

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ**  
**FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA**



**PONTIFICIA  
UNIVERSIDAD  
CATÓLICA  
DEL PERÚ**

**“DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA RED INALÁMBRICA  
PARA UN PROCESO INDUSTRIAL UTILIZANDO PROTOCOLO  
MODBUS”**

Tesis para optar el Título de Ingeniero Electrónico, que presenta el bachiller:

**Alonso Henry Gómez Zeballos**

**ASESOR: Juan Javier Sotomayor Moriano**

**Lima, mayo de 2014**

## RESUMEN

La versatilidad de las comunicaciones inalámbricas nos brinda la posibilidad de desplazarnos por diferentes lugares, manteniendo la conectividad a una red con las mismas características como si estuviéramos conectados a una red cableada, siempre y cuando estemos dentro del rango de cobertura de la red inalámbrica. Así mismo, hace posible la comunicación en áreas de muy difícil acceso o en donde el cableado alcanza precios prohibitivos. Esta tecnología no sólo aminora los costos respecto a una instalación cableada, sino que también es de fácil implementación y permite importantes ahorros en la mantención de la red.

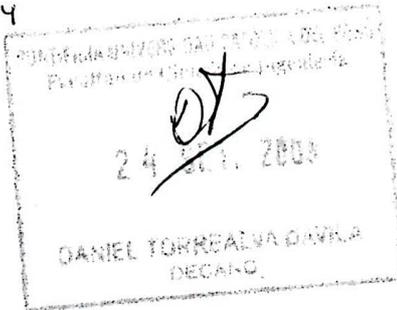
El presente trabajo tiene como objetivo diseñar e implementar una red inalámbrica para propósitos de control de procesos industriales realimentados con fines didácticos. Se utiliza modelos de procesos industriales y la instrumentación necesaria para medir y controlar variables industriales en lazo cerrado en un entorno de laboratorio de control de procesos, utilizando MODBUS como protocolo de comunicación de datos.

En la primera etapa de la investigación se definió un proceso de control representativo, que cuente con las características típicas de las aplicaciones industriales. En este caso se eligió realizar el control de velocidad de un motor de corriente continua por la posibilidad de los recursos y porque representa un caso típico en aplicaciones en la industria textil, por mencionar un ejemplo. Definido el proceso, se procedió a la selección de los equipos de comunicación inalámbrica a utilizar en el presente trabajo. Luego de ello, se pasó a la configuración de los mismos de acuerdo a las exigencias y requerimientos del proyecto, así como el diseño del entorno de supervisión para el control de velocidad del motor.

En la segunda etapa se implementó la red inalámbrica en el laboratorio de Control Avanzado del Pabellón de Ingeniería Electrónica de la Pontificia Universidad Católica del Perú. En esta etapa se hicieron pruebas para corroborar las prestaciones de la red. Y por último, se realizaron las experiencias correspondientes para poner en funcionamiento el entorno de supervisión

## TEMA DE TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO ELECTRÓNICO

Título : Diseño e Implementación de una red inalámbrica para un proceso industrial utilizando protocolo MODBUS  
Área : Control y Automatización # 724  
Asesor : Dr. Juan Javier Sotomayor Moriano  
Alumno : Alonso Henry Gómez Zeballos  
Código : 20037162  
Fecha : 22 de Septiembre de 2009



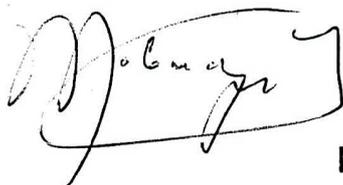
### Descripción y Objetivos

En la actualidad, una de las tecnologías que está tomando cada vez más auge en la vida de los usuarios son las comunicaciones inalámbricas por su versatilidad, así como la libertad de movimiento que ofrece al liberarse de conexiones físicas. En entornos industriales, el área de las comunicaciones no ha sido ajena a esta necesidad, sobre todo en la automatización de procesos.

La mayoría de procesos industriales utilizan medios físicos, como lo son los cables, para entablar la comunicación de las diferentes señales de control. Al implementar una red inalámbrica industrial podremos realizar tareas de supervisión, monitoreo y control de las variables del proceso. Se optará por el uso del protocolo MODBUS debido a que presenta implementaciones vía comunicación inalámbrica.

El presente trabajo tiene como objetivo diseñar e implementar una red inalámbrica para propósitos de control de procesos industriales mediante lazo cerrado con fines didácticos en un entorno de laboratorio de control de procesos.

La red a implementar constará de hardware de comunicación, con el que se desarrollará una experiencia práctica de uso de redes inalámbricas para el control de un proceso industrial. Así mismo, se utilizará el software Visu+ 1.2 con propósitos de supervisión de dicho proceso industrial. La implementación de la red y la realización de las experiencias se harán en el laboratorio de control y automatización de la Pontificia Universidad Católica del Perú.



MÁXIMO 50 PÁGINAS

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ  
SECCIÓN ELECTRICIDAD Y ELECTRONICA

Ing. ANDRES FLORES ESPINOZA  
Coordinador de la Especialidad de Ingeniería Electrónica

## TEMA DE TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO ELECTRÓNICO

Título : Diseño e Implementación de una red inalámbrica para un proceso industrial utilizando protocolo MODBUS

### Índice

Introducción

1. Redes industriales
2. Redes industriales inalámbricas para procesos industriales con protocolo MODBUS
3. Diseño de una red inalámbrica para un proceso industrial y el entorno de supervisión.
4. Implementación y pruebas

Conclusiones

Recomendaciones

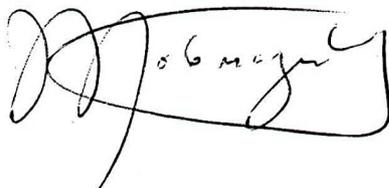
Bibliografía

Anexos

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ  
SECCION ELECTRICIDAD Y ELECTRONICA



Ing. ANDRÉS FLORES ESPINOZA  
Coordinador de la Especialidad de Ingeniería Electrónica





*Dedico este trabajo*

*A mis padres Eleana y Henry en gratitud*

*a su esfuerzo y dedicación por*

*brindarme una buena educación.*

## INDICE

<b>INTRODUCCION .....</b>	<b>11</b>
<b>CAPITULO 1</b>	
<b>Redes Industriales .....</b>	<b>13</b>
1.1. Sistemas de control industrial .....	13
1.1.1 Control centralizado .....	13
1.1.2. Control centralizado multicapa .....	13
1.1.2. Control distribuido .....	14
1.2. Pirámide de automatización .....	14
1.2.1. Nivel de Acción/Sensado .....	14
1.2.2. Nivel de Control .....	15
1.2.3. Nivel de Supervisión .....	15
1.2.4. Nivel de Gestión .....	15
1.3. Redes de comunicación: Modelo OSI y Topologías .....	16
1.3.1. El modelo ISO/OSI .....	16
1.3.2. Topologías de red .....	16
1.4. Protocolos Industriales .....	17
1.4.1. Buses de campo .....	17
1.5. Declaración del marco problemático .....	19
1.6. Objetivos .....	21
1.6.1. Objetivo General .....	21
1.6.2. Objetivos Específicos .....	21
<b>CAPITULO 2</b>	
<b>Redes industriales Inalámbricas para procesos industriales con protocolo MODBUS .....</b>	<b>22</b>
2.1. Redes inalámbricas .....	22
2.1.1. Definición y tipos de redes inalámbricas .....	22
2.1.2. Estándares de comunicación .....	23
2.1.3. Equipos y componentes de las tecnologías inalámbricas .....	24
2.1.4. Topologías de las redes inalámbricas .....	26
2.2. Protocolo de comunicación MODBUS .....	27
2.2.1. Descripción del protocolo MODBUS .....	27

2.2.2. Método de funcionamiento .....	28
2.2.3. Modos de transmisión serial .....	29
2.2.4. Elementos del mensaje MODBUS.....	29
2.2.5. Trama del mensaje MODBUS .....	31
2.2.6. Método de control de errores.....	32
2.2.7. Modelo de datos MODBUS .....	34

### CAPITULO 3

#### **Diseño de la red inalámbrica y del entorno de supervisión para el control de velocidad..... 35**

3.1. Diseño de la red inalámbrica .....	35
3.1.1. Requerimientos de la red inalámbrica .....	35
3.1.2. Importancia del uso de redes y protocolos industriales .....	36
3.1.3. Modelo de la solución tecnológica.....	36
3.1.4. Elección del sistema de comunicaciones .....	38
3.1.5. Selección de equipos de comunicación inalámbrica.....	40
3.1.6. Selección de proveedor de equipos de comunicación inalámbrica .	42
3.1.7. Descripción de los equipos de comunicación de la marca PHOENIX CONTACT.....	46
3.1.8. Diseño de la red inalámbrica con el software RAD-Link 3.24 .....	50
3.2. Diseño del entorno de supervisión .....	55
3.2.1. Principio de funcionamiento de un regulador de velocidad de motor de corriente continua .....	55
3.2.3. Solución tecnológica.....	59
3.2.4. Desarrollo del entorno de supervisión utilizando el software Visu+ 1.2 de la marca PHOENIX CONTACT .....	60

### CAPITULO 4

#### **Implementación y pruebas .....**

4.1. Implementación de la red inalámbrica y del proceso industrial.....	66
4.1.1. Introducción .....	66
4.1.2. Conexión de los equipos .....	66
4.1.3. Supervisión de la red inalámbrica usando el software RAD-Link 3.24 de la marca PHOENIX CONTACT .....	68
4.2. Implementación del sistema de supervisión del proceso industrial .	70
4.2.1. Supervisión del proceso industrial utilizando el software Visu+ 1.2 de la marca PHOENIX CONTACT .....	70

CONCLUSIONES.....	75
RECOMENDACIONES .....	76
BIBLIOGRAFÍA.....	77



## INDICE DE FIGURAS

### Capítulo 1

Figura 1. 1. Control Centralizado.....	13
Figura 1. 2. Control Centralizado Multicapa .....	14
Figura 1. 3. Control Distribuido .....	14
Figura 1. 4. Pirámide de Automatización [4] .....	15
Figura 1. 5. Situación Actual.....	19
Figura 1. 6. Solución tecnológica propuesta .....	20

### Capítulo 2

Figura 2. 1. Categoría de redes inalámbricas [14] .....	24
Figura 2. 2. Topología en las redes inalámbricas .....	27
Figura 2. 3. Modo de funcionamiento .....	28
Figura 2. 4. Mensaje MODBUS .....	29
Figura 2. 5. Organización de datos en la memoria de un dispositivo .....	34

### Capítulo 3

Figura 3. 1. Modelo de la red inalámbrica .....	37
Figura 3. 2. Modelo propuesto de la red inalámbrica.....	41
Figura 3. 3. Área de cobertura mínima de la red inalámbrica.....	51
Figura 3. 4. Canales presentes en la banda de 2.4 GHz .....	52
Figura 3. 5. Espectro en frecuencia y mapa térmico en la banda 2.4 GHz ..	52
Figura 3. 6. Esquema del motor de corriente continua .....	55
Figura 3. 7. Zonas de ajuste de motores de corriente continua.....	56
Figura 3. 8. Señales a utilizar .....	58
Figura 3. 9. Entrada analógica (Fuente de voltaje) .....	58
Figura 3. 10. Salida analógica (Módulo de Control).....	59
Figura 3. 11. Solución Tecnológica .....	60
Figura 3. 12. Señales necesarias para el control de velocidad del motor ....	60
Figura 3. 13. Plantilla 1 – Motor y Borneras .....	62
Figura 3. 14. Plantilla 2 - Control de Velocidad .....	62
Figura 3. 15. Plantilla 3 – Panel de Alarmas .....	63
Figura 3. 16. Fuente de voltaje controlada por corriente .....	64
Figura 3. 17. Sensor de velocidad.....	64
Figura 3. 18. Interruptores y lámparas .....	65

### Capítulo 4

Figura 4. 1. Control de velocidad de un motor de corriente continua .....	66
Figura 4. 2. Convertidor de voltaje a corriente .....	67
Figura 4. 3. Gráfica de Indicador de Intensidad de Señal Recibida RSSI. ( <i>Received Signal Strength Indicator</i> ).....	68
Figura 4. 4. Gráfica de paquetes perdidos .....	69
Figura 4. 5. Proceso industrial y entorno de supervisión .....	70

Figura 4. 6. Plantilla 1 – Motor y Borneras .....	71
Figura 4. 7. Plantilla 2 – Control de Velocidad .....	71
Figura 4. 8. Plantilla 3 – Panel de Alarmas .....	71
Figura 4. 9. Plantilla de Tendencias .....	72
Figura 4. 10. Porcentaje de error.....	74



## INDICE DE TABLAS

### Capítulo 1

Tabla 1. 1. Capas y descripción del modelo OSI [5] .....	16
Tabla 1. 2. Topologías de red [6].....	17
Tabla 1. 3. Características de algunos buses y protocolos [8].....	18

### Capítulo 2

Tabla 2. 1. Tipos de redes inalámbricas [9] .....	22
Tabla 2. 2. Clasificación de las antenas [16].....	25
Tabla 2. 3. Parámetros de desempeño de una antena [16].....	26
Tabla 2. 4. MODBUS en el modelo ISO/OSI.....	28
Tabla 2. 5. Códigos de función.....	30
Tabla 2. 6. Trama ASCII .....	31
Tabla 2. 7. Trama RTU .....	32
Tabla 2. 8. Tabla de datos MODBUS .....	34

### Capítulo 3

Tabla 3. 1. Características de los equipos de DATA LINC GROUP [25].....	42
Tabla 3. 2. Características de las redes inalámbricas de SIEMENS [26].....	43
Tabla 3. 3. Tecnologías inalámbricas de PHOENIX CONTACT [27].....	45
Tabla 3. 4. Datos Técnicos del transceptor de radiotelefonía.....	46
Tabla 3. 5. Datos técnicos del transceptor de radio .....	47
Tabla 3. 6. Datos técnicos del módulo de entradas/salidas analógicas y digitales.....	48
Tabla 3. 7. Datos técnicos de la antena omnidireccional.....	49
Tabla 3. 8. Datos técnicos de la fuente de alimentación.....	50
Tabla 3. 9. Parámetros de la red inalámbrica .....	53
Tabla 3. 10. Parámetros de los equipos de la red inalámbrica.....	54
Tabla 3. 11. Variables utilizadas.....	65

### Capítulo 4

Tabla 4. 1. Características de la red inalámbrica.....	69
Tabla 4. 2. Resultados de las pruebas.....	73

## INTRODUCCION

Estamos en un mundo en el cual el acceso a la información y la movilidad son una constante necesidad que va en aumento día a día. En aras de satisfacer estas necesidades, han surgido nuevas tecnologías de información y de comunicaciones, cada una enfocada en un campo específico.

Una de estas tecnologías, las comunicaciones inalámbricas o Wireless, está tomando cada día mayor importancia por su costo, por su versatilidad, por la libertad de movimiento al liberarse de conexiones física limitantes. Este tipo de conexión nos brinda la posibilidad de desplazarnos a diferentes lugares dentro del rango de cobertura de un punto de acceso al cual estamos conectados con las mismas características de una red cableada.

Sin embargo, la penetración de tecnologías inalámbricas en un entorno industrial no ha sido tan fácil como en el hogar o la oficina. En la industria hay problemas ambientales especiales que tienen que ser superados. La seguridad y la confiabilidad son dos factores a tener en cuenta en redes inalámbricas industriales.

Como hipótesis de investigación, se considera que las redes industriales utilizadas en la actualidad tienen como protagonista principal a las redes físicas, es decir redes cableadas que no permiten la libre movilidad. Entonces un sistema de control basado en una red inalámbrica brindará la movilidad requerida sin sacrificar la calidad en la transmisión de datos.

El objetivo general de la investigación es el diseño e implementación de una red inalámbrica para propósitos de control de procesos industriales, utilizando el protocolo industrial MODBUS. Como objetivos específicos están el desarrollo de una experiencia práctica de uso de redes inalámbricas, en este caso, el control de velocidad de un motor de corriente continua; asegurar la disponibilidad de los datos en el laboratorio de Control Avanzado de la Pontificia Universidad Católica del Perú considerando que la estación de supervisión puede situarse en cualquier lugar dentro del laboratorio; y el

desarrollo del entorno de supervisión de dicho proceso así como su implementación.

En el capítulo 1 se hablará acerca de las redes industriales, definiendo que es un sistema industrial de control, la pirámide de automatización y las redes de comunicación, poniendo énfasis en las comunicaciones industriales.

En el capítulo 2 se mencionará acerca de las redes industriales inalámbricas utilizando protocolo MODBUS. Para ello se define primero que son las redes inalámbricas, los estándares actuales y posteriormente se hablará acerca del protocolo industrial MODBUS.

En el capítulo 3 se desarrollará el diseño de la red inalámbrica y el entorno de supervisión. Primero se definirán los requerimientos de la red que se desea diseñar, así como los equipos que se necesitan para tal fin. Posteriormente se desarrollará el entorno de supervisión teniendo en cuenta el proceso industrial que se va a monitorear.

En el capítulo 4 se comentará acerca de la implementación de la red inalámbrica en un entorno de laboratorio y de la puesta en marcha del sistema de supervisión, realizando algunas experiencias y obteniendo valores que servirán para formular las conclusiones correspondientes.

Finalmente se presentarán las conclusiones y recomendaciones que se deben tener en cuenta al momento de su implementación y puesta en funcionamiento.

## CAPITULO 1

### Redes Industriales

#### 1.1. Sistemas de control industrial

##### 1.1.1 Control centralizado

El control centralizado se da en sistemas poco complejos donde varios procesos pueden ser gestionados directamente mediante un único elemento de control encargado de realizar todas las tareas relacionadas a dichos procesos de producción tal como se muestra en la figura 1.1.

La principal ventaja es que su arquitectura facilita el flujo de información pero tiene la desventaja que depende de la fiabilidad del elemento de control utilizado ya que este se encarga de controlar y gestionar los diferentes procesos.

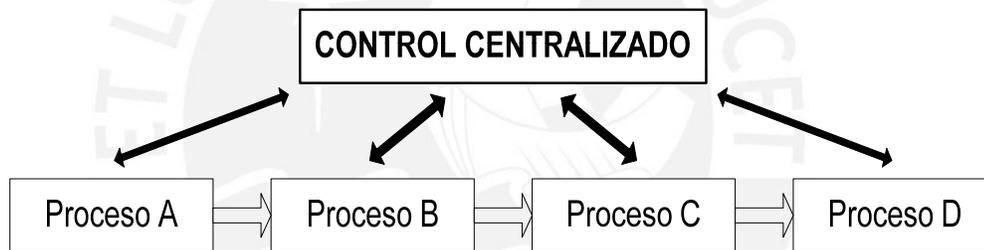


Figura 1. 1. Control Centralizado

##### 1.1.2. Control centralizado multicapa

El control centralizado multicapa es un control jerárquico de dos niveles: el nivel más bajo está constituido por controladores locales para el control de lazos específicos o subprocesos del sistema, mientras que en el nivel superior podemos encontrar al computador central que establece las órdenes correspondientes a cada controlador local.

Como se puede apreciar en la figura 1.2., los controladores locales realizan tareas relacionadas al control de cada proceso independientemente de los otros controladores, siendo un control centralizado en la etapa superior donde se encuentra un ordenador que realiza tareas de supervisión y gestión de alarmas, así como tratamientos de señal y control de procesos [1]

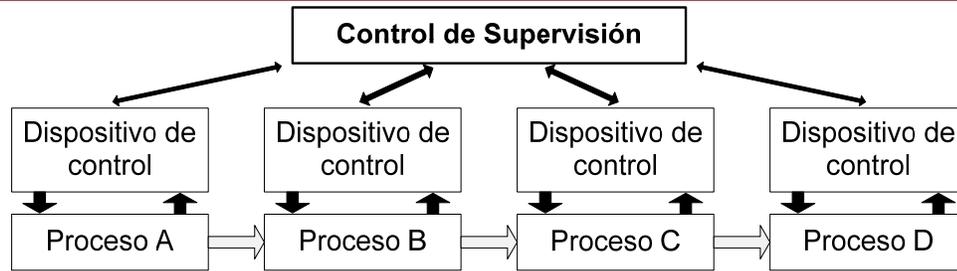


Figura 1. 2. Control Centralizado Multicapa

**1.1.2. Control distribuido**

Bajo esta denominación englobamos aquellos sistemas destinados al control de grandes o pequeñas plantas de procesos, fundamentalmente de tipo continuo, con capacidad de llevar a cabo el control integral de la planta. Se caracterizan por un fuerte componente informático y una estructura jerarquizada.

A grandes rasgos, está constituido por un conjunto de controladores y una computadora central enlazados por un canal de comunicación muy rápido. Al observar la figura 1.3 se puede apreciar que su estructura es muy similar al control centralizado multicapa con la diferencia que en el control distribuido los dispositivos de control se comunican entre sí. [2]

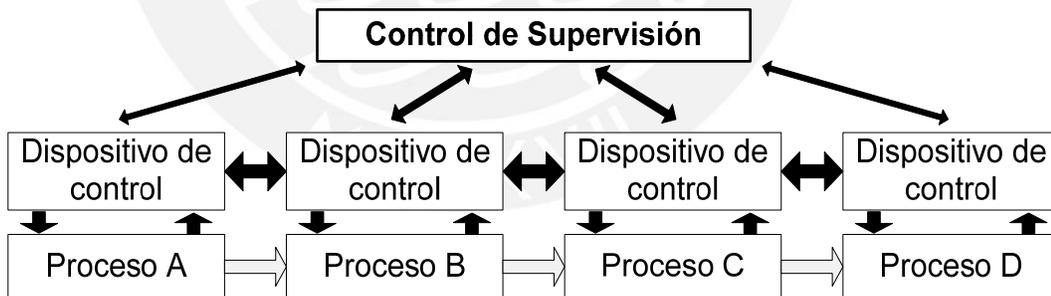


Figura 1. 3. Control Distribuido

**1.2. Pirámide de automatización**

**1.2.1. Nivel de Acción/Sensado**

Conocido también como nivel de instrumentación, está más relacionado con el proceso. Está formado por los diferentes elementos de medida (sensores) y mando (actuadores) distribuidos en una línea de producción tal como se observa en la figura 1.4.

### 1.2.2. Nivel de Control

En este nivel se sitúan los elementos capaces de gestionar los actuadores y sensores del nivel anterior tales como Controladores Lógicos Programables-PLC o equipos basados en microprocesadores. Gran cantidad de procesos industriales están basados exclusivamente en estos dos niveles ya que los dispositivos que conforman estos dos niveles poseen autonomía suficiente como para realizar procesos productivos por sí mismos.

### 1.2.3. Nivel de Supervisión

En este nivel es posible visualizar cómo se está llevando a cabo el proceso de planta, y a través de entornos SCADA (Supervisión, Control y Adquisición de Datos) poseer una imagen virtual de la planta de modo que se pueda visualizar el estado de fallas, alarmas o alteraciones en el proceso que se lleva a cabo. Para ello resulta imprescindible el uso de buses de campo de altas prestaciones, pues es necesaria la transmisión de grandes volúmenes de información así como la conexión con un gran número de elementos de control.

### 1.2.4. Nivel de Gestión

Este nivel, por estar más alejado de los procesos productivos, está constituido principalmente por computadores, con los que es posible procesar la información relativa a la producción y su gestión asociada, es decir, es posible obtener información de todos los niveles inferiores de una o varias plantas. [3]

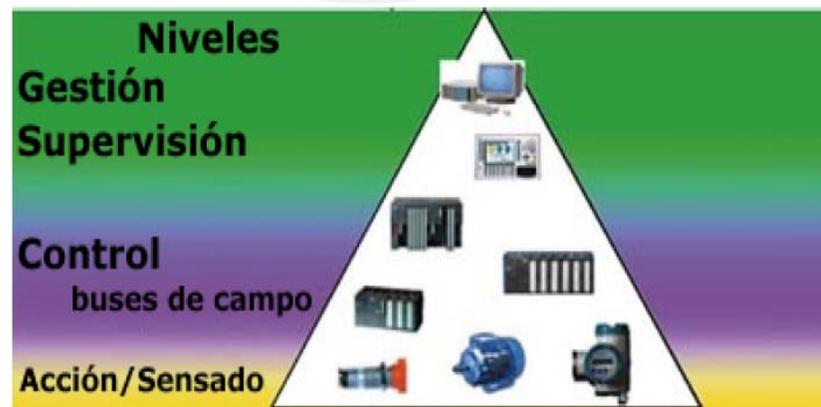


Figura 1. 4. Pirámide de Automatización [4]

### 1.3. Redes de comunicación: Modelo OSI y Topologías

#### 1.3.1. El modelo ISO/OSI

Cuando se produce un intercambio de datos entre equipos de un sistema de comunicaciones es preciso definir el sistema de transmisión y el método de acceso, así como informaciones relativas al establecimiento de los enlaces. Por este motivo, la *International Standards Organization* (ISO) especificó el modelo ISO/OSI, el cual está compuesto por siete capas, tal como se aprecia en la Tabla 1.1.

Tabla 1. 1. Capas y descripción del modelo OSI [5]

CAPA	NOMBRE	FUNCIÓN
7	<b>Capa de aplicación</b>	Función de usuario. Intercambio de variables.
6	<b>Capa de Presentación</b>	Conversión a un formato adecuado al equipo.
5	<b>Capa de Sesión</b>	Establecimiento, disolución y vigilancia de una sesión.
4	<b>Capa de Transporte</b>	Formación, repetición y clasificación de paquetes.
3	<b>Capa de Red</b>	Direccionamiento de otras redes y control de flujo. Rutas de comunicación.
2	<b>Capa de Enlace de Datos</b>	Método de acceso. Gestión de colisiones. Detección y eliminación de errores.
1	<b>Capa Física</b>	Método físico de transmisión. Test de errores a nivel de bit.

#### 1.3.2. Topologías de red

Se llama topologías de red a las diferentes estructuras de interconexión en que se pueden organizar las redes de transmisión de datos entre dispositivos. Cuando componentes de automatización autónomos tales como sensores, actuadores, autómatas programables, etc., intercambian información, estos deben interconectarse físicamente con una estructura determinada. Cada topología de red lleva asociada una topología física y una topología lógica. La primera (topología física), es la que define la estructura física de la red, es decir, la manera en la que debe estar dispuesto

el cable de interconexión entre los elementos de la red. La topología lógica es un conjunto de reglas normalmente asociado a una topología física, que define el modo en el que se gestiona la transmisión de los datos.

En la tabla 1.2 se mencionan las topologías más utilizadas en las redes de comunicación.

Tabla 1. 2. Topologías de red [6]

TOPOLOGÍA	CARACTERÍSTICAS
<b>Interconexión total y parcial</b>	Múltiples enlaces entre los nodos de la red. Múltiples caminos de interconexión entre nodos. Si un nodo falla, la red no se ve afectada.
<b>Interconexión en estrella</b>	Cada nodo se conecta a un nodo central El nodo central se encarga del control de acceso a la red. Si el nodo central falla, la red falla en su totalidad.
<b>Interconexión en bus</b>	Todos los nodos están conectados a un único bus. Todos los nodos escuchan el mensaje presente en el bus. Si una estación falla, la red no se ve afectada.
<b>Interconexión en árbol</b>	Encadenamiento de diferentes estructuras en bus. Se establecen jerarquías de comunicación entre nodos. Si una estación falla, la red no se ve afectada.
<b>Interconexión en anillo</b>	Cada nodo se conecta en serie alrededor de un anillo. Los mensajes se transmiten en una dirección. El control de la red queda distribuido entre todos los nodos.

#### 1.4. Protocolos Industriales

##### 1.4.1. Buses de campo

El bus de campo constituye el nivel más simple y próximo al proceso dentro de la estructura de comunicaciones industriales. Está basado en procesadores simples y utiliza un protocolo mínimo para gestionar el enlace entre ellos. Los buses en la actualidad contemplan la posibilidad de integración del bus a una estructura de comunicaciones jerárquicamente superior e inferior así como a una estructura más potente para así enlazar los diferentes niveles de la pirámide de automatización.

La característica básica para que una red de comunicación pueda denominarse como bus de campo es que permita intercambiar órdenes y datos entre productos de un mismo o de distintos fabricantes a través de un protocolo reconocido por cada uno de los nodos. [7]

En la tabla 1.3 se puede apreciar una comparación entre los diferentes buses de campo y protocolos industriales teniendo en cuenta sus características como topología, soporte, velocidad y tipo de comunicación.

Tabla 1. 3. Características de algunos buses y protocolos [8]

NOMBRE	TOPOLOGÍA	SOPORTE	VELOCIDAD	COMUNICACIÓN
<b>Profibus DP</b>	Bus, estrella y anillo	Par trenzado Fibra óptica	1.5 Mbps 12 Mbps	Master/Slave peer to peer
<b>Profibus PA</b>	Bus, estrella y anillo	Par trenzado Fibra óptica	31.5 Kbps	Master/Slave peer to peer
<b>Foundation Fieldbus H1</b>	Estrella o bus	Par trenzado Fibra óptica	31.25 Kbps	Signal/multi master
<b>Devicenet</b>	Bus con bifurcaciones	Par trenzado Fibra óptica	500 Kbps	Master/Slave multi-master peer to peer
<b>ASi</b>	Bus, anillo, árbol, estrella	Par trenzado	167 Kbps	Master/Slave
<b>Modbus RTU</b>	Bus, estrella, árbol, red con segmentos	Par trenzado Coaxial Radio	1.2 a 115.2 Kbps	Master/Slave
<b>Ethernet Industrial</b>	Bus, estrella, malla.	Coaxial Par trenzado Fibra óptica	10, 100 Mbps	Master/Slave peer to peer
<b>Hart</b>	Lazo	Par trenzado	1.2 Kbps	Master/Slave

### 1.5. Declaración del marco problemático

En el pabellón de Ingeniería Electrónica de la Pontificia Universidad Católica del Perú se cuenta con módulos de enseñanza en técnicas de control de procesos industriales. Las variables de interés así como las señales de instrumentación y control sólo son accesibles localmente mediante sistemas cableados con tecnología convencional, tal como se aprecia en la figura 1.5. Esta circunstancia restringe el acceso a la información de las variables de control en un entorno de un metro alrededor de los módulos didácticos. Este hecho representa una seria limitación cuando se trata por ejemplo de hacer demostraciones en clase del funcionamiento de un lazo de control. Las principales señales del módulo didáctico tendrían que cablearse físicamente hasta el lugar de la demostración con los respectivos gastos en el cableado, ductos de cableado y la inseguridad de las instalaciones provisionales.

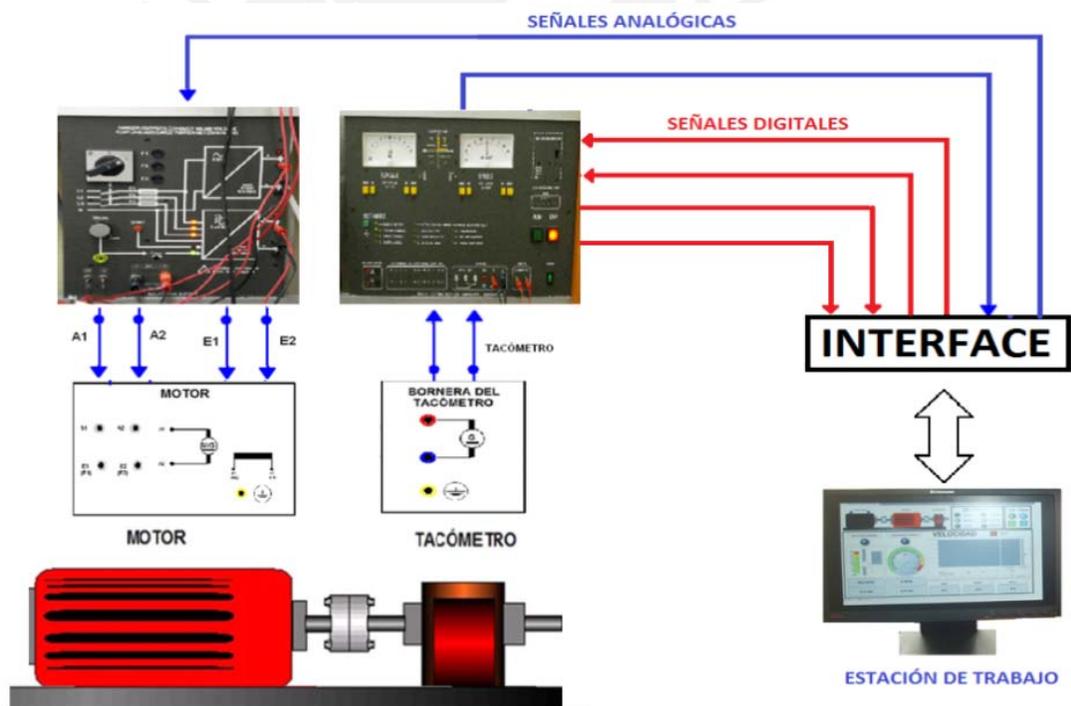


Figura 1. 5. Situación Actual

Una alternativa de solución a esta problemática son las comunicaciones inalámbricas. Al utilizar esta alternativa se dejaría de lado el problema relacionado al cableado y transmisión de las señales a través de medio físicos. Esta alternativa se puede apreciar en la figura 1.6 donde se observa

que, utilizando una interfaz, podemos transmitir las señales eléctricas a través del ambiente tomando ciertos criterios que se irán describiendo a lo largo de este documento.

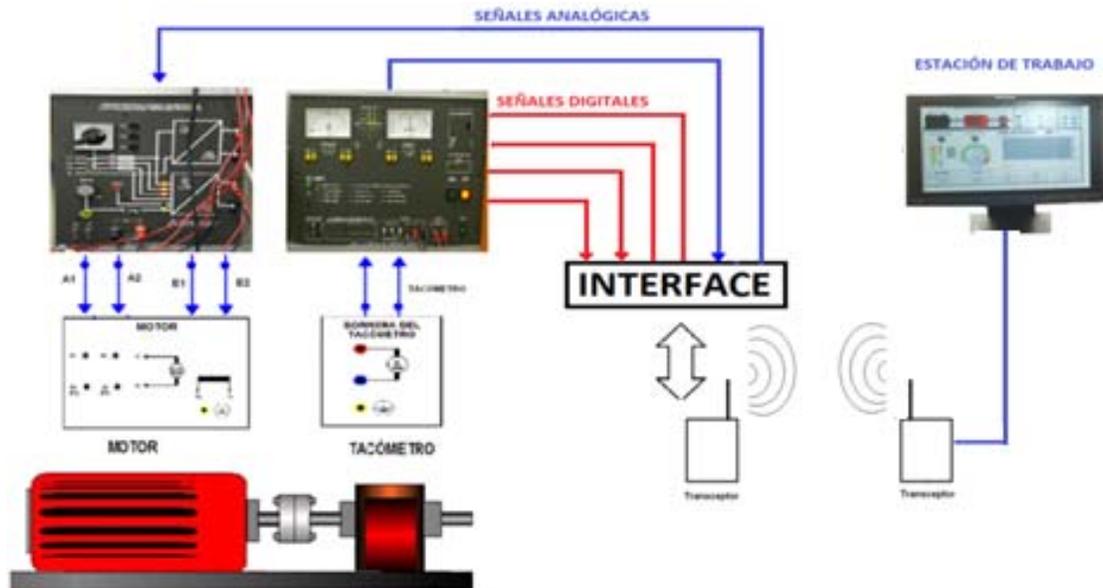


Figura 1. 6. Solución tecnológica propuesta

La problemática con respecto a la movilidad aún persiste debido a que la penetración de tecnologías inalámbricas en el entorno industrial no es muy difundida fundamentalmente porque el ambiente en entornos industriales es hostil a comparación del ambiente que se puede encontrar en implementación de redes inalámbricas en el hogar u oficina, en donde las redes inalámbricas tienen mayor importancia día a día. Cabe mencionar que en la industria hay problemas ambientales especiales que tienen que ser superados tomando en cuenta también la seguridad y la confiabilidad de la señal al momento de implementar las redes inalámbricas industriales.

Se debe aclarar que dicho diseño se limita a establecer el enlace de la señal inalámbrica, asegurar el área de cobertura que está definido por el área del laboratorio en el cual se realizarán las pruebas, y posteriormente desarrollar una experiencia práctica, en este caso se optará por un control directo, es decir se enviarán comandos de velocidad al motor y se registrarán la velocidad real del motor, así como el error que se calcula en base a la referencia y la velocidad desarrollada por el motor.

## 1.6. Objetivos

### 1.6.1. Objetivo General

El objetivo general de la investigación es el diseño e implementación de una red inalámbrica para propósitos de control de procesos industriales, utilizando el protocolo industrial MODBUS.

### 1.6.2. Objetivos Específicos

Como objetivos específicos están:

- El desarrollo de una experiencia práctica de uso de redes inalámbricas, en este caso, el control de velocidad de un motor de corriente continua.
- Asegurar la disponibilidad de los datos en el laboratorio de Control Avanzado de la Pontificia Universidad Católica del Perú considerando que la estación de supervisión puede situarse en cualquier lugar dentro del laboratorio.
- El desarrollo del entorno de supervisión de dicho proceso así como su implementación.

## CAPITULO 2

### Redes industriales Inalámbricas para procesos industriales con protocolo MODBUS

#### 2.1. Redes inalámbricas

##### 2.1.1. Definición y tipos de redes inalámbricas

Son redes de telecomunicaciones en donde la interconexión entre nodos es simplemente por un medio de transmisión no guiado, es decir, sin el uso de cables. Son generalmente implementadas con algún tipo de sistema de transmisión de información que usa ondas electromagnéticas, como las ondas de radio.

Las redes inalámbricas se clasifican dependiendo del área de cobertura de la señal que puede ir desde unos cuantos metros hasta unos miles de kilómetros utilizada preferentemente para comunicaciones globales. En la tabla 2.1 se describen brevemente los tipos de redes inalámbricas utilizadas en la actualidad.

Tabla 2. 1. Tipos de redes inalámbricas [9]

TIPO DE RED	DEFINICIÓN
<b>Redes inalámbricas de área personal (WPAN)</b>	Son aquellas redes pensadas hacia la residencia del usuario, ya que el área de cobertura no es mayor a 12 metros.
<b>Redes inalámbricas de área local (WLAN)</b>	Estas redes tienen un radio de irradiación mayor a las redes personales. Están pensadas para ofrecer servicios a edificios contiguos.
<b>Redes inalámbricas de área metropolitana (WMAN)</b>	El rango de irradiación es mayor a las redes antes mencionadas y brinda servicio a una ciudad o entorno metropolitano.
<b>Redes inalámbricas de área extendida (WWAN)</b>	Poseen un rango de irradiación que es capaz de brindar servicios a regiones completas, países o continentes.

## **2.1.2. Estándares de comunicación**

### **2.1.2.1. Bluetooth**

Bluetooth es un estándar de transmisión de datos vía radio que permite que los dispositivos electrónicos se “comprendan” entre sí a distancia; también permite comunicaciones inalámbricas de baja potencia con frecuencias en torno a los 2.45 GHz, con velocidades máximas de hasta 1 Mbit/s (aunque la velocidad útil ronda los 720 Kbit/s), y donde se pueden conectar un máximo de ocho equipos, con una longitud total de 10 metros. Esta comunicación se realiza independientemente de quién sea el fabricante, ya que se trata de un estándar, así como del lugar donde nos encontremos, puesto que opera en una banda libre (2.45 GHz). [10]

### **2.1.2.2. Wi-Fi**

Wi-Fi originalmente estaba basada en el estándar IEEE 802.11b. Luego, se decidió que se expandiera e incluyera los productos de 54 Mbps operando en los espectros de frecuencia de 2.4 y 5 GHz. El estándar IEEE 802.11b surge gracias a que la IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*) estableció el estándar para redes inalámbricas 802.11 con velocidades de transmisión de 1 y 2 Mbps. La revisión 802.11b de dicho estándar permitió alcanzar los 11 Mbps en la banda de 2.4 GHz, en los que se conoce como banda S –*Industrial, Scientific and Medical (ISM)* – con el uso de la tecnología DSSS – *Direct Sequence Spread Spectrum* – y la limitación de su potencia máxima a menos de 1 W. [11]

### **2.1.2.3. WiMAX**

WiMAX es un sistema de comunicación digital inalámbrica, también conocida como IEEE 802.16, que se destina para la telefonía celular "Redes de Área Metropolitana". Esta tecnología puede proporcionar acceso inalámbrico de banda ancha (BWA) hasta 50 km para estaciones fijas, y de 5 a 15 km para estaciones móviles a diferencia del Wi-Fi/802.11 que se limita en la mayoría de los casos a 30 o 100m. [12]

### **2.1.2.4. GSM/GPRS**

GSM (Global System for Mobile Communications) es un sistema digital de telefonía móvil que provee un estándar común para los usuarios,

permitiendo el roaming internacional y la capacidad de ofrecer a alta velocidad servicios avanzados de transmisión de voz, datos y video, y otros servicios de valor agregado.

Los principales servicios que ofrece esta tecnología son la posibilidad de utilizar GPRS (General Packet Radio Service), servicios WAP (Wireless Application Protocol), envío y recepción de mensajes SMS y MMS. Entre las principales ventajas que ofrece esta tecnología destacan la privacidad, inviolabilidad, cobertura, gran velocidad y roaming internacional. [13]

En la figura 2.1 podemos observar los diferentes estándares dependiendo de la categoría de la red inalámbrica a la que pertenecen.



Figura 2. 1. Categoría de redes inalámbricas [14]

### 2.1.3. Equipos y componentes de las tecnologías inalámbricas

#### 2.1.3.1. Transmisores y receptores

El transmisor es un dispositivo electrónico destinado al envío de las señales. Crea y manda una señal de radiofrecuencia a la antena, que es la encargada de radiar el éter. La señal recorre una larga distancia y provoca una tensión inducida en las antenas receptoras que halla a su paso. El receptor es también un circuito electrónico pero a diferencia del transmisor, aquel permite la recuperación de las señales transmitidas por un transmisor mediante ondas electromagnéticas. [15]

### 2.1.3.2. Antenas

Una antena, en principio, puede ser cualquier conductor de dimensiones comparables a la longitud de onda ( $\lambda$ ) de cierta señal, la cual, al momento de viajar por el espacio, se encuentra a su paso con el conductor, y al hacerlo queda atrapada, produciendo una distribución de corriente en el conductor.

Dada la gran variedad de antenas disponibles en la actualidad, podemos clasificarlas según su forma de radiación o según su geometría y/o construcción de manera general mencionando algunas características como se muestra en la tabla 2.2.

Tabla 2. 2. Clasificación de las antenas [16]

	TIPO DE ANTENA	CARACTERÍSTICAS
SEGÚN SU FORMA DE RADIACIÓN	Antenas omnidireccionales	Dipolos eléctricos y magnéticos, antenas de parche.
	Antenas direccionales	Yagi-Uda, reflectores parabólicos, helicoidales, arreglos dipolares.
	Antenas independientes de la frecuencia	Logarítmicas, espirales, espirales cónicas.
	Antenas electrónicamente direccionables y adaptativas	Arreglos de antena de fase controlada (AAFC)
SEGÚN SU GEOMETRÍA Y/O CONSTRUCCIÓN	Antenas delgadas	Dipolos eléctricos y magnéticos, logarítmica, Yagui-Uda, helicoidal, arreglo de dipolos.
	Antenas de abertura	Guía de onda, corneta, reflectores parabólicos y hiperbólicos.
	Antenas autodefinidas	Logarítmicas, espirales, espirales cónicas.
	Antenas planares	Antenas de parche (diversas geometrías), espirales.
	Antenas cuasi-ópticas	Antenas de Fresnel.

También debe tomarse en cuenta las características que miden el desempeño de una antena o en general de los diversos aspectos de un sistema radiante determinado. Estos aspectos se detallan en la tabla 2.3.

Tabla 2. 3. Parámetros de desempeño de una antena [16]

PARÁMETRO	DEFINICIÓN
<b>Patrón de radiación</b>	Es la distribución espacial de potencia irradiada por la antena
<b>Ángulo de <math>\frac{1}{2}</math> potencia</b>	Es el ángulo dentro del cual se encuentra la mitad de la energía irradiada.
<b>Directividad</b>	Es la medida de la capacidad de dirigir la energía en cierta dirección en relación con otra antena tomada como referencia
<b>Impedancia de antena</b>	Es la impedancia medida en los terminales de alimentación dependiendo de la geometría de la antena
<b>Ancho de banda</b>	Es el rango de frecuencias en el cual las características de ganancia o impedancia no se modifican más allá de ciertos valores.
<b>Polarización</b>	Es la dirección del campo eléctrico emitido por la antena.

#### 2.1.4. Topologías de las redes inalámbricas

##### 2.1.4.1. Topología en estrella

El arreglo típico o por defecto de una red inalámbrica es la topología en estrella, Figura 2.2a, en la que el Punto de Acceso (*Access Point*) se encuentra en el centro de la red. Cada dispositivo inalámbrico se comunica solamente con el punto de acceso común, el cual está conectado mediante cables al *switch* de la red.

##### 2.1.4.2. Topología en árbol

De manera similar a las redes convencionales, las redes inalámbricas se pueden organizar en una topología en árbol, Figura 2.2b. En esta disposición, cada campo está configurado para una red en particular y que a la vez está conectada a un switch/punto de acceso. Este punto de acceso

está conectado con otro punto de acceso de manera que sigan una jerarquía mientras más se acercan a la red cableada.

### 2.1.4.3. Topología en malla

Esta topología es la más revolucionaria de las topologías existentes en la actualidad. En una red en malla, Figura 2.2c, cada estación se comporta como dispositivo final así como elemento de transmisión, por lo que la red se hace redundante, tolerante a fallos y posee gran área de irradiación. [17]

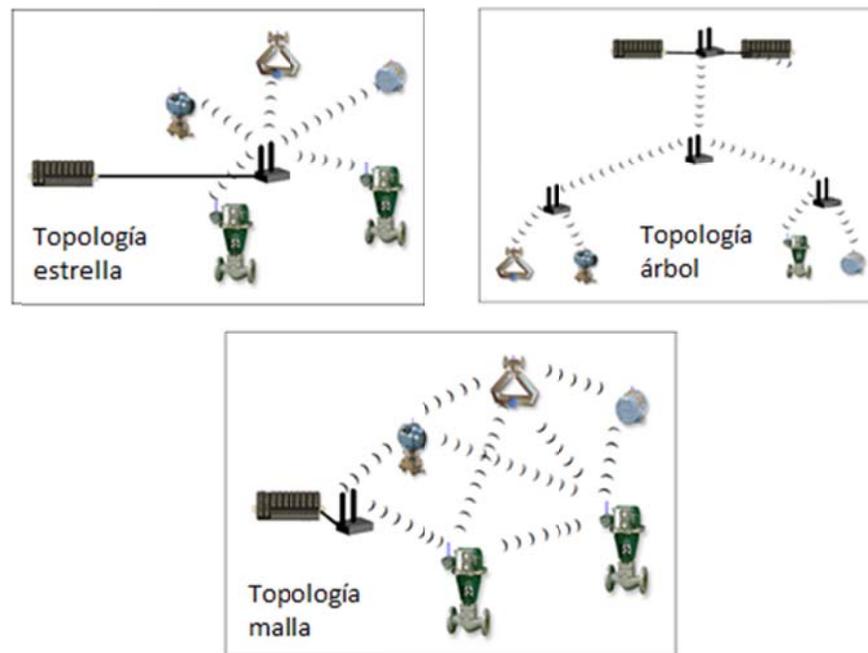


Figura 2. 2. Topología en las redes inalámbricas

## 2.2. Protocolo de comunicación MODBUS

### 2.2.1. Descripción del protocolo MODBUS

El protocolo MODBUS es uno de los protocolos industriales más antiguos, apareció para transmitir y recibir datos de control entre los controladores y los sensores mediante comunicación serial RS-232, RS-422 o RS-485. MODBUS es una estructura de mensajería estableciendo la comunicación maestro/esclavo, en el que cada solicitud del maestro es tratada de forma independiente por el esclavo.

Debido a que el protocolo MODBUS es una estructura de mensajería, es independiente de la capa física y se encuentra posicionada en la capa 7 del

modelo ISO/OSI (Capa de Aplicación) tal como se puede apreciar en la Tabla 2.4.

Tabla 2. 4. MODBUS en el modelo ISO/OSI

MODELO ISO/OSI	
7	Capa de Aplicación
6	Capa de Presentación
5	Capa de Sesión
4	Capa de Transporte
3	Capa de Red
2	Capa de Enlace de Datos
1	Capa Física

← MODBUS

**2.2.2. Método de funcionamiento**

En el mensaje enviado por un maestro, Figura 2.3, se especifica la dirección del esclavo, la acción a realizar (por ejemplo escribir registro, leer registro), los datos que son necesarios para realizar la acción especificada anteriormente y una suma de verificación (LRC o CRC).

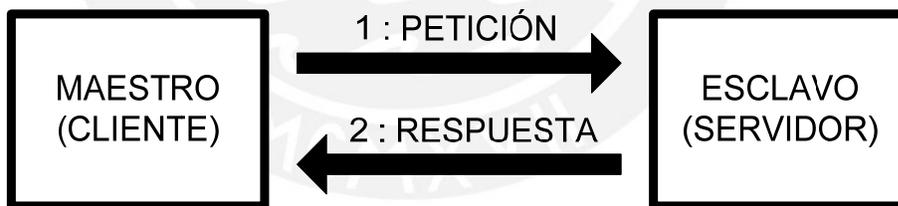


Figura 2. 3. Modo de funcionamiento

Cuando el dispositivo maestro envía una petición, el campo de código de función contiene la dirección del dispositivo esclavo al que se dirige el mensaje. En el campo de datos se encuentra la información necesaria para realizar la función. El campo de verificación de errores proporciona un método para que el dispositivo esclavo pueda validar la integridad del contenido del mensaje recibido.

Si el dispositivo esclavo tiene una respuesta normal, entonces el campo de código de función será idéntico al código de función de la petición hecha por el dispositivo maestro. En el campo de datos se encuentra los datos recabados por el esclavo. Si se produce un error, el código de función es modificado para indicar que se produjo un error y en el campo de datos se especifica el error producido. [23]

### 2.2.3. Modos de transmisión serial

#### 2.2.3.1. Modo ASCII (American Standard Code for Information Interchange)

En este modo se envía dos caracteres (2 bytes equivalentes a 16 bits) por cada mensaje, pudiendo haber hasta 1 segundo de tiempo de diferencia entre ellos sin producir error.

#### 2.2.3.2. Modo RTU (Remote Terminal Unit)

Al configurar los controladores con este modo se envían cuatro caracteres hexadecimales (4 bits cada uno) para cada mensaje. Esta opción es más empleada en transmisiones inalámbricas. Cada mensaje debe ser transmitido en un flujo continuo.

### 2.2.4. Elementos del mensaje MODBUS

#### 2.2.4.1. Direcciones MODBUS

El mensaje que se transmite, Figura 2.4, está basado en un paquete simple denominado Unidad de Datos de Protocolo PDU (*Protocol Data Unit*) al cual se puede incluir otros campos adicionales en la Unidad de Datos de Aplicación ADU (*Application Data Unit*).



Figura 2. 4. Mensaje MODBUS

En cada mensaje MODBUS, la dirección del dispositivo receptor es la primera información que se coloca en la trama al momento de la transmisión. Este parámetro contiene un byte de información.

- En modo ASCII se codifica en dos caracteres hexadecimales.
- En modo RTU sólo se emplea un byte.

Las direcciones válidas en este campo se encuentran dentro del rango de 0 a 247. Sin embargo, los valores asignados a cada dispositivo MODBUS van en el rango de 1 a 247 ya que el 0 se utiliza como dirección de mensaje público o *broadcast*.

#### **2.2.4.2. Códigos de función**

La función de código, Tabla 2.5, como segundo parámetro en cada mensaje MODBUS, define el tipo de mensaje y el tipo de acción requerida por el dispositivo esclavo. Este parámetro está contenido en un byte de información.

- En modo ASCII se codifica en dos caracteres hexadecimales.
- En modo RTU sólo se emplea un byte.

Tabla 2. 5. Códigos de función

RANGO	USO
0	No Válido
1-127	Funciones válidas
128-255	Respuestas de excepción

#### **2.2.4.3. Campo de datos**

Contiene información adicional que el servidor utiliza para llevar a cabo la acción definida por el código de función. Estos datos pueden incluir:

- Direcciones discretas.
- Direcciones de registros.
- Cantidad de ítems a ser manipulados.
- Cuenta de bytes actuales en el campo de datos.

#### 2.2.4.4. Campo de control de errores

En este campo, el contenido dependerá del método de control de errores que se esté utilizando en la red MODBUS.

- En modo ASCII, se utiliza el chequeo de redundancia longitudinal LRC (*Longitudinal Redundancy Check*)
- En modo RTU, se utiliza el chequeo de redundancia cíclica CRC (*Cyclical Redundancy Check*).

#### 2.2.5. Trama del mensaje MODBUS

##### 2.2.5.1. Trama ASCII

En modo ASCII, Tabla 2.6, el tamaño de la palabra es de 7 bits y los mensajes comienzan con un signo de dos puntos (:), caracter ASCII 3A hexadecimal; y la trama finaliza con un retorno de línea (CRLF) caracteres ASCII 0D y 0A hexadecimal respectivamente. En los demás campos que contiene la trama MODBUS, los caracteres permitidos son hexadecimales, 0...9, A...F. A cada caracter (7 bits) se le añade 1 bit de inicio, 1 bit de paridad y 1 bit de parada.

Tabla 2. 6. Trama ASCII

INICIO	DIRECCIÓN	FUNCIÓN	DATOS	LRC	FIN
:	2 caracteres	2 caracteres	N caracteres	2 caracteres	CR LF

##### 2.2.5.2. Trama RTU

En modo RTU, Tabla 2.7, el tamaño de la palabra es de 8 bits y comienza con un intervalo de silencio de al menos 3.5 veces el tiempo de caracter.

Al igual que en la trama ASCII, los caracteres permitidos en los diferentes campos son números hexadecimales 0...9, A...F. Los dispositivos controladores monitorean continuamente la red, incluso en los intervalos de silencio. Una vez que el primer campo (campo de direcciones) es recibido, cada dispositivo decodifica el mensaje para corroborar si es el destinatario del mensaje.

La trama completa debe ser transmitida de forma continua. Si hay un intervalo de silencio mayor a 1.5 veces el tiempo de caracter antes del

término del mensaje, el dispositivo receptor rechazará el mensaje incompleto y asumirá que el próximo byte corresponderá al campo de dirección de un nuevo mensaje.

Tabla 2. 7. Trama RTU

INICIO	DIRECCIÓN	FUNCIÓN	DATOS	CRC	FIN
3.5 tiempo de caracter	8 bits	8 bits	N*8 bits	16 bits	3.5 tiempo de caracter

## 2.2.6. Método de control de errores

### 2.2.6.1. Comprobación de paridad

En cualquiera de los dos modos de transmisión serial (ASCII y RTU) con los que cuenta el protocolo MODBUS, se cuenta con dos tipos de comprobación de errores. Comprobación de paridad (par o impar) aplicable a cada carácter y Control de trama (LRC o CRC) el cual se aplica a todo el mensaje. Tanto el control de trama así como la comprobación de paridad es generada por el dispositivo maestro y es aplicado al mensaje antes de ser transmitido. El dispositivo esclavo comprueba cada caracter y el mensaje completo de la trama durante la recepción.

El maestro es configurado por el usuario para esperar un determinado intervalo de tiempo antes de abortar la operación. Este intervalo debe tener una duración apropiada para garantizar la respuesta normal por parte del dispositivo esclavo. Si el esclavo detecta un error en la transmisión, el mensaje se descarta. El esclavo no generará una respuesta frente al error. Esto ocasiona que el tiempo de espera del dispositivo maestro expire y por lo tanto permitir así que el programa del maestro procese el error.

Los usuarios pueden configurar los controladores en comprobación par o impar. Esta configuración determinará el estado del bit de paridad de cada caracter.

- **Paridad par:** el bit de paridad se pondrá en 1 si es que el número de bits en 1 en el campo de datos da como resultado un número impar, caso contrario se pondrá en 0.

- **Paridad impar:** el bit de paridad se pondrá en 1 si es que el número de bits en 1 en el campo de datos da como resultado un número par, caso contrario se pondrá en 0.

Cuando el mensaje es transmitido, el bit de paridad es calculado y colocado en la trama. El dispositivo receptor cuenta la cantidad de bits en 1 y genera un error si no concuerdan con su configuración. Esto implica que todos los dispositivos MODBUS deben estar configurados para utilizar el mismo método de comprobación de paridad.

#### **2.2.6.2. Comprobación utilizando LRC (modo ASCII)**

La comprobación de Redundancia Longitudinal consiste en un número binario de 8 bits. El valor de LRC es calculado por el dispositivo de transmisión y lo añade al mensaje en el campo de comprobación de errores. El dispositivo receptor recalcula el valor de LRC durante la recepción del mensaje, y luego lo compara con el valor presente en el campo LRC. Si los dos valores son diferentes, se generará un error.

El LRC es el resultado de calcular la suma de los 8 bits sucesivos, descartando cualquier desborde y aplicando el complemento a 2 a dicho resultado.

#### **2.2.6.3. Comprobación utilizando CRC (modo RTU)**

La comprobación de Redundancia Cíclica es de dos bytes, que contiene un número binario de 16 bits. El valor de CRC es calculado por el dispositivo de transmisión y lo añade al mensaje en el campo de comprobación de errores. El dispositivo receptor recalcula el valor de CRC durante la recepción del mensaje, y luego lo compara con el valor presente en el campo CRC. Si los dos valores son diferentes, se generará un error.

El CRC es el resultado de calcular un polinomio a partir de los bits de mensaje descartando los bits de inicio, fin y de paridad. Se considera el mensaje completo como un polinomio y se divide entre un polinomio fijo llamado polinomio generador, y se obtiene un cociente más un residuo. Este residuo se anexa al mensaje y se transmite como un caracter de comprobación. [24]

**2.2.7. Modelo de datos MODBUS**

El protocolo MODBUS basa su modelo de datos en una serie de tablas que tienen características distintivas para área de datos. En la tabla 2.8 se puede observar las cuatro tablas principales que maneja este protocolo.

Tabla 2. 8. Tabla de datos MODBUS

TABLA PRIMARIA	TIPO DE OBJETO	TIPO DE ACCESO
Entradas Discreta (Discretes Input)	1 Bit (Single Bit)	Sólo Lectura
Salidas Discretas (Coils)	1 Bit (Single Bit)	Lectura – Escritura
Entradas Analógicas (Input Registers)	16 Bits (1 Word)	Sólo Lectura
Salidas Analógicas (Holding Registers)	16 Bits (1 Word)	Lectura - Escritura

Esta tabla de datos puede estar claramente separada cada área una de otra dependiendo de la organización de datos de cada dispositivo MODBUS de acuerdo a la aplicación utilizada. Figuras 2.5

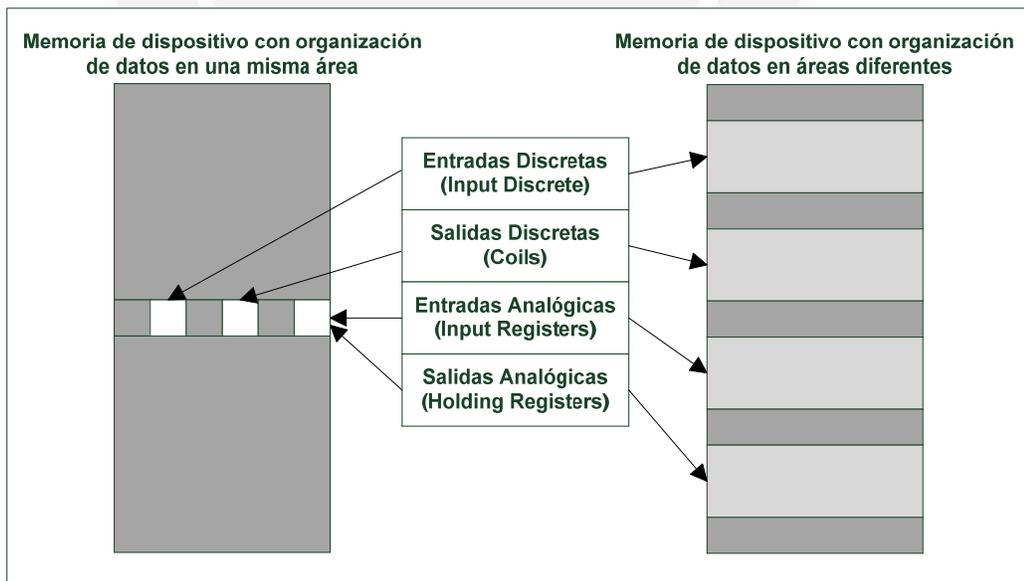


Figura 2. 5. Organización de datos en la memoria de un dispositivo

## **CAPITULO 3**

### **Diseño de la red inalámbrica y del entorno de supervisión para el control de velocidad**

#### **3.1. Diseño de la red inalámbrica**

##### **3.1.1. Requerimientos de la red inalámbrica**

###### **3.1.1.1. Seguridad**

Nos referimos a la protección que debe tener esta red frente al sabotaje, espionaje y atentado que podría sufrir por parte de fuentes externas, es decir, que se pueda depender de la red en todo momento y así asegurar la entrega de datos dónde y cuándo se requiera.

###### **3.1.1.2. Privacidad**

La red debe estar libre de la intromisión de los demás, no necesariamente causada por fuentes externas a la red, ya que es posible verse afectada por la alteración de la información por miembros identificados de la red, pero pertenecientes a otras áreas.

###### **3.1.1.3. Fiabilidad**

Quiere decir que la comunicación se dé en forma confiable y segura, superando las interferencias del medio minimizando al máximo los errores que pudiesen ocurrir durante la transferencia de datos.

###### **3.1.1.4. Robustez**

Se debe tener en cuenta que los equipos o dispositivos utilizados para implementar la red sean resistentes al ambiente hostil con el que cuenta la industria. En otras palabras, los equipos deben ser resistentes a la humedad, condensación, polvo y otros factores presentes en el ambiente industrial.

###### **3.1.1.5. Gestión y monitorización**

Se debe conocer en todo momento el estado de los equipos que conforman la red. Así mismo tener la capacidad de realizar labores de diagnóstico, configuración y monitoreo de la red inalámbrica utilizando un software para tal fin.

### **3.1.1.6. Fuentes de alimentación**

Un parámetro importante a tenerse en cuenta es el hecho que la red inalámbrica necesita fuentes de alimentación locales y confiables para garantizar el enlace inalámbrico.

### **3.1.2. Importancia del uso de redes y protocolos industriales**

Como es de suponer, las redes industriales tienen su origen en los conceptos y fundamentos que encontramos en el mundo de la informática pero acondicionados a un entorno más hostil como es el área industrial.

Su importancia radica en que el uso de estas redes, utilizando protocolos industriales, puede reducir de manera drástica el cableado en las plantas. Esto, aunque suena sencillo, en realidad su implementación plantea serios problemas técnicos. Diferentes fabricantes plantearon la solución de este problema dando origen a distintos buses de campo cada uno de ellos orientado a una aplicación específica, tal como se mencionó en el primer capítulo.

Con el desarrollo de estas redes, el operario puede realizar ciertas actividades, como por ejemplo labores de diagnóstico y control, que anteriormente eran posibles sólo mediante visitas de campo, es decir, estar físicamente presente en el lugar, y que gracias a las redes industriales se pueden realizar de forma remota teniendo a la mano mejores herramientas para realizar dichas labores.

El costo de la implementación del sistema de monitoreo, así como del entorno de supervisión es un factor importante al momento de determinar la tecnología adecuada a utilizar en el diseño.

### **3.1.3. Modelo de la solución tecnológica**

Para el diseño de la red inalámbrica se debe tener en cuenta los dispositivos que conforman la red. Entre los equipos que podemos encontrar en las redes actuales están principalmente los transmisores, los receptores y las antenas.

En la figura 3.1 se muestra una posible configuración de la red inalámbrica tomando en cuenta el uso de los equipos antes mencionados. Cabe

mencionar que es un posible diseño asumiendo que se requieren todos los dispositivos que conforman la red inalámbrica.

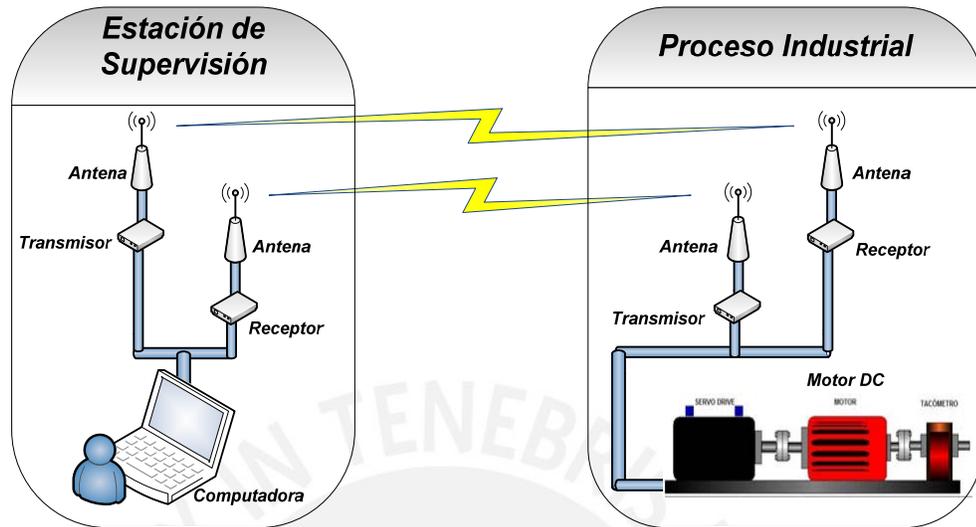


Figura 3. 1. Modelo de la red inalámbrica

Se puede apreciar dos áreas bien definidas: La Estación de Supervisión y el Proceso Industrial. La primera se encuentra ubicada por lo general alejada del proceso industrial, ya que requiere de un ambiente controlado. Por su parte, la segunda área está expuesta a condiciones y ambientes hostiles, en donde los equipos tienden a ser robustos para soportar dichas condiciones de trabajo.

Podría optarse por implementar una red inalámbrica utilizando sensores inalámbricos. Teniendo en cuenta dicha premisa, sería viable esta solución siempre y cuando el diseño de las instalaciones del proceso industrial permita dicha alternativa. Si no es el caso, la implementación mediante sensores inalámbricos sería la solución adecuada asumiendo que el controlador tiene la interfaz adecuada para tratar las señales inalámbricas provenientes de los sensores, y luego, mandarlas a la estación de supervisión.

Así mismo, el uso de radio módems también ofrece una posible solución al problema de la comunicación industrial. Al utilizar estos dispositivos se debería tener en cuenta que las señales provenientes de campo (Proceso Industrial) estén ya adaptadas al sistema de transmisión utilizado.

Generalmente la comunicación entre el radio módem y los instrumentos de campo debe ser de tipo serial (RS-232), es decir, que las señales a ser enviadas por el radio módem debe ser adecuadas previamente, para lo cual se requieren otros equipos.

#### **3.1.4. Elección del sistema de comunicaciones**

##### **3.1.4.1. Elección del estándar de comunicación inalámbrica**

Realizando un análisis a los sistemas inalámbricos que prescindan del cableado, se concluye que estos poseen sistemas distribuidos potentes, complejos y costosos, los cuales podrían no ajustarse a las necesidades del proceso. De esta manera surge la necesidad de analizar el costo-beneficio que tendría el uso de esos sistemas inalámbricos comparados con el uso de los tradicionales sistemas cableados, es decir, con los buses de campo.

Se decidió utilizar el estándar Wi-Fi en la comunicación inalámbrica debido a los siguientes factores:

- Es una de las tecnologías más utilizadas hoy en día, lo cual nos conviene al ser una tecnología fácil de conseguir.
- Cuenta con una velocidad de transmisión que puede alcanzar los 11 Mbps permitiendo enviar mayor cantidad de datos en menos tiempo.
- Porque trabaja en la banda de 2.4 GHz, en lo que se conoce como banda S –*Industrial, Scientific and Medical (ISM)*, la cual es una banda libre (sin licencia).

Debe tenerse en cuenta también las desventajas que conlleva utilizar este estándar. El hecho de utilizar la frecuencia de 2.4 GHz implica que su alcance es menor a uno que se pudiera conseguir con una frecuencia menor ya que es sabido que mientras más alta es la frecuencia de una onda, más datos y más rápidamente puede transmitir; sin embargo se ve reducido su alcance y su capacidad de atravesar objetos sólidos.

##### **3.1.4.2. Elección de la topología inalámbrica**

En lo concerniente a la topología de la red inalámbrica que se propone diseñar se llegó a la conclusión de utilizar la topología en estrella, debido principalmente a:

- Esta topología es el arreglo típico o por defecto de las redes inalámbricas dando la posibilidad que las personas encargadas de darle mantenimiento se sientan familiarizados con esta topología tan difundida y común.
- Esta topología nos permite agregar nuevos procesos industriales monitoreados desde una misma estación de supervisión. Cabe resaltar que se busca que cada proceso industrial se comunique solamente con la estación de supervisión.
- Con esta topología podríamos controlar múltiples procesos industriales desde un solo punto de supervisión sin necesidad de cambiar de equipo brindando total control sobre todos los procesos conectados a la red.

#### **3.1.4.3. Elección del protocolo industrial**

En lo concerniente al protocolo industrial que se utilizará, se decidió por el uso del protocolo MODBUS debido principalmente a lo siguiente:

- El protocolo MODBUS es uno de los protocolos industriales más difundido, por lo que en la industria se encuentra fácilmente equipos con interfaces para MODBUS.
- Este protocolo soporta comunicación inalámbrica y tiene implementaciones anteriores utilizando el aire como medio de transmisión alcanzando una distancia máxima 350 metros entre cada dispositivo.
- Debido a su velocidad de transmisión, la cual al ser de 1.2 a 115.2 Kbps, es ideal para la comunicación inalámbrica debido a que existen en el mercado dispositivos inalámbricos que trabajan a esas velocidades.

La red inalámbrica basada en el estándar Wi-Fi, trabajando sobre una topología en estrella y utilizando el estándar industrial MODBUS para la transferencia de datos, se perfila como la mejor alternativa para realizar el control de velocidad del motor de corriente continua.

### **3.1.5. Selección de equipos de comunicación inalámbrica**

#### **3.1.5.1. Transceptores frente a Transmisores y Receptores**

El transmisor es un dispositivo electrónico que con la ayuda de una antena irradia ondas electromagnéticas que contienen información. El receptor, por su parte, es también un circuito electrónico pero a diferencia del transmisor, aquel permite la recuperación de las señales transmitidas por un transmisor mediante ondas electromagnéticas.

Habiendo mencionado al transmisor y al receptor, se define a un transceptor como un dispositivo que realiza, dentro de un mismo chasis, funciones tanto de transmisión como de recepción, utilizando componentes del mismo circuito comunes para ambas funciones. Debido a que se utiliza elementos comunes para realizar las dos funciones antes mencionadas, el envío de información entre dos terminales no es simultáneo, es decir, se trata de una comunicación half-duplex.

Una vez definidos los posibles equipos de comunicación inalámbrica se opta por usar transceptores tanto en la Estación de Supervisión como en el Proceso Industrial debido a que:

- La red inalámbrica a implementar, al tener fines didácticos, no es necesaria una comunicación full-duplex, es decir envío y recepción de información al mismo tiempo.
- El módulo donde estén alojados los equipos de comunicación inalámbrica debe ser lo más portátil posible ya que se trata de una red móvil.
- La Estación de Supervisión será móvil ya que se analizará la red inalámbrica tomando lecturas del Número de Paquetes Perdidos así como la Fuerza de la Señal Recibida, expresada en decibelios (dB), en diferentes puntos dentro del laboratorio donde se realizará la implementación.

#### **3.1.5.2. Antenas Omnidireccionales frente a otros tipos de antenas**

Entre los diferentes tipos de antenas que se pueden encontrar en el mercado para aplicaciones inalámbricas tenemos a las direccionales y a las omnidireccionales. Las antenas direccionales se caracterizan por concentrar

la mayor parte de la energía radiada de manera localizada siendo idóneas para cubrir mayores distancias pero necesitan ser orientadas para mejorar sus prestaciones. Las antenas Omnidireccionales, a diferencia de la anterior, brinda un ángulo más amplio de emisión/recepción, siendo este ángulo igual a 360°, es decir, en todas direcciones; pero con la desventaja de que la señal emitida es de corto alcance.

Una vez definidos los tipos de antenas, se opta por utilizar las antenas omnidireccionales tanto en la Estación de Supervisión como en el Proceso Industrial debido a que:

- La red inalámbrica a implementar, al tener fines didácticos, no es necesario cubrir grandes distancias.
- La Estación de Supervisión será móvil así que se necesitará tener cobertura de la señal inalámbrica por todo el ambiente donde se realizará la implementación.
- Podría no haber línea de vista entre el equipo de campo (Proceso Industrial) y el equipo de control (Estación de Supervisión).

En la figura 3.2 se observa el modelo propuesto de la red inalámbrica a implementar.

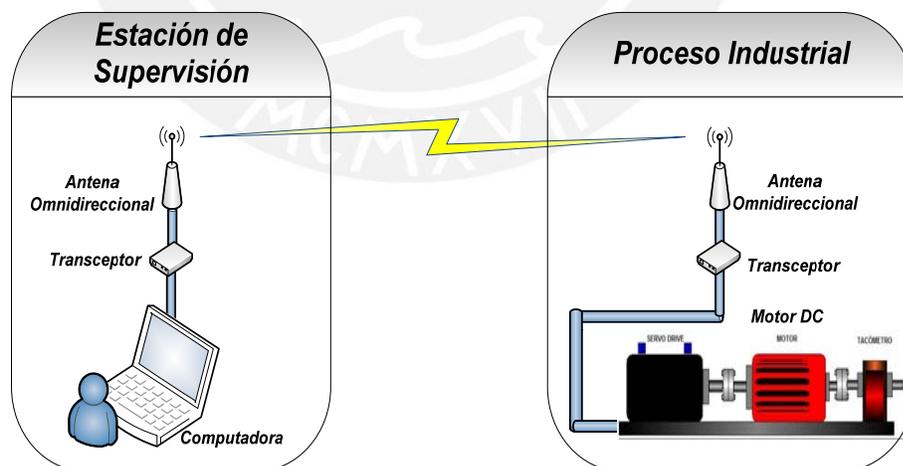


Figura 3. 2. Modelo propuesto de la red inalámbrica

Se propone utilizar dos transceptores: uno de ellos estará situado en campo, mientras que el otro transceptor estará en la estación de supervisión. La transmisión de las señales inalámbricas se realizará mediante el uso de dos

antenas omnidireccionales ubicadas tanto en el proceso industrial como en la estación de supervisión.

**3.1.6. Selección de proveedor de equipos de comunicación inalámbrica**

**3.1.6.1. Equipos de comunicaciones de la marca DATA LINC GROUP**

La marca DATA LINC GROUP utiliza la más avanzada tecnología en cuanto a comunicación inalámbrica se refiere. Sus equipos, llámese radio módem, emplean técnicas especializadas para el intercambio de información y así alcanzar a proveer un nivel excepcional de información de forma íntegra y fiable. Algunas características de los equipos de comunicación de DATA LINC GROUP se encuentran resumidas en la tabla 3.1.

Tabla 3. 1. Características de los equipos de DATA LINC GROUP [25]

<b>Instalación transparente</b>	Todos los módems se venden configurados. No hay necesidad de programación o ajustes. No requieren adaptadores.
<b>Robustez</b>	Inmunidad contra el ruido. Resistente a las interferencias electromagnéticas. Robustez mecánica.
<b>Seguridad</b>	Mecanismos estándar para el reconocimiento de usuario (autenticación) Codificación de los datos.
<b>Tipo de comunicación</b>	Comunicación de módem a módem (point to point). Comunicación de módem a múltiples módem (multidrop). Transmisión de múltiples mensajes sobre un mismo canal o circuito (multiplexing).

Podría optarse por el uso de los equipos de DATA LINC GROUP para la implementación de la red inalámbrica ya que básicamente se necesitarían dos radio módems: uno situado en campo y otro situado en la estación de supervisión.

El primero debería tener la capacidad de manejar señales digitales y analógicas, mientras que el segundo sólo necesitaría una interfaz serial RS-

232 para comunicarse con la computadora encargada de realizar la supervisión de la red.

Sin embargo, al no contar con el software necesario para poder supervisar la red en tiempo real y al no poseer instrumentación dedicada a convertir las señales analógicas, presentes en el proceso industrial, a señales digitales, para ser enviadas a la estación de supervisión, se descarta el uso de radio modem de la marca DATA LINC GROUP.

**3.1.6.2. Equipos de comunicación de la marca SIEMENS**

La marca SIEMENS dispone de equipos muy confiables para entornos industriales agresivos. La comunicación industrial con productos y sistemas de SIEMENS aporta una mayor eficiencia en todos los ámbitos de la empresa. Tanto si se trata de la simple conexión de un sensor como la transferencia de datos de producción, los equipos de esta marca ofrecen la posibilidad de integración de todas las áreas de una empresa de manera eficiente.

Tabla 3. 2. Características de las redes inalámbricas de SIEMENS [26]

	<b>INDUSTRIAL WIRELESS TELECONTROL</b>	<b>INDUSTRIAL WIRELESS LAN</b>	<b>WIRELESSHART</b>
<b>Fiabilidad</b>	Cubre todas las frecuencias GSM utilizadas en el mundo.	Tráfico de datos cíclico y predecible (determinista).	Salto de canales y compatibilidad con otras redes inalámbricas
<b>Robustez</b>	Diseño hermético que impide la entrada de agua y polvo.	Diseño hermético que impide la entrada de agua y polvo.	Diseño hermético que impide la entrada de agua y polvo.
<b>Seguridad</b>	Mecanismo estándar para la encriptación de datos	Alta seguridad contra accesos no autorizados gracias a WPA y al cifrado (AES)	Mecanismo estándar para el reconocimiento de usuario. Codificación de datos
<b>Gestión centralizada</b>	Posibilidad de control y gestión de redes.	Posibilidad de control y gestión de redes.	Posibilidad de control y gestión de redes.

Haciendo referencia a la tabla 3.2, se podría optar por utilizar equipos de la tecnología Industrial Wireless LAN debido a que utilizan Wi-Fi como estándar de comunicación inalámbrica y por las características mencionadas con respecto a temas de fiabilidad, robustez, etc.

Esta opción se deja de lado debido a que la aplicación que se desea implementar no requiere sistemas tan complejos como lo son los dispositivos que trabajan con redes basadas en GSM / GPRS. Se deja de lado también la tecnología Industrial Wireless LAN debido a que podría haber conflictos con la red inalámbrica existente en el laboratorio. Finalmente no se opta por utilizar la tecnología WirelssHART puesto que no se tienen equipos que se comuniquen mediante el protocolo HART.

### **3.1.6.3. Equipos de comunicación de la marca PHOENIX CONTACT**

En la tabla 3.3 se encuentra resumidas las tecnologías que ofrecen los equipos de PHOENIX CONTACT. Estos equipos poseen la capacidad de expansión así como la posibilidad de supervisión. Al haber aplicaciones con estos equipos podemos garantizar el correcto funcionamiento de la red siendo atractiva la posibilidad de supervisarla en tiempo real.

Teniendo en cuenta que la red inalámbrica será implementada en un laboratorio donde hay presencia de computadoras que están enlazadas mediante una WLAN (Wireless Local Area Network) se descarta el uso de la tecnología WLAN debido a que podría haber interferencia entre estos equipos. Esta interferencia ocurre así mismo con la tecnología Bluetooth por lo que también se deja de lado.

Tabla 3. 3. Tecnologías inalámbricas de PHOENIX CONTACT [27]

	TRUSTED WIRELESS™	BLUETOOTH	WLAN
<b>Características en frecuencia</b>	81 canales 1 MHz ancho de banda por canal	79 canales 1 MHz ancho de banda por canal	13 canales 22 MHz ancho de banda por canal
<b>Robustez e inmunidad</b>	Alto grado de inmunidad y robustez	Posibilidad de interferencia con otros equipos	Posibilidad de interferencia con otros equipos
<b>Fiabilidad y diagnóstico</b>	Gran fiabilidad y posibilidad de diagnóstico	Fiabilidad moderada	Alta fiabilidad y posibilidad de diagnóstico
<b>Encriptación</b>	---	---	WEP, WPA, WPA PSK
<b>Autenticación</b>	---	---	EAP
<b>Alcance (típico)</b>	3 kilómetros 2.4 GHz	200 metros 2.4 GHz	200 metros 2.4 GHz

Habiendo expuesto las alternativas que se tiene al momento de la implementación se decide utilizar la tecnología Trusted Wireless™ de la marca PHOENIX CONTACT ya que:

- La red inalámbrica a implementar debe utilizar una frecuencia libre como lo es la frecuencia de 2.4 GHz y así no depender de licencias de uso.
- Los equipos presentan alto grado de robustez e inmunidad ante las condiciones donde será implementada la red, en este caso un laboratorio, donde estarán en constante movimiento debido a la finalidad de la red inalámbrica.
- Los equipos presentan la posibilidad de expansión al añadir módulos para incrementar el número de señales que se pueda manejar con estos equipos, así como la naturaleza de estas señales, ya sean discretas o analógicas.
- A la gran fiabilidad y capacidad de diagnóstico pues se cuenta con software especializado para la gestión de la red. Entre las posibilidades

que se tiene con este software está la de configuración y monitoreo remoto de los elementos de la red inalámbrica.

### 3.1.7. Descripción de los equipos de comunicación de la marca PHOENIX CONTACT

#### 3.1.7.1. Transceptor de Radiotelefonía

El transceptor de radiotelefonía RAD-ISM-2400-DATA-BD, Tabla 3.4, es un módulo de comunicación inalámbrica con interface serial, tanto RS-232 como RS-422 ó RS-485, el cual estará situado en la estación de supervisión conectado a una computadora utilizando la interfaz serial RS-232.

Tabla 3. 4. Datos Técnicos del transceptor de radiotelefonía

<b>INTERFAZ DE RADIO</b>	
<b>Gama de frecuencias</b>	2,4015 – 2,4815 GHz
<b>Distancia entre canales</b>	1 MHz
<b>Número de canales</b>	3 / 27 (grupos / canales por grupo)
<b>Potencia de emisión</b>	1 ... 100 mW (ajustable)
<b>INTERFAZ SERIAL RS-232</b>	
<b>Tipo de conexión</b>	SUB-D 9, conector hembra
<b>Tipo de módulo</b>	DCE (Data Communication Equipment)
<b>Velocidad de transmisión serie</b>	300 Bit/s ... 115,2 kBit/s
<b>Formato de datos</b>	Asíncrono
<b>Control de flujo de datos</b>	RTS / CTS
<b>Tamaño de paquete</b>	32 / 98 / 240 Bytes
<b>INTERFAZ SERIAL RS-485/RS-422</b>	
<b>Tipo de conexión</b>	Borne con conexión por tornillo COMBICON

Los datos que se comparten por la red inalámbrica pueden ser transmitidos bidireccionalmente pero no al mismo tiempo debido a que se trata de una comunicación half-duplex. Utiliza la frecuencia 2,4 GHz para la transmisión de la información proveniente de la computadora en la que estará corriendo el entorno de supervisión.

### 3.1.7.2. Transceptor de Radio

El transceptor de radio RAD-ISM-2400-DATA-BD-BUS, Tabla 3.5, al igual que el transceptor de radiotelefonía descrito anteriormente, es también un módulo de comunicación inalámbrica con interface serial, tanto RS-232 como RS-422 o RS-485 pero que además puede ser usado para conectar módulos de entrada/salida gracias a que este transceptor posee un pie de bus. Debido a esta característica estará situado en el proceso industrial.

Tabla 3. 5. Datos técnicos del transceptor de radio

<b>INTERFAZ DE RADIO</b>	
<b>Gama de frecuencias</b>	2,4015 – 2,4815 GHz
<b>Distancia entre canales</b>	1 MHz
<b>Número de canales</b>	3 / 27 (grupos / canales por grupo)
<b>Potencia de emisión</b>	1 ... 100 mW (ajustable)
<b>INTERFAZ SERIAL RS-232</b>	
<b>Tipo de conexión</b>	SUB-D 9, conector hembra
<b>Tipo de módulo</b>	DCE (Data Communication Equipment)
<b>Velocidad de transmisión serie</b>	300 Bit/s ... 115,2 kBit/s
<b>Formato de datos</b>	Asíncrono
<b>Control de flujo de datos</b>	RTS / CTS
<b>Tamaño de paquete</b>	32 / 98 / 240 Bytes
<b>INTERFAZ SERIAL RS-485/RS-422</b>	
<b>Tipo de conexión</b>	Borne con conexión por tornillo COMBICON

Estos módulos proveen de entradas salidas tanto analógicas como digitales, lo que permite que sensores y actuadores se conecten de forma inalámbrica al sistema de control que se implementa en esta red. Cabe mencionar que los datos pueden ser transmitidos bidireccionalmente, pero no simultáneamente, igual que en el transceptor de radiotelefonía.

### 3.1.7.3. Módulo de entradas/salidas analógicas y digitales

En la red que se desea implementar es necesario manejar señales de entrada y salida tanto analógicas como digitales. Para manejar estas señales

se necesita módulos de entrada salida como el módulo de ampliación RAD-IN+OUT-2D-1A-I, Tabla 3.6.

Tabla 3. 6. Datos técnicos del módulo de entradas/salidas analógicas y digitales

<b>ENTRADA ANALÓGICA</b>	
<b>Número de entradas</b>	1
<b>Resolución</b>	16 Bits
<b>Margen de señales</b>	4 ... 20 mA
<b>SALIDA ANALÓGICA</b>	
<b>Número de salidas</b>	1
<b>Resolución</b>	16 Bits
<b>Margen de señales</b>	4 ... 20 mA
<b>ENTRADA DIGITAL</b>	
<b>Número de entradas</b>	2
<b>Frecuencia de entrada</b>	1 Hz (máximo)
<b>Margen de señales</b>	5 ... 30 V AC/DC
<b>Nivel de conmutación</b>	Señal 1 ("H") 5 V DC Señal 0 ("L") 1,5 V DC
<b>SALIDA DIGITAL</b>	
<b>Número de salidas</b>	2
<b>Frecuencia de salida</b>	1 Hz (máximo)
<b>Tensión de activación</b>	30 V DC / 30 V AC
<b>Corriente de conmutación</b>	0,5 A

Este módulo se ubicará en el proceso industrial ya que es ahí donde se encuentran las señales digitales provenientes de los interruptores y lámparas, así como las señales analógicas provenientes del sensor de velocidad (tacómetro) y de la fuente de tensión con la que se alimentara la armadura del motor.

La alimentación del módulo así como la comunicación de los datos se realiza mediante un bus de datos interno, para esto se hace uso de dicha interfaz de bus proporcionado por el módulo de radio RAD-ISM-2400-DATA-BD-BUS.

#### 3.1.7.4. Antena Omnidireccional

La antena omnidireccional RAD-ISM-2400-ANT-OMNI-2-1, Tabla 3.7, se encarga de emitir y recibir la señal Wi-Fi proveniente de los transceptores de radio y radiotelefonía (RAD-ISM-2400-DATA-BD-BUS y RAD-ISM-2400-DATA-BD respectivamente) y así tener el enlace inalámbrico deseado entre la estación de supervisión y el proceso industrial.

Se contarán con dos antenas; una de ella se ubicará en la estación de supervisión junto al transceptor de radiotelefonía y la computadora donde se estará corriendo el software de supervisión; y la otra antena estará ubicada en el proceso industrial junto al transceptor de radio y al módulo de entradas/salidas analógicas y digitales.

Tabla 3. 7. Datos técnicos de la antena omnidireccional

CARACTERÍSTICAS	
Tipo de protección	IP65
Ganancia	2 dBi
Ancho de haz	360° horizontal 75° vertical
Tipo de conexión	MCX (macho)

#### 3.1.7.5. Fuente de alimentación

La fuente de alimentación MINI-PS-100-240AC/24DC/1.3, Tabla 3.8, se caracteriza por sus dimensiones delgadas lo que le brinda versatilidad. Así mismo podemos encontrarla en otros valores de tensión y de corriente dependiendo de la aplicación que se desea realizar. Ésta brinda un buen servicio frente a las aplicaciones donde hay riesgo de caídas de tensión estáticas, fallos de transitorios de la tensión de alimentación, etc.

Se utilizarán dos fuentes de alimentación; una de ella se ubicará en la estación de supervisión junto al transceptor de radiotelefonía y la computadora donde se estará corriendo el software de supervisión; y la otra antena estará ubicada en el proceso industrial junto al transceptor de radio y al módulo de entradas/salidas analógicas y digitales.

Tabla 3. 8. Datos técnicos de la fuente de alimentación

ENTRADA	
Tensión nominal de entrada	100 – 240 V AC
Margen de tensión de entrada	85 – 264 V AC 90 – 350 V DC
Frecuencia	45 – 65 Hz
SALIDA	
Tensión nominal de salida ( $U_{out}$ )	24 V DC / $\pm 1\%$
Margen de tensión de salida	22,5 – 28,5 V DC
Corriente nominal de salida	1,3 A ( $U_{out} = 24$ V DC)

### 3.1.7.6. Cable de conexión serial

Para poder configurar el transceptor de radiotelefonía así como el de radio (RAD-ISM-2400-DATA-BD-BUS y RAD-ISM-2400-DATA-BD respectivamente) es necesario el uso del cable de conexión serial CM-KBL-RS232/USB el cual es un cable de conexión D-9-SUB a USB, con adaptador D-9-SUB a D-25-SUB.

Este cable se utilizará en la estación de supervisión para poder obtener información del estado de la red inalámbrica así como para la parte de supervisión del proceso industrial. Otro motivo por el cual utilizamos esta interfaz serial es debido al gran número de implementaciones que existe en la actualidad utilizando RS232 para la transferencia de información.

### 3.1.8. Diseño de la red inalámbrica con el software RAD-Link 3.24

#### 3.1.8.1. Parámetros de la red inalámbrica

Como paso inicial debemos definir cómo será el ambiente donde se implementará la red inalámbrica. El ambiente elegido para la red es el Laboratorio de Control Avanzado, ubicado en el primer piso del pabellón de Ingeniería Electrónica, Informática y Telecomunicaciones de la Pontificia Universidad Católica del Perú y tiene un área aproximada de 80 m<sup>2</sup>.

Debido a que el proceso industrial consta de un motor de corriente continua, un tacómetro mecánico, una fuente de tensión dependiente de corriente, un módulo de control de Velocidad/Torque y una unidad de Servofreno, es

lógico pensar que deben estar situados en una ubicación fija y cerca de una toma de tensión adecuada para el buen funcionamiento de estos equipos. Por diseño del laboratorio, estos equipos se encuentran ubicados en la parte posterior derecha del laboratorio.

En lo concerniente a la estación de supervisión, esta tiene la característica de ser móvil dando total flexibilidad a la red inalámbrica, por lo que no tendrá una ubicación fija. Esto obliga a que la señal proveniente del proceso esté presente en todo el laboratorio para garantizar la supervisión de dicho proceso sin importar la ubicación de la estación de supervisión. En la figura 3.3 podemos observar el área de cobertura mínima que debe tener la red para garantizar la fidelidad de la señal.

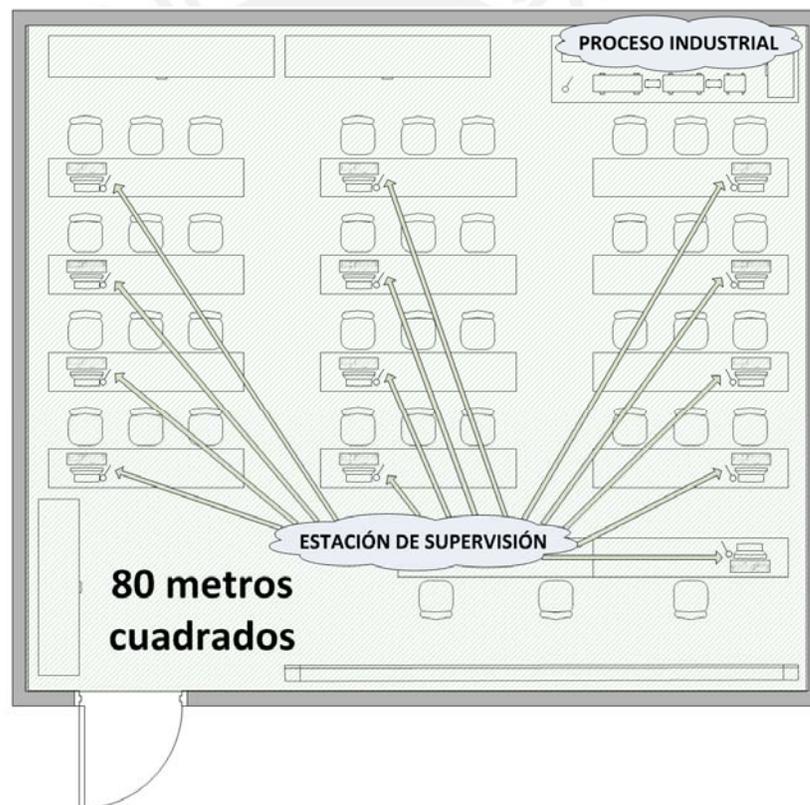


Figura 3. 3. Área de cobertura mínima de la red inalámbrica

Un aspecto muy importante que hay que considerar es la presencia de otras redes inalámbricas en el entorno donde se realizarán las pruebas.

En las figuras 3.4 y 3.5 se presentan los canales presentes en la banda de 2.4 GHz. y el espectro en frecuencia y mapa térmico medido dentro del laboratorio, respectivamente.

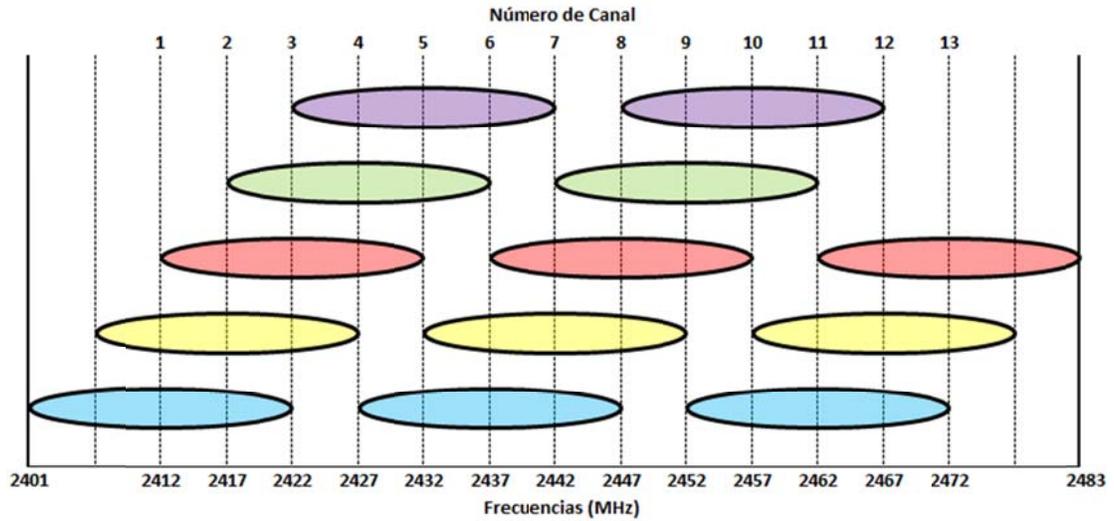


Figura 3. 4. Canales presentes en la banda de 2.4 GHz

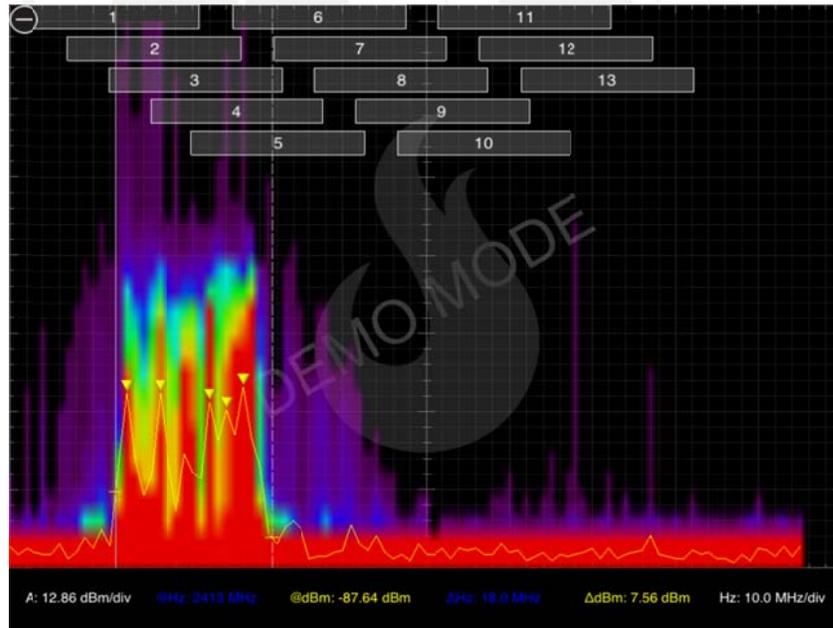


Figura 3. 5. Espectro en frecuencia y mapa térmico en la banda 2.4 GHz  
De las figuras anteriores concluimos que debemos evitar el uso de frecuencias menores a 2432 MHz para evitar la interferencia debido a otras señales inalámbricas u otros factores que podrían perjudicar la red inalámbrica. Este factor ya está considerado pues se eligió equipos que

utilicen el Espectro ensanchado por salto en frecuencia (FHSS *Frequency Hopping Spread Spectrum*). [28]

Una vez definida la red a grandes rasgos, se procede a definir los parámetros necesarios para la configuración de la red, los cuales se mencionan en la tabla 3.9. (Para más detalle se recomienda leer el manual de los dispositivos antes mencionados).

Tabla 3. 9. Parámetros de la red inalámbrica

PARÁMETRO	VALOR	JUSTIFICACIÓN
Frecuencia de trabajo	2.4 GHz	Esta es la frecuencia correspondiente al estándar Wi-Fi.
Número de Repetidores	0	El área de cobertura es pequeña por lo que no es necesario el uso de repetidores.
Número de Maestros	1	Se designa a la estación de supervisión como Maestro.
Número de Esclavos	1	Se designa a los procesos industriales como Esclavos.
ID de la red	7	Para diferenciar nuestra red de otras redes en la misma área.
ID de seguridad	19867	Para proteger los datos transmitidos entre las estaciones.
Banda de radio	1	Para evitar la interferencia con otras redes que utilizan la frecuencia de 2.4 GHz.
Selección de transmisión	2	Cada emisión del maestro se transmite dos veces, así incrementamos la seguridad.
Velocidad de transmisión	19200	Velocidad adecuada de transmisión.
Tipo de paridad	Par	Tipo de paridad de la trama a transmitir.
Bits de datos	8	Número de bits de datos utilizados en la trama.
Bits de parada	1	Número de bits de parada de la trama

### 3.1.8.2. Parámetros de los equipos de la red inalámbrica

Como se observa en la tabla 3.10, los parámetros configurados en cada equipo son muy similares ya que debe haber concordancia entre los parámetros de cada uno con respecto a los parámetros de la red mencionados anteriormente.

Tabla 3. 10. Parámetros de los equipos de la red inalámbrica

PARÁMETRO	TRANSCPTOR DE RADIOTELEFONÍA	TRANSCPTOR DE RADIO
ID del radio	0	1
Tipo de Radio	2.4GHz DATA-BD	2.4GHz DATA-DB-BUS
Modo	Maestro	Esclavo
Velocidad de transmisión	19200	19200
Tipo de paridad	Par	Par
Bits de datos	8	8
Bits de parada	1	1
Potencia de transmisión	20 dB	20 dB
Tipo de transmisión	MODBUS RTU	MODBUS RTU

Como se puede observar en la tabla anterior, los parámetros de comunicación entre los transceptores tales como lo son la velocidad de transmisión, tipo de paridad, bits de datos y bits de parada deben coincidir con los parámetros de la red inalámbrica para asegurar que haya comunicación entre ellos.

La ubicación del transceptor de radio (proceso industrial) será fija ya que si fuese móvil involucraría mover equipos pesados y de difícil instalación cada vez que se realiza una experiencia. Lo contrario ocurre con la ubicación del transceptor de radiotelefonía (estación de supervisión) pues esta tendrá la característica de tener una ubicación variable, es decir se trata de una estación móvil. Esto nos brinda la posibilidad de poder realizar múltiples experiencias sin necesidad de cablear o mover equipos pesados.

Cabe resaltar que al utilizar antenas omnidireccionales, la orientación de la antena no se considera pues la señal se irradia en todas direcciones.

### 3.2. Diseño del entorno de supervisión

#### 3.2.1. Principio de funcionamiento de un regulador de velocidad de motor de corriente continua

El uso de motores de corriente continua en la industria en aplicaciones de velocidad variable y/o torque variable, obliga a desarrollar mecanismos o procedimientos mediante los cuales se puedan manipular los parámetros más importantes del motor, Figura 3.6, muestra como lo son el voltaje de armadura, el flujo magnético del campo o corriente de excitación, etc. Al manipular esos parámetros podemos controlar su velocidad así como su posición.

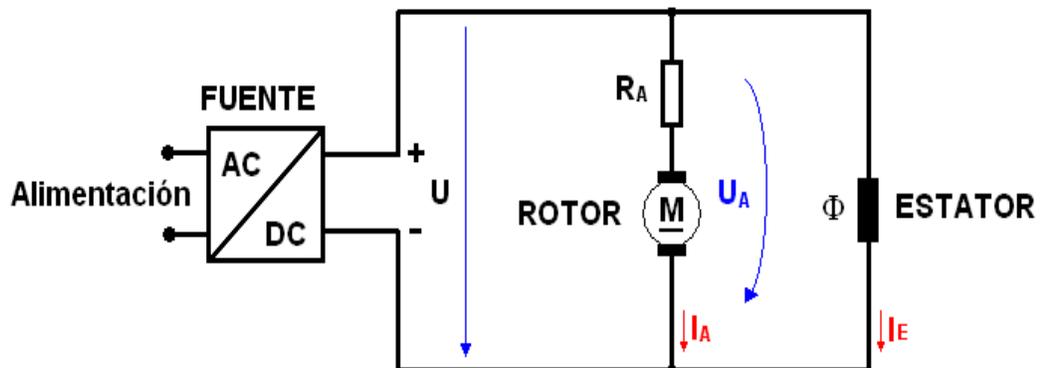


Figura 3. 6. Esquema del motor de corriente continua

Con ayuda de la figura 3.3 podemos mencionar las dos ecuaciones fundamentales que describen el comportamiento eléctrico de un motor de corriente, las cuales son:

$$U_A = R_A \cdot I_A + C_1 \cdot \eta \cdot \Phi \quad (1)$$

$$M = C_2 \cdot I_A \cdot \Phi \quad (2)$$

Donde  $U_A$  es la tensión del rotor,  $I_A$  la corriente del rotor,  $R_A$  la resistencia del rotor,  $\eta$  las revoluciones del motor,  $\Phi$  el flujo magnético de la bobina de excitación,  $M$  el momento de giro del motor, y  $C_1$  y  $C_2$  son constantes.

La primera ecuación indica que la tensión del inducido  $U_A$  se divide en la caída de tensión en el inducido  $I_A \cdot R_A$  y una parte proporcional a las revoluciones  $C_1 \cdot \eta \cdot \Phi$ . La segunda parte es la tensión contraria que se induce en el rotor y que para motores grandes asciende hasta el 90%.

Y la segunda ecuación indica que el momento de rotación del motor es proporcional a la corriente del rotor y al campo de excitación.

De la ecuación (1) resulta la ecuación para las revoluciones:

$$\eta = \frac{U_A - R_A * I_A}{C_1 * \Phi} \quad (3)$$

$$\eta \approx \frac{U_A}{C_1 * \Phi} \quad (4)$$

Esta ecuación indica que en la primera aproximación, las revoluciones de un motor de corriente continua son proporcionales a la tensión del rotor y al campo de excitación. Esto resulta en la práctica en dos zonas de regulación de las revoluciones, Figura 3.7, en las que se usan diferentes métodos.

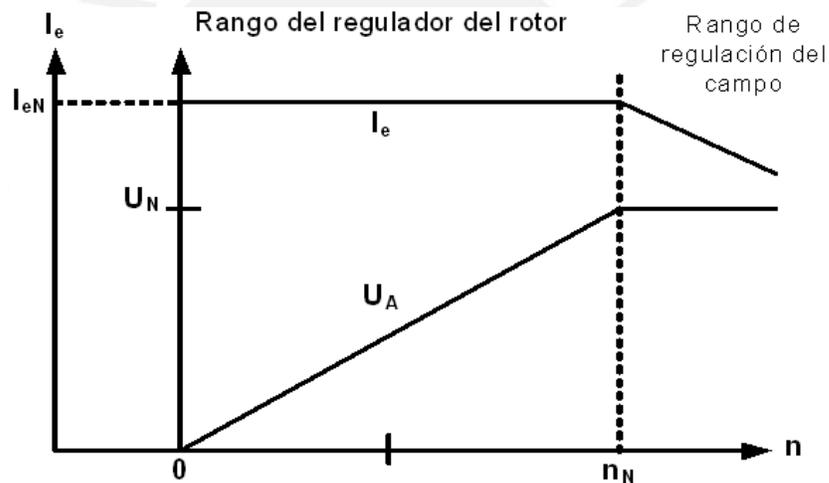


Figura 3. 7. Zonas de ajuste de motores de corriente continua

### **3.2.1.1. Zona de ajuste del rotor**

En este margen uno trabaja con tensiones de rotor variables, mientras el campo magnético de excitación se mantiene constante a su valor nominal.

La zona de ajuste del motor comprende las revoluciones entre cero y las revoluciones nominales. Si  $U_A = 0$ ; entonces las revoluciones para una tensión nominal  $U_A = U_N$ , se logra el valor nominal. El rango de ajuste del rotor es el rango en el que se regula las revoluciones variando la tensión del rotor.

### **3.2.1.2. Zona de ajuste del campo**

En este caso, se trabaja con el campo de excitación variable, mientras la tensión de rotor se mantiene constante a su valor nominal.

La zona de ajuste del campo abarca las revoluciones por encima de las revoluciones nominales, las que se alcanzan disminuyendo el campo de excitación. Si el campo está en su valor nominal entonces el motor girará a su velocidad nominal. Si no disminuye el campo, entonces, la velocidad aumentará según la ecuación (4).

El método que se utilizará para el control de velocidad del motor DC es el que se encuentra en la Zona de Ajuste del Rotor debido a que con este método podremos llegar a la velocidad nominal del motor sin la posibilidad de que se sobrecargue.

### **3.2.2. Descripción del módulo de control de velocidad a utilizar**

Al hablar del control de velocidad se debe mencionar las señales necesarias para llevar a cabo tal acción. En primer lugar se tienen dos señales analógicas, una de entrada y otra de salida, así como cuatro señales digitales, dos entradas y dos salidas.

El estado de estas señales debe ser reflejado en el entorno de supervisión, pudiendo así controlar la velocidad del motor a través de una computadora tal como se aprecia en la figura 3.8. Cabe resaltar que las entradas y salidas mencionadas a continuación le pertenecen al proceso, es decir al conjunto formado por el controlador y la fuente de voltaje dependiente de corriente.

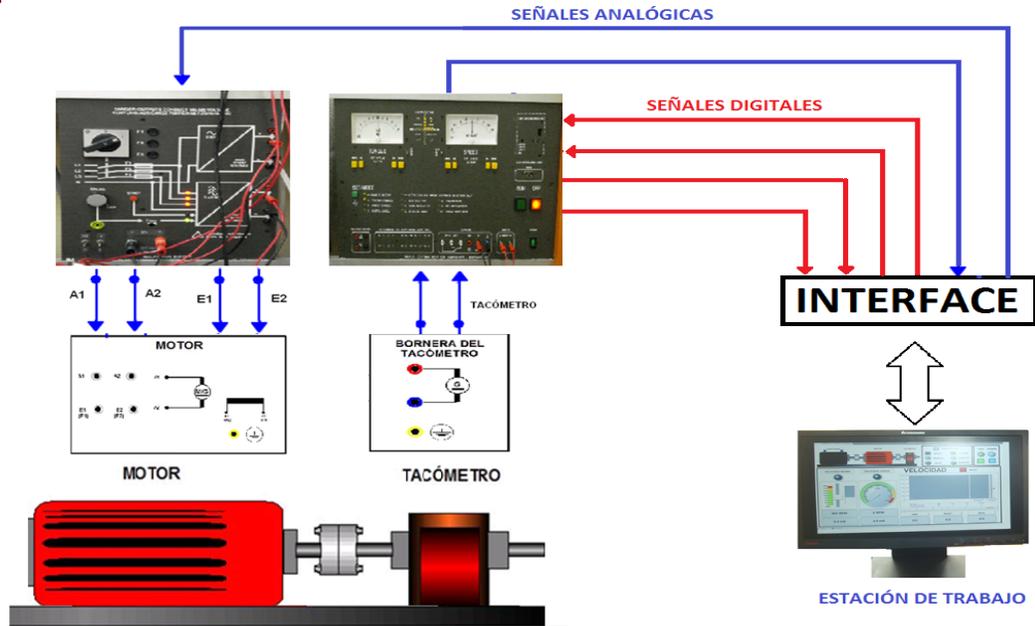


Figura 3. 8. Señales a utilizar

Como entrada analógica tenemos una señal de corriente continua la cual tiene un rango de 4 a 20 mA con la que se controlará una fuente de voltaje dependiente de corriente. Dicha fuente de voltaje se utiliza para alimentar la armadura del motor con un rango de 0 a 240 voltios DC. Figura 3.9. Esta señal es usada como señal de referencia al momento de controlar la velocidad del motor. De aquí en adelante se le referirá como *Set Point (SP)*.

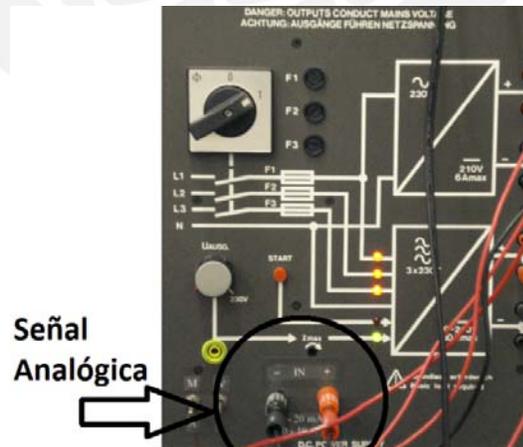


Figura 3. 9. Entrada analógica (Fuente de voltaje)

Como salida analógica se tiene una señal de voltaje proveniente del módulo de control de Velocidad/ Torque del motor, específicamente del sensor de

velocidad. Figura 3.10. Este sensor es del tipo activo y entrega una señal de voltaje con un rango de 0 a 10 voltios, donde 0 voltios representa 0 r.p.m. y 10 voltios representa 10000 r.p.m., es decir, el sensor de velocidad entrega 1 Voltio por cada 1000 r.p.m. De aquí en adelante se le referirá como *Process Value (PV)*. Cabe señalar que este sensor tiene una precisión del 5%.



Figura 3. 10. Salida analógica (Módulo de Control)

Como entradas digitales tenemos dos interruptores con los que se controlará el Arranque y Parada del motor (*Start* y *Stop*); y como salidas digitales, tenemos dos lámparas. Una se encenderá cuando la velocidad del motor supere las 1500 r.p.m., y la otra se encenderá cuando la velocidad supere las 1800 r.p.m.

### 3.2.3. Solución tecnológica

Como se puede deducir, el control de velocidad se realiza en el mismo sitio donde está el motor, es decir, el operador o aquella persona que desee manipular el módulo de control, ya sea para fijar la velocidad deseada del motor, manipular los parámetros del controlador, etc. necesita estar físicamente en campo.

Como solución tecnológica se propone utilizar una estación de trabajo remota de donde se pueda configurar los parámetros y poder conocer en todo momento el estado de las variables necesarias para realizar un óptimo control de velocidad. Para este fin se opta por utilizar tecnología inalámbrica a fin de brindar la mayor movilidad a la estación de trabajo. Para fines de

implementación se tendrá una estación de trabajo con fines didácticos por lo que la característica de movilidad es fundamental. Figura 3.11.

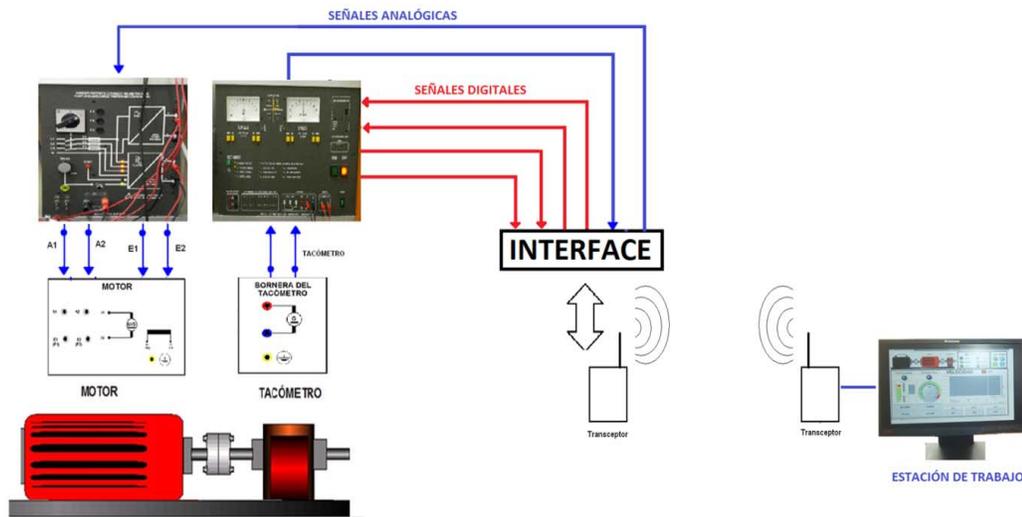


Figura 3. 11. Solución Tecnológica

### 3.2.4. Desarrollo del entorno de supervisión utilizando el software Visu+ 1.2 de la marca PHOENIX CONTACT

Al hablar del control de velocidad se debe mencionar las señales necesarias para llevar a cabo tal acción. En primer lugar se tienen dos señales analógicas, una de entrada y otra de salida, así como cuatro señales digitales, dos entradas y dos salidas tal como se aprecia en la figura 3.12



Figura 3. 12. Señales necesarias para el control de velocidad del motor

Estas señales serán definidas en el software Visu+1.2 como variables teniendo en cuenta que se utilizará el protocolo MODBUS. También debe prestarse atención al mapa de memoria del módulo de entrada salida RAD-

IN+OUT-2D-1A-I. En la tabla 3.11 se puede apreciar el mapa de memoria del módulo dependiendo del tipo de señal que deseamos definir.

La plantilla 1 (figura 3.13) es una representación de las borneras del motor. Se aprecia los bornes para el Armadura (A1 y A2) y la tensión de campo o del Estator (E1 y E2), así como las borneras del taco generador. Esta plantilla se utilizará como referencia de conexión al momento de conectar la alimentación, así como el sensor que se utilizará para medir la velocidad del motor.

La plantilla 2 (figura 3.14) se podrá observar tanto la velocidad a la que se desea llegar, *Set Point*, así como la velocidad real desarrollada por el motor, *Process Value*.

Para establecer la velocidad deseada, *Set Point*, se hará uso de una barra deslizante (*Slider bar*) con la que se varía la velocidad a la que se desea llegar. Como se observa, el rango de velocidad del motor está entre 0 y 2000 r.p.m.

Para visualizar la velocidad real del motor se hará uso de un indicador de aguja (*Gauge*) que recibe como entrada la señal de un sensor de velocidad, el cual se utiliza para monitorear continuamente la velocidad del motor. Este sensor de velocidad tiene como salida una señal analógica en un rango de 0 a 10 V (0 a 10000 r.p.m. respectivamente). Como se puede deducir, la velocidad máxima que puede ser alcanzada por el motor es de 2000 r.p.m. por lo que se procedió a escalar la velocidad medida por el sensor.

Adicionalmente se podrá observar las tendencias tanto de la velocidad deseada, *Set Point*, así como la velocidad real alcanzada por el motor, *Process Value*, en un gráfico de tendencias, tal como lo tienen los registradores industriales. Para ello se utilizó un Pantalla de tendencias (*Trend*), la cual nos brinda los valores máximos, mínimos y promedio de las dos variables a medir, El *Set Point* y *Process Value*

Para controlar el registro de las tendencias de las variables antes mencionadas, *Set Point* y *Process Value*, se tiene un botón *RUN*, *OFF* y *POWER*. Con el interruptor *POWER* se habilita/deshabilita el registro de

datos, es decir, se habilita/deshabilita la toma de datos para poder visualizarlos en la gráfica de tendencias. Con el botón *RUN*, se inicia, o se pone en pausa, la toma de datos del registrador. Y por último, con el botón *RESET*, se reinicializa los valores de los datos.

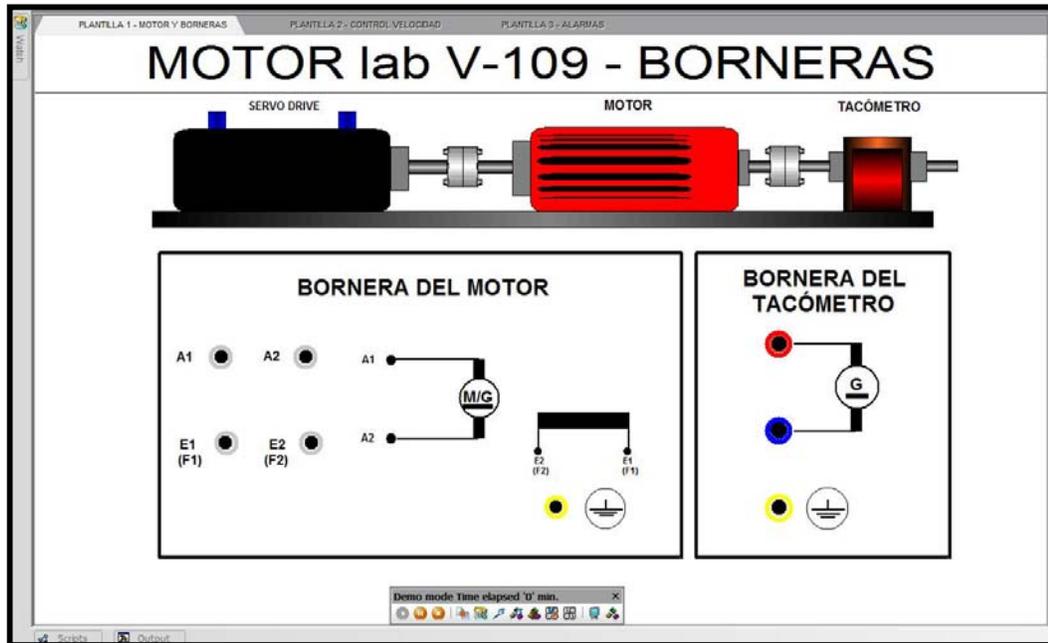


Figura 3. 13. Plantilla 1 – Motor y Borneras

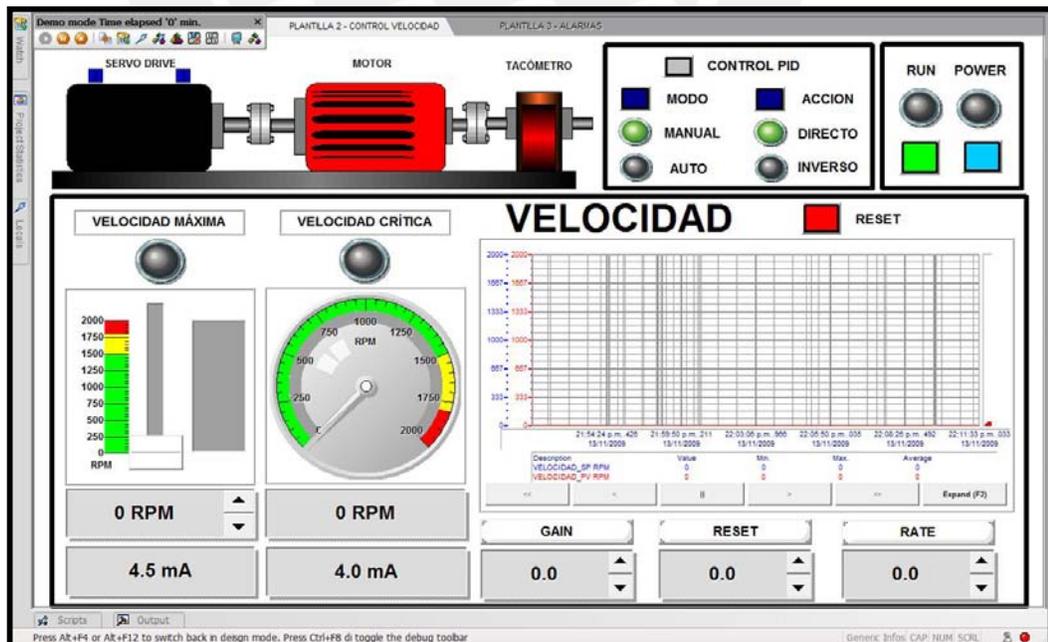


Figura 3. 14. Plantilla 2 - Control de Velocidad

.Así mismo se implementó los controles necesarios para poder control PID del proceso. Para tal fin se tiene una sección de la plantilla donde se puede observar el botón *CONTROL PID*, con el cual se habilita/deshabilita el control PID. En el mismo recuadro se tiene también el botón *MODO*, con el cual se puede escoger el modo, *Manual* o *Automático*, y con el botón *ACCIÓN* se puede escoger entre *Directo* e *Inverso*. Finalmente se tiene las casillas debajo del gráfico de tendencias en las que se puede introducir los parámetros del controlador PID, es decir, se puede ingresar los valores de ganancia Proporcional (*GAIN*), Integral (*RESET*) y Derivativa (*RATE*).

Y en la plantilla 3 (figura 3.15) se tiene el panel de alarmas en la que se observa el estado de las alarmas, en esta caso, cuando se excede un umbral definido como velocidad máxima y otro denominado como velocidad crítica. El estado de las alarmas también se pueden observar en la plantilla 2.



Alarm Description	Time ON	Duration	Severity	Condition
Velocidad Máxima	13/11/2009 09:51:22 p.m.	00:00:36	1	OFF
Velocidad Crítica	13/11/2009 09:51:40 p.m.	00:00:12	1	OFF
VELOCIDAD_PV_SCALED...	13/11/2009 09:51:22 p.m.	00:00:36	1	OFF
VELOCIDAD_PV_SCALED...	13/11/2009 09:51:40 p.m.	00:00:12	1	OFF

Demo mode Time elapsed '0' min.

Figura 3. 15. Plantilla 3 – Panel de Alarmas

Como entrada analógica del proceso tenemos la señal proveniente de la fuente de voltaje que tiene como entrada una señal de corriente con un rango de 4 a 20 mA, y como salida una señal de voltaje en el rango de 0 a 240 voltios DC, utilizada para alimentar la armadura del motor. Figura 3.16

Como salida analógica del proceso se tiene la señal proveniente del sensor de velocidad del motor, como el que se muestra en la figura 3.17, el cual es un sensor pasivo que entrega una señal de voltaje con un rango de 0 a 10 voltios, donde 0 voltios representa 0 r.p.m. y 10 voltios representa 10000 r.p.m., es decir, el sensor de velocidad entrega 1 Voltio por cada 1000 r.p.m.

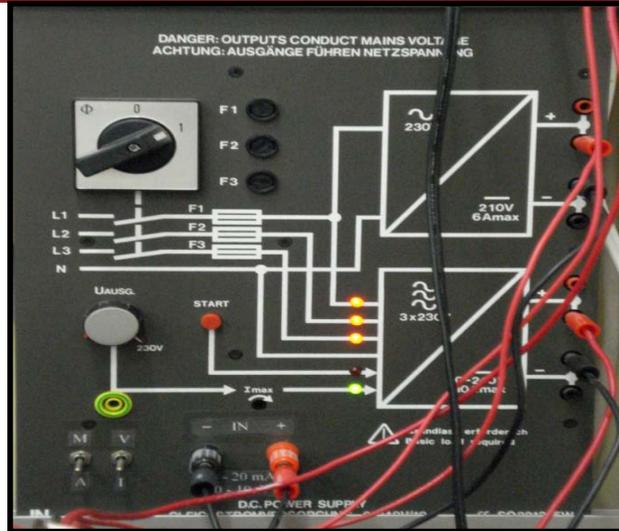


Figura 3. 16. Fuente de voltaje controlada por corriente



Figura 3. 17. Sensor de velocidad

Como entradas digitales del proceso tenemos dos interruptores con los que se simulará el Arranque y Parada del motor (*Start* y *Stop*), y como salidas digitales del proceso tenemos dos lámparas, figura 3.18. Una se encenderá cuando la velocidad del motor supere las 1500 r.p.m., y la otra se encenderá cuando la velocidad supere las 1800 r.p.m.

Una vez definida las señales necesarias para el control de velocidad se procede a definir las variables necesarias para dicho control. Como se utilizará el Protocolo MODBUS RTU se debe definir las tablas de direcciones a utilizar. En la tabla 3.11 se puede observar el nombre de las variables utilizadas, el tipo de dato, área de datos y número de registro. Se debe

mencionar que el tipo de dato hace como referencia a entradas o salidas de la estación de supervisión.



Figura 3. 18. Interruptores y lámparas

Tabla 3. 11. Variables utilizadas

NOMBRE DE VARIABLE	TIPO DE DATO	AREA DE DATO	NÚMERO DE REGISTRO
Velocidad medida (Speed_PV)	Entrada (Input)	Entrada Analógica (Input Register)	16
Velocidad deseada (Speed_SP)	Salida (Output)	Salida Analógica (Holding Register)	40024
Arrancar (Start)	Entrada (Input)	Entrada Discreta (Discrete Inputs)	16
Parar (Stop)	Entrada (Input)	Entrada Discreta (Discrete Inputs)	17
Velocidad Alta (Speed Alarm High)	Salida (Output)	Salida Discreta (Coils)	00016
Velocidad Alta Alta (Speed Alarm High High)	Salida (Output)	Salida Discreta (Coils)	00017

## **CAPITULO 4**

### **Implementación y pruebas**

#### **4.1. Implementación de la red inalámbrica y del proceso industrial**

##### **4.1.1. Introducción**

En el presente capítulo se expondrá la implementación de la red inalámbrica, utilizando los equipos de la marca PHOENIX CONTACT, y la supervisión de la red antes mencionada con el software RAD-Link 3.24. Así mismo, se comentará acerca de la implementación y puesta en marcha del entorno de supervisión del proceso industrial, en este caso, el control de velocidad de un motor de corriente continua, tal como se observa en la figura 4.1, a través de la realización de algunas experiencias con el software Visu+ 1.2.

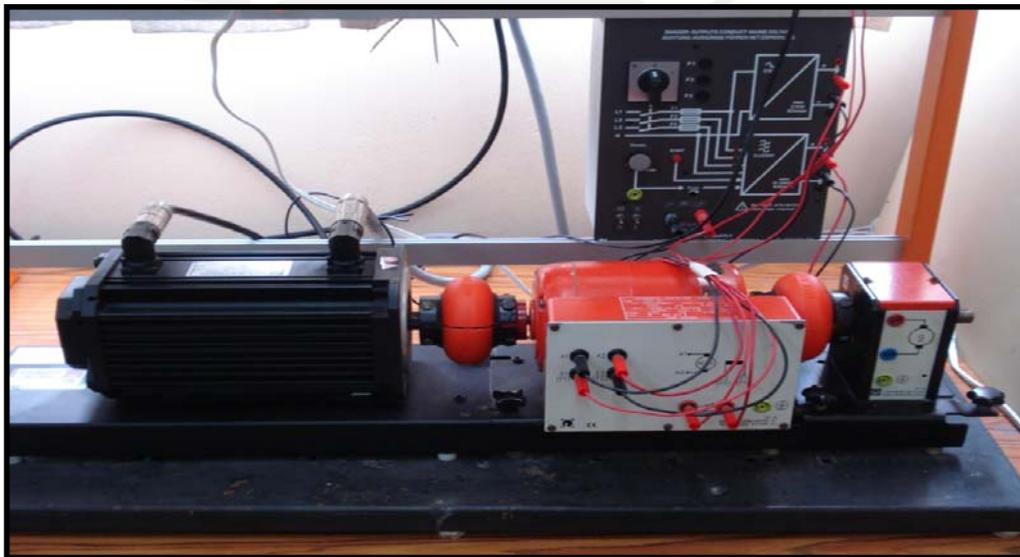


Figura 4. 1. Control de velocidad de un motor de corriente continua

##### **4.1.2. Conexión de los equipos**

Una vez configurados los equipos de comunicación inalámbrica, tal como se menciona en el anexo del presente documento, se procedió a su conexión de acuerdo al proceso industrial que se desea controlar y supervisar.

Al hablar del control de velocidad se debe mencionar las señales necesarias para llevar a cabo tal acción. En primer lugar se tienen dos señales analógicas, una de entrada y otra de salida, así como cuatro señales digitales, dos entradas y dos salidas.

Como salida analógica del proceso se tiene la señal proveniente del sensor de velocidad del motor como el que se muestra en la figura 3.17 de la sección anterior, el cual es un sensor pasivo que entrega una señal de voltaje con un rango de 0 a 10 voltios, donde 0 voltios representa 0 r.p.m. y 10 voltios representa 10000 r.p.m., es decir, el sensor de velocidad entrega 1 Voltio por cada 1000 r.p.m.

Se debe tener en cuenta que la señal que puede recibir el módulo de extensión (RAD-IN+OUT-2D-1A-I) es una señal de corriente con un rango de 4 a 20 mA (cabe mencionar que dicho rango corresponde a un estándar industrial), por lo que se debió utilizar un convertidor de voltaje a corriente como el de la figura 4.2. Este dispositivo tiene como entrada una señal de voltaje con un rango de -10 a 10 voltios y como salida una señal de corriente de 4 a 20 mA.



Figura 4. 2. Convertidor de voltaje a corriente

Como entrada analógica del proceso tenemos la señal proveniente del módulo de extensión (RAD-IN+OUT-2D-1A-I), el cual entrega una señal de corriente con un rango de 4 a 20 mA. Esta señal irá al actuador (Figura 3.16 de la sección anterior), en este caso, una fuente de tensión que tiene como entrada una señal de corriente con un rango de 4 a 20 mA, y como salida una señal de voltaje en el rango de 0 a 240 voltios DC, utilizada para alimentar la armadura del motor.

Como entradas digitales del proceso tenemos dos interruptores con los que se simulará el encendido y apagado del motor (*Start* y *Stop*). Y como salidas digitales del proceso tenemos dos lámparas, una se encenderá cuando la

velocidad del motor supere las 1500 r.p.m. representando la alarma de Velocidad Alta (Velocidad Máxima), y la otra se encenderá cuando la velocidad supere las 1800 r.p.m. indicando una alarma de Velocidad Alta Alta (Velocidad Crítica). Figura 3.18

#### 4.1.3. Supervisión de la red inalámbrica usando el software RAD-Link 3.24 de la marca PHOENIX CONTACT

Al ejecutar el software RAD-Link 3.24 aparece una ventana con el asistente para la creación, modificación o monitorización de una red inalámbrica. En este caso, se seleccionará la opción de Monitorear o Modificar una red de trabajo existente (*Monitor/Modify Existing Network*).

Entre los parámetros a monitorear se encuentran:

- Indicador de Intensidad de Señal Recibida RSSI (*Received Signal Strength Indicator*).
- Paquetes perdidos.

Considerando que la separación entre el transceptor de radiotelefonía (**MAESTRO -MASTER**) y el transceptor de radio (**ESCLAVO-SLAVE**) es de aproximadamente 1 metro, se obtuvieron las siguientes gráficas. (Ver figuras 4.3 y 4.4).

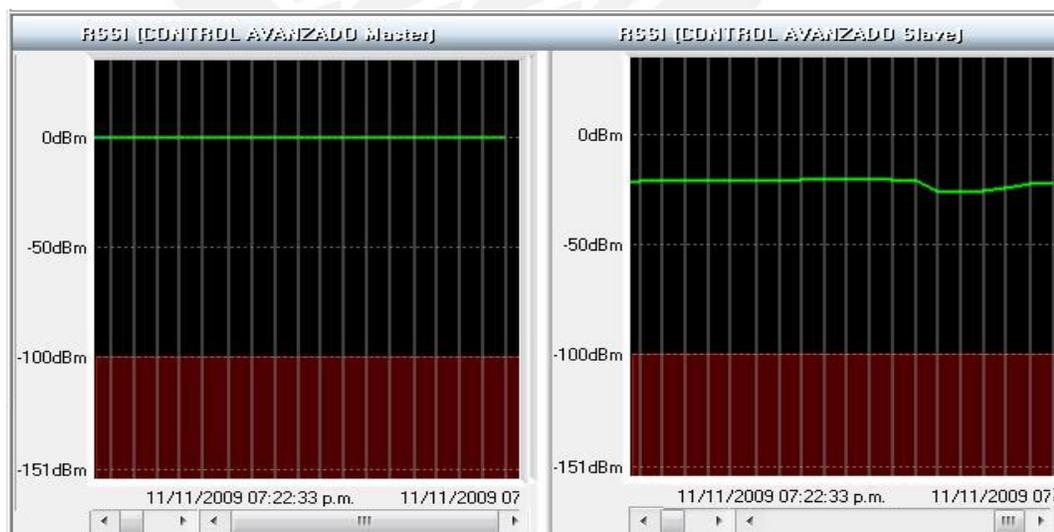


Figura 4. 3. Gráfica de Indicador de Intensidad de Señal Recibida RSSI.  
(*Received Signal Strength Indicator*)

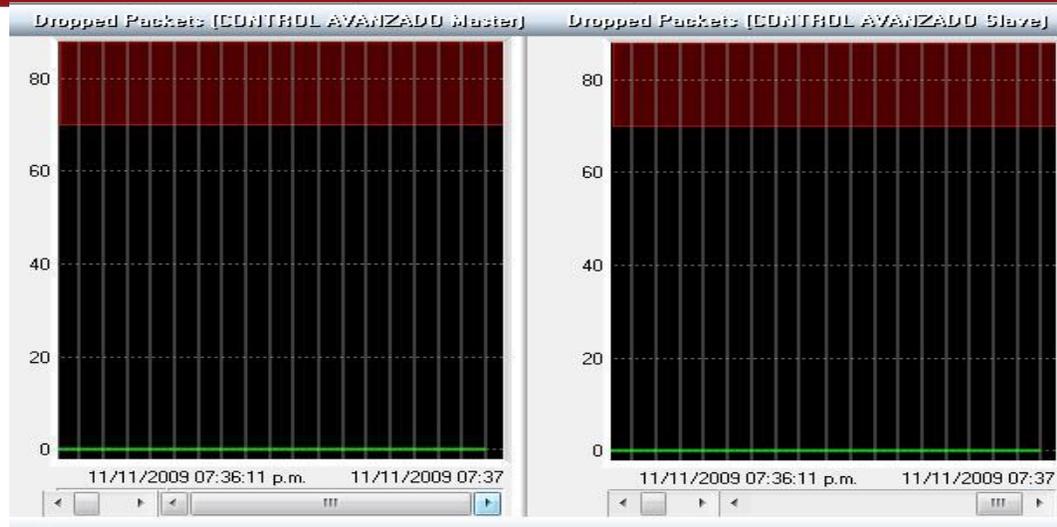


Figura 4. 4. Gráfica de paquetes perdidos

En la tabla 4.1 se puede apreciar la calidad de la señal de acuerdo a la distancia, así como la cantidad de paquetes perdidos. En dicha tabla **M** indica maestro (*MASTER*) y **S** indica esclavo (*SLAVE*).

Tabla 4. 1. Características de la red inalámbrica.

DISTANCIA (m)	RSSI			PAQUETES PERDIDOS		CONDICIÓN DE LA CONEXIÓN
	(dB)		(V)	M	S	
	M	S	S			
1	0	-20	3.42	0	0	Buena
2	0	-26	3.42	0	0	Buena
3	0	-30	3.42	0	0	Buena
4	0	-34	3.42	0	0	Buena
5	0	-40	3.42	0	1	Buena
6	0	-44	3.41	0	1	Buena
7	0	-50	3.40	0	1	Buena
8	0	-53	3.38	0	2	Buena
9	0	-59	3.29	0	5	Buena
10 a 15	0	-71	2.29	0	<50	Regular
15 a 20	0	-86	1.17	0	>70	Débil

De acuerdo a la tabla anterior, da como resultado un área de 706,87 m<sup>2</sup> en donde la estación de supervisión puede movilizarse sin que haya pérdida de información. Dicha área es de forma circular teniendo como centro del círculo el proceso industrial pues es una ubicación fija y porque se utilizan antenas omnidireccionales para el envío de la señal.

#### 4.2. Implementación del sistema de supervisión del proceso industrial

##### 4.2.1. Supervisión del proceso industrial utilizando el software Visu+ 1.2 de la marca PHOENIX CONTACT

En la figura 4.5 se puede apreciar la implementación completa, es decir, el entorno de supervisión corriendo en la computadora, y en el otro lado se observa los componentes que componen el proceso: el motor de corriente continua, el sensor de velocidad, el convertidor de voltaje a corriente, la fuente de voltaje controlada por corriente y el módulo de extensión.



Figura 4. 5. Proceso industrial y entorno de supervisión

El entorno de supervisión consta de tres plantillas. En la primera, figura 4.6, se muestra el motor y la distribución de borneras, la cual sirve como referencia para la correcta conexión de la alimentación del motor así como de la señal al sensor de velocidad. La segunda, figura 4.7, es la interfaz de control del motor, en la que se puede variar la velocidad del motor.

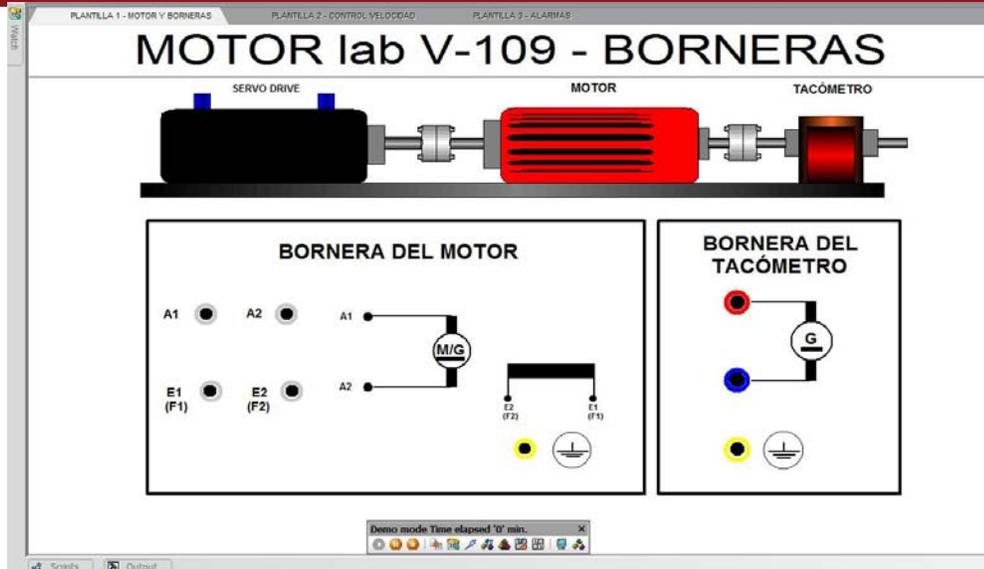


Figura 4. 6. Plantilla 1 – Motor y Borneras

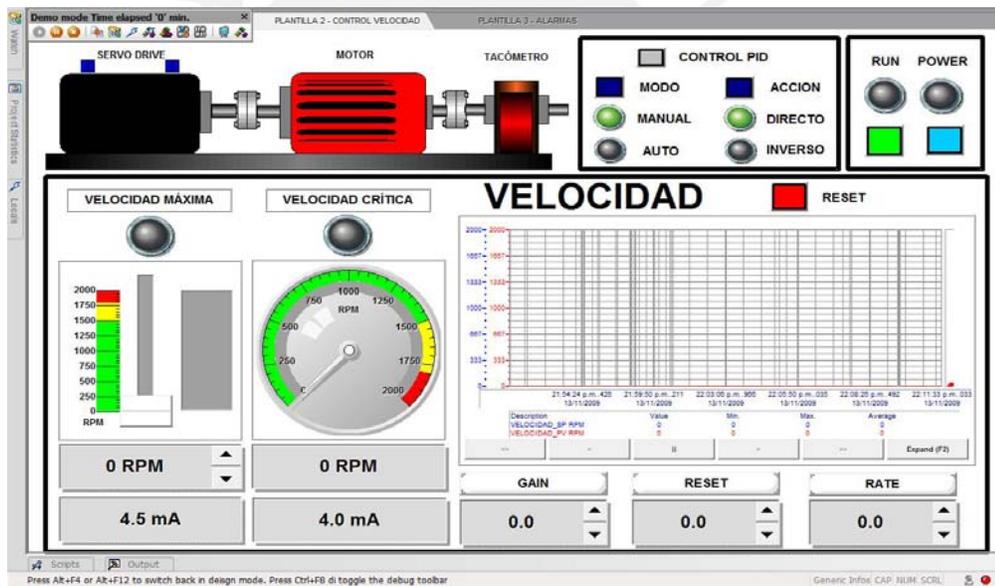


Figura 4. 7. Plantilla 2 – Control de Velocidad

Y en la tercera, figura 4.8, se tiene el panel de alarmas, en la que se da información acerca de la hora y motivo de las alarmas.

Alarm Description	Time ON	Duration	Severity	Condition
Velocidad Máxima	13/11/2009 09:51:22 p.m.	00:00:36	1	OFF
Velocidad Crítica	13/11/2009 09:51:40 p.m.	00:00:12	1	OFF
VELOCIDAD_PV_SCALED...	13/11/2009 09:51:22 p.m.	00:00:36	1	OFF
VELOCIDAD_PV_SCALED...	13/11/2009 09:51:40 p.m.	00:00:12	1	OFF

Figura 4. 8. Plantilla 3 – Panel de Alarmas

También se cuenta con una plantilla donde se puede observar la curva de tendencias de la variable de proceso, es decir, la velocidad, figura 4.9.

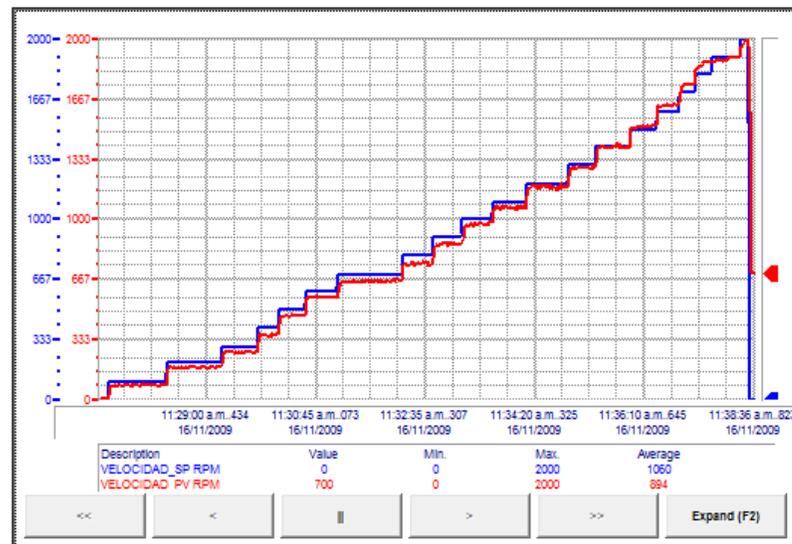


Figura 4. 9. Plantilla de Tendencias

Finalmente después de realizar algunas pruebas variando gradualmente la velocidad del motor desde 0 a 2000 r.p.m. con incrementos de 100 r.p.m., se obtuvieron los datos contenidos en la tabla 4.2, considerando la siguiente nomenclatura:

- Velocidad de Referencia, Set Point (SP).
- Velocidad medida, Process Value (PV).
- Porcentaje de Error (ER).

Apreciamos que el porcentaje de error, figura 4.10, es significativamente alto a muy bajas velocidades, lo cual se debe a la inercia que debe vencer el motor al momento de iniciar el giro. Una vez vencida esta inercia, la velocidad desarrollada por el motor es mucho más cercana al valor de referencia de velocidad.

Tabla 4. 2. Resultados de las pruebas.

SP (r.p.m.)	PV <sub>1</sub> (r.p.m.)	PV <sub>2</sub> (r.p.m.)	PV <sub>3</sub> (r.p.m.)	ER <sub>1</sub> (%)	ER <sub>2</sub> (%)	ER <sub>3</sub> (%)
0	0	0	0	0.00	0.00	0.00
100	52	60	57	48.00	40.00	43.00
200	161	174	168	19.50	13.00	16.00
300	263	277	271	12.33	7.67	9.67
400	374	381	378	6.50	4.75	5.50
500	477	482	480	4.60	3.60	4.00
600	577	583	581	3.83	2.83	3.17
700	679	685	682	3.00	2.14	2.57
800	780	785	784	2.50	1.88	2.00
900	883	886	884	1.89	1.56	1.78
1000	985	987	985	1.50	1.30	1.50
1100	1086	1087	1087	1.27	1.18	1.18
1200	1187	1190	1189	1.08	0.83	0.92
1300	1288	1290	1289	0.92	0.77	0.85
1400	1388	1391	1390	0.86	0.64	0.71
1500	1488	1492	1491	0.80	0.53	0.60
1600	1590	1593	1591	0.63	0.44	0.56
1700	1690	1693	1692	0.59	0.41	0.47
1800	1791	1793	1792	0.50	0.39	0.44
1900	1891	1895	1894	0.47	0.26	0.32
2000	1993	1998	1996	0.35	0.10	0.20

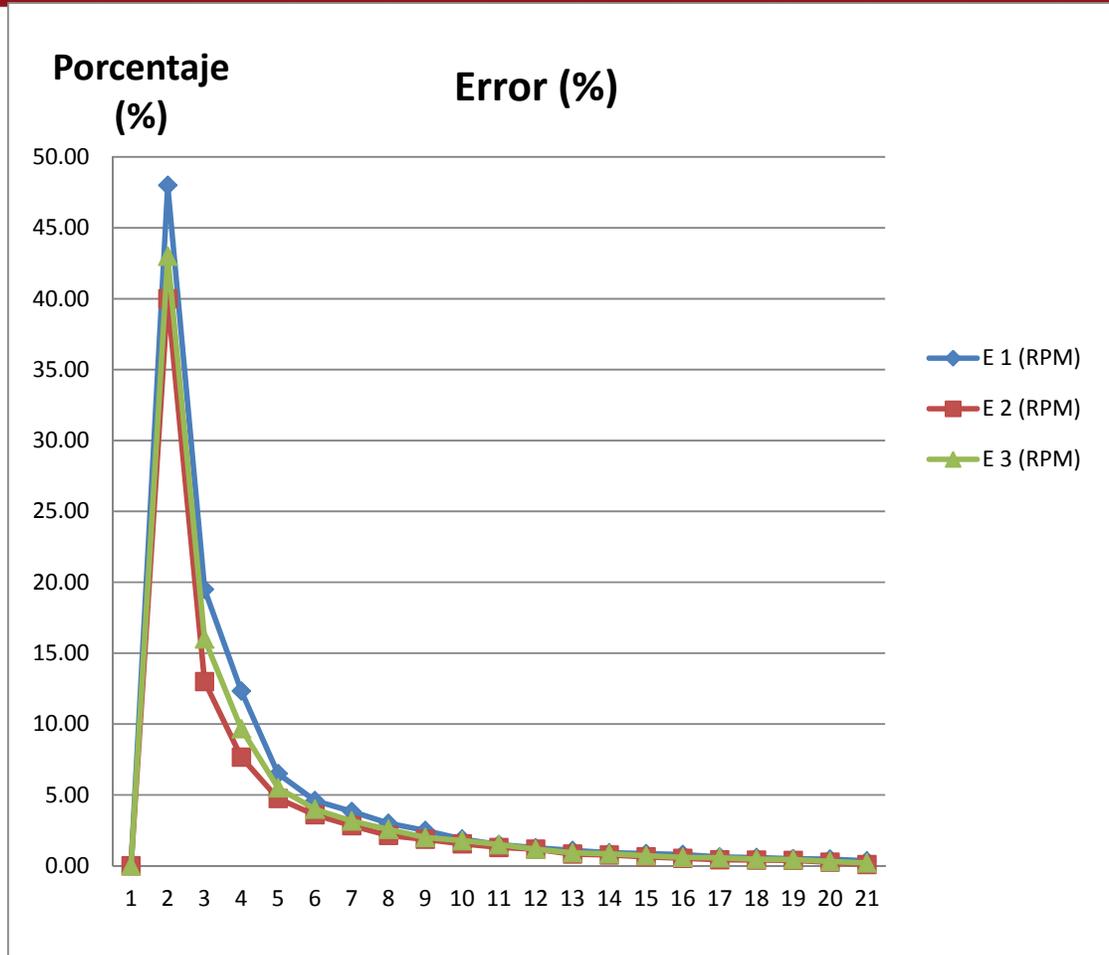


Figura 4. 10. Porcentaje de error

## CONCLUSIONES

1. En las pruebas de la cobertura de la red inalámbrica, se observó una adecuada potencia de recepción y un mínimo número de paquetes perdidos (Tabla 4.1). Lo anterior permite garantizar la calidad del enlace y la fiabilidad de la comunicación entre nodos (maestro y esclavo) con una separación máxima de hasta 12 metros entre ellos.
2. Las pruebas de movilidad y flexibilidad de la red inalámbrica dieron como resultado un área de 706,87 m<sup>2</sup> en donde la estación de supervisión puede movilizarse sin que haya pérdida de información.
3. Las pruebas que se realizaron en el pabellón V, dieron como resultado un área de cobertura menor a las especificaciones técnicas de los dispositivos de PHOENIX CONTACT, lo cual fue debido a la presencia de elementos que atenúan la señal inalámbrica. Es importante recalcar que la presencia de otras redes inalámbricas y el proceso industrial mismo (motor de corriente continua) afectan la calidad de la señal.
4. El protocolo MODBUS, permite el envío de información a través de medios no guiados. Esta característica es de vital importancia en el uso de redes inalámbricas, a pesar del retardo que se presenta en el envío de la señal desde un nodo hacia otro nodo. Este retardo debe considerarse en tareas de control de un proceso industrial, dado que podría afectar su funcionamiento.
5. Al usar el software RAD-Link 3.24 se pudo monitorear exitosamente la red inalámbrica brindando información acerca de la potencia de la señal enviada y recibida por cada nodo, así como la cantidad de paquetes perdidos presentes durante la transmisión. Así mismo, al diseñar e implementar el entorno de supervisión con el software SCADA Visu+ 1.2, se pudo utilizar al 100% el módulo de extensión RAD-IN+OUT-2D-1A-I utilizando sus dos señales analógicas y cuatro digitales en la supervisión del control de velocidad del motor de corriente continua.

## RECOMENDACIONES

1. Teniendo la red inalámbrica en funcionamiento se recomienda realizar pruebas aplicando estrategias de control donde se requiera un monitoreo continuo de la señal siendo vital la no pérdida de señal tanto de campo a la estación de supervisión y viceversa.
2. Como se comentó en el capítulo 3, sección 3.2.4, se podría optar por el control de torque teniendo en cuenta que se debe añadir señales de entrada y salida, tanto analógicas como digitales para efectuar lo antes mencionado.
3. Con respecto a la integración de más sistemas de control, como por ejemplo un lazo de control de temperatura, nivel, presión o flujo, debería tenerse en cuenta, aparte de aumentar las señales de entrada salida, tomar como referencia la configuración de la red inalámbrica tal como se comentó en el capítulo 3, sección 3.9.
4. Al momento de realizar nuevas investigaciones o trabajos tomando como referencia o punto de partida este documento, se recomendaría utilizar un Controlador Lógico Programable (PLC) como dispositivo maestro y el transceptor de radio como dispositivo esclavo añadiendo instrumentación compatible con el protocolo MODBUS e ir armando una red industrial donde se utilicen medios guiados, así como no guiados.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] GARCÍA MORENO, Emilio  
1999 Automatización de procesos industriales: Robótica y Automática,  
Universidad Politécnica de Valencia
- [2] BALCELLS, Josep y ROMERAL, José Luis  
1997 Autómatas programables, Marcombo
- [3] RODRIGUEZ PENIN, Aquilino  
2007 Sistemas SCADA, Marcombo
- [4] ROSADO MUÑOZ, Alfredo  
Sistemas Industriales Distribuidos, Universidad de Valencia.
- [5] HERRERA PÉREZ, Enrique  
2002 Tecnologías y redes de transmisión de datos, Limusa
- [6] FLYNN, Ilda M.y MCHOES, Ann McIver  
2001, Sistemas Operativos, 3ra Edición, Thomson Learning
- [7] DOMIINGO PEÑA, Joan  
2003 Comunicaciones en el entorno industrial, UOC
- [8] MAHGOUB, Imad., ILYAS, Mohammad  
2005 Sensor Networks Protocols, CRC Press
- [9] BING, Benny  
2007 Emerging Technologies in Wireless LANs: Theory, Design, and  
Deployment, Cambridge University Press
- [10] DOMIINGO PEÑA, Joan  
2003 Comunicaciones en el entorno industrial, UOC
- [11] LEYVA MACHIN, Ebenezer  
¿Qué es Wi-Fi?, Revista Técnica de la Empresa de  
Telecomunicaciones de Cuba S.A.
- [12] HERNANDEZ RUEDA, José Abel  
Antenas: Principios básicos, análisis y diseño, UABC

- [13] Estándar WiMAX  
Consulta: 18 de febrero de 2013.  
<http://www.wimax.com/general/what-is-wimax>
- [14] TANENBAUM, Andrew S.  
2003 Redes de computadoras, 4ta edición, Pearson
- [15] FERNANDEZ GÓMEZ, Eva  
2004 Conocimientos y aplicaciones tecnológicas para la dirección comercial
- [16] MARCOMBO, Paul Rinaldo  
1993 Guía Internacional del radioaficionado, MARCOMBO
- [17] CARO, Dick  
2008 Wireless Network for Industrial Automation, 3rd Edition, ISA
- [23] MODBUS Tools  
Consulta: 24 de julio de 2013.  
<http://www.modbustools.com/modbus.asp>
- [24] MODBUS  
Consulta: 24 de julio de 2013.  
<http://www.modbus.org/specs.php>
- [25] DATA LINC GROUP  
Consulta: 20 de abril de 2013.  
<http://www.data-linc.com/espanol/producte/plr580sp.htm>
- [26] SIEMENS  
Consulta: 20 de abril de 2013.  
[http://www.automation.siemens.com/net/html\\_78/produkte/050\\_netzkomponenten.htm](http://www.automation.siemens.com/net/html_78/produkte/050_netzkomponenten.htm)
- [27] PHOENIX CONTACT  
Consulta: 20 de abril de 2013.  
<http://www.phoenixcontact.es/tecnologia/18108.htm>

[28] Espectro ensanchado por frecuencia (FHSS)

Consulta: 18 de septiembre de 2013.

<http://www.phoenixcontact.es/tecnologia/18108.htm>

