



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA



UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS - “ESPE”

DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES
CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA, AUTOMATIZACIÓN Y CONTROL

**“CONTROL SOBRE UN PROTOTIPO DE MECANISMO DE SUPERFICIE CON CARRERA LARGA
PARA BOMBAS DE SUBSUELO DE PRODUCCIÓN PETROLÍFERA”**

AUTOR: ROGER NICOLÁS JÁCOME PÉREZ

DIRECTOR: ING. DARWIN OMAR ALULEMA FLORES, PhD.

QUITO-ECUADOR
2022

VERSIÓN: 1.1



Agenda



01 INTRODUCCIÓN

Levantamiento artificial
Bombeo mecánico de balancín
Mecanismo de superficie Rotaflex
Pirámide CIM

02 OBJETIVOS

General
Específicos

03 INGENIERÍA BÁSICA

Sistema de control
Sistema de instrumentación
Sistema de supervisión
Sistema de comunicaciones

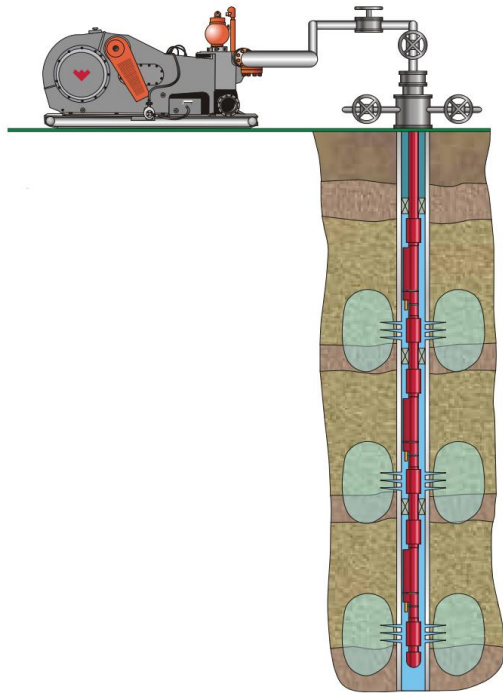
04 INGENIERÍA DE DETALLE

Sistema de control
Sistema de instrumentación
Sistema de supervisión
Sistema de comunicaciones

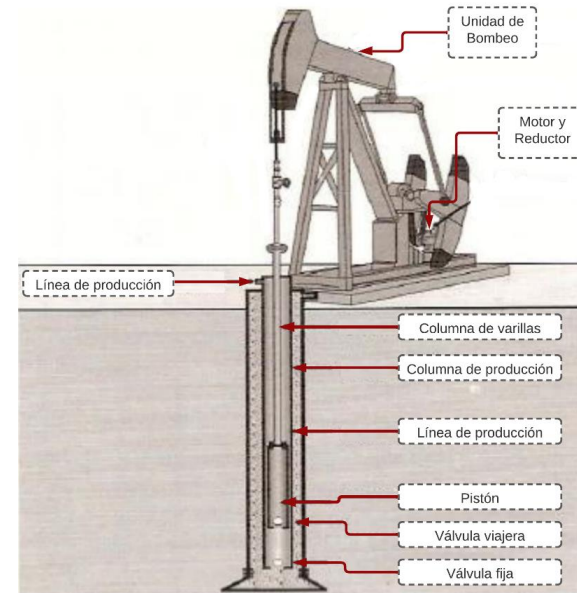
05 PRUEBAS Y RESULTADOS

Funcionamiento, usabilidad, mediciones sensor
encoder, estrategia de control, ciclos/min

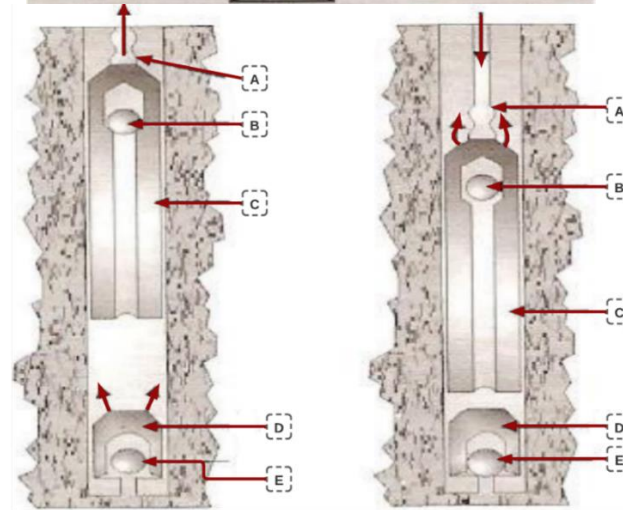
06 CONCLUSIONES TRABAJOS FUTUROS



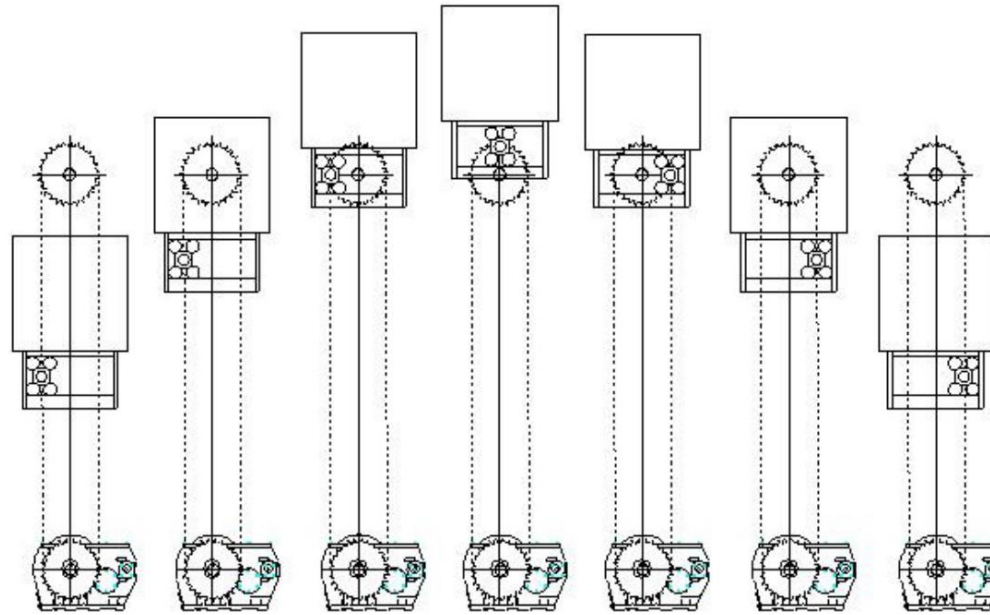
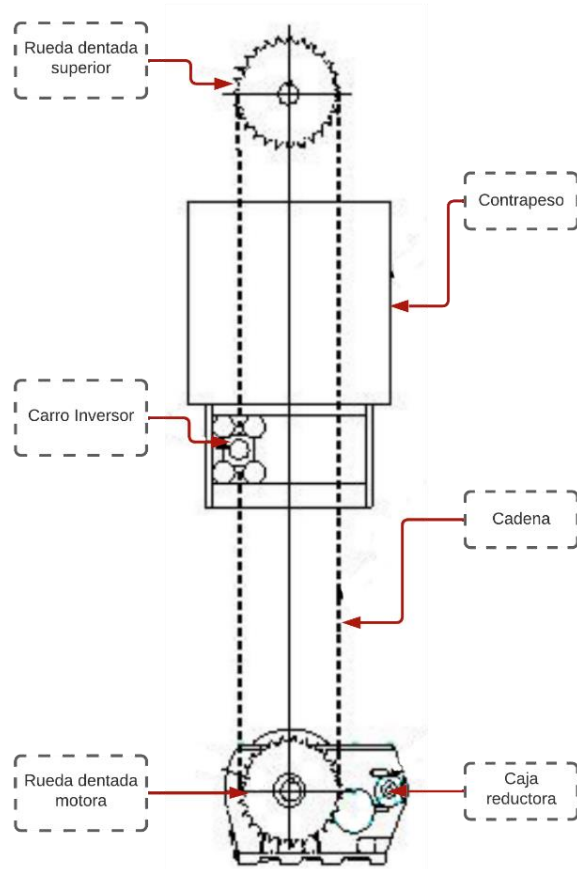
Levantamiento artificial



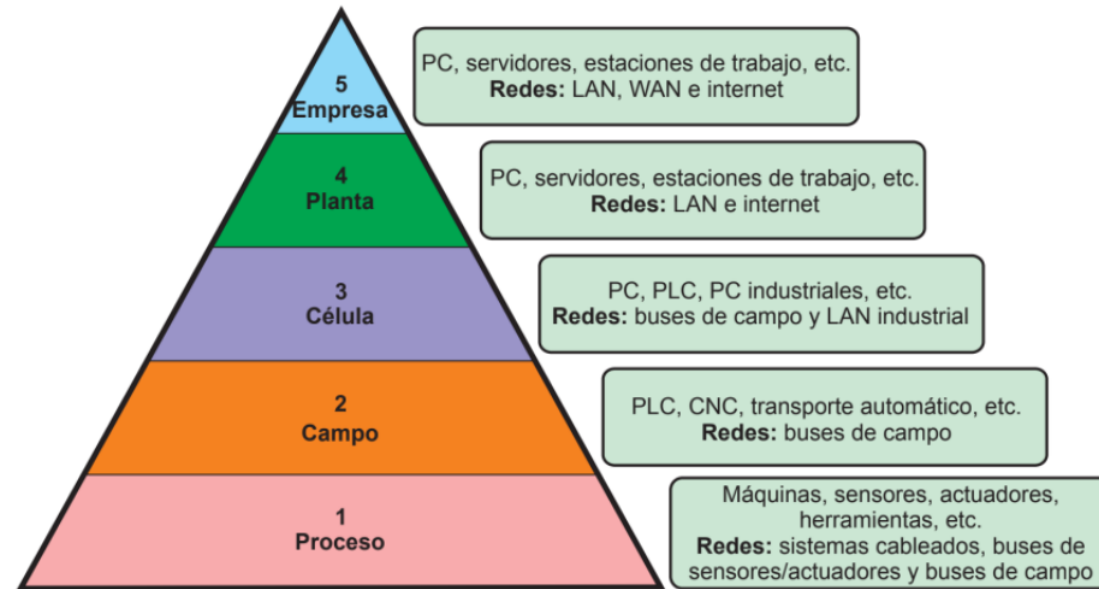
Bombeo mecánico de balancín



- A- Columna de varillas
- B- Válvula viajera
- C- Pistón
- D- Camisa
- E- Válvula fija



Mecanismo de superficie Rotaflex



Pirámide
CIM





Objetivos

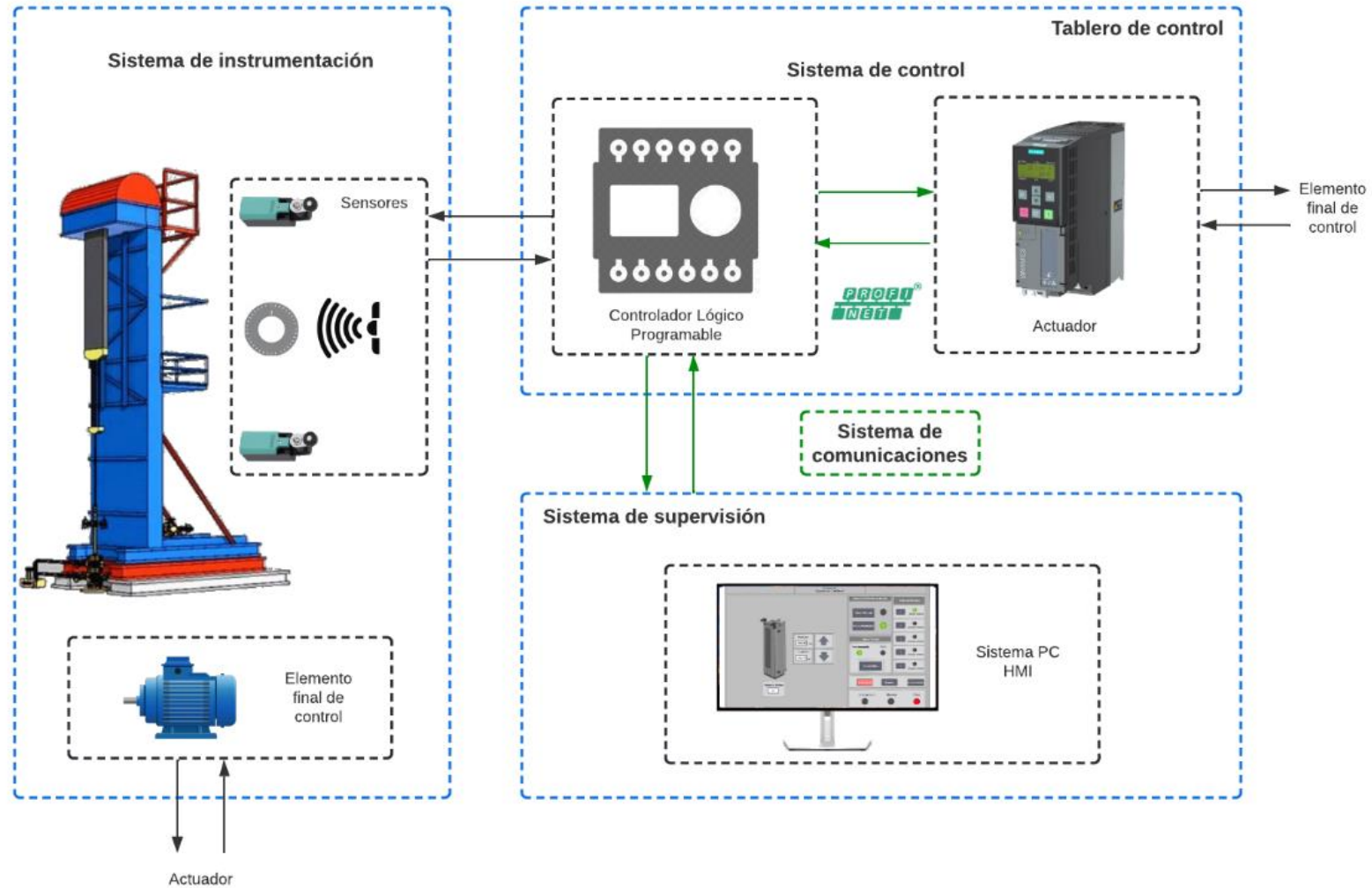
Objetivo General

Implementar el control de velocidad para un prototipo de mecanismo con carrera larga utilizando conceptos de automatización y control para obtener ciclos de bombeo uniformes.

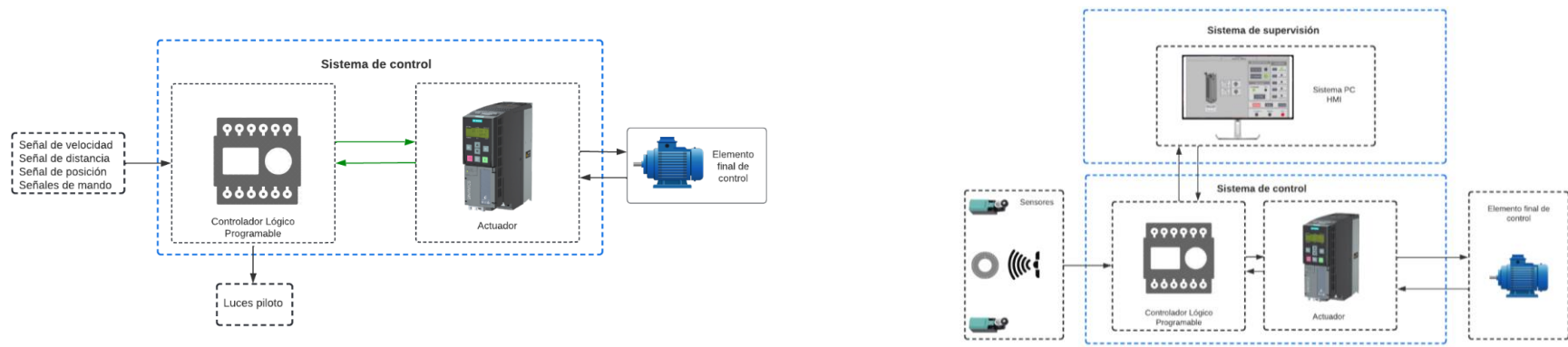
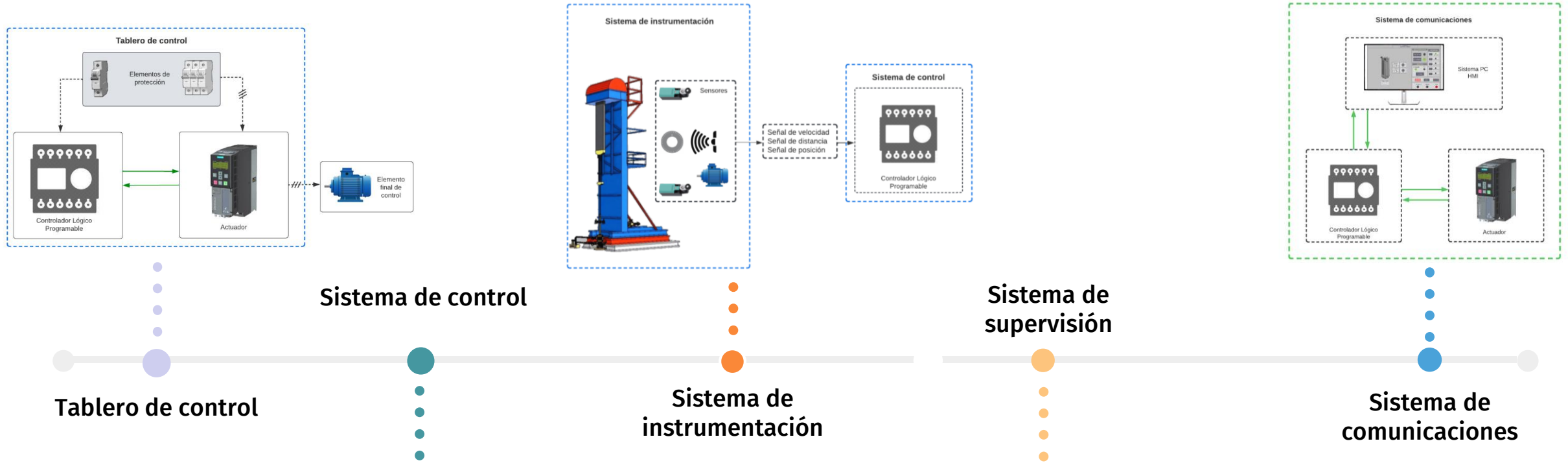
Objetivos Especificos

- Realizar un estudio sistemático de la literatura sobre bombas de subsuelo, mecanismos de elevación artificial y conceptos de automatización industrial en pozos petroleros.
- Realizar el control de inversión de giro del motor de manera suave y programada para cumplir con los ciclos operativos ascendente y descendente de bombeo.
- Controlar las velocidades en el recorrido vertical para los diferentes tramos en un ciclo.
- Diseñar una interfaz Humano Máquina (HMI) para la supervisión y el control del funcionamiento del prototipo de mecanismo de superficie.
- Diseñar e implementar un tablero de control que contenga los diferentes dispositivos eléctricos y electrónicos, para el control del prototipo.
- Implementar el tratamiento de paradas de emergencia en anomalías de funcionamiento del prototipo de mecanismo de superficie.

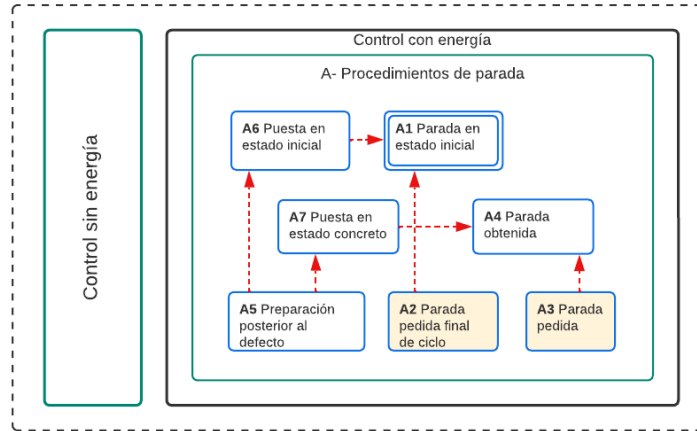




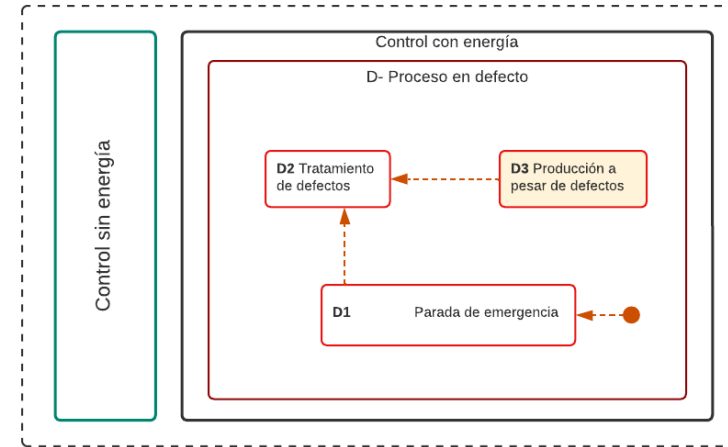
Sistemas y estructuras



Estructura general de funcionamiento

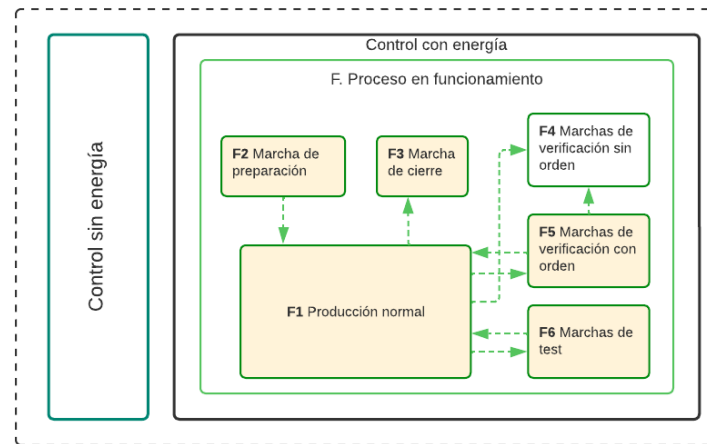


Proceso en funcionamiento

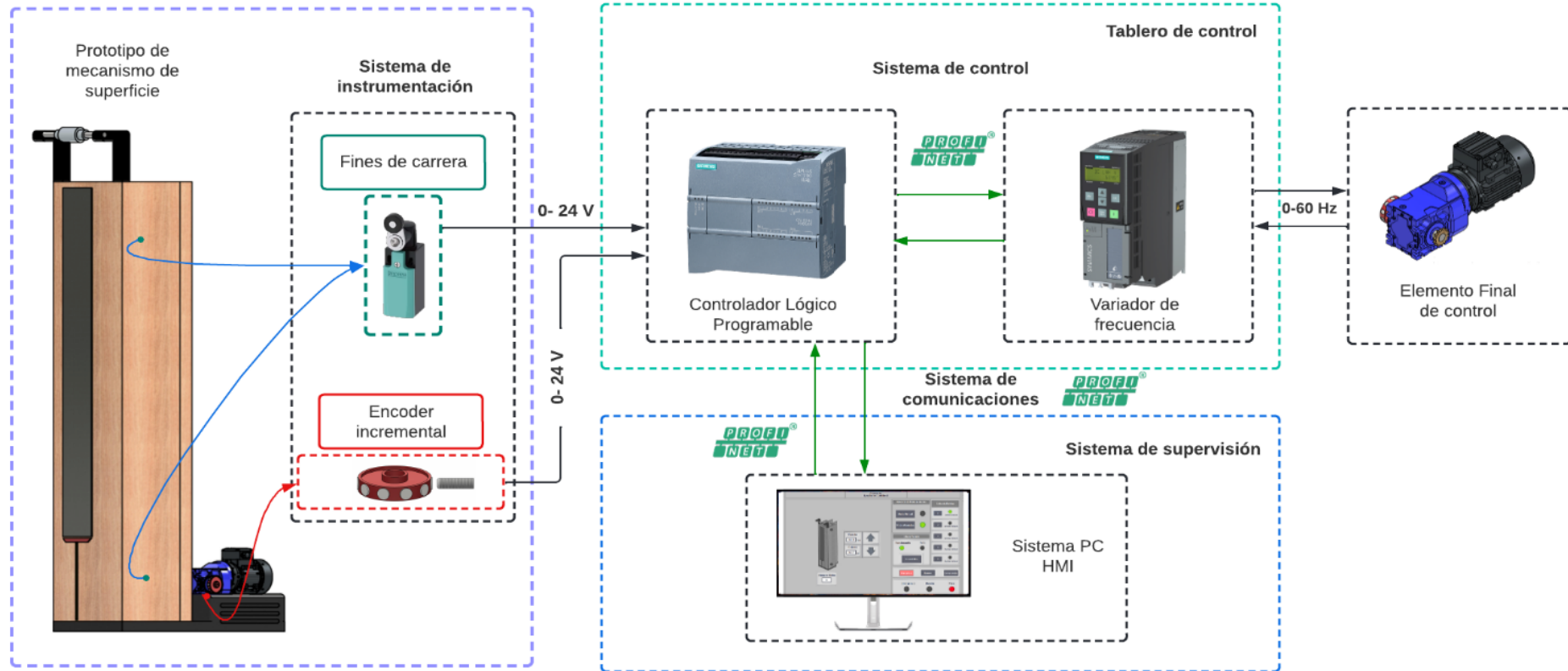


Procedimientos de parada

Proceso en defecto



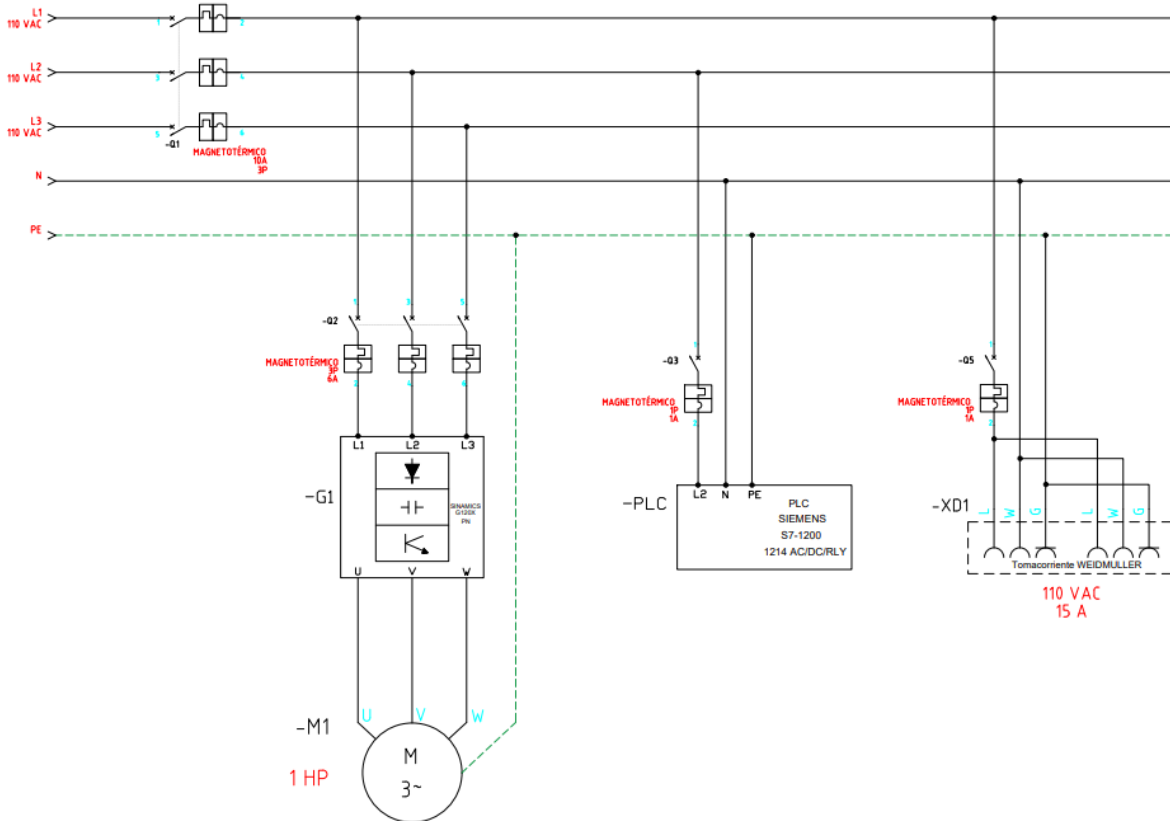
Ingeniería de Detalle



01

Tablero de control

Plano de fuerza



$$I_{Total} = I_{Variador} + I_{PLC} + I_{Señalización} + I_{Switch Ethernet}$$

$$I_{Total} = 5.4 [A] + 0.3[A] + 0.1[A] + 0.03[A]$$

$$I_{Total} = 5.83 [A]$$

| Cantidad | Marca | Modelo | Descripción |
|----------|--------------------|--------|-----------------------------------|
| 2 | Schneider Electric | iC60N | Interruptor termomagnético 1P 1A |
| 1 | Schneider Electric | Easy9 | Interruptor termomagnético 3P 6A |
| 1 | Schneider Electric | Easy9 | Interruptor termomagnético 3P 10A |

$$I_{m\acute{a}x} = I_N \times 125\%$$

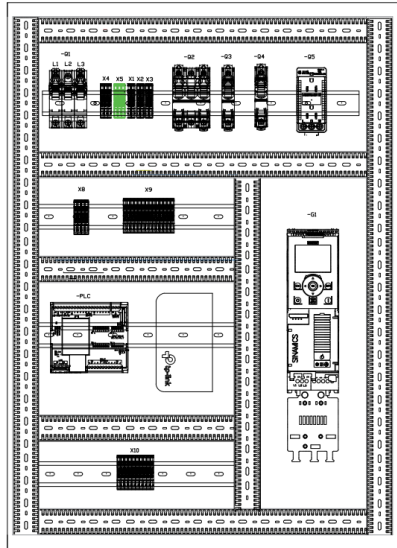
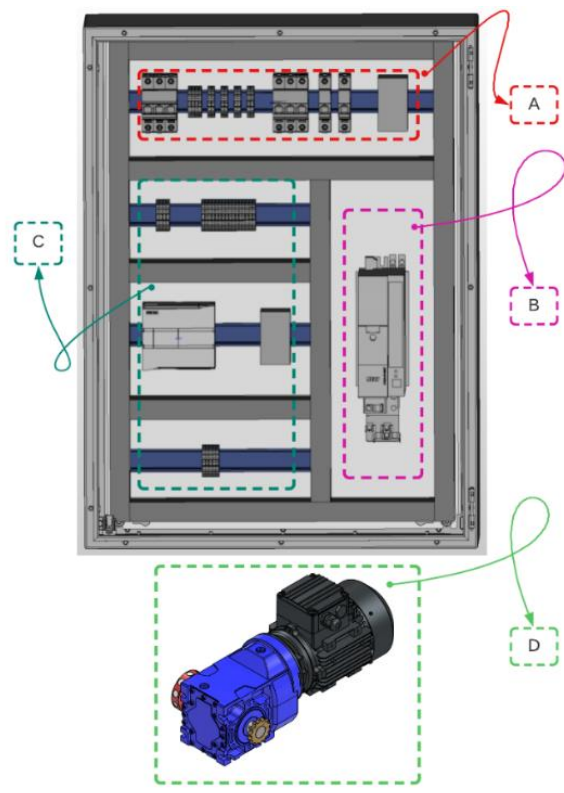
$$I_{m\acute{a}x} = (5.83) \times 1.25$$

$$I_{m\acute{a}x} = 7.2875 [A]$$

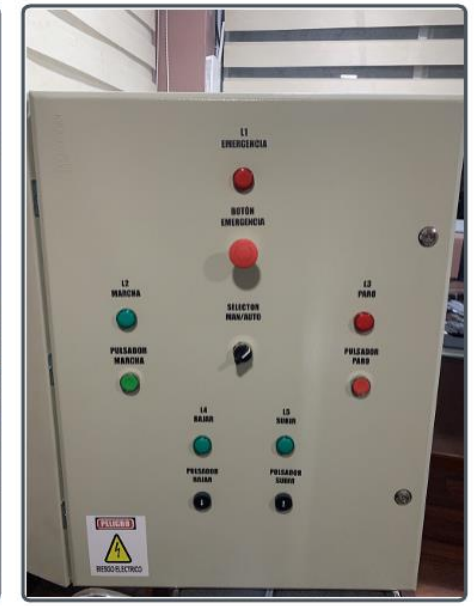
| Calibre | Sección mm ² | Tipo | Capacidad máxima de conducción | Aplicación |
|---------|-------------------------|------|--------------------------------|---|
| 16 AWG | 1.31 | TFF | 13 [A] | Distribución de energía de baja tensión, usos industriales en bandejas, ductos, interconexión de aparatos de protección, motores, tableros de control, etc. |

Tablero de control

01 Tablero de control Zonas CEM



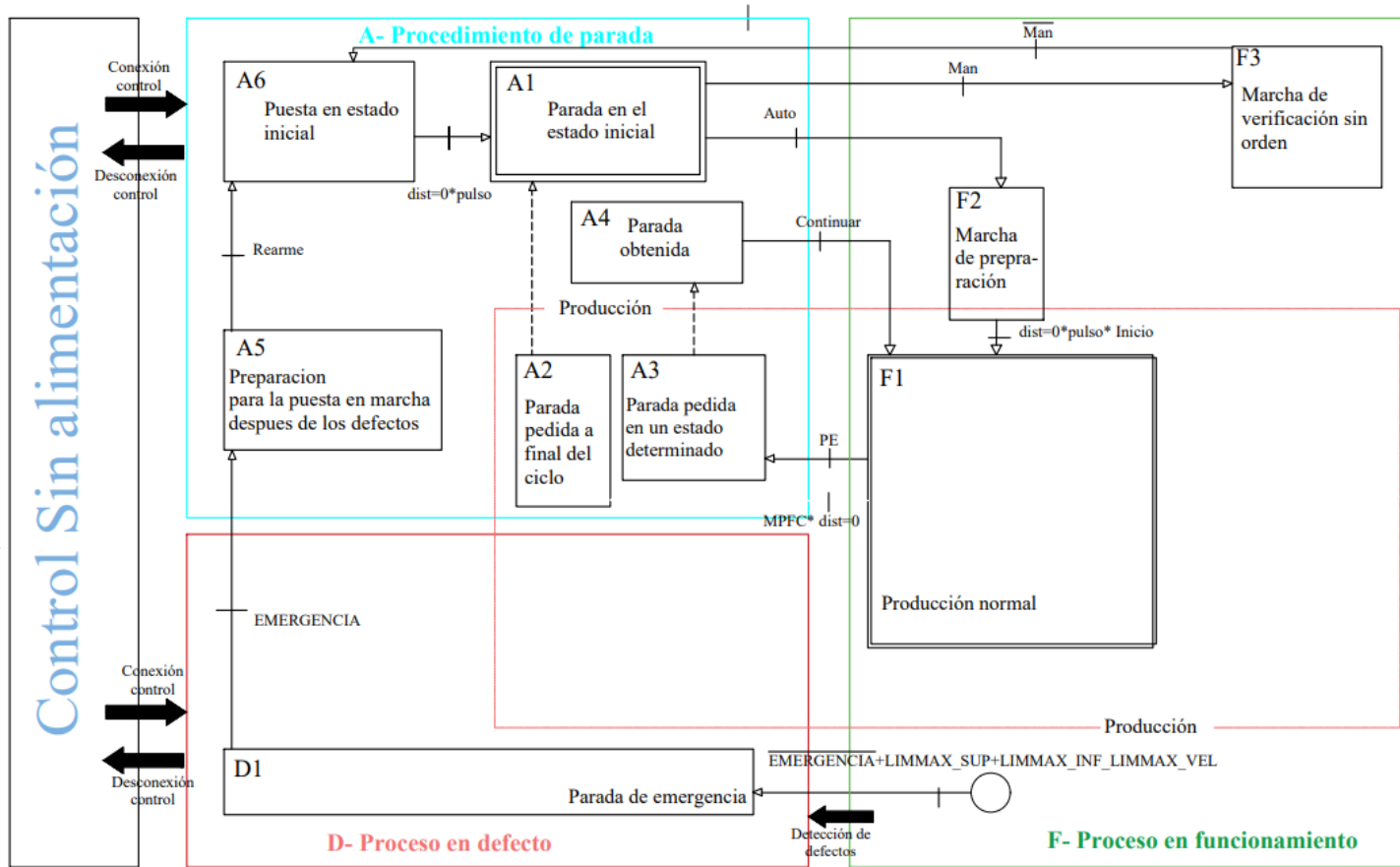
- Zona A: Conexión de red
- Zona B: Electrónica de potencia
- Zona C: Cotrolador, sensores, borneras.
- Zona D: Motores



02

Sistema de control

Guía GEMMA



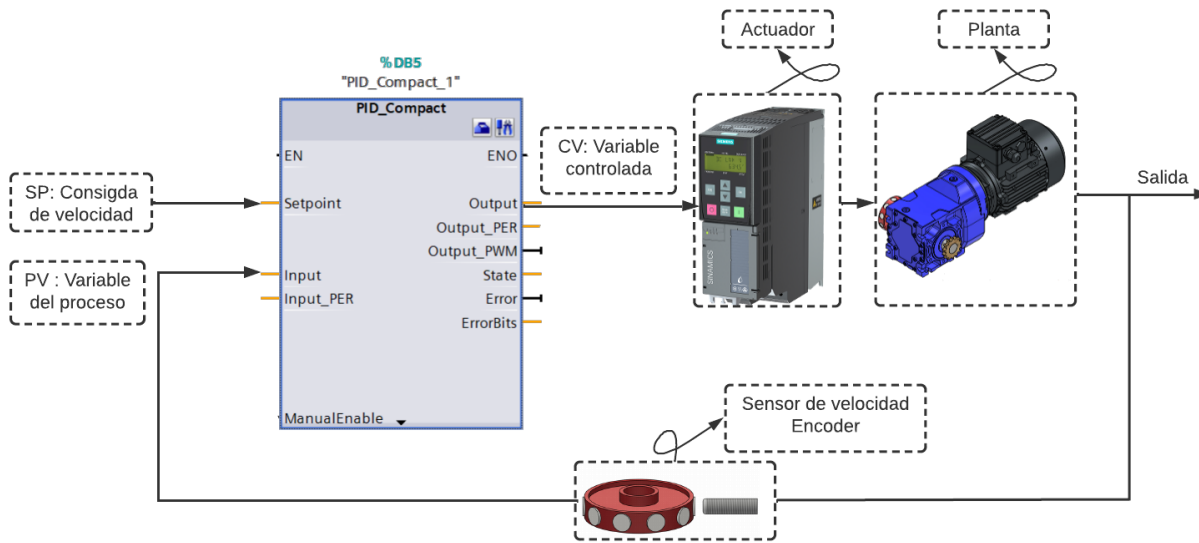
- Producción
- Modos de Marcha
- Paro de estado determinado
- Paro fin de ciclo
- Seguridad



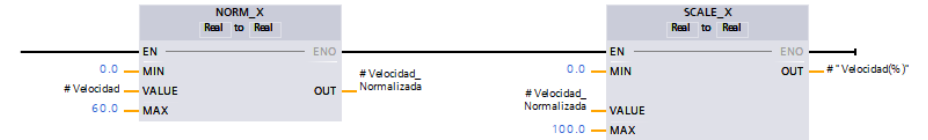


02

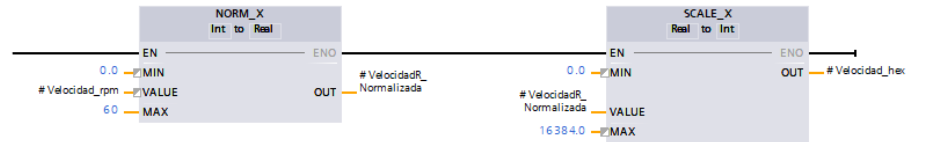
Sistema de control Estrategia de control



Segmento 2: Variable del proceso_PV(%)
Normalizamos la medida del sensor de velocidad, esto con el fin de expresar en porcentaje la variable del proceso para el bloque PID



Segmento 3: Variable Controlada _CV(%)
Segmento 4: Velocidad Real
En el registro (r063) del variador podemos observar que la velocidad real del se encuentra normalizada por el parámetro (p200 = Ajusta la magnitud de referencia para velocidad de giro y frecuencia. Todas las velocidades de giro o frecuencias relativas están referidas a esta magnitud de referencia) por lo cual la velocidad entregada en porcentaje por el bloque PID debemos escalarla a un rango entre 0 y 16384 o 4000 hex del p200



$$y = K_p[(b \cdot w - x)] + \frac{1}{T_i p} \cdot (w - x) + T_D \cdot p \cdot (c \cdot w - x) \cdot \frac{1}{1 + a \cdot T_D \cdot p}$$

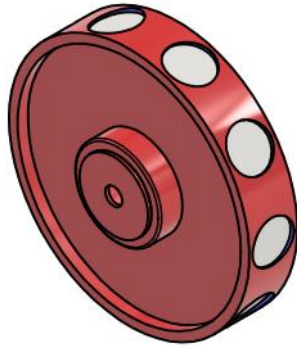
P I D Filtro pasa bajo



03

Sistema de instrumentación

Sensor Encoder y variables físicas



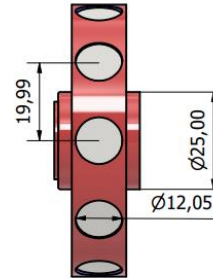
$$f_{C_{min}} = \frac{n \times V_{max}}{60}$$

$$f_{C_{min}} = \frac{20 \times 1800}{60}$$

$$f_{C_{min}} = 600 [Hz]$$

| Marca | Referencia | Frecuencia de conmutación | Número de conductores | Tensión de alimentación | Salida de conmutación | Diámetro de actuación | Distancia de actuación |
|--------|------------|---------------------------|-----------------------|-------------------------|-----------------------|-----------------------|------------------------|
| BALLUF | BES0064 | 2500 Hz | 3 | 24 V DC | PNP- NA | 10 mm | 4 mm |

Velocidad

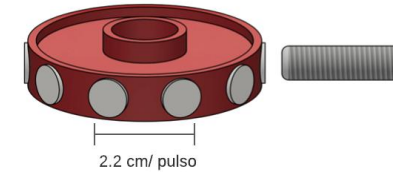


```

1
2 // Si el tiempo transcurrido (Elapsed time) y el conteo (edgeCount)son válidos, calculamos el periodo
3
4
5 [IF (#edgeCount > 0)
6   AND (#elapsedTime > 0)
7   AND (#elapsedTime <= 4294967280)
8   THEN
9   // Calcular el periodo en nanosegundos
10  #statPeriod := #elapsedTime / #edgeCount;
11  // Calculate the period in seconds
12  #statPeriod := #numPulsePerRot * #statPeriod / #BILLION;
13  END_IF;
14
15 // Comprobamos si se da un sobretiempo (Es decir que el periodo entre dos bordes de pulso supera o no los 4,295 segundos)
16 [IF (#elapsedTime = #OVERFLOW_VALUE)
17   THEN
18   #statOverflow := TRUE;
19   ELSE
20   #statOverflow := FALSE;
21   END_IF;
22
23 // El periodo es igual a 0 si existe un sobretiempo
24 [IF (#statOverflow = TRUE)
25   THEN
26   #statPeriod := 0;
27   END_IF;
28
29 // Calculamos las rpm a partir del periodo (tiempo para una vuelta)
30 [IF (#statPeriod > 0)
31   THEN
32   #speed := 1 / #statPeriod * 60.0;
33   ELSE
34   #speed := 0;
35   END_IF;
36
37

```

Distancia



$$d = \frac{\text{Perímetro}}{\# \text{ de pulsos}}$$

$$d = \frac{22 \text{ cm}}{10 \text{ pulsos}}$$

$$d = 2.2 \frac{\text{cm}}{\text{pulso}}$$

```

1 #I_Pulsos := #Dist_cm / 2.2;
2
3 // Detectar el flanco positivo del sensor inductivo
4 [R_TRIG_DB" (CLK:= #Pulso,
5   Q=>#Flanco);
6
7 [IF #Flanco = TRUE AND "ZSW1_Data"."IN 23" = TRUE THEN
8   // Cuando detecte un flanco positivo en el sensor inductivo y este activo
9   // el sentido de giro positivo el mecanismo avanza en 0.787402 cm/pulso.
10  #Dist_cm := #Dist_cm + 0.787402;
11  ;
12  ELSIF #Flanco = TRUE AND "ZSW1_Data"."IN 23" = FALSE THEN
13  // Cuando detecte un flanco positivo en el sensor inductivo y este activo el
14  // sentido de giro negativo el mecanismo retrocede en 0.787402 cm/pulso.
15  #Dist_cm := #Dist_cm - 0.787402;
16  ;
17  // Se calibra el sensor encoder, se ubica el punto inicial de funcionamiento
18  ELSIF "Variables_HMI".Calibrar = TRUE THEN
19  // Se calibra el sensor encoder, se ubica el punto inicial de funcionamiento
20  #Dist_cm := 0;
21  ;
22  ELSIF #Dist_cm < 0.786402 AND #Dist_cm >= -0.786402 AND "Etapas_Grafoet".G0_2[3]=FALSE THEN
23  #Dist_cm := 0;
24  ;
25  END_IF;
26

```

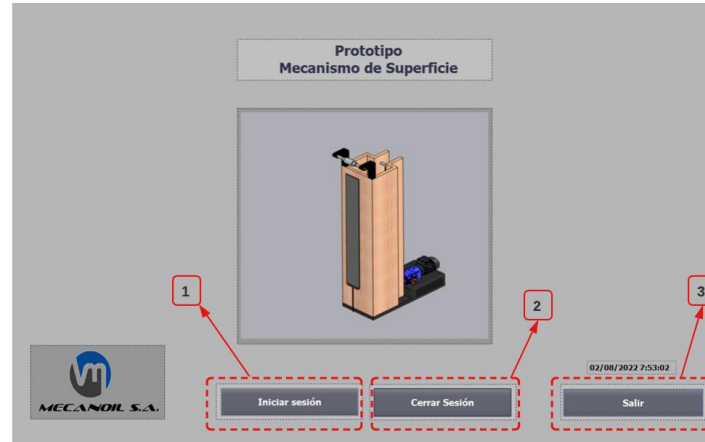
04

Sistema de supervisión

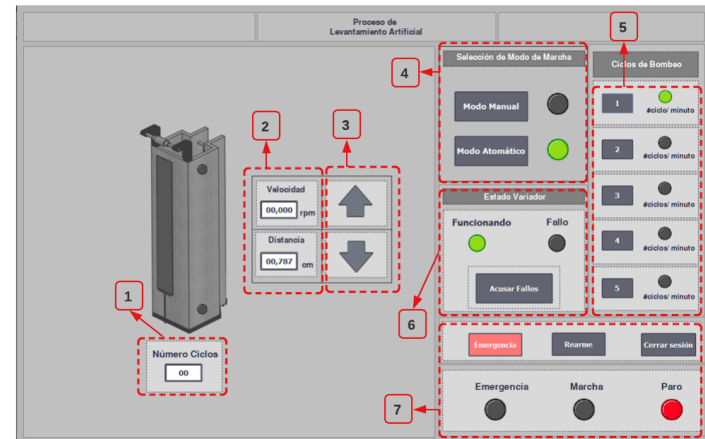
Norma ISA 101

- Introducción
- Uso de color
- Dinámica visual
- Consistencia del diseño
- Botones
- Métodos de navegación

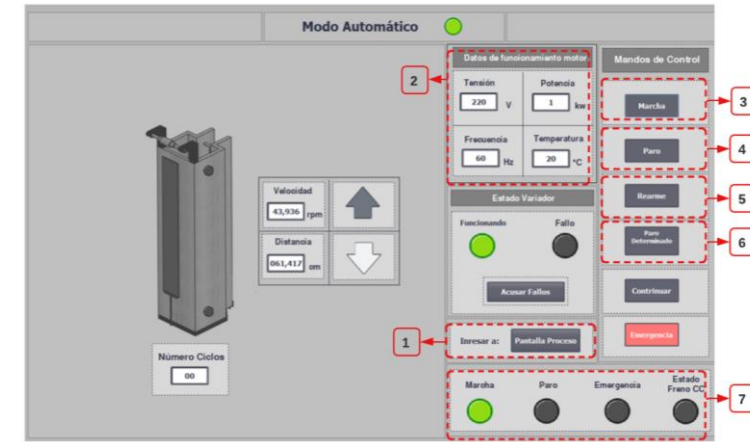
Inicio de sesión



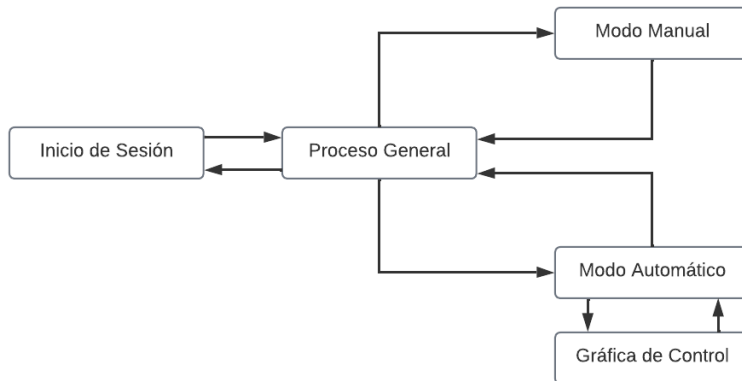
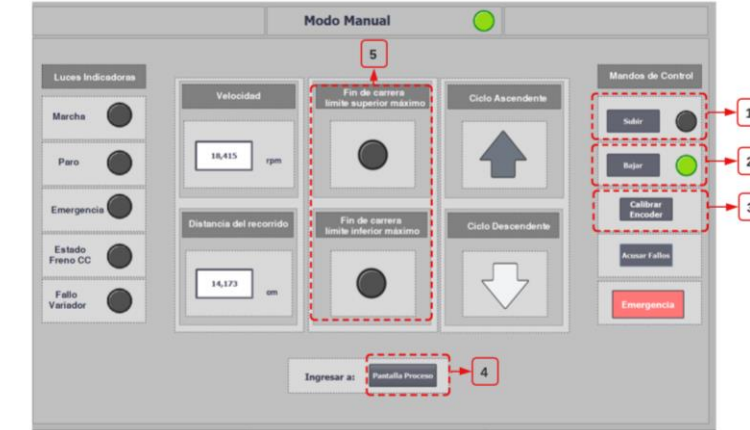
Proceso General



Modo automático



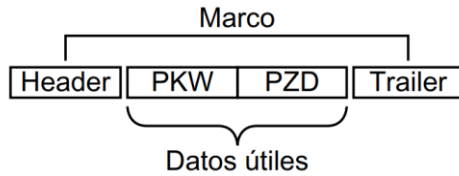
Modo manual



05

Sistema de comunicaciones

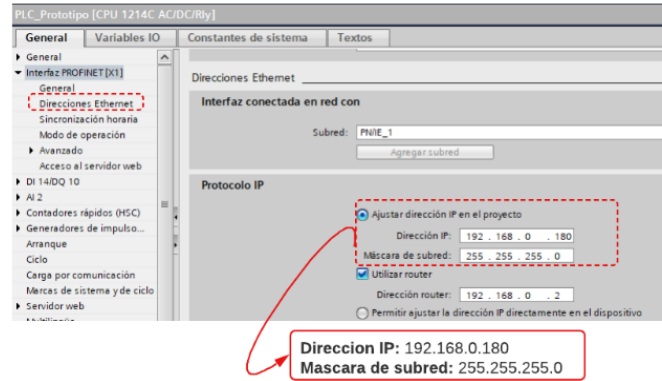
Profinet



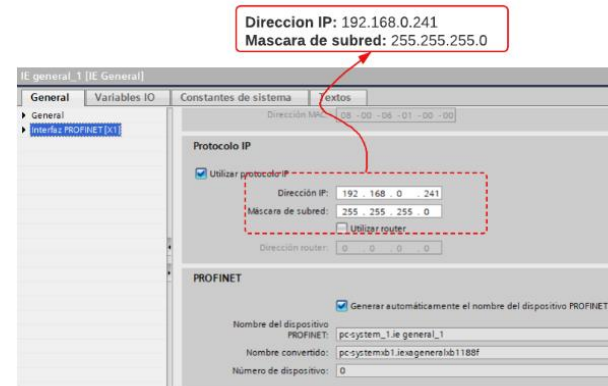
Telegrama 350

| Dato de Proceso | Parámetro | Descripción |
|-----------------|--------------|--------------------------|
| PZD01 | STW1 | Palabra de mando 1 |
| | ZSW1 | Palabra de estado 1 |
| PZD02 | NSOLL_A | Consigna de velocidad |
| | NIST_A GLATT | Velocidad real filtrada |
| PZD03 | M_LIM | Límite de par |
| | IAIST_GLATT | Intensidad real filtrada |
| PZD04 | STW3 | Palabra de mando 3 |
| | ZSW3 | Palabra de estado 3 |

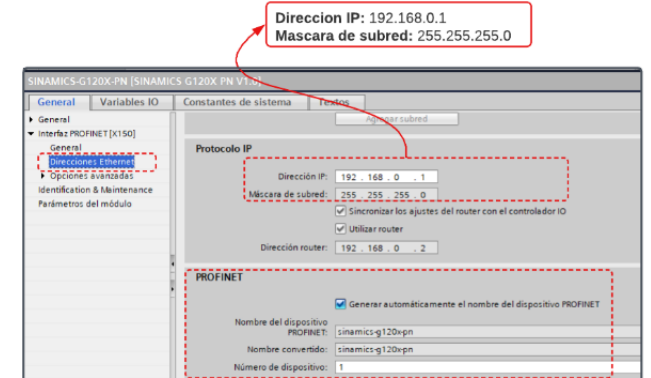
Profinet PLC



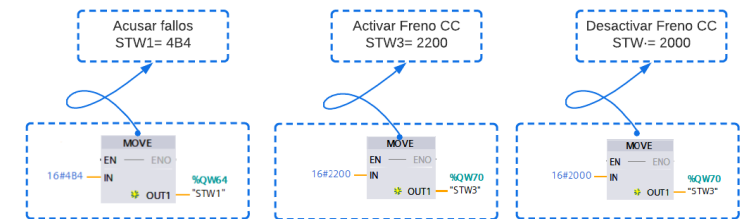
Profinet PG/PC



Profinet Variador

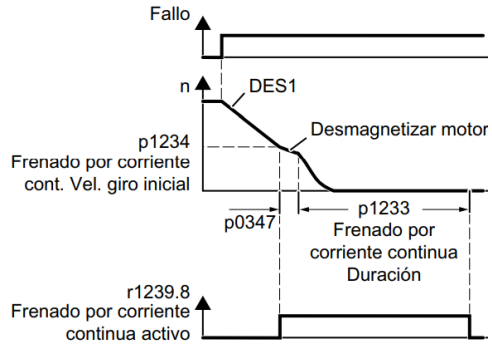


| Palabra de mando | Significado | bits | Hexadecimal |
|------------------|--|------------------|-------------|
| STW1 | Puesta en servicio/ Parada natural | 0000010001111110 | 16#047E |
| | Sentido de giro positivo | 0000010001111111 | 16#47F |
| | Inversión de sentido de giro | 0000110001111111 | 16#C7F |
| | Confirmar fallos | 0000010010110100 | 16#4B4 |
| STW3 | Freno de corriente continua activo | 0010001000000000 | 16#2200 |
| | Desactivar freno de corriente continua | 0010000000000000 | 16#2000 |



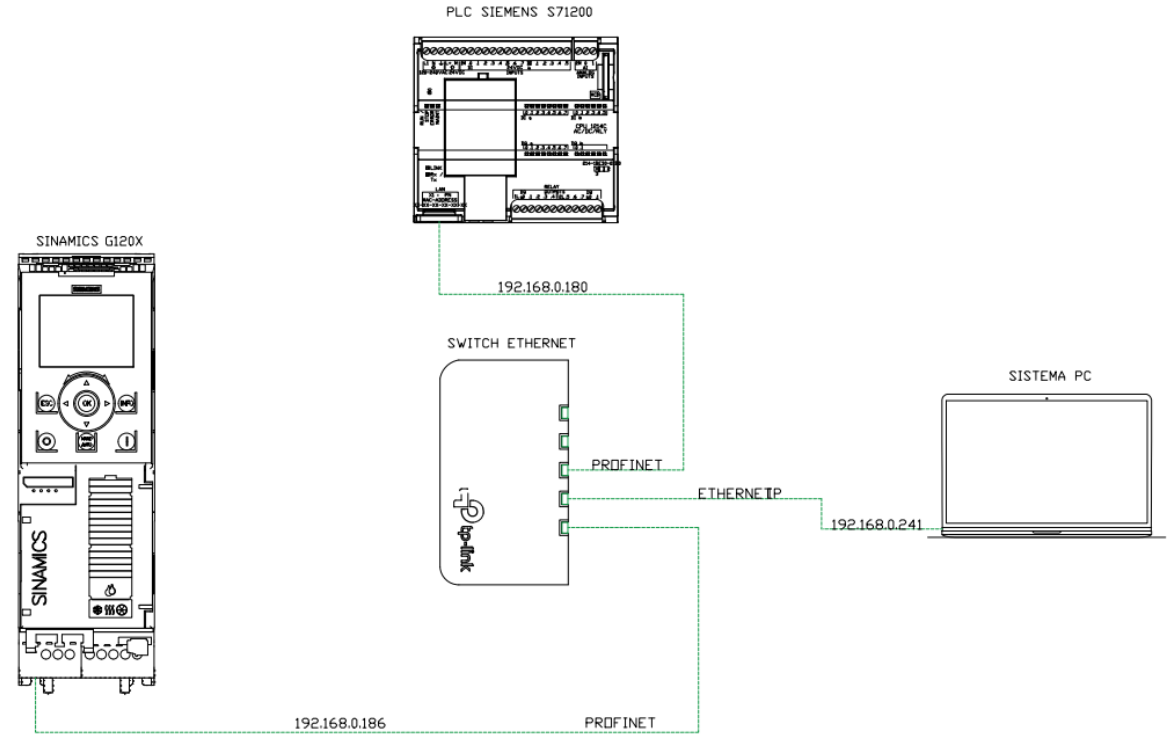
Sistema de comunicaciones

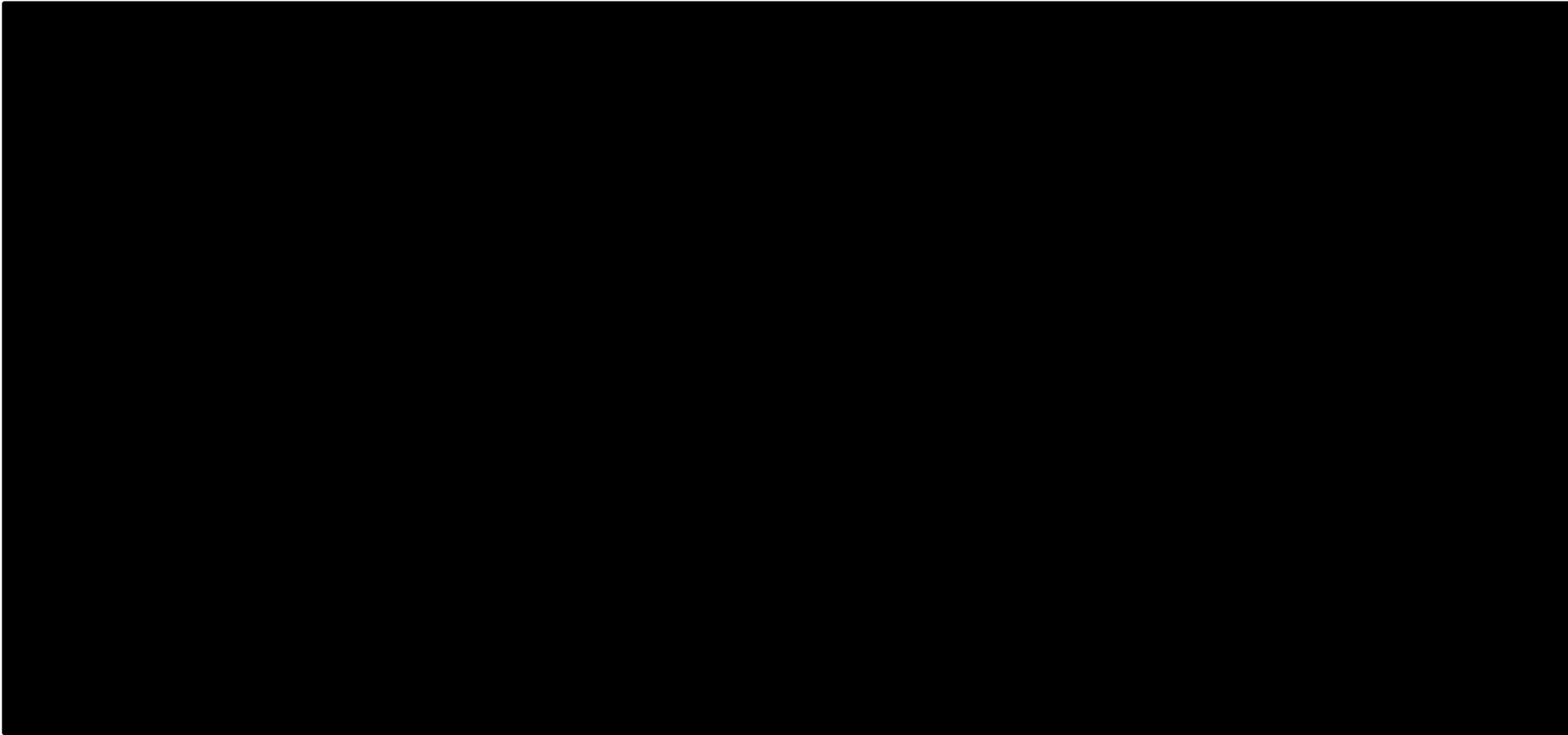
Freno de corriente continua



| Parámetro | Descripción | Valor |
|-----------|---|-----------|
| P1232 | Intensidad de frenado por corriente continua | 3.4 A |
| p1233 | Duración del frenado de corriente continua | 1 s |
| p1234 | Velocidad inicial de frenado por corriente continua | 21000 rpm |

Arquitectura de comunicaciones



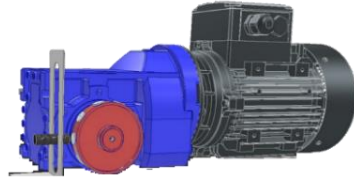


Pruebas de funcionamiento

01

Velocidad

Resultados de las pruebas de medición de velocidad



| Velocidad del panel operador (rpm) | Velocidad convertida del panel operador /30 (rpm) | Velocidad medida por el sensor (rpm) | Error absoluto (rpm) | Error relativo (%) |
|------------------------------------|---|--------------------------------------|----------------------|--------------------|
| 150 | 5 | 5.12 | -0.12 | 2.40 |
| 300 | 10 | 9.77 | 0.33 | 2.20 |
| 450 | 15 | 14.88 | 0.12 | 0.80 |
| 600 | 20 | 19.25 | 0.75 | 3.75 |
| 750 | 25 | 25.37 | -0.37 | 1.48 |
| 900 | 30 | 29.42 | 0.58 | 1.93 |
| 1050 | 35 | 35.22 | -0.22 | 0.62 |
| 1200 | 40 | 39.78 | 0.22 | 0.55 |
| 1350 | 45 | 45,31 | -0.31 | 0.68 |
| 1500 | 50 | 49.33 | 0.67 | 1.34 |
| 1650 | 55 | 54,51 | 0.49 | 0.89 |
| 1800 | 60 | 60.12 | -0.12 | 0.20 |
| Promedio | | | 0.358 rpm | 1.40% |

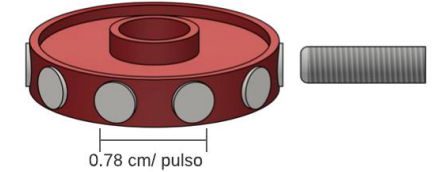
Imprecisión Absoluta: $0.358 \pm$ valor de velocidad en rpm

Error relativo: % 1.40

02

Distancia

Resultados de las pruebas de medición de distancia



| Distancia medida con la cinta métrica (cm) | Distancia medida por el sensor encoder (cm) | Error absoluto (rpm) | Error relativo (%) |
|--|---|----------------------|--------------------|
| 10 | 9.22 | 0.78 | 7.8 |
| 20 | 19.22 | 0.78 | 3.9 |
| 30 | 29.22 | 0.78 | 2.6 |
| 40 | 40.78 | -0.78 | 1.95 |
| 50 | 49.22 | 0.78 | 1.56 |
| 60 | 59.22 | 0.78 | 1.30 |
| 70 | 69.22 | 0.78 | 1.11 |
| 80 | 80.78 | -0.78 | 0.97 |
| 90 | 90,78 | -0.78 | 0.86 |
| 100 | 99.22 | 0.78 | 0.78 |
| Promedio | | 0.78 cm | 2.28% |

Imprecisión Absoluta: $0.78 \pm$ valor de distancia en cm

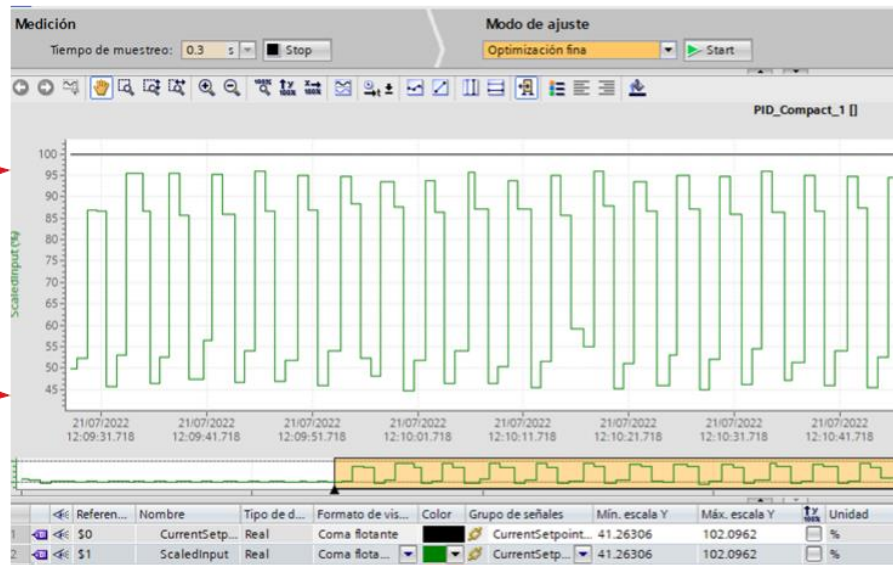
Error relativo: % 2.28



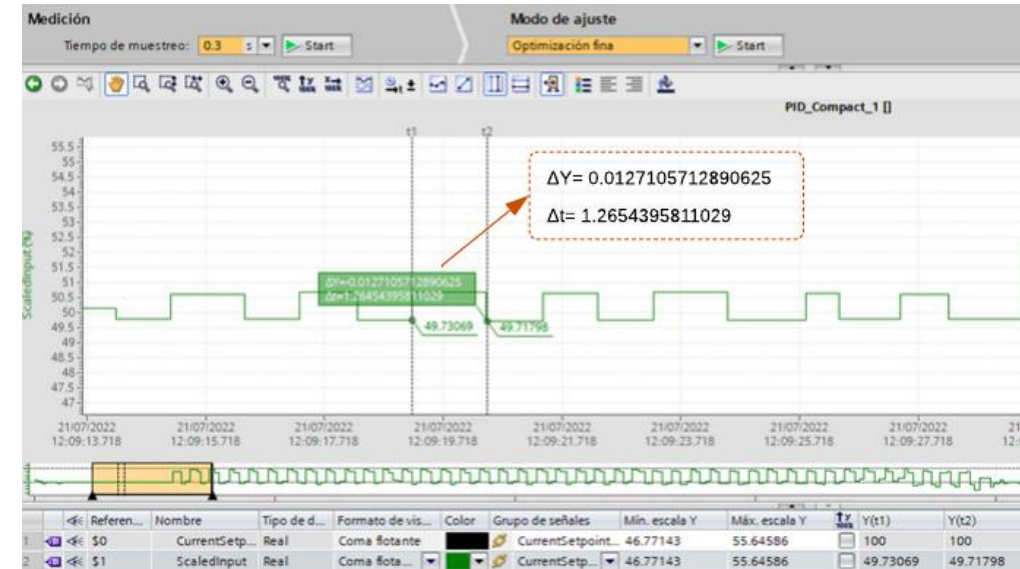
Pruebas de funcionamiento

03 Método de sintonización Ziegler-Nichols

Ku= 3



Ku= 1



| Tipo de controlador | Kp | Ti | Td |
|-----------------------------|-----|------|------|
| PID (mixto menos oscilante) | 0.3 | 0.63 | 0.21 |





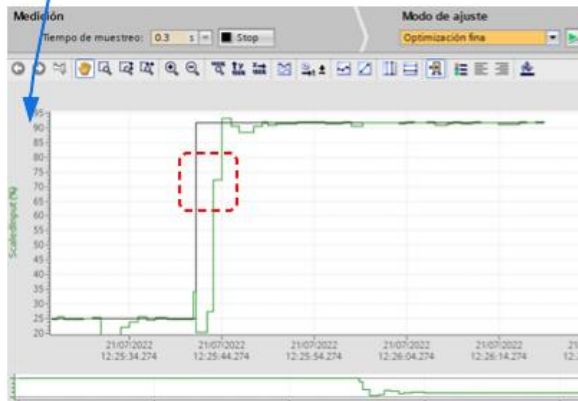
Pruebas de funcionamiento

04

Sintonización

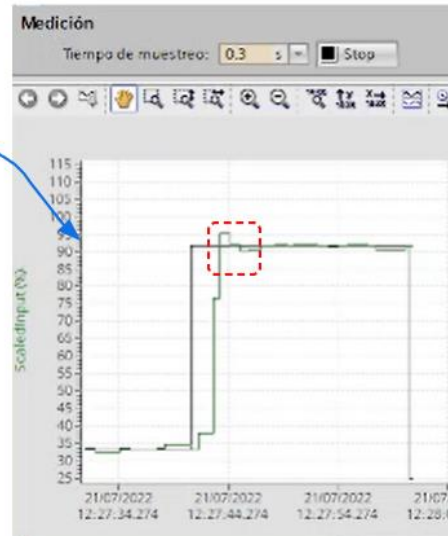
Ajuste de parámetros

55 rpm
91.6%



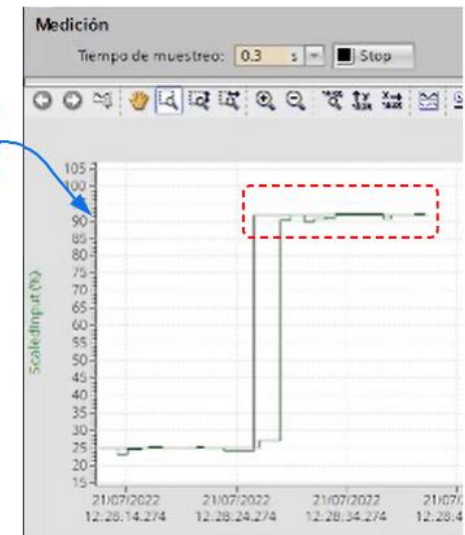
| Kp | Ti | Td |
|-----|------|------|
| 0.3 | 0.63 | 0.21 |

55 rpm
91.6%



| Kp | Ti | Td |
|------|------|------|
| 0.32 | 0.60 | 0.21 |

55 rpm
91.6%



| Kp | Ti | Td |
|-----|------|------|
| 0.3 | 0.59 | 0.21 |



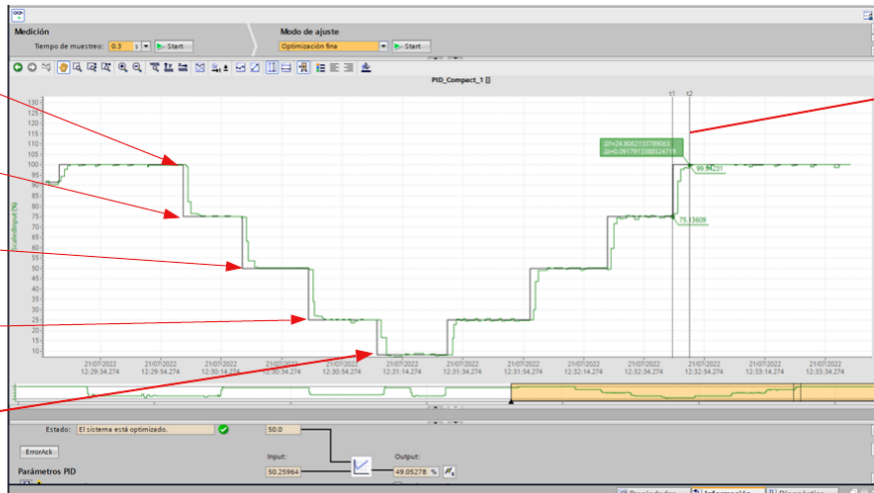
Pruebas de funcionamiento

05

Performance

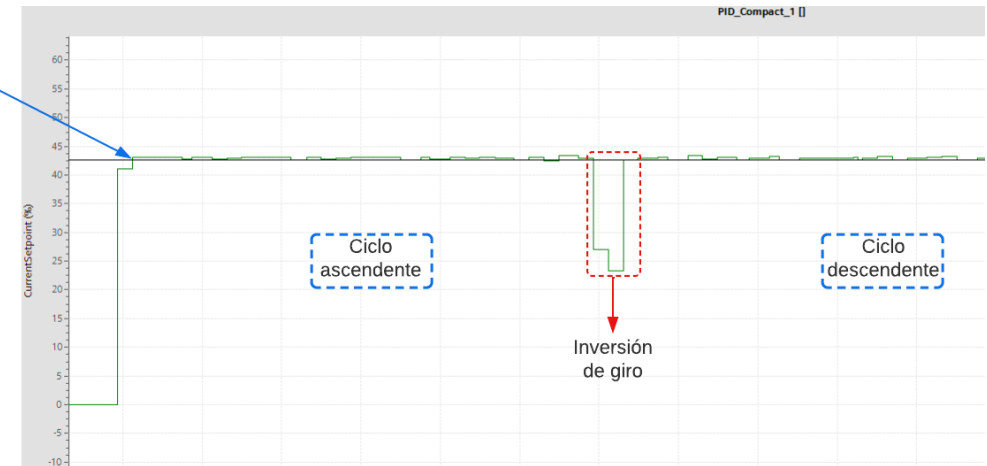
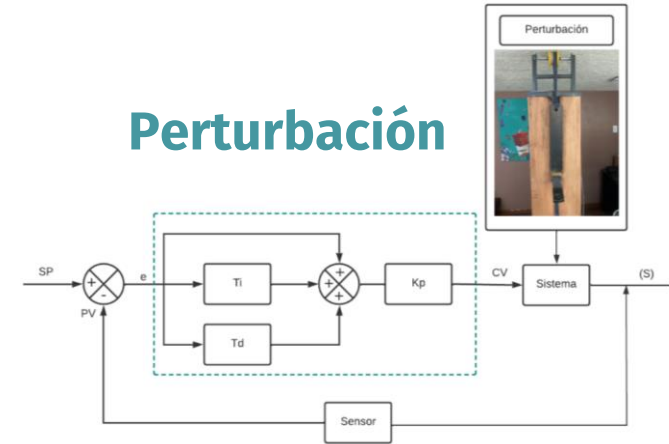
Con y sin perturbación

Sin perturbación



● Tiempo de estabilización: 0.09 min

Perturbación



● CV: 42.71 %

Pruebas de funcionamiento

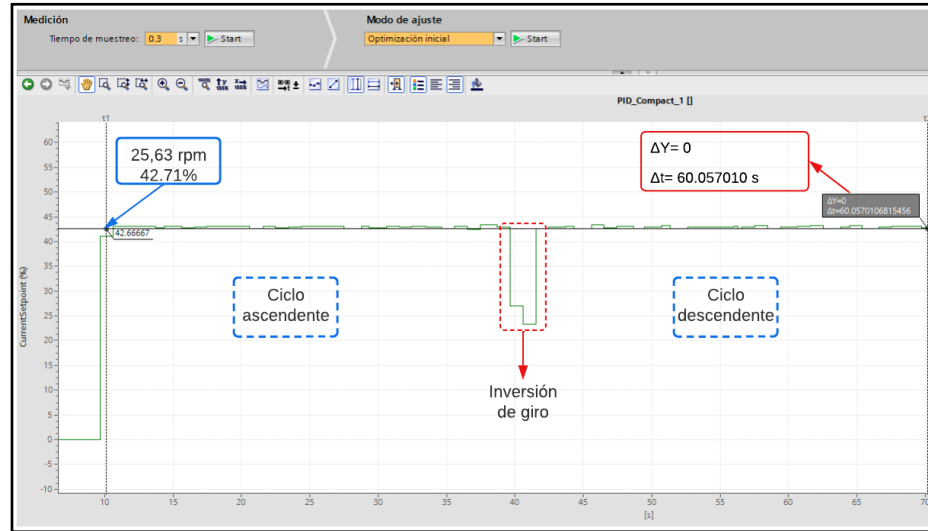
06

Ciclos de bombeo/ min

A escala completa

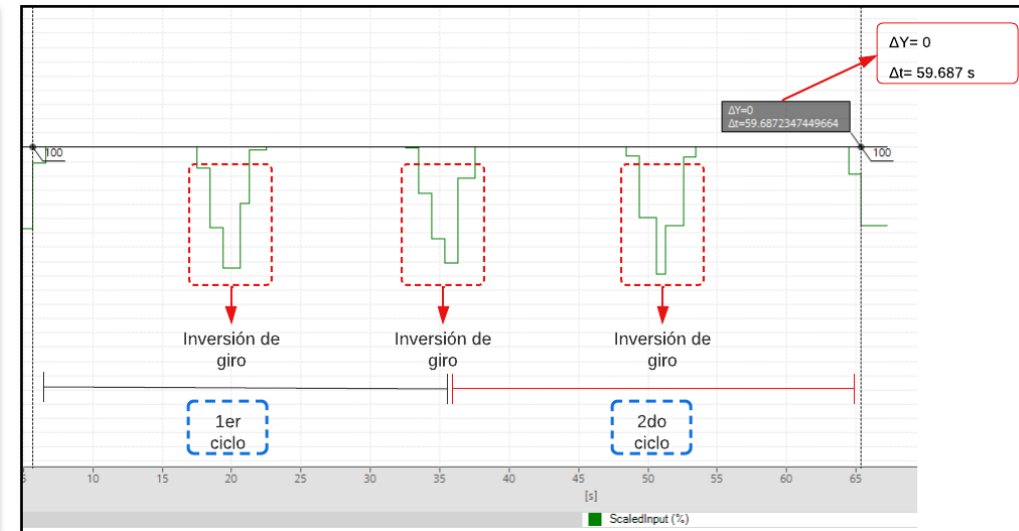


1 ciclo/min



● Δt : 60.05 s
CV: 42.71 %

2 ciclos/min



● Δt : 59.68 s
CV: 100 %

Escala completa

● Tramo vertical: 105 cm

Pruebas de funcionamiento

06

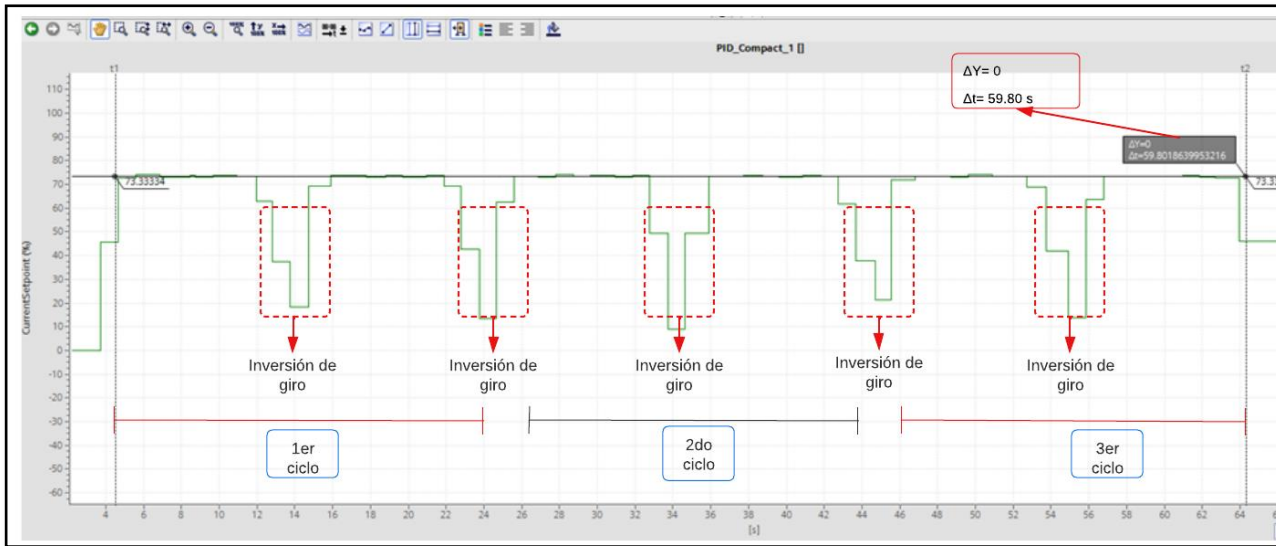
Ciclos de bombeo/ min

Media escala

Media escala

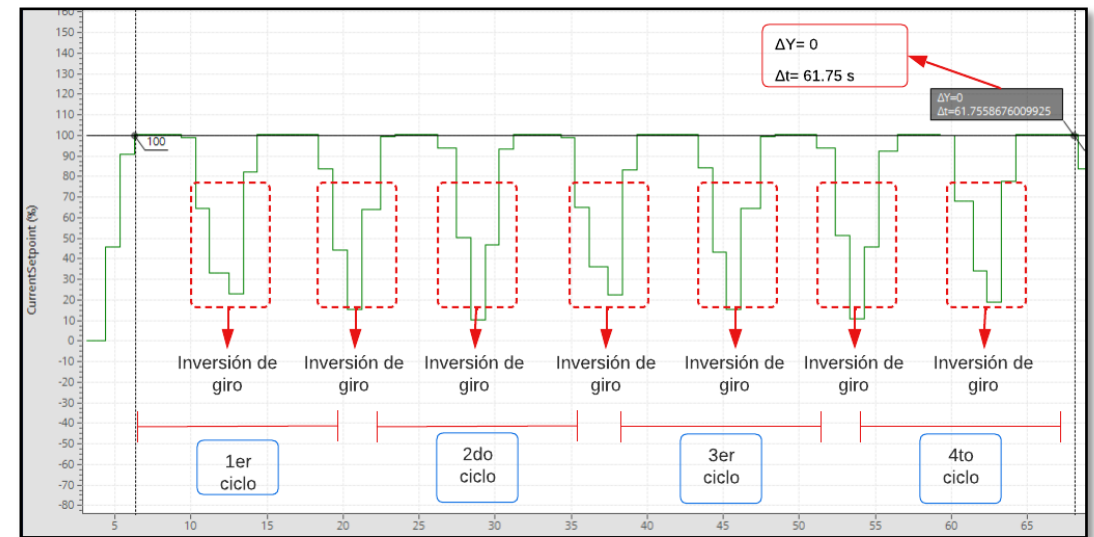
Tramo vertical: 54 cm

3 ciclos/min



● Δt: 50.8 s
CV: 73.24 %

4 ciclos/min



● Δt: 61.75 s
CV: 100 %

PRUEBAS Y RESULTADOS

Pruebas de usabilidad



08

Usuarios Técnicos

Pruebas de usabilidad a usuarios con conocimientos previos

| Preguntas Usuarios | P1 | P2 | P3 | P4 | P5 | P6 | P7 | P8 | P9 | P10 | Puntaje SUS |
|--------------------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|-----|-------------|
| U1 | 4 | 2 | 4 | 1 | 4 | 1 | 4 | 2 | 4 | 1 | 82.5 |
| U2 | 5 | 2 | 4 | 1 | 5 | 1 | 4 | 2 | 5 | 1 | 90 |
| U3 | 5 | 1 | 5 | 1 | 5 | 1 | 4 | 1 | 4 | 1 | 95 |
| U4 | 5 | 1 | 5 | 2 | 4 | 1 | 4 | 1 | 5 | 1 | 92.5 |
| U5 | 4 | 1 | 5 | 2 | 4 | 1 | 3 | 2 | 5 | 1 | 85 |
| U6 | 5 | 1 | 4 | 1 | 5 | 1 | 5 | 1 | 4 | 1 | 95 |
| Promedio: | | | | | | | | | | | 90 |

- Pregunta 3: Facilidad de usar el sistema. Promedio: 4,5/5.
- Pregunta 5: Integración de las funciones del sistema. Promedio: 4,5/5.
- Pregunta 9: Confianza que brinda el sistema al usuario. Promedio: 4,5/5.

Prueba de interfaz
Prueba de eficiencia
Prueba de satisfacción

09

Usuarios no Técnicos

Pruebas de usabilidad a usuarios sin conocimientos técnicos

| Preguntas Usuarios | P1 | P2 | P3 | P4 | P5 | P6 | P7 | P8 | P9 | P10 | Puntaje SUS |
|--------------------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|-----|-------------|
| U7 | 3 | 2 | 4 | 3 | 5 | 1 | 4 | 2 | 4 | 3 | 72.5 |
| U8 | 3 | 1 | 4 | 3 | 5 | 1 | 3 | 2 | 3 | 2 | 72.5 |
| U9 | 3 | 2 | 4 | 3 | 5 | 1 | 4 | 2 | 4 | 3 | 72.5 |
| U10 | 4 | 2 | 5 | 2 | 5 | 1 | 5 | 2 | 5 | 2 | 87.5 |
| Promedio: | | | | | | | | | | | 76.25 |

- Pregunta 3: Facilidad de usar el sistema. Promedio: 4,25/5.
- Pregunta 5: Integración de las funciones del sistema. Promedio: 5/5.
- Pregunta 9: Confianza que brinda el sistema al usuario. Promedio: 4/5.





Conclusiones

- Mediante el uso de un variador de frecuencia se pudo implementar la inversión de giro de manera suave y programada. La transición suave entre las carreras ascendentes y descendentes redujo la tensión en la sarta de varillas y mejoró la dinámica del proceso.
- Los accionamientos de velocidad variable y las mediciones de distancia proporcionadas por el sensor encoder permitieron ajustar las velocidades de los ciclos ascendente y descendente a los objetivos de bombeo. Es así que para cada ciclo de bombeo se implementaron diferentes velocidades en cada tramo del recorrido vertical dando lugar a 4 ciclos de bombeo controlados.
- Mediante la aplicación de la norma ANSI/ISA 101 y niveles de jerarquía la interfaz HMI permitió mostrar la información operativa del sistema en tiempo real, presentando información de fácil interpretación y brindando un significado y contexto al estado de funcionamiento de los diferentes elementos que conforman el sistema.



Conclusiones



- Se diseñó y construyó un tablero de control que permitió el accionamiento parcial o completo de cada uno de los elementos del sistema.
- Los valores de los parámetros $p_{1233} = 1 \text{ s}$ y p_{1232} a una corriente nominal del motor de 3.4 A, permitieron que el freno de corriente continua detenga el motor de manera instantánea en cada una de las diferentes situaciones de emergencia previamente programadas.
- Con los resultados obtenidos en las pruebas de ciclos de bombeo se puede concluir que las velocidades programadas en variador de frecuencia permitieron cumplir con los ciclos operativos ascendente y descendente del sistema, dando como resultado un máximo 4 ciclos de bombeo a media escala (52 cm) y hasta 2 ciclos de bombeo a máxima escala (105 cm).



Conclusiones

- La sintonización de parámetros del controlador mediante el método de Ziegler-Nichols permitió establecer una estrategia de control PID que logró cumplir con los requerimientos de las diferentes consignas de velocidad en cada tramo del recorrido vertical. En las pruebas de sintonización se observa que a pesar de aplicar una perturbación de 15 kg el control alcanza la consigna de velocidad y cumple con los ciclos de bombeo programados.
- Como resultado de la imprecisión absoluta se sabe que la medida de velocidad entregada por el sensor encoder es de $0.358 \pm$ el valor de la velocidad expresada en rpm con un promedio de error relativo de 1.40%.
- Como resultado de la imprecisión absoluta se sabe que la distancia entregada por el sensor encoder es de $0.78 \pm$ el valor de la distancia expresada en cm. Tomando en cuenta la relación entre el piñón del motor y el piñón del mecanismo se obtuvo un valor de 0.78 cm/ pulso con un error relativo promedio de 2.28%.



- Al finalizar las pruebas de usabilidad de usuarios técnicos se obtuvo un puntaje de 90/100, por lo que se puede concluir que el sistema es aplicable. Adicionalmente los resultados por pregunta de dicho análisis corroboran que el sistema es apto para ser usado frecuentemente, que es fácil de utilizar y que es un sistema bien integrado que inspira confianza.
- Al finalizar las pruebas de usuarios no técnicos se obtiene el puntaje SUS con un promedio de 76.25/100, por lo que se puede concluir que el sistema es aplicable. Sin embargo, si separamos estos resultados por pregunta podemos concluir que la mayoría de usuarios no técnicos precisan de un técnico para operar el mecanismo y necesitan aprender conceptos clave.





- Los pozos petrolíferos pueden estar situados en las más diversas regiones geográficas, entre montañas, zonas desérticas, etc. Es decir, en lugares remotos poco habitados. En este sentido, se puede implementar la supervisión a distancia la cual se convierte en algo primordial no sólo para vigilar y controlar la producción, sino también para reducir y optimizar los costes de mantenimiento, preventivo y correctivo.
- Ya que el freno en CC no funciona en caso de desconexión de la red una solución para detener el mecanismo sería añadir la opción de frenado dinámico o un freno de fricción electromecánico. Para eso sería necesario configurar internamente al motor para que actúe como generador en caso de desconexión y detenga al motor.



Trabajos a Futuro



- Implementar un sistema SCADA que pueda alertar al personal de mantenimiento sobre cualquier problema mediante un mensaje de texto, una llamada telefónica o un correo electrónico. El personal de mantenimiento podrá entonces responder inmediatamente al llamado. Dicho sistema también podrá ayudar en el mantenimiento preventivo, alertando al personal de cuándo debe realizar el mantenimiento de la sarta de varillas, motor o de cualquier elemento que conforme el automatismo.
- Analizar la posibilidad de implementar un motor de accionamiento por reluctancia conmutada SRD. A diferencia de los motores de inducción comunes, el SRD tiene una gran capacidad de sobrecarga y una capacidad de conmutación frecuente que lo hace ideal para adaptarse a las condiciones de funcionamiento de la zona. El tiempo de conmutación del motor puede preajustarse en función de la carga y la carrera, de modo que la inversión es más suave y soporta menos impactos mecánicos.

