos de los individuos seleccionados son utilizados en la siguiente generación sin ninguna modificación. Otros, en cambio, se usan para crear nuevos descendientes mediante operaciones genéticas tales como *cruce* y *mutación*.

El prototipo para un algoritmo genético se describe a continuación:

AG (*Idoneidad*, *Umbral_idoneidad*, *p*, *r*, *m*)

Idoneidad: Función que asigna una medida de evaluación para una hipótesis dada.

Umbral_idoneidad: Umbral que especifica el criterio de terminación.

p: Número de hipótesis incluidas en la población.

r: Fracción de la población a ser reemplazada por cruce en cada iteración

m: Tasa de mutación.

- *Inicializar población*: $P \leftarrow$ Genera *p* hipótesis aleatoriamente
- *Evaluación*: Para cada *h* en *P*, calcular *Idoneidad*(*h*)
- Mientras [*max Idoneidad*(*h*) < *Umbral_idoneidad*] hacer

Crear nueva generación, *Ps*:

1. *Selección*: Probabilísticamente seleccionar $(1 - r)p$ miembros de *P* para agregar a *Ps*. La probabilidad $\text{Pr}(h_i)$ de una hipótesis *h_i* seleccionada de *P* está dada por:

$$\text{Pr}(h_i) = \frac{\text{Idoneidad}(h_i)}{\sum_{j=1}^p \text{Idoneidad}(h_j)}$$

2. *Cruce*: Seleccionar probabilísticamente $(r p) / 2$ hipótesis en *P*, de acuerdo a $\text{Pr}(h_i)$. Para cada par (*h₁*, *h₂*) producir dos descendientes aplicando el operador de cruce. Agregar todos los descendientes a *Ps*.
3. *Mutación*: Seleccionar un porcentaje *m* de los miembros de *Ps* con una probabilidad uniforme. Para cada uno modificar un bit aleatorio.
4. *Actualización*: $P \leftarrow Ps$.
5. *Evaluación*: Para cada *h* en *P*, calcular *Idoneidad*(*h*)

- Retornar la hipótesis perteneciente a *P* más apta.

Se observa que cada iteración produce una nueva generación de hipótesis basada en la población actual. Al inicio un número determinado de hipótesis es seleccionado probabilísticamente en la población actual. La probabilidad de que una hipótesis sea seleccionada es directamente

proporcional a su propia idoneidad e inversamente proporcional a la idoneidad de las demás hipótesis en la misma población.

Una vez que los miembros de la generación actual han sido seleccionados para ser incluidos en la siguiente generación poblacional, miembros adicionales son generados mediante la operación de cruce en la cual dos hipótesis descendientes son generadas mediante la recombinación de dos hipótesis padre seleccionadas probabilísticamente. Después de la creación de nuevos miembros por cruce, la nueva generación poblacional contendrá el número deseado de miembros. En este punto, cierta fracción m de dichos miembros son seleccionados aleatoriamente y alterados mediante mutaciones.

4.2.2.1. Representación de hipótesis

Las hipótesis en algoritmos genéticos pueden ser representadas por medio de cadenas de bits, de manera que puedan ser manipuladas con facilidad por los operadores genéticos (mutación y cruce). Las hipótesis representadas de esta manera pueden llegar a ser bastante complejas. Por ejemplo, una serie de reglas o normas pueden ser representadas mediante la codificación de condiciones previas y posteriores.

Una cadena de bits puede contener reglas completas, en donde los bits representantes de las limitaciones o restricciones de cada atributo perteneciente a las condiciones son concatenados para formar la cadena final. Por ejemplo, si se consideran los atributos de Clima y Viento como condiciones previas y Juego como condición posterior, en donde los valores de cada atributo se asignan como sigue:

Tabla V. Ejemplo de representación de atributos

Atributo	Valor	Representación
Clima	Soleado	100
	Nublado	010
	Lluvioso	001
Viento	Fuerte	10
	Débil	01
Juego	Si	10
	No	01

La regla de jugar sólo en caso de que el clima sea soleado y el viento débil se representara mediante la siguiente cadena de bits:

Tabla VI. Ejemplo de definición de una regla

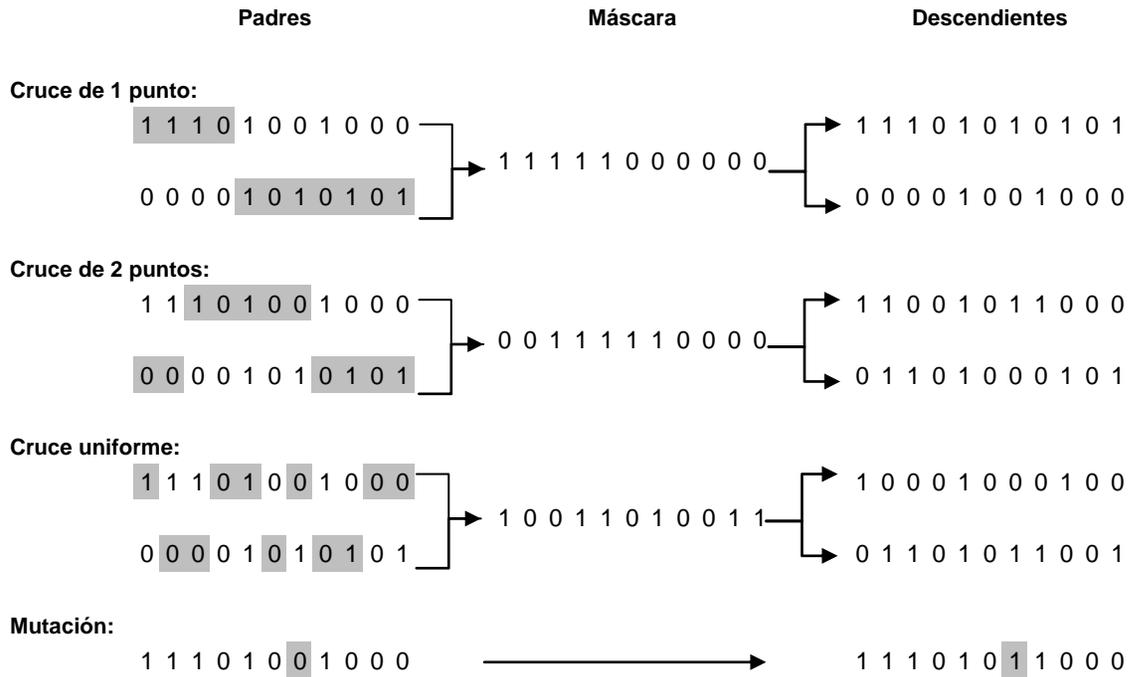
Clima	Viento	Juego
100	01	10

Las reglas son representadas por cadenas de bits de longitud fija, en donde los atributos se localizan en posiciones determinadas de la cadena. Además es posible definir un conjunto de reglas concatenando las cadenas de bits pertenecientes a cada regla individual.

4.2.2.2. Operadores genéticos

En los algoritmos genéticos, las generaciones sucesoras son determinadas por una serie de operadores que combinan y mutan miembros seleccionados en la población inicial. Los operadores más comunes son *cruce* y *mutación*, los cuales se ilustran en la siguiente tabla:

Figura 50. Operadores genéticos



Cada operación produce descendientes representados por cadenas de bits. El *operador cruce* produce dos nuevos descendientes en base a dos cadenas de bits padre, utilizando una máscara de cruce la cual determina los bits con que contribuye cada padre. El *operador mutación* crea un solo descendiente en base a un solo padre al modificar el valor de un bit elegido aleatoriamente. El operador mutación frecuentemente es utilizado luego del operador cruce, como se puede observar en el prototipo descrito anteriormente.

4.2.2.3. Función idoneidad y selección

La función idoneidad define el criterio para categorizar hipótesis potenciales y para seleccionarlas probabilísticamente, con el fin de incluirlas en la próxima generación poblacional.

Se conoce como *selección proporcional de idoneidad* (o rueda de la ruleta) el hecho de que la probabilidad de que una hipótesis en particular sea seleccionada es directamente proporcional a su función idoneidad e inversamente proporcional a la función idoneidad del resto de miembros de la población actual.

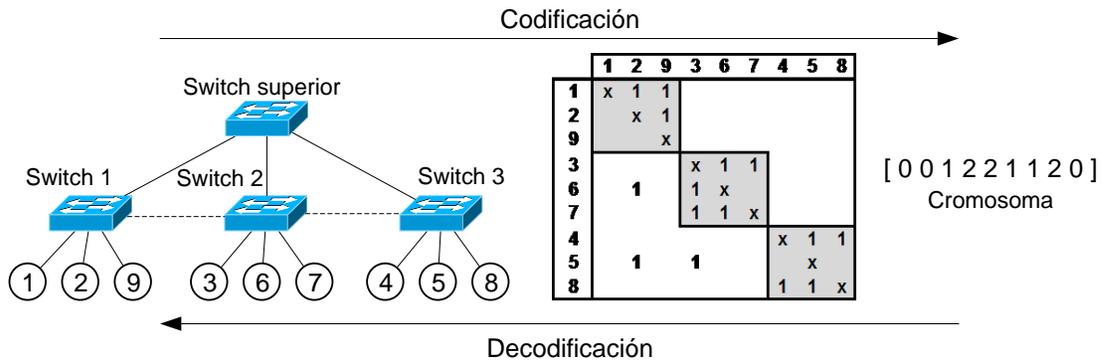
$$\Pr(h_i) = \frac{Idoneidad(h_i)}{\sum_{j=1}^p Idoneidad(h_j)}$$

4.2.3. Optimización de la topología mediante Algoritmos Genéticos

Para el problema de partición de grafos analizado anteriormente, es posible representar cada nodo por medio de un cromosoma. Cada cromosoma corresponde a una cadena en la cual el elemento i toma el valor j si el vértice i del grafo pertenece a la partición j . Existirán tantos elementos en la cadena como vértices en el grafo, de manera que para un problema con k vértices el grafo se representaría con los elementos de cadena $[0, 1, \dots, k-1]$.

Por ejemplo, la cadena $[001221120]$ contiene un total de 9 elementos, es decir, 9 nodos o vértices. Cada vértice pertenece a la partición 0, 1 ó 2. Así, los vértices 1, 2 y 9 pertenecen a la partición 0, los vértices 3, 6 y 7 a la partición 1 y los vértices 4, 5 y 8 a la partición 2. En la siguiente figura se ilustra la codificación y decodificación de este ejemplo para una topología jerárquica con redundancia:

Figura 51. Partición de grafos y la representación de su solución genética



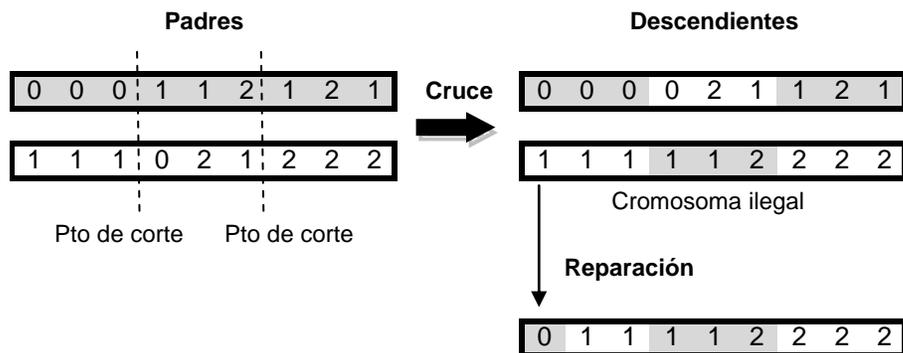
Para inicializar el algoritmo genético, es necesario definir una población inicial. El método más común es crear soluciones aleatoriamente. Sin embargo, el método aleatorio debe de ser controlado con el fin de no generar cromosomas absurdos para esta topología, tales como [002220020] ó [111111111], en donde no se satisface el número de particiones o subgrupos esperados.

Los operadores cruce y mutación son utilizados. Un cruce de dos puntos es empleado en el algoritmo. Ambos puntos de corte son seleccionados aleatoriamente, los cuales son idénticos para ambos cromosomas padre. De esta manera, cada cromosoma padre es dividido en tres partes. Cada nuevo cromosoma es formado copiando una o dos partes de ambos cromosomas padre.

El operador cruce puede generar cromosomas ilegales, como en la definición de la población inicial. Para solucionar esto, se propone la utilización de un procedimiento de reparación que consiste en revisar la cantidad de subgrupos. Si el cromosoma descendiente no cumple con el número de

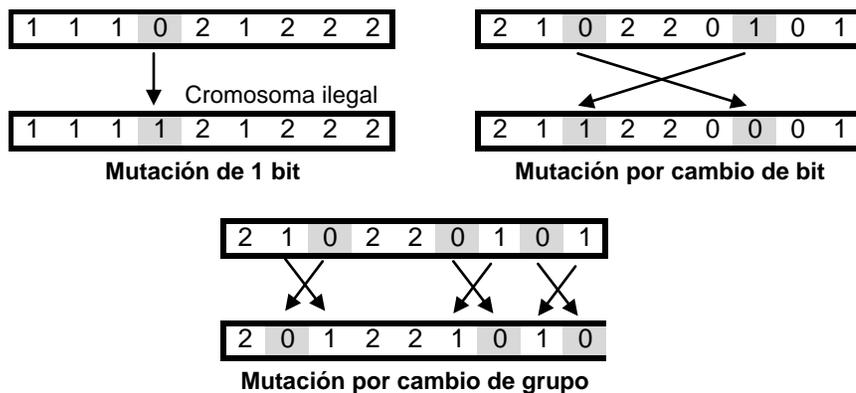
subgrupos esperados, es reparado por medio de permutaciones de los cromosomas padre.

Figura 52. Operador cruce de dos puntos con reparación



El operador mutación permite la introducción de cromosomas inexplorados a la población. Aunque generalmente se cambia el valor de un bit elegido aleatoriamente, el método de intercambio de bits es utilizado con el fin de preservar la condición de número de subgrupos.

Figura 53. Operador mutación por intercambio de bits



Para determinar la calidad de la solución final, se propone el uso de dos métricas. La primera se refiere al criterio de arista de corte, la cual representa el volumen de intercambio de información entre vértices de un mismo subgrupo. Comprende la suma de todos los vértices en una misma partición conectados a una arista de corte. La segunda métrica se refiere al tamaño de una partición la cual mide el balanceo entre subgrupos.

Para cada solución un valor idoneidad es calculado mediante la siguiente función idoneidad:

$$f(e, e_v, e_o) = \frac{e - e_o}{e + e_v}$$

donde

e = elementos totales en la matriz

e_o = elementos fuera de las particiones (elementos excepcionales)

e_v = elementos nulos dentro de las particiones

La función idoneidad tiene propiedades interesantes tales como la no negatividad y el rango de valores entre 0 y 1. Cuando no existen elementos excepcionales o nulos la función tomará un valor de 1. Si el número de elementos excepcionales iguala al número total de elementos, la función tomará un valor de 0.

4.2.3.1. Resultados experimentales

Con el fin de ilustrar el comportamiento del algoritmo propuesto, [4] ha experimentado con una matriz de intercambio de tráfico para 40 dispositivos industriales, considerando la hipótesis de que el intercambio de información entre los distintos dispositivos es estable. En los procesos de comunicación industriales, el volumen y la frecuencia de los intercambios satisfacen dicha hipótesis. Para simplificación, todos los intercambios son representados mediante una matriz binaria, en donde “1” representa un paquete enviado cada segundo. El tamaño de cada paquete es fijo e igual a 1518 bytes. Se desea interconectar los dispositivos haciendo uso de 5 subgrupos.

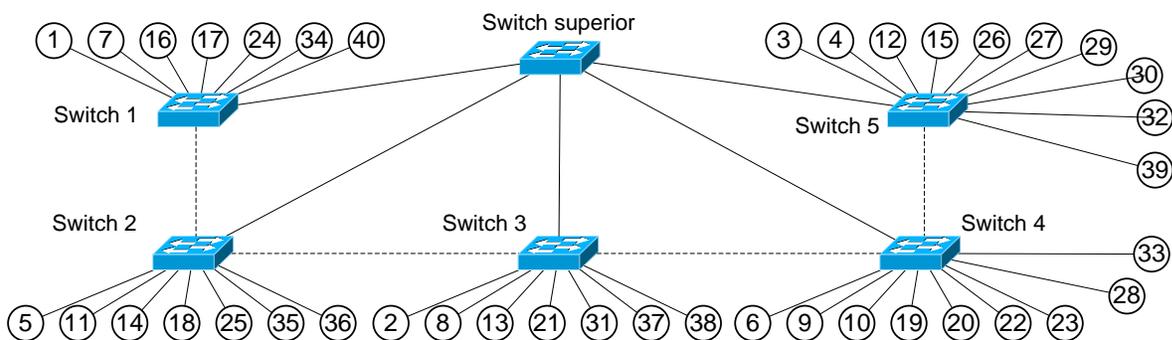
Figura 54. Matriz de tráfico

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40			
1	x															1	1							1										1							1		
2		x																		1											1							1	1				
3			x																							1	1					1									1		
4				x																						1	1					1										1	
5					x															1																	1						
6						x																		1					1	1			1										
7							x									1	1								1								1								1		
8								x												1												1								1			
9									x								1		1	1				1						1										1			
10										x										1	1											1	1										
11											x									1																			1				
12												x																1	1	1												1	
13													x																						1						1		
14														x																											1		
15															x																											1	
16	1						1									x																									1		
17	1						1										x																									1	
18				1						1								x																								1	
19									1	1										x																						1	
20										1	1										x																					1	
21		1						1														x																		1	1	1	
22						1																	x																		1		
23										1	1													x																			
24	1						1																	x																	1		
25															1											x															1		
26			1	1									1														x															1	
27			1	1									1															x														1	
28									1	1																																	1
29				1	1											1																										1	
30					1											1																										1	
31		1							1								1	1																								1	
32			1							1																																	1
33					1						1																																1
34	1						1										1	1	1								1																1
35					1																																						1
36						1																																					1
37		1																																									1
38		1																																									1
39			1	1																																							1
40	1																																										1

Previo al análisis de la topología obtenida mediante el algoritmo propuesto, se ha concluido que el peor caso de partición equivale a los 5 subgrupos conformados por los nodos 1-9, 10-17, 18-26, 27-33 y 34-40. En este caso toda comunicación se da dentro de cada subgrupo. El tráfico total está fuera de las particiones y la función idoneidad es nula.

Debido a que los algoritmos genéticos son procesos de búsqueda estocástica, el algoritmo propuesto es realizado 20 veces. La mejor solución se presenta en la siguiente figura:

Figura 55. Repartición de dispositivos obtenidos mediante AG



El valor $AG(max)$ representa la mejor solución obtenida durante las 20 ejecuciones del algoritmo, mientras que el valor $AG(prm)$ es el promedio. Los resultados de acuerdo a la función idoneidad se presentan en la siguiente tabla:

Tabla VII. Distribución de los subgrupos

	Peor caso	Algoritmos Genéticos
Grupo 1	1 - 9	1, 7, 16, 17, 24, 34, 40
Grupo 2	10 - 17	5, 11, 14, 18, 25, 35, 36
Grupo 3	18 - 26	2, 8, 13, 21, 31, 37, 38
Grupo 4	27 - 33	6, 9, 10, 19, 20, 22, 23, 28, 33
Grupo 5	34 - 40	3, 4, 12, 15, 26, 27, 29, 30, 32, 39
f(e, ev, eo)	0	max = 0.426 avg = 0.389

Con el fin de evaluar el desempeño de la topología se analizan los siguientes factores para la topología jerárquica:

- Carga en los enlaces
- Carga en los switches
- Tiempo promedio de retraso

Se observa una gran diferencia al comparar el peor escenario con el resultado obtenido mediante el algoritmo genético. En el peor caso la carga en los enlaces es de aproximadamente 700 Kbps, mientras que con el algoritmo es reducida a 90 Kbps.

Tabla VIII. Carga en los enlaces (Kbps)

Switch superior hacia	Peor caso	AG
Switch 1	866	85
Switch 2	700	97
Switch 3	700	60
Switch 4	771	97
Switch 5	522	121
Avg	711	92

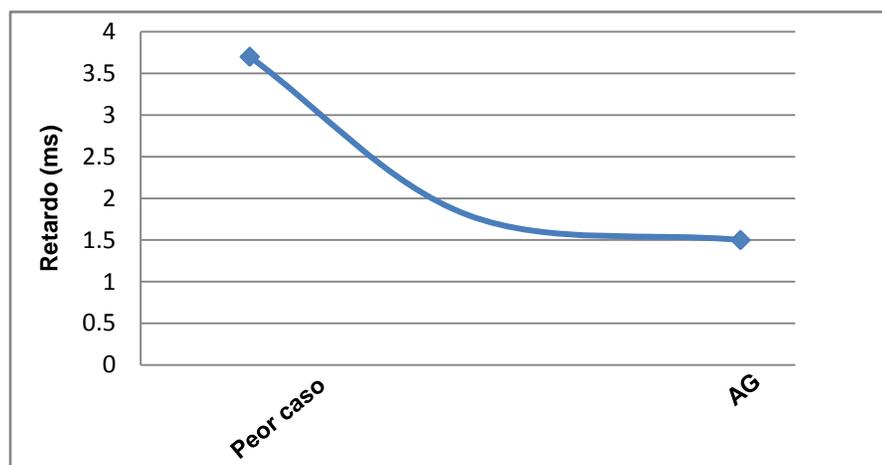
El tráfico disminuye hasta 30% en el switch superior mediante el uso del algoritmo genético.

Tabla IX. Carga en los switches (Kbps)

	Peor caso	AG
Switch superior	376	230
Switch 1	425	473
Switch 2	546	327
Switch 3	461	352
Switch 4	473	376
Switch 5	291	522
Avg	428	380

El tiempo promedio de retraso para cada topología se mejora en un factor de 2 con el algoritmo. En ambientes industriales dicho valor es significativo. En el ejemplo, esto representa una ganancia de 2 ms cuando el tiempo de procesamiento de un controlador programable es típicamente de 10 ms.

Figura 56. Tiempo de retardo punto a punto



CONCLUSIONES

1. Con base a la comparación de latencia en pruebas loop-back para redes Modbus utilizando 3 topologías distintas: Ethernet, anillo y estrella, se muestra que la comunicación Ethernet es más rápida que el resto de topologías probadas. Se observa además que el tipo de topología y la longitud de los cables de transmisión tienen poco efecto en el rendimiento de una red Modbus con controladores.
2. Es posible asumir que la capacidad para CSMA p -persistente es constante e igual a 0.8, para longitudes de paquetes típicas en redes de control. Este resultado es una referencia cuantitativa importante para otros protocolos CSMA.
3. Una comparación de la capacidad del canal entre los protocolos CSMA p -persistente y CSMA p -persistente y predictivo muestra que el primero es similar al segundo para redes pequeñas de aproximadamente 10 nodos. En el caso de un mayor número de nodos activos, la capacidad del CSMA predictivo es más pequeña y varía de acuerdo al escenario de tráfico.
4. Para el protocolo CSMA p -persistente y predictivo, la capacidad del canal puede ser maximizada a costa de minimizar el uso del ancho de banda dedicado a la transmisión de mensajes de los datos de aplicación.

5. La preferencia por el uso de algoritmos genéticos radica en que la evolución es conocida como un método exitoso y robusto en la adaptación de sistemas biológicos.
6. Los algoritmos genéticos pueden evaluar hipótesis compuestas por partes complejas, en donde el impacto de cada parte en la solución general puede ser difícil de modelar.
7. Gracias al incremento en la capacidad de procesamiento y el costo decreciente de sistemas computacionales, algoritmos heurísticos tales como algoritmos genéticos son cada vez más fáciles de implementar.
8. Con base al tráfico observado entre dispositivos industriales y mediante la aplicación de algoritmos, es posible diseñar topologías de manera que la disponibilidad y el rendimiento en la red mejoren.

RECOMENDACIONES

1. Tomando como punto de partida este trabajo, se puede ahondar en la investigación de factores que contribuyen al retraso en redes con aplicaciones de tiempo real, así como de problemas relacionados a las limitaciones del rendimiento en un canal de transmisión.
2. Entre las ineficiencias que más afectan al rendimiento de una red se pueden mencionar la congestión de mensajes, uso innecesario de protocolos, colisiones excesivas, errores y retardos. Mediante la identificación y corrección de estos problemas se pueden diseñar redes más limpias, rápidas y efectivas.
3. Para el diseño de sistemas de comunicaciones con aplicaciones en tiempo real, tal como redes aplicadas en ambientes industriales, un análisis del tráfico entre los dispositivos industriales es necesario, además de tomar en cuenta parámetros de retardo.
4. El empleo de métodos o algoritmos en el diseño redes es muy importante para lograr topologías eficientes.

REFERENCIAS

1. ROSATO, DOMINIK; ROSATO, DONALD & ROSATO, MARLENE: *Injection molding handbook*. Springer, 3ra edición, Octubre, 2000.
2. MIŚKOWICZ, MAREK: *On the Capacity of p-Persistent CSMA*. IJCSNS International Journal of Computer Science and Network Security, VOL.7 No.11, Noviembre, 2007.
3. JOELIANTO, E. & HOSANA: *Performance of an industrial data communication protocol on Ethernet network*. 5th IFIP International Conference on Wireless and Optical Communications Networks, 2008.
4. KROMMENACKER, N.; DIVOUX, T. & RONDEAU, E.: *Using genetic algorithms to design switched Ethernet industrial networks*. Proceedings of the 2002 IEEE International Symposium on Industrial Electronics, 2002.

BIBLIOGRAFÍA

1. BRYCE, DOUGLAS M.: *Plastic injection molding: manufacturing process fundamentals*. Society of Manufacturing Engineers, Abril, 1996.
2. DISTEFANO, MARIO: *Comunicaciones en entornos industriales*, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Cuyo.
3. GOODSHIP, VANNESSA: *Troubleshooting Injection Moulding*. Smithers Rapra Press, Enero, 2004.
4. JOELIANTO, E. & HOSANA: *Performance of an industrial data communication protocol on Ethernet network*. 5th IFIP International Conference on Wireless and Optical Communications Networks, 2008.
5. JOHANNABER, FRIEDRICH: *Injection molding machines: a user's guide*. Hanser Gardner Publications, 3ra edición, Julio 1994.
6. KROMMENACKER, N.; DIVOUX, T. & RONDEAU, E.: *Using genetic algorithms to design switched Ethernet industrial networks*. Proceedings of the 2002 IEEE International Symposium on Industrial Electronics, 2002.
7. MACKAY, S.; WRIGHT, E.; REYNDERS, D. & PARK, J.: *Industrial Data Networks: Design, Installation and Troubleshooting*. Newnes, Gran Bretaña, 2004.
8. MIŚKOWICZ, MAREK: *A generalized analytic approach to the evaluation of predictive p-CSMA/CD saturation performance*, Proc. IEEE Intern. Workshop on Factory Communication Systems WFCS'2006, pp.342-352, 2006.
9. MIŚKOWICZ, MAREK: *On the Capacity of p-Persistent CSMA*. IJCSNS International Journal of Computer Science and Network Security, VOL.7 No.11, Noviembre 2007.
10. MITCHELL, TOM: *Machine Learning*. McGraw Hill Higher Education, 1ra edición, Octubre, 1997.

11. MONTERO, D.; BARRANTES, D. & QUIRÓS, J.: *Introducción a los sistemas de control supervisor y de adquisición de datos (SCADA)*, Universidad de Costa Rica, Junio, 2004.
12. MORTON, JONES: *Procesamiento de plásticos: Inyección, moldeo y PVC*. Editorial Limusa, México, 1999.
13. REES, HERBERT: *Injection Molding Technology*. Hanser Gardner Publications, Mayo, 1994.
14. RODRIGUEZ PENIN, AQUILINO: *Sistemas SCADA*. Ediciones técnicas Marcombo, España, 2006.
15. ROMAGOSA, J.; GALLEGO, D. & PACHECO, R.: *Miniproyecto: Automatización Industrial*. Universitat Politècnica de Catalunya, Mayo, 2004.
16. ROSATO, DOMINIK; ROSATO, DONALD & ROSATO, MARLENE: *Injection molding handbook*. Springer, 3ra edición, Octubre, 2000.
17. ROSATO, DOMINIK & ROSATO, DONALD: *Plastics Engineered Product Design*. Elsevier Science, 1ra edición, Diciembre, 2003.
18. RUSSEL, STUART & NORVIG, PETER: *Inteligencia Artificial: Un enfoque moderno*. Pearson Prentice Hall, 2da edición, España, 2004.
19. SÁNCHEZ, VALDÉS: *Moldeo por inyección de termoplásticos*. Editorial Limusa, Enero, 2002.
20. TENNEFOSS, MICHAEL: *Leveraging Internet protocol without breaking the bank*. Intech, Septiembre, 2003.
21. VASQUEZ, MODESTO: *Sistemas de control digital en el entorno actual*. Intech, Diciembre, 2003.