



**Control sobre un prototipo de mecanismo de superficie con carrera larga para bombas de
subsuelo de producción petrolífera**

Jácome Pérez, Roger Nicolás

Departamento de Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones

Carrera de Ingeniería en Electrónica, Automatización y Control

Trabajo de titulación, previo a la obtención del título de Ingeniero en Electrónica,
Automatización y Control

Ing. Alulema Flores, Darwin Omar, PhD.

16 de agosto del 2022



Trabajo_Titulacion_JacomeRoger.pdf

Scanned on: 16:20 August 18, 2022 UTC



Overall Similarity Score



Results Found



Total Words in Text

Identical Words	328
Words with Minor Changes	168
Paraphrased Words	502
Omitted Words	0



Departamento de Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones

Carrera de Ingeniería en Electrónica, Automatización y Control

Certificación

Certifico que el trabajo de titulación: **“Control sobre un prototipo de mecanismo de superficie con carrera larga para bombas de subsuelo de producción petrolífera”** fue realizado por el señor **Jácome Pérez Roger Nicolás**; el mismo que cumple con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, además fue revisado y analizado en su totalidad por la herramienta de prevención y/o verificación de similitud de contenidos; razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que se lo sustente públicamente.

Sangolquí, 16 de agosto del 2022

Firma:



.....
Ing. Alulema Flores, Darwin Omar, PhD.

C. C. 1002493334



Departamento de Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones

Carrera de Ingeniería en Electrónica, Automatización y Control

Responsabilidad de Autoría

Yo, **Jácome Pérez Roger Nicolás**, con cédula de ciudadanía n° 1723451017, declaro que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: **“Control sobre un prototipo de mecanismo de superficie con carrera larga para bombas de subsuelo de producción petrolífera”** es de mi autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos, y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Sangolquí, 16 de agosto del 2022

Firma

Jácome Pérez Roger Nicolás

C.C.: 1723451017



Departamento de Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones

Carrera de Ingeniería en Electrónica, Automatización y Control

Autorización de Publicación

Yo **Jácome Pérez Roger Nicolás**, con cédula de ciudadanía n° 1723451017, autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación: **“Control sobre un prototipo de mecanismo de superficie con carrera larga para bombas de subsuelo de producción petrolífera”** en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi responsabilidad.

Sangolquí, 16 de agosto del 2022

Firma

Jácome Pérez Roger Nicolás

C.C.: 1723451017

Dedicatorias

Todas las personas necesitamos creer en algo para proyectarnos, para luchar y para vivir. En mi caso esa fuente de inspiración, esas ganas de salir adelante radican en el amor de mis padres.

Dedico el presente trabajo de titulación a mi padre Roger Jácome y a mi madre Corona Pérez. Gracias por creer en mí, por enseñarme a levantar ante cualquier adversidad, gracias por estar presentes en cada uno de mis logros y darme su mano desinteresadamente en cada uno de mis fracasos.

A mis hermanos Christian y Marlon a quienes admiro con todo mi corazón, gracias por cuidar de mi todo este tiempo.

GRACIAS por habérmelo dado todo en esta vida.

Roger Nicolás Jácome Pérez

Agradecimientos

Um agradecimento especial ao meu tio José Jácome, que admiro e respeito desde criança, seu conhecimento e inteligência sempre foram dignos de minha admiração.

Obrigado por criar em mim o maior sonho que tenho tido, o de ser engenheiro.

Al Ing. Francisco Gordillo gerente general de la empresa MECANOIL S.A. por darme la oportunidad de contribuir con los objetivos de la empresa.

A mi tutor Ing. Darwin Alulema, PhD. por darle acogida a la propuesta de investigación y por guiarme con su conocimiento hacia la elaboración técnica del presente trabajo.

A mi hermano Marlon Jácome quien ha sido como un padre para mí, gracias por ser esa luz que todos en esta familia necesitamos.

Índice de Contenidos

Informe de originalidad	2
Certificación	3
Responsabilidad de Autoría	4
Autorización de publicación.....	5
Dedicatorias.....	6
Agradecimientos.....	7
Índice de Contenidos	8
Índice de Tablas	16
Índice de Figuras	19
Resumen.....	25
Abstract	26
Capítulo I Marco Metodológico	27
Antecedentes.....	27
Justificación e Importancia	32
Alcance del Proyecto	35
Objetivos.....	36
Objetivo General	36
Objetivos Específicos.....	36
Estado del Arte	37
Metodología.....	37
Mapeo Sistemático de la Literatura	38

Preguntas de investigación.....	38
Establecer los criterios de búsqueda	39
Definir la cadena de búsqueda	40
Fijar los criterios de inclusión y exclusión	40
Determinar la estrategia de extracción de datos	40
Revisión sistemática de la literatura.....	45
Definir las preguntas de investigación.....	45
Establecer los criterios de búsqueda	46
Definir la cadena de búsqueda	46
Fijar los criterios de inclusión y exclusión	47
Determinar la estrategia de extracción de datos	47
Capítulo 2 Marco Conceptual	51
Introducción.....	51
Producción petrolera	51
Elevación Natural	51
Elevación Artificial.....	51
Bombeo Mecánico	52
Automatización Industrial.....	54
Pirámide CIM	55
Nivel de proceso	56
Hardware	56
Motores de Inducción.	56
Variador de Frecuencia.....	56
Sensores.	57

	10
Nivel de campo	59
Sistemas de control.....	59
Controladores Lógicos Programables	59
Técnicas de control	60
Sistemas de control en lazo abierto	60
Sistemas de control en lazo cerrado.....	60
Estrategias convencionales de control	61
Controlador Proporcional Integrador Derivativo (PID).....	62
Estándares de diseño y comunicación	63
Protocolos de Comunicación en Redes Industriales.....	63
Guía GEMMA.....	64
Estructura base.....	65
Estados de modos de marcha y de paro.....	65
Nivel de célula.....	66
Normativa para el diseño de interfaces HMI (ISA 101)	66
Gestión del sistema HMI.....	67
Ingeniería de factores humanos y ergonomía	68
Jerarquía de visualización.....	68
Interacción con el usuario	72
Rendimiento.....	72
Entrenamiento.....	73
Criterios de High Performance para interfaces hombre-máquina.....	73
Capítulo 3 Ingeniería Básica	74
Introducción.....	74

Descripción general del funcionamiento	74
Requisitos de diseño para el control del prototipo	75
Requisitos del tablero de control	75
Requisitos del sistema de control	76
Requisitos del sistema de supervisión.....	76
Requisitos del sistema de comunicaciones.	77
Requisitos del sistema de instrumentación.....	77
Sistemas y estructuras	77
Tablero de control.....	77
Sistema de control	78
A. Procedimientos de parada.	79
F. Procedimientos de funcionamiento.....	81
D. Proceso en defecto.	83
Estructura general de funciones.	85
Sistema de instrumentación.....	90
Sistema de supervisión.....	91
Sistema de comunicaciones	94
Capítulo 4 Ingeniería de Detalle.....	96
Introducción.....	96
Selección de equipos	97
Tablero de control.....	97
Sistema de control	100
Sistema de comunicación.....	103
Sistema de instrumentación.....	106

	12
Sistema de supervisión.....	109
Listado final de elementos	112
Características de hardware	112
Controlador lógico programable SIEMENS S7-1200 1214 AC/DC/RLY.....	112
Motor	113
Variador de frecuencia SINAMICS G120X 6SL3220-1YC10-0UB0	115
Switch Ethernet TL-SG1005D	116
Elementos de señalización	117
Dimensionamiento de protecciones y conductores para el sistema.....	118
Selección del circuito de protección para señalización	118
Selección del circuito de protección para el PLC Siemens S7-1200	119
Cálculo de corrientes etapa de potencia	119
Cálculo de conductores	121
Tablero de control	121
Implementación	122
Circuito de fuerza.	122
Diagrama de control.....	122
Puesta en marcha.....	123
Consideraciones de puesta en marcha	123
Sistema de control	127
Implementación de la lógica de funcionamiento	128
Guía GEMMA.....	128
GRAFSET.....	129
Puesta en marcha de la lógica de funcionamiento.....	130

G0: GRAFCET de seguridad.....	130
G1: GRAFCET de modos de marcha.....	131
G2: GRAFCET de Paro de estado determinado.....	133
G3: GRAFCET de paro fin de ciclo.....	133
G4: GRAFCET de producción.....	134
Bloques de organización.....	135
Bloques de función.....	136
Funciones.....	137
Implementación de la estrategia de control.....	138
Puesta en marcha de la estrategia de control.....	141
Sistema de instrumentación.....	145
Implementación del sistema de instrumentación.....	145
Encoder.....	145
Velocidad.....	147
Distancia.....	148
Sensor fin de carrera.....	149
Puesta en marcha del sistema de instrumentación.....	151
Programación del encoder.....	151
Bloque de función Calc_Speed.....	153
Bloque de función Calc_Distancia.....	155
Sistema de supervisión.....	156
Implementación del sistema de supervisión.....	156
Puesta en marcha del sistema de supervisión.....	159
Inicio de Sesión.....	159

Proceso General.	160
Modo Automático.	162
Modo Manual.	163
Gráfica de control.	165
Sistema de comunicación	166
Implementación del sistema de comunicaciones.....	166
Puesta en marcha del sistema de comunicaciones	168
Configuración del telegrama.	168
Configuración <i>Profinet</i> del PLC.	171
Configuración <i>Profinet</i> del variador.	171
Configuración del freno de corriente continua.....	173
Configuración comunicación PG/PC.	174
Capítulo 5 Pruebas y Resultados	179
Introducción.....	179
Pruebas de funcionamiento.....	179
Mediciones sensor encoder	179
Velocidad.....	179
Distancia.....	181
Estrategia de control	182
Ciclos de bombeo por minuto	190
1 ciclo de bombeo por minuto (escala completa).	191
2 ciclos de bombeo por minuto (escala completa).	193
3 ciclos de bombeo por minuto (media escala).	194
4 ciclos de bombeo por minuto (media escala).	196

Pruebas de usabilidad.....	197
Personas técnicas	198
Personas no técnicas	199
Capítulo 6 Conclusiones y Recomendaciones	200
Conclusiones.....	200
Recomendaciones.....	202
Trabajos futuros.....	204
Acrónimos.....	205
Referencias	206
Apéndices	213

Índice de Tablas

Tabla 1. Preguntas para desarrollo SMS.	38
Tabla 2. Cadena de información de búsqueda para Web of Science.	39
Tabla 3. Resultados de búsqueda con los criterios de inclusión.	41
Tabla 4. Resultados finales con criterios de inclusión y exclusión.	41
Tabla 5. Preguntas para el desarrollo de SLR.	46
Tabla 6 Cadena de información de búsqueda para Web of Science e IEEE Xplore.	46
Tabla 7. Resultados de búsqueda con los criterios de inclusión.	48
Tabla 8. Resultados finales con criterios de inclusión y exclusión.	48
Tabla 9. Sensores de posición y velocidad.	58
Tabla 10. Descripción de los estados del módulo “A. procedimiento de parada”.	80
Tabla 11. Descripción de los estados del módulo “F. Proceso de funcionamiento”.	82
Tabla 12. Descripción de los estados del módulo “D. Proceso en defecto”.	84
Tabla 13. Requerimientos de las ventanas del sistema de supervisión.	93
Tabla 14. Evaluación de criterios para la selección del gabinete de control.	97
Tabla 15. Evaluación de las alternativas con respecto al criterio de costo accesible.	98
Tabla 16. Evaluación de las alternativas con respecto al criterio de estándares y normas.	98
Tabla 17. Evaluación de las alternativas respecto al criterio de dimensiones.	99
Tabla 18. Conclusión sobre la elección del tablero de control.	99
Tabla 19. Evaluación de criterios para la selección del sistema de control.	100
Tabla 20. Evaluación de las alternativas respecto al criterio de características de hardware y software.	101
Tabla 21. Evaluación de las alternativas con respecto al criterio de estrategia de control.	101
Tabla 22. Evaluación de las alternativas respecto al criterio de costo accesible.	102

Tabla 23. <i>Evaluación de las alternativas respecto al criterio de flexibilidad.</i>	102
Tabla 24. <i>Conclusión sobre la elección del sistema de control.</i>	103
Tabla 25. <i>Evaluación de criterios para la selección del sistema de comunicaciones.</i>	104
Tabla 26. <i>Evaluación de las alternativas con respecto al criterio de características de hardware.</i>	104
Tabla 27. <i>Evaluación de las alternativas con respecto al criterio de costo accesible.</i>	105
Tabla 28. <i>Evaluación de las alternativas respecto al criterio de disponibilidad.</i>	105
Tabla 29. <i>Conclusión sobre la elección del sistema de comunicación.</i>	106
Tabla 30. <i>Evaluación de criterios para la selección del sistema de instrumentación.</i>	107
Tabla 31. <i>Evaluación de las alternativas con respecto al criterio de costo accesible.</i>	108
Tabla 32. <i>Evaluación de las alternativas con respecto al criterio de disponibilidad</i>	108
Tabla 33. <i>Evaluación de las alternativas respecto al criterio de robustez.</i>	109
Tabla 34. <i>Conclusión sobre la elección del sistema de instrumentación.</i>	109
Tabla 35. <i>Evaluación de criterios para la selección del gabinete de control.</i>	110
Tabla 36. <i>Evaluación de las alternativas con respecto al criterio de herramientas de diseño.</i>	110
Tabla 37. <i>Evaluación de las alternativas con respecto al criterio de comunicación.</i>	111
Tabla 38. <i>Conclusión sobre el sistema de supervisión.</i>	111
Tabla 39. <i>Características técnicas PLC S7-1200.</i>	113
Tabla 40. <i>Características técnicas motor de inducción trifásico 1 HP 1LE0141-0DB36-4AA4-Z.</i>	114
Tabla 41. <i>Características técnicas variador SINAMICS G120X 6SL3220-1YC10-0UB0.</i>	115
Tabla 42. <i>Características técnicas Switch Ethernet TI-SG1005D.</i>	116
Tabla 43. <i>Características técnicas de luces piloto XA2EVF5LC, XA2EVF4LC, XA2EVF3LC.</i>	117
Tabla 44. <i>Elementos de protección eléctrica finales del automatismo.</i>	120
Tabla 45. <i>Características técnicas del conductor.</i>	121
Tabla 46. <i>Medidas del armario eléctrico.</i>	125

Tabla 47. <i>Parámetros del método de Ziegler- Nichols.</i>	141
Tabla 48. <i>Características técnicas sensor inductivo.</i>	146
Tabla 49. <i>Parámetros de configuración HSC1 para medición de duración de periodo.</i>	152
Tabla 50. <i>Matriz de aplicación de la norma ISA 101.</i>	157
Tabla 51. <i>Descripción de funcionamiento ventana “Inicio de Sesión”.</i>	159
Tabla 52. <i>Descripción de funcionamiento ventana “Proceso General”.</i>	161
Tabla 53. <i>Descripción de funcionamiento ventana “Modo Automático”.</i>	162
Tabla 54. <i>Descripción de funcionamiento ventana “Modo Manual”.</i>	164
Tabla 55. <i>Descripción de funcionamiento ventana “Gráfica del Proceso”.</i>	166
Tabla 56. <i>Telegrama 350.</i>	168
Tabla 57. <i>Combinaciones de palabras de mando STW1 y STW3.</i>	170
Tabla 58 <i>Parámetros del motor para la primera puesta en marcha.</i>	172
Tabla 59. <i>Parámetros del frenado por corriente continua mediante orden de mando.</i>	173
Tabla 60. <i>Análisis de datos de medidas de velocidad</i>	180
Tabla 61. <i>Análisis de datos de medidas de distancia.</i>	181
Tabla 62. <i>Parámetros resultantes con el método de Ziegler-Nichols.</i>	184
Tabla 63. <i>Mayor ganancia proporcional y menor tiempo de integración.</i>	185
Tabla 64. <i>Mayor ganancia proporcional y menor tiempo de integración.</i>	186
Tabla 65. <i>Tiempos y velocidades por ciclo de bombeo</i>	197
Tabla 66. <i>Resultados de pruebas de usabilidad personas técnicas.</i>	198
Tabla 67. <i>Resultados de pruebas de usabilidad personas no técnicas.</i>	199

Índice de Figuras

Figura 1. <i>Mecanismo de bombeo mecánico de balancín y varillas (Sucker rod pumping).</i>	28
Figura 2. <i>Mecanismo de elevación por gas (Gas lift).</i>	29
Figura 3. <i>Mecanismo de bombeo hidráulico de pistón.</i>	30
Figura 4. <i>Unidad de bombeo DynaPump.</i>	31
Figura 5. <i>Mecanismo de superficie de carrera larga (Rotaflex).</i>	32
Figura 6. <i>Estructura mecánica de funcionamiento Rotaflex.</i>	33
Figura 7. <i>Movimiento del carro inversor y contrapeso en un ciclo de bombeo.</i>	34
Figura 8. <i>Proceso secuencial para desarrollar un SMS.</i>	38
Figura 9. <i>Red generada con la concurrencia de palabras claves.</i>	42
Figura 10. <i>Palabras con mayor concurrencia de la red de palabras claves</i>	42
Figura 11. <i>Red de concurrencia a través del tiempo.</i>	43
Figura 12. <i>Red generada en base a la concurrencia de países de las muestras bibliográficas.</i>	44
Figura 13. <i>Países con mayor aporte</i>	44
Figura 14. <i>Proceso a seguir para el SLR.</i>	45
Figura 15. <i>Red generada con la concurrencia de palabras claves a lo largo del tiempo.</i>	49
Figura 16. <i>Palabras con mayor concurrencia de la red de palabras claves</i>	49
Figura 17. <i>Red de concurrencia a través del tiempo.</i>	50
Figura 18. <i>Sistema de bombeo mecánico.</i>	53
Figura 19. <i>Partes y funcionamiento de una bomba de fondo en un ciclo.</i>	54
Figura 20. <i>Pirámide CIM.</i>	55
Figura 21. <i>Esquema del principio de funcionamiento de un variador de frecuencia.</i>	57
Figura 22. <i>Representación de un sistema de control en lazo abierto.</i>	60
Figura 23. <i>Representación de un sistema de control en lazo cerrado.</i>	61

	20
Figura 24. <i>Comportamiento de los distintos tipos de control.</i>	62
Figura 25. <i>Guía GEMMA completa.</i>	64
Figura 26. <i>Zonas principales de la guía GEMMA.</i>	65
Figura 27. <i>Estados de modos de marcha y paro.</i>	66
Figura 28. <i>Ciclo de vida de una HMI.</i>	67
Figura 29. <i>Ejemplo de pantalla de nivel 1.</i>	69
Figura 30. <i>Ejemplo de pantalla nivel 2.</i>	70
Figura 31. <i>Ejemplo de pantalla nivel 3.</i>	71
Figura 32. <i>Ejemplo de pantalla nivel 4.</i>	72
Figura 33. <i>Módulos generales del automatismo.</i>	75
Figura 34. <i>Estructura general del tablero de control.</i>	78
Figura 35. <i>Estructura general del sistema de control</i>	78
Figura 36. <i>Procedimientos de parada.</i>	79
Figura 37. <i>Proceso en funcionamiento</i>	81
Figura 38. <i>Proceso en defecto</i>	83
Figura 39. <i>Guía GEMMA.</i>	85
Figura 40. <i>Subrutina de marcha de preparación.</i>	86
Figura 41. <i>Diagrama del módulo de proceso en funcionamiento.</i>	87
Figura 42. <i>Diagrama del estado F1 de producción normal.</i>	88
Figura 43. <i>Diagrama del estado F4 de marchas de verificación sin orden</i>	89
Figura 44. <i>Diagrama del estado D1 de parada de emergencia.</i>	90
Figura 45. <i>Estructura general del sistema de instrumentación</i>	91
Figura 46. <i>Estructura general del sistema de supervisión.</i>	92
Figura 47. <i>Esquema de navegación entre pantallas.</i>	92

Figura 48. <i>Diseño genérico de las ventanas de supervisión.</i>	94
Figura 49. <i>Estructura general del sistema de comunicaciones.</i>	95
Figura 50. <i>Módulos del sistema a detalle.</i>	96
Figura 51. <i>PLC Siemens 6ES7 212-1BE40-0XB0 S7-1200 1214 AC/DC/RLY.</i>	112
Figura 52. <i>Motor de inducción trifásico 1 HP 1LE0141-0DB36-4AA4-Z.</i>	114
Figura 53. <i>Variador SINAMICS G120X 6SL3220-1YC10-0UB0.</i>	115
Figura 54. <i>Switch Ethernet TL-SG1005D.</i>	116
Figura 55. <i>Luces piloto XA2EVF5LC, XA2EVF4LC, XA2EVF3LC Schneider Electric.</i>	117
Figura 56. <i>Plano de fuerza.</i>	122
Figura 57. <i>Diagrama de control.</i>	123
Figura 58. <i>Zonas CEM en un armario de control.</i>	124
Figura 59. <i>Ubicación de elementos según las características CEM.</i>	125
Figura 60. <i>Diseño final del tablero de control.</i>	126
Figura 61. <i>Implementación y puesta en marcha del tablero de control.</i>	127
Figura 62. <i>Guía GEMMA.</i>	128
Figura 63. <i>Jerarquía de GRAFCET estructurado.</i>	129
Figura 64. <i>GRAFCET de seguridad G0.</i>	131
Figura 65. <i>GRAFCET de Modos de Marcha G1.</i>	132
Figura 66. <i>GRAFCET de paro de estado determinado G2.</i>	133
Figura 67. <i>GRAFCET de paro fin de ciclo G3.</i>	134
Figura 68. <i>GRAFCET de producción G4.</i>	135
Figura 69. <i>Bloques de organización.</i>	135
Figura 70 <i>Bloques de función.</i>	136
Figura 71. <i>Funciones</i>	137

Figura 72. <i>Diagrama del sistema de control.</i>	138
Figura 73. <i>Controlador PID Mixto.</i>	139
Figura 74. <i>Algoritmo PID.</i>	139
Figura 75. <i>Comportamiento de oscilaciones en respuesta a la variación de K_p.</i>	140
Figura 76. <i>Bloque PID_Compact.</i>	141
Figura 77. <i>Ajustes de tipo de regulación.</i>	142
Figura 78. <i>Bloque “Conversión_Variables_DB”.</i>	142
Figura 79. <i>Contenido de la función “Conversión_Variables”.</i>	143
Figura 80. <i>Parámetros de Entrada/Salida bloque “PID_Compact”</i>	144
Figura 81. <i>Límites del valor de salida.</i>	144
Figura 82. <i>Diseño de encoder incremental en 3D.</i>	146
Figura 83. <i>Dimensiones de encoder.</i>	147
Figura 84. <i>Diámetro del encoder expresado en mm.</i>	148
Figura 85. <i>Resolución de distancia.</i>	149
Figura 86. <i>Tramo vertical del prototipo.</i>	150
Figura 87. <i>Ubicación de los elementos del sistema de instrumentación.</i>	151
Figura 88. <i>Bloques de función del sistema de instrumentación.</i>	152
Figura 89. <i>Bloque de función CTRL_HSC_EXT.</i>	153
Figura 90. <i>Bloque de función CalcSpeed.</i>	154
Figura 91. <i>Programación del bloque “CalcSpeed”.</i>	154
Figura 92. <i>Bloque de función Calc_Distancia.</i>	155
Figura 93. <i>Programación el bloque “Calc_Distancia_DB”</i>	156
Figura 94. <i>Ventana de “Inicio de Sesión”.</i>	159
Figura 95. <i>Ventana de “Proceso General”</i>	160

Figura 96. Ventana de “Modo Automático”.....	162
Figura 97. Ventana de Modo Manual.....	164
Figura 98. Ventana de Gráfico de Control.....	165
Figura 99. Estructura de un telegrama.....	167
Figura 100. Selección de telegrama.....	169
Figura 101. Direcciones telegrama 350.....	169
Figura 102. Transferencia de valores hexadecimales.....	170
Figura 103. Selección de la CPU del PLC y configuración de la interfaz PROFINET.....	171
Figura 104. Selección de la CPU del variador y configuración de la interfaz PROFINET.....	172
Figura 105. Frenado por corriente continua mediante orden de mando.....	173
Figura 106. Selección del sistema PC para interfaz gráfica y configuración de red.....	175
Figura 107. Configuración interfaz PG/PC.....	175
Figura 108. Arquitectura de comunicaciones.....	176
Figura 109. Sistema de instrumentación y prototipo.....	177
Figura 110. Tablero de control, sistema de control y sistema de comunicaciones.....	177
Figura 111. Sistema de supervisión.....	178
Figura 112. Planta para el uso del método de Ziegler-Nichols.....	182
Figura 113. Salida oscilante del sistema con $K_u=3$	183
Figura 114. Salida oscilante del sistema con valor $K_u=1$	184
Figura 115. Señal de la salida del controlador a una velocidad de 55 y 20 rpm.....	185
Figura 116. Sobreimpulso en la señal de control.....	186
Figura 117. Señal estable.....	187
Figura 118. Oscilaciones producidas por la resolución del encoder.....	187
Figura 119. Estrategia de control resultante.....	188

Figura 120. <i>Diagrama final de control.</i>	189
Figura 121. <i>Comportamiento de la planta a 25.63 rpm en un ciclo de bombeo.</i>	189
Figura 122. <i>Comportamiento de la planta a 60 rpm en un ciclo de bombeo.</i>	190
Figura 123. <i>Tramos de pruebas para ciclos de bombeo.</i>	191
Figura 124. <i>Valores de velocidad para 1 ciclo de bombeo.</i>	192
Figura 125. <i>Estrategia de control en un ciclo de bombeo.</i>	192
Figura 126. <i>Valores de velocidad para 2 ciclos de bombeo.</i>	193
Figura 127. <i>Estrategia de control y tiempo por 2 ciclos por minuto a escala completa.</i>	194
Figura 128. <i>Valores de velocidad para 3 ciclos de bombeo.</i>	195
Figura 129. <i>Estrategia de control y tiempo por 3 ciclos por minuto a media escala.</i>	195
Figura 130. <i>Valores de velocidad para 4 ciclos de bombeo.</i>	196
Figura 131. <i>Estrategia de control y tiempo por 4 ciclos por minuto a media escala.</i>	196

Resumen

A nivel mundial, las reservas de petróleo pesado han cobrado importancia como futura fuente de energía. Sin embargo, para obtener fluidos de hidrocarburos es necesario perforar a través de las capas geológicas de la tierra hasta dar con el yacimiento petrolífero. Cuando la presión del yacimiento disminuye la única manera de obtener una tasa alta de producción es utilizando sistemas de levantamiento artificial. En ese sentido la empresa MECANOIL S.A. que opera en el ámbito de la extracción de petróleo plantea la automatización de un prototipo de mecanismo de superficie. Para lo cual, la información de los posibles estados de funcionamiento del automatismo se estructura en base a los 3 primeros niveles de la pirámide CIM, dando lugar a 5 diferentes subsistemas que contienen las características tecnológicas de acuerdo con el tráfico y tipo de información que manejan. El tablero de control conformado por el PLC Siemens S7-1200 y el variador de frecuencia SINAMICS G120X, es el encargado del accionamiento parcial o completo del automatismo. Para esto la comunicación entre elementos se desarrolla en el perfil *PROFIdrive* del protocolo de comunicación *Profinet* mediante el telegrama 350. La interfaz gráfica del sistema se implementa en 5 niveles jerárquicos diseñados a partir de la norma ISA 101 permitiendo mostrar la información operativa del sistema y brindando un significado y contexto al estado de funcionamiento de los elementos que conforman el sistema. Ya en el funcionamiento del prototipo, la transición suave entre las carreras ascendentes y descendentes mejora la dinámica del proceso, mientras que las velocidades programadas en variador de frecuencia permiten obtener hasta un máximo de 4 ciclos de bombeo a media escala (52 cm) y hasta 2 ciclos de bombeo a máxima escala (105 cm). Para esto la sintonización de parámetros del controlador utiliza el método de Ziegler-Nichols que permite implementar una estrategia de control PID robusta para cumplir con los ciclos de bombeo programados. Finalmente, el sistema es evaluado mediante un conjunto de pruebas de funcionalidad y pruebas de usabilidad aplicadas a un grupo específico de personas.

Palabras clave: mecanismos de superficie, levantamiento artificial, control de velocidad.

Abstract

Globally, heavy oil reserves have gained importance as a future energy source. However, to obtain hydrocarbon fluids it is necessary to drill through the geological layers of the earth until the oil reservoir is encountered. When the reservoir pressure decreases, the only way to obtain a high production rate is to use artificial lift systems. In this sense, the company MECANOIL S.A., which operates in the field of oil extraction, proposes the automation of a prototype of a surface mechanism. For which, the information of the possible operating states of the automatism is structured on the basis of the first 3 levels of the CIM pyramid, giving rise to 5 different subsystems that contain the technological characteristics according to the traffic and the type of information they handle. The control panel, formed by the Siemens S7-1200 PLC and the SINAMICS G120X frequency inverter, is in charge of the partial or complete drive of the automation system. For this, the communication between elements is developed in the PROFIdrive profile of the Profinet communication protocol by means of telegram 350. The graphical interface of the system is implemented in 5 hierarchical levels designed from the ISA 101 standard, allowing to show the operational information of the system and providing a meaning and context to the operating status of the different elements that make up the system. Already in the prototype operation, the smooth transition between up and down strokes improves the process dynamics, while the speeds programmed in frequency variator allow to obtain up to a maximum of 4 pumping cycles at medium scale (52 cm) and up to 2 pumping cycles at full scale (105 cm). For this, the tuning of the controller parameters uses the Ziegler-Nichols method that allows implementing a robust PID control strategy to meet the programmed pumping cycles. Finally, the system is evaluated through a set of functionality tests and usability tests applied to a specific group of people.

Keywords: surface mechanisms, artificial lift, speed control.

Capítulo I

Marco Metodológico

Antecedentes

A nivel mundial, las reservas de petróleo pesado, han cobrado importancia como futura fuente de energía. Sin embargo, para obtener fluidos de hidrocarburos, es necesario perforar a través de las capas geológicas de la tierra hasta dar con el yacimiento petrolífero. Por consiguiente, en la superficie suele ser necesario un sistema de levantamiento artificial. El cual, está destinado a transportar el fluido de producción, desde el fondo del pozo hasta un cabezal situado en la superficie (Clark & Benson, 2016).

Cuando la presión del yacimiento disminuye, no se puede producir dicho fluido a flujo natural, a menos que se utilicen mecanismos naturales de empuje para mantener la energía del yacimiento. Como, por ejemplo, el acuífero, el casquete de gas o los mecanismos de mantenimiento de la presión, tales como, la inundación de agua o la inyección de gas. Entonces, cuando los reservorios no disponen de la suficiente presión de fondo, la única manera de obtener una alta tasa de producción, es utilizando sistemas de levantamiento artificial (Boyun, Lyons, & Ghalambor, 2017).

Por otra parte, se sabe que aproximadamente el 50% de los pozos de todo el mundo necesita sistemas de levantamiento artificial (Clark & Benson, 2016). No obstante, es importante analizar, qué técnica de elevación artificial se va a utilizar para estudiar la rentabilidad a largo plazo del campo petrolífero. Una inadecuada selección de la técnica de elevación puede reducir la producción y aumentar considerablemente los costes de explotación.

Los métodos de levantamiento artificial más utilizados a nivel mundial en los pozos de extracción petrolífera, son los siguientes:

- Bombeo mecánico de balancín y varillas (*Sucker rod pumping*): proporciona energía mecánica para elevar el petróleo desde el fondo del pozo hasta la superficie. Es eficaz,

sencillo y fácil de manejar para el personal de campo. El mismo puede bombear un pozo hasta una presión de reservorio muy baja para maximizar la tasa de producción de petróleo. Las principales desventajas del bombeo por varillas, son: la excesiva fricción con la tubería de producción, los problemas de fricción con sólidos, la baja eficacia en pozos con gas, la profundidad limitada ligada a la capacidad de las varillas y el volumen en operaciones en alta mar (Moore, 1981), ver Figura1.

Figura 1.

Mecanismo de bombeo mecánico de balancín y varillas (Sucker rod pumping).

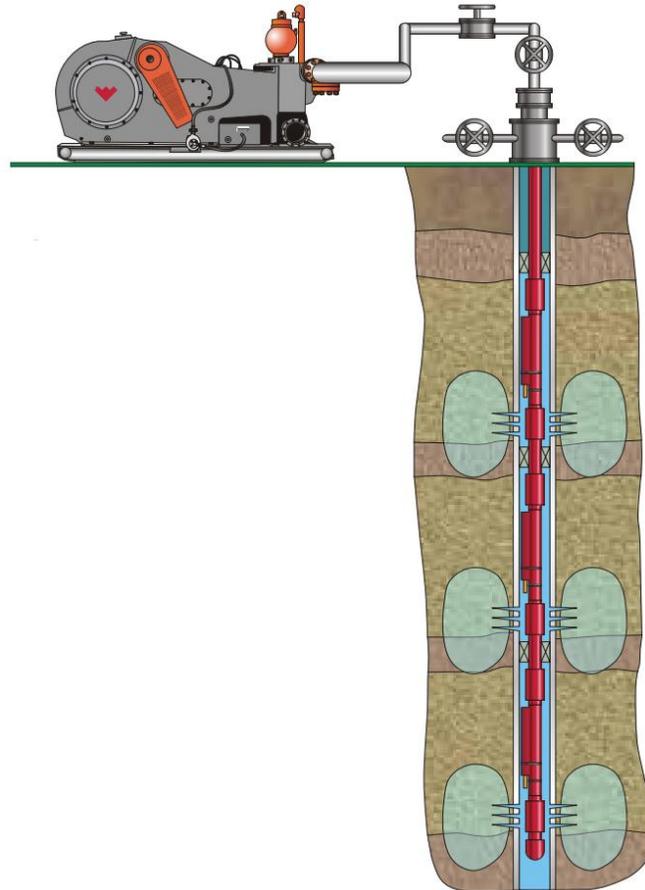


Nota. Figura tomada de (ANALITIK, 2018).

- Elevación por gas (*Gas lift*): la tecnología de elevación por gas, aumenta la tasa de producción de petróleo mediante la inyección de gas comprimido en la sección inferior de la tubería. En consecuencia, no suele ser eficiente en la elevación de campos pequeños con un número reducido de pozos. Los avances en el levantamiento de gas, en el control de la presión y en los sistemas de automatización han permitido la optimización de los pozos individuales y de los sistemas de elevación por gas (Guo, Lyons, & Ghalambor, Gas Lift, 2007), ver Figura2.

Figura 2.

Mecanismo de elevación por gas (Gas lift).



Nota. Figura tomada de (Weatherford, Gas-Lift Equipment Catalog, 2014).

- Bombeo hidráulico de pistón (*Hydraulic Piston Pumping*): los sistemas de bombeo de pistón hidráulico (Figura 3), pueden elevar grandes volúmenes de líquido desde grandes profundidades, mediante el bombeo de pozos a presiones bastante bajas; tanto el gas natural como la electricidad pueden utilizarse como fuente de energía, pero sus principales desventajas son los problemas de tratamiento del agua, de alimentación y la producción de altos sólidos (Guo, Lyons, & Ghalambor, *Other Artificial Lift Methods*, 2007).

Figura 3.

Mecanismo de bombeo hidráulico de pistón.



Nota. Figura tomada de (Weatherford, 2016).

- Unidad *DynaPump*: la unidad de bombeo de varilla de succión controlada por ordenador, fue inventada por A. Rosman a finales de la década de 1980. Desde su introducción comercial en el campo petrolífero en 2001, la tecnología ha experimentado varias mejoras que han conducido a los modelos actuales. Al igual que las unidades de carrera larga Rotaflex, los equipos DynaPump también pueden competir con las instalaciones tradicionales ofreciendo una mayor eficiencia del sistema y menores costes de producción. A diferencia de las unidades Rotaflex, las unidades DynaPump (Figura 4) permiten al operador seleccionar la variación de la mayoría de los parámetros cinemáticos durante el ciclo de bombeo; que pueden introducirse en el controlador de la unidad (Takács, 2015).

Figura 4.

Unidad de bombeo DynaPump.



Nota. Figura tomada de (Romero Chávez, 2015).

- Bombeo de carrera larga (*Long Stroke Pumping*): a medida que los pozos son más profundos, se requieren de equipos de bombeo de superficie de carrera más larga para operar la sarta de varillas. El uso de estas carreras más largas conlleva a menores ciclos por minuto, permite esfuerzos mucho más altos de las varillas para mantener la eficiencia requerida y prolongar la vida útil del equipo (Jones, 1951).

La búsqueda de evidencias dicta, que a finales de los años 80 se logró desarrollar una unidad de bombeo de carrera larga completamente mecánica (Figura 5). Dicha unidad de bombeo fue la versión patentada en 1990 por Lively. La cual, tuvo gran aceptación en el campo petrolífero y su nombre comercial es, Rotaflex. Las unidades de bombeo de carrera

larga son completamente diferentes a los mecanismos de bombeo de balancín tradicionales y suelen tener longitudes de carrera superiores a los 7 m (Takacs, Choose between Long-Stroke Sucker Rod Pumping Systems, 2015).

Figura 5.

Mecanismo de superficie de carrera larga (Rotaflex).



Nota. Figura tomada de (Weatherford, Rotaflex® Long-Stroke Pumping Unit, 2020).

Justificación e Importancia

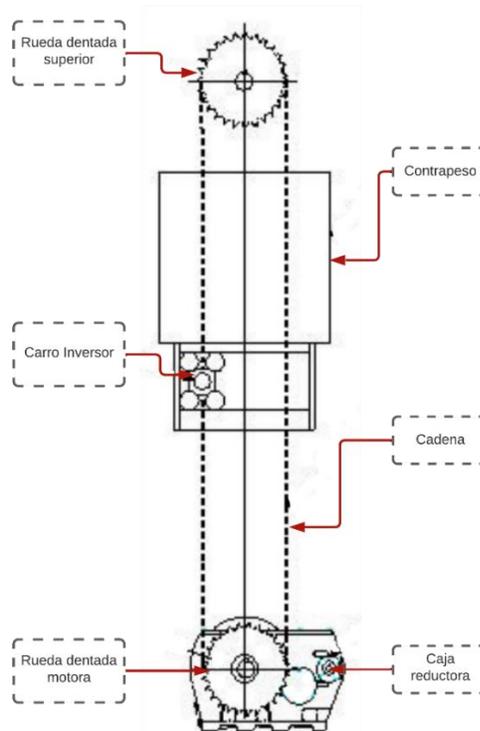
Si combinamos grandes profundidades y la necesidad de altos caudales, da lugar a que los mecanismos de superficie Rotaflex y la sarta de varillas sean llevados a valores límites. De tal manera, que resulta imposible incrementar el régimen de extracción, ya que se generan fallas durante los cambios de carrera e inversiones de giro mecánico. En dichas etapas de funcionamiento antes mencionadas es donde se producen los mayores esfuerzos sobre las instalaciones de producción. Ingenieros de Weatherford en

el Área Entre Lomas, aseguran que, si se logra disminuir la velocidad en estos puntos y a la vez mantener un régimen de bombeo controlado, se podrían llegar a superar las actuales limitaciones existentes (Palomeque , Rodriguez, & Prado).

La unidad Rotaflex, es un mecanismo de superficie que utiliza velocidades relativamente bajas de bombeo. El motor eléctrico se encuentra conectado a una caja reductora para adaptar la velocidad del motor y entregar el par necesario hasta generar el movimiento de rotación a la rueda dentada motriz, de esta manera la cadena viaja entre la rueda dentada superior y la rueda dentada antes mencionada. Por otra parte, el contrapeso de la unidad se encuentra fijo a uno de los eslabones de la cadena para ayudar a vencer la inercia del motor, ver Figura 6.

Figura 6.

Estructura mecánica de funcionamiento Rotaflex.

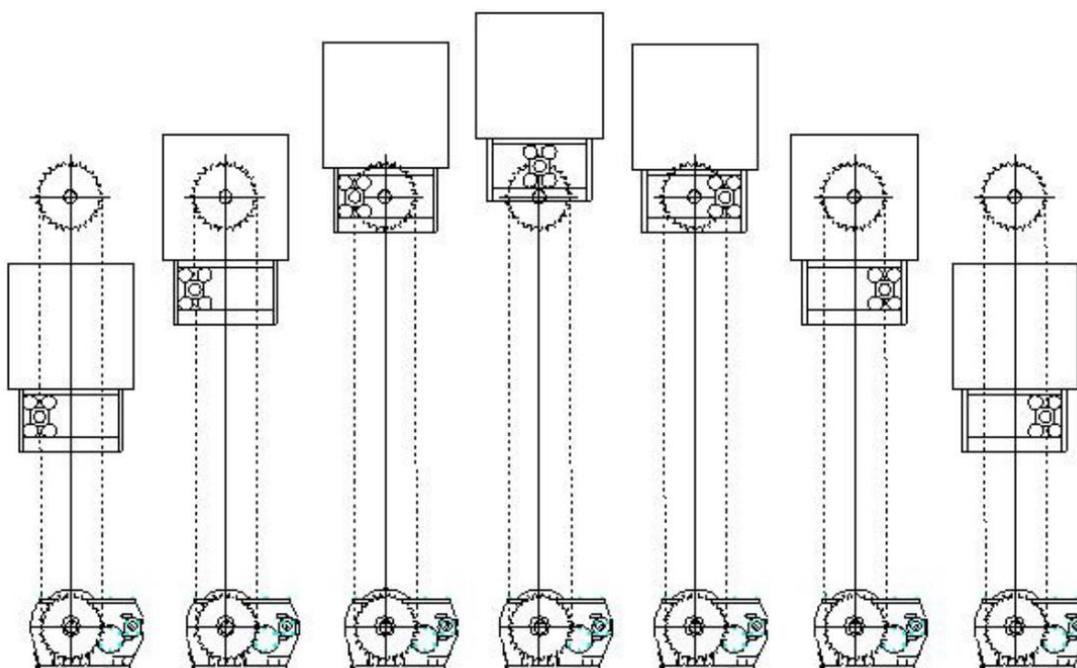


Nota. Figura adaptada de (Nercesian, Fernandez Castro, Grande, & Saiz).

Los cambios de sentido de giro, tienen lugar entre las ruedas dentadas del mecanismo. El carro inversor pasa a través de dichas ruedas para invertir el giro. Dichos cambios de velocidad originan la desaceleración del contrapeso al final de cada mitad de carrera y la aceleración al principio de cada mitad. En la Figura 7 se observa el comportamiento del mecanismo inversor en un ciclo de bombeo.

Figura 7.

Movimiento del carro inversor y contrapeso en un ciclo de bombeo.



Nota. Un ciclo de bombeo equivale a un recorrido ascendente y descendente en el tramo vertical. Figura tomada de (Nercesian, Fernandez Castro, Grande, & Saiz).

La empresa MECANOIL S.A. que opera en el ámbito de la extracción de petróleo crudo y realiza actividades de apoyo para operaciones de petróleo y gas requiere automatizar el funcionamiento de un prototipo de bombeo de carrera larga a escala. La empresa plantea un diseño innovador, para evitar el uso del carro inversor e impulsar una mejor economía de pozo.

En respuesta a la problemática anterior se ha propuesto implementar un sistema automatizado que permita modificar independientemente las velocidades en cada ciclo de bombeo. Esto con el objetivo de que las velocidades de ascenso y descenso sean controladas sin necesidad del carro inversor. Lo que representa una mejor distribución de los esfuerzos del mecanismo, disminución del alto costo de mantenimiento por daños mecánicos y un aumento en la tasa de confiabilidad y disponibilidad.

Mediante el presente proyecto se obtendrán ciclos de bombeo controlados y en consecuencia a gran escala se proporcionará una mayor vida útil del mecanismo, incrementando la vida útil de la sarta de varillas, disminuyendo en gran medida las fuerzas dinámicas y reduciendo los requisitos de energía.

Alcance del Proyecto

Con objeto de brindar una solución a la problemática planteada en el apartado anterior, el presente proyecto pretende alcanzar los siguientes hitos.

- Diseño y construcción de un tablero de control que contenga los diferentes dispositivos de control y maniobra que permiten la operación del prototipo en forma individual o en subgrupos. Se hace referencia a la Norma Ecuatoriana de Construcción.
- Diseño de la lógica de control en los siguientes lenguajes: Lenguaje estructurado de control (SCL) y lenguaje de escalera (LD) bajo la norma IEC 61131-3.
- Arranque y parada del motor desde el modo manual y automático. En el modo manual, el arranque se realiza a bajas rpm en sentido horario o antihorario y es utilizado para tensar la sarta de varillas.
- Diseñar de un sistema de supervisión para la interacción entre el operario y la máquina, mediante el diseño de HMIs en el software Tia Portal bajo la norma ANSI/ISA-101.01 y criterios de High Performance por (Hollifield, Oliver, Nimno, & Habibi).

- Reducción automática de velocidad del motor hasta llegar a 0 rpm cuando se llegue al final de la carrera ascendente o descendente.
- Inversión de rotación del motor con tiempo de espera en los puntos muertos superior e inferior.
- Incremento automático progresivo de velocidad en el motor hasta obtener una velocidad constante en la parte central del recorrido del cabezal.
- Capacidad de programar la velocidad de rotación del motor, para que el mecanismo pueda trabajar de uno a cuatro ciclos por minuto (El ascenso y descenso de la carrera representa un ciclo).
- El sistema de control deberá tener en cuenta situaciones de emergencia, de forma que se garantice el buen funcionamiento del mismo. A continuación, se presentan las situaciones de emergencia que el control deberá gestionar:
 - Falla por exceder los límites del recorrido permitido y programado en cualquiera de los modos de marcha.
 - Fallo por superar o no cumplir con la velocidad máxima programada en el tramo vertical.

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 Específicos

- 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.

Estado del Arte

Metodología

Una vez planteado el alcance y objetivos del proyecto, se establecen métodos existentes para la búsqueda del estado del arte. Para esto es importante estudiar los trabajos realizados hasta la fecha sobre mecanismos de levantamiento artificial que incluyan conceptos de automatización industrial. En consecuencia, resulta necesario una fuente de información de alto nivel que aporte de manera enriquecedora al desarrollo del presente proyecto o incluso sugiera un conjunto de posibles soluciones a los objetivos que el mismo plantea (Moguel Márquez, 2018).

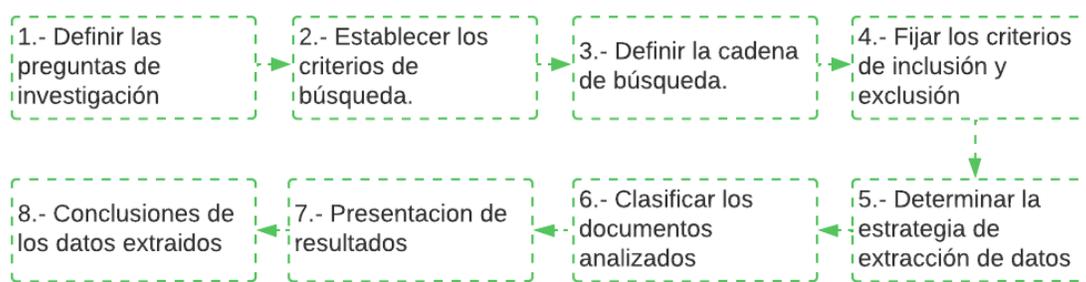
Con objeto de brindar un mayor conocimiento. Se decide realizar un Mapeo Sistemático de la Literatura (*Systematic Mapping Studies*) sobre los mecanismos de superficie de carrera larga y la influencia de la tecnología actual en el funcionamiento de los mismos.

Mapeo Sistemático de la Literatura

El mapeo sistemático de la literatura es una revisión exhaustiva de los estudios primarios existentes sobre un tema de investigación específico que pretende identificar y clasificar las investigaciones, relacionándolas con un tema de investigación amplio (Kitchenham & Charters, 2007). Los pasos a seguir para la elaboración de un SMS se desarrollan según las recomendaciones de (Bayley, y otros, 2007) . Para ello, en la Figura 8 se presenta el proceso secuencial de un SMS.

Figura 8.

Proceso secuencial para desarrollar un SMS.



Nota. Figura adaptada de (Moguel Márquez, 2018).

Preguntas de investigación

El primer paso para desarrollar un SMS, es establecer preguntas de investigación que permitan indagar sobre el desarrollo de estudios relacionados con los mecanismos de superficie en conjunto con conceptos de automatización utilizados y cómo influyen en el funcionamiento de los mismos. En la Tabla 1 se presentan las preguntas de investigación para el desarrollo del SMS.

Tabla 1.

Preguntas para desarrollo SMS.

Preguntas de investigación	Motivación
RQ1: ¿Qué tipo de técnicas existen para el levantamiento artificial en pozos petroleros?	Conocer las técnicas existentes para el levantamiento artificial en pozos de petróleo.

Preguntas de investigación	Motivación
RQ2: ¿Cuáles son las estrategias de control disponibles para implementarse en PLCs?	Conocer los diferentes algoritmos de control aplicables a autómatas programables y el porqué de su uso.
RQ3: ¿Qué tecnologías existen para la toma de datos de variables físicas como distancia y velocidad?	Conocer las tecnologías existentes en la toma de datos de variables físicas para automatismos industriales.
RQ4: ¿Qué tecnología existe para el accionamiento y control de velocidad de motores de inducción trifásicos?	Conocer los diferentes dispositivos electrónicos capaces de accionar y controlar motores de inducción trifásicos.

Establecer los criterios de búsqueda

Como motor de búsqueda se plantea el uso de librerías digitales como “Web of Science” y “IEEE Xplore”. Una recomendación de (Moguel Márquez, 2018) es que al tratarse del primer reconocimiento del estado del arte no se debe descartar ningún tipo de publicación.

Una vez se haya elegido el o los motores de búsqueda. A partir de las preguntas de investigación se procede a generar las cadenas de información de búsqueda de librerías digitales. En la Tabla 2 se presentan los términos alternativos a ser utilizados.

Tabla 2.

Cadena de información de búsqueda para Web of Science.

Término clave	Términos alternativos
RQ1: Levantamiento artificial	“Artificial Lifting” OR “Mechanical Pumping”
RQ2: Sintonización de controladores	“Self Tuning” OR “PID Tuner”
RQ3: Sensores	“Detector” OR “Measurement” OR “Sensor”
RQ4: Control de velocidad	“Speed” OR “Measurement”

Definir la cadena de búsqueda

("Artificial Lifting" OR "Mechanical Pumping") AND ("Self Tuning" OR "PID Tuner") AND ("Detector" OR "Measurement" OR "Sensor") AND ("Speed" OR "Measurement")

Con la cadena general se generan dos resultados, siendo insuficiente para realizar un SMS. Por lo cual se desglosa el criterio general en 3 cadenas de términos de búsqueda.

Cadena 1:

("Artificial Lifting" OR "Mechanical Pumping") AND ("Self Tuning" OR "PID Tuner") AND ("Detector" OR "Measurement" OR "Sensor")

Cadena 2:

("Self Tuning" OR "PID Tuner") AND ("Detector" OR "Measurement" OR "Sensor") AND ("Speed" OR "Measurement")

Cadena 3:

("Artificial Lifting" OR "Mechanical Pumping") ("Detector" OR "Measurement" OR "Sensor") AND ("Speed" OR "Measurement").

Fijar los criterios de inclusión y exclusión

Para los criterios de búsqueda se han tenido en cuenta los siguientes criterios de inclusión y exclusión:

- Documentos de acceso libre
- Publicaciones que se desarrollen desde el 2012 hasta el 2022
- Cualquier tipo de publicación
- No se excluyen documentos por autor

Determinar la estrategia de extracción de datos

Para la extracción de datos, siguiendo la sugerencia de (Moguel Márquez, 2018) se elabora una ficha de extracción de información para los artículos donde se registran hallazgos de la información

bibliográfica correspondiente. En la Tabla 3 se presenta el resultado de búsqueda con los criterios de inclusión.

Tabla 3.

Resultados de búsqueda con los criterios de inclusión.

Motores de búsqueda	Cantidad de documentos
IEEE Xplore	1418
Web of Science	150
Total	1568

Para clasificar las publicaciones de interés se aplican los criterios de exclusión e inclusión al número total. De tal manera que la información de mayor relevancia sea acorde al tema del proyecto. En la Tabla 4 se presenta el resultado de la aplicación de dichos criterios.

Tabla 4.

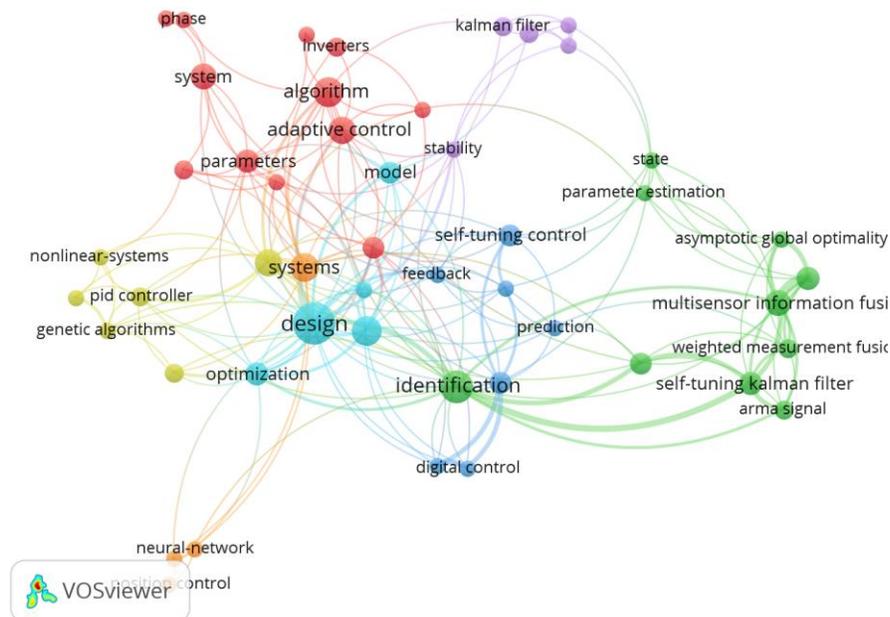
Resultados finales con criterios de inclusión y exclusión.

Motores de búsqueda	Cantidad de documentos con criterios de exclusión
IEEE Xplore	15
Web of Science	25
Total	40

Aplicado el procedimiento del mapeo sistemático se obtienen 40 trabajos de interés. Utilizando el software “VOSViewer” se elabora un mapa de densidad con el análisis de “Co-ocurrencia” con las palabras claves de los 40 trabajos antes mencionados.

Figura 9.

Red generada con la concurrencia de palabras claves.



De la Figura 9 se deduce el número de concurrencia de las palabras claves, es así que en la Figura 10 se presentan las 13 palabras con mayor concurrencia de acuerdo al análisis de VOSviewer.

Figura 10.

Palabras con mayor concurrencia de la red de palabras claves

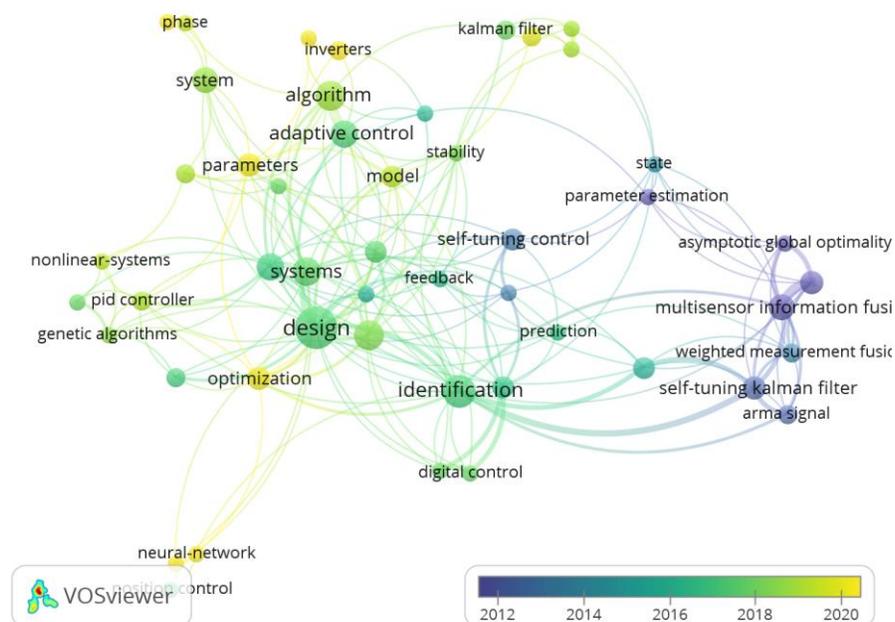
Cluster 1 (12 items)
adaptive control
algorithm
frequency
harmonic analysis
implementation
inverters
parameters
phase
robust control
sensor
system
tracking control

Con las 12 palabras resultantes del análisis ya se puede tener una idea del contenido de dichos artículos. Por ejemplo, la palabra "frequency" e "inverter" hacen referencia a los dispositivos de accionamiento industrial para variar la velocidad conocidos como variadores de frecuencia.

Adicionalmente se utiliza la herramienta de “Overlay_Visualitation”, la cual genera una red en base a los términos más actuales. Por ejemplo, en la Figura 11 se observa que los temas en auge en términos de control son la optimización, los controladores PID, el control adaptativo y control digital y para los accionamientos industriales están los variadores de frecuencia.

Figura 11.

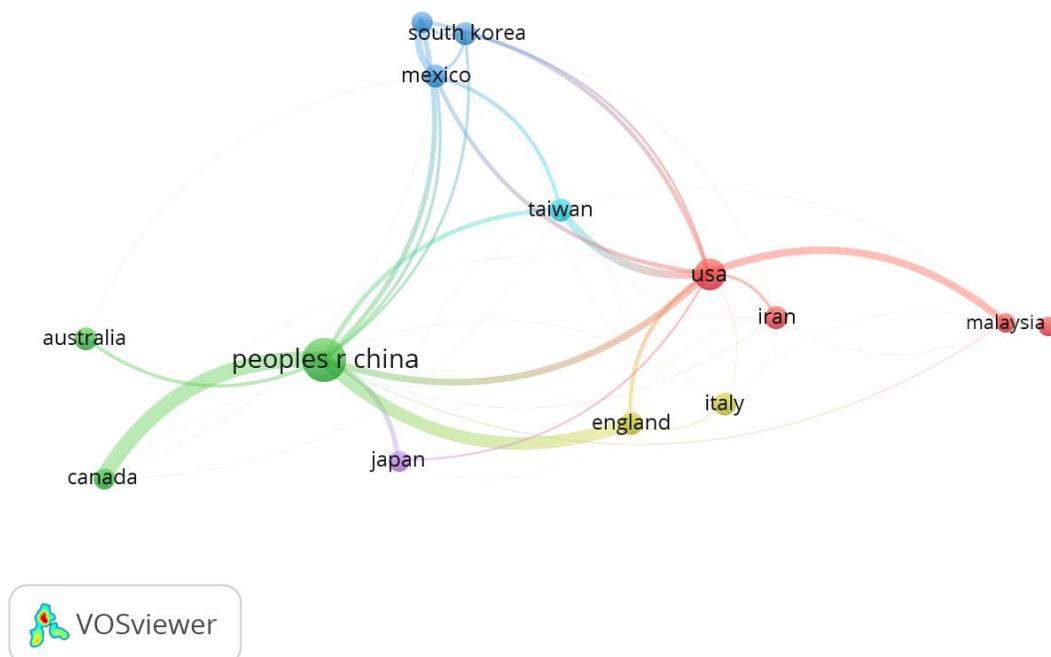
Red de concurrencia a través del tiempo.



Finalmente se genera una red una red de densidad por búsqueda de países. Se cambian las configuraciones de VOSviewer de tal manera que nos aporte una visión más amplia con los aportes de cada país. En la Figura 12 se presenta la red generada en base al análisis expuesto.

Figura 12.

Red generada en base a la concurrencia de países de las muestras bibliográficas.



Se observa que el mayor número de concurrencia en cuanto a muestras bibliográficas se encuentra en países como China y Estados Unidos. Adicionalmente En la Figura 13 se detalla el resultado del análisis de la herramienta VOSViewer.

Figura 13.

Países con mayor aporte

Cluster 1 (4 items)
iran
malaysia
turkey
usa
Cluster 2 (3 items)
australia
canada
peoples r china

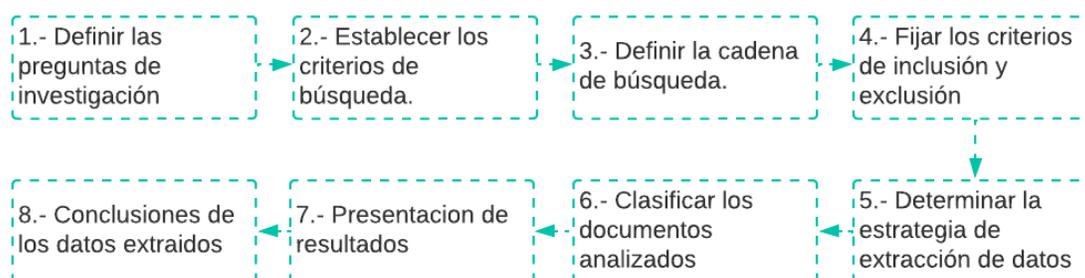
Revisión sistemática de la literatura

Con el análisis SMS se obtuvo información relevante que aporta con lineamiento del contenido que se está tratando. Ahora para aportar con información útil al desarrollo del proyecto se realiza un estudio sistemático de la literatura ("*Systematic Literature Review*"). El SLR hace referencia a la revisión sistemática. La revisión busca, identifica, selecciona, valora y sintetiza la información sistemáticamente, de acuerdo a las pruebas de investigación relevantes para la pregunta (Majumder, 2015).

La diferencia con el análisis anteriormente realizado (SMS) es que el SRL aborda el tema de manera más profunda (Moguel Márquez, 2018). Es así que se realiza el SRL para abordar los temas de interés desde un punto de vista más profundo. En la Figura 14 se plantea el proceso a seguir para el SLR.

Figura 14.

Proceso a seguir para el SLR.



Nota. Figura adaptada de (Moguel Márquez, 2018).

Definir las preguntas de investigación

Al implementar el SLR se pretende examinar las tecnologías que existen en torno a accionamientos de motores de inducción trifásica, variación de velocidad y medición de las variables físicas presentes en los mecanismos de superficie. Es así que se plantean las siguientes preguntas:

Tabla 5.*Preguntas para el desarrollo de SLR.*

Preguntas de investigación	Motivación
RQ1: ¿Qué tan fiables son los procesos de sintonización de controladores?	Analizar los métodos para sintonizar controladores en la industria.
RQ2: ¿Qué funcionalidades ofrece un variador de frecuencia sobre un motor de inducción trifásico?	Qué funcionalidades se pueden añadir al proyecto con un variador de frecuencia.
RQ3: ¿Qué tipo de sensores se utilizan para medir velocidad en motores de inducción?	Seleccionar el tipo de sensor que cubra las necesidades del proyecto
RQ4: ¿Qué arquitectura de comunicación es utilizada en el ámbito petrolero?	Conocer el medio por el cual se dan las comunicaciones industriales en el ámbito petrolero.

Establecer los criterios de búsqueda

De igual manera que en SMS se plantea el uso de librerías digitales como “Web of Science” y “IEEE Xplore”. La diferencia es que el SLR busca a mayor profundidad la información por lo que según (Moguel Márquez, 2018) es aconsejable descartar publicaciones de divulgación de libros y de páginas web.

Tabla 6*Cadena de información de búsqueda para Web of Science e IEEE Xplore.*

Término clave	Términos alternativos
RQ1: Control	“Self Tuning” OR “PID Tuner”
RQ2: Variación de velocidad	“Frequency drives” OR “drive”
RQ3: Sensores	“Detector” OR “Measurement” OR “Speed Sensor”
RQ4: Redes industriales	“Industrial Networks” OR “Industrial Protocols”

Definir la cadena de búsqueda

("Self Tuning" OR "PID Tuner") AND ("Frequency drives" OR "drive") AND ("Detector" OR "Measurement" OR "Speed Sensor") AND ("Industrial Networks" OR "Industrial Protocols").

Con la cadena general no se genera ningún resultado por lo cual se procede a seccionar los criterios de búsqueda en 3 cadenas

Cadena 1:

("Self Tuning" OR "PID Tuner") AND ("Frequency drives" OR "drive") AND ("Detector" OR "Measurement" OR "Speed Sensor")

Cadena 2:

("Frequency drives" OR "drive") AND ("Detector" OR "Measurement" OR "Speed Sensor") AND ("Industrial Networks" OR "Industrial Protocols")

Cadena 3:

("Detector" OR "Measurement" OR "Speed Sensor") AND ("Industrial Networks" OR "Industrial Protocols") AND ("Self Tuning" OR "PID Tuner")

Fijar los criterios de inclusión y exclusión

Se tienen en cuenta los siguientes criterios de inclusión y exclusión:

- Documentos de acceso libre.
- Publicaciones que se desarrollen desde el 2017 hasta el 2022.
- Artículos completos.
- Se excluyen los tipos de documentos de divulgación por libros.
- No se excluyen documentos por autor.

Determinar la estrategia de extracción de datos

De igual Manera que para el SMS se realiza el uso de una ficha de extracción de información para los artículos donde se registran hallazgos de la información bibliográfica correspondiente

Tabla 7.

Resultados de búsqueda con los criterios de inclusión.

Motores de búsqueda	Cantidad de documentos
IEEE Xplore	104
Web of Science	72
Total	176

Para clasificar las publicaciones de interés se aplican los criterios de exclusión e inclusión al número total. De tal manera que la información de mayor relevancia sea acorde al tema del proyecto. En la Tabla 8 se representa el resultado de dichos criterios.

Tabla 8.

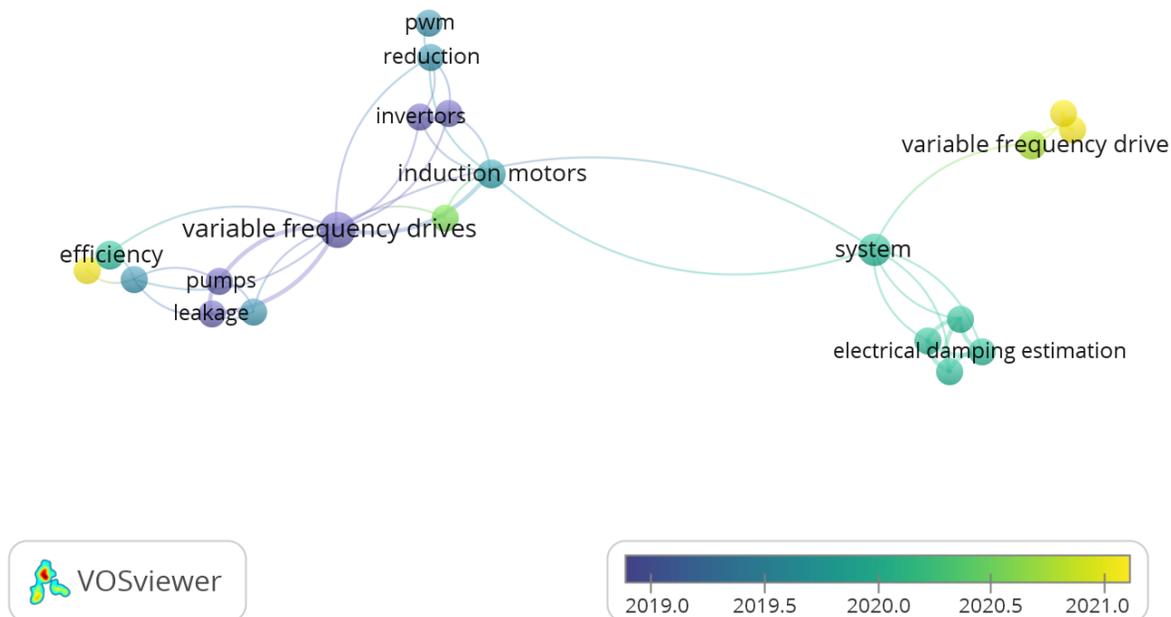
Resultados finales con criterios de inclusión y exclusión.

Motores de búsqueda	Cantidad de documentos con criterios de exclusión
IEEE Xplore	8
Web of Science	10
Total	18

Aplicado el procedimiento del mapeo sistemático se obtienen 18 trabajos de interés. Utilizando el software "VOSViewer" se elabora un mapa de densidad con el análisis de "Co-ocurrencia" con las palabras claves de los 18 trabajos antes mencionados a lo largo del tiempo.

Figura 15.

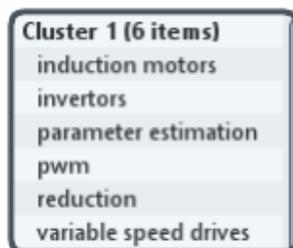
Red generada con la concurrencia de palabras claves a lo largo del tiempo.



De la Figura 15 se deduce el número de concurrencia de las palabras claves. En esta misma figura aparece el término “pwm”. El cual es válido para realizar el control de velocidad. Además, se observa que los variadores de frecuencia tienen relación con la eficiencia y las bombas. Mediante el análisis de VOSViewer extraemos los datos de más relevancia. Estos datos son representados en la Figura 16.

Figura 16.

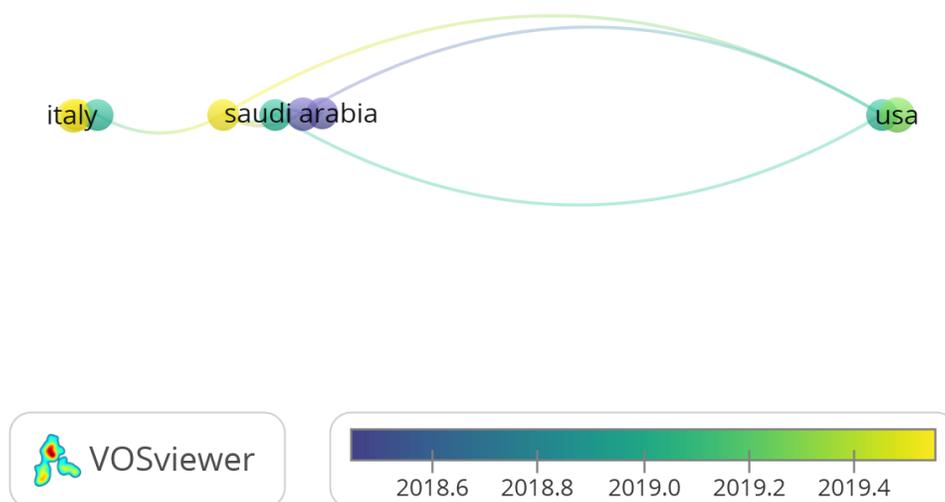
Palabras con mayor concurrencia de la red de palabras claves



Finalmente se genera una red de densidad por búsqueda de países. En la Figura 17 se puede visualizar que el país con más aportes a lo largo del tiempo es Estados Unidos. Sin embargo, los países con más aportes actuales son Inglaterra, e Italia.

Figura 17.

Red de concurrencia a través del tiempo.



Capítulo 2

Marco Conceptual

Introducción

En este capítulo se realiza un análisis conceptual del proceso de elevación artificial en campos petroleros. Además, se incluye la fundamentación teórica para el desarrollo del proyecto. Para el caso se divide al capítulo en secciones agrupadas de acuerdo al nivel jerárquico al que pertenecen en base a la pirámide CIM.

Producción petrolera

Los siguientes términos se presentan con el objetivo de brindar un acercamiento conceptual al funcionamiento de los mecanismos de superficie para bombas de subsuelo. Para ello es importante conocer la terminología utilizada y los principios físicos en los que dichos mecanismos basan su funcionamiento.

Elevación Natural

Por lo general, los pozos de petróleo en las primeras etapas de su vida fluyen naturalmente hacia la superficie. La producción fluida significa que la presión en el fondo del pozo es suficiente para superar las pérdidas de presión que se producen a lo largo del recorrido del flujo. Cuando este criterio no se cumple, es decir la presión del depósito ya no es suficiente para elevar los fluidos a la superficie el flujo natural termina y el pozo muere. Para que estos pozos vuelvan a producir o incluso aumentar la producción se utilizan métodos de elevación artificial, estos métodos actúan aportando al pozo la energía adicional necesaria para elevar los fluidos (Takacs, Electrical Submersible Pumps Manual, 2018).

Elevación Artificial

El levantamiento artificial es un proceso utilizado en los pozos petrolíferos para aumentar la presión dentro del yacimiento e impulsar el petróleo hacia la superficie. Su funcionamiento consiste en

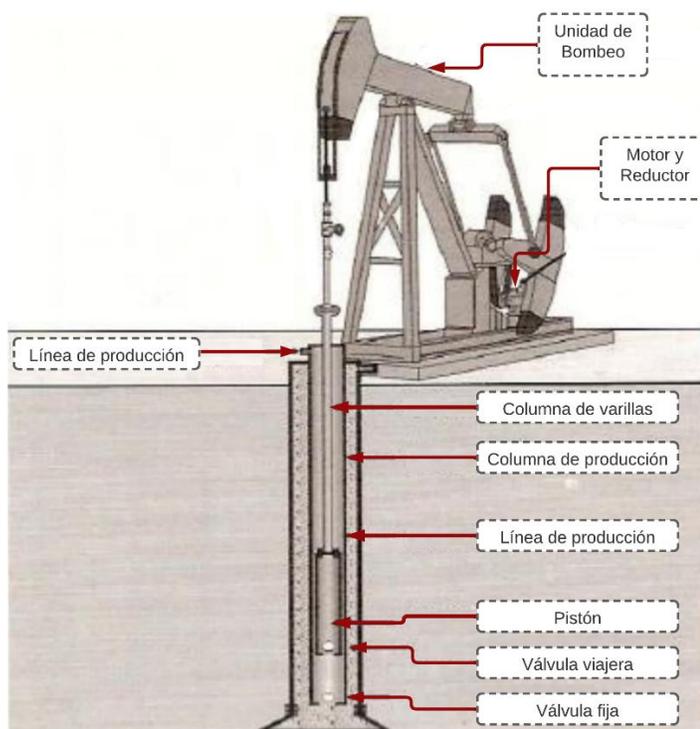
mecanismos, equipos y técnicas que transmiten la energía desde la superficie hasta el fondo del pozo para elevar los fluidos contenidos en el yacimiento (Amaral Bezerra, 2015). La elección del mejor método de elevación para un pozo está asociado al estudio de la geometría del pozo, las propiedades de los fluidos contenidos en la formación, condiciones de operación y a la capacidad actual y futura del reservorio (Aragão Sousa, y otros, 2013). Por otra parte, la elección incorrecta del método y su inadecuado dimensionamiento pueden provocar una pérdida de producción e innumerables problemas operativos.

Bombeo Mecánico

El bombeo mecánico surgió luego del nacimiento de la industria petrolera y es considerado el primer método de elevación artificial, su importancia se refleja en la gran cantidad de pozos instalados en todo el mundo (Amaral Bezerra, 2015). Para proporcionar energía a la bomba de fondo y elevar a la superficie los fluidos producidos por el yacimiento es necesario utilizar mecanismos de superficie (Figura 18). Los mecanismos de superficie generalmente se instalan sobre una base de hormigón o bajo perfiles de acero, lo que permite la alineación de los componentes de la unidad. En la superficie, la unidad de bombeo es accionada por el motor conectado a una caja reductora a través de correas y transforma la energía eléctrica en rotación. El objetivo de la caja reductora es reducir significativamente la velocidad de funcionamiento sin que la potencia se vea afectada, de tal manera que mientras el motor gira a grandes revoluciones o incluso a su velocidad nominal a la salida de la caja reductora se obtiene un mayor par a bajas revoluciones.

Figura 18.

Sistema de bombeo mecánico.

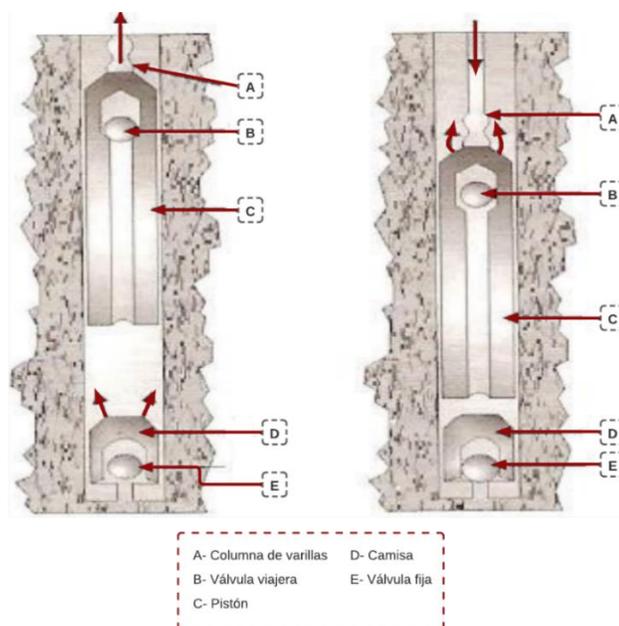


Nota. Figura adaptada de (Barbalho Tavares, 2015).

La función de la bomba de fondo (Figura 19) es mover el fluido desde la aspiración a baja presión, hasta la descarga a alta presión. Para ello, el ciclo de bombeo se divide en funcionamientos de carreras ascendentes y carreras descendentes. En la carrera ascendente, el pistón sube comprimiendo el fluido por encima de la válvula fija la cual permanece cerrada. La caída de presión creada entre el pistón y la válvula fija hace que esta última se abra y permita que el fluido contenido en el anular pase al interior de la bomba. En la carrera descendente, el pistón desciende aumentando la presión entre las válvulas, lo que hace que la válvula fija permanezca cerrada y la válvula viajera se abra, permitiendo el paso del fluido sobre el pistón (Barbalho Tavares, 2015).

Figura 19.

Partes y funcionamiento de una bomba de fondo en un ciclo.



Nota. Figura adaptada de (Barbalho Tavares, 2015).

Por otra parte, se sabe que en los sistemas de automatización de los campos de producción de petróleo la ingeniería siempre ha utilizado los recursos y la tecnología de automatización existentes en ese momento para automatizar una determinada área o equipo. Por lo cual es necesario aclarar ciertos conceptos, normas y protocolos que se emplean para dar solución a la problemática del presente proyecto.

Automatización Industrial

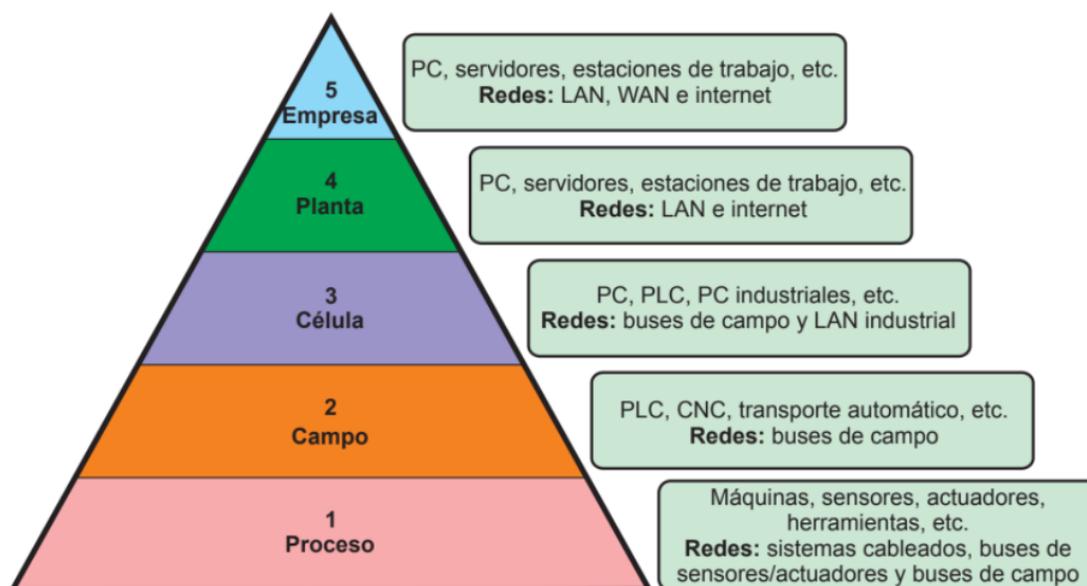
El término Automatización abarca un conjunto de técnicas asociadas a sistemas del tipo mecánico, electrónico y ordenadores, cuyo objetivo es la operación y el control de la producción (Lorenzo Lledó, 2007). Por otra parte, se sabe que la automatización abarca niveles en base a la tecnología ocupada en cada una de las etapas de producción de un producto. Es así que para representar cada uno de estos niveles la información se presenta de manera funcional en una pirámide.

Pirámide CIM

La pirámide CIM es una representación visual de los niveles de automatización (Figura 20) presentes en las industrias y empresas. Su objetivo es organizar de forma jerárquica los cinco niveles de trabajo presentes en el sector industrial y mostrar cómo se relacionan todos estos niveles entre sí. Dicho modelo se basa en utilizar tecnologías informatizadas en todas las etapas de producción de un producto, desde el inicio hasta el proceso de fabricación, incluyendo el control de calidad. Es así que los niveles están divididos de acuerdo con el tráfico y el tipo de información que se intercambia (Valdivia Miranda, 2019). La jerarquía permite mostrar la interdependencia de cada uno de los niveles de automatización existentes en el sector industrial. El presente proyecto contempla los niveles 1, 2 y 3 de la pirámide CIM y para brindar un mayor entendimiento se divide la tecnología y conceptos empleados en los niveles de proceso, campo y célula.

Figura 20.

Pirámide CIM.



Nota. Figura tomada de (Valdivia Miranda, 2019).

Nivel de proceso

Es la base de la pirámide y contempla los elementos (*hardware*) que tienen interacción directa con las variables del proceso, máquinas y de los sistemas de producción.

Hardware

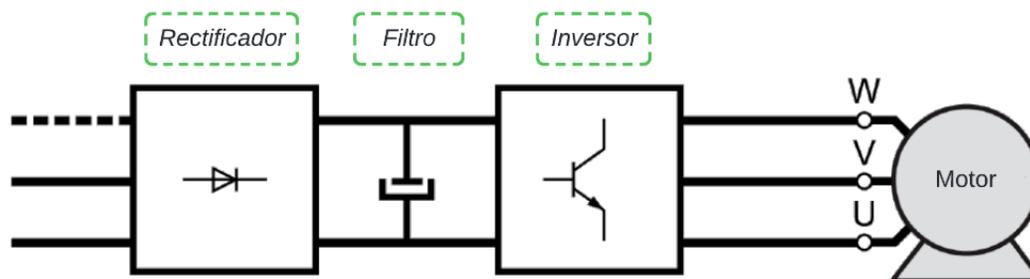
Motores de Inducción. Los motores de inducción (o motores asíncronos) trifásicos son los motores más utilizados en la industria. Funcionan a velocidades esencialmente constantes desde cero hasta plena carga y son los encargados de transformar la energía eléctrica de su alimentación, en energía mecánica de forma rotativa (Wildi, 2007). Una característica importante del motor asíncrono o de inducción es que la velocidad del rotor, y por tanto la potencia no se puede variar gradualmente ya que dependen directamente de la frecuencia de alimentación y del número de polos. Sin embargo, para dar solución a dicha problemática se utilizan cada vez más los controladores electrónicos de frecuencia variable para controlar la velocidad en motores de inducción (Wildi, 2007).

Variador de Frecuencia. Un variador de frecuencia es un dispositivo que varía el giro de accionamiento de un motor eléctrico de forma rápida, eficaz y que además ofrece un potencial de ahorro de energía. Este equipo está constituido por un rectificador, un filtro y un inversor (Figura 21) que permiten modificar la frecuencia de la tensión aplicada al motor con los siguientes fines:

- Reducir el consumo de energía y los costos energéticos.
- Optimizar el funcionamiento de diversas aplicaciones basadas en motores eléctricos.
- Brindar una mejora en el control del proceso.
- Aceleración controlada y desaceleración controlada.
- Variación y regulación de la velocidad.
- Invertir el sentido de la marcha.

Figura 21.

Esquema del principio de funcionamiento de un variador de frecuencia.



Nota. Un variador de velocidad no puede ser al mismo tiempo un controlador. En este caso, se trata de actuador rudimentario que dispone de un sistema de control basado en los valores eléctricos del motor con amplificación de la etapa de potencia. Figura adaptada de (Schneider electric, 2003).

- Rectificador: La función del rectificador dentro del variador de velocidad es transformar la tensión alterna trifásica en tensión continua monofásica. El rectificador está formado por diodos semiconductores, que funcionan como una válvula antirretorno, permitiendo que la corriente fluya en una sola dirección.
- Filtro: La función del filtro es reducir la componente de CA y aumentar el nivel de tensión de CC de un circuito rectificador.
- Inversor: Los semiconductores que componen el inversor permiten recrear una corriente alterna (trifásica) con frecuencia u ondulación variable. Es la amplitud de las variaciones sinusoidales la que determina la frecuencia de la corriente aplicada al motor (ABCCLIM, 2022).

Sensores. Los sensores son dispositivos con capacidad para transformar variables físicas. Por tanto, cada tipo de sensor es capaz de detectar una determinada magnitud física para transformarla en

unidades de ingeniería como señales eléctricas, sonoras o datos. Los tipos de sensores existentes para la medición de las variables del proyecto se describen en la siguiente tabla.

Tabla 9.

Sensores de posición y velocidad.

Tipo	Descripción	Representación
Inductivo	Son útiles para detectar componentes metálicos, desde hierro, aluminio, acero y acero inoxidable hasta latón. (Hi tecnología, 2022).	
Capacitivo	Se utilizan para la detección de nivel de líquidos y sólidos, pero principalmente para la detección de materiales no metálicos como resinas, plásticos y maderas, ya que son excelentes para detectar cualquier tipo de masa.	
Ultrasónico	Los sensores ultrasónicos están microprocesados y pueden contar con salida digital simple o doble, además de salida analógica de tensión o corriente. Ofrecen un transmisor de señales ultrasónicas para la detección de objetos y distancias.	
Fotoeléctrico	Los sensores fotoeléctricos se utilizan para detectar sin contacto partes y piezas de máquinas automáticas, así como productos fabricados en la línea de producción. Proporcionan información relevante como el contraste, la luminiscencia, la retroreflexión, el color, la distancia y la zona que se vigila.	

Tipo	Descripción	Representación
Encoder incremental	Los encoders incrementales generan información sobre la posición, el ángulo y el número de revoluciones. La resolución se define por el número de guiones que el codificador transmite al controlador por cada revolución	
Encoder Absoluto	Los encoders absolutos proporcionan información sobre la posición, el ángulo y las revoluciones en incrementos angulares. Son sensores que generan una señal de código binario para cada unidad de desplazamiento.	

Nivel de campo

Más conocido como nivel de control, aloja los dispositivos encargados de realizar el control automatizado de las actividades de la planta. En ese nivel se reciben las señales y datos del nivel de proceso.

Sistemas de control

Controladores Lógicos Programables

Un controlador lógico programable (PLC) es un ordenador industrial robusto utilizado para controlar o regular el funcionamiento de un proceso o máquina. Los controladores lógicos programables poseen una memoria programable capaz de almacenar instrucciones impartidas por el usuario para brindar soluciones específicas mediante el uso de funciones lógicas, temporizadas, funciones aritméticas, etc. Su constitución es general, pero existen PLCs del tipo modular que permiten ampliar sus características de *hardware* según las necesidades de cada aplicación.

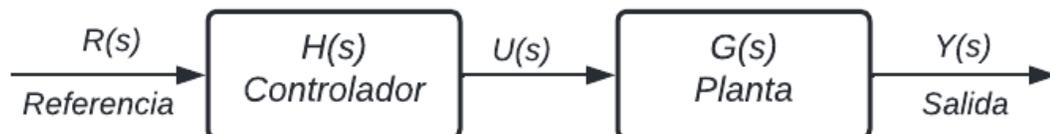
Técnicas de control

Un sistema de control es la interconexión de varios componentes que da lugar a una configuración que proporciona un rendimiento deseado. La descripción del sistema se refiere a la relación causal entre la entrada y la salida del sistema (Maruyama, 2017). Se puede realizar una clasificación en base al procedimiento utilizado por el controlador y el tipo de operación del sistema. Es así que a continuación se presentan los dos tipos de sistemas de control de interés para el presente proyecto.

Sistemas de control en lazo abierto. Un sistema de control de lazo abierto (Figura 22) utiliza un dispositivo actuador para controlar el proceso directamente sin el uso de retroalimentación negativa. De este modo, el sistema de control no conoce el valor de la señal de salida conocida como variable controlada.

Figura 22.

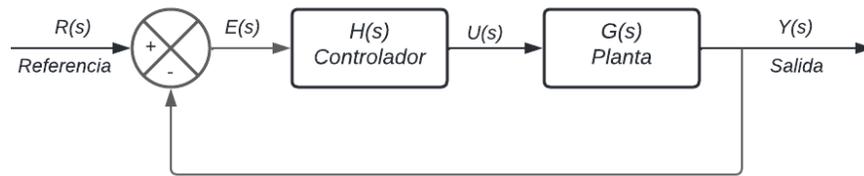
Representación de un sistema de control en lazo abierto.



Sistemas de control en lazo cerrado. Un sistema de control de lazo cerrado (Figura 23) utiliza una medición de la salida del sistema y la retroalimentación de esta señal para compararla con la señal de referencia. La señal de error es utilizada por el controlador para el cálculo de la señal de accionamiento.

Figura 23.

Representación de un sistema de control en lazo cerrado.



Estrategias convencionales de control

En el diseño real de un sistema de control, el diseñador debe decidir el uso de uno o más controladores. El tipo de controlador más utilizado, incluso en plantas de las más diversas naturalezas, es el controlador electrónico. De hecho, las señales no eléctricas son, normalmente, transformadas en señales eléctricas, a través de transductores, y, debido a la simplicidad de la transmisión, aumentan el rendimiento, la fiabilidad y, principalmente, la facilidad de compensación (Uguilino, 2007). Las estrategias de control más utilizados en controladores electrónicos a nivel industrial son los siguientes:

- Control ON-OFF
- Control Proporcional (P)
- Control Proporcional Derivativo (PD)
- Control Proporcional Integral (PI)
- Controlador proporcional Integrador Derivativo (PID)

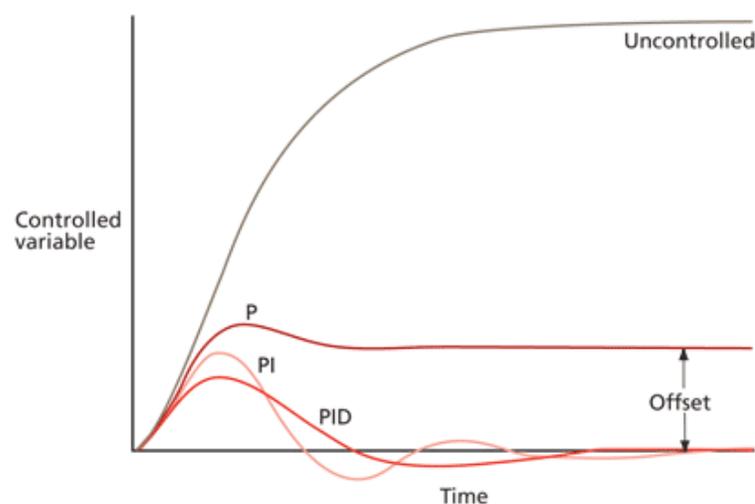
Para implementar cada una de las estrategias de control es preciso analizar los recursos económicos destinados al proyecto. Por ejemplo, si se plantea introducir una acción del tipo integral o derivativa a un control proporcional, es necesario analizar el controlador electrónico que se desea utilizar. Sólo los dispositivos de alta gama cuentan con las características necesarias de procesamiento para implementar dichos algoritmos de control.

Para el presente proyecto se considera el control proporcional integral derivativo (PID). El control PID ofrece un performance para casi cualquier aplicación. La única consideración a tener en cuenta es que si bien la ganancia derivativa ayuda a atenuar las oscilaciones en estado estacionario también puede amplificar el ruido producido por algún elemento del sistema de control. La parte derivativa tiende a aumentar la estabilidad relativa del sistema y reduce el tiempo de acomodación, sin embargo, en oposición a estas ventajas, aumenta el tiempo de subida y, al no actuar en el régimen permanente, no corrige el error de estado estacionario (Uguilino, 2007).

Controlador Proporcional Integrador Derivativo (PID). Ampliamente utilizado en los sistemas de control industrial y en una variedad de otras aplicaciones que requieren un control continuamente modulado. La característica principal del controlador PID es la capacidad de utilizar los tres términos de control de la influencia proporcional, integral y derivativa en la salida del controlador para aplicar un control preciso y óptimo. En la Figura 24 se presenta el performance que ofrece un control PID en relación a las demás estrategias de control.

Figura 24.

Comportamiento de los distintos tipos de control.



Nota. Figura tomada de (ANSI/ISA-62443-3-2, 2011).

En otro orden de ideas, debido a que los niveles de la pirámide CIM tienen diferentes capacidades, la interacción entre dispositivos del mismo nivel es sencilla, pero entre niveles es compleja porque cada nivel tiene necesidades diferentes. Es así que surge la necesidad de elegir un protocolo de comunicación que permita integrar los 3 niveles antes mencionados en los que se desarrolla el presente proyecto. De igual manera, es necesario implementar una guía que aporte consistencia al diseño de los posibles modos de funcionamiento del automatismo.

Estándares de diseño y comunicación

Protocolos de Comunicación en Redes Industriales.

Los protocolos de redes industriales son estándares creados para que los ordenadores puedan comunicarse y llevar a cabo una serie de procesos. Cada uno de ellos tiene normas específicas en lo que respecta a la transferencia y recepción de datos. No obstante, conocer los principales protocolos resulta importante para elegir la mejor tecnología y lograr los resultados deseados. A continuación, se enlistan algunos de los principales protocolos de redes industriales aplicados en la industria y se explica el protocolo de interés para el proyecto.

- Modbus RTU
- Modbus TCP/IP
- CANopen
- OPC
- Ethernet/IP
- Profibus
- Profinet

El protocolo de comunicación industrial de interés para el proyecto es el protocolo *Profinet*. *Profinet* es un protocolo de comunicación industrial que se utiliza en redes Ethernet de alta velocidad. Los

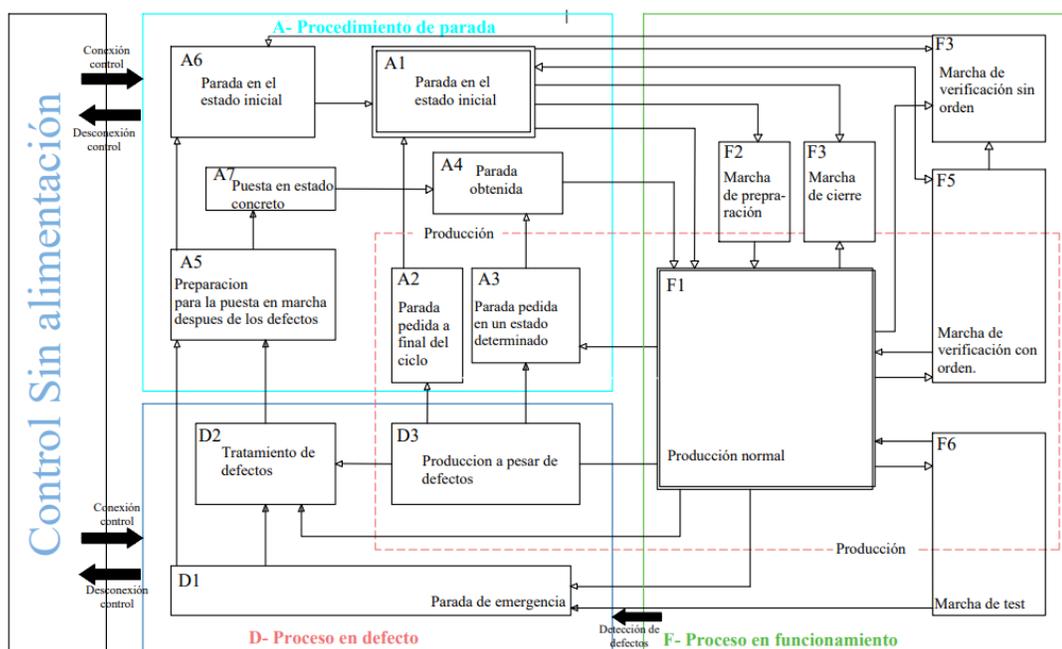
dispositivos *Profinet* son lo suficientemente robustos como para funcionar en entornos de control de fábricas y procesos difíciles. Además, soporta grandes volúmenes de información y se adapta bien a los requisitos de la fabricación avanzada. *Profinet* sigue el estándar de Ethernet Industrial, conforme a IEEE 802, ofreciendo funcionalidades como TCP/IP. Utiliza la misma estructura de cableado y soporta redes de fibra óptica, wifi e incluso Bluetooth. Es adecuado para maquinaria de tamaño medio y grande ya que no requiere proveedores y es compatible con equipos de diferentes fabricantes.

Guía GEMMA

Sus siglas significan Guía de Estudios de Modos de Marcha y Paro. Es un documento estructurado, listo para ser rellenado por un usuario con el fin de seguir un enfoque guiado y sistemático. La guía GEMMA (Figura 25) es una ayuda complementaria al GRAFCET, no obstante, el uso de estas dos herramientas o técnicas permite expresar de forma clara y concisa los modos de funcionamiento y parada del automatismo (Cireddu, 2014).

Figura 25.

Guía GEMMA completa.



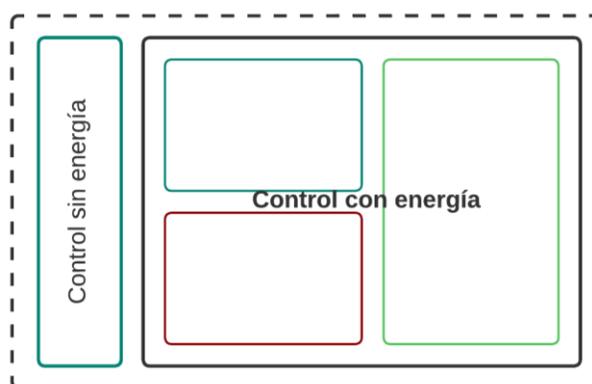
El estudio de los modos de arranque y parada (guía GEMMA) se planifica desde la fase de diseño y se integra en el automatismo, no obstante, es utilizada para seleccionar los modos de arranque y parada que mejor se adapten a la solución del proyecto. Para eso se debe identificar los diferentes modos previstos para el sistema y la identificación de las secuencias que los vinculan, es decir se deben determinar las condiciones para pasar de un modo a otro (Abati, 2017).

Estructura base. La guía GEMMA define el estado en el que se encuentra la parte de control del automatismo. En otras palabras, podemos decir que se encuentra dividido en dos zonas, ver Figura 26.

- Parte de control sin energía: el control se encuentra sin alimentación de energía. En esta zona no hay modos procesados por la parte de control.
- Parte de control con energía: el control utiliza modos de arranque y parada, a cada uno de estos modos les corresponde un rectángulo de estado dispuesto en la guía GEMMA según una estructura precisa.

Figura 26.

Zonas principales de la guía GEMMA.



Estados de modos de marcha y de paro. Cada estado corresponde a una zona de la guía GEMMA.

En la Figura 27 se ilustran los principales procedimientos de cada sección.

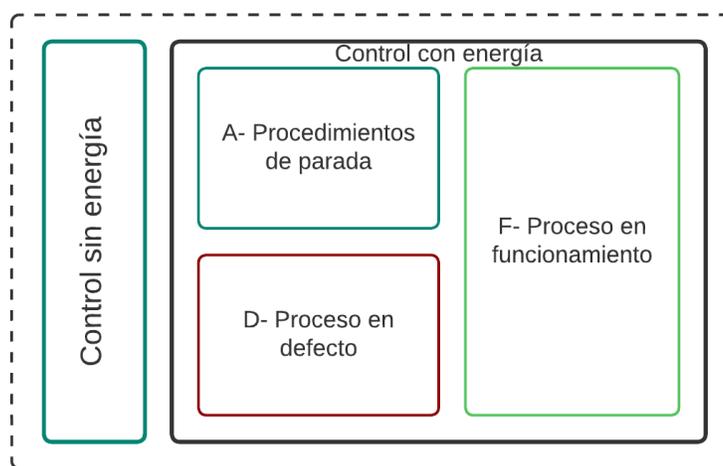
- Procedimientos de parada: precedido por la letra A. En esta zona se encuentran todos los

modos que conducen a un estado de parada o aquellos que lo provocan.

- Proceso en defecto: precedido por la letra D. En esta zona se encuentran agrupados los estados en caso de fallo o emergencia de la parte operativa.
- Proceso en funcionamiento: los procesos operativos se encuentran precedidos por la letra F.

Figura 27.

Estados de modos de marcha y paro.



Nota. No todos los estados de las diferentes zonas se tienen que cumplir o implementar obligatoriamente. Es decir, la persona que utiliza esta herramienta es libre de utilizar los estados que mejor representen el funcionamiento del automatismo.

Nivel de célula

Nivel destinado a la supervisión del proceso de producción de la planta. En este apartado se presentan los conceptos y normas claves para el desarrollo de una HMI.

Normativa para el diseño de interfaces HMI (ISA 101)

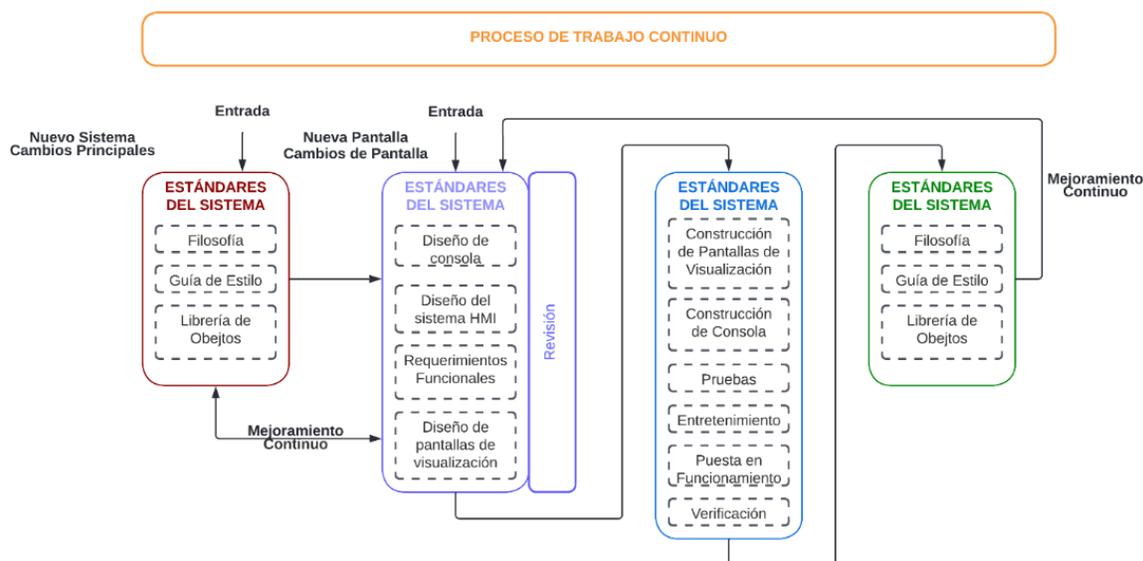
El propósito de este estándar es abordar la filosofía, el diseño, la implementación, la operación y el mantenimiento de las interfaces hombre-máquina (HMI) para sistemas de automatización. El estándar

ISA 101 define la terminología, los modelos para desarrollar una HMI y los procesos de trabajo recomendados para mantener eficazmente la HMI durante todo el ciclo de vida (ANSI/ISA-101, 2015).

Gestión del sistema HMI. La HMI se desarrollará y gestionará mediante el modelo de ciclo de vida de la Figura 28. Las principales etapas del ciclo de vida de la HMI son el diseño, la revisión, la implementación y el funcionamiento. El primer punto de entrada son los estándares del sistema, y son utilizados para representar la filosofía de un nuevo sistema o para realizar cambios importantes en un sistema existente que incluye la migración desde una HMI heredada. Por otra parte, el segundo punto de entrada está pensado para nuevos diseños de pantalla o para cambios que se realicen en la pantalla en base a las etapas de mejora continua (ANSI/ISA-101, 2015).

Figura 28.

Ciclo de vida de una HMI.



Nota. Las ideas de mejora continua pueden surgir en cualquier punto del ciclo de vida, pero las principales conexiones muestran los cambios más significativos. Figura adaptada de (ANSI/ISA-101, 2015).

En la Figura 28 se detallan dos etapas de mejora continua. La primera se encuentra entre los estándares del sistema y ciclo de diseño, de este modo se pueden realizar mejoras en base a una filosofía o guía de estilo. El segundo se encuentra entre diseño y funcionamiento, y se aplica según las necesidades que se presenten en la puesta en marcha, aquí se pueden realizar cambios significativos para mejorar la *HMI*.

Ingeniería de factores humanos y ergonomía. El propósito de esta cláusula es proporcionar un conjunto coherente de principios. Permitiendo al diseñador del *HMI* entender el fundamento de las decisiones clave de diseño. La aplicación adecuada de los principios de la ingeniería de factores humanos (IFH) relacionados con las capacidades y limitaciones cognitivas sensoriales de los usuarios del *HMI* apoyan a conseguir un diseño efectivo de *HMI*. El diseño del *HMI* apoyará las tareas primarias de los usuarios de monitoreo y control de procesos. En consecuencia, el diseño del *HMI* deberá minimizar el impacto de las tareas secundarias que puedan distraer al usuario del *HMI* de realizar sus tareas primarias (ANSI/ISA-101, 2015).

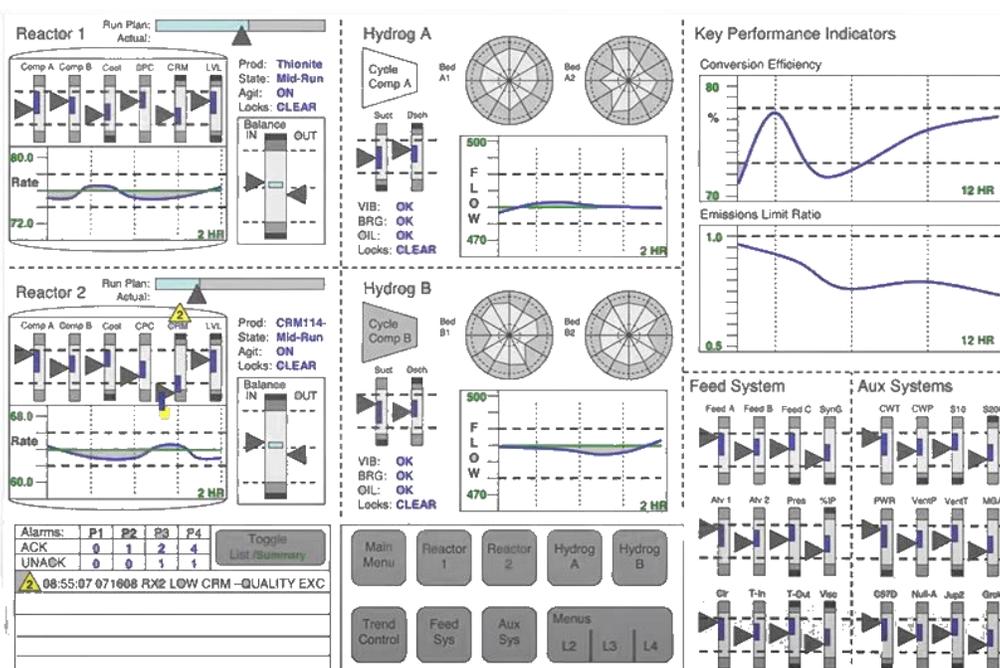
Estilos de pantalla y estructura general del *HMI*. Los estilos de visualización hacen referencia a la forma en que se presenta la información en una pantalla. La selección de un estilo de visualización debe basarse en los requisitos funcionales de la pantalla. El método de presentación más efectivo también probablemente se verá influenciado por la variación esperada en los datos del proceso (ANSI/ISA-101, 2015).

Jerarquía de visualización. El uso de una jerarquía de visualización proporcionará al operador una visión estructurada de todo su ámbito de responsabilidad. Se recomienda un máximo de cuatro niveles, siendo el nivel 1 el de mayor alcance y el nivel 4 el de mayor enfoque. Aunque son de naturaleza jerárquica, los niveles de visualización no están necesariamente alineados con una jerarquía de navegación que puede tener menos o más niveles. A continuación, se describe el objetivo de cada nivel:

- Nivel 1: Las pantallas de nivel 1 (Figura 29) proporcionan una visión general de los parámetros clave, como las alarmas, las condiciones de proceso calculadas y los trayectos de propagación de las perturbaciones de todo el ámbito de control en una sola pantalla (ANSI/ISA-101, 2015).

Figura 29.

Ejemplo de pantalla de nivel 1.

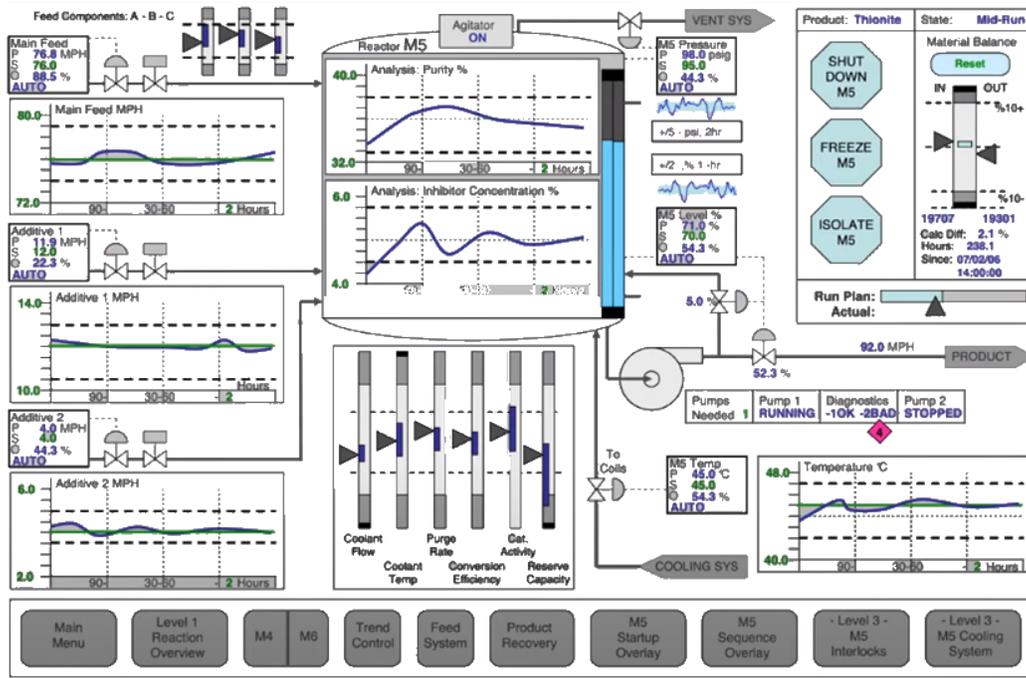


Nota. En sistemas más grandes, la pantalla del nivel 1 podría abarcar varias pantallas, siempre que todas sean visibles al mismo tiempo. Esas pantallas tienen el alcance más amplio y el nivel más bajo de detalle de los procesos. Figura tomada de (Hollifield, Oliver, Nimmo, & Habibi, 2008).

- Nivel 2: Las pantallas de nivel 2 (Figura 30) se describen mejor como pantallas de proceso de alto nivel. Típicamente contienen más detalles que las pantallas de nivel 1. Las pantallas de nivel 2 deben ser la pantalla principal de operación durante las operaciones normales para los cambios y el monitoreo de rutina (ANSI/ISA-101, 2015).

Figura 30.

Ejemplo de pantalla nivel 2.

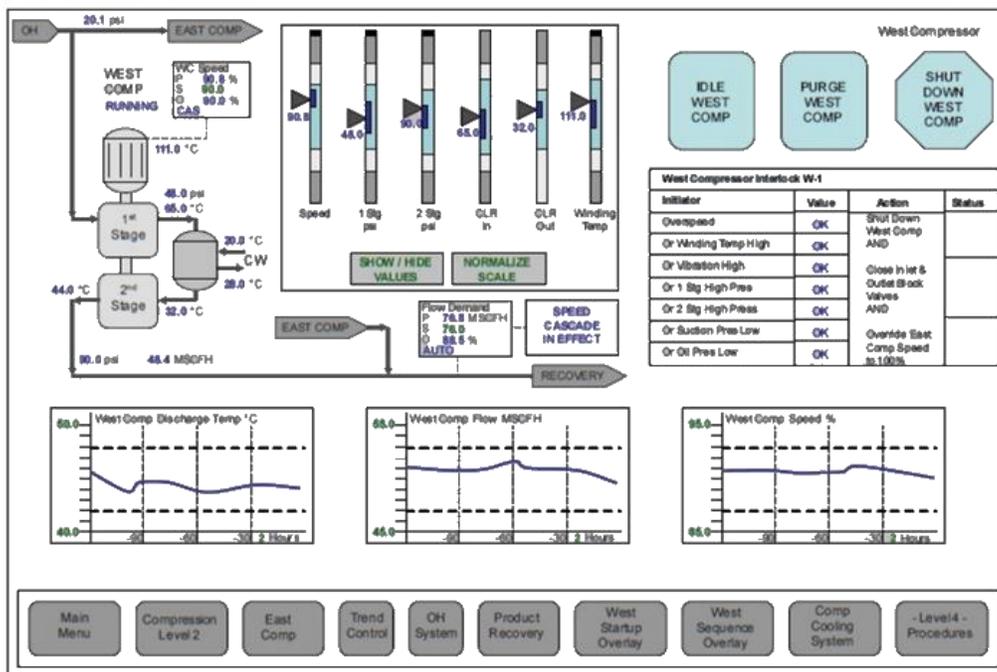


Nota. Mientras que las pantallas de nivel 1 proporcionan una visión general continua del alcance del control de un operador, las pantallas de nivel 2 deben estar basadas en tareas que permitan al operador realizar tareas utilizando un número limitado de pantallas y una navegación mínima. Figura tomada de (Hollifield, Oliver, Nimmo, & Habibi, 2008).

- Nivel 3: Las pantallas de nivel 3 (Figura 31) se describen como pantallas de detalle de sistema o subsistema. Típicamente contienen más detalles que las pantallas de nivel 2 asociadas. Las pantallas de nivel 3 son las que el operador utiliza para realizar operaciones no rutinarias como cambios de alineación, cambio de equipo o tareas rutinarias complejas. (ANSI/ISA-101, 2015).

Figura 31.

Ejemplo de pantalla nivel 3.

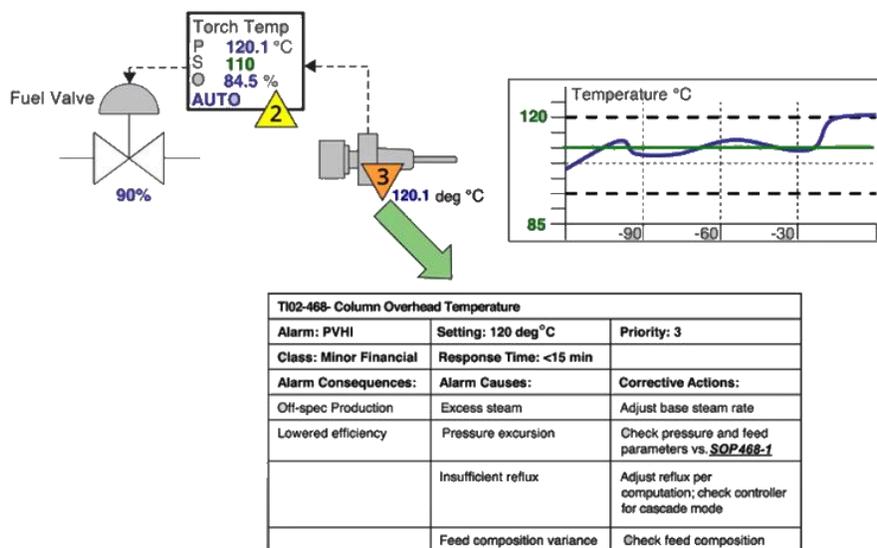


Nota. Las pantallas de nivel 3 deben proporcionar suficiente información para facilitar el diagnóstico del proceso. Figura tomada de (Hollifield, Oliver, Nimmo, & Habibi, 2008).

- Nivel 4: Las pantallas de nivel 4 (Figura 32) más conocidas como pantallas de diagnóstico son aquellas donde toda la información del sistema debería estar disponible. Las pantallas de nivel 4 no están pensadas para ser usadas para el control de procesos o sistemas, sin embargo, la funcionalidad para llevar a cabo el control puede existir en estas pantallas. Las visualizaciones de nivel 4 pueden no requerir una visualización en pantalla completa, permitiendo que la información del sistema se muestre en una ventana emergente, debido a la brevedad o intermitencia de su uso (ANSI/ISA-101, 2015).

Figura 32.

Ejemplo de pantalla nivel 4.



Nota. Figura tomada de (Hollifield, Oliver, Nimmo, & Habibi, 2008).

Interacción con el usuario. Su objetivo de estudio son los métodos de software y dispositivos de hardware que permiten a los usuarios interactuar con el *HMI*. Los métodos de interacción con el usuario generalmente incluyen: Entrada de datos, navegación, mensajes fuera del sistema y seguridad de acceso del usuario (ANSI/ISA-101, 2015).

Rendimiento. Esta cláusula se centra en los factores de rendimiento. Estos factores de rendimiento se pueden ver en dos categorías:

- Factores de servicio del HMI: estos factores están relacionados con la respuesta de la pantalla, incluyendo métricas como los tiempos de llamada, los tiempos de actualización de la pantalla y los clics de las teclas (ANSI/ISA-101, 2015).
- Factores que determinan el rendimiento: estos factores están relacionados con la rapidez con que un operador es capaz de detectar, diagnosticar y tomar medidas (ANSI/ISA-101, 2015).

Entrenamiento. La capacitación en gestión debe incluir el uso del HMI para realizar las tareas requeridas. Estas tareas típicamente incluyen el acceso a la información de alto nivel de producción y operación de la planta, que puede o no estar disponible fuera del entorno del HMI. Si se necesita la HMI para acceder a esta información, se debe garantizar la capacitación de estas personas (ANSI/ISA-101, 2015).

Criterios de High Performance para interfaces hombre-máquina. Una HMI de alto rendimiento permite a un operario supervisar y gestionar de forma segura y eficaz una planta de procesamiento. Se basa en las mejores prácticas para la visualización de la información conforme a los problemas conocidos de los factores humanos y los principios adecuados para la gestión de situaciones anormales (Hollifield, Oliver, Nimmo, & Habibi, 2008).

Capítulo 3

Ingeniería Básica

Introducción

En este capítulo se plantean las consideraciones necesarias para el diseño de los elementos tanto de *hardware* como de *software*. Para ello los niveles de proceso, campo y célula se estructuran como un conjunto de automatización de la siguiente manera: tablero, sistema de control, sistema de supervisión, sistema de comunicaciones y sistema de instrumentación. Es así que para dar inicio al capítulo el primer paso será describir el funcionamiento general del automatismo.

Descripción general del funcionamiento

El prototipo deberá contar con modos de marcha manual y automático. Los mismos serán seleccionables desde un tablero de control mediante un selector de tres posiciones. El modo manual es necesario para tensar inicialmente la sarta de varillas y para poner la bomba de fondo en punto de trabajo. El modo automático deberá asegurar que el mecanismo se encuentre en condiciones iniciales de funcionamiento antes de ponerlo en marcha. Es decir, que la sarta de varillas esté tensada y la bomba de fondo de pozo esté en punto de trabajo, permitiendo el arranque del motor y el correcto funcionamiento del ciclo de bombeo.

Los elementos de accionamiento, control y sensores del mecanismo deberán permitir un arranque suave a bajas rpm con alto torque. A medida que el mecanismo alcance la velocidad máxima permitida en el tramo vertical, el control de velocidad deberá disminuir la velocidad paulatinamente hasta llegar a 0 RPM. Después de 2 s aproximadamente, el control invierte el sentido de rotación del motor e inicia el ciclo descendente con un arranque suave, que poco a poco adquiere la velocidad máxima programada. Por último, cuando el contrapeso se acerca a la parte superior del recorrido, el control

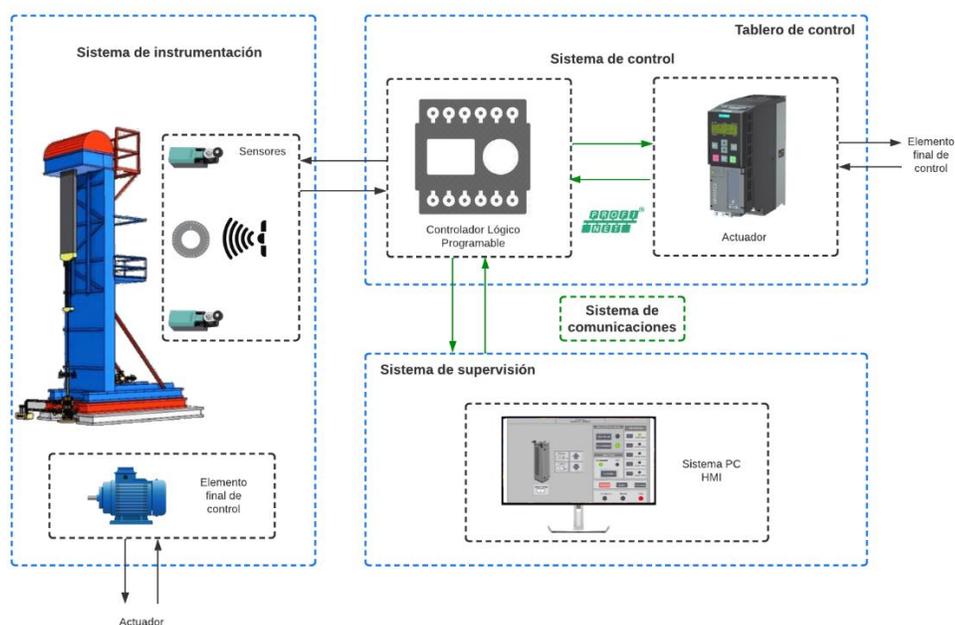
empieza a reducir la velocidad hasta alcanzar las 0 RPM en el extremo inferior, completando así un ciclo de bombeo.

Requisitos de diseño para el control del prototipo

La automatización del prototipo de mecanismo de carrera larga proporcionado por la empresa MECANOIL S.A, debe cumplir ciertos requisitos y estándares que permitan brindar una solución óptima a la problemática planteada en el Capítulo 1. En la Figura 33 se ilustran los diferentes módulos que conforman el automatismo.

Figura 33.

Módulos generales del automatismo.



Los requisitos del automatismo se han recopilado de manera que sea posible la puesta en marcha de manera eficaz. Es así que a continuación se enlistan los parámetros considerados para el diseño de cada uno de sus módulos.

Requisitos del tablero de control

- El tablero debe cumplir con certificaciones de calidad nacionales e internacionales para

garantizar un correcto y estricto funcionamiento.

- El recubrimiento del tablero debe proporcionar durabilidad y resistencia a la corrosión.
- Las dimensiones del tablero deben abastecer el espacio necesario para colocar los diferentes elementos. Para este apartado es necesario tomar en cuenta las distancias mínimas de ventilación de los elementos que lo conforman.
- Doble fondo metálico.
- Protecciones magnetotérmicas para cada uno de los equipos electrónicos.
- Señalización de riesgo eléctrico en la parte externa e interna del tablero.
- Capacidad de accionamiento completo y parcial de cada uno de los elementos que ameriten elementos de protección.

Requisitos del sistema de control

- Robustez para entornos industriales.
- El *hardware* del controlador debe abastecer el número de entradas y salidas digitales, para los diferentes elementos de mando, control y señalización.
- El controlador debe permitir implementar algoritmos de control del alto desempeño.
- Las entradas digitales deben soportar funciones de conteo rápido.
- Debe contar con un puerto ethernet que soporte protocolos de comunicación industrial.

Requisitos del sistema de supervisión

- El diseño de la HMI debe tomar en cuenta los aspectos obligatorios de diseño basados en la norma ANSI/ISA 101 así como los que el diseñador considere importantes.
- El *software* de diseño debe permitir implementar las funciones pertinentes para el control y supervisión del automatismo.
- Optimizar el acceso a funciones críticas y a comandos de control.

Requisitos del sistema de comunicaciones.

- Se debe elegir un protocolo de comunicación industrial compatible con los elementos disponibles. Esto con el objetivo de abaratar costos y establecer una comunicación óptima.
- Capacidad de comunicación por bus en tiempo real.
- Transferencia de datos críticos en tiempo garantizado.

Requisitos del sistema de instrumentación.

- Los sensores deben cumplir con los requerimientos para un buen funcionamiento de los factores automatizados.
- Medir, controlar y monitorear los elementos del sistema.
- No deben superar el presupuesto otorgado por la empresa.

Como se pudo observar en la Figura 33 los elementos internos del tablero de control son el pilar de funcionamiento del automatismo. Por consiguiente, es el primer módulo a ser desarrollado. El segundo es el sistema de control ya que es el puente para la recepción de datos, procesamiento, comunicación y puesta en marcha de los elementos finales de control. Dicho análisis finaliza con el sistema de comunicación ya que es el encargado de comunicar los sistemas antes mencionados a excepción del sistema de instrumentación que tiene relación directa con el sistema de control.

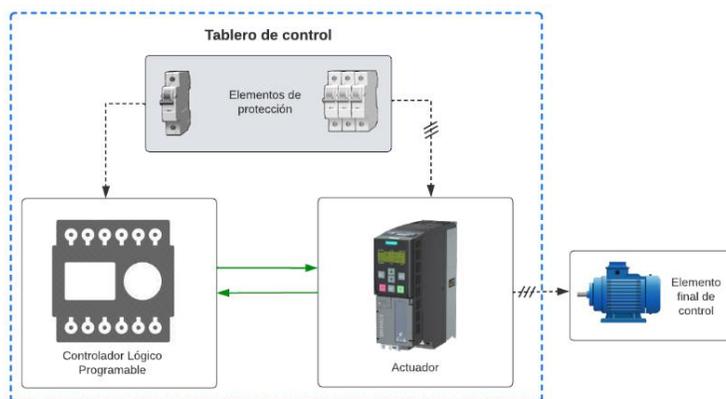
Sistemas y estructuras***Tablero de control***

En el interior del tablero de control se concentran los dispositivos de protección y maniobra, desde los cuales se pretende operar todo el automatismo o parte de él, ya sea de forma programada o manual. El desarrollo del tablero de control es fundamental, debido a que contiene los elementos que

permiten implementar las acciones de control, supervisión y comunicación. La Figura 34 presenta el diagrama preliminar del tablero de control haciendo énfasis a la conexión eléctrica entre elementos.

Figura 34.

Estructura general del tablero de control.

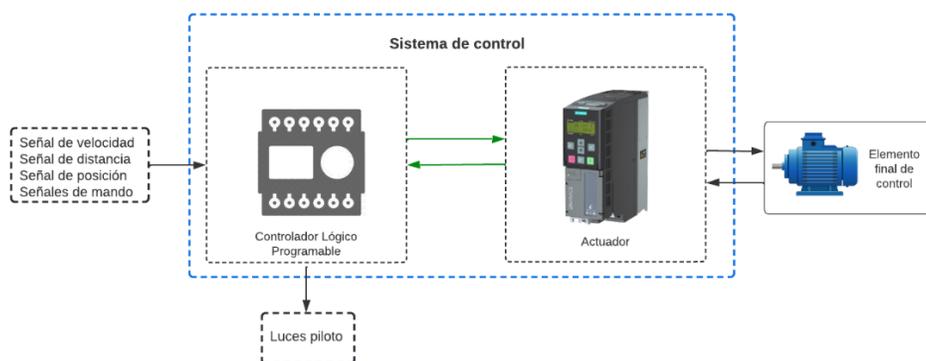


Sistema de control

Encargado de la recepción, procesamiento y respuesta de los datos obtenidos por los diferentes sensores del automatismo. El sistema deberá ser capaz de implementar estrategias y acciones de control que permitan mantener una velocidad constante en el tramo vertical del prototipo, además es el encargado de poner en marcha la lógica de funcionamiento del proceso secuencial. En la Figura 35 se presenta la estructura general del sistema de control.

Figura 35.

Estructura general del sistema de control

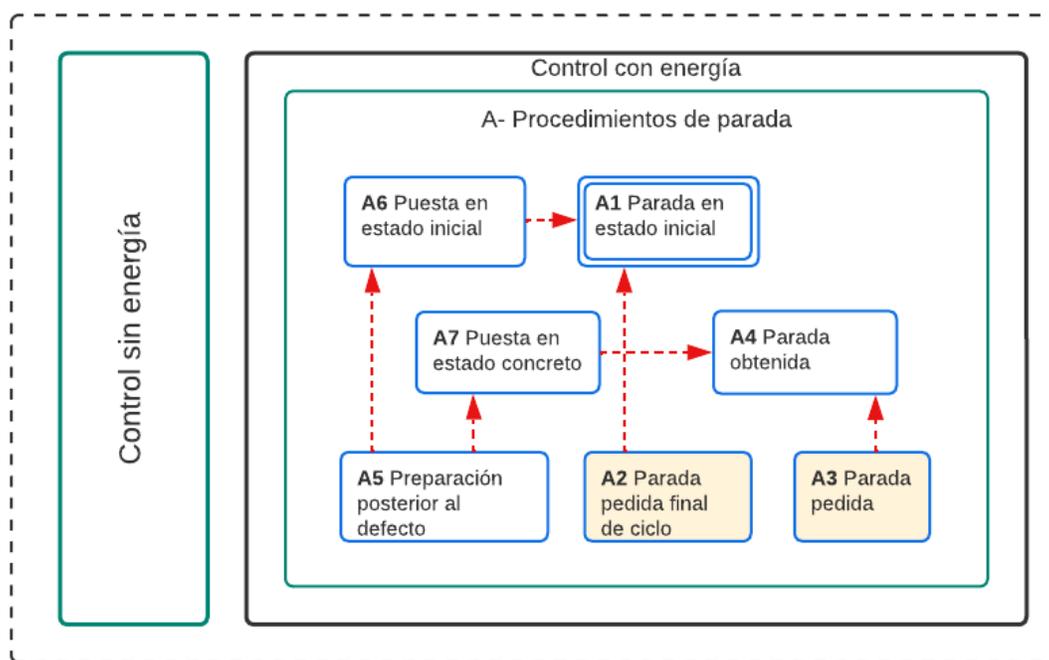


Para establecer de forma clara y concisa los modos de funcionamiento y parada posibles a implementar en el sistema de control es primordial utilizar la guía de modos de marcha y paros (guía GEMMA). Este enfoque se lo ha dividido por secciones, entre las cuales se presentan las secciones: A. Procedimientos de parada, F. Procedimientos de funcionamiento y D. Proceso en defecto. A continuación, se presentan los diferentes modos de funcionamiento posibles a implementar para brindar soluciones específicas de automatización asegurando un enfoque guiado y sistemático.

A. Procedimientos de parada. El procedimiento de parada (Figura 36) cuenta con 7 estados que hacen referencia a las paradas normales o a las marchas que conducen a estas paradas (Rodríguez Urrego, 2010). La descripción de cada uno se presenta a continuación en la Tabla 10.

Figura 36.

Procedimientos de parada.



Nota. Los estados con color de fondo hacen referencia a los estados involucrados con la producción.

Tabla 10.

Descripción de los estados del módulo "A. procedimiento de parada".

Estado	Descripción
A1. Parada en estado inicial	Hace referencia al estado inicial del automatismo y se lo representa con una doble línea al igual que en el GRAFCET. Este estado es el punto de partida para el módulo F. Proceso en funcionamiento y sus estados correspondientes.
A2. Parada pedida final de ciclo	En este estado el automatismo es llamado a terminar el ciclo de producción normal. Es así que el sistema continúa con su funcionamiento normal hasta terminar dicho ciclo.
A3. Parada pedida	El automatismo se detiene en un estado solicitado por el operador diferente del estado inicial o final, se puede decir que es como un pause en cualquier etapa de funcionamiento normal.
A4. Parada obtenida	Es un estado transitorio al que se llega al solicitar el estado A3, Se lo congela al automatismo en este estado, hasta que el operador solicite retomar con la producción normal.
A5. Preparación posterior al defecto	Se realizan las operaciones necesarias para una nueva puesta en marcha después de un fallo.
A6. Puesta en estado inicial	Se lleva al automatismo a condiciones iniciales para dar inicio al estado A1. Se puede acceder a este estado desde el estado F4 y D1
A7. Puesta en estado concreto	En este estado, el automatismo es llevado a un estado distinto al inicial para una nueva puesta en marcha.

Una vez definidas cada una de las funciones de los estados que conforman el módulo A se plantea utilizar 6 de los 7 estados disponibles los cuales son: A1, A2, A3, A4, A5, A6. El estado A7 no es utilizado ya que para dar inicio al proceso es crucial empezar con las condiciones iniciales de funcionamiento. Por otra parte, los 6 módulos restantes permiten obtener una parada en el estado inicial por lo cual resultan indispensables.

F. Procedimientos de funcionamiento. En el módulo F de procedimientos de funcionamiento (Figura 37) se incluyen todos los estados necesarios para la producción, dicho módulo cuenta con 6 estados que hacen referencia a los posibles modos de producción o a aquellos que resultan indispensables para la puesta en marcha del automatismo. La descripción de cada uno se presenta a continuación en la Tabla 11.

Figura 37.

Proceso en funcionamiento

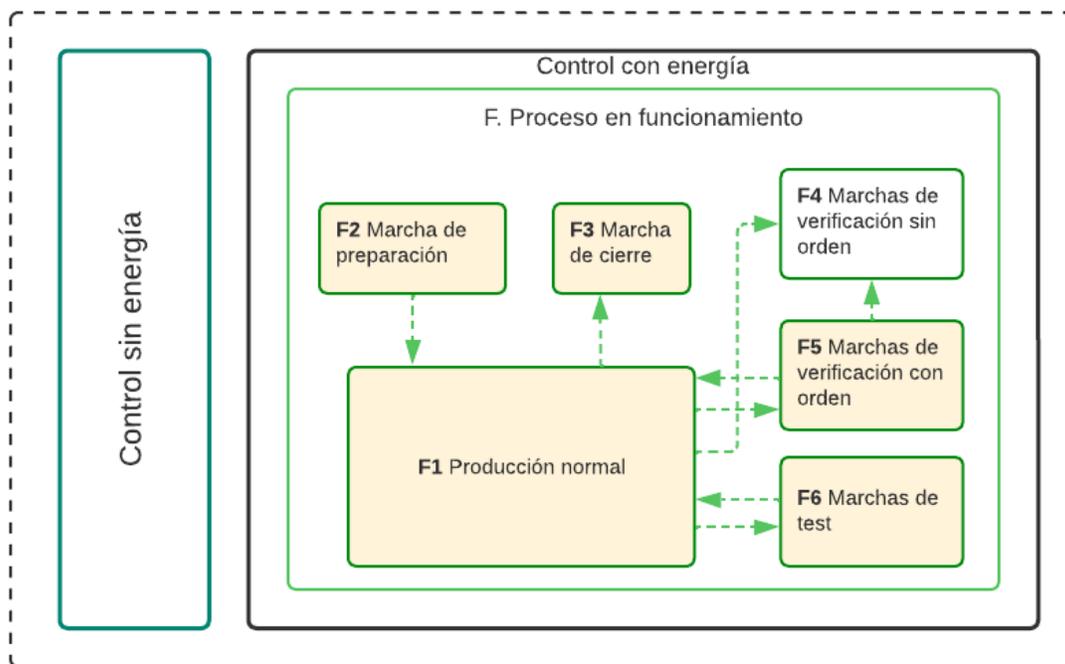


Tabla 11.

Descripción de los estados del módulo "F. Proceso de funcionamiento".

Estado	Descripción
F1. Producción normal	En este estado de producción ocurre el funcionamiento secuencial normal programado en el controlador, es decir en su interior se encuentra el algoritmo básico expresado en el GRAFCET de Producción (Rodríguez Urrego, 2010) .
F2. Marcha de preparación	En este estado se realizan operaciones antes de pasar a la producción norma. Es así que tiene lugar la producción normal con condiciones óptimas de funcionamiento.
F3. Marcha de cierre	Incluye operaciones de cierre antes de realizar la parada del sistema, un ejemplo puede ser el vaciado, limpieza, enfriamiento u otros (Rodríguez Urrego, 2010).
F4. Marcha de verificación sin orden	Conocido como modo manual del automatismo, permite realizar maniobras de algunas partes del automatismo sin respetar el orden secuencial de producción. Comúnmente se lo utiliza para calibrar los diferentes elementos del sistema.
F5. Marchas de verificación con orden	Conocido como modo semiautomático, permite verificar paso a paso el ciclo normal de producción.
F6. Marchas de test	Este estado permite realizar marchas de prueba para realizar operaciones de mantenimiento.

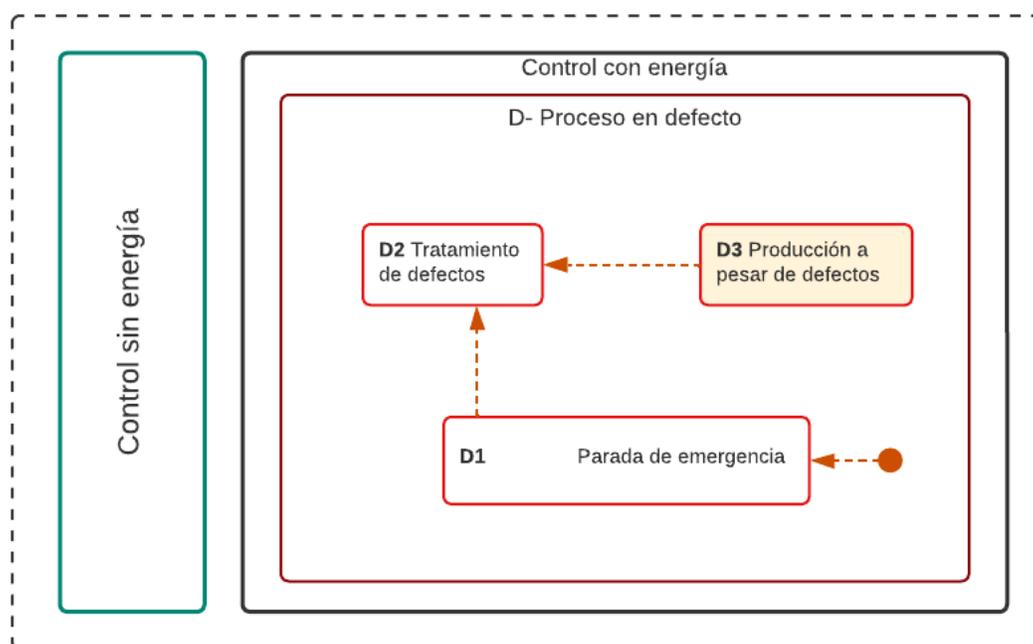
Una vez definidas cada una de las funciones de los estados que conforman el módulo F se plantea utilizar 3 de los 6 estados disponibles los cuales son: F1, F2, F4. Los estados F3, F5 y F6 no son utilizados

ya que por ejemplo el proceso no contempla un vaciado, enfriamiento o limpiado. Por otra parte, no se utiliza el modo semiautomático ya que el funcionamiento del prototipo se desarrolla en un tramo vertical continuo, por lo cual no amerita tener paradas de verificación con orden, en contraste a dicho estado se utilizan las marchas de verificación sin orden más conocidas como modo manual, en donde se pretende calibrar los distintos sensores y variables que intervienen en el proceso.

D. Proceso en defecto. En el módulo D de proceso en defecto (Figura 38) incluye las paradas ocasionadas por el funcionamiento anormal del automatismo, dicho módulo cuenta con 3 estados que hacen referencia a las posibles situaciones de emergencia y paradas por defectos. La descripción de cada uno se presenta a continuación en la Tabla 12.

Figura 38.

Proceso en defecto



Nota. La flecha con el círculo hace referencia a que es posible ingresar al estado de emergencia desde cualquier otro estado existente de la guía GEMMA.

Tabla 12.

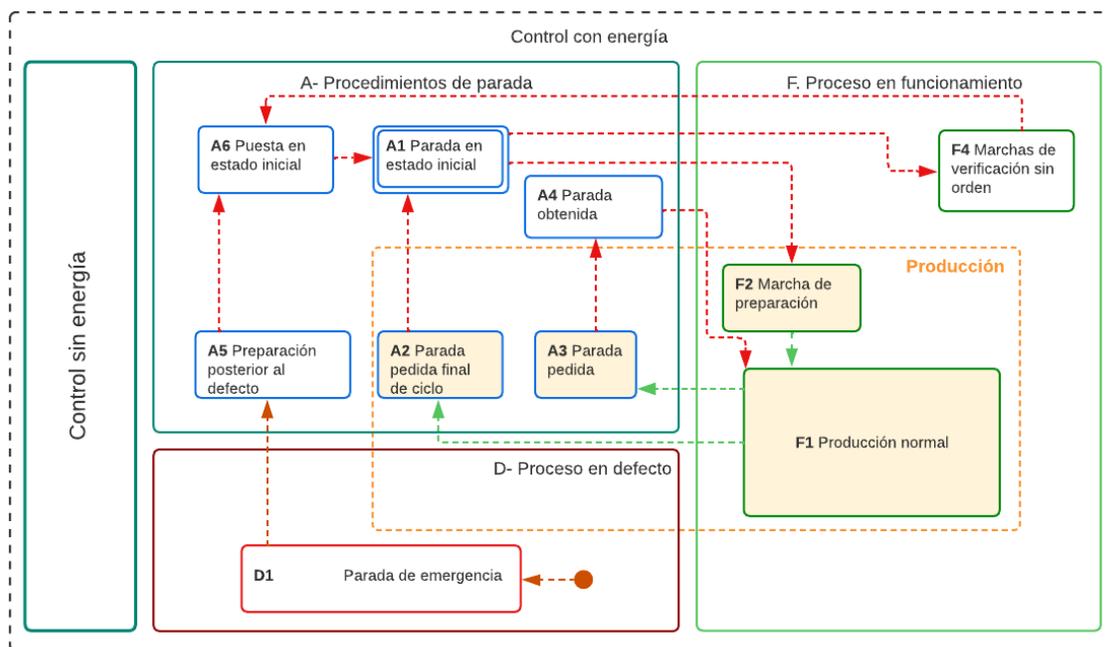
Descripción de los estados del módulo "D. Proceso en defecto".

Estado	Descripción
D1. Parada de emergencia	Estado al cual llega el automatismo después de cualquier situación de emergencia desde cualquier estado de funcionamiento. En este estado lo primordial es llevar al automatismo a una condición que no represente un peligro para los operadores o para la misma máquina.
D2. Tratamiento de defectos	En este estado el automatismo puede ser examinado después de un fallo, se puede proporcionar un diagnóstico o tratamiento de los defectos.
D3. Producción a pesar de defectos	Contempla la posibilidad del funcionamiento del automatismo debido a algún fallo leve que no influye en la producción normal.

Una vez definidas cada una de las funciones de los estados que conforman el módulo D se plantea utilizar 1 de los 3 estados disponibles el cual es: D1. Los estados D2 y D3 no son utilizados ya que el tratamiento de defectos se efectúa en el estado A5 del módulo de procedimientos de parada en donde el algoritmo asegura que antes de una puesta en marcha todas las variables se encuentren en condiciones óptimas de funcionamiento. Por otra parte, es imposible aplicar el estado D3, ya que bajo ninguna condición el automatismo deberá funcionar con situaciones de defecto. Es así que después de haber definido la estructura de funcionamiento del automatismo se ilustra en la Figura 39 un bosquejo de la guía GEMMA que presenta los estados posibles del automatismo de manera general.

Figura 39.

Guía GEMMA.



Nota. Al ser una representación general se presentan las conexiones entre estados con líneas entrecortadas. En el siguiente capítulo se presenta la guía GEMMA con las condiciones de transición a cada estado en base a la lógica de programación.

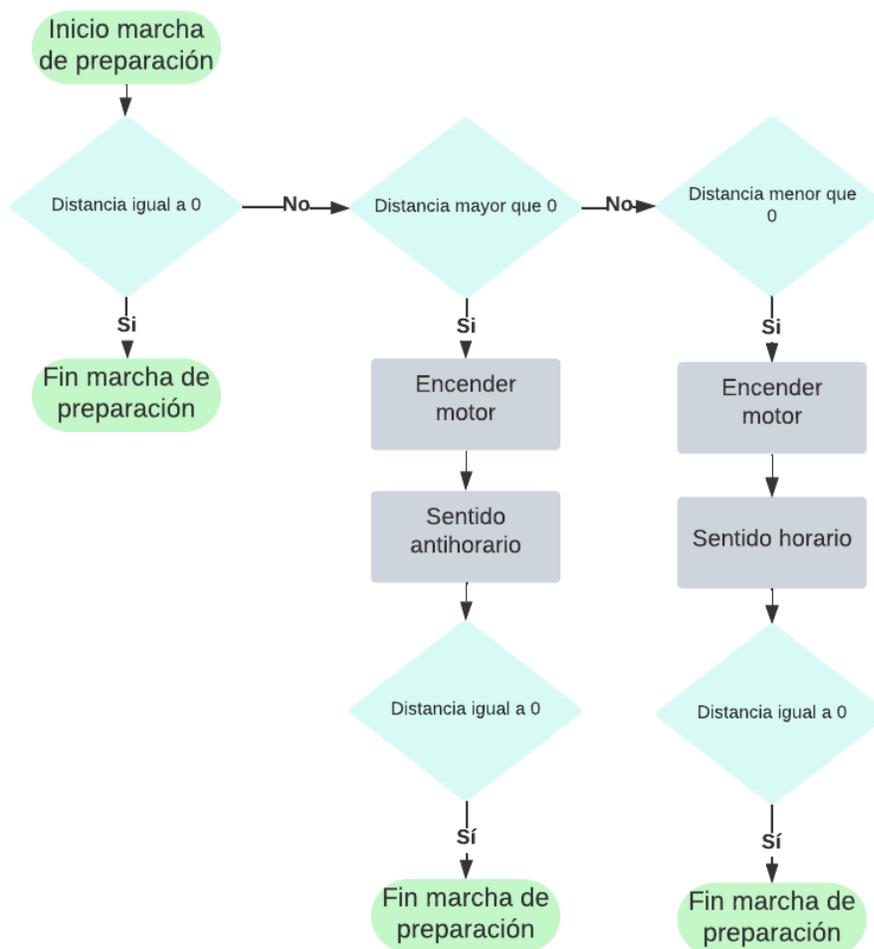
Estructura general de funciones. Una vez se hayan definido los estados de funcionamiento del automatismo es necesario brindar un acercamiento a la lógica de programación que se pretende implementar en el sistema de control. Es así que a continuación se representa dicho algoritmo mediante diagramas de flujo de los 3 módulos siguientes:

- A. Procedimiento de parada
- F. Proceso de funcionamiento
- D. Proceso en defecto

A. Procedimiento de parada. En este apartado se presenta la lógica de programación para las diferentes situaciones en las que el automatismo necesita ingresar a los estados A1, A5 y A6, para lo cual es necesario diseñar una función que permita realizar un rearme para posicionar al automatismo en condiciones iniciales de funcionamiento. En la Figura 40 se presenta el diagrama de flujo de dicha función.

Figura 40.

Subrutina de marcha de preparación.



F. Proceso de funcionamiento. En este apartado se presenta la lógica de programación del proceso de producción, como se mencionó anteriormente en este módulo se implementan los estados F1, F2 y F4 de la guía GEMMA. La lógica de programación de este apartado debe permitir al automatismo

realizar secuencias de producción normal, marchas de preparación y la implementación de un modo de marcha automático. En las Figuras 41,42 y 43 se presenta el diagrama de flujo de dicho módulo.

Figura 41.

Diagrama del módulo de proceso en funcionamiento.

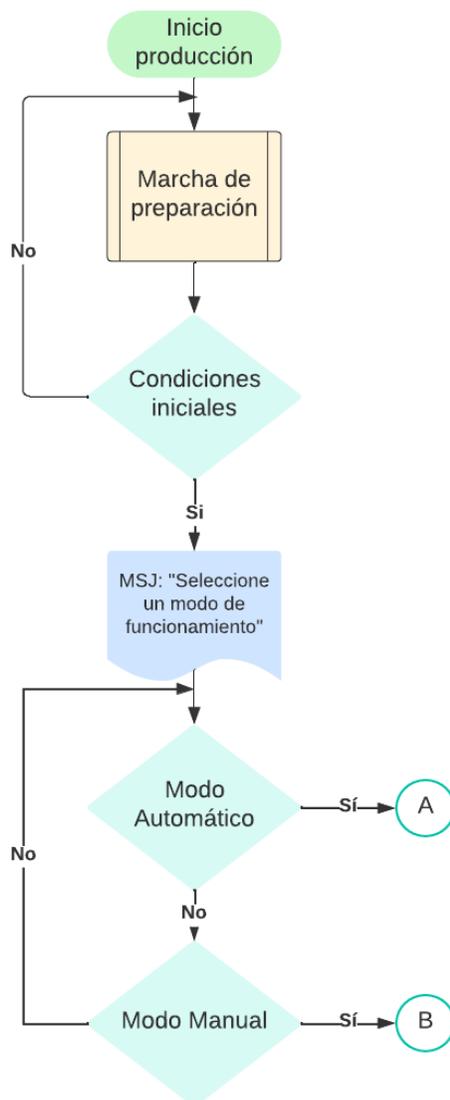


Figura 42.

Diagrama del estado F1 de producción normal.

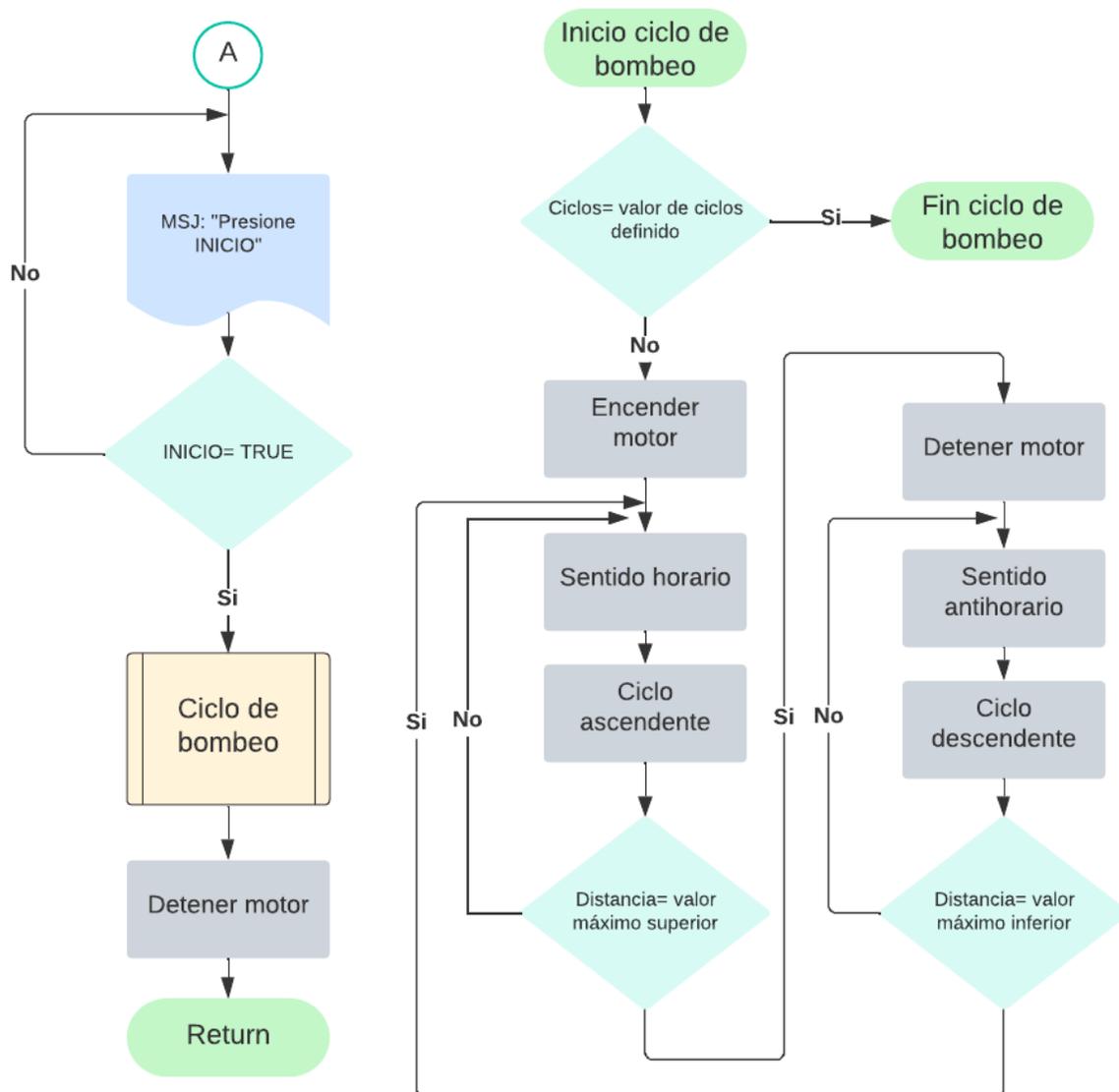
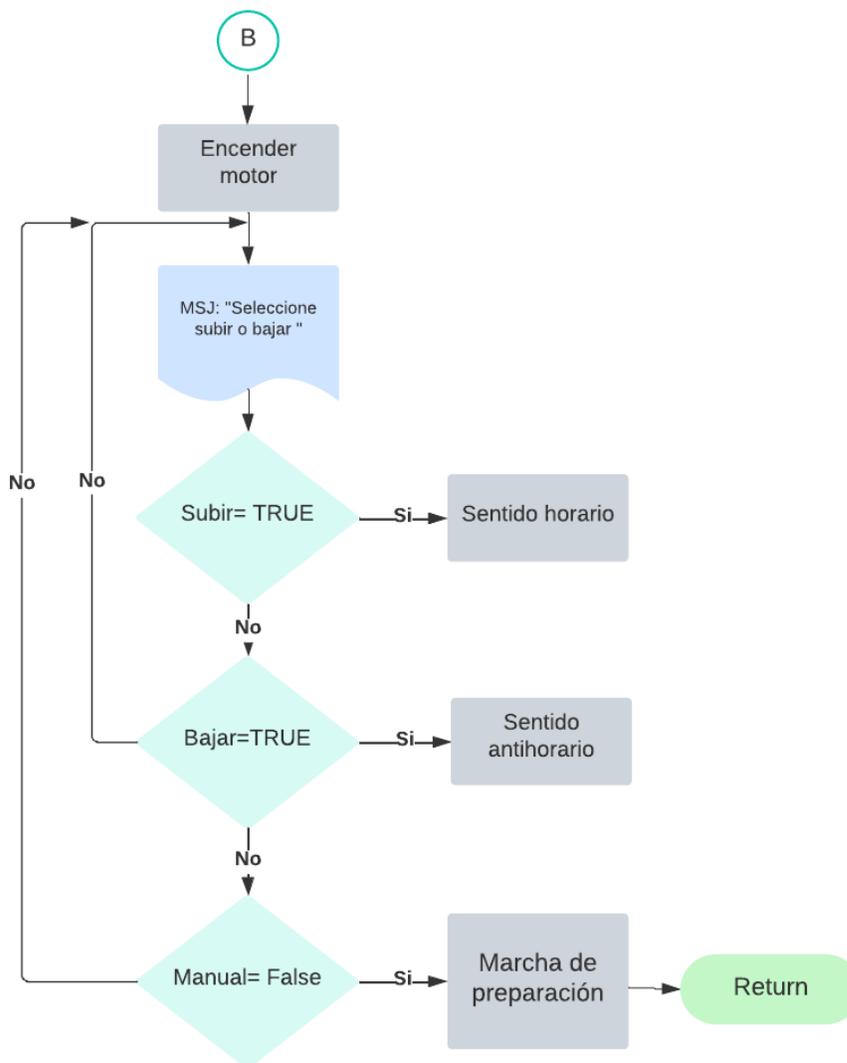


Figura 43.

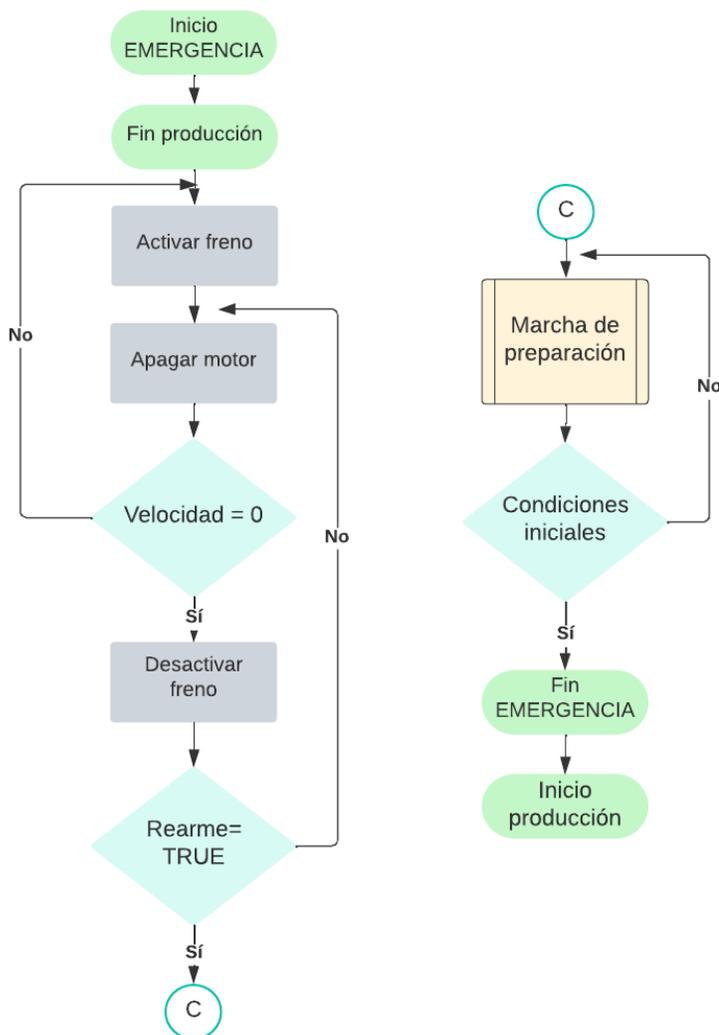
Diagrama del estado F4 de marchas de verificación sin orden



D. Proceso en defecto. En este apartado se presenta la lógica de programación para las situaciones de emergencia en los que el automatismo necesita realizar acciones específicas para llevarlo a condiciones seguras tanto para el operador como para el propio mecanismo. Para lo cual se implementa el estado D1 del módulo de proceso en defecto. En la Figura 44 se presenta el diagrama de flujo de dicha función.

Figura 44.

Diagrama del estado D1 de parada de emergencia.

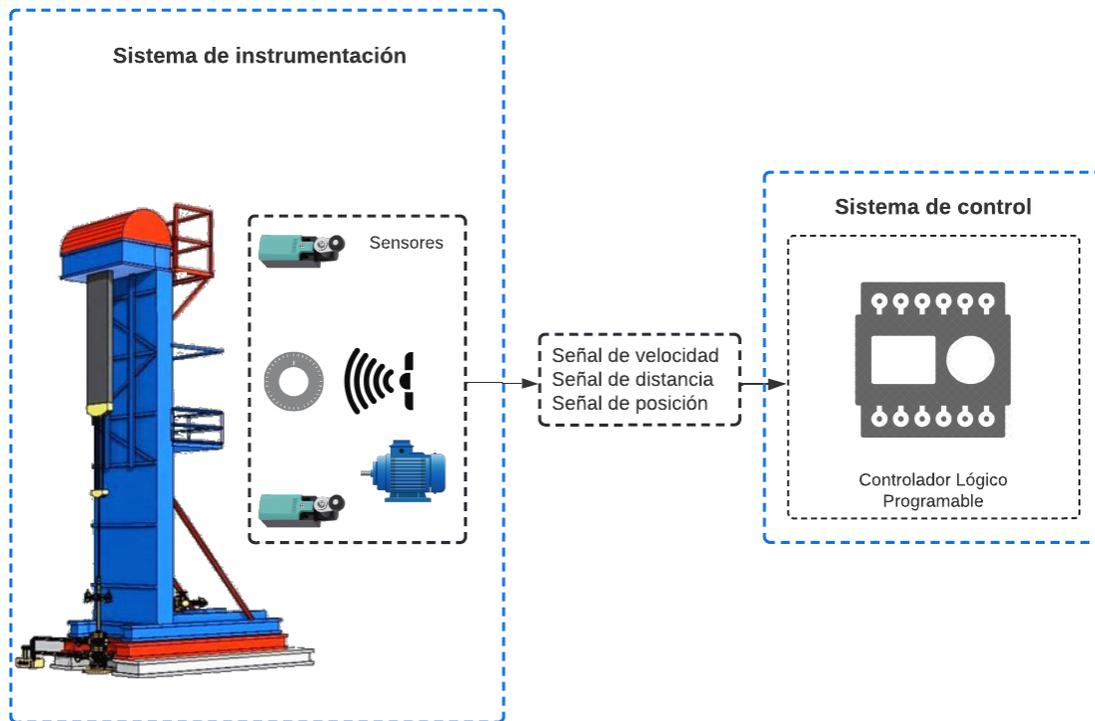


Sistema de instrumentación

Sistema encargado de medir las variables físicas del sistema. Dicho sistema permite implementar varias funciones previstas para el desarrollo del sistema de control y supervisión para lo cual es necesario implementar sensores que aseguren el funcionamiento en condiciones normales de producción, los mismos también son los encargados de llevar al automatismo a cualquiera de las situaciones de emergencia a ser implementadas. En la Figura 45 se presenta la estructura general del sistema de instrumentación.

Figura 45.

Estructura general del sistema de instrumentación

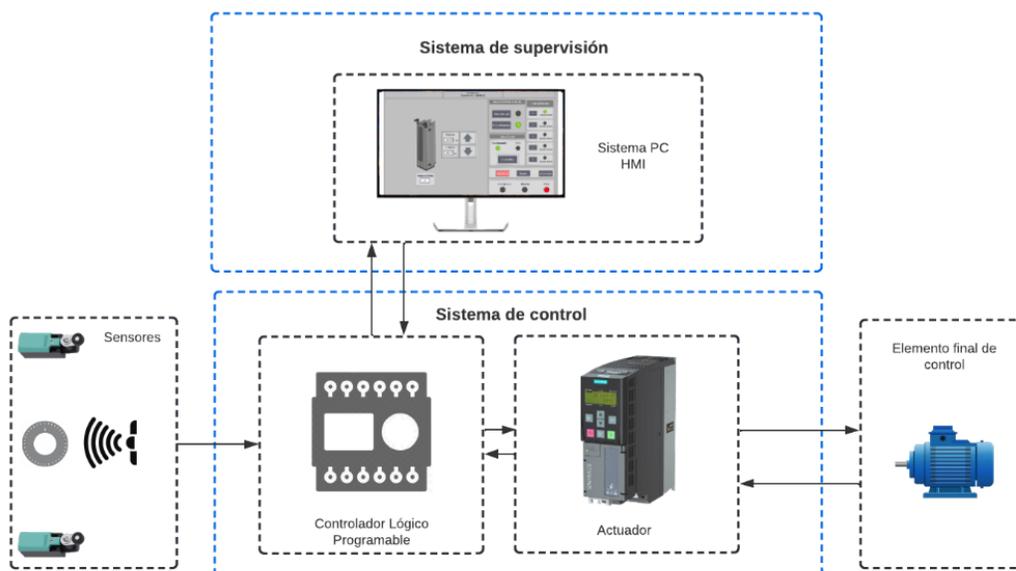


Sistema de supervisión

Las funciones que conforman el sistema de supervisión se basan en los requerimientos del usuario, eso debido a que es en este sistema donde el operador interactúa de forma indirecta con el mecanismo. No obstante, resulta necesario que la interfaz proporcione información útil por medio de los diferentes sensores, actuadores y elementos finales de control. Por otra parte, la interfaz gráfica (HMI) es la encargada de enviar los requerimientos del operador hacia el controlador, el cual procesa dicha solicitud y brinda respuestas en base a la lógica de programación. En la Figura 46 se presenta la estructura general del sistema de instrumentación.

Figura 46.

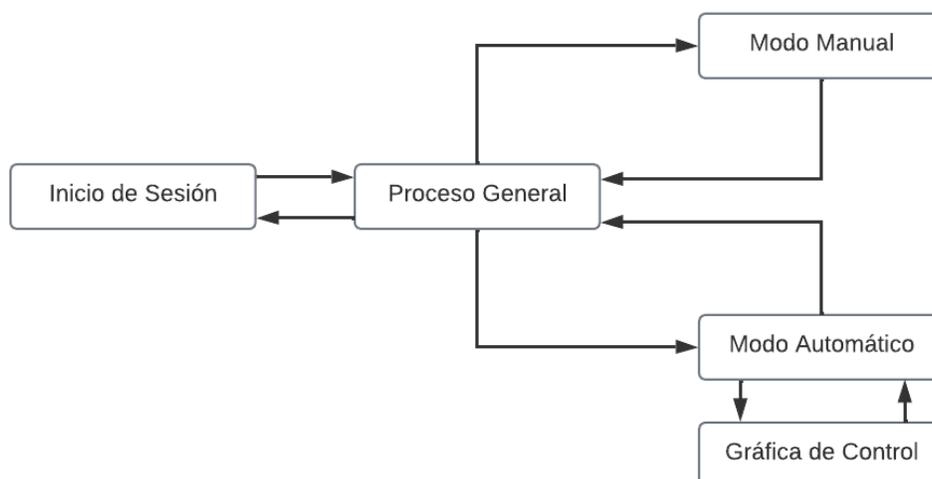
Estructura general del sistema de supervisión.



Se prevé que el sistema de supervisión esté compuesto por 5 imágenes, las cuales tratan de abarcar todas las necesidades del automatismo. Es así, que resulta importante plantear un esquema de navegación (Figura 47) del sistema que permita entender a grosso modo el funcionamiento de cada una de ellas.

Figura 47.

Esquema de navegación entre pantallas.



Para el diseño de cada una de estas ventanas es necesario establecer algunos requerimientos en base a la norma ANSI/ISA-101 que permitan presentar un diseño general de lo que se espera que la interfaz gráfica tenga. Es así, que en la Tabla 13 se presenta un grupo de requerimientos por cada ventana del esquema de navegación, las mismas deberán proporcionar un grupo de ideas previas a su implementación. Por último, en la Figura 48 se presenta un diseño genérico de cada una de estas ventanas.

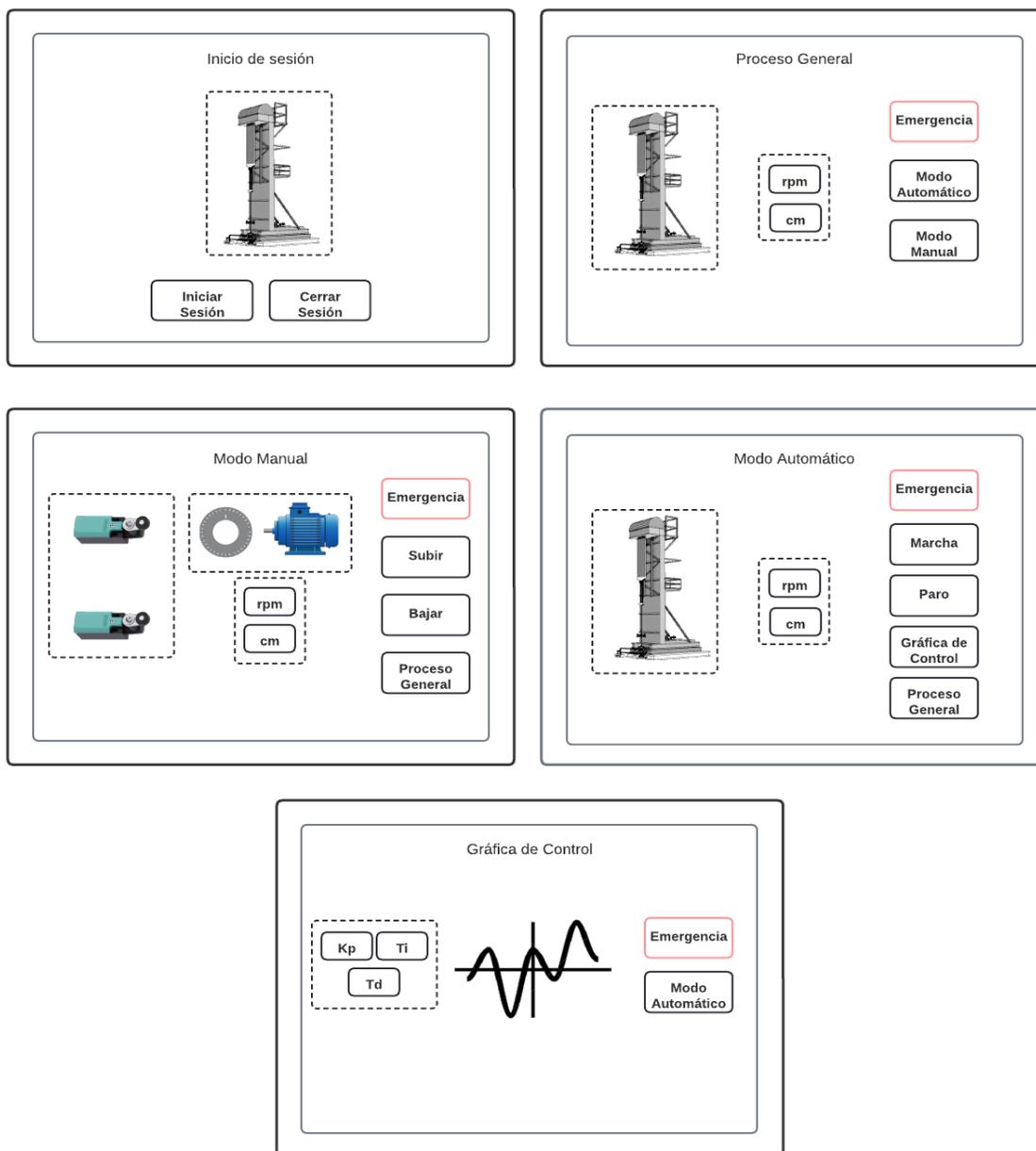
Tabla 13.

Requerimientos de las ventanas del sistema de supervisión.

Imagen	Requerimiento
Inicio de sesión	Niveles de acceso con permisos a funcionalidades específicas según el tipo de usuario.
Proceso general	Presentar la estructura general del sistema, menú de elección de los modos de funcionamiento y la capacidad de activar acciones de seguridad.
Modo manual	Capacidad de calibrar y posicionar los diferentes elementos que conforman el automatismo
Modo automático	Capacidad de realizar el accionamiento de producción normal del sistema, adquirir y tratar datos provenientes del elemento final de control (variador)
Gráfica de control	Capacidad de modificar los parámetros de control por un usuario autorizado y la opción de presentar la gráfica de control.

Figura 48.

Diseño genérico de las ventanas de supervisión.



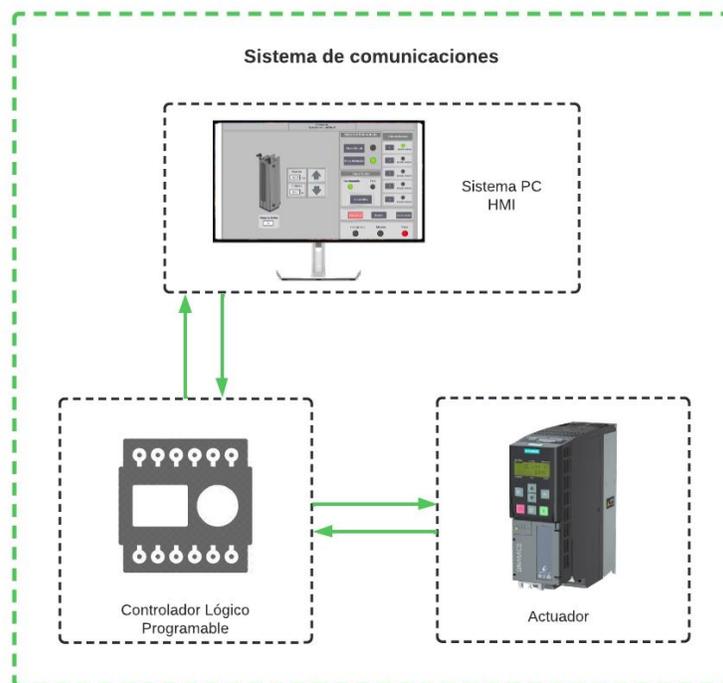
Sistema de comunicaciones

La comunicación entre dispositivos (Figura 49). Debe permitir el intercambio de datos cíclicos entre el controlador, actuador y sistema de supervisión. Para esto se debe elegir un protocolo de comunicación industrial compatible con los elementos del sistema. No obstante, dicho protocolo debe

permitir establecer la comunicación en tiempo real y garantizar la transferencia de datos en tiempo crítico, entre los elementos de control, accionamiento y supervisión. Solo así se podrá asegurar el funcionamiento óptimo de todos los otros sistemas del automatismo.

Figura 49.

Estructura general del sistema de comunicaciones.



Capítulo 4

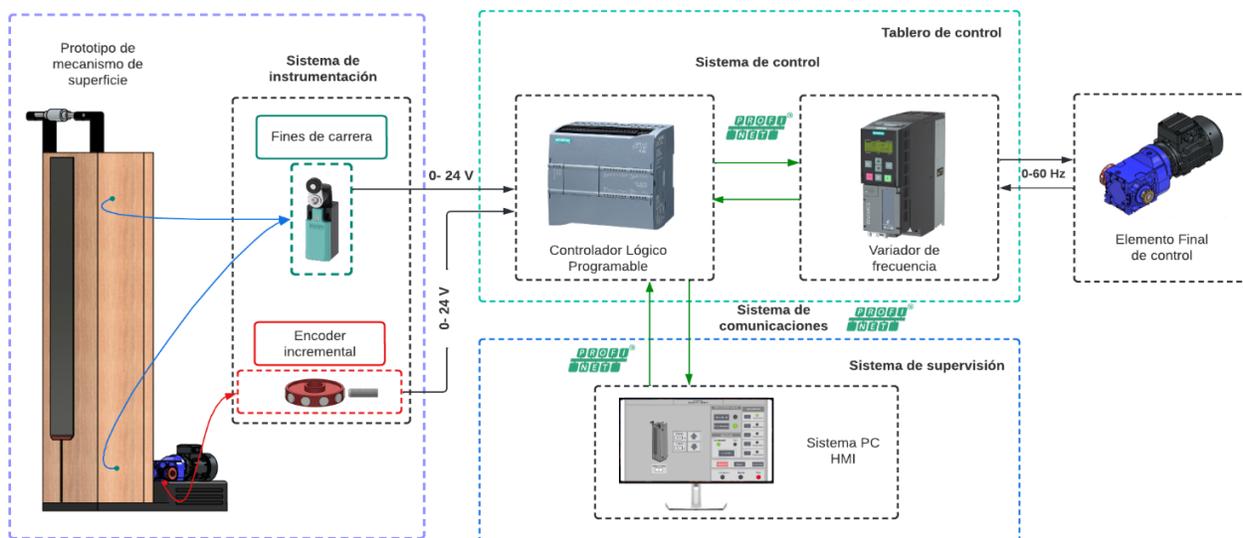
Ingeniería de Detalle

Introducción

Una vez se hayan planteado los conceptos metodológicos necesarios, los requerimientos y estructuras básicas para el desarrollo del sistema, se procede a definir las herramientas y tecnologías necesarias para implementar los niveles de proceso, campo y célula. Para esto el capítulo sigue el siguiente orden metodológico: selección de equipos, características de hardware, diseño e implementación de: tablero de control, sistema de control, sistema de instrumentación, sistema de supervisión, sistema de comunicaciones. La Figura 50 ilustra de manera simplificada las herramientas empleadas en el sistema.

Figura 50.

Módulos del sistema a detalle.



Nota. Detalles sobre la estructura interna del mecanismo serán omitidos debido al acuerdo de confidencialidad firmado con la empresa.

Selección de equipos

Para la selección de los diferentes elementos que conformarán el automatismo, se tomaron en cuenta aspectos técnicos, conceptuales y económicos, de tal manera que sea posible obtener un resultado de alto nivel ingenieril. A continuación, se presenta un análisis funcional que permitirá determinar la solución más conveniente. Es así, que la ponderación se establece en un rango de 0 a 1 donde 0 representa criterio secundario y 1 criterio principal.

Tablero de control

Las alternativas de solución y criterios de valoración considerados para el apartado del gabinete de control son las siguientes:

- Alternativa 1: Tablero metálico Schneider Electric Spacial CRN NSYCRN86250.
- Alternativa 2: Tablero metálico Beaucoup GSL – 806025.
- Costo accesible.
- Estándares y normas.
- Dimensiones.

Tabla 14.

Evaluación de criterios para la selección del gabinete de control.

Criterios	Costo accesible	Estándares y normas	Dimensiones	$\sum +1$	Ponderación	Orden
Costo accesible	x	0.5	0.5	2	0.33	2
Estándares y normas	0.5	x	0	1.5	0.25	3
Dimensiones	0.5	1	x	2.5	0.42	1
Suma				6	1	

Nota. La estructura visual de las tablas utilizadas para todo el análisis funcional hace referencia a los autores (Sotomayor Cardenas & Castellanos Villa , 2016)

En la Tabla 14 se observa que el criterio “Dimensiones” es el de mayor prioridad. El mismo hace referencia a la disponibilidad de varios tipos de dimensiones de gabinetes, con el objetivo de abastecer a los diferentes dispositivos de mando, control y señalización.

Tabla 15.

Evaluación de las alternativas con respecto al criterio de costo accesible.

Costo accesible	Alternativa 1	Alternativa 2	$\sum +1$	Ponderación
Alternativa 1	x	0	1	0.33
Alternativa 2	1	x	2	0.66
Suma			3	1

En la Tabla 15 se observa que la alternativa 2 tiene mayor ponderación que la alternativa 1. Al cotizar las dos opciones se obtuvo que el precio de la Alternativa 1 excedía por casi el doble al de la Alternativa 2.

Tabla 16.

Evaluación de las alternativas con respecto al criterio de estándares y normas.

Estándares y normas	Alternativa 1	Alternativa 2	$\sum +1$	Ponderación
Alternativa 1	x	1	2	0.66
Alternativa 2	0	x	1	0.33
Suma			3	1

En la Tabla 16 se observa que la alternativa 1 tiene mayor ponderación que la alternativa 2. Schneider Electric al ser una empresa de carácter internacional cuenta con un conjunto más amplio de certificaciones. Por otra parte, el tablero de la marca Beaucoup cumple con los estándares y normas necesarios para gabinetes industriales.

Tabla 17.

Evaluación de las alternativas respecto al criterio de dimensiones.

Dimensiones	Alternativa 1	Alternativa 2	$\Sigma +1$	Ponderación
Alternativa 1	x	0.5	1.5	0.5
Alternativa 2	0.5	x	1.5	0.5
Suma			3	1

En la Tabla 17 se observa que ambas alternativas disponen de un amplio catálogo de gabinetes que cumplen con los requerimientos del proyecto.

Tabla 18.

Conclusión sobre la elección del tablero de control.

Conclusiones	Costo accesible	Estándares y normas	Dimensiones	Σ	Prioridad
Alternativa 1	0.33 × 0.33	0.66 × 0.25	0.5 × 0.42	0.48	2
Alternativa 2	0.66 × 0.33	0.33 × 0.25	0.5 × 0.42	0.51	1

Para concluir con la selección del tablero de control, en Tabla 18 se observa que la solución de mayor prioridad es la alternativa 2: Tablero metálico Beaucoup GSL – 806025.

Sistema de control

El sistema de control hace referencia al controlador lógico programable. Las alternativas y criterios de valoración para este apartado son las siguientes:

- Alternativa 1: PLC SIEMENS 6ES7 212-1BE40-0XB0 S7-1200 1214 AC/DC/RLY.
- Alternativa 2: TM221CE40R Schneider Electric CPU compacta AC 24E/16S Relé Ethernet.
- Características de *hardware* y *software*.
- Estrategia de control.
- Costo accesible.
- Flexibilidad.

Tabla 19.

Evaluación de criterios para la selección del sistema de control.

Criterios	Característica s de <i>hardware</i> y <i>software</i>	Estrategi a de control	Costo accesibl e	Flexibilida d	$\sum +1$	Ponderació n	Orden
Característica s de <i>hardware</i> y <i>software</i>	x	0.5	0.5	1	3	0.3	1
Estrategia de control	0.5	x	0.5	0.5	2.5	0.25	2
Costo accesible	0.5	0.5	x	1	3	0.3	1
Flexibilidad	0	0.5	0	x	1.5	0.15	3
Suma					10	1	

En la Tabla 19 se observa que el criterio “Costo accesible “y “Características de *hardware*, *software*” son los de mayor prioridad debido a que las características del PLC están relacionadas directamente con el capital que se invierte.

Tabla 20.

Evaluación de las alternativas respecto al criterio de características de hardware y software.

Características de hardware y software	Alternativa 1	Alternativa 2	$\sum +1$	Ponderación
Alternativa 1	x	0.5	1.5	0.5
Alternativa 2	0.5	x	1.5	0.5
Suma			3	1

En la Tabla 20 se observa que ambas alternativas cumplen con las características mínimas que se requieren para el proyecto. En cuanto a características de *hardware* el PLC M221 ofrece un mayor número de entradas y salidas. Sin embargo, al hablar de *software* el PLC SIEMENS cuenta con mejores características.

Tabla 21.

Evaluación de las alternativas con respecto al criterio de estrategia de control.

Estrategia de control	Alternativa 1	Alternativa 2	$\sum +1$	Ponderación
Alternativa 1	x	1	2	0.66
Alternativa 2	0	x	1	0.33
Suma			3	1

En la Tabla 21 se observa que la alternativa 1 tiene una mayor ponderación. Al revisar la hoja de datos de cada alternativa se identificó que cada una cuenta con la posibilidad de implementar estrategias de control tanto PI como PID. La única diferencia es que el PLC de la marca SIEMENS cuenta con la herramienta *PID Autotune*.

Tabla 22.

Evaluación de las alternativas respecto al criterio de costo accesible.

Costo accesible	Alternativa 1	Alternativa 2	$\sum +1$	Ponderación
Alternativa 1	x	0	1	0.33
Alternativa 2	1	x	2	0.66
Suma			3	1

En la Tabla 22 se observa que la alternativa 2 tiene una mayor ponderación. Al cotizar las dos alternativas se obtuvo que el precio de la alternativa 1 era mayor al precio de la alternativa 2.

Tabla 23.

Evaluación de las alternativas respecto al criterio de flexibilidad.

Costo accesible	Alternativa 1	Alternativa 2	$\sum +1$	Ponderación
Alternativa 1	x	1	2	0.66
Alternativa 2	0	x	1	0.33
Suma			3	1

En la Tabla 23 se observa que la alternativa 1 tiene una mayor ponderación. El PLC de la marca SIEMENS ofrece mayor soporte en cualquiera de sus aplicaciones. Un ejemplo es la plataforma de *Ignition*

que no permite establecer conexión con dispositivos de la marca Schneider Electric. Por otra parte, ambas soluciones utilizan protocolos de comunicación que permiten la interconexión con elementos de otras marcas.

Tabla 24.

Conclusión sobre la elección del sistema de control.

Conclusiones	Características de <i>hardware</i> y <i>software</i>	Estrategia de control	Costo accesible	Flexibilidad	Σ	Prioridad
Alternativa 1	0.5 × 0.3	0.66 × 0.25	0.33 × 0.3	0.66 × 0.15	0.513	1
Alternativa 2	0.5 × 0.3	0.33 × 0.25	0.66 × 0.3	0.33 × 0.15	0.48	2

Para concluir con la selección del sistema de control, en la Tabla 24 se observa que la solución de mayor prioridad es la alternativa 1: PLC SIEMENS S7-1200. A pesar de que su costo es más elevado que el de la alternativa 2 la empresa MECANOIL S.A. optó por adquirir la alternativa 1.

Sistema de comunicación

El sistema de comunicación hace referencia al protocolo de comunicación industrial que se va a utilizar entre el PLC y el variador de frecuencia.

- Alternativa 1: PLC SIEMENS S7-1200 y Variador de frecuencia SINAMICS G120X comunicación Profinet.
- Alternativa 2: PLC SIEMENS S7-1200 y Variador de frecuencia ATV320 comunicación Modbus.

Los criterios de valoración considerados para este apartado son los siguientes:

- Características de *hardware*.

- Costo accesible.
- Disponibilidad

Tabla 25.

Evaluación de criterios para la selección del sistema de comunicaciones.

Criterios	Características de <i>hardware</i>	Costo accesible	Disponibilidad	$\sum +1$	Ponderación	Orden
Características de <i>hardware</i>	x	0.5	0.5	2	0.33	2
Costo accesible	0.5	x	0	1.5	0.25	3
Disponibilidad	0.5	1	x	2.5	0.42	1
Suma				6	1	

En la Tabla 25 se observa que el criterio de “Disponibilidad” es el de mayor prioridad. Es importante que el variador que se seleccione se encuentre disponible en el mercado ecuatoriano y cumpla con las características de hardware necesarias.

Tabla 26.

Evaluación de las alternativas con respecto al criterio de características de hardware.

Características de <i>hardware y software</i>	Alternativa 1	Alternativa 2	$\sum +1$	Ponderación
Alternativa 1	x	1	2	0.66
Alternativa 2	0	x	1	0.33
Suma			3	1

En la Tabla 26 se observa que la alternativa 1 tiene una mayor ponderación. La alternativa 1 cuenta con varias características necesarias para el proyecto, como por ejemplo con la opción de frenado de corriente continua que se utiliza comúnmente para paradas de emergencia.

Tabla 27.

Evaluación de las alternativas con respecto al criterio de costo accesible.

Costo accesible	Alternativa 1	Alternativa 2	$\sum +1$	Ponderación
Alternativa 1	x	0	1	0.33
Alternativa 2	1	x	2	0.66
Suma			3	1

En la Tabla 27 se observa que la alternativa 2 tiene una mayor ponderación. La alternativa 1 al ofrecer mejores características tiene un costo más elevado. Cabe recalcar que para este punto se realizó la cotización de ambos equipos.

Tabla 28.

Evaluación de las alternativas respecto al criterio de disponibilidad.

Disponibilidad	Alternativa 1	Alternativa 2	$\sum +1$	Ponderación
Alternativa 1	x	0.5	1.5	0.5
Alternativa 2	0.5	x	1.5	0.5
Suma			3	1

En la Tabla 28 observa que ambas alternativas tienen la misma ponderación, esto debido a que ambas se comercializan en el mercado ecuatoriano.

Tabla 29.

Conclusión sobre la elección del sistema de comunicación.

Conclusiones	Características de <i>hardware</i>	Costo accesible	Disponibilidad	Σ	Prioridad
Alternativa 1	0.66×0.33	0.33×0.25	0.5×0.42	0.51	1
Alternativa 2	0.33×0.33	0.66×0.25	0.5×0.42	0.48	2

Se puede concluir de la Tabla 29 que la solución de mayor prioridad es la alternativa 1: PLC SIEMENS S7-1200 y variador de frecuencia SINAMICS G120X. En este apartado se tuvieron que analizar varios aspectos tanto económicos como técnicos que se explican a continuación.

El variador SINAMICS G120X se comercializa en estándares de comunicación *Profibus*, *Profinet* y *Modbus*, pero debido a que en el apartado anterior se eligió como controlador al PLC SIEMENS S7-1200, la mejor opción es utilizar la versión *Profinet* del variador, ya que para la comunicación por *Profibus* o *Modbus* habría que adquirir módulos adicionales para el PLC. Por otra parte, la alternativa 2 ofrece de fábrica el estándar de comunicación Modbus y CANopen, sin embargo, el fabricante ofrece la posibilidad de adquirir módulos de conmutación *Profinet* o *Profibus* lo que representaría un gasto adicional. Al ser estándares de comunicación industrial, la comunicación entre dispositivos de diferentes marcas es posible sin ningún problema, pero la ventaja de utilizar los dos equipos de la marca SIEMENS es que su configuración resulta más intuitiva y el costo disminuye al no tener que adquirir algún módulo de comunicación.

Sistema de instrumentación

Para las variables físicas de velocidad y posición del recorrido vertical se planteó utilizar un encoder incremental pero debido a que se alcanzó el presupuesto máximo establecido para el proyecto, se decidió diseñar y construir un encoder que utiliza un sensor inductivo que la empresa ya disponía. De

esta manera el análisis de criterios para el sistema de instrumentación hace referencia a los sensores de seguridad que se utilizarán para controlar el límite máximo y mínimo del recorrido vertical. Las alternativas para este apartado son las siguientes:

- Alternativa 1: Sensor fin de carrera Schneider Electric.
- Alternativa 2: Sensores capacitivos Sick.

Los criterios de valoración considerados para este apartado son los siguientes:

- Costo accesible.
- Disponibilidad
- Robustez

Tabla 30.

Evaluación de criterios para la selección del sistema de instrumentación.

Criterios	Costo accesible	Disponibilidad	Robustez	$\sum +1$	Ponderación	Orden
Costo accesible	x	0.5	0.5	2	0.33	2
Disponibilidad	0.5	x	1	2.5	0.42	1
Robustez	0.5	0	x	1.5	0.25	3
Suma				6	1	

Como resultado de la evaluación de criterios de la Tabla 30, se observa que el criterio de “Disponibilidad” es la mayor prioridad. Es importante que el sensor que mejor se adapte al proyecto se encuentre disponible en el mercado ecuatoriano.

Tabla 31.

Evaluación de las alternativas con respecto al criterio de costo accesible.

Costo accesible	Alternativa 1	Alternativa 2	$\sum +1$	Ponderación
Alternativa 1	x	1	2	0.66
Alternativa 2	0	x	1	0.33
Suma			3	1

Como resultado de la evaluación de alternativas de la Tabla 31 se obtuvo que la alternativa 1 tiene una mayor ponderación. La alternativa 1 debido a su principio de funcionamiento es más económico que la alternativa 2.

Tabla 32.

Evaluación de las alternativas con respecto al criterio de disponibilidad

Disponibilidad	Alternativa 1	Alternativa 2	$\sum +1$	Ponderación
Alternativa 1	x	0.5	1.5	0.5
Alternativa 2	0.5	x	1.5	0.5
Suma			3	1

Como resultado de la evaluación de alternativas de la Tabla 32 se puede observar que ambas alternativas tienen la misma ponderación. Ambos sensores se encuentran disponibles en el mercado ecuatoriano.

Tabla 33.

Evaluación de las alternativas respecto al criterio de robustez.

Robustez	Alternativa 1	Alternativa 2	$\sum +1$	Ponderación
Alternativa 1	x	0.5	1.5	0.5
Alternativa 2	0.5	x	1.5	0.5
Suma			3	1

Como resultado de la evaluación de alternativas de la Tabla 33 se puede observar que ambas alternativas tienen la misma ponderación. Ambos sensores cumplen con estándares y normas internacionales que aseguran su robustez y durabilidad en entornos industriales. La única consideración a tomar en cuenta es que la alternativa 1 cuenta con partes mecánicas que con el tiempo irán perdiendo sus propiedades.

Tabla 34.

Conclusión sobre la elección del sistema de instrumentación.

Conclusiones	Costo accesible	Disponibilidad	Robustez	\sum	Prioridad
Alternativa 1	0.66×0.33	0.5×0.42	0.5×0.25	0.55	1
Alternativa 2	0.33×0.33	0.5×0.42	0.5×0.25	0.44	2

Para concluir con la selección del sistema de instrumentación, en la Tabla 34 se observa que la solución de mayor prioridad es la alternativa 1: Sensor fin de carrera Schneider Electric.

Sistema de supervisión

El objetivo del proyecto plantea realizar la simulación del sistema de supervisión más no su implementación. Las alternativas de solución para el apartado son las siguientes:

- Alternativa 1: Wonderware Intouch.
- Alternativa 2: WinCC.

Los criterios de valoración considerados para este apartado son los siguientes:

- Herramientas de diseño
- Comunicación.

Tabla 35.

Evaluación de criterios para la selección del gabinete de control.

Criterios	Herramientas de diseño	Comunicación	$\sum +1$	Ponderación	Orden
Herramientas de diseño	x	1	2	0.66	1
Comunicación	0	x	1	0.33	2
Suma			3	1	

En la Tabla 35 se observa que el criterio “Herramientas de diseño” es el de mayor prioridad. El mismo hace referencia a las herramientas que cada programa ofrece para el diseño de las interfaces.

Tabla 36.

Evaluación de las alternativas con respecto al criterio de herramientas de diseño.

Herramientas de diseño	Alternativa 1	Alternativa 2	$\sum +1$	Ponderación
Alternativa 1	x	0	1	0.33
Alternativa 2	1	x	2	0.66
Suma			3	1

En la Tabla 36 se observa que la alternativa 2 tiene mayor ponderación que la alternativa 1. Este apartado hace referencia a la experiencia del diseñador con ambas alternativas. WinCC ofrece gráficos de mayor calidad.

Tabla 37.

Evaluación de las alternativas con respecto al criterio de comunicación.

Comunicación	Alternativa 1	Alternativa 2	$\sum +1$	Ponderación
Alternativa 1	x	0	2	0.33
Alternativa 2	1	x	1	0.66
Suma			3	1

En la Tabla 37 se observa que la alternativa 2 tiene mayor ponderación que la alternativa 1. La comunicación con WinCC se establece mediante *Profinet* en el mismo *software* que se programa el PLC. Por consiguiente, asociar las variables del PLC con las de la interfaz resulta sencillo.

Tabla 38.

Conclusión sobre el sistema de supervisión.

Conclusiones	Herramientas de diseño	Comunicación	\sum	Prioridad
Alternativa 1	0.33×0.66	0.33×0.33	0.33	2
Alternativa 2	0.66×0.66	0.66×0.33	0.66	1

Para concluir con la selección del software del sistema de supervisión, en Tabla 38 se observa que la solución de mayor prioridad es la alternativa 2: WinCC. En ambas alternativas es posible realizar interfaces gráficas, pero la alternativa 1 consume más recursos del computador debido a que hay que

implementar un sistema OPC e instalar el *software* de Wonderware Intouch. Por otra parte, en la alternativa 1 la comunicación entre WinCC y el PLC SIEMENS se realiza en misma red *Profinet*.

Listado final de elementos

Como resultado de la evaluación de criterios el sistema de control estará compuesto por los siguientes componentes:

- Tablero metálico Beaucoup GSL – 806025.
- PLC Siemens 6ES7 212-1BE40-0XB0 S7-1200 1214 AC/DC/RLY.
- Variador de frecuencia SINAMICS G120X comunicación Profinet.
- Sensor fin de carrera Schneider Electric.
- Software WinCC.

Características de hardware

Con el fin de dimensionar los elementos de protección y conductores a utilizar en el proyecto, en este apartado se exponen las características técnicas de los principales elementos del automatismo.

Controlador lógico programable SIEMENS S7-1200 1214 AC/DC/RLY

El PLC de la Figura 51 cumple con los criterios establecidos en el apartado de selección de equipos del sistema de control. Es así que a continuación se detallan sus características técnicas.

Figura 51.

PLC Siemens 6ES7 212-1BE40-0XB0 S7-1200 1214 AC/DC/RLY.



Nota. Figura tomada de (Siemens, 2022).

Tabla 39.

Características técnicas PLC S7-1200.

Característica técnica	Descripción
Tensión de alimentación	120 V AC / 230 V AC
Consumo máximo de intensidad	300mA con 120 V AC
Memoria de trabajo	100 kbyte
	14 integradas a 24 V DC
Entradas digitales	6 HSC Contadores rápidos (<i>High Speed Counter</i>)
Salidas digitales	10 tipo Relé con carga máxima de 2 A
Entradas analógicas	2 entradas analógicas de tensión de 0 a 10 V
Tipo de interfaz	PROFINET
Grado de protección	IP20

Nota. Tomado de hoja de datos técnicos, (Siemens, 2022).

Motor

En la actualidad, el motor de inducción trifásica (Figura 52) es el que predomina en la industria debido a su robusta construcción, sus bajos requisitos de mantenimiento y rentabilidad. En la Tabla 40 se detallan sus características técnicas.

Figura 52.

Motor de inducción trifásico 1 HP 1LE0141-0DB36-4AA4-Z



Nota. Figura tomada de, (Siemens, 2022).

Tabla 40.

Características técnicas motor de inducción trifásico 1 HP 1LE0141-0DB36-4AA4-Z.

Característica técnica	Descripción
Tensión nominal	220 V DD/ 380V YY/ 440 V D
Frecuencia	60 Hz
Potencia Nominal	1HP
Velocidad Nominal	1705 rpm
Dirección de rotación	Bidireccional
Corriente Nominal	3.2 A/ 1.85 A/ 1.61 A
Tamaño constructivo	80M
Grado de protección	IP 55

Nota. Tomado de hoja de datos técnicos, (Siemens, 2021).

Variador de frecuencia SINAMICS G120X 6SL3220-1YC10-0UB0

El variador SINAMICS G120X de la Figura 53 cumple con los criterios establecidos en el apartado de selección de equipos del sistema de comunicación. En la Tabla 41 se detallan sus características técnicas.

Figura 53.

Variador SINAMICS G120X 6SL3220-1YC10-0UB0.



Nota. Figura tomada de (Siemens, 2022).

Tabla 41.

Características técnicas variador SINAMICS G120X 6SL3220-1YC10-0UB0.

Característica técnica	Descripción
Número de fases de entrada	3
Potencia nominal	1.1 kW--- 1.5HP
Corriente nominal	5.4 A
Voltaje de línea	200...240 V +10 % -20%
Frecuencia de línea	47... 63 Hz
Entradas digitales	6
Salidas digitales	2 tipo Relé
Entradas analógicas	2 conmutable (corriente/ tensión)

Característica técnica	Descripción
Salidas analógicas	1 conmutable (corriente/tensión)
Grado de protección	IP 20
Protocolo de comunicación	<i>Profinet</i>

Nota. Tomado de hoja de datos técnicos, (Siemens, 2022).

Switch Ethernet TL-SG1005D

Debido al número de dispositivos que se requiere conectar a la red *Profinet* resulta necesario implementar un *Switch Ethernet*. Este dispositivo está pensado de igual manera para aplicaciones futuras sobre el prototipo, como incluir una HMI o quizás otro PLC para implementar un sistema instrumentado de seguridad SIS. En la Tabla 42 se detallan sus características técnicas.

Figura 54.

Switch Ethernet TL-SG1005D.



Nota. Figura tomada de (tp-link, 2022).

Tabla 42.

Características técnicas Switch Ethernet TL-SG1005D

Característica técnica	Descripción
Fuente de alimentación externa	100-240 V AC, 50/60 Hz

Característica técnica	Descripción
Consumo máximo de energía	3,4 W
Interface	5 puertos RJ45 10/100/1000 Mbps
Transferencia de datos	IEEE 802.3x
Certificación	FCC, CE, RohS

Nota. Tomado de hoja de datos técnicos, (tp-link, 2022).

Elementos de señalización

Las luces piloto (Figura 55) utilizadas para el apartado de señalización cumplen con las mismas características eléctricas y de construcción entre ellas. Los modelos utilizados son: XA2EVF5LC, XA2EVF4LC, XA2EVF3LC de la marca Schneider Electric. En la Tabla 43 se detallan sus características técnicas.

Figura 55.

Luces piloto XA2EVF5LC, XA2EVF4LC, XA2EVF3LC Schneider Electric.



Nota. Figura tomada de (Schneider electric, 2022).

Tabla 43.

Características técnicas de luces piloto XA2EVF5LC, XA2EVF4LC, XA2EVF3LC.

Característica técnica	Descripción
Gama de producto	<i>Easy Harmony CVG</i>

Característica técnica	Descripción
Diámetro de montaje	22 mm
Colores	Amarillo, Rojo, Verde
Tensión de alimentación	110 V AC/CC 50/60 Hz
Consumo de corriente	20 mA
Grado de protección IP	IP65, panel IEC 60529
Fuente de luz	LED

Nota. Tomado de hoja de datos técnicos (Schneider electric, 2022).

Una vez se hayan especificado las características técnicas de interés, se procede a realizar los cálculos pertinentes para determinar los elementos de protección contra cortocircuitos y sobrecargas. A su vez se realiza el cálculo de los conductores en base a la máxima corriente admisible.

Dimensionamiento de protecciones y conductores para el sistema

Selección del circuito de protección para señalización

Para dimensionar el circuito de protección para señalización, se toma en consideración los siguientes parámetros técnicos de cada luz piloto.

- $V = 120 \text{ V AC}$
- $P = 2,4 \text{ W}$ (por cada luz piloto)
- $I_L =$ corriente de línea
- $I_T = 5 \times I_L$

$$I_L = \frac{P}{V}$$

$$I_L = \frac{2,4 \text{ [W]}}{120 \text{ [V]}}$$

$$I_L = 0.02 \text{ [A]}$$

Para el cálculo total de consumo se consideran 5 luces piloto.

$$I_T = 5 \times I_L$$

$$I_T = 0.1 \text{ [A]}$$

No obstante, la protección para el circuito de señalización es un interruptor termomagnético de un polo 1 A.

Selección del circuito de protección para el PLC Siemens S7-1200

Para dimensionar el circuito de protección para el PLC Siemens S7-1200, se toman en consideración los siguientes parámetros técnicos.

- $V = 120 \text{ V AC}$
- $I = 36 \text{ [W]}$
- $I_L = \text{Corriente de línea}$

$$I_L = \frac{P}{V}$$

$$I_L = \frac{36}{120}$$

$$I_L = 0.3 \text{ [A]}$$

No obstante, la protección para el circuito de señalización es un interruptor termomagnético de un polo 1 A.

Cálculo de corrientes etapa de potencia

Cuando el motor funciona a baja velocidad, el valor máximo de la corriente de entrada puede aumentar notablemente y puede producir un disparo del disyuntor del lado de la línea. Para evitar

disparos molestos, el disyuntor del lado de la línea se debe seleccionar de acuerdo con la corriente máxima de entrada al variador de frecuencia, no a la corriente nominal del motor a plena carga (Allen-Bradley, 2016). De la Tabla 41 donde se describen las principales características técnicas del variador se sabe que la corriente máxima es:

$$I_{\text{máx}} = 5.4 \text{ [A]}$$

No obstante, la protección para el variador de frecuencia interruptor termomagnético de tres polos 6 A.

Por otra parte, el circuito de potencia debe permitir el accionamiento completo y parcial de cada uno de los elementos que ameriten elementos de protección. Es así que el interruptor termomagnético principal es la resultante de todas las corrientes que conforman el circuito:

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

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

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

Se debe prever la adición futura de más elementos de control, señalización y accionamiento, por lo cual la protección para el circuito completo es un interruptor termomagnético tripolar de 10 [A]. A continuación, se presentan los elementos finales de protección contra cortocircuitos y sobrecargas.

Tabla 44.

Elementos de protección eléctrica finales del automatismo.

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

Cálculo de conductores

La corriente máxima admisible que circula por el circuito debe prever un incremento de corriente del 125% sobre la corriente nominal. De ahí que:

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

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

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

En base a la corriente nominal máxima calculada y el tipo de aplicación se selecciona el tipo de calibre del conductor. Es así que en la Tabla 45 se presentan las características del conductor seleccionado.

Tabla 45.

Características técnicas del conductor.

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.

Nota. Adaptado de hoja de datos técnicos (Cablec, 2020).

Tablero de control

Utilizando los datos obtenidos en las secciones anteriores se diseña el circuito de fuerza, control y borneras para representar la interconexión de los elementos que conformarán el sistema. Estos planos representan una guía técnica para la implementación del tablero de control. Para más información acerca de los diagramas de borneras revisar la sección de apéndices.

Implementación

Circuito de fuerza. En el diagrama de fuerza se presentan los elementos de protección para cada elemento que conforma el sistema además de las conexiones entre el motor, variador de frecuencia y tomacorriente. Por otra parte, la energía se encuentra distribuida en las 3 líneas de alimentación, es decir cada uno de los elementos se encuentra conectado a una línea de alimentación diferente para así balancear la carga del sistema, a excepción del variador de frecuencia ya que el mismo utiliza las tres fases para su alimentación. En la Figura 56 se ilustra el diagrama de fuerza del sistema.

Figura 56.

Plano de fuerza.

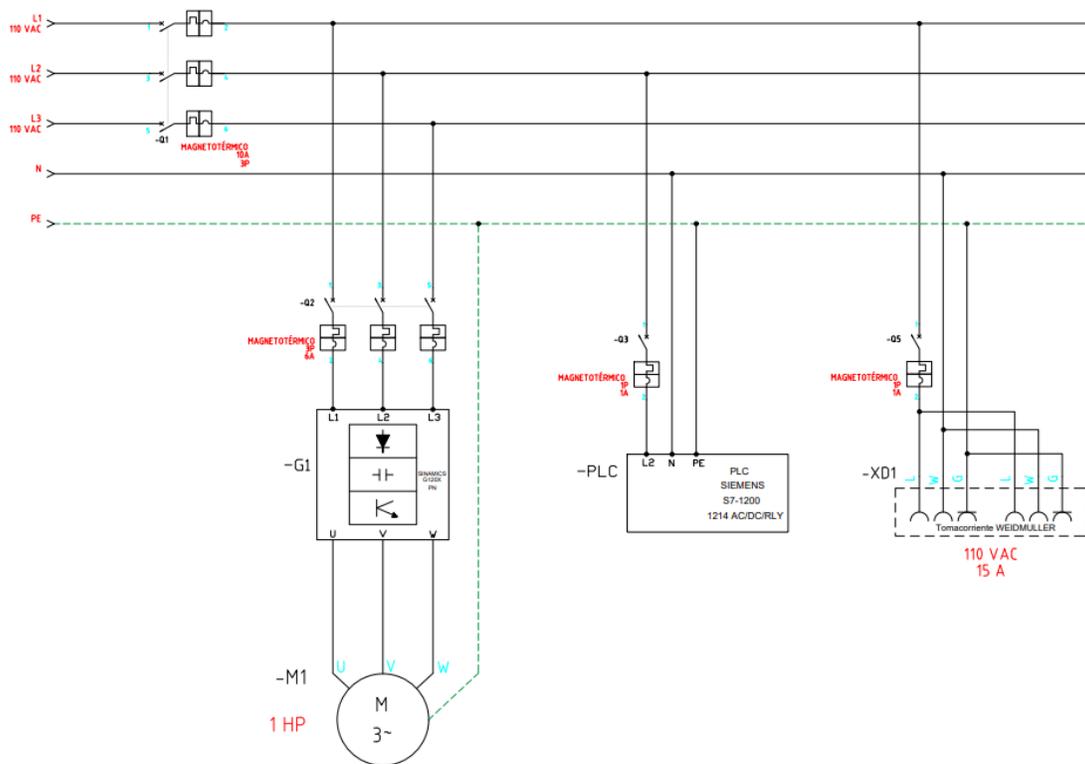
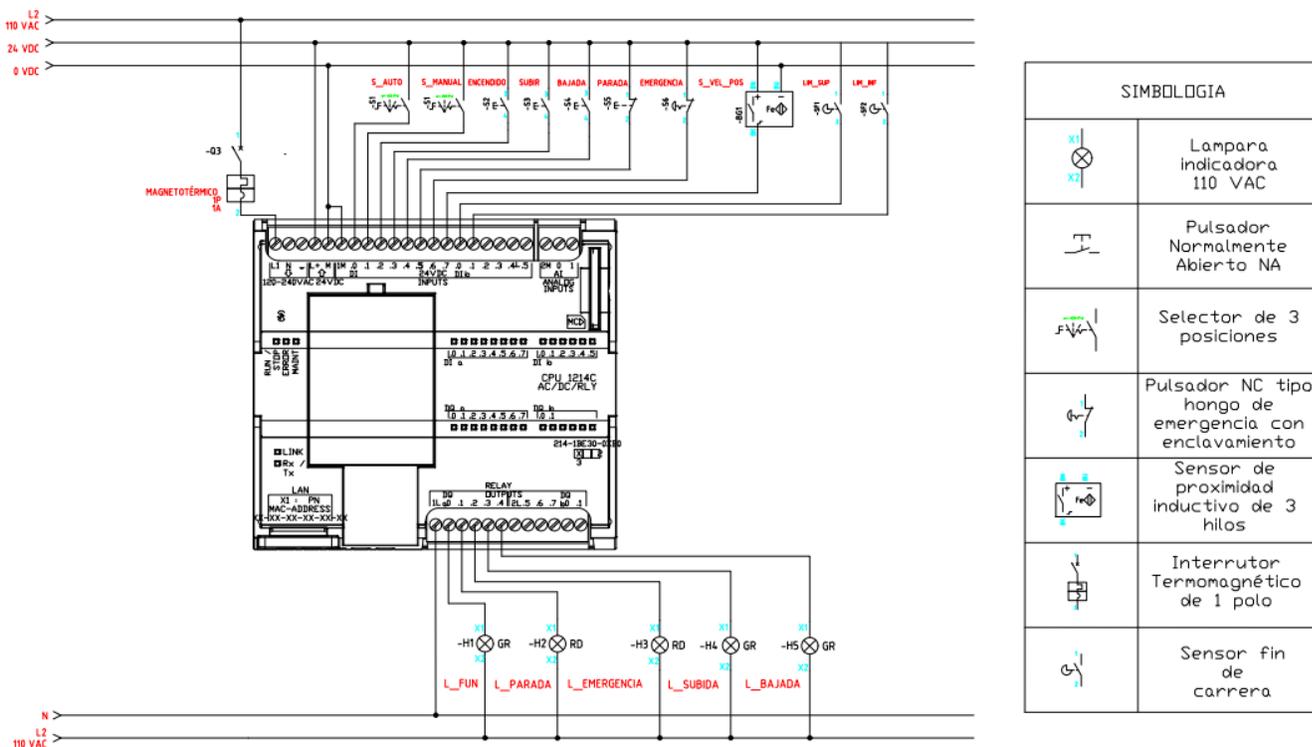


Diagrama de control. El diagrama de control tiene la finalidad de ilustrar los componentes del circuito como sensores, actuadores, etc. y de cómo se encuentran conectados al controlador. En la Figura 57 se observa la interconexión de los diferentes dispositivos de mando, señalización y control. Los mismos

se sitúan unos junto a otros, en el orden correspondiente a su alimentación (en la medida de lo posible) durante el funcionamiento normal.

Figura 57.

Diagrama de control.



Puesta en marcha

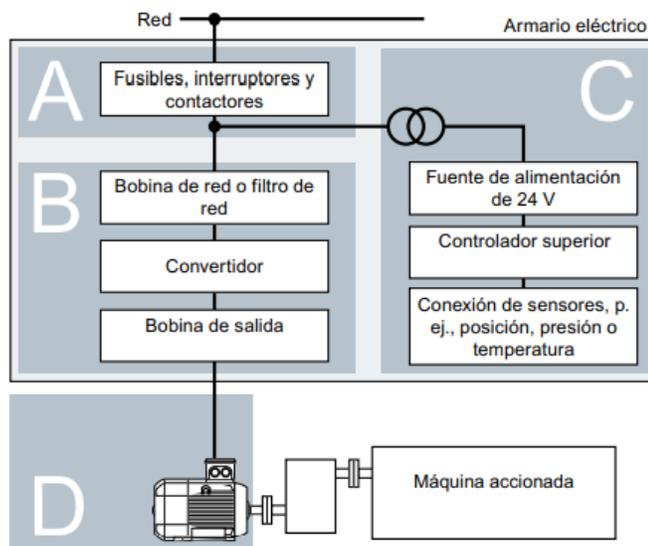
Consideraciones de puesta en marcha. Una vez se hayan planteado los diagramas generales para realizar la interconexión de elementos, se deben tomar ciertas consideraciones en cuanto al montaje y ubicación de los elementos que lo conforman. El funcionamiento fiable y sin perturbaciones sólo está garantizado cumpliendo las normas CEM (Figura 58), las Normas CEM definen la compatibilidad electromagnética para funcionar en su entorno electromagnético sin producir perturbaciones electromagnéticas intolerables para cualquier otro dispositivo situado en el mismo entorno (EMF

Explained 2.0, 2022). Es así que, a fin de garantizar un funcionamiento fiable, continuo y sin anomalías, se toman ciertos aspectos en cuenta para ubicar el convertidor de frecuencia y controlador:

- Los convertidores están diseñados para instalarlos en un armario de control.
- Los convertidores sólo son aptos para el montaje sobre superficies no combustibles, por ejemplo, sobre una placa de montaje metálica no revestida.
- Distancia de montaje sugerida para el convertidor de frecuencia 80 mm de espacio para la parte superior y 100 mm parte inferior.
- Para la instalación del PLC es necesario prever el espacio suficiente para el cableado y la conexión de los cables de comunicación, las distancias sugeridas de instalación para el controlador son: 25 mm parte superior y 25 mm parte inferior.

Figura 58.

Zonas CEM en un armario de control.



Nota. La Zona C puede ocupar el lugar de la Zona B, Figura tomada de (Siemens, 2021).

Para cumplir con las distancias sugeridas y especificaciones CEM se necesita un armario eléctrico con las medidas especificadas en la Tabla 46.

Tabla 46.

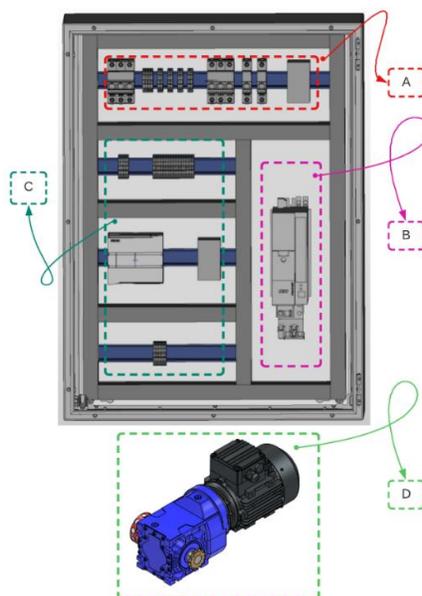
Medidas del armario eléctrico.

Marca	Referencia	Largo	Ancho	Profundidad
Beaucoup	Tablero metálico GSL-806025	800 mm	600 mm	250 mm

A fin de comprobar que la profundidad, largo y ancho del tablero son aptos para montar los diferentes elementos, se diseñó un diagrama de montaje (Figura 59) con los diferentes equipos que conforman el tablero de control. Cabe recalcar que la ubicación de cada uno de los elementos hace referencia a las zonas CEM de la Figura 58. Es así que a continuación se explica el significado de cada una de las zonas implementadas en el diseño del tablero de control.

Figura 59.

Ubicación de elementos según las características CEM.



- Zona A: Conexión de red.
- Zona B: Electrónica de potencia: Dichos elementos emiten campos electromagnéticos de

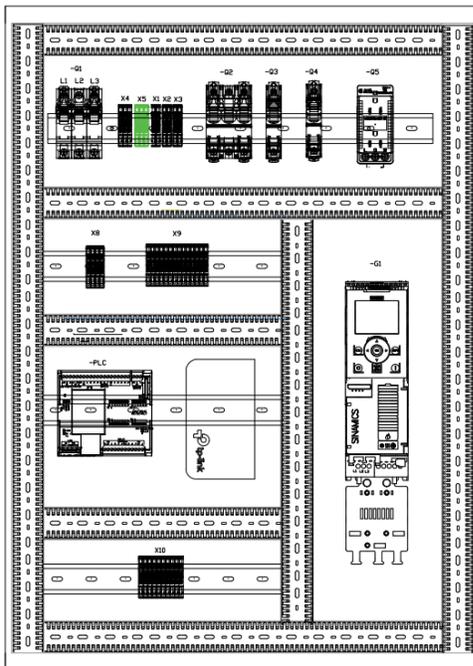
alta energía.

- Zona C: Controlador, sensores, borneras. Los equipos que pertenecen a la zona c no emiten campos electromagnéticos de alta energía, pero su funcionamiento puede verse afectado por campos electromagnéticos.
- Zona D: Motores, estos equipos emiten campos electromagnéticos de alta energía y se ubican al exterior del armario de control.

Finalmente, con todas las consideraciones proporcionadas por el diagrama de fuerza, control, borneras y zonas CEM se presenta el diseño a detalle de la parte interna del tablero de control. Por otra parte, si se desea información detallada acerca de la parte frontal del tablero se recomienda visitar la sección de tablero de control en apéndices.

Figura 60.

Diseño final del tablero de control.



La puesta en marcha del tablero de control es un reflejo de los planos de fuerza, mando, control y del diseño preliminar presentado anteriormente. Los elementos que lo conforman como: interruptores termomagnéticos, lámparas indicadoras, riel DIN, canaletas y cable se seleccionan de acuerdo al diseño y cálculos realizados, sólo así se garantiza que el espacio para el cableado sea el óptimo y que el tablero cumpla con todas las consideraciones antes planteadas. En la Figura 61 se presenta el tablero de control armado y listo para su puesta en marcha. Para más información acerca de la construcción del tablero visitar la sección de tablero de control en apéndices.

Figura 61.

Implementación y puesta en marcha del tablero de control.



Sistema de control

Para el diseño del sistema de control se toman en consideración los aspectos competentes en relación al *hardware* y *software* a utilizar. Como resultado del apartado de selección de equipos, se sabe

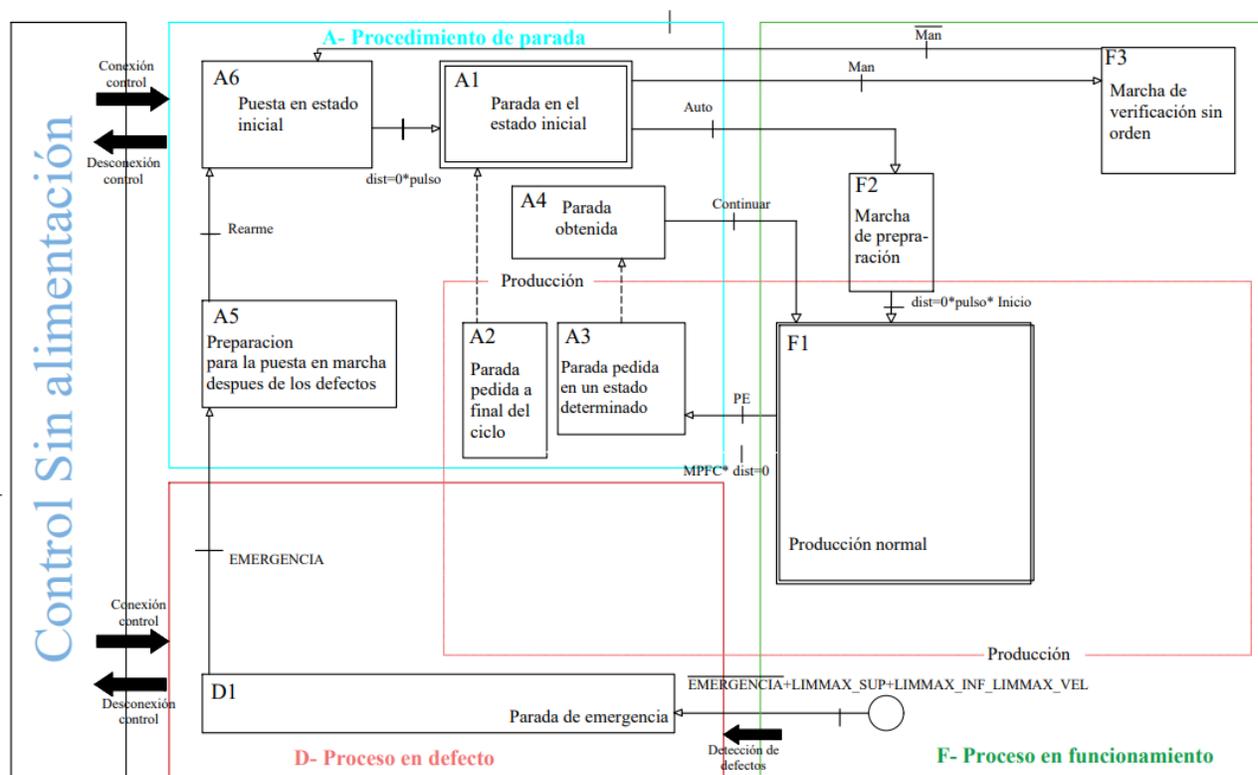
que el controlador encargado de recibir y procesar las variables del prototipo es un PLC Siemens s7-1200. Es así que los siguientes análisis se hacen en base a las características del mismo. Para el caso el sistema de control consta de dos módulos, el primero corresponde a la lógica de funcionamiento del proceso secuencial y el segundo a la estrategia de control.

Implementación de la lógica de funcionamiento

Guía GEMMA. Para establecer de forma clara y concisa los modos de funcionamiento y parada se toma como referencia la guía de modos de marcha y paros (guía GEMMA) desarrollada en el capítulo anterior. La diferencia es que ahora se establecen las condiciones necesarias para la transición de cada estado de los 3 módulos que la componen, asegurando un enfoque guiado y sistemático.

Figura 62.

Guía GEMMA.

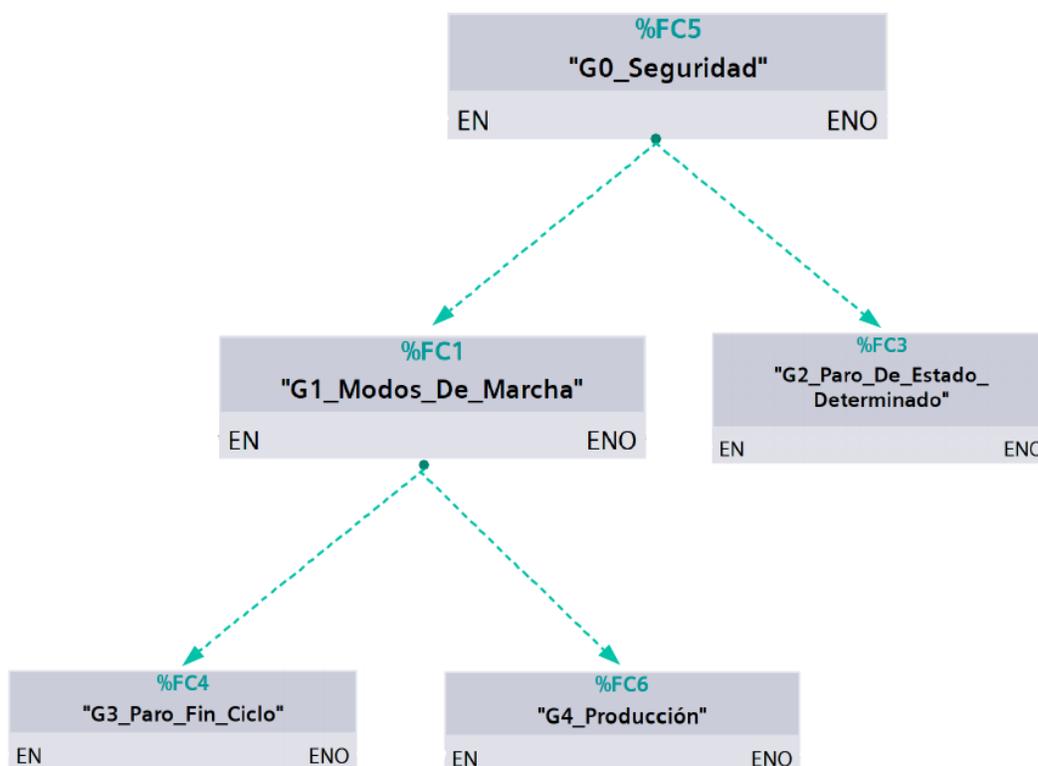


La guía GEMMA del presente capítulo y los diagramas de flujo planteados en el capítulo anterior son el punto de partida para programar el automatismo. Gracias a estas dos herramientas se formula el GRAFCET, el mismo que contiene el algoritmo de programación de los diferentes modos de funcionamiento del automatismo.

GRAFCET. Para el diseño del GRAFCET se utiliza una estructura jerárquica, ya que permite implementar una lógica de programación más detallada y presenta la documentación de forma comprensible para su posterior mantenimiento o modificación. Cada GRAFCET está gobernado por un GRAFCET jerárquico superior capaz de controlar un GRAFCET de un nivel jerárquico inferior. En la Figura 63 se presenta la jerarquía de GRAFCET del sistema.

Figura 63.

Jerarquía de GRAFCET estructurado.



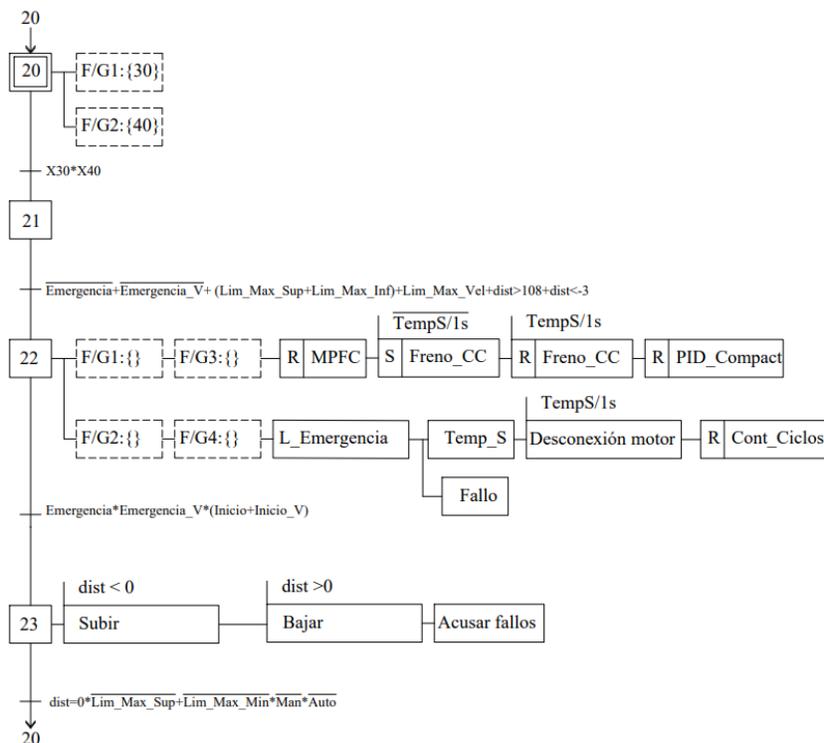
Puesta en marcha de la lógica de funcionamiento

G0: GRAFCET de seguridad. Es el GRAFCET de mayor jerarquía ya que la seguridad es el aspecto más importante en la implementación de cualquier automatismo. La función principal del GRAFCET de seguridad es asegurar un conjunto de acciones que lleven al automatismo a un estado seguro ante una anomalía o situación de emergencia. Para el caso del proyecto es crucial que el mecanismo no supere los límites de funcionamiento en el tramo vertical ni exceda la velocidad máxima programada. La distancia permitida del recorrido vertical y la velocidad máxima programada se miden con el sensor encoder, adicionalmente se ubicaron dos sensores finales de carrera en los límites superior máximo e inferior máximo. Si de una u otra forma el encoder no logra medir que el mecanismo superó el recorrido vertical, los fines de carrera activarán las acciones emergentes.

Para detener el mecanismo se necesita frenar el motor, no basta con reducir la velocidad a 0, ya que el mismo llegará a dicho valor de consigna con un tiempo de rampa de desaceleración programada. Es así que se necesita un sistema de frenado más rápido. Para realizar dicho frenado se introduce el término de frenado por corriente continua. El frenado por corriente continua inyecta corriente continua al estator del motor creando un campo magnético fijo, de esta manera el rotor tratará de alinearse con este campo y se producirá el frenado. Cuando ocurre el frenado el motor transforma la energía de frenado en calor. Toda la explicación antes detallada se da de tal manera que se entienda la programación del GRAFCET de seguridad de la Figura 64. Cabe aclarar que según la guía GEMMA implementada se puede acceder al estado D1 del módulo "D. Proceso en defecto" desde cualquier etapa del automatismo.

Figura 64.

GRAFCET de seguridad GO.



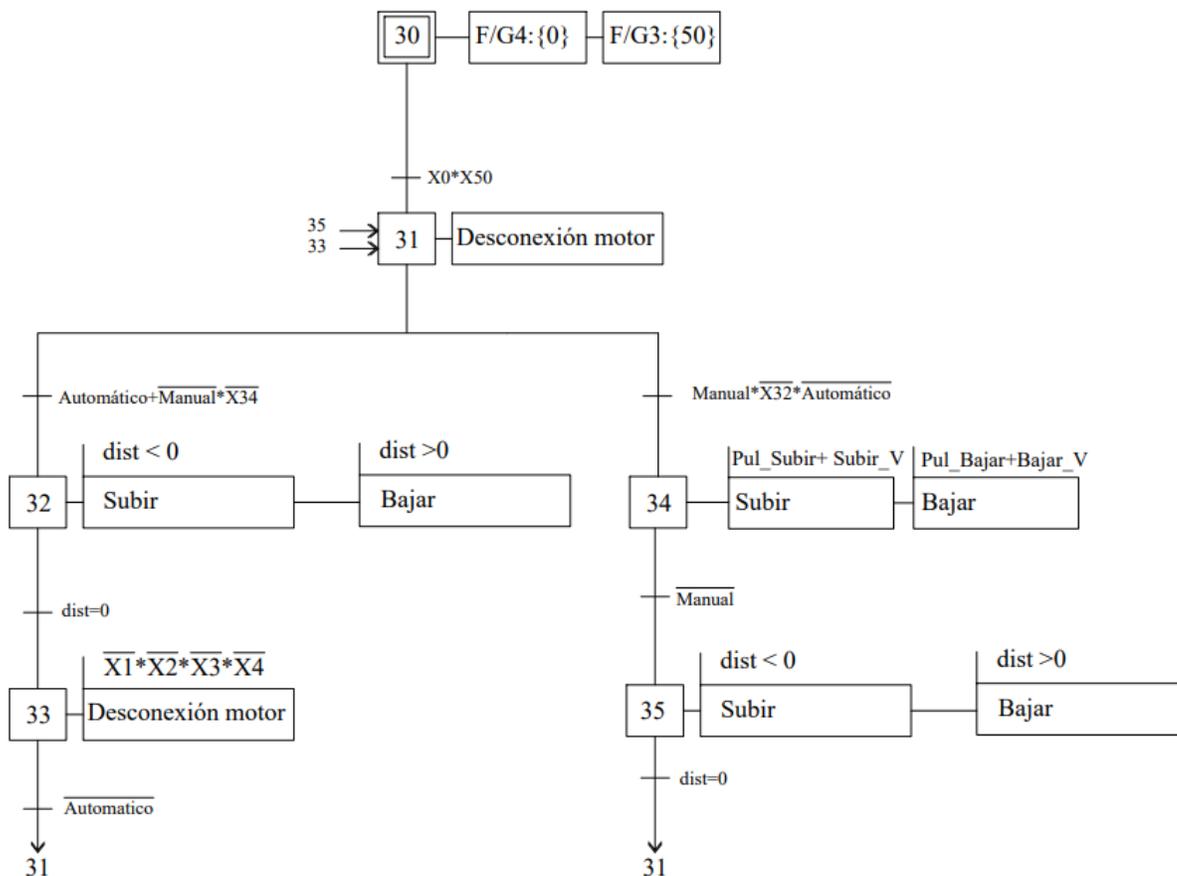
G1: GRAFCET de modos de marcha. La función del GRAFCET de modos de marcha es definir el modo de funcionamiento del automatismo. Un parámetro importante a considerar es que de ninguna manera se puede acceder al modo automático desde el modo manual y viceversa. A continuación, se detalla cada tipo de modo de funcionamiento y su lógica de programación.

Modo Manual. El modo manual se sitúa en el estado F3 de la guía GEMMA y corresponde a la marcha de verificación sin orden. Este modo de funcionamiento generalmente es usado para calibrar, sensores, actuadores y demás variables que intervienen en el proceso. Una vez se finaliza el modo manual mediante el selector de 3 posiciones, se programa una acción de rearme con el objetivo de que el automatismo empiece su ciclo de funcionamiento en condiciones iniciales. Es así que al desactivar el modo manual inicia la puesta en estado inicial (rearme).

Modo Automático. Para el modo automático el automatismo primero tiene que realizar una marcha de preparación, es decir tiene que empezar con los valores óptimos de funcionamiento. Comúnmente cuando se utilizan encoders incrementales es necesario realizar un movimiento de referencia. En este caso antes de iniciar con el modo automático el automatismo se asegura de que el mecanismo se encuentre ubicado en la posición 0 y que el sensor inductivo se encuentre activo. Para este punto es necesario recordar que el encoder entrega una medida de 2.2 cm/pulso, es así que si el sensor inductivo inicia en estado de desconexión (FALSE) se obtendrá un desfase de 2.2 cm. En la Figura 65 se presenta el GRAFCET de modos de marcha G1.

Figura 65.

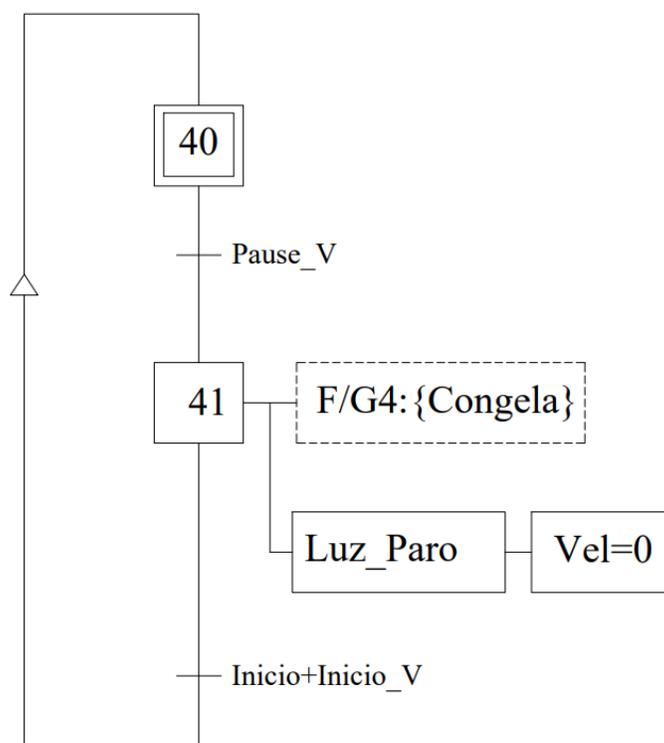
GRAFCET de Modos de Marcha G1.



G2: GRAFCET de Paro de estado determinado. El GRAFCET de paro de estado determinado lleva al automatismo a una parada deseada. Es decir, el operador puede detener el mecanismo en cualquier parte del tramo vertical. Al presionar el pulsador de inicio el automatismo inicial el ciclo de bombeo desde la parte del tramo en que se quedó antes de solicitar una parada determinada. En la Figura 66 se presenta el GRAFCET de Paro de estado determinado G2.

Figura 66.

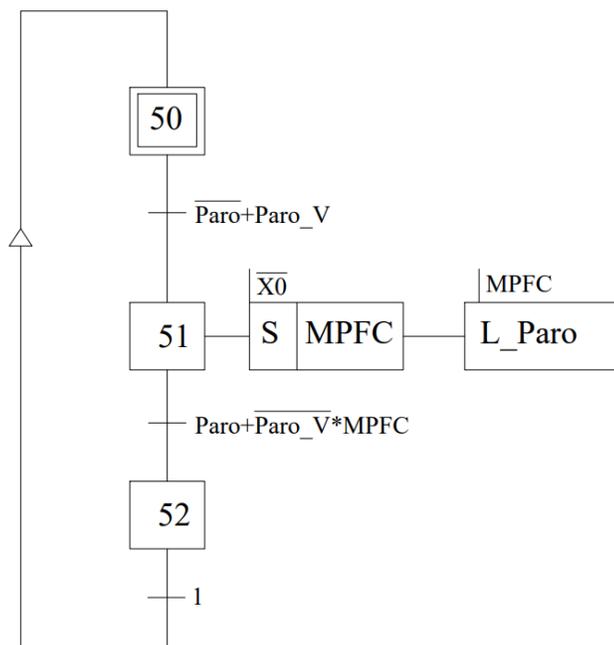
GRAFCET de paro de estado determinado G2.



G3: GRAFCET de paro fin de ciclo. El GRAFCET de paro fin de ciclo, se implementa para finalizar el ciclo de funcionamiento del automatismo. Una vez termina el ciclo, el automatismo se ubica en una parada de estado inicial A1 del módulo “A. Procedimiento de parada”. En la Figura 67 se presenta el GRAFCET de Paro de fin de ciclo.

Figura 67.

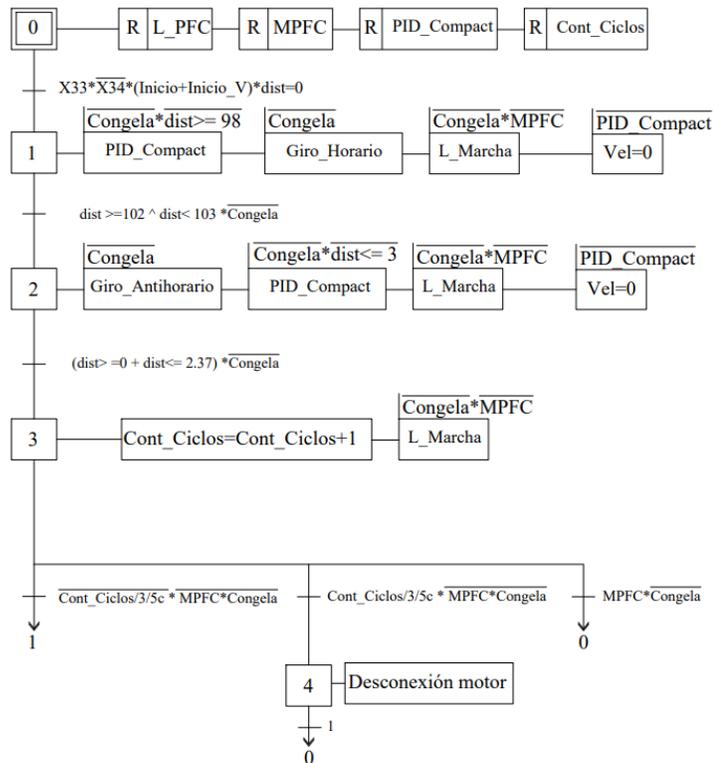
GRAF CET de paro fin de ciclo G3.



G4: GRAFCET de producción. En el GRAFCET de producción (Figura 68) tiene lugar el funcionamiento del modo de marcha automático del automatismo. Antes de iniciar con la producción normal es necesario una marcha de preparación que permita ubicar al mecanismo en la distancia de inicio 0 y al encoder en punto de funcionamiento. El funcionamiento secuencial del automatismo se basa en ciclos ascendentes y descendentes. Es así que cuando el motor inicia la carrera ascendente el controlador activa el control PID con el fin de alcanzar la consigna de velocidad establecida y la mantiene a pesar de las perturbaciones ocasionadas por el peso de la sarta de varillas. Un momento antes de llegar al límite superior del tramo vertical el control se desactiva y se obtiene una velocidad de 0 rpm. Después de aproximadamente 1s el controlador invierte el sentido de giro y el control PID se activa para el tramo vertical descendente hasta un momento antes de llegar al límite inferior.

Figura 68.

GRAFSET de producción G4.

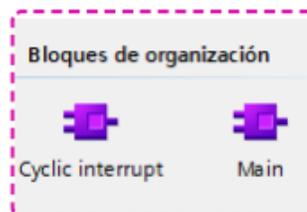


Por último, una vez se han realizado los diferentes GRAFCET se procede a realizar la programación del automatismo. Por lo cual es necesario explicar la composición general del programa. El cual está compuesto por varios bloques de programa y para su explicación se los divide según el tipo de bloque:

Bloques de organización

Figura 69.

Bloques de organización.



Los OB de interrupción cíclica sirven para iniciar programas en intervalos periódicos, independientemente de la ejecución cíclica del programa. En esta etapa se encuentran todos los bloques del programa que necesitan ejecutarse en intervalos independientes de las etapas de funcionamiento. Cabe aclarar que si se precisa información acerca de los recursos utilizados del controlador se debe visitar la sección de tabla de asignación de recursos en apéndices. Las funciones de programas en la interrupción cíclica [OB30] son:

- Calc_Disancia.
- CalcSpeed.
- Conversión_Variables.

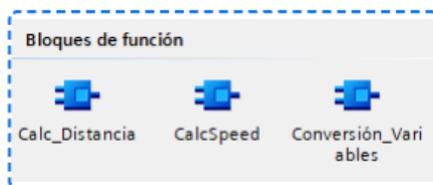
Los OB de ciclo se procesan cíclicamente. El ciclo *Main* es un bloque lógico de orden superior en el programa, en el que se pueden programar instrucciones o llamar otros bloques. Las funciones programadas en la interrupción de programa *Main* [OB1] son:

- G0_Seguridad.
- G1_Modos_de_Marcha.
- G2_Paro_de_Estado_Determinado.
- G3_Paro_Fin_de_Ciclo.
- G4_Grafcet_de_Producción

Bloques de función

Figura 70

Bloques de función.



Los bloques de función son bloques lógicos que depositan sus valores de forma permanente en bloques de datos de instancia, de modo que siguen estando disponibles después de procesar el bloque. Los bloques de este apartado se explican e implementan en el sistema donde cumplen alguna función:

- *Calc_Disancia*: Bloque de función encargado de realizar el cálculo de distancia en base a los pulsos del sensor inductivo, este bloque de función se detalla en el apartado de sistema de instrumentación.
- *CalcSpeed*: Bloque de función encargado de calcular la velocidad en base al periodo de tiempo que existe entre cada pulso del sensor inductivo. Se detalla en el apartado de sistema de instrumentación.
- *Conversion_Variables*: Bloque de función encargado de convertir las variables del sistema de control para implementar la estrategia de control del bloque “*PID_Compact*”. Además, convierte el dato de variable controlada (CV) en el valor hexadecimal consigna para la velocidad del variador de frecuencia.

Funciones

Figura 71.

Funciones



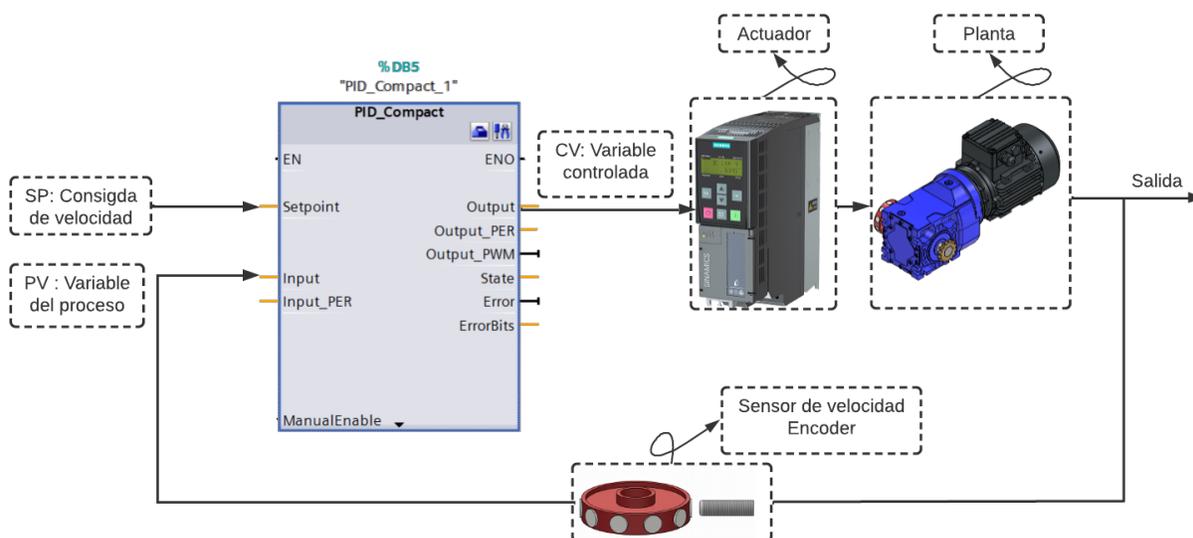
Las funciones son bloques lógicos sin memoria y se implementan en la interrupción cíclica del programa *Main* [OB1], dichas funciones contienen el desarrollo del GRAFCET jerárquico del sistema.

Implementación de la estrategia de control

En cuanto a la estrategia de control el PLC Siemens S7-1200 permite implementar estrategias de control del tipo PI y PID. En realidad, la función *PID_Compact* es un tema abierto al programador, se puede implementar de varias maneras con el fin de cubrir las necesidades de cada proyecto. Para dar inicio a la explicación detallada del apartado de la estrategia de control, en la Figura 72 se presenta el diagrama en bucle cerrado del sistema.

Figura 72.

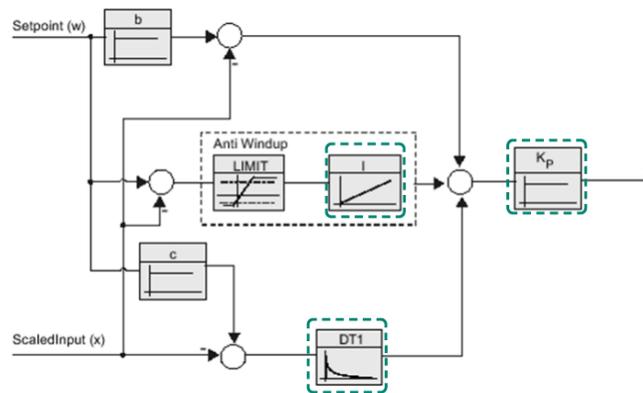
Diagrama del sistema de control.



En el bloque *PID_Compact*, es posible implementar varias estrategias de control, lo que quiere decir que los parámetros se pueden ir modificando hasta obtener una acción de control óptima. Para entender cómo configurar y modificar dichos parámetros es importante analizar qué tipo de algoritmo matemático posee el controlador (Figura 73). Por otra parte, para modificar los parámetros T_i de la acción integral (I) y T_d de la acción derivativa (D), hay que tener en cuenta que están multiplicadas por el factor P. En la Figura 74 se presenta la ecuación del modelo matemático que rige a la función *PID_Compact*.

Figura 73.

Controlador PID Mixto.



Nota. Se la llama configuración mixta, ya que la constante proporcional K_p multiplica a las otras constantes del controlador. Figura adaptada de (Siemens, 2018).

Figura 74.

Algoritmo PID.

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

P
 I
 D
 Filtro pasa bajo

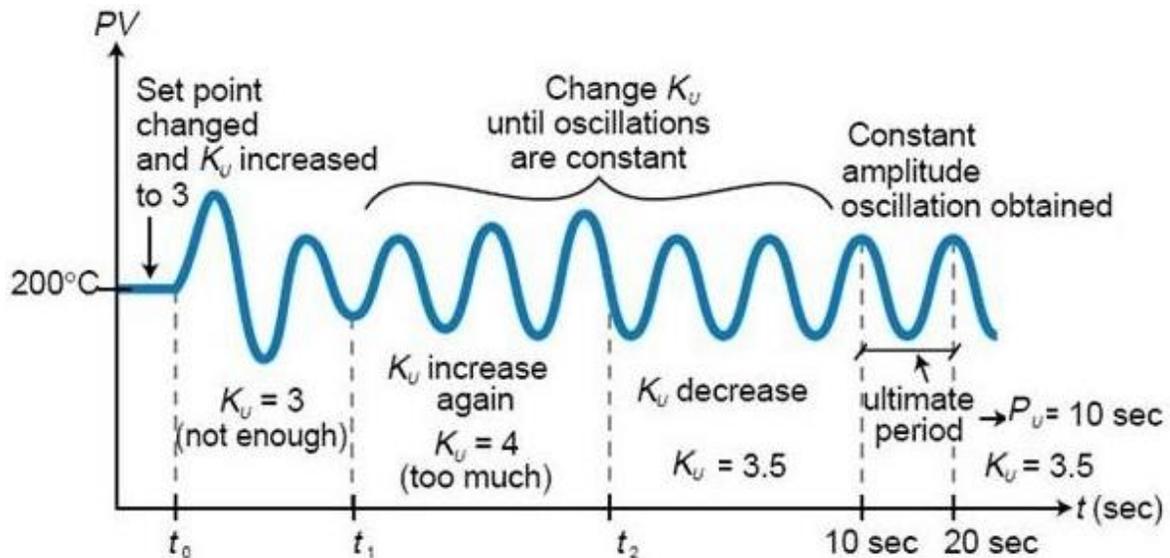
Nota. La acción derivativa viene multiplicada con un filtro pasa bajos para eliminar las perturbaciones del sistema, hay que tener mucho cuidado al utilizar la acción derivativa en un proceso ya que, en lugar de obtener una señal robusta de control podría amplificarse el ruido y ocasionar inestabilidad.

Los métodos de sintonización de los parámetros del controlador son variados, para el caso existen métodos teóricos y métodos prácticos. De esta manera con el fin de demostrar y justificar los valores de las diferentes ganancias se utiliza el segundo método de Ziegler-Nichols. Más conocida como técnica de oscilaciones en bucle cerrado, dicho método consiste en realizar pruebas con un valor de consigna

constante en lazo cerrado, a medida que se aumenta la ganancia proporcional crítica K_u se obtendrá una salida oscilante. Para mayor comprensión en la Figura 75 se detalla el método de Ziegler-Nichols.

Figura 75.

Comportamiento de oscilaciones en respuesta a la variación de K_p .



Nota. Para un valor de K_u muy pequeño la señal resultante oscila de forma atenuada, mientras que para valores de K_u mayores la salida empieza a oscilar hasta volverse inestable, si esto ocurre hay que disminuir el valor de K_u hasta que la respuesta sea una señal oscilante de amplitud constante. El último paso es verificar el período de la señal (P_u) en el tramo de amplitud constante. Figura tomada de (ControlsWiki, 2007).

En la Tabla 47 se presentan las fórmulas para calcular los valores de K_p , T_i y T_d a partir del método de Ziegler-Nichols. Las fórmulas presentes en dicha tabla hacen referencia solo a los controladores de interés para el proyecto.

Tabla 47.

Parámetros del método de Ziegler- Nichols.

Tipo de controlador	Kp	Ti	Td
PID (mixto)	0.6 x Ku	Pu/2	Pu/8
PID (mixto menos oscilante)	0.3 x Ku	Pu/2	Pu/6

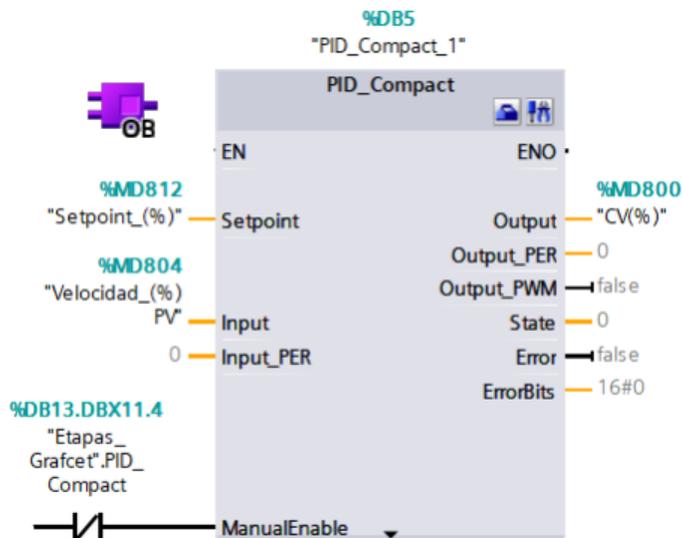
Nota. Tabla tomada de (ControlsWiki, 2007).

Puesta en marcha de la estrategia de control

Es importante aclarar que al ser el bloque "PID_Compact" un parámetro necesario en cualquier etapa del sistema se encuentra programado en una interrupción cíclica llamada "Cyclic interrupt".

Figura 76.

Bloque PID_Compact.



Nota. La variable "Etapas_Grafcet".PID_Compact" es la encargada de desactivar el control un momento antes de que se realiza la inversión de giro en el ciclo ascendente o descendente de bombeo.

Para implementar el bloque de control en el PLC Siemens S7-1200 existen dos parámetros básicos a configurar. El primero hace referencia al tipo de regulación (Figura 77) y el segundo a los parámetros de entrada y salida del bloque “PID_Compact” (Figura 80).

Figura 77.

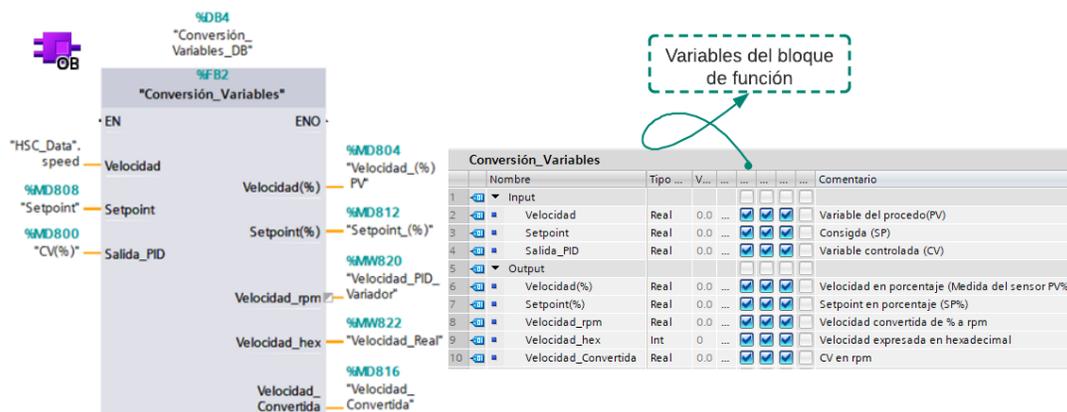
Ajustes de tipo de regulación.



Debido a la simplicidad del método, la mayoría de controladores en la industria están configurados para que su tipo de regulación se desarrolle en base a porcentajes. La regulación general recibe solo parámetros expresados en porcentaje. Por consiguiente, tanto la variable del proceso (PV), la variable controlada (CV) y el valor de la consigna (SP) deberán ser convertidas. Para dar solución a la problemática planteada, se implementó un bloque de funciones que convierte las variables de control en porcentaje. En la Figura 78 se observa el bloque de función “Conversión_Variables_DB” y las variables que lo conforman.

Figura 78.

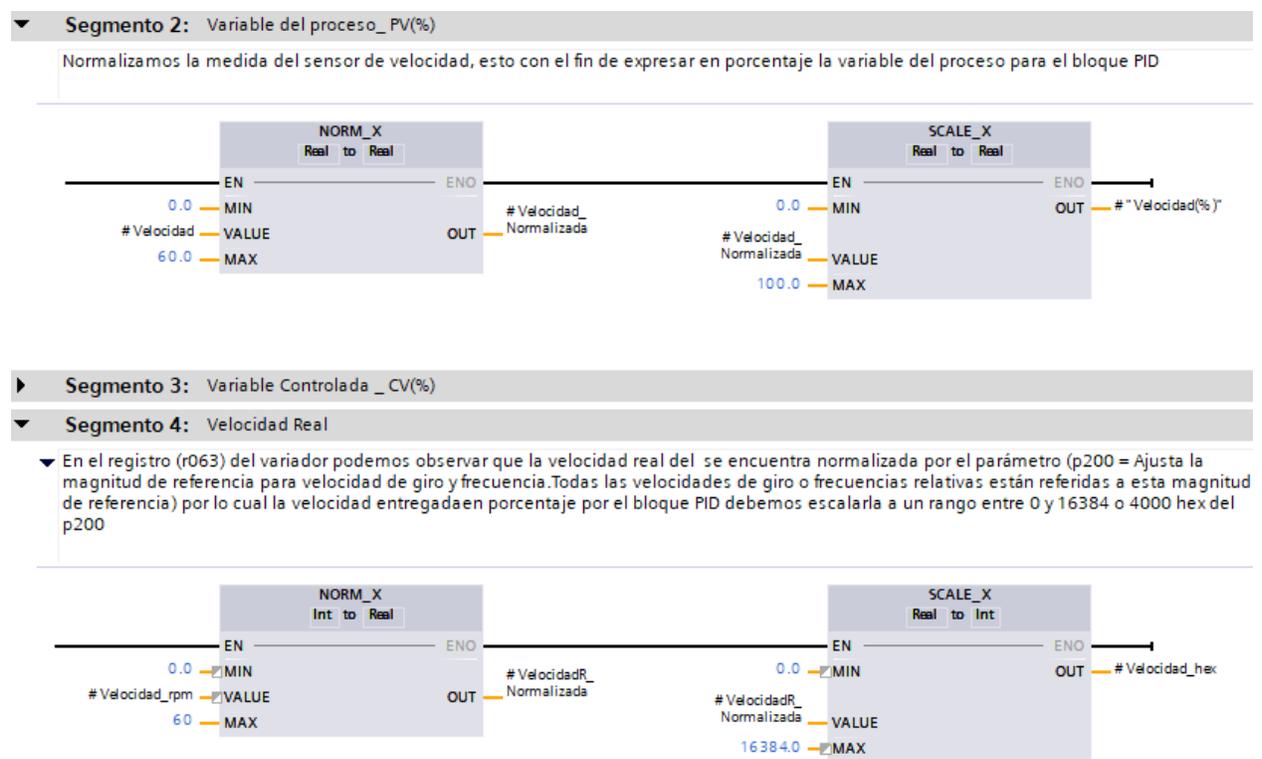
Bloque “Conversión_Variables_DB”.



Adicionalmente en la Figura 79 se observa un fragmento del contenido de la función “*Conversión_Variables_DB*”. En el segmento dos de la imagen se escala y normaliza el valor entregado por el sensor (PV) con el fin de expresarlo en porcentaje. Por otra parte, la descripción del segmento 4 explica porque se escala la velocidad en un rango de 0 a 16384, esta velocidad se almacena en la variable “*Velocidad_hex*” y es la variable que controla la frecuencia que el variador entrega al motor.

Figura 79.

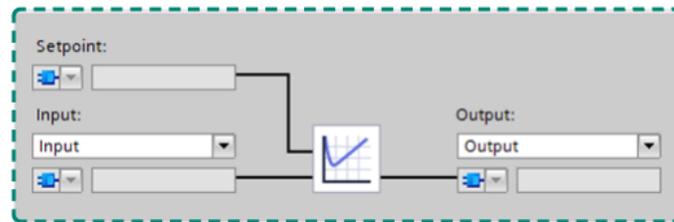
Contenido de la función “*Conversión_Variables*”.



El segundo aspecto a configurar son los parámetros de entrada y salida de la Figura 80. Para el caso se debe seleccionar respectivamente en entrada y salida los tipos de datos correspondientes a la variable del proceso (PV) y a la variable controlada (CV).

Figura 80.

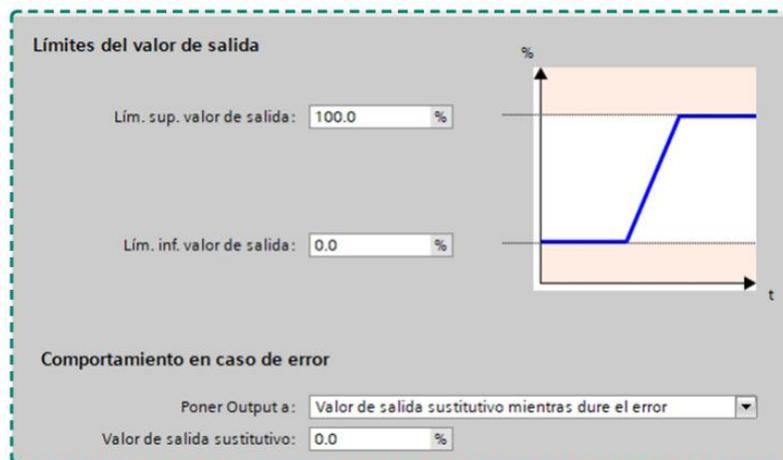
Parámetros de Entrada/Salida bloque "PID_Compact"



Acto seguido se definen los límites superiores e inferiores de la variable controlada (CV). Adicionalmente es importante seleccionar el comportamiento que debe tener el controlador en caso de error o situación de emergencia. En la Figura 81 se detalla la configuración mencionada.

Figura 81.

Límites del valor de salida.



Nota. Es de vital importancia que el mecanismo se detenga en situaciones de error o emergencia. Por lo cual se configura un valor sustitutivo de 0 en la variable controlada (CV).

El último aspecto a configurar es el tipo de controlador que se desea implementar y el valor de sus parámetros. Para mejorar el performance del objetivo de control se implementa un control PID, El parámetro derivativo anticipa el error y actúa en función del error futuro, anticipando los efectos del cambio de carga del prototipo.

Sistema de instrumentación

Implementación del sistema de instrumentación

En este apartado se aborda la solución para medir las variables físicas del sistema, el diseño del sensor encoder y las consideraciones de *software* y *hardware* necesarias para su construcción y puesta en marcha. Asimismo, se presenta la ubicación de los sensores finales de carrera implementados en el tramo vertical.

Encoder. Debido a la disponibilidad de un sensor inductivo en la empresa y a que se alcanzó el presupuesto máximo destinado al proyecto, se optó por diseñar un encoder incremental. El parámetro principal para el diseño del encoder es la frecuencia de conmutación del sensor inductivo, la misma debe ser suficiente para captar los flancos ascendentes y descendentes que se generan cuando el motor empieza a girar. La frecuencia de conmutación mínima que el sensor inductivo debe poseer se calcula en base al número de conmutaciones por vuelta (n) y a la velocidad máxima del motor de inducción trifásico. En cuanto al número de conmutaciones se trató de abarcar en su mayoría las necesidades del proyecto, de tal manera que se implementaron 10 secciones metálicas. Es así que tomando en cuenta que el régimen de vueltas máximo del motor es de 1800 rpm y que el número de conmutaciones por vuelta es de 20 (al implementar 10 secciones metálicas se sabe que el sensor conmutará 20 veces entre flancos positivos y negativos para completar una vuelta), se procede a calcular la frecuencia mínima de conmutación con la que el sensor inductivo deberá contar.

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

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

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

De tal manera que la frecuencia mínima de conmutación con la que el sensor debe contar son 600 [Hz]. En la Tabla 48 se presentan las características técnicas del sensor inductivo con el que cuenta la empresa.

Tabla 48.

Características técnicas sensor inductivo.

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

Al contar con 2500 Hz de frecuencia de conmutación, se puede concluir que el sensor cumple con los requerimientos mínimos. En la Figura 82 se presenta el diseño preliminar del encoder

Figura 82.

Diseño de encoder incremental en 3D.

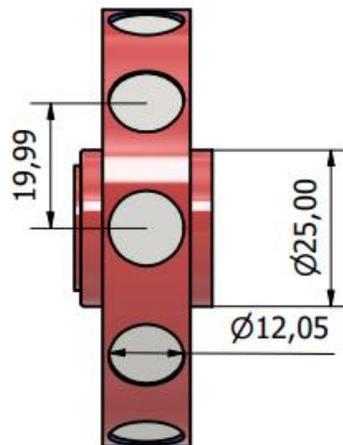


Cabe recalcar que entre más se seccione el perímetro del círculo a superficies metálicas, se obtendrá una mayor precisión en la medición de la variable competente. A continuación, se presentan algunas consideraciones que se tuvieron en cuenta para diseñar el encoder.

Velocidad. Debido a que el método para el cálculo de la misma hace referencia al periodo de separación entre cada sección metálica, la separación equidistante se convierte en un parámetro de vital importancia. Para cubrir con dicho parámetro se toma en cuenta el diámetro de actuación del sensor que son 10 mm. En la Figura 83 se presentan las dimensiones que permiten el funcionamiento correcto del encoder.

Figura 83.

Dimensiones de encoder.

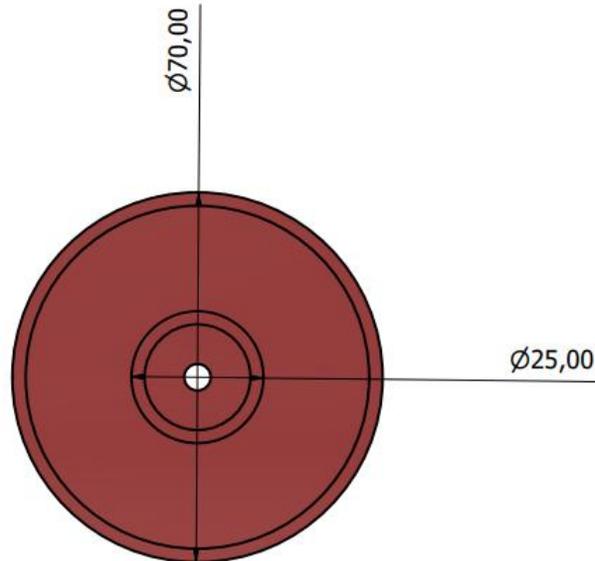


Nota. La separación entre cada sección metálica debe ser un poco más grande que la sección de actuación del sensor, esto con el objetivo de que el sensor inductivo pueda detectar de manera correcta la conmutación entre flancos positivos y negativos. Si la separación entre cada sección es menor que el diámetro de actuación, el sensor no conmutará del flanco positivo al negativo, es decir siempre estará activo.

Distancia. Una de las aplicaciones de un encoder incremental es la medición de distancia, la resolución de dicho parámetro está ligado de igual manera al número de secciones metálicas que se implementen. Ya que el encoder se ha dividido en 10 secciones metálicas, se procede a calcular la resolución en cm por cada conmutación entre flanco positivo y negativo del sensor inductivo. Para dicho cálculo se toma en consideración el valor de la circunferencia del encoder. En la Figura 84 se presentan los valores necesarios para el cálculo.

Figura 84.

Diámetro del encoder expresado en mm.



En base al valor de diámetro de la circunferencia más grande se procede a calcular el perímetro del encoder:

$$P = 2 \times \pi \times r$$

$$P = 2 \times \pi \times (3.5 \text{ cm})$$

$$P = 22 \text{ cm}$$

En 1 vuelta el sensor inductivo deberá detectar 10 flancos positivos. En términos de distancia (d) se plantea la siguiente relación.

$$1 \text{ vuelta} = 10 \text{ pulsos}$$

El término pulsos hace referencia cada una de las 10 secciones metálicas en las que el sensor entrega un flanco positivo, es así que:

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

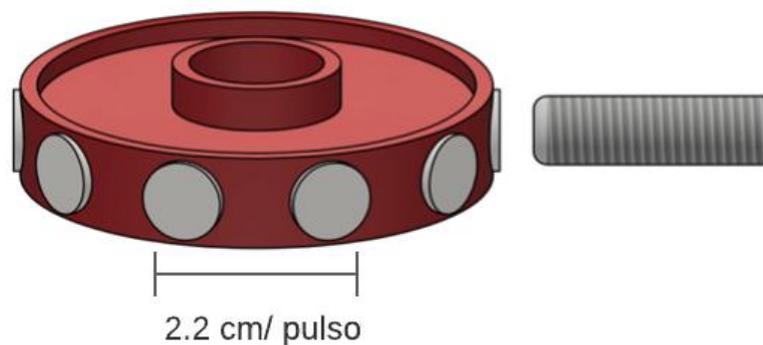
$$d = \frac{22 \text{ cm}}{10 \text{ pulsos}}$$

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

Con todos los parámetros anteriormente expuestos se puede concluir que el encoder diseñado entrega 2.2 cm por cada flanco positivo (pulso). En la Figura 85 se ilustra de manera gráfica el cálculo realizado

Figura 85.

Resolución de distancia.

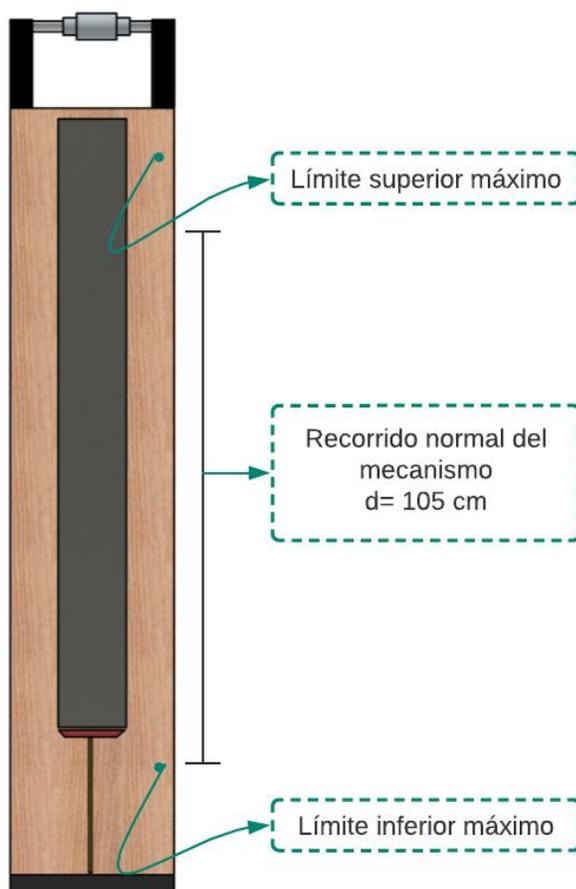


Sensor fin de carrera. El objetivo de implementar sensores finales de carrera es que el ciclo de bombeo se desarrolle en el tramo vertical (Figura 86), estos límites deben respetarse con el fin de asegurar

la integridad del mecanismo y por supuesto de las personas que se encuentren comprometidas. Es por esto que se plantea que los sensores fin de carrera sean ubicados en el límite superior máximo y el límite inferior máximo permitido. De esta manera si el encoder entrega algún valor erróneo del valor de distancia del tramo vertical, los sensores de seguridad detendrán el mecanismo y el automatismo entrará en una de las situaciones de emergencia a ser programadas.

Figura 86.

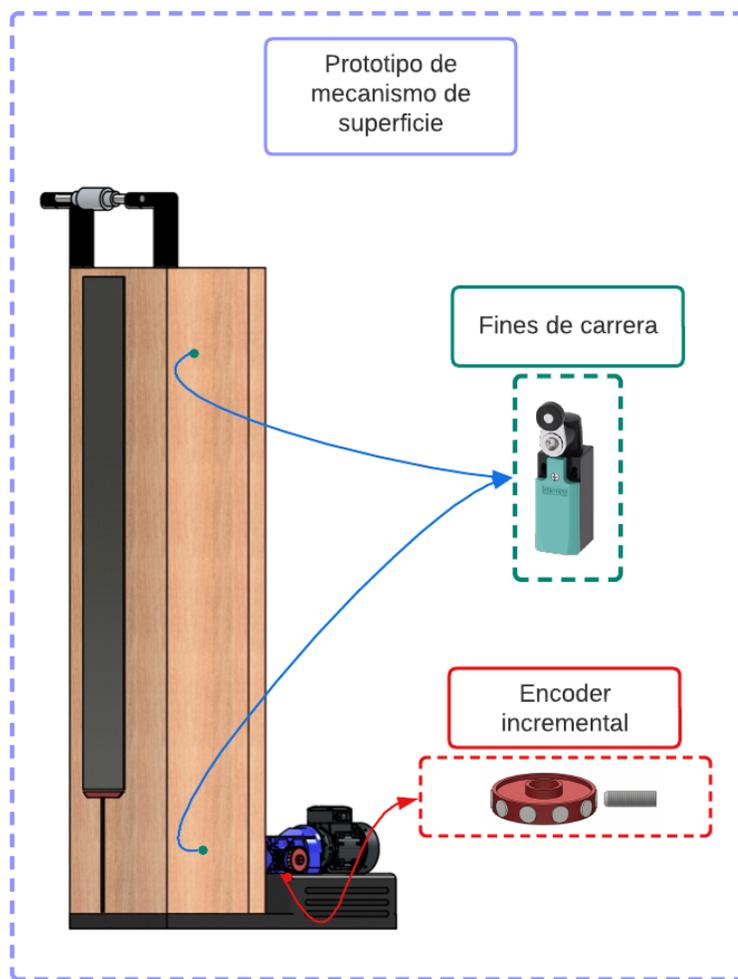
Tramo vertical del prototipo.



Por otra parte, en la Figura 87 se detalla la ubicación de los diferentes elementos del sistema de instrumentación.

Figura 87.

Ubicación de los elementos del sistema de instrumentación.



Nota. Los sensores finales de carrera se encuentran ubicados al interior del cuerpo del mecanismo, la ubicación de los mismos se definió mediante pruebas de funcionamiento utilizando el modo de marcha manual del automatismo.

Puesta en marcha del sistema de instrumentación

Programación del encoder. En este apartado se desarrollan aspectos necesarios del programa que permiten obtener datos sobre las variables físicas del sistema. La velocidad y distancia del mecanismo en recorrido del tramo vertical son las variables a ser analizadas. Generalmente las instrucciones básicas

en contadores están limitadas a eventos de contaje que se producen a velocidades inferiores a las del ciclo de la CPU. Es así que resulta necesario un método para contar impulsos que ocurren a velocidades mayores que las del ciclo del PLC. La función de contador rápido (HSC) ofrece la posibilidad de contar impulsos que ocurren a una velocidad mayor (Siemens, 2018). Por lo antes mencionado, es necesario configurar la entrada discreta %I0.7 del sensor inductivo como contador rápido. Dicha entrada debe ser capaz de medir el periodo que se produce entre cada sección metálica del encoder. La serie de parámetros a configurar se presentan a continuación en la Tabla 49.

Tabla 49.

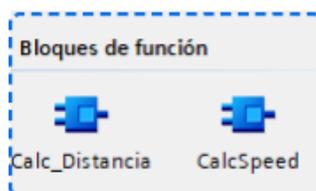
Parámetros de configuración HSC1 para medición de duración de periodo.

Parámetro	Configuración
General	Habilitar opción "Activar contador rápido"
Modo de contaje	Duración del periodo
Fase de servicio	Monofásica
Sentido de contaje	Programa de usuario
Sentido de contaje inicial	Incrementar contador
Periodo de medición de frecuencia	1.0 s
Entradas de hardware	Entrada del generador de impulsos del reloj %I0.7
Direcciones E/S	Dirección inicial 1000.0

El sistema de instrumentación está compuesto por los bloques de funciones de la Figura 88.

Figura 88.

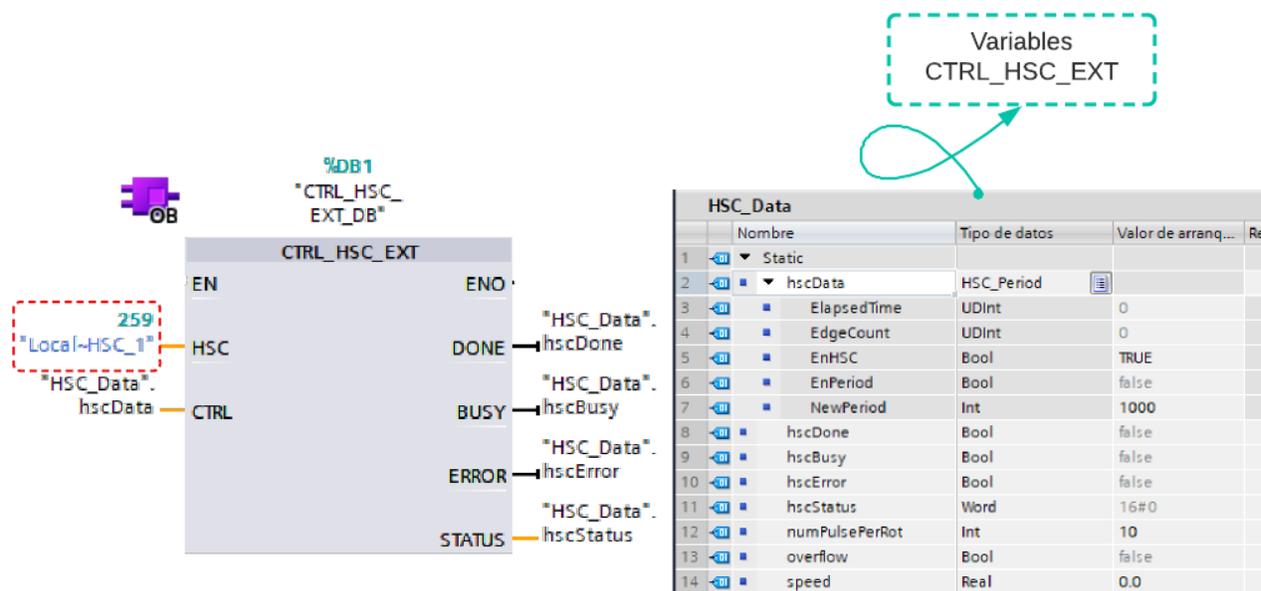
Bloques de función del sistema de instrumentación.



Los parámetros de velocidad y distancia son cruciales en cualquier etapa del proyecto, es por esto que las funciones del sistema de instrumentación se implementan en la interrupción cíclica “*Cyclic interrupt*”. Por otra parte, para el control de la tarjeta rápida y lectura del canal, es necesario implementar la función “*CTRL_HSC_EXT*” que se extrae de la librería de funciones de Tia Portal. Esta función permite parametrizar y controlar los contadores rápidos que soporta la CPU. En la Figura 89 se ilustra dicha función y sus variables.

Figura 89.

Bloque de función CTRL_HSC_EXT.

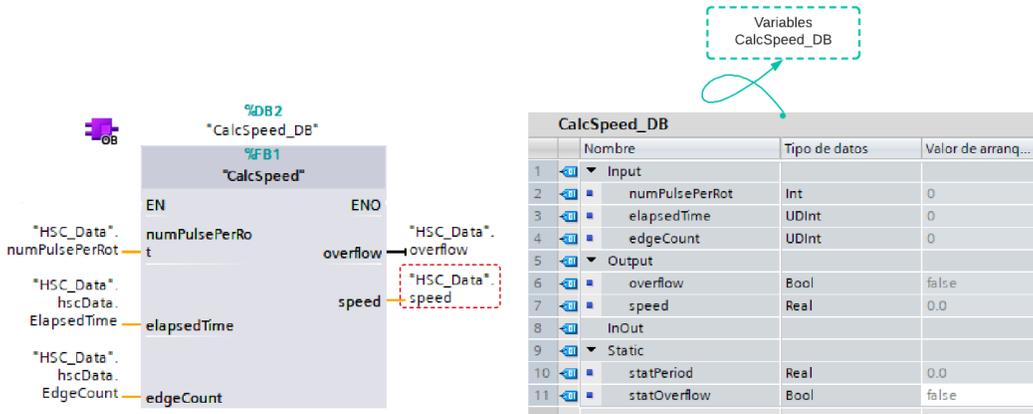


Nota. Si bien “*CTRL_HSC_EXT*” es una función propia del programa, el bloque de datos de la función debe ser creado. Adicionalmente para implementar la variable de control “*CTRL*”, es necesario crear una variable del tipo “*HSC_Period*”, la misma contendrá todos los parámetros de control del bloque.

Bloque de función Calc_Speed. Para el cálculo de la velocidad se implementó el bloque de función “*Calc_Speed*” de la Figura 90. La velocidad resultante de la programación se almacena en la variable “*HSC_Data*”.*speed*”.

Figura 90.

Bloque de función CalcSpeed.



Para el cálculo del periodo entre cada sección metálica es necesario considerar el total de pulsos por rotación que se van a implementar. En este caso el encoder que se diseñó cuenta 10 secciones, pero entre más pulsos por rotación se puedan añadir el cálculo de velocidad será más preciso. La programación del bloque de función "CalcSpeed" se detalla a continuación.

Figura 91.

Programación del bloque "CalcSpeed".

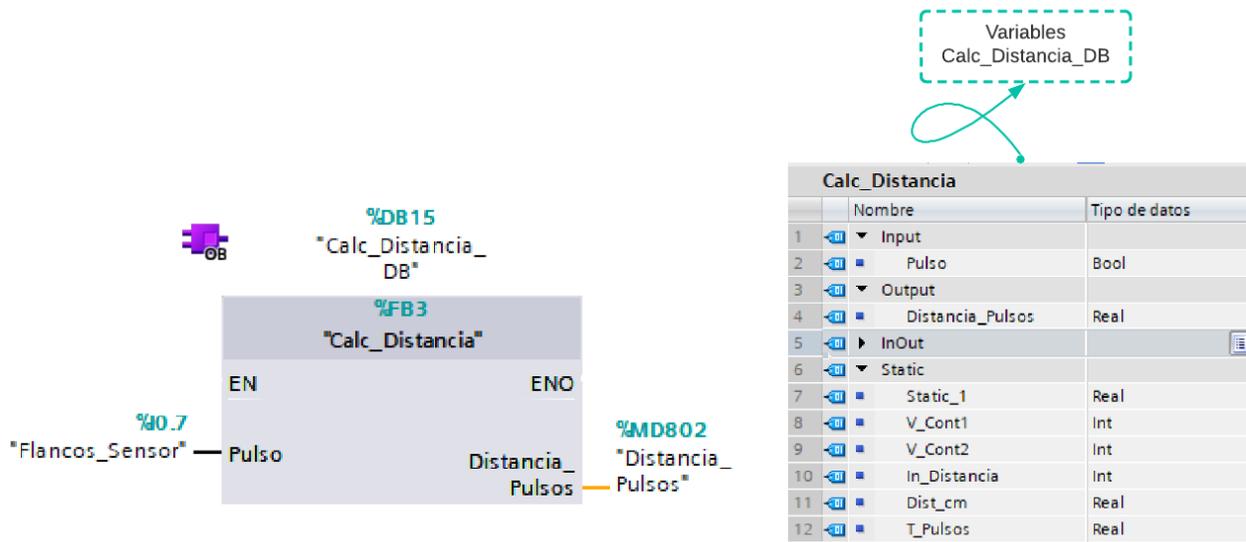
```

1
2
3 // Si el tiempo transcurrido (Elapsed time) y el conteo (edgeCount)son válidos, calculamos el periodo
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;
--
    
```

Bloque de función Calc_Distancia. En el apartado del diseño del sistema de instrumentación se realizó la explicación pertinente acerca del cálculo matemático para obtener el valor de distancia por pulso que recorre el mecanismo. Dicho cálculo se implementa en el bloque de función "Calc_Distancia" de la Figura 92.

Figura 92.

Bloque de función Calc_Distancia.



La programación del bloque "Calc_Distancia_DB" se presenta a continuación en la Figura 93. La clave en este punto es detectar cada flanco positivo del sensor inductivo. Si solo se consideraría la activación y desactivación del sensor ocurrirían varias sumas sucesivas de distancia y el cálculo no sería posible. Por otra parte, si solo se considera el flanco positivo solo ocurrirá una suma por cada sección metálica detectada. Otro aspecto que se consideró en este apartado, es la opción de calibrar el encoder, es decir ponerlo a 0 en la posición inicial del recorrido del mecanismo.

Figura 93.

Programación el bloque "Calc_Distancia_DB"

```

1 #T_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_Grafcet".GO_2[3]=FALSE THEN
23  #Dist_cm := 0;
24  ;
25 END_IF;

```

Sistema de supervisión

Implementación del sistema de supervisión

El objetivo planteado para el sistema de supervisión es el diseño y simulación de una interfaz gráfica HMI. Al ser un prototipo, la empresa auspiciante MECANOILS S.A., no proporciona una HMI física debido a su elevado costo. En su lugar se planteó utilizar un ordenador que cumpla las funciones del sistema de supervisión. Como se planteó en el capítulo 3 el sistema de supervisión está compuesto por 5 imágenes, las cuales tratan de abarcar todas las necesidades del automatismo. Siguiendo la estructura de navegación entre pantallas y la norma ANSI/ISA 101 se presentan a continuación las cláusulas tomadas en cuenta para el diseño de cada una de las ventanas antes mencionadas.

Tabla 50.*Matriz de aplicación de la norma ISA 101.*

N.-	Cláusula	Aplicación
4.1	Introducción	El diseño de la HMI cuenta con tipos de usuarios los cuales tienen permisos diferentes y accesos diferentes a las funcionalidades de la HMI
4.2.2.1.2	Uso del color	Se utilizan colores y tonalidades bajas para añadir significado a la exhibición y no causar ningún tipo de distracción al operador
5.1.1	Consistencia del diseño	Se representa de manera simple el funcionamiento del proceso. Lo que brinda una idea clara de funcionamiento, de tal manera que facilita a la interacción con el usuario.
5.2.1.2	Color	Se utiliza un fondo con una tonalidad gris clara para representar la activación y para desactivación se utiliza una escala más oscura de gris.
5.2.1.3	Interacciones entre fondo y primer plano	Para la interacción de colores se utiliza un fondo gris claro, el cual permite que la información mostrada se visualice sin ocasionar distorsiones cromáticas.
5.2.1.5	Dinámica visual	Los únicos elementos que parpadean son utilizados para representar las alarmas críticas del sistema y las condiciones de rearme del automatismo.

N.-	Cláusula	Aplicación
6.3	Jerarquía de visualización	Jerarquía de pantallas: Nivel 1 para una vista general de parámetros clave y alarmas del proceso, Nivel 2 para una descripción más detallada del proceso mostrado en el Nivel 1.
6.3.1	Pantallas de nivel 1	Proporciona una visión general o un resumen de los parámetros clave, las alarmas, las condiciones de proceso calculadas.
6.3.2	Pantallas de nivel 2	Pantalla de proceso de alto nivel. Contiene más detalles que la pantalla de nivel 1. Es la pantalla principal de operación durante las operaciones normales y el monitoreo de rutina.
7.2.1.2	Presentación de números	Las unidades de ingeniería están disponibles para referencia del operador y se muestran directamente en la pantalla.
7.2.1.3	Presentación y entrada de texto	El texto en títulos y botones se presenta con la primera letra en mayúscula para facilitar su lectura. Adicionalmente se configura el tamaño y una fuente de letra adecuada.
7.2.1.5	Botones	Se etiquetan los botones de manera clara que asocie la acción correspondiente. El diseño de los botones es suficientemente grande para su selección rápida.
7.2.2	Métodos de navegación	Se implementan métodos de navegación entre pantallas, mediante botones que permiten un buen desempeño, consistencia e intuitiva.

Puesta en marcha del sistema de supervisión

Inicio de Sesión. Para la ventana de “Inicio de Sesión” (Figura 94) se ha planteado un diseño con niveles de acceso. Según el tipo de cargo se tiene acceso a funcionalidades específicas. Al ingresar el usuario y contraseña varios campos de entrada y salida se adaptan al tipo de usuario. La funcionalidad de cada uno sus botones se explica a continuación en la Tabla 51.

Figura 94.

Ventana de “Inicio de Sesión”.

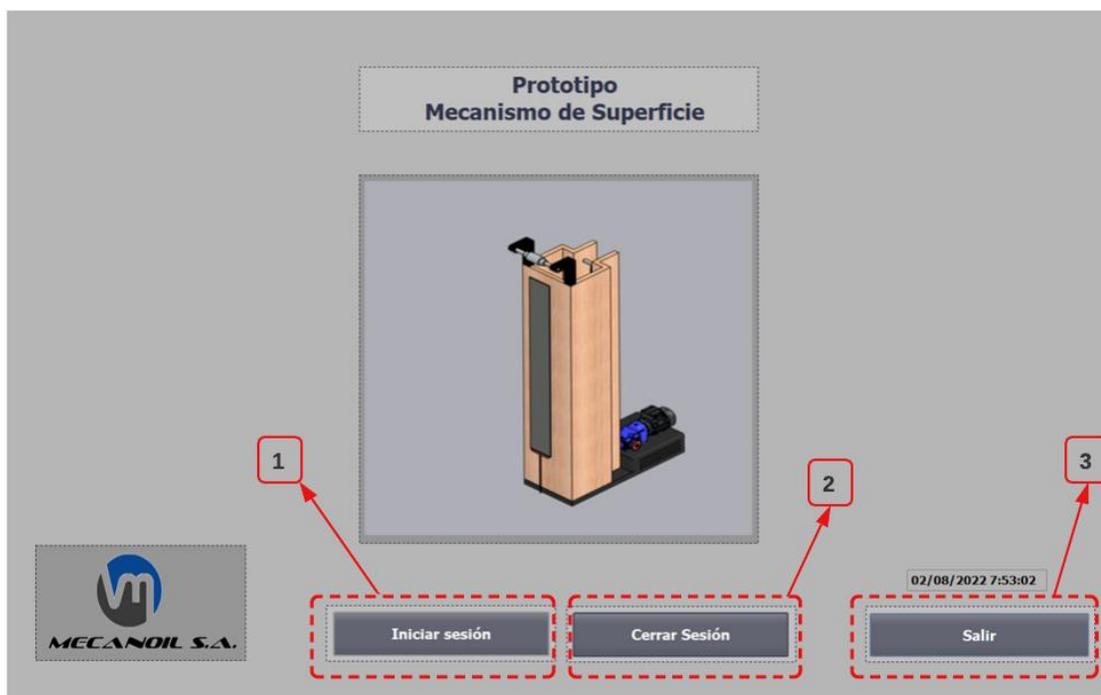


Tabla 51.

Descripción de funcionamiento ventana “Inicio de Sesión”.

Botón N.º	Descripción
1. Inicio de Sesión	Permite ingresar un usuario y contraseña, en base al usuario se otorgan permisos diferentes para el control de la interfaz gráfica.

Botón N.º	Descripción
2. Cerrar Sesión	Cierra la sesión de cualquier usuario ingresado.
3. Salir	Botón implementado para salir del sistema, es decir cierra el programa que ejecuta la interfaz gráfica.

Proceso General. A nivel de información la ventana de “Proceso General” (Figura 95) presenta la estructura general del proyecto y de las diferentes variables que lo conforman. Es el punto de partida para elegir el modo de marcha deseado y controlar el funcionamiento del automatismo. De tal manera que se debe diseñar para que sea la principal ventana de operación. Adicionalmente se incluyen características de rendimiento relacionado con los factores de servicio de una HMI explicados en el capítulo 2 en el nivel de célula. En la Tabla 52 se explica la funcionalidad de los parámetros implementados.

Figura 95.

Ventana de “Proceso General”

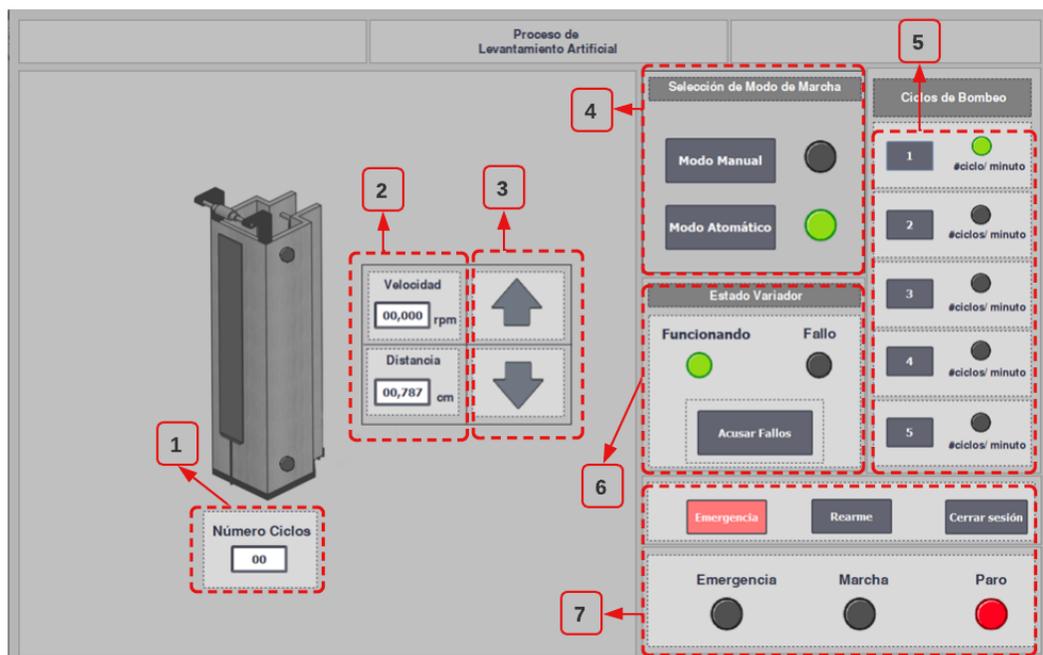


Tabla 52.

Descripción de funcionamiento ventana “Proceso General”.

Botón N.º	Descripción
1. Número de ciclos	Presenta información relacionada con el número de ciclos que realiza el automatismo.
2. Velocidad y Distancia	Presenta el valor de las variables medidas por el sensor encoder.
3. Fechas indicadoras	Indican el ciclo en el que se encuentra el automatismo, ya sea el ciclo ascendente o el descendente.
4. Modos de marcha	Permiten elegir entre el modo manual o el modo automático de funcionamiento.
5. Ciclos de bombeo	Esta sección permite elegir el número de ciclos de bombeo con los que inicia el proceso secuencial.
6. Estado del variador	El botón de “Acusar fallos” hace referencia a los fallos que se producen en el variador. Cuando existe un fallo el led físico de bus del variador empieza a parpadear. El usuario con permisos de administrador será capaz de acusar estos fallos y poner al variador en estado operativo nuevamente.
7. Emergencia y Rearme	Sección que permite activar las acciones de emergencia previamente programadas. Por otra parte, el botón de rearme es el encargado de posicionar al automatismo en condiciones óptimas de funcionamiento.

Modo Automático. Ventana del proceso capaz de realizar el accionamiento del sistema. En esta ventana (Figura 96) se presentan datos acerca del sistema, variables del motor y variador. Para adquirir los datos del variador y motor se hace uso de la librería SINAPARA de la librería de funciones de Tia Portal. En consecuencia, en esta ventana se desarrolla el funcionamiento secuencial del automatismo, es así que los botones implementados permiten al usuario acceder a todas las funciones del GRAFCET de producción G4. Adicionalmente se consideraron criterios de “High Performance” para los colores de activación y desactivación de elementos. En la Tabla 53 se explica la funcionalidad de los parámetros que no se han tocado en los apartados anteriores.

Figura 96.

Ventana de “Modo Automático”.

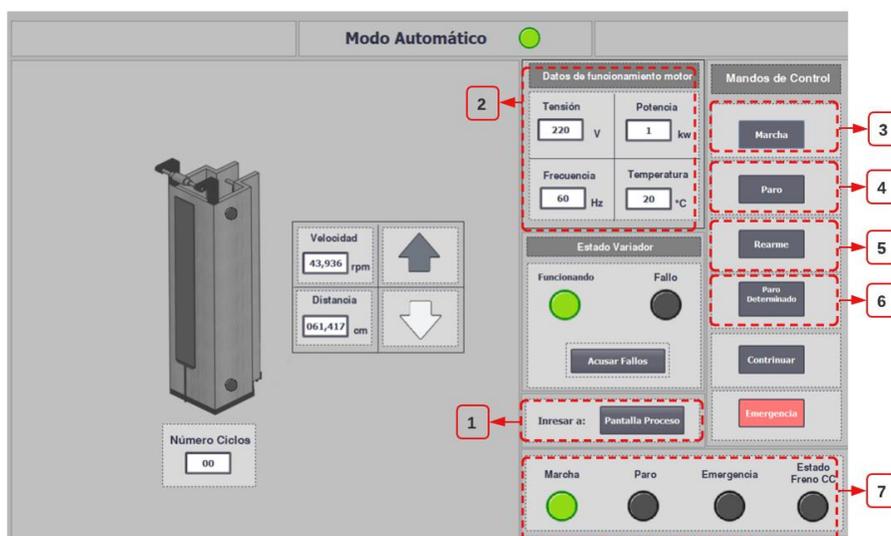


Tabla 53.

Descripción de funcionamiento ventana “Modo Automático”.

Botón N.º	Descripción
1. Pantalla del proceso	Permite realizar un salto a la ventana general del proceso.

Botón N.º	Descripción
2. Variables del motor	Se presentan las variables de funcionamiento con las que el motor está funcionando.
3. Marcha	Permite iniciar el proceso secuencial del automatismo.
4. Paro	Finaliza el ciclo de funcionamiento normal y lo lleva al estado A1 del módulo de procedimientos de parada.
5. Rearme	Encargado de posicionar al automatismo en condiciones óptimas de funcionamiento.
6. Paro determinado	Permite detener el automatismo en cualquier etapa de funcionamiento
7. Luces indicadoras	Indican el estado de funcionamiento del automatismo, se implementaron 4 luces que indican que el automatismo se encuentra en: marcha, paro y emergencia, adicionalmente se presenta el estado de activación del freno de corriente continua.

Modo Manual. Típicamente utilizado para calibraciones, la ventana de modo manual (Figura 97) permite el funcionamiento no secuencial del automatismo. En esta ventana se ilustra el estado de los diferentes actuadores y sensores del sistema. De igual manera que en la ventana anterior se utilizan criterios de “*High Performance*” para los colores de activación y desactivación de los sensores y actuadores del sistema. Cabe recalcar que incluso si en el modo manual se excede el límite del recorrido vertical el sistema activará las condiciones de emergencia antes programadas. En la Tabla 54 se explica la funcionalidad de los parámetros de dicha ventana.

Figura 97.

Ventana de Modo Manual.

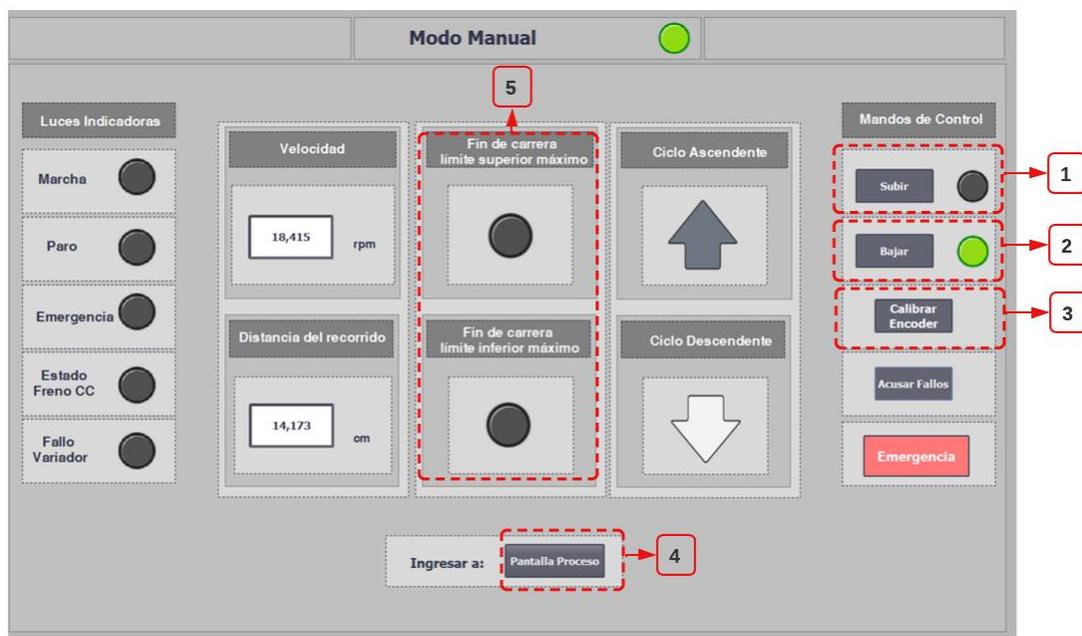


Tabla 54.

Descripción de funcionamiento ventana "Modo Manual".

Botón N.º	Descripción
1. Subir	Utilizado para realizar el ciclo ascendente del automatismo sin verificación de orden.
2. Bajar	Utilizado para realizar el ciclo descendente del automatismo sin verificación de orden.
3. Calibrar encoder	Posiciona el valor de 0 en la variable distancia después de la calibración.
4. Fines de carrera de seguridad	Luces indicadoras de emergencia para los extremos superior e inferior de emergencia.
5. Pantalla de proceso	Permite regresar a la pantalla de proceso general.

Gráfica de control. Por último, se presenta la ventana de “Gráfica de Control” (Figura 98), la misma incluye información acerca de los parámetros de control. Esta pestaña utiliza los criterios de “Interacción con el usuario” presentados en el capítulo 2. Por otra parte, esta pantalla es modificable sólo por el usuario que tenga permisos de administrador. Su implementación es necesaria para que el usuario encargado no tenga que conectarse desde un ordenador al PLC y pueda modificar dichos parámetros desde la interfaz gráfica. En la gráfica se diagrama el comportamiento de la variable velocidad (PV) con respecto a la consigna de velocidad (SP) del recorrido del tramo vertical. En la Figura 98 se presenta la ventana de “Gráfica de Control”. En la Tabla 55 se explica la funcionalidad de los parámetros que la conforman.

Figura 98

Ventana de Gráfico de Control

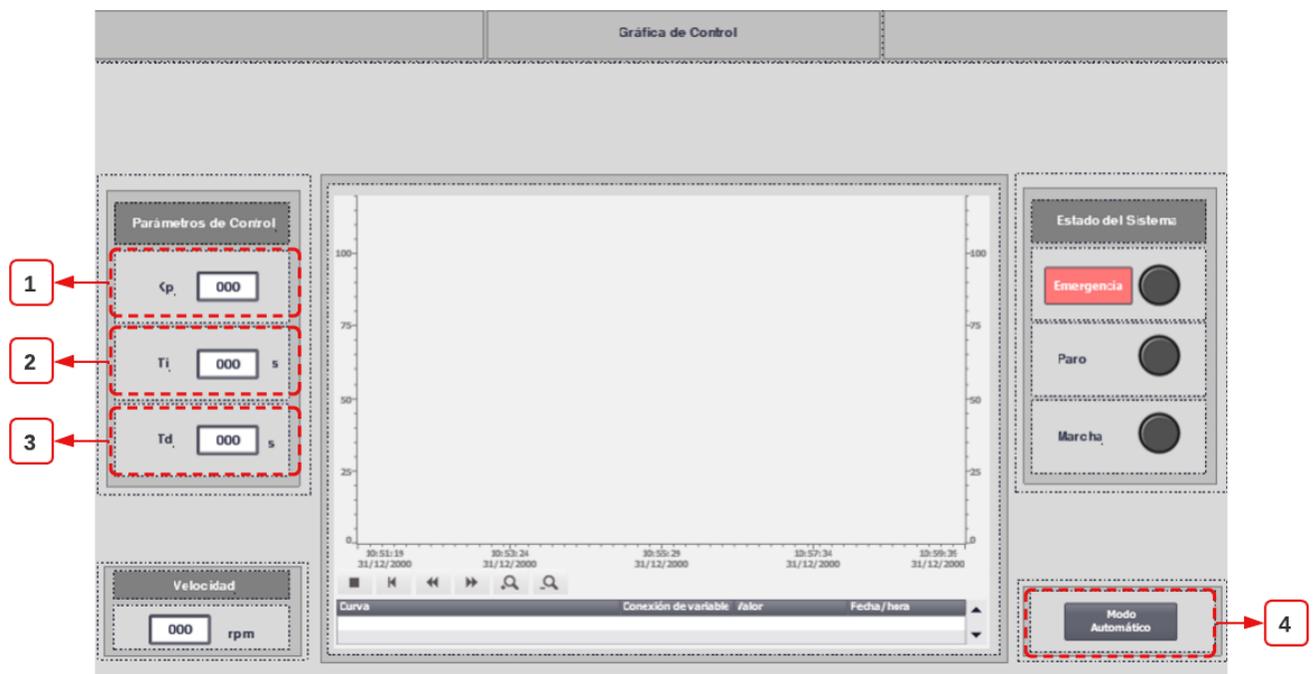


Tabla 55.

Descripción de funcionamiento ventana “Gráfica del Proceso”.

Botón N.º	Descripción
1. Subir	Utilizado para realizar el ciclo ascendente del automatismo sin verificación de orden.
2. Bajar	Utilizado para realizar el ciclo descendente del automatismo sin verificación de orden.
3. Calibrar encoder	Posiciona el valor de 0 en la variable distancia después de la calibración.
4. Fines de carrera de seguridad	Luces indicadoras de emergencia para los extremos superior e inferior de emergencia.

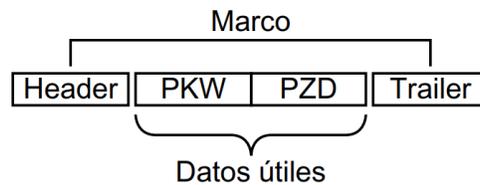
Sistema de comunicación

Implementación del sistema de comunicaciones.

El diseño de la arquitectura de comunicaciones contempla el protocolo *Profinet*. Para el caso, “en el perfil *PROFIdrive* hay determinados telegramas definidos para aplicaciones típicas. Así, cada número de telegrama *PROFIdrive* equivale a una combinación definida de señales. De este modo, un número de telegrama describe el intercambio de datos cíclico de manera unívoca”. (Siemens, 2021). Para entender cómo ocurre el intercambio de datos cíclicos entre el PLC Siemens S7-1200 y el variador SINAMICS G120X resulta necesario explicar la estructura de un telegrama, en donde para el intercambio de datos el variador y el controlador superior empaquetan sus datos en telegramas. En la Figura 99 detalla la estructura de un telegrama.

Figura 99.

Estructura de un telegrama.



Nota. Figura tomada de (Siemens, 2021).

- El encabezado (Header) y la cola (Trailer) forman el marco del protocolo. No obstante, al interior de este marco se encuentran los datos útiles PKW y PZD.
- Los datos "PKW" permiten al controlador leer o modificar los parámetros del convertidor. Hay que tener en cuenta que el área "PKW" no se encuentra presente en todos los telegramas. Es decir, existen telegramas que en su estructura de datos útiles poseen solo datos "PZD"
- Los datos "PZD" permiten al convertidor recibir órdenes de mando y consignas del controlador superior, además permiten enviar avisos de estado y valores de consignas reales.

Para la implementación del sistema de comunicaciones se plantea utilizar el telegrama 350 el cual cuenta con dos palabras de mando y dos palabras de estado, la palabra de mando STW3 contiene en uno de sus 16 bits la activación del freno por corriente continua y la STW1 la consigna de velocidad. Sin embargo, existe un telegrama libre, conocido como telegrama 999 o BICO, el mismo permite añadir a conveniencia los parámetros necesarios para leerlos o modificarlos, lo que quiere decir que en su trama de datos cuenta con datos PKW y PZD. Se elige el telegrama 350 por dos razones. La primera es que ofrece los parámetros necesarios para el proyecto y la segunda que al ser un variador relativamente nuevo el

software Tia Portal no cuenta con soporte completo hacia el variador, lo cual dificulta implementar el telegrama BICO. En la Tabla 56 se presenta la estructura del telegrama 350.

Tabla 56.

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

Nota. Cada palabra de mando y palabra de estado tiene una configuración de 16 bits detallada en el manual de usuario del variador. Tabla adaptada de (Siemens, 2021).

Puesta en marcha del sistema de comunicaciones

La puesta en marcha del sistema de comunicaciones considera los aspectos que intervienen en la comunicación entre el PLC, variador e interfaz gráfica. De tal manera que este apartado se encuentra dividido en las siguientes secciones: configuración del telegrama, configuración *Profinet* del PLC, variador, freno de corriente continua e interfaz gráfica.

Configuración del telegrama. Para seleccionar el telegrama en Tia Portal, es necesario acceder a la sección de dispositivos y redes, entrar a la configuración del variador y seleccionar desde la pestaña de

submódulos el telegrama deseado (Figura 100). Cada palabra de mando del telegrama está constituida por un conjunto de 16 bits con funciones específicas y su configuración resultante de bits puede ser expresada en valores hexadecimales. En la Figura 100 se presentan las variables correspondientes a las palabras de mando y estado del telegrama 350 y en la Tabla 57 se resumen las configuraciones utilizadas tanto de la palabra de mando STW1 como para la palabra STW3.

Figura 100.

Selección de telegrama.

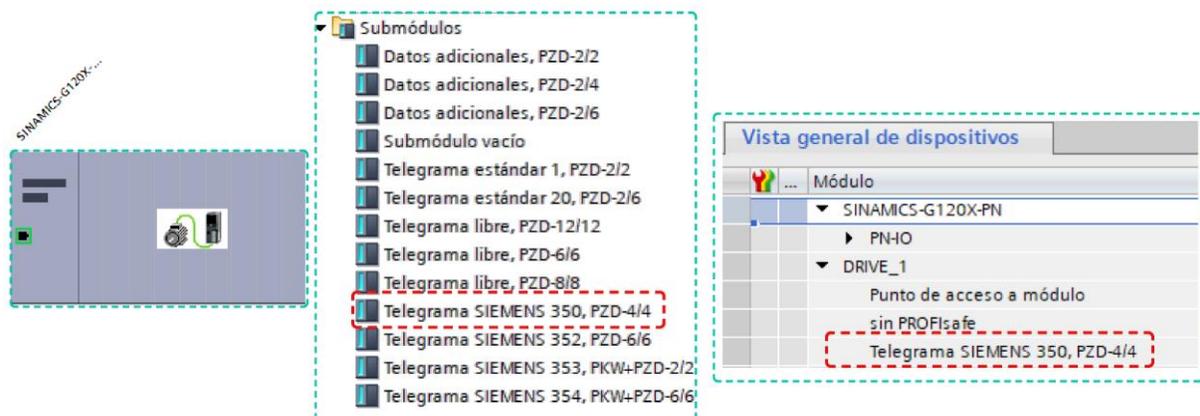


Figura 101.

Direcciones telegrama 350.

Nombre	Tipo	Dirección	Tabla de variables	Comentario
ZSW1	Int	%IW68	Tabla de variables estándar	Palabra de estado ZSW1 del telegrama 350
NIST_A_GLATT	Int	%IW70	Tabla de variables estándar	Velocidad real filtrada
IAIST_GLATT	Int	%IW72	Tabla de variables estándar	Intensidad real filtrada
ZSW3	Int	%IW74	Tabla de variables estándar	Palabra de estado ZSW3 del telegrama 350
STW1	Int	%QW64	Tabla de variables estándar	Palabra de mando STW1 del telegrama 350
Consigna_Velo...	Int	%QW66	Tabla de variables estándar	Consigna de velocidad del telegrama 350
Lim_Par	Int	%QW68	Tabla de variables estándar	Limite de par del telegrama 350
STW3	Int	%QW70	Tabla de variables estándar	Palabra de mando STW3 del telegrama 350

Tabla 57.

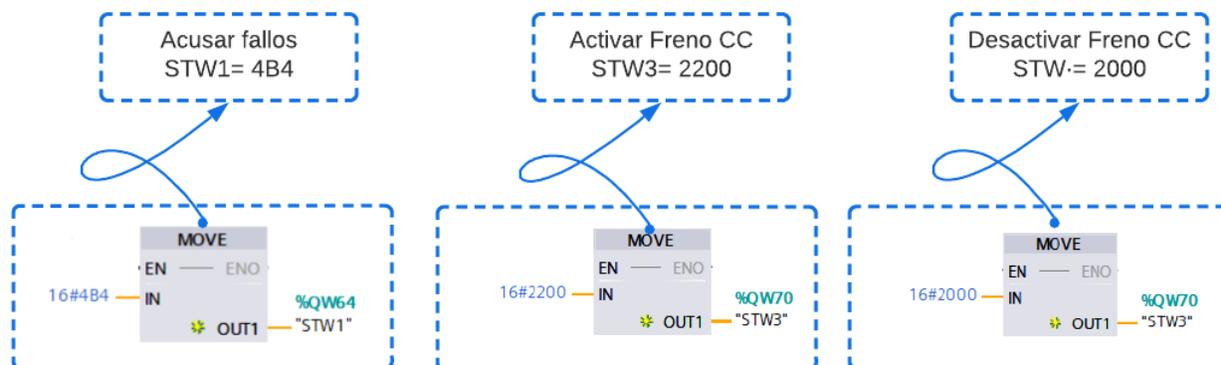
Combinaciones de palabras de mando STW1 y STW3.

Palabra de mando	Significado	bits	Hexadecimal
STW1	Puesta en servicio/ Parada natural	00000100011111110	16#047E
	Sentido de giro positivo	00000100011111111	16#47F
	Inversión de sentido de giro	00001100011111111	16#C7F
	Confirmar fallos	0000010010110100	16#4B4
STW3	Freno de corriente continua activo	0010001000000000	16#2200
	Desactivar freno de corriente continua	0010000000000000	16#2000

Para el envío de los valores hexadecimales de cada palabra de mando es necesario utilizar bloques de transferencia "MOVE". En consecuencia, a la entrada del bloque se digita el parámetro a enviar y a la salida la dirección. En la Figura 102 se presenta un ejemplo del envío de dichos valores mediante el protocolo *Profinet* hacia las diferentes palabras de mando.

Figura 102.

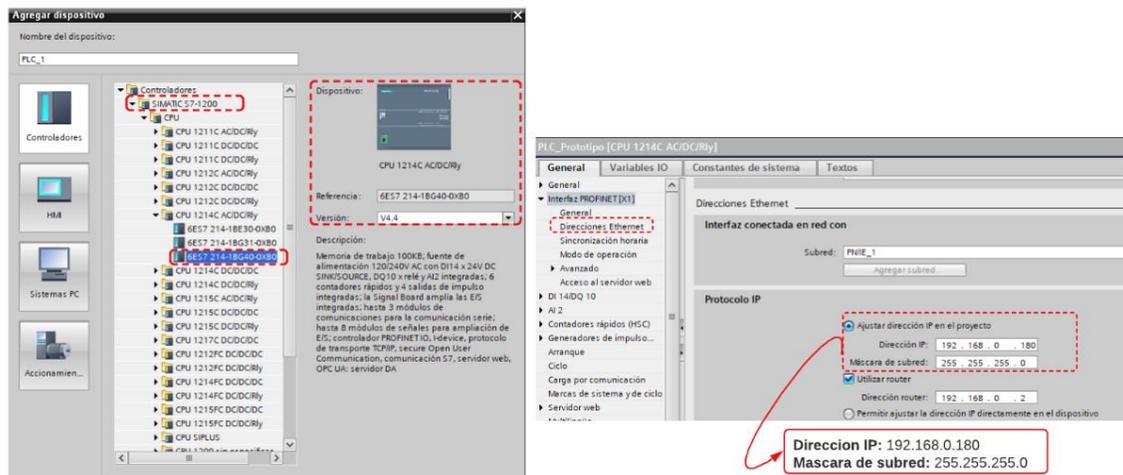
Transferencia de valores hexadecimales.



Configuración Profinet del PLC. En este apartado se realiza la configuración de los parámetros de comunicación del PLC por medio del *software* TIA Portal. Es importante señalar que la comunicación entre el PLC y la PC se realiza a través del estándar Ethernet y que para configurar el PLC es necesario reconocer las características del mismo, para esto existen dos opciones: Importar un PLC sin especificar la serie del controlador o mediante el número de serie de la CPU. Para el caso se utilizó la segunda opción ya que en el análisis de la selección de equipos se determinaron las características exactas del controlador. Acto seguido se configura la interfaz PROFINET [X1] en donde debemos asignar una dirección IP única al PLC. En la Figura 103 se detalla el proceso de selección del controlador y la configuración de la red *Profinet*.

Figura 103

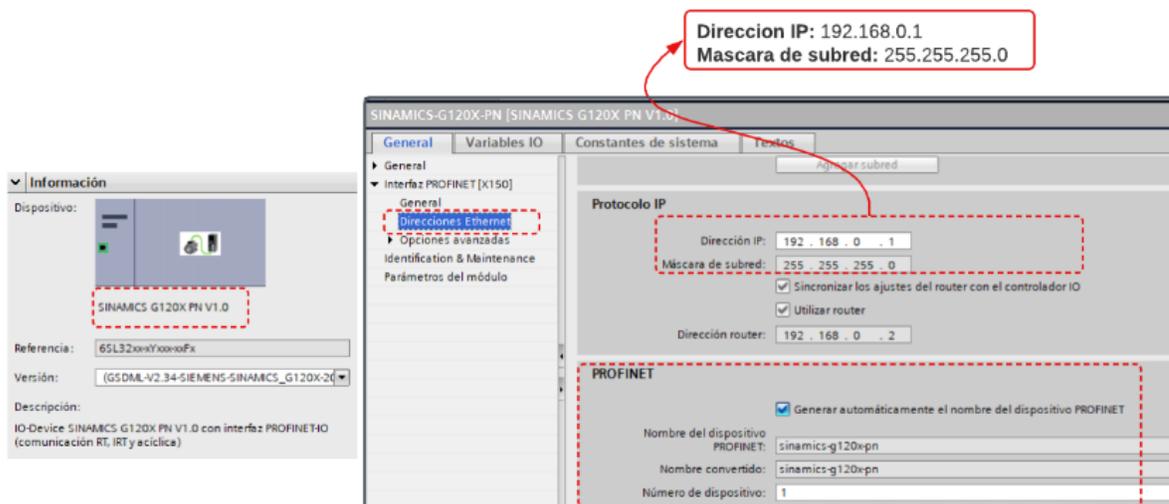
Selección de la CPU del PLC y configuración de la interfaz PROFINET.



Configuración Profinet del variador. Para la configuración del variador SINAMICS G120X (Figura 104) el primer paso es instalar los *drivers* y la configuración básica. Este paso es necesario ya que al ser un nuevo modelo de variador el *software* Tia Portal no cuenta con el soporte completo de configuración. La dirección IP asignada al variador debe ser única y debe estar en el rango de la dirección IP del PLC. En cuanto al nombre debe ser el mismo en el programa y en el dispositivo físico, si este parámetro se encuentra mal configurado en el variador se encenderá un led rojo de fallo de bus.

Figura 104.

Selección de la CPU del variador y configuración de la interfaz PROFINET



El siguiente y último paso antes de la puesta en marcha es configurar los parámetros básicos del variador. Estos parámetros incluyen la información técnica del motor. Para esto es necesario acceder al panel de operador e ingresar a la sección de parámetros. Acto seguido se elige el número de parámetro y se lo configura. En la Tabla 58 haciendo referencia a la placa del motor se resumen los parámetros a configurar para una primera puesta en marcha.

Tabla 58

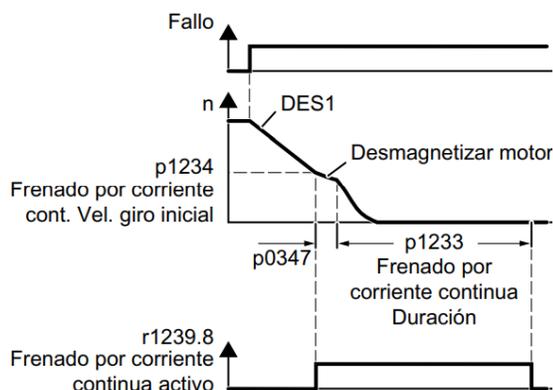
Parámetros del motor para la primera puesta en marcha.

Parámetro	Descripción	Valor
p0304	Tensión nominal	220 VDD
p0305	Intensidad del motor	3.2 A
p0307	Potencia asignada del motor	1 HP
p0310	Frecuencia asignada	60 Hz
p0311	Velocidad de giro asignada	1705

Configuración del freno de corriente continua. El variador SINAMICS G120 X dispone de la opción de frenado por corriente continua. El freno de corriente continua generalmente se utiliza en aplicaciones que no requieren un frenado emergente constante, esto debido a que si el frenado de corriente continua se utiliza de forma prolongada o frecuente el motor se sobrecalienta y en consecuencia se pueden producir daños (Siemens, 2021) .Existen 4 eventos diferentes de activación para frenado de corriente continua. Al utilizar un telegrama para la comunicación entre el PLC y el variador, el único medio o evento permitido para activar el freno de corriente continua es el de la Figura 105. Los 3 métodos restantes se pueden implementar mediante macros predefinidos del variador.

Figura 105.

Frenado por corriente continua mediante orden de mando



Nota. Figura tomada de (Siemens, 2021).

Para una explicación detallada de la Figura 105, primero se describe en la Tabla 59 las características de los parámetros visibles en la imagen.

Tabla 59.

Parámetros del frenado por corriente continua mediante orden de mando.

Parámetro	Descripción	Valor
P1232	Intensidad de frenado por corriente continua	3.4 A

Parámetro	Descripción	Valor
p1233	Duración del frenado de corriente continua	1 s
p1234	Velocidad inicial de frenado por corriente continua	21000 rpm

Para activar el frenado de cc es necesaria una orden de mando, en el caso del proyecto esta orden de mando viene dada por: el paro de emergencia, los fines de carrera de los límites máximos superior e inferior y el exceso de velocidad máxima programada. Para esto es necesario explicar la función que cumple cada uno de estos parámetros. El parámetro p1234 está ajustado de fábrica a una velocidad de 21000 rpm, es decir a una velocidad que el motor jamás podrá alcanzar, si se desea configurar este evento de frenado se deberá establecer una velocidad consigna a la que el motor tenga que frenar. El parámetro p1233 hace referencia a la duración del frenado de cc, este tiempo no debe ser muy prolongado, en el caso del proyecto basta con 1s para que el motor frene en su totalidad. Si se excede este tiempo el motor puede sobrecalentarse y se pueden generar daños. Es así que transcurrido 1s el PLC envía la orden al variador y desconecta al motor durante la parada. Por otra parte, este tiempo no debe ser muy corto tampoco, debido a que el motor puede vencer la inercia presente en el momento de frenado, es decir retoma la velocidad consigna programada. Adicionalmente, el parámetro p1232 viene de ajuste de fábrica a una intensidad de 0 A. Generalmente este parámetro se establece al valor de la corriente nominal del motor y la explicación es la siguiente. Si el motor gira a 10 rpm con una intensidad de casi 2.5 A el campo magnético inducido por el freno de cc debe superar la corriente de 2.5A. Es así que se fija en el caso del proyecto una corriente de 3.4 A que es la corriente nominal del motor

Configuración comunicación PG/PC. Para unir a la red *Profinet* el sistema PC encargado de simular la HMI (Figura 106), hace falta asignar una dirección IP de igual rango que la del PLC, cabe aclarar que dicha dirección debe ser la misma del ordenador donde se desee ejecutar la HMI. Por último, en el panel

de control del ordenador se configura la interfaz PG/PC y se selecciona la tarjeta de red del ordenador (Figura 107).

Figura 106.

Selección del sistema PC para interfaz gráfica y configuración de red.

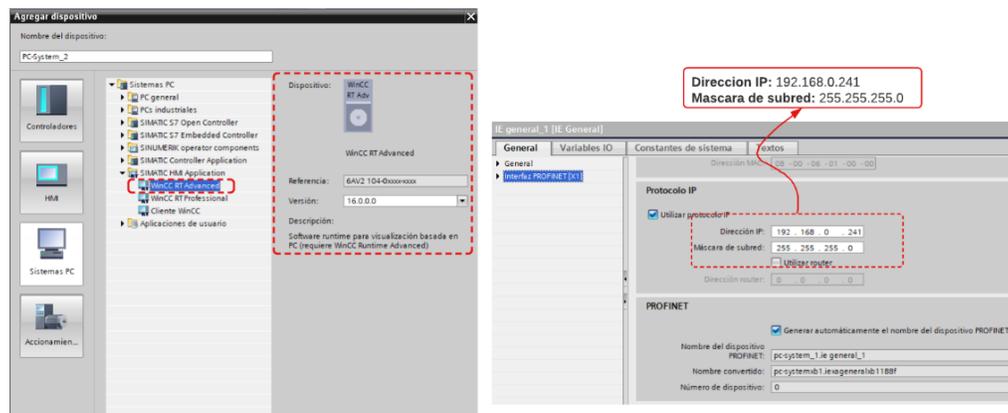
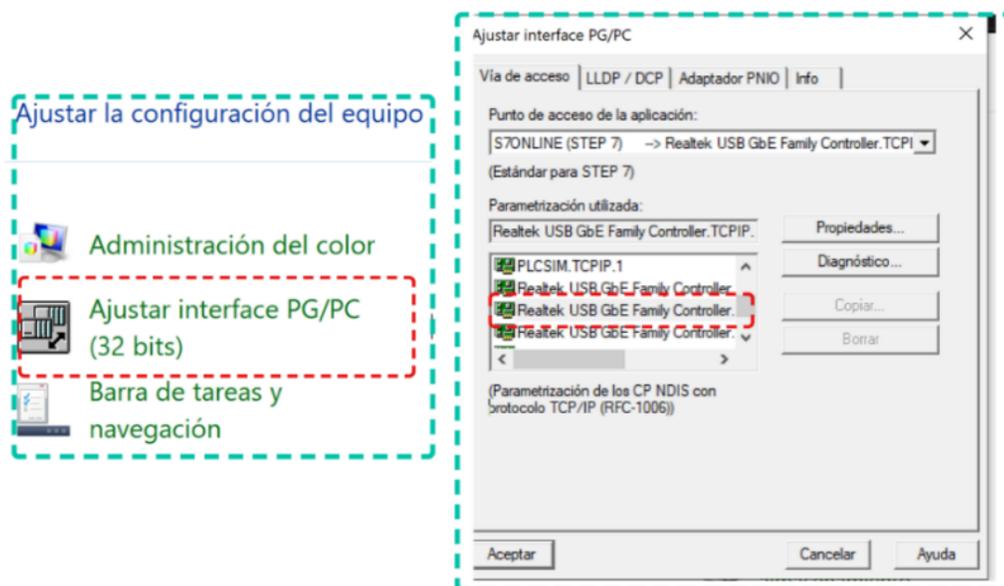


Figura 107.

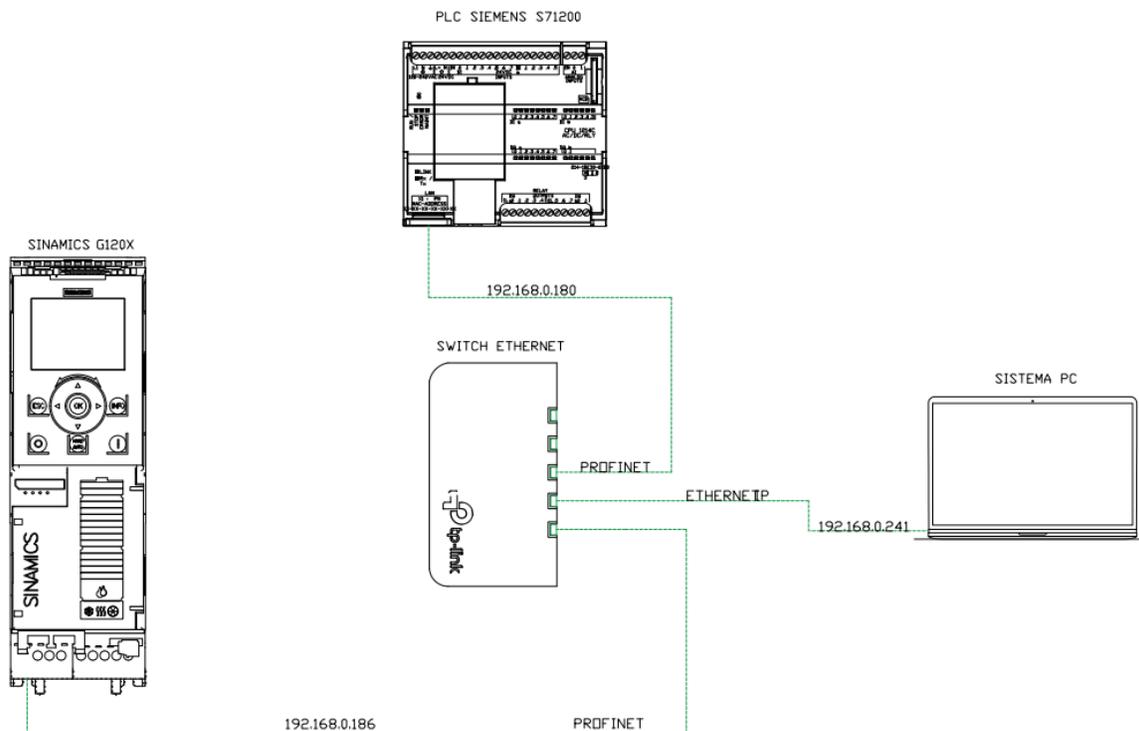
Configuración interfaz PG/PC



Para concluir con esta sección se presenta la arquitectura del sistema de comunicaciones a detalle.

Figura 108.

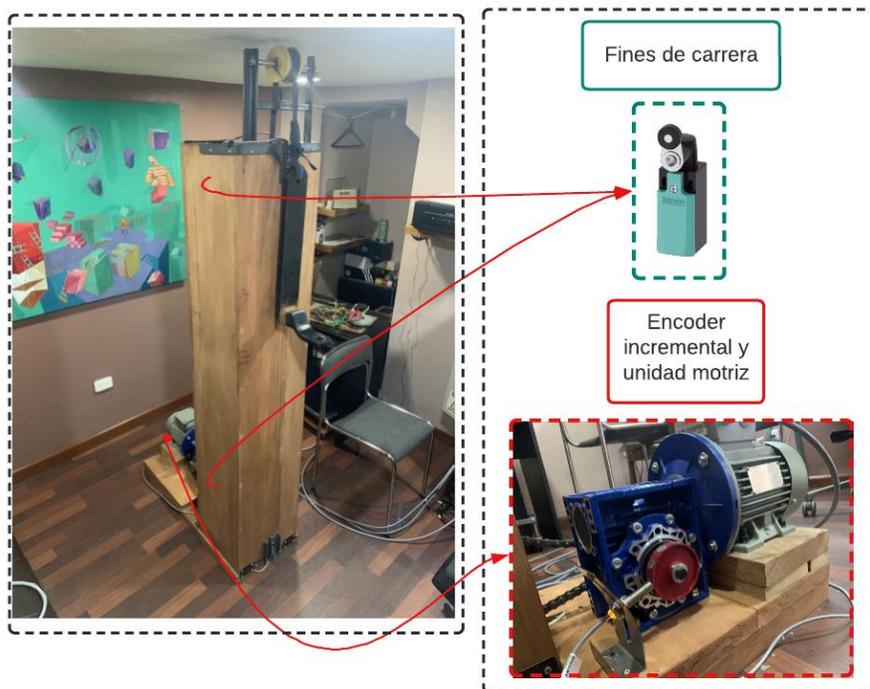
Arquitectura de comunicaciones.



Antes de finalizar el capítulo de ingeniería de detalle es necesario presentar los módulos reales que conforman el sistema. En la Figura 109 se presenta la distribución real de los elementos implementados en el prototipo. Dicha implementación hace referencia a la ingeniería básica y de detalle del tablero de control, sistema de control, sistema de instrumentación, sistema de supervisión y sistema de comunicaciones implementada a lo largo del desarrollo del presente documento. Información acerca del ensamble del motor a la caja reductora se encuentran en la sección de apéndices.

Figura 109.

Sistema de instrumentación y prototipo.

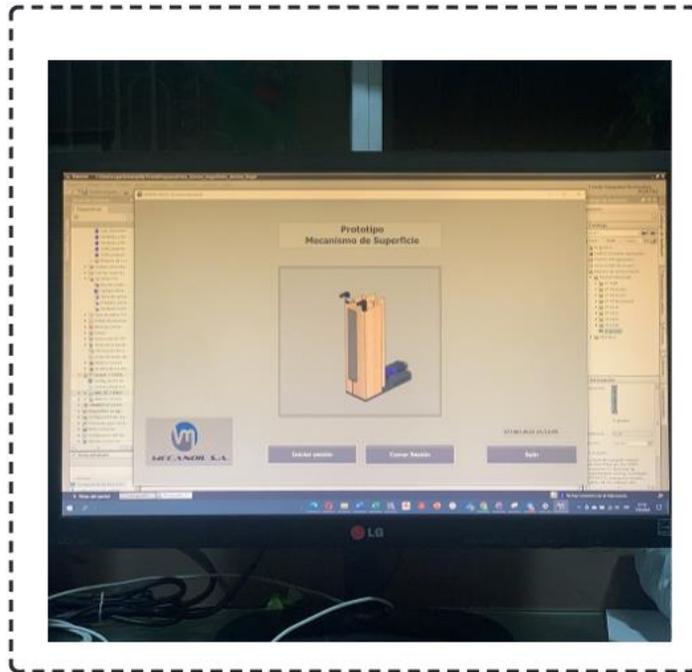
**Figura 110.**

Tablero de control, sistema de control y sistema de comunicaciones.



Figura 111.

Sistema de supervisión.



Capítulo 5

Pruebas y Resultados

Introducción

En este capítulo se realizan dos tipos de pruebas, la primera tiene que ver con las pruebas de funcionamiento y la segunda se realiza utilizando pruebas de usabilidad que evalúan el grado en el que el sistema puede ser utilizado por usuarios específicos.

Pruebas de funcionamiento

Para dar inicio a las pruebas de funcionamiento del automatismo se empiezan realizando mediciones de las variables físicas de velocidad y distancia. Finalmente se realizan pruebas de la estrategia de control implementada y de los ciclos de funcionamiento del prototipo.

Mediciones sensor encoder

Toda medición va acompañada de un cierto grado de error, al haber fabricado el sensor encoder resulta necesario valorar este grado de error. Por consiguiente, se realizan pruebas para las variables de velocidad y distancia.

Velocidad. Para las pruebas de medición de los valores de velocidad entregados por el sensor encoder se establecen 12 velocidades en rangos de frecuencia diferentes. La toma de datos para su posterior comparación se da de la siguiente manera, el valor real o ideal es el entregado por el panel de operador del variador de frecuencia, la única consideración a tomar en cuenta es que hay que dividirla para 30 debido al factor de reducción de la caja reductora. Por otra parte, el valor medido se obtiene del bloque "*Calc_Speed*" detallado en la ingeniería de detalle el cual es encargado de entregar la velocidad medida por el sensor. En la Tabla 60 se presenta la comparativa de dichos datos.

Tabla 60.*Análisis de datos de medidas 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%

Como resultado de la imprecisión absoluta presentada en la Tabla 60 se puede decir que la medida de velocidad entregada por el sensor encoder es de $0.358 \pm$ el valor de la velocidad expresada en rpm. Por otra parte, el promedio del error relativo nos entrega un resultado de 1.40%, este valor es un indicador de la calidad de medida. El error presente se debe principalmente al número de secciones metálicas implementadas en el encoder. A pesar de que no es un error muy elevado se puede mejorar

implementando un mayor número de secciones metálicas o en el mejor de los casos adquiriendo un sensor encoder más robusto.

Distancia. Para las pruebas de medición de los valores de distancia entregados por el sensor encoder se establecen 10 distancias diferentes en el recorrido normal del tramo vertical del prototipo. El análisis a utilizar es el mismo que se utilizó en el apartado anterior, pero en este caso el valor medido real se lo realiza con una cinta métrica y el medido por el sensor se obtiene de bloque “*Calc_Distancia*” detallado en la ingeniería de detalle. En la Tabla 61 se presenta la comparativa de dichos datos.

Tabla 61.

Análisis de datos de medidas 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%

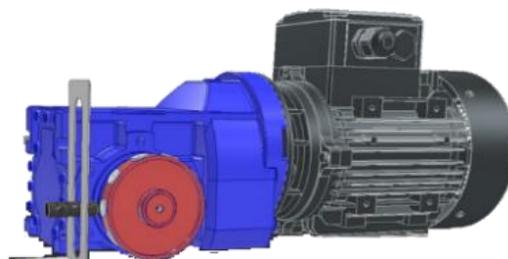
Como resultado de la imprecisión absoluta presentada en la Tabla 61 se puede decir que la medida de distancia entregada por el sensor encoder es de $0.78 \pm$ el valor de la distancia expresada en cm. El patrón presente en dicha tabla se debe a que en principio el sensor entrega el mismo valor de distancia por sección metálica, el valor explicado en los apartados anteriores era de 2.2 cm/pulso, pero ahora hay que tomar en cuenta la relación entre el piñón del motor y el piñón más grande del mecanismo, es así que se obtiene un valor de 0.78 cm/ pulso. Por otra parte, el error relativo promedio es de 2.28%. En conclusión, la calidad de medida en cuanto a distancia no es mala, pero en definitiva todas estas mediciones se pueden mejorar implementando un sensor encoder robusto.

Estrategia de control

Para obtener el valor de los parámetros de sintonización se aplica el método de Ziegler-Nichols explicado en los capítulos anteriores. Para este punto el motor y caja reductora no se encuentran conectados al prototipo. Al realizar incrementos progresivos en la ganancia proporcional el sistema tiende a ser inestable, es decir el variador enviará valores de frecuencia bruscos entre valores mínimos y máximos al motor, lo cual ocasionaría el daño de los elementos mecánicos y de la estructura del prototipo. En la Figura 112 se ilustra la planta considerada para aplicar el método.

Figura 112.

Planta para el uso del método de Ziegler-Nichols.

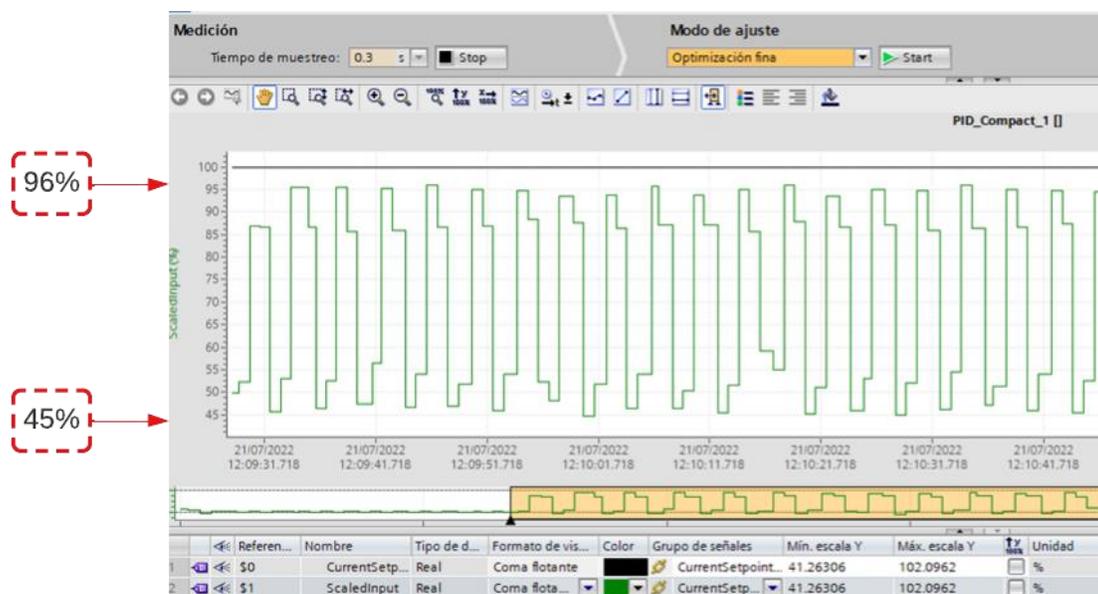


Para llevar a cabo el método es necesario activar a la entrada manual de parámetros y eliminar el tiempo de integración y tiempo derivativo, es decir implementar un control netamente proporcional.

Cabe recalcar que el tiempo de muestreo del algoritmo debe ser el mismo tiempo de ciclo de la interrupción en la que se encuentra el bloque “PID_Compact”. Es así que para la primera prueba se aumenta la ganancia proporcional hasta obtener en la salida una señal oscilante atenuada, el valor considerado para esta primera prueba fue de $K_u=3$ en donde se observa en la Figura 113 que la señal de salida oscila hasta alcanzar la inestabilidad del sistema.

Figura 113.

Salida oscilante del sistema con $K_u=3$.

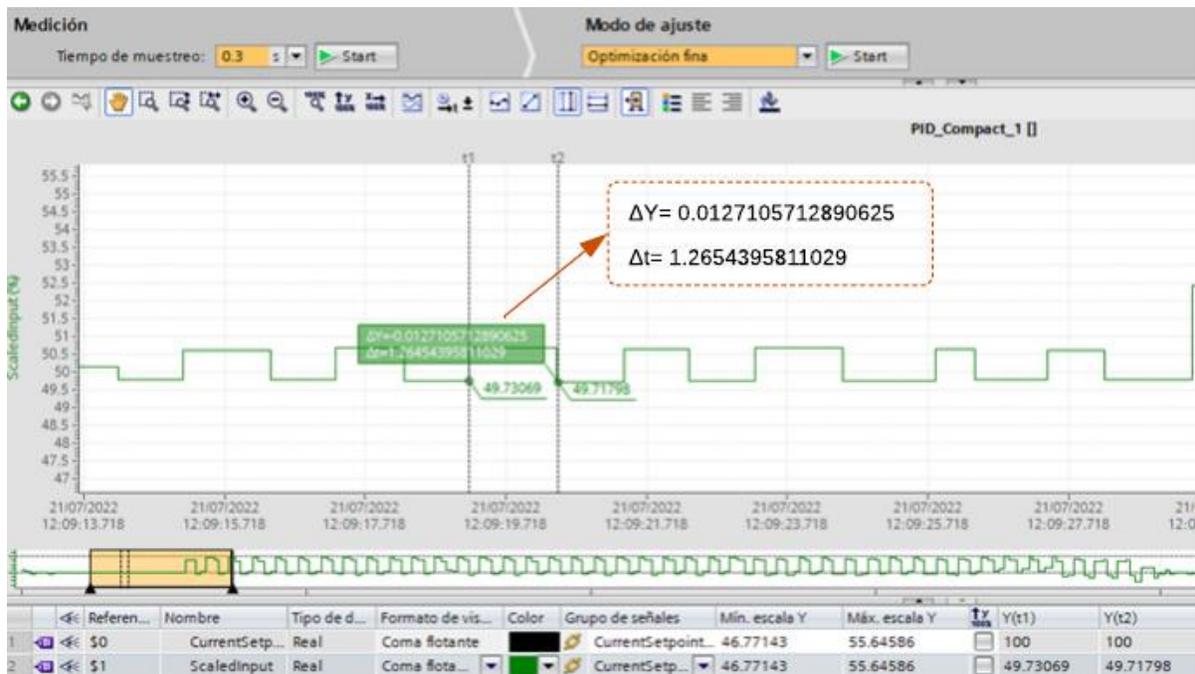


Nota. Es recomendable iniciar con valores pequeños de ganancia proporcional. A pesar de que 3 es un valor pequeño se observa en la figura que la señal oscila entre 45% y 96%. Visto desde el punto de vista de la planta el motor acelera y desacelera repetitivamente de 27 a 57,6 rpm.

Para valores muy pequeños de K_u la salida se estabiliza. Sin embargo, al ser únicamente un control proporcional existe un offset entre la señal y la consigna establecida. Debido a esto se prueba con un valor de $K_u=1$. Para $K_u=1$ se obtiene una señal próxima a tener una amplitud constante. En la Figura 114 se detallan los valores de la ganancia crítica y el periodo crítico.

Figura 114.

Salida oscilante del sistema con valor $K_u=1$



Nota. Se observa que para un valor de ganancia crítica $K_u=1$ la señal empieza a oscilar periódicamente con un tiempo crítico $P_u=1.26$ s.

Una vez que obtenemos la ganancia crítica y el tiempo crítico utilizamos las fórmulas presentadas en la Tabla 47 del capítulo de ingeniería de detalle, con lo cual se presentan los siguientes resultados.

Tabla 62.

Parámetros resultantes con el método de Ziegler-Nichols.

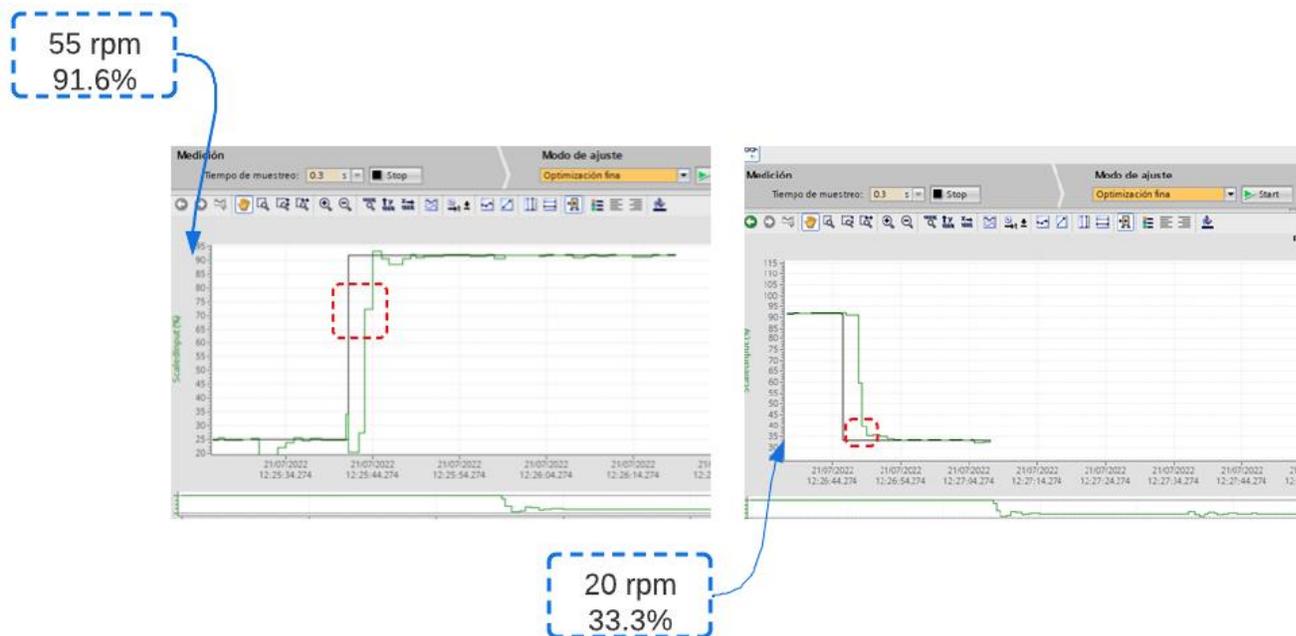
Tipo de controlador	K_p	T_i	T_d
PID (mixto menos oscilante)	0.3	0.63	0.21

Nota. Como la salida del controlador no es muy oscilante y el control que estamos utilizando es del tipo PID se utilizan las fórmulas para un control PID mixto menos oscilante.

Para la primera prueba con los valores de la Tabla 62 se establece una velocidad de 55 rpm y 20 rpm. La señal resultante realmente no es mala, pero se pueden corregir ciertos parámetros para que la respuesta del controlador sea más robusta.

Figura 115.

Señal de la salida del controlador a una velocidad de 55 y 20 rpm.



En los cuadrados de color rojo se observa que la señal en un instante de tiempo entrega menos porcentaje a la salida del controlador (CV), lo cual incrementa el tiempo de estabilización tanto en la señal de 55 y 20 rpm. La solución es aumentar la ganancia proporcional y disminuir el tiempo de integración T_i de tal manera que alcance la velocidad consigna (SP) en menos tiempo. Para lo cual se establecen los siguientes valores a la entrada manual del controlador.

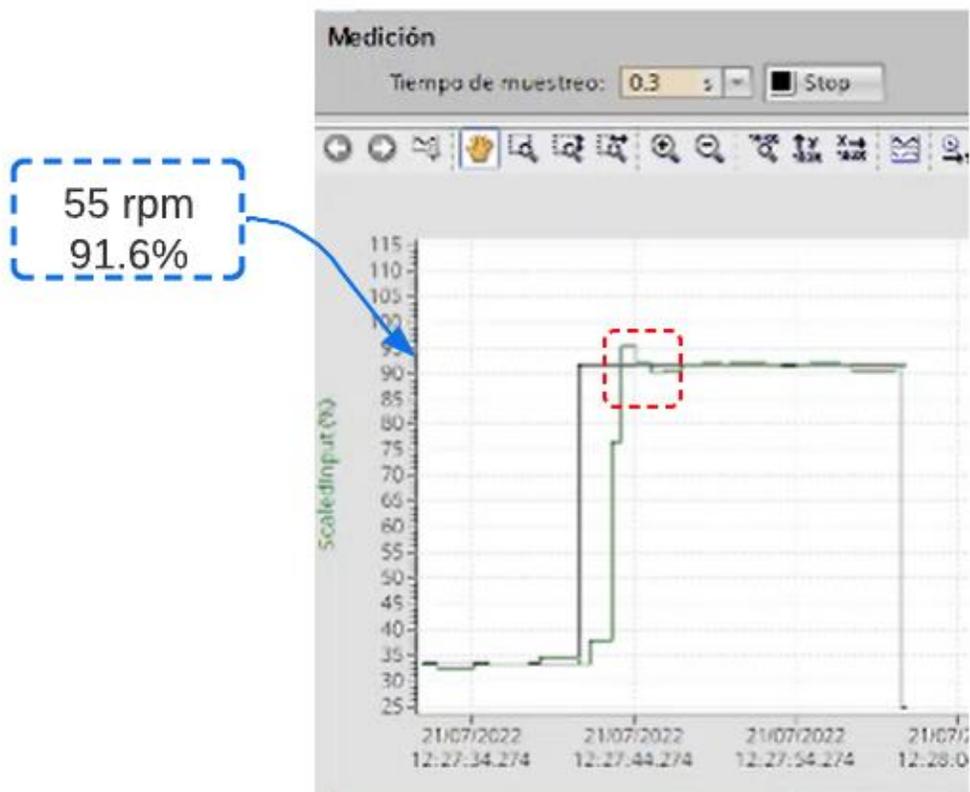
Tabla 63.

Mayor ganancia proporcional y menor tiempo de integración.

K_p	T_i	T_d
0.32	0.60	0.21

Figura 116.

Sobreimpulso en la señal de control.

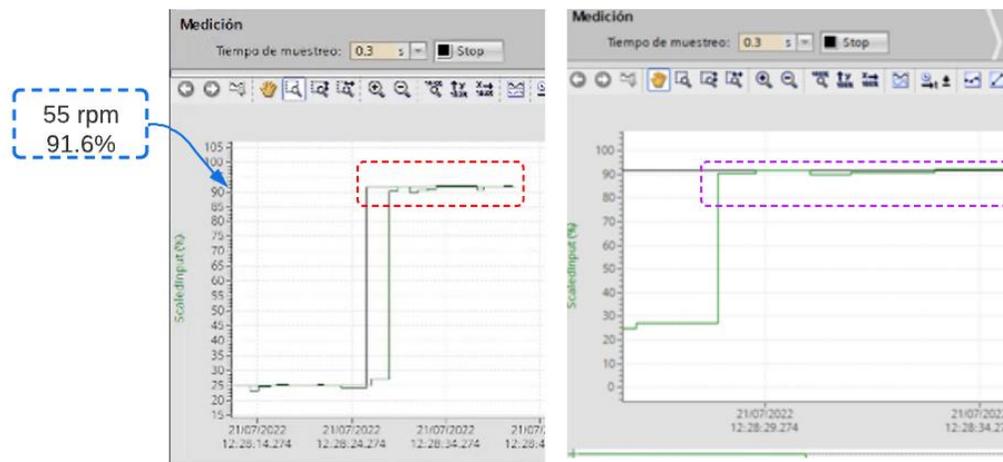


Con los valores presentados en la Tabla 63 se obtuvo la señal de la Figura 116. En este caso existe un sobreimpulso, lo que quiere decir que se aumentó demasiado la ganancia proporcional o se disminuyó mucho el tiempo de integración. Para contrarrestar dicha respuesta se disminuye la ganancia proporcional y el tiempo de integración. En la Tabla 54 se presentan los nuevos valores del controlador.

Tabla 64.

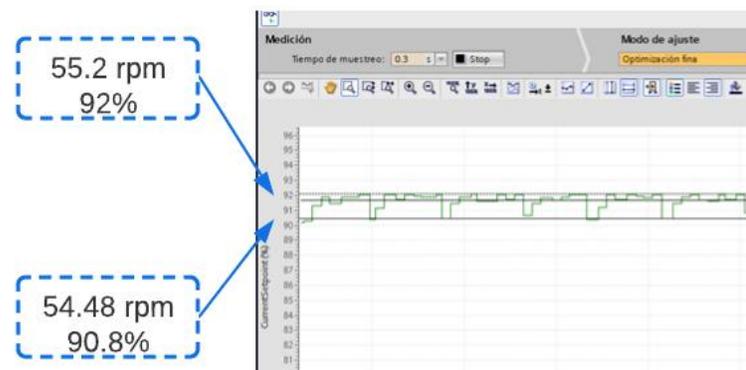
Mayor ganancia proporcional y menor tiempo de integración.

Kp	Ti	Td
0.3	0.59	0.21

Figura 117.*Señal estable.*

Nota. La señal encerrada en el rectángulo de color lila es la señal ampliada de la imagen de la izquierda, esto con el objetivo de visualizar mejor el comportamiento de la señal resultante.

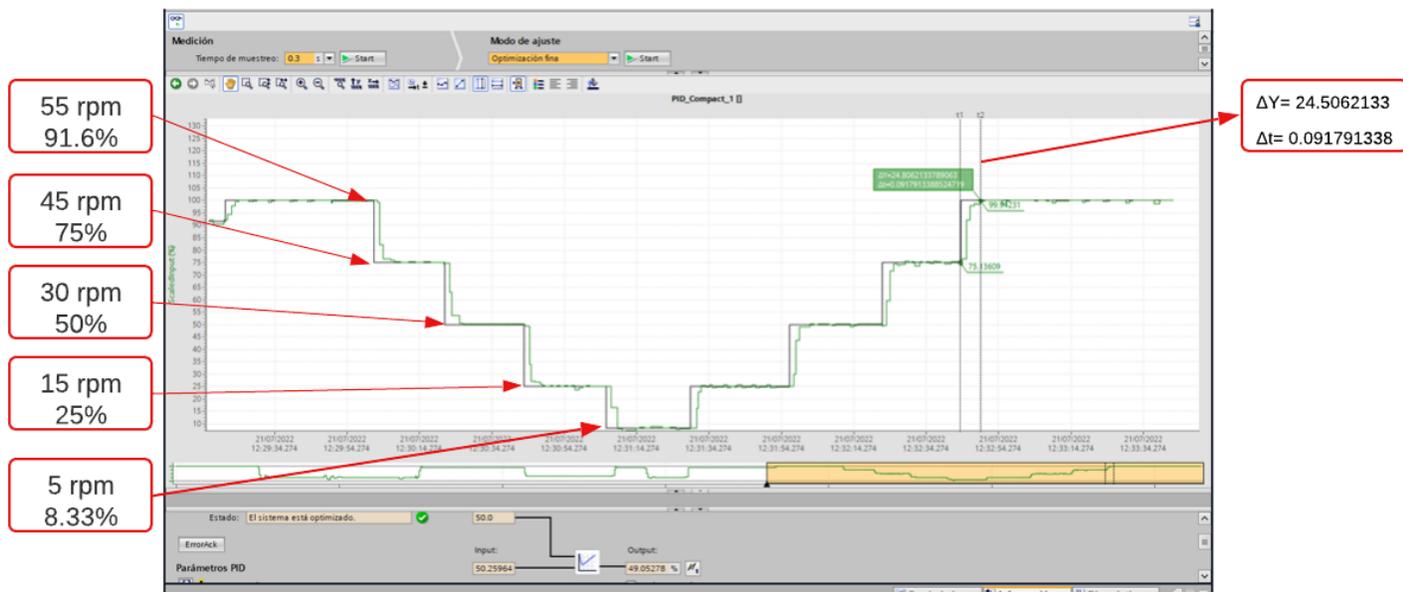
Al disminuir la ganancia proporcional y el tiempo de integración se observa que la señal se estabiliza sin presentar sobreimpulsos ni desaceleraciones en el estado transitorio. Por otra parte, las oscilaciones visibles en el estado estacionario se deben a la resolución del sensor encoder. La variación de estas oscilaciones para una velocidad consigna de 55 rpm son mínimas y son de 54.48 rpm hasta 55.2 rpm. En la Figura 118 se ilustran dichas oscilaciones.

Figura 118.*Oscilaciones producidas por la resolución del encoder.*

Finalmente se realizan pruebas para varios valores de velocidad, dichas pruebas se las realiza de manera descendente y ascendente con el objetivo de visualizar el comportamiento de la estrategia de control en cualquiera de los ciclos de funcionamiento del mecanismo. En la Figura 119 se presenta el resultado de dichas pruebas.

Figura 119.

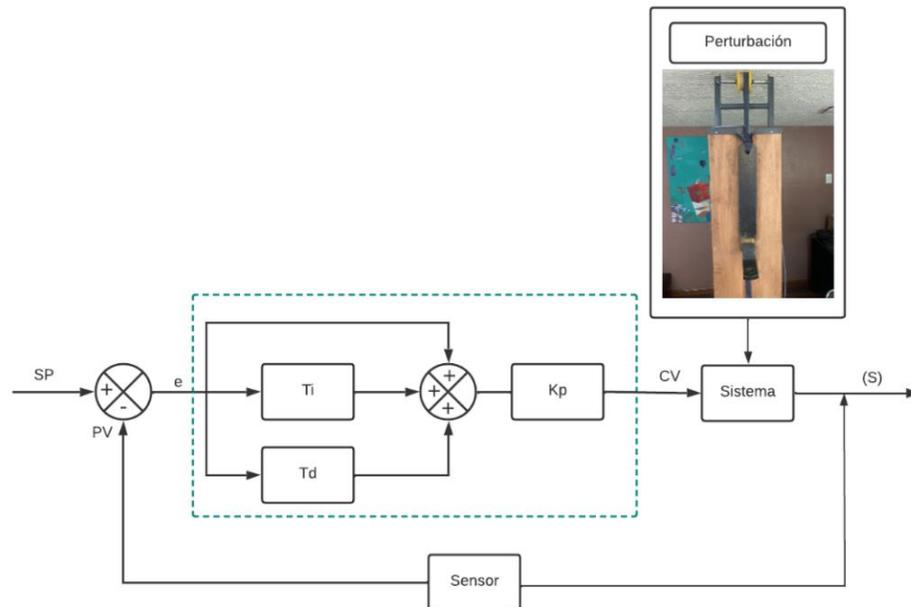
Estrategia de control resultante.



Para los valores de velocidades de 55, 45, 30, 15 y 5 rpm en los ciclos ascendente y descendente se observa que en efecto el control alcanza el valor consigna con un tiempo de estabilización de 0.09 s. Una vez se hayan sintonizado los valores de los diferentes parámetros es necesario acoplar la carga a la caja reductora y observar el comportamiento de la estrategia de control con una perturbación de aproximadamente 15 kg. Visto desde un diagrama de control sería de la siguiente manera.

Figura 120.

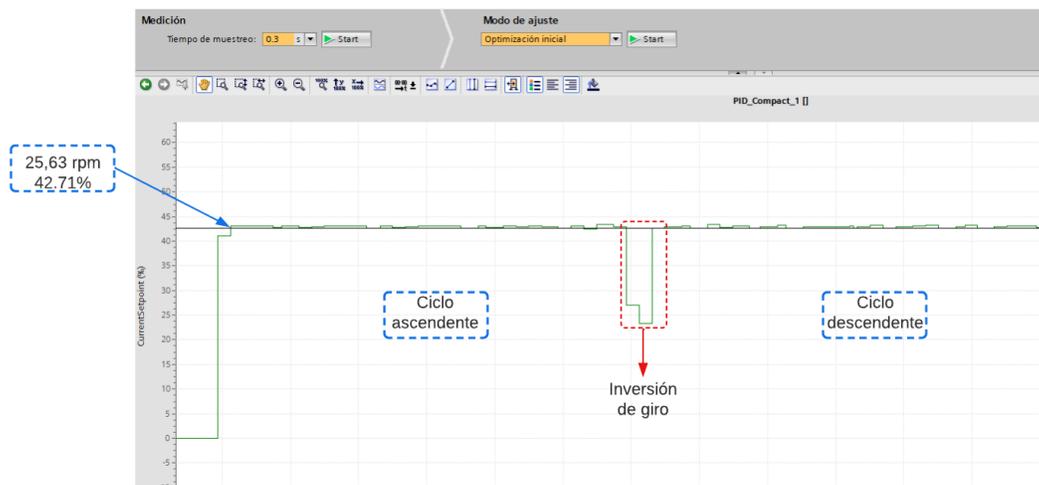
Diagrama final de control.



A continuación, se presenta la señal de control resultante con una carga aproximada de 15 kg en un ciclo de bombeo a una velocidad de 25.63 rpm.

Figura 121.

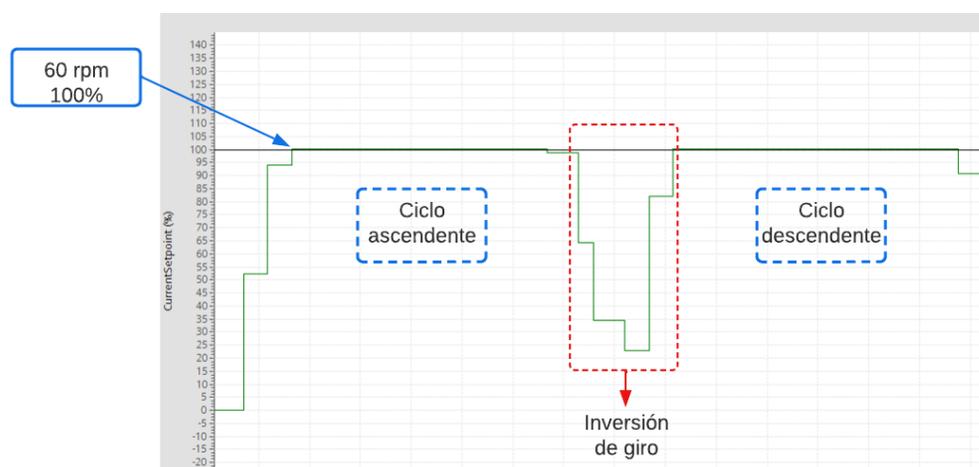
Comportamiento de la planta a 25.63 rpm en un ciclo de bombeo.



En efecto, la estrategia de control consigue mantener una velocidad constante a lo largo del tramo vertical. La señal que se muestra en el rectángulo de color rojo de la Figura 122 representa la inversión de giro que se da cuando mecanismo se detiene y da lugar al ciclo descendente. Con objeto de demostrar que la estrategia de control es óptima para la planta se realiza la misma prueba con una velocidad de 60 rpm y una carga de 15 kg.

Figura 122.

Comportamiento de la planta a 60 rpm en un ciclo de bombeo.



El motivo de que la gráfica sea un poco más corta a lo largo del tiempo es lógico, al aumentar la velocidad el mecanismo realiza un ciclo de bombeo en menos tiempo. Por otra parte, se observa que la señal se estabiliza alrededor de la consigna de 60 rpm. La razón de que la señal se vea menos oscilante es debido a que el controlador no puede entregar más del 100% es decir las variaciones producto de la resolución del sensor encoder no serán visibles. En el rectángulo de color rojo tiene lugar la inversión de giro para dar lugar al ciclo descendente en donde el control retoma la velocidad consigna.

Ciclos de bombeo por minuto.

En primer lugar, hay que aclarar que un ciclo de bombeo representa la carrera ascendente y descendente del mecanismo. Para presentar los resultados primero se divide el tramo del recorrido

vertical en 2 situaciones de prueba. El primero se realiza a escala completa es decir en los 105 cm y el segundo tiene lugar a media escala, es decir en los 52 cm del tramo vertical. En la Figura 123 se dan a conocer las dos situaciones antes mencionadas.

Figura 123.

Tramos de pruebas para ciclos de bombeo.



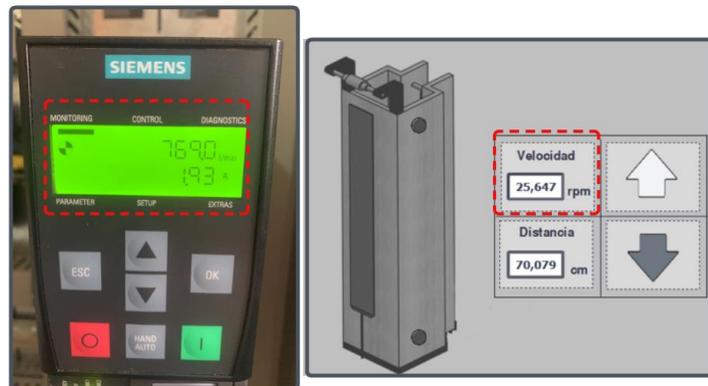
Nota. La escala completa está pensada para pozos de mayor profundidad, mientras que la escala media para pozos menos profundos.

Para la toma del tiempo de cada ciclo de bombeo se utiliza la misma herramienta del bloque “PID_Compact”, donde mediante los cursores de medición verticales la diferencia de las dos posiciones respecto al eje del tiempo nos entrega como resultado el tiempo por ciclo de bombeo.

1 ciclo de bombeo por minuto (escala completa). Para el caso se establece una velocidad de 25.6 rpm. En la Figura 124 se presentan las configuraciones de velocidad a las que funciona el mecanismo para que funcione a 1 ciclo de bombeo por minuto.

Figura 124.

Valores de velocidad para 1 ciclo de bombeo.

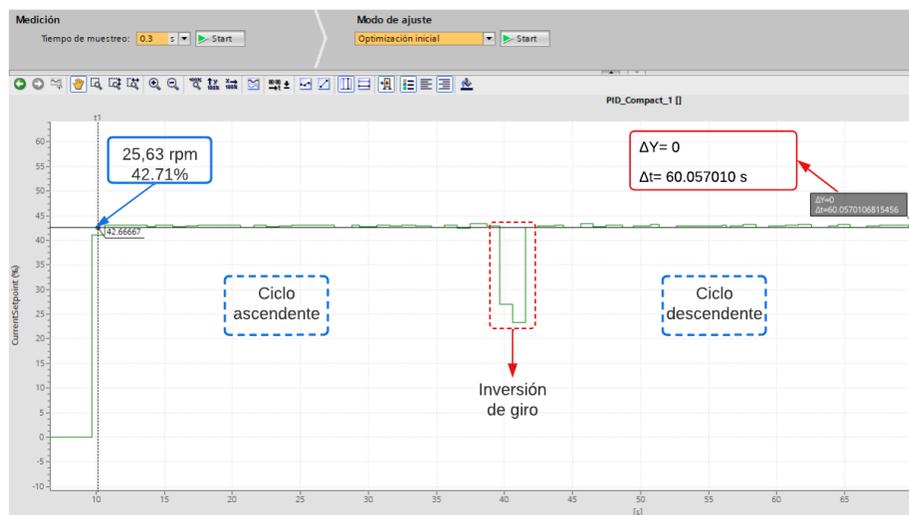


Nota. La figura de la izquierda representa la velocidad del motor en el ciclo ascendente y la de la derecha la velocidad real medida por el sensor en la salida de la caja reductora

Para el presente análisis hay que recordar que la velocidad visible en el panel de operador del variador es la velocidad del motor y que a esa velocidad se la tiene que dividir en un factor de 30 por la caja reductora. Es así que $769.0/30 = 25.63$ rpm. Para visualizar el tiempo del ciclo bombeo y el comportamiento de la estrategia de control se presenta la Figura 125.

Figura 125.

Estrategia de control en un ciclo de bombeo.

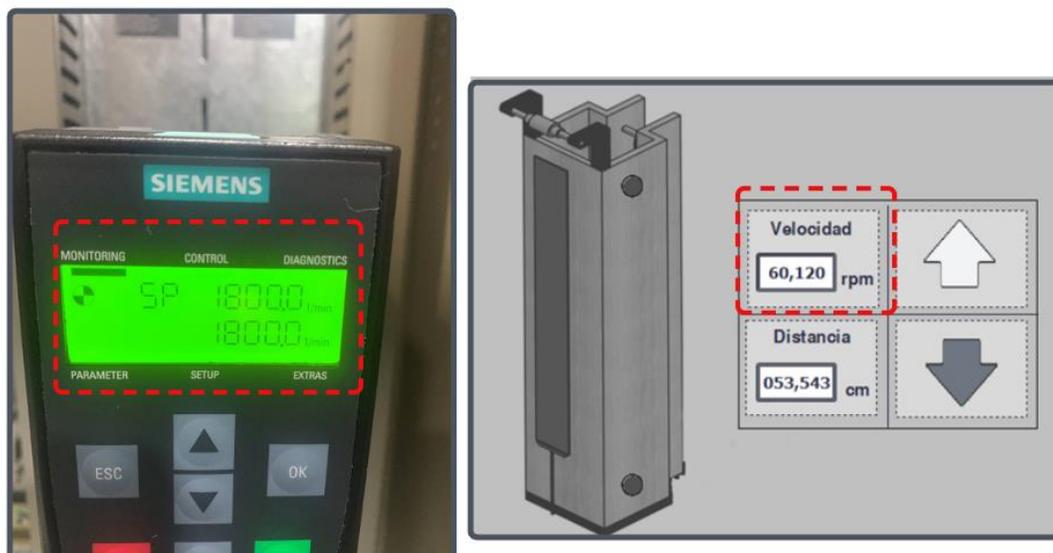


Como resultado se obtiene que a una velocidad de 25.64 rpm el mecanismo efectúa un ciclo de bombeo en 60.05 s lo que equivale a un ciclo de bombeo por minuto. Adicionalmente se observa el comportamiento de la estrategia de control para los ciclos ascendente y descendente.

2 ciclos de bombeo por minuto (escala completa). Para el caso se establece una velocidad de 60 rpm. En la Figura 126 se presentan las configuraciones de velocidad a las que funciona el mecanismo para que funcione a 2 ciclos de bombeo por minuto en el tramo vertical a escala completa.

Figura 126.

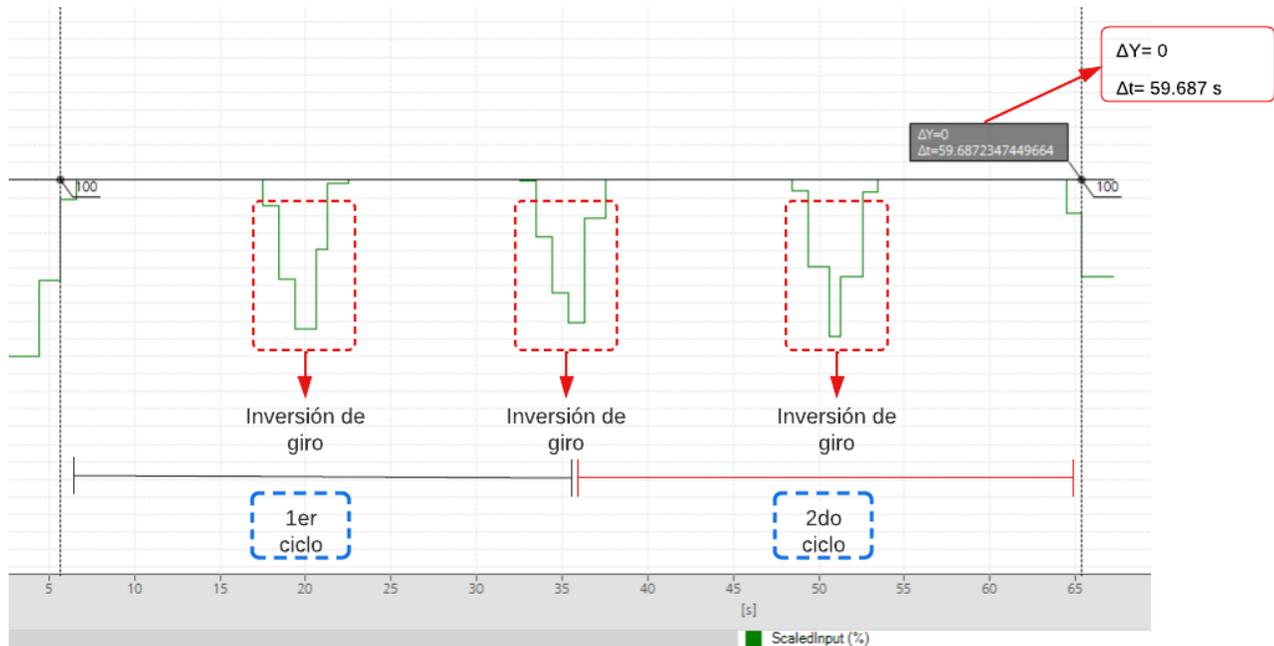
Valores de velocidad para 2 ciclos de bombeo.



De igual forma para el presente análisis hay que dividir en un factor de 30 la velocidad del motor por la caja reductora. Es así que $1800/30= 60$ rpm. Para visualizar el tiempo del ciclo bombeo y el comportamiento de la estrategia de control se presenta la Figura 127.

Figura 127.

Estrategia de control y tiempo por 2 ciclos por minuto a escala completa.

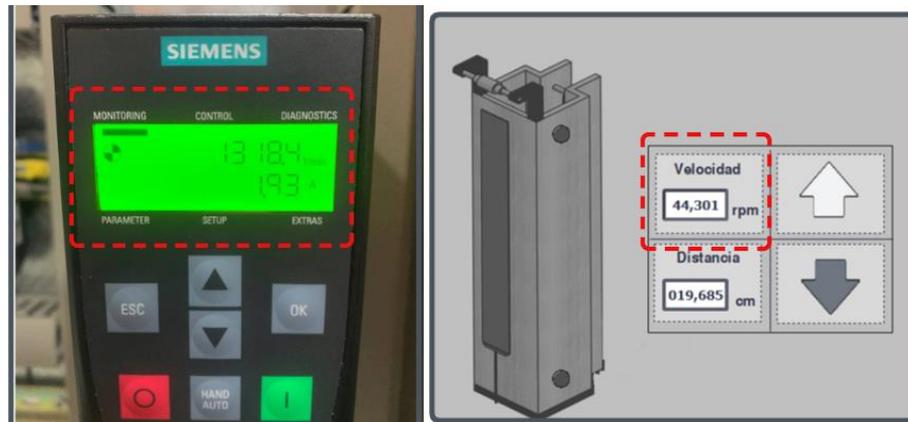


Como resultado se obtiene que a una velocidad de 60 rpm el mecanismo efectúa dos ciclos de bombeo en 59.8 s lo que equivale a dos ciclos de bombeo por minuto. El motivo de que las oscilaciones en torno a la consigna de velocidad de 60 rpm no se visualicen, es que el máximo porcentaje que puede entregar la estrategia de control es 100 %, valores superiores a eso no serán mostrados. Sin embargo, en la Figura 126 se observa que la velocidad medida de funcionamiento es de 60.12 rpm

3 ciclos de bombeo por minuto (media escala). El análisis para este apartado es el siguiente: si a máxima velocidad en el tramo vertical a escala completa se consiguen 2 ciclos de bombeo por minuto, para obtener más ciclos de bombeo se debe utilizar el recorrido a media escala, el cual está orientado a pozos de menor profundidad. Para el caso se establece una velocidad de 43.94 rpm. En la Figura 128 se presentan las configuraciones de velocidad a las que funciona el mecanismo para que funcione a 3 ciclos de bombeo por minuto en el tramo vertical a media escala.

Figura 128.

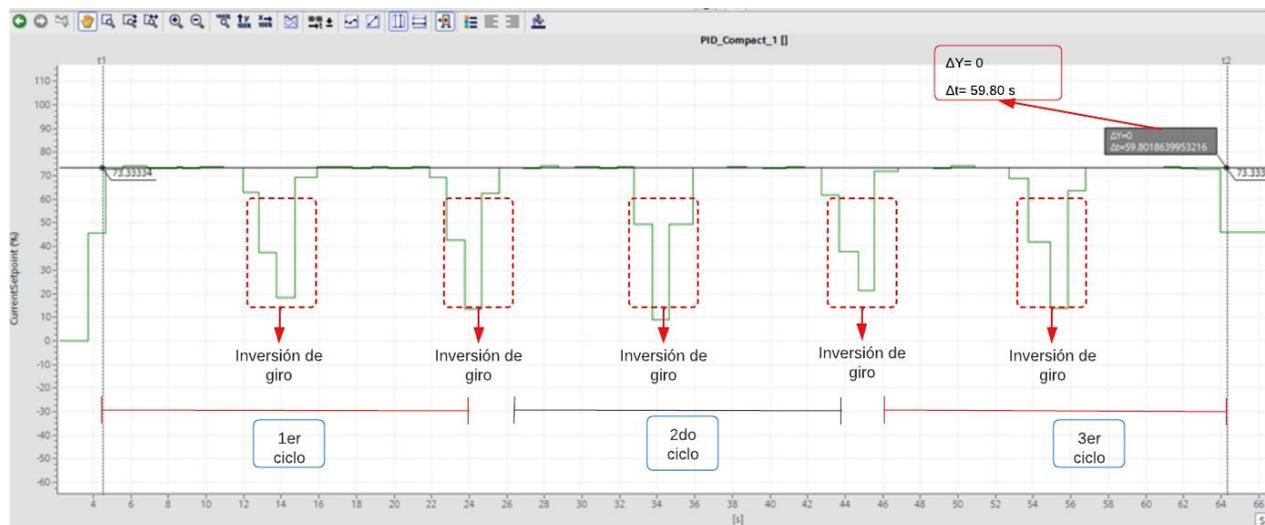
Valores de velocidad para 3 ciclos de bombeo.



De igual forma para el presente análisis hay que dividir en un factor de 30 la velocidad del motor por la caja reductora. Es así que $1318.4/30 = 43.94$ rpm. Para visualizar el tiempo del ciclo bombeo y el comportamiento de la estrategia de control se presenta la Figura 129.

Figura 129.

Estrategia de control y tiempo por 3 ciclos por minuto a media escala.

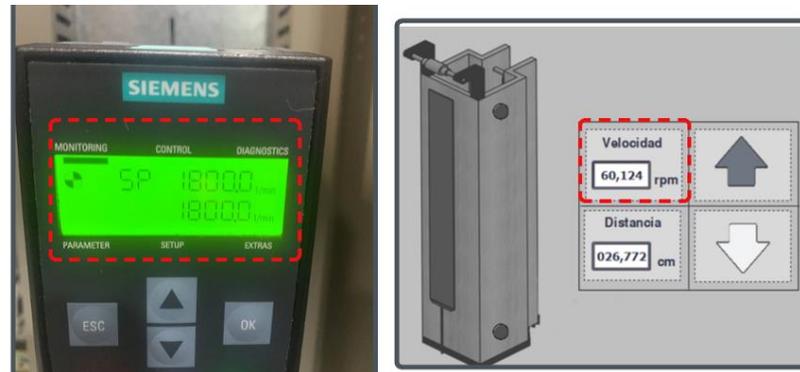


Como resultado se obtiene que a una velocidad de 43.39 rpm el mecanismo efectúa tres ciclos de bombeo en 59.801 s lo que equivale a tres ciclos de bombeo por minuto a media escala.

4 ciclos de bombeo por minuto (media escala). Para el caso se establece una velocidad de 60 rpm. En la Figura 130 se presentan las configuraciones de velocidad a las que funciona el mecanismo para que funcione a ciclos de bombeo por minuto en el tramo vertical a media escala.

Figura 130.

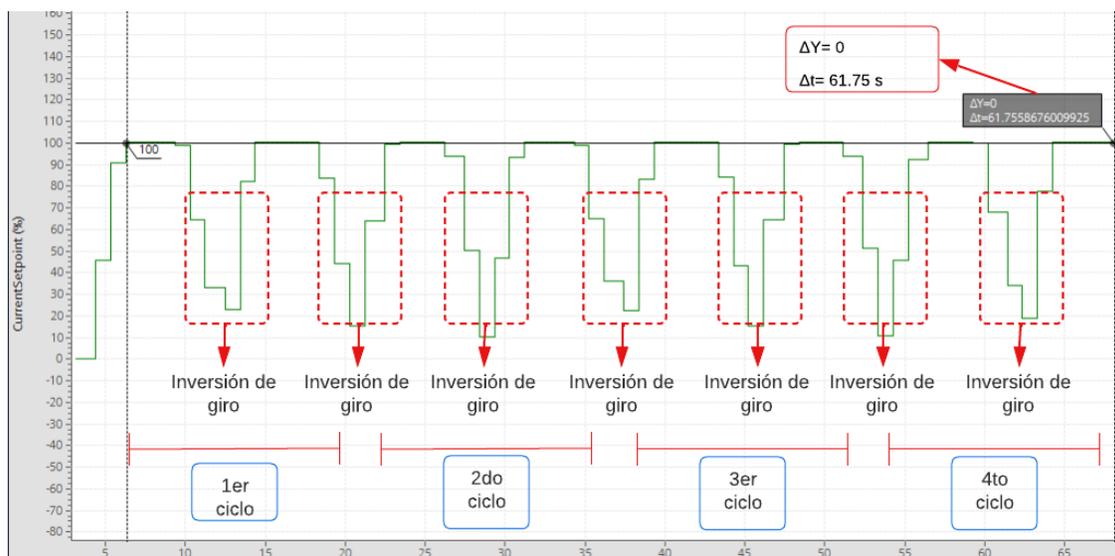
Valores de velocidad para 4 ciclos de bombeo.



Una vez más hay que dividir en un factor de 30 la velocidad del motor por la caja reductora. Es así que $1800/30=60$ rpm. Para visualizar el tiempo del ciclo bombeo y el comportamiento de la estrategia de control se presenta la Figura 131.

Figura 131.

Estrategia de control y tiempo por 4 ciclos por minuto a media escala.



Como resultado se obtiene que a una velocidad de 60 rpm el mecanismo efectúa cuatro ciclos de bombeo en 61.75 s, lo que equivale a cuatro ciclos de bombeo por minuto a media escala. Los resultados finales de cada ciclo de bombeo del mecanismo se presentan a continuación en la Tabla 65.

Tabla 65.

Tiempos y velocidades por ciclo de bombeo

n.º ciclos/min	Tiempo	Velocidad
1	60.047 s	25.64 rpm
2	59.687 s	60 rpm
3	59.801 s	43.39 rpm
4	61.75 s	60 rpm

Pruebas de usabilidad

Las pruebas de usabilidad evalúan el grado en el que un sistema puede ser utilizado por usuarios específicos. Es así que se implementa un sistema de escalas de usabilidad SUS (*System Usability Scale*) para determinar qué tan amigable es la aplicación para el usuario. El sistema SUS cuenta con 10 preguntas estandarizadas obtenidas de (Devin, 2017), las cuales deben ser puntuadas con un valor de 1 a 5, donde 1 se interpreta como total desacuerdo y 5 que se interpreta en total acuerdo. Cabe aclarar que, para obtener los resultados bajo este método, las preguntas impares tendrán el valor asignado por el usuario menos 1, mientras que para las preguntas pares será de 5 menos el valor asignado por el usuario. Las preguntas se enlistan a continuación:

1. ¿Creo que usaría este sistema frecuentemente?
2. ¿Encontré al sistema innecesariamente complejo?
3. ¿Creo que el sistema fue fácil de utilizar?
4. ¿Creo que necesitaría el apoyo de un técnico para poner en marcha este sistema?
5. ¿Las funciones del sistema se encuentran bien integradas?
6. ¿Pienso que el sistema tiene demasiadas inconsistencias?

7. ¿Imagino que la mayoría de personas aprendería a usar este sistema rápidamente?
8. ¿Encuentro que el sistema es muy difícil de utilizar?
9. ¿Me sentí confiado al utilizar dicho sistema?
10. ¿Necesitaba aprender muchas cosas antes de poner en marcha el sistema?

Para el caso se evaluó a 10 usuarios, 6 usuarios son estudiantes egresados de la carrera de Automatización y Control que tienen experiencia previa con conceptos de automatización y 4 usuarios son usuarios no técnicos, es decir no tienen ninguna idea del funcionamiento ni del prototipo ni de la interfaz gráfica. Para el caso, previo al uso fue necesario realizar una explicación del funcionamiento y aclarar algunos términos que intervienen en el funcionamiento del mismo. Para dar solución a la problemática planteada las pruebas se dividen en dos secciones: personas técnicas y personas no técnicas

Personas técnicas

Tabla 66.

Resultados de pruebas de usabilidad personas técnicas.

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
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

Al finalizar las pruebas de usuarios técnicos se obtiene el puntaje SUS con un promedio de 90/100 lo que significa que el sistema es aplicable. Adicionalmente si separamos estos resultados por pregunta podemos concluir que el sistema es apto para ser usado frecuentemente, es fácil de utilizar, es un sistema muy bien integrado que además inspira confianza.

Personas no técnicas

Tabla 67.

Resultados de pruebas de usabilidad personas no técnicas.

Usuarios	Preguntas										Puntaje
	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	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	

Al finalizar las pruebas de usuarios no técnicos se obtienen el puntaje SUS con un promedio de 76.25/100, para el caso hay que aclarar que puntajes superiores a 70 se consideran aplicables. El contraste de esta prueba con la de los usuarios técnicos es notable, y es debido a que algunos conceptos básicos los usuarios no técnicos no lo tienen muy claro o lo confunden. 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. Sin embargo, no encuentran inconsistencias y piensan que con práctica cualquier persona podría utilizar el sistema.

Capítulo 6

Conclusiones y Recomendaciones

Conclusiones

La investigación realizada permitió determinar una metodología válida de diseño e implementación de estrategias de automatización y control para el funcionamiento del prototipo de mecanismo de superficie. Para contemplar los posibles estados de funcionamiento del sistema se estructuró la información en base a los 3 primeros niveles de la pirámide CIM, dando lugar a 5 subsistemas diferentes que contienen las características tecnológicas necesarias para la implementación del proyecto. El uso de protocolos de comunicación industrial y aparatos de accionamiento industrial permitieron ofrecer una solución en tiempo real de bajo consumo energético capaz de implementar acciones de seguridad para salvaguardar la integridad de las personas y de los equipos que conforman el sistema.

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.

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 $p_{1233} = 1$ 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).

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.

Recomendaciones

En la etapa cableado de se recomienda dejar unos 15 cm de cable extra en cada terminal. Esto con el objetivo de prever posibles modificaciones futuras.

Para la construcción de un sensor encoder se recomienda elegir un sensor inductivo con el diámetro de operación menor a 10mm, de esta manera será posible implementar un mayor número de secciones metálicas alrededor del perímetro del círculo y en consecuencia aumentar la precisión en la medida.

Dependiendo de la aplicación que se le quiera dar al variador de frecuencia, es recomendable en una primera puesta en marcha configurar los parámetros correspondientes a la inversión de giro del motor. Esto debido a que el variador viene configurado de fábrica para bloquear el giro en sentido antihorario.

Si el modelo de variador lo permite, es recomendable utilizar el telegrama BICO ya que se pueden añadir tantas palabras de mando y control como sean necesarias.

Si se desea añadir módulos de entradas, salidas o incluso sensores que en consumo de corriente superen los 400 mA, es recomendable adquirir una fuente de 24 V que suministre la corriente necesaria para alimentar a cada uno de dichos módulos.

Se recomienda utilizar la estrategia de control de manera general. Es decir que los valores de entrada y salida sean expresados en porcentaje, ya que resulta simple asimilar o relacionar las unidades físicas con unidades de porcentaje.

Para implementar una interfaz HMI es necesario que al finalizar el diseño se realicen pruebas de validación de la información. Es decir, aplicar el ciclo de mejora continua de una HMI, de tal manera que en base a las pruebas que se realicen se mejoren los aspectos útiles de la misma.

Para la instalación de cualquier dispositivo electrónico es recomendable revisar el manual de puesta en marcha, en el mismo se topan aspectos interesantes sobre la puesta en marcha, configuración e incluso consideraciones para la instalación de los mismos.

Cuanto más largo es el cable de motor del convertidor, mayores son las capacitancias de red del cable de motor. Las capacitancias de red provocan una corriente adicional durante el funcionamiento del convertidor y representan una carga adicional para este. Si este es el caso se recomienda analizar la implementación de un filtro a la entrada para evitar armónicos y un filtro a la salida para evitar el fenómeno de onda reflejada.

Ya que el funcionamiento fiable y sin perturbaciones sólo está garantizado cumpliendo las normas CEM, se recomienda montar el variador sobre un panel de montaje conductor dentro del armario eléctrico.

Trabajos futuros

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.

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.

Acrónimos

- PLC. Controlador Lógico Programable.
- PV. Variable del Proceso.
- SP. Set Point o consigna de la variable.
- CV. Variable Controlada.
- SMS. Mapeo Sistemático de la Literatura.
- SLR. Revisión Sistemática de la Literatura.
- Kp. Ganancia proporcional.
- Ti. Tiempo de integración.
- Td. Tiempo derivativo.
- Ku. Ganancia crítica.
- Pu. Tiempo crítico.
- SRD. Accionamiento por Reluctancia Conmutada.
- SUS. System Usability Scale.
- HMI. Interfaz Hombre Máquina.
- CEM. Compatibilidad Electromagnética.

Referencias

- Abati, P. (18 de 11 de 2017). *Technologuepro*. Obtenido de <https://www.technologuepro.com/cours-automate-programmable-industriel/Le-GEMMA.htm>
- ABCCLIM. (12 de 07 de 2022). *Fonctionnement des variateurs de fréquence*. Obtenido de <https://www.abcclim.net/variableur-vitesse-frequence.html>
- Allen-Bradley. (2016). U.S.A.
- Amaral Bezerra, A. (2015). *PROTÓTIPO DE UMA UNIDADE DE BOMBEIO MECÂNICO*. UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE, DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PETRÓLEO, Rio Grande do Norte.
- ANALITIK, V. (13 de 07 de 2018). *VALORA ANALITIK*. Obtenido de <https://www.valoraanalitik.com/2018/07/13/a-junio-se-supera-meta-de-produccion-de-petroleo-en-colombia/>
- ANSI/ISA-101. (2015). *Human Machine Interfaces for Process Automation Systems ANSI/ISA-101.01-2015*. North Carolina.
- ANSI/ISA-62443-3-2. (2011). *Security for industrial automation and control systems*. International Society of Automation.
- Aragão Sousa, L., Lima Rodrigues, M., Gomes Sousa, M., Batista Barros, Y., Pereira Araújo, P., & Souza Leite, M. (2013). *APLICAÇÃO DO BOMBEIO MECÂNICO COM HASTES NA ELEVAÇÃO DO PETRÓLEO*. Sergipe: Cadernos de Graduação - Ciências Exatas e Tecnológicas.
- Barbalho Tavares, M. (2015). *SISTEMÁTICA DE SELEÇÃO DO MELHOR MÉTODO DE ELEVAÇÃO*. UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE, DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PETRÓLEO, Rio Grande do Norte.
- Bayley, J., Budgen, M., Turner, B., Kitchenham, P., Breton, P., & Linkman, S. (2007). *Evidence relating to Object-Oriented software design: A survey*.

- Berno, D. (01 de 02 de 2018). *DMC*. Obtenido de Smart People. Expert Solutions.: <https://www.dmcinfo.com/latest-thinking/blog/id/9540/efficient-scl-development-in-tia-portal-v14>
- Borges Araújo, J. A. (2003). *Aplicação de inversor de frequência para economia de energia elétrica, em sistema de irrigação por aspersão*. Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agronômicas, Botucatu.
- Boyun, G., Lyons, W., & Ghalambor, A. (2017). Artificial Lift Methods. En G. Boyun, W. Lyons, & A. Ghalambor, *Petroleum Production Engineering* (pág. 159). New Mexico: Gulf Professional Publishing.
- Brun, J. (2019). *TechAcute*. Obtenido de <https://techacute.com/about-programmable-logic-controller/>
- Cablec. (2020). *Cables de fuerza-control*. Quito.
- Champman, S. (2020). *Máquinas Eléctricas* (Quinta ed.). The MacGraw-Hill.
- Cireddu, R. (2014). *Sciences et Techniques Industrielles Ressource Automatique et Informatique Industrielle Génie Mécanique*. Obtenido de <http://robert.cireddu.free.fr/Ressources/All/Dossier%20ressource%20sur%20le%20GEMMA/index.htm>
- Clark, R., & Benson, T. (2016). *Long Stroke Pumping Unit*. Houston: WIPO PCT.
- ControlsWiki. (2007). *PID Tuning Clasical*.
- Cui, J., Xiao, W., Feng, H., Dong, W., Zhang, Y., & Jianghan, W. (2019). *Long Stroke Pumping Unit Driven By Low-Speed Permanent Magnet Synchronous Motor*. China.
- Devin, F. (25 de 02 de 2017). *UXpañol*. Obtenido de Discusiones sobre Experiencia de Usuario: <https://uxpanol.com/teoria/sistema-de-escalas-de-usabilidad-que-es-y-para-que-sirve/>
- DIMAE. (17 de 07 de 2022). *Dielectro Manchego*. Obtenido de <https://dimae.com/envolventes-y-cajas/placasdemontajeparaarmarios/metalicas.html>

- EMF Explained 2.0. (17 de 07 de 2022). *EXPLICACIÓN DE LAS NORMAS CEM*. Obtenido de <http://www.emfexplained.info/spa/?ID=24898#:~:text=Las%20normas%20que%20origen%20CEM,importante%20margen%20de%20seguridad%20incorporado>.
- Gear Drive. (12 de 07 de 2022). *NMRV velocidad de aluminio reductor NMRV caja de cambios 30 40 50 63 75 90 110 gusano para motor paso a paso*. Obtenido de <https://www.devogearbox.com/es/nmrv-aluminum-speed-reducer-nmr-30-40-50-63-75-90-110-worm-gearbox-for-stepper-motor.html>
- Guo, B., Lyons, W., & Ghalambor, A. (2007). Gas Lift. En B. Guo, W. Lyons, & A. Ghalambor, *Petroleum Production Engineering* (págs. 182-206). New Mexico: Gulf Professional Publishing.
- Guo, B., Lyons, W., & Ghalambor, A. (2007). Other Artificial Lift Methods. En B. Guo, W. Lyons, & A. Ghalambor. New Mexico: Gulf Professional Publishing.
- Hi tecnologia. (12 de 7 de 2022). *Hi tecnologia*. Obtenido de Automação Industrial : <https://www.hitecnologia.com.br/blog/quais-sao-os-tipos-de-sensores-industriais/>
- Hollifield, B., Oliver, D., Nimmo, I., & Habibi, E. (2008). *The High Performance Handbook*. Kalamazoo: 360 Digital Books.
- Hollifield, B., Oliver, D., Nimno, I., & Habibi, E. (s.f.). *The High Performance HMI Handbook*. (Primera ed.). Kalamazoo, United States: 360 Digital Books.
- Jones, D. (1951). *An introduction to the Hydraulic Long Stroke Pumping Unit for Pumping Problem*. Netherlands.
- Kitchenham, B., & Charters, S. (2007). *Guidelines for performing systematic literature*. Keele University.
- Kumar Dey, A. (2022). *What is piping*. Obtenido de <https://whatispiping.com/artificial-lift/>
- Lima, F. (2014). *Detecção e Classificação de Modos de Operação do*. Universidade Federal do Rio, Natal.
- Lobosco, O., & Dias, J. (2020). *Seleção e aplicação de motores elétricos*. São Paulo.
- Lorenzo Lledó, L. (2007). *Automatización de una Planta Industrial*. Universitat d'Àlacant, Departamento de Física, Ingeniería de Sistemas y Teoría de la Señal, San Vicente de Raspeig.

- Maitelli Wilza , C. (2010). *Simulação do Escoamento Monofásico em um Estágio de uma Bomba Centrífuga Utilizando Técnicas de Fluidodinâmica Computacional*. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal.
- Majumder, K. (29 de 04 de 2015). *Editage*. Obtenido de A young researcher's guide to a systematic review: <https://www.editage.com/insights/a-young-researchers-guide-to-a-systematic-review>
- Martín Castillo, J., & García García , M. (2009). *Automatismos Industriales*. Madrid: Editex.
- Maruyama, N. (2017). *Introdução os sistemas de controle*.
- Moguel Márquez, J. (2018). *Una arquitectura orientada a*. Universidad de extremadura, Programa de Doctorado en Tecnologías Informáticas , Badajoz.
- Moore, K. (1981). *Sucker Rod Pumping*.
- Moraes, C., & Castrucci, P. (2007). *Engenharia da Automação Industrial (Segunda ed.)*. Brasil.
- Nascimento Araújo, J. (2013). *Simulador Computacional para Poços de Petróleo com Método de Elevação Artificial por Bombeio Mecânico*. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal.
- Nercesian, F., Fernandez Castro, H., Grande, R., & Saiz, J. (s.f.). *Uso de unidades de bombeo de carrera larga en Cerro Dragón*. Argentina.
- Norma Ecuatoriana de Construcción. (2013). *Instalaciones Electromecánicas*. Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda.
- Ortiz, H. (2021). *Técnicas de Control de procesos y Aplicaciones*. Universidad De Las Fuerzas Armadas ESPE, Quito.
- Palomeque , D., Rodriguez, D., & Prado, P. (s.f.). *Optimización del sistema de extracción Rotaflex . Área Entre Lomas*.
- Pardo, C. M. (10 de 12 de 2018). *Tecno recursos*. Obtenido de <https://www.picuino.com/es/control-pid.html>

- Petrobras. (2013). *Control e instrumentacao*. Obtenido de http://www.controleinstrumentacao.com.br/arquivo/ed_191/cv1.html
- Posital. (12 de 07 de 2022). *Posital*. Obtenido de Absolute vs Incremental: <https://www.posital.com/pt/produtos/codificadores-absolutos/absolute-incremental-encoders.php>
- Rio Grande. (2003). *SISTEMAS DE CONTROLE I*. UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE, DEPARTAMENTO DE ENG. DE COMPUTAÇÃO E AUTOMAÇÃO, Natal- RN.
- Rodriguez Urrego, L. (2010). *GEMMA Una Herramienta Universal para la Automatización de Procesos*. Universidad Politécnica de Valencia, Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática, Valencia.
- Romero Chávez, J. S. (2015). *Rediseño de una estructura de un equipo de bombeo mecánico de petróleo con capacidad de 40klb*. Sangolquí .
- San Segundo, P. (2015). *Introducción al modelado GRAFCET 1 1*. Universidad Politécnica de Madrid -UPM, Madrid.
- Schneider electric. (2003). *Cahier technique n° 208 démarreurs et variateurs de vitesse électroniques*. Grenoble: Schneider Electric.
- Schneider electric. (17 de 07 de 2022). *Easy Harmony XA2E*. Obtenido de <https://www.se.com/mx/es/product/XA2EVF3LC/easy-harmony-xa2e-monolithic-pilot-light-plastic-green-%C3%B822-integral-led-screw-clamp-terminals-110-v-ac-dc-anti-interference/>
- Selectromin. (17 de 07 de 2020). *Soluciones electromecánicas industriales*. Obtenido de <https://selectromin.mx/products/reductor>
- Sick. (12 de 07 de 2022). *Sick*. Obtenido de Sensor Intelligence: <https://www.sick.com/mx/es/fotocelulas/fotocelulas/w12-3/c/g203237>
- SIEMENS. (2018). *Manual controlador programable S7-1200*.

- Siemens. (2018). *S7 Controlador programable S7-1200 - Manual del Sistema*.
- Siemens. (2021). *Datasheet for three-phase Squirrel-Cage-Motors*.
- Siemens. (2021). *Instrucciones de servicio SINAMICS G120X*.
- Siemens. (2022). *Datasheet SINAMICS G120X*.
- Siemens. (17 de 07 de 2022). *Industry Image Database*. Obtenido de <https://www.automation.siemens.com/bilddb/index.aspx?lang=en>
- Siemens. (23 de 6 de 2022). *Siemens*. Obtenido de <https://new.siemens.com/fr/fr/produits/automatisation-entrainements/systemes-automatisation/industrial/plc.html>
- Siemens, S. (2013). *Industry Online Support International*. Obtenido de [https://support.industry.siemens.com/cs/document/67519310/dans-step-7-\(tia-portal\)-v12-pourquoi-faut-t-il-ins%C3%A9rer-une-instruction-set-apr%C3%A8s-une-commande-de-saut-afin-de-s'assurer-d'un-premier-passage-?dti=0&lc=fr-WW](https://support.industry.siemens.com/cs/document/67519310/dans-step-7-(tia-portal)-v12-pourquoi-faut-t-il-ins%C3%A9rer-une-instruction-set-apr%C3%A8s-une-commande-de-saut-afin-de-s'assurer-d'un-premier-passage-?dti=0&lc=fr-WW)
- Silva Oliveira, Á. (2015). *Controlo de um motor síncrono de relutância sem*. Universidade de Coimbra, Departamento de Engenharia Eletrotécnica e de Computadores, Coimbra.
- Smith, G. (2013). *Hydraulic Pumping in Oil Wells*. *Society of Petroleum Engineers*.
- Sotomayor Cardenas, D., & Castellanos Villa, S. (2016). *Diseño y construcción de un banco de pruebas para la detección de fallas en motores de inducción trifásicos*. Escuela Politécnica Nacional, Facultad de ingeniería mecánica, Quito.
- Takacs, G. (2015). *Choose between Long-Stroke Sucker Rod Pumping Systems*.
- Takács, G. (2015). *COMPARISON OF PRESENT-DAY LONG-STROKE*.
- Takacs, G. (2018). *Electrical Submersible Pumps Manual*. United States: Gulf Professional Publishing.
- tp-link. (17 de 07 de 2022). *Soho Switches*. Obtenido de <https://www.tp-link.com/ec/home-networking/soho-switch/tl-sg1005d/v1/>

Uguilino, F. (2007). *Sistemas de Controle*. UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE, DEPT°. DE ENGENHARIA DE COMPUTAÇÃO E AUTOMAÇÃO, Natal.

Valdivia Miranda, C. (2019). *Comunicaciones industriales*. Madrid: Paraninfo.

Weatherford. (2014). Gas-Lift Equipment Catalog.

Weatherford. (2020). *Rotaflex® Long-Stroke Pumping Unit*. Obtenido de <https://www.weatherford.com/documents/technical-specification-sheet/products-and-services/production-optimization/rotaflex-long-stroke-pumping-unit/>

Wheatherford. (2016). *WellPilot Flow Control Technology*. Obtenido de Wheatherford: <https://www.weatherford.com/documents/brochure/products-and-services/production-optimization/wellpilot-flow-control-technology/>

Wildi, T. (2007). *Máquinas Eléctricas y sistemas de Potencia* (Sexta ed.). Naucalpan de Juárez, México: Pearson Educación.

Apéndices