



**Universidad de Valladolid**



**ESCUELA DE INGENIERÍAS  
INDUSTRIALES**

**UNIVERSIDAD DE VALLADOLID**

**ESCUELA DE INGENIERIAS INDUSTRIALES**

**Grado en Ingeniería en Electrónica Industrial y Automática**

**Supresión de vibraciones en estructuras  
civiles esbeltas mediante PLC industrial  
siemens S7-1200**

**Autor:**

**Fracchia Álvarez, Mariano**

**Tutor:**

**Poncela Méndez, Alfonso  
Departamento de ingeniería de  
sistemas y automática**

**Valladolid, Septiembre del 2020**



# AGRADECIMIENTOS

Agradezco y dedico este proyecto a mis padres, hermano, novia y demás familiares por todo el apoyo que me han brindado durante toda la carrera y siempre me han motivado y alentando a seguir.

A mi amigos y profesores que me han acompañado durante todos estos años y me han ayudado y aportado conocimientos para poder superar los estudios y crecer profesionalmente.

A mi tutor Alfonso Valentín Poncela que ha sido paciente y me ha ayudado y asesorado de forma correcta.

Sin todos vosotros no hubiera sido posible llegar hasta aquí.

Gracias.



# RESUMEN

En el presente trabajo se ha realizado un sistema de supresión de vibraciones para estructuras esbeltas por medio de un PLC de la marca Siemens y modelo S7-1200.

El sistema de supresión de vibraciones consiste en leer la aceleración de la estructura por medio de un acelerómetro y con un controlador PID integrado en el PLC se alimenta un actuador (shaker) para que contrarreste dichas vibraciones.

Primero se hace un estudio en un equipo de laboratorio (maqueta Ménsula) para ver si se puede llevar a cabo dicho control y más adelante se hace un estudio teórico de dicho control aplicado a un puente real.

Por último, se hace un estudio económico de la solución que se propone.

## PALABRAS CLAVE

PLC siemens S7-1200, controlador PID, supresión de vibraciones, PID en estructuras esbeltas, acelerómetro, TiaPortal.



## **ABSTRACT**

In the present work, a vibration suppression system for slender structures has been carried out by means of a PLC of the Siemens brand and model S7-1200.

The vibration suppression system consists of reading the acceleration of the structure by means of an accelerometer and with an integrated PID controller in the PLC an actuator (Shaker) is moved to counteract the vibrations.

First, a study is carried out in a laboratory equipment (Ménsula model) to see if a control can be carried out and then a theoretical study of said control applied to a real bridge is made.

Finally, an economic study is made of the proposed solution.

## **KEYWORDS**

Siemens S7-1200 PLC, PID controller, vibration suppression, PID in slender structures, accelerometer, TiaPortal.





# ÍNDICE DE CONTENIDOS

CAPITULO 1. INTRODUCCIÓN, JUSTIFICACIÓN Y OBJETIVOS .....	1
1.1. ANTECEDENTES.....	1
1.2. JUSTIFICACIÓN.....	2
1.3. OBJETIVO DEL PROYECTO .....	3
1.3.1. OBJETIVO GENERAL.....	3
1.3.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS .....	3
1.3.2.1. PARTE MÉNSULA .....	3
1.3.2.2. PARTE PASARELA.....	4
1.4. PLANTEAMIENTO ADOPTADO.....	4
1.5. ESTRUCTURA DEL PROYECTO.....	6
CAPITULO 2. HARDWARE PROPUESTO .....	7
2.1. PLC SIEMENS SIMATIC S7-1200 .....	7
2.1.1. INTRODUCCIÓN.....	7
2.1.2. ELECCIÓN DEL HARDWARE NECESARIO.....	8
2.1.3. PLC SIEMENS SIMATIC S7-1212C AC/DC/Relé.....	9
2.1.4. SIGNAL BOARD 1232 – ANALOG OUTPUTS.....	12
2.2. PANTALLA HMI .....	14
2.2.1. INTRODUCCIÓN.....	14
2.2.2. SIEMENS SIMATIC HMI KTP400 basic panel .....	15
2.3. ACELERÓMETROS .....	15
2.3.1. INTRODUCCIÓN.....	15
2.3.2. ACELEROMETRO POLOLU 3 ejes MMA7341L $\pm 3g$ .....	16
2.3.3. ACELEROMETRO MEMSIC 1 EJE CXL04GP1 $\pm 4g$ .....	17
2.4. SHAKER.....	19
2.4.1. INTRODUCCION.....	19
2.4.2. APS 400 ELECTRO-SEIS SHAKER.....	19
2.4.2.1. INTRODUCCIÓN.....	19
2.4.2.2. MODOS DE FUNCIONAMIENTO.....	20
2.4.2.3. CARACTERÍSTICAS GENERALES.....	23
2.4.3. AMPLIFICADOR APS MODELO 144.....	23
2.4.3.1. INTRODUCCIÓN.....	23
2.4.3.2. CARACTERÍSTICAS GENERALES.....	24
CAPITULO 3. SOFTWARE UTILIZADO .....	25
3.1. INTRODUCCIÓN .....	25
3.2. TOTALLY INTEGRATED AUTOMATION PORTAL (TIA PORTAL V14).....	25
3.2.1. INTRODUCCIÓN.....	25
3.2.2. INTERFAZ TIA PORTAL .....	26
3.2.3. DISPOSITIVO Y REDES.....	27
3.2.3.1. VISTA DE REDES .....	27
3.2.3.2. VISTA TOPOLÓGICA.....	27
3.2.3.3. VISTA DE DISPOSITIVOS .....	28
3.2.4. PLC_MENSULA.....	28
3.2.4.1. ESTRUCTURA DE PROGRAMACION SIEMENS.....	30
3.2.4.2. LENGUAJES DE PROGRAMACIÓN .....	31
3.2.4.3. OPCIONES DE CARGA Y SIMULACIÓN.....	32
3.2.4.4. SEGURIDAD.....	33
3.2.5. HMI_MENSULA .....	33
3.2.5.1. ESTRUCTURA DE PROGRAMACIÓN.....	34
3.2.5.2. OPCIONES DE CARGA Y SIMULACION.....	34
3.2.5.3. SEGURIDAD.....	36
3.3. MATLAB Y SIMULINK .....	36

3.4. EXCEL .....	37
<b>CAPITULO 4. DISEÑO DEL CONTROLADOR EN LA MENSULA .....</b>	<b>39</b>
4.1. INTRODUCCIÓN Y DESCRIPCIÓN DE LA MÉNSULA .....	39
4.2. MODELADO DE LA MÉNSULA .....	41
4.2.1. INTRODUCCIÓN.....	41
4.2.2. IMPLEMENTACIÓN DEL ACELEROMETRO POLOLU EN LA MÉNSULA .....	41
4.2.3. CALIBRACIÓN INICIAL DEL EQUIPO .....	42
4.2.4. RESPUESTA EN FRECUENCIA .....	43
4.2.5. FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA .....	52
4.3. DISEÑO DEL CONTROLADOR .....	55
4.3.1. INTRODUCCIÓN.....	55
4.3.2. CONTROLADOR PROPORCIONAL P.....	58
4.3.3. CONTROLADOR PROPORCIONAL-INTEGRAL PI.....	60
4.3.4. CONTROLADOR PROPORCIONAL INTEGRAL DERIVATIVO PID .....	64
4.4. MODELADO DEL ACTUADOR .....	69
4.4.1. INTRODUCCIÓN – MODELADO DEL ACTUADOR .....	69
4.4.2. CONTROLADOR PI CON FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA DEL ACTUADOR .....	70
4.4.3. CONTROLADOR PID CON FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA DEL ACTUADOR.....	71
4.4.4. COMPARATIVA DEL LAZO ABIERTO FRENTE A LOS CONTROLES PI, PID CON ACTUADOR .....	71
<b>CAPITULO 5. DISEÑO DEL CONTROLADOR PARA LA ESTRUCTURA REAL.....</b>	<b>75</b>
5.1. INTRODUCCIÓN .....	75
5.1.1. OBJETO DE ESTUDIO .....	77
5.2. MODELADO DE LA PASARELA PEATONAL.....	77
5.2.1. CARACTERIZACIÓN DE LA PASARELA.....	77
5.2.2. CARACTERIZACIÓN DEL ACTUADOR .....	79
5.3. DISEÑO DEL CONTROLADOR .....	80
5.4. IMPLEMENTACION EN LA PASARELA.....	87
<b>CAPITULO 6. IMPLEMENTACION DEL PROGRAMA DE CONTROL .....</b>	<b>89</b>
6.1. INTRODUCCIÓN .....	89
6.2. ESTRUCTURA DEL PROGRAMA EN EL PLC .....	89
6.2.1. INTRODUCCIÓN.....	89
6.2.2. BLOQUES DEL PROGRAMA .....	91
6.2.2.1. BLOQUES OB.....	92
6.2.2.2. BLOQUES FC .....	93
6.2.2.3. BLOQUES FB .....	93
6.2.2.4. BLOQUES DB.....	93
6.2.3. OB100: STARTUP.....	93
6.2.4. PROGRAMA PRINCIPAL: BLOQUE MAIN .....	94
6.2.4.1. SEGMENTO 1: CONDICIONES GENERAL DEL EQUIPO.....	95
6.2.4.2. SEGMENTO 2: BLOQUE CONFIGURACION INICIAL.....	96
6.2.4.3. SEGMENTO 3: BLOQUE ENTRADAS ANALOGICAS .....	98
6.2.4.4. SEGMENTO 4: BLOQUE SELECCIÓN DE MODO .....	99
6.2.4.5. SEGMENTO 5: BLOQUE CONFIGURACION PARAMETROS .....	102
6.2.4.6. SEGMENTO 6: BLOQUE LECTURA DATOS .....	103
6.2.4.7. SEGMENTO 7: BLOQUE SALIDAS ANALÓGICAS .....	105
6.2.4.8. SEGMENTO 8: BLOQUE REGISTRO DATOS .....	106
6.2.4.9. SEGMENTO 9: BLOQUE DEFECTOS MENSAJES.....	108
6.2.5. OB30. PID_mensula .....	109
6.2.5.1. CONFIGURACION.....	110
6.2.5.2. PUESTA EN SERVICIO .....	111
6.2.6. OB31. ONDA_Generada.....	112
6.2.7. TRACE.....	113
6.3. PROGRAMACIÓN Y CONFIGURACION DEL HMI .....	114
6.3.1. INTRODUCCIÓN.....	114
6.3.2. ALARMAS.....	116
6.3.3. IMAGEN 1: CONF_INICIAL .....	119

6.3.4. IMAGEN 2: PORTADA.....	121
6.3.5. IMAGEN 3: MANUAL .....	122
6.3.6. IMAGEN 4: AUTOMÁTICO.....	123
6.3.7. IMAGEN 5: CONF_PARAMETROS.....	124
<b>CAPITULO 7. ENSAYOS Y PRUEBAS EN LA MENSULA.....</b>	<b>127</b>
7.1. INTRODUCCIÓN .....	127
7.2. SISTEMA EN LAZO ABIERTO .....	129
7.3. EXPERIMENTO ALTERNANDO LAZO ABIERTO CON LAZO CERRADO Y CONTROLADOR PROPORCIONAL .....	130
7.4. EXPERIMENTO ALTERNANDO LAZO ABIERTO CON LAZO CERRADO Y CONTROLADOR PROPORCIONAL-INTEGRAL .....	133
7.5. ANALISIS DE LOS RESULTADOS.....	136
<b>CAPITULO 8. ESTUDIO ECONÓMICO.....</b>	<b>139</b>
8.1. INTRODUCCIÓN .....	139
8.2. PRESENTACION DEL MATERIAL.....	139
8.3. ESTRUCTURA DEL PRODUCTO .....	141
8.4. COSTES DIRECTOS .....	142
8.4.1. COSTE DEL MATERIAL DEL PRODUCTO .....	142
8.4.2. COSTE DIRECTO DE FABRICACION Y MONTAJE.....	143
8.4.3. COSTE DIRECTO DE DESARROLLO.....	144
8.5. GASTOS INDIRECTOS .....	146
8.6. COSTES TOTALES Y MERCADOS DE EXPLOTACIÓN .....	147
8.6.1. COSTES TOTALES .....	147
<b>CAPITULO 9. CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS.....</b>	<b>149</b>
9.1. CONCLUSIONES.....	149
9.2. LINEAS FUTURAS .....	150
<b>CAPITULO 10. BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS .....</b>	<b>151</b>

# ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Figura 1.1. Pasarela Museo de la ciencia .....	1
Figura 2.1. Gama de productos SIEMENS.....	7
Figura 2.2. Gama PLC SIMATIC S7 .....	8
Figura 2.3. Comparativa de productos SIMATIC S7-1200 .....	9
Figura 2.4. PLC SIEMENS S7-1212C AC/DC/Relé .....	10
Figura 2.5. Características generales PLC S7-1212C.....	11
Figura 2.6. Características generales PLC S7-1212C.....	11
Figura 2.7. Software TiaPortal para SIEMENS .....	12
Figura 2.8. Signal Board 1232.....	12
Figura 2.9. Características generales Signal Board 1232 .....	13
Figura 2.10. HMI KTP400 Basic Panel.....	14
Figura 2.11. Logotipo de la marca POLOLU .....	16
Figura 2.12. Foto-esquema del acelerómetro POLOLU MMA7341L.....	17
Figura 2.13. Logotipo de la marca MEMSIC.....	17
Figura 2.14. Acelerómetro MEMSIC CLX4GP1.....	18
Figura 2.15. Código de colores del cable del MEMSIC CLX4GP1.....	18
Figura 2.16. Shaker APS 400.....	20
Figura 2.17. Shaker en modo cuerpo fijo.....	21
Figura 2.18. Shaker en modo del cuerpo libre .....	22
Figura 2.19. Shaker en modo excitador de tabla .....	22
Figura 2.20. Amplificador APS modelo 144.....	23
Figura 3.1. Estructura TiaPortal .....	26
Figura 3.2. Vista de proyecto.....	26
Figura 3.3. Vista de redes.....	27
Figura 3.4. Vista topológica .....	28
Figura 3.5. Vista de dispositivos .....	28
Figura 3.6. Estructura PLC_MENSULA.....	29
Figura 3.7. Estructura de programación.....	30
Figura 3.8. Vista ONLINE .....	32
Figura 3.9. Estructura de seguridad .....	33
Figura 3.10. Estructura del HMI.....	34
Figura 3.11. Opciones de carga HMI .....	35
Figura 3.12. Simulación HMI.....	35
Figura 3.13. Estructura de seguridad HMI.....	36
Figura 3.14. Logotipo de Matlab y Simulink .....	36
Figura 3.15. Logotipo de Excel.....	37
Figura 4.1. Ménsula con acelerómetro integrado .....	39
Figura 4.2. Módulos de conexión de los componentes.....	40
Figura 4.3. Acelerómetro POLOLU MMA7341L.....	42
Figura 4.4. Ménsula con acelerómetro POLOLU.....	42
Figura 4.5. Diagrama de bloques de respuesta en frecuencia .....	43
Figura 4.6. Repuesta en frecuencia para 1 Hz.....	44
Figura 4.7. Repuesta en frecuencia para 2 Hz.....	44
Figura 4.8. Repuesta en frecuencia para 3 Hz.....	45
Figura 4.9. Repuesta en frecuencia para 4 Hz.....	45
Figura 4.10. Repuesta en frecuencia para 5 Hz.....	46
Figura 4.11. Repuesta en frecuencia para 6 Hz.....	46
Figura 4.12. Repuesta en frecuencia para 7 Hz.....	47
Figura 4.13. Repuesta en frecuencia para 7,5 Hz .....	47
Figura 4.14. Repuesta en frecuencia para 8 Hz.....	48
Figura 4.15. Respuesta en frecuencia para 9 Hz.....	48
Figura 4.16. Respuesta en frecuencia para 10 Hz.....	49
Figura 4.17. Respuesta en frecuencia para 100 Hz .....	49
Figura 4.18. Diagrama de Bode de nuestro sistema .....	51
Figura 4.19. Diagrama de bode teórico.....	52

Figura 4.20. Curvas de magnitud logarítmica, asíntotas y curvas de ángulo de fase de una función de transferencia variando su coeficiente de amortiguamiento .....	53
Figura 4.21. Diagrama de bode obtenido por respuesta en frecuencia .....	55
Figura 4.22. Diagrama de bode de nuestro sistema.....	56
Figura 4.23. Diagrama de bloques del sistema en lazo abierto.....	57
Figura 4.24. Diagrama de bloques del sistema en lazo cerrado.....	57
Figura 4.25. Respuesta del sistema en lazo abierto ante entrada escalón .....	58
Figura 4.26. Diagrama de bloques para sistema lazo cerrado con controlador P.....	58
Figura 4.27. Lugar de las raíces sistema lazo cerrado con controlador P.....	59
Figura 4.28. Sistema lazo abierto y lazo cerrado con controlador proporcional ante entrada escalón.....	59
Figura 4.29. Diagrama de bode lazo abierto (azul) y diagrama de bode lazo cerrado con controlador P (rojo) .....	60
Figura 4.30. Diagrama de bloques para controlador PI.....	61
Figura 4.31. Lugar de las raíces lazo abierto (rojo) y lugar de las raíces lazo cerrado con controlador PI (azul) .....	62
Figura 4.32. Respuesta escalón sistema lazo cerrado con controlador PI .....	63
Figura 4.33. Respuesta en frecuencia lazo abierto (rojo) y respuesta en frecuencia lazo cerrado con controlador PI (azul).....	63
Figura 4.34. Controlador PI anti-windup.....	64
Figura 4.35. Diagrama de bloques para sistema lazo cerrado con controlador PID .....	65
Figura 4.36. Lugar de las raíces sistema lazo cerrado con controlador PID .....	66
Figura 4.37. Respuesta escalón sistema lazo cerrado con controlador PID .....	67
Figura 4.38. Diagrama de bode LA (rojo) y diagrama de bode controlador PID (azul).....	67
Figura 4.39. Respuesta en frecuencia del sistema en LA, LCP, LCPI y LCPID.....	68
Figura 4.40. Modelado del actuador de la ménsula correspondiente al artículo de la referencia 2 .....	69
Figura 4.41. Modelo del sistema en lazo cerrado con el actuador .....	70
Figura 4.42. Respuesta escalón con controlador PI con actuador .....	70
Figura 4.43. Respuesta escalón con controlador PID con actuador.....	71
Figura 4.44. Comparativa respuesta temporal del sistema LA con PI y PID con actuador .....	72
Figura 4.45. Comparativa respuesta frecuencia del sistema LA con PI y PID con actuador....	73
Figura 5.1. Localización de la pasarela peatonal del museo de la ciencia .....	75
Figura 5.2. Foto aérea de la pasarela del museo de la ciencia.....	76
Figura 5.3. Localización de los vanos en la pasarela.....	76
Figura 5.4. Vano 2 de la pasarela peatonal .....	77
Figura 5.5. Respuesta en frecuencia del sistema de la pasarela peatonal .....	78
Figura 5.6. Respuesta en frecuencia del actuador SHAKER .....	79
Figura 5.7. Sistema en lazo cerrado en SIMULINK.....	80
Figura 5.8. Lugar de las raíces del sistema .....	80
Figura 5.9. Comportamiento del sistema en lazo abierto.....	81
Figura 5.10. Lugar de las raíces con controlador PID .....	82
Figura 5.11. Zona en el lugar de las raíces en la que se va a trabajar.....	82
Figura 5.12. Diagrama de bode del sistema sin controlador con controlador PID .....	83
Figura 5.13. Comparativa del sistema ante entrada impulso .....	84
Figura 5.14. Diagrama de bloques del sistema en lazo abierto con sistema controlado .....	84
Figura 5.15. Sistema en lazo abierto vs sistema controlado con PID ante entrada onda cuadrada.....	85
Figura 5.16. MTWV con sistema en LA.....	86
Figura 5.17. MTWV con sistema controlado con PID .....	86
Figura 5.18. Exterior del producto para comercializar .....	87
Figura 5.19. Interior del producto a comercializar .....	88
Figura 6.1. Estructura condiciones de seguridad .....	90
Figura 6.2. Estructura del programa.....	91
Figura 6.3. Bloques del programa .....	92
Figura 6.4. Funcionamiento bloques OB .....	92
Figura 6.5. OB Startup .....	94
Figura 6.6. Estructura del main (OB1).....	94
Figura 6.7. Estructura del bloque main en TiaPortal.....	95

Figura 6.8. Bloque GENERAL_EQUIPO.....	96
Figura 6.9. Estructura bloque GENERAL_EQUIPO.....	96
Figura 6.10. Bloque CONFIGURACION_INICIAL.....	97
Figura 6.11. Estructura bloque CONFIGURACION_INICIAL.....	97
Figura 6.12. Bloque ENTRADAS_ANALOGICAS .....	98
Figura 6.13. Estructura del bloque ENTRADAS_ANALOGICAS .....	98
Figura 6.14. Bloque SELECCIÓN_MODO .....	99
Figura 6.15. Estructura del bloque SELECCIÓN_MODO.....	99
Figura 6.16. Estructura del bloque ONDA_SENOIDAL.....	100
Figura 6.17. Periodo de muestreo de OB31 .....	101
Figura 6.18. Bloque PID_compact.....	101
Figura 6.19. Bloque CONFIGURACION_PARAMETROS .....	102
Figura 6.20. Estructura del bloque CONFIGURACION_PARAMETROS.....	103
Figura 6.21. Bloque LECTURA_DATOS .....	103
Figura 6.22. Estructura del bloque LECTURA_DATOS .....	104
Figura 6.23. Estructura de adquisición de datos.....	104
Figura 6.24. Estructura del bloque DATOS_ACCELEROMETRO .....	105
Figura 6.25. Bloque SALIDAS_ANALOGICAS .....	105
Figura 6.26. Estructura del bloque SALIDAS_ANALOGICAS .....	106
Figura 6.27. Bloque REGISTRO_DATOS .....	106
Figura 6.28. Estructura del bloque REGISTRO_DATOS .....	107
Figura 6.29. Navegador Google Chrome con la pantalla de inicio del PLC .....	108
Figura 6.30. Archivo "Acelerometro.csv" .....	108
Figura 6.31. Bloque DEFECTOS MENSAJES.....	108
Figura 6.32. Estructura del bloque DEFECTOS MENSAJES.....	109
Figura 6.33. Pantalla Avisos HMI en el HMI .....	109
Figura 6.34. OB30 PID_mensula .....	110
Figura 6.35. Ventana "Configuración".....	111
Figura 6.36. Ecuación de PID utilizada por el bloque PID_Compact.....	111
Figura 6.37. Ventana "Puesta en Servicio" .....	112
Figura 6.38. OB31 ONDA_Generada .....	113
Figura 6.39. Ventana de navegación para agregar nuevo trace .....	113
Figura 6.40. Ventana de Configuración.....	114
Figura 6.41. Ventana de Diagrama.....	114
Figura 6.42. Estructura de ejecución de las pantallas en el HMI.....	115
Figura 6.43. Estructura de proyecto HMI .....	116
Figura 6.44. Estructura de condiciones de seguridad en el HMI .....	117
Figura 6.45. Mensaje de alarma en el HMI.....	118
Figura 6.46. Símbolo de advertencia indicativo de alarma no acusada.....	119
Figura 6.47. Imagen CONF_INICIAL .....	119
Figura 6.48. Imagen CONF_PARAMETROS.....	120
Figura 6.49. Imagen PORTADA.....	121
Figura 6.50. Imagen MANUAL .....	122
Figura 6.51. Imagen AUTOMÁTICO .....	123
Figura 6.52. Imagen CONF_PARAMETROS.....	124
Figura 6.53. Pantalla ADQUISICION DE DATOS.....	125
Figura 7.1. Ménsula equipada para ensayos y experimentos .....	127
Figura 7.2. Esquema para la segunda prueba con el excitador .....	128
Figura 7.3. Sistema en lazo abierto excitado por entrada escalón .....	129
Figura 7.4. MTVV sistema en lazo abierto.....	130
Figura 7.5. Ensayo alternado lazo abierto con lazo cerrado y controlador proporcional.....	131
Figura 7.6. MTVV del ensayo 1.....	132
Figura 7.7. Sistema con controlador PID y entrada escalón.....	134
Figura 7.8. MTVV del ensayo 2.....	135
Figura 8.1. Esquema eléctrico PILZ .....	140
Figura 8.2. Layout del producto .....	141
Figura 8.3. Layout interior del producto .....	142

# ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Características generales Shaker APS 400. ....	23
Tabla 2.2. Características generales amplificador APS 144 .....	24
Tabla 4.1. Valores de respuesta en frecuencia .....	50
Tabla 4.2. Valores del diagrama de bode .....	51
Tabla 4.3. Comparativa lazo abierto con controladores P, PI, PID .....	69
Tabla 4.4. Comparativa LA, PI y PID.....	73
Tabla 7.1. Resultados del ensayo 1 .....	133
Tabla 7.2. Resultados del ensayo 2 .....	136
Tabla 7.3. Mejora de los distintos controladores sobre el sistema.....	137
Tabla 8.1. Materiales del producto.....	139
Tabla 8.2. Elementos de campo .....	139
Tabla 8.3. Coste económico del material.....	143
Tabla 8.4. Salarios según el convenio del metal en Valladolid .....	144
Tabla 8.5. Coste de fabricación y montaje.....	144
Tabla 8.6. Convenio colectivo del sector de empresas de ingeniería y oficinas de estudios técnicos.....	145
Tabla 8.7. Tareas a realizar por los ingenieros y sus horas empleadas .....	146
Tabla 8.8. Coste del personal de desarrollo .....	146
Tabla 8.9. Coste directo de desarrollo.....	146
Tabla 8.10. Coste de explotación .....	146
Tabla 8.11. Costes totales del producto .....	147





# CAPITULO 1. INTRODUCCIÓN, JUSTIFICACIÓN Y OBJETIVOS

## 1.1. ANTECEDENTES

En los últimos años la tendencia en la construcción de estructuras peatonales ha avanzado hacia un diseño más estético y más ligero. Esto se debe principalmente a la incorporación de nuevos materiales de construcción que aportan un alto rendimiento a diferentes tipos de estructuras. El empleo de estos nuevos materiales da lugar a estructuras más ligeras que presentan amortiguación más baja y frecuencias naturales más bajas, las cuales son más susceptibles a la excitación por los usuarios humanos y vibraciones naturales. Estas vibraciones son analizadas con anterioridad y posterioridad para que no causen problemas en la resistencia, fatiga o seguridad de las estructuras, pero sí pueden llegar a dar problemas de incomodidad al usuario. Es decir, pequeñas vibraciones que son percibidas por una persona y dan sensación de inseguridad o inestabilidad.

Principalmente este fenómeno de vibraciones se suele dar en las pasarelas peatonales, las cuales están en lugares de interés turístico y son construidas con materiales altamente estéticos y diseños modernos.

La pasarela que se va a estudiar en este caso es la pasarela peatonal del Museo de la Ciencia en Valladolid (España) (Figura 1.1). Esta pasarela cómo se estudiará a continuación es un claro ejemplo de como al sufrir la excitación de los peatones al caminar o al correr puede llegar a alcanzar una aceleración vertical excesiva o molesta.



Figura 1.1. Pasarela Museo de la ciencia

### 1.2. JUSTIFICACIÓN

Observando la pasarela del Museo de la Ciencia de Valladolid se aprecia que puede ser afectada por vibraciones que pueden llegar a ser incómodas, por esta razón se va a realizar un control activo de bajo coste para reducirlas al máximo y que no molesten al usuario.

Este control activo se va a llevar a cabo con un Controlador Lógico Programable (PLC) de la marca Siemens. El usar un controlador industrial nos aporta un plus de seguridad, fiabilidad y robustez en comparación a otros dispositivos de bajo coste cómo podría ser Arduino.

Para medir la aceleración de la pasarela se utilizará un acelerómetro y para mitigar las vibraciones se utilizará un excitador (shaker).

Por motivo de acceso y seguridad en la pasarela real los ensayos de validación del control se van a hacer en una maqueta pequeña que hay en el laboratorio del Dto. ISA de la EII UVA. [1]

La maqueta tipo ménsula servirá para reproducir el modo de vibración principal de nuestro sistema real, el cual se intentará mitigar/reducir lo más posible.

### **1.3. OBJETIVO DEL PROYECTO**

#### **1.3.1. OBJETIVO GENERAL**

Los objetivos del proyecto son (1) verificar si con un PLC industrial de gama baja podemos mejorar el estado vibratorio de una estructura civil tipo pasarela peatonal, y (2) usar como esquema de control un PID. Esto es debido fundamentalmente a las frecuencias de trabajo, y a su compatibilidad con ciclo de trabajo del PLC. Adicionalmente al PLC se le debe dotar un interface para diálogo con el usuario (tercer objetivo). Tanto el PLC como el HMI deben ser programados a medida. El conjunto PLC-HMI se montará en armario fácilmente transportable (cuarto objetivo) para poder hacer pruebas de campo en distintas estructuras.

Las vibraciones se medirán por medio de la aceleración de la pasarela, ya que medir el desplazamiento es muy difícil. Una vez obtenida dicha aceleración, la variable de control será el voltaje introducido a un excitador o shaker el cual es el actuador de nuestro sistema.

Antes de nada, cómo se mencionaba en el apartado anterior, los cálculos y la calibración se llevarán a cabo un equipo de laboratorio.

Como se debe controlar el sistema, primero hay que hallar el modelo de éste. Se usan las herramientas que nos aporta SIEMENS (TiaPortal V14), un osciloscopio (para la adquisición de datos y posteriormente tratarlos con el PC en Excel) y los programas Matlab y Simulink.

#### **1.3.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS**

Se va a dividir el proyecto en dos partes individuales las cuales están relacionadas con el objetivo indicado.

##### **1.3.2.1. PARTE MÉNSULA**

En esta parte se va a integrar un acelerómetro externo en la ménsula y se va a calibrar dicho sensor y el actuador.

Una vez acoplado los elementos de medición y actuación, se van a llevar a cabo experimentos de identificación del sistema para posteriormente simular con Matlab y Simulink el comportamiento.

Mediante la simulación del sistema se obtiene el controlador PID más adecuado y se implementa en la ménsula. Se llevan a cabo una serie de experimentos y mediciones para validar lo teórico con lo real.

El controlador PID se implementa con un bloque de programación del programa TiaPortal llamado PID\_Compact. Dicho bloque de programación se configura con los parámetros obtenidos de la forma teórica en los modelos de Matlab y Simulink. También se programa un dispositivo HMI con el cual se pueden elegir distintos modos de funcionamiento del lazo de control. Manual (lazo abierto), automático (lazo cerrado).

Finalmente se realizan experimentos en la ménsula con el sistema en lazo abierto y en lazo cerrado. Se evalúan ciertos parámetros para ver la mejora conseguida.

### **1.3.2.2. PARTE PASARELA**

En este apartado se muestran los experimentos y análisis hechos en otros trabajos por el equipo investigador en la pasarela para la obtención del modelo matemático de la misma. También se obtiene el modelo matemático del shaker [2].

Ambos modelos matemáticos se estudian en Matlab y Simulink como en el apartado anterior. De esta manera se obtiene el controlador PID más adecuado que se implementará en el PLC de la misma manera que en el apartado de la ménsula. Se hacen simulaciones para verificar si con el PID mejora el comportamiento de la pasarela y se deja todo preparado para las pruebas de campo que serán objeto de trabajos posteriores no incluidos en este TFG.

Todo ello va enfocado hacia un producto comercial sencillo y de bajo coste. En este caso es un sistema para transportar y conectar fácilmente.

### **1.4. PLANTEAMIENTO ADOPTADO**

El planteamiento adoptado es realizar primero la parte de la ménsula, modelo aproximado de la pasarela, y experimentar en él para someterlo a todas las pruebas necesarias y configurar con máxima seguridad el control PID.

Con la ménsula se puede realizar pruebas con más seguridad, poner el sistema en estados de alta peligrosidad (resonancia) sin tener consecuencias catastróficas y configurar un control con más precisión sin tener ningún problema económico y personal.

El siguiente paso es la elección del PLC y el HMI, ya que en él se va a llevar a cabo el control PID y por la pantalla se va a poder elegir el tipo de prueba o comportamiento que se quiere que haga el sistema. Para ello se

fijan unos requisitos y se adquiere el PLC y el HMI que más se adapta junto con sus respectivos softwares.

Elegidos ambos componentes primero se configuran los materiales para adaptarse al sistema. En el caso del acelerómetro, el dispositivo PLC puede leer su variable analógica, pero la variable analógica del actuador no puede ser controlada sin un accesorio a mayores.

Como el actuador de la ménsula se controla con valores de tensión (-10...+10)V y el actuador shaker se controla con valores de tensión (-2...+2)V se añade a mayores al PLC una Signal Board de la marca SIEMENS adecuada para manipular salidas analógicas.

Una vez elegidos los componentes, se calibra todo y se trabaja en la identificación del modelo de la ménsula. Con los sensores y el actuador se deduce el modelo matemático de la ménsula y del actuador.

Una vez hallado ambos modelos se trabaja en Matlab y Simulink con la finalidad de hallar el PID más adecuado teniendo en cuenta los diferentes métodos de sintonización del PID.

Finalizada la parte de simulación se pasa a las pruebas reales sobre la maqueta del laboratorio, que consisten en la elaboración de un programa en TiaPortal donde se implementa el PID calculado y se elaboran pantallas para el manejo de la aplicación desarrollada.

Para la configuración inicial lo primero que se necesitan son los valores del controlador PID, los cuales se obtuvieron a partir de los modelos matemáticos con su respectiva sintonización.

En trabajos anteriores [3],[4] se ha estudiado de forma precisa la pasarela y el shaker y se han obtenido los modelos matemáticos de ambos con una precisión muy exacta. De aquí se van a tomar dichos modelos para calcular los parámetros de nuestro control PID a implementar en la estructura real.

Hallado el PID por medio de simulación en Matlab y Simulink, se escribirán los parámetros en el programa de nuestro PLC y se quedaran por hacer las pruebas necesarias en la pasarela que serán objeto de trabajo posteriores.

## 1.5. ESTRUCTURA DEL PROYECTO

El TFG ha sido organizado de la siguiente manera:

**Capítulo 1:** En este capítulo se da una introducción al proyecto, se explican los objetivos que se desean alcanzar y se mencionan los pasos que se van a seguir para obtenerlos.

**Capítulo 2:** En este apartado se describen de forma precisa los materiales que se van a utilizar y el porqué de su elección.

**Capítulo 3:** En este capítulo se describen el software utilizado en el proyecto.

**Capítulo 4:** Este capítulo va específicamente relacionado con la ménsula. Se empieza haciendo una descripción de la misma para más adelante identificarla con su modelo matemático. También se detalla el cálculo e implementación del PID.

**Capítulo 5:** En este apartado se habla de la pasarela. Se hace referencia a su modelo matemático y al del shaker, se calcula e implementa el PID y se comentan las simulaciones que se han llevado a cabo. Se presenta un posible producto final con su diseño y especificaciones.

**Capítulo 6:** En este capítulo se desarrolla como se ha programado el PID en el PLC y las distintas funcionalidades que se le ha dado. También se describe la programación del HMI y de sus modos de funcionamiento.

**Capítulo 7:** Parte experimental en la ménsula. Configurado el PID en el PLC se hacen pruebas en la ménsula.

**Capítulo 8:** Estudio económico del posible producto que se puede comercializar. También se exponen los posibles mercados de explotación.

**Capítulo 9:** Conclusiones del trabajo y líneas futuras.

**Capítulo 10:** Bibliografía.

## CAPITULO 2. HARDWARE PROPUESTO

Para conseguir las variables del sistema, efectuar el control y poder actuar sobre él se van a utilizar una serie de materiales que se describen a continuación.

En este apartado se va a detallar con máxima brevedad los principales elementos utilizados para el control. Dichos elementos son 4 a los cuales se le dedican un apartado a cada uno:

- Controlador: PLC Siemens SIMATIC S7-1200.
- Pantalla de manejo y visualización: Siemens SIMATIC HMI basic panel.
- Sensores: Acelerómetros tipo MEMS.
- Actuador: Shaker.

### 2.1. PLC SIEMENS SIMATIC S7-1200

Como se ha comentado en apartados anteriores el control del sistema se va a llevar a cabo con PLC marca Siemens de la gama SIMATIC S7-1200 dada su amplia robustez en la industria y su precio económico.

#### 2.1.1. INTRODUCCIÓN

Siemens es una empresa Alemana con trayectoria en la industria de más de 30 años, en la actualidad compite en el mercado principalmente con Allen Bradley, la cual es su mayor rival en América. Es la marca preferida en Europa gracias a su fiabilidad y a la innovación que han presentado en todos sus productos SIMATIC por varias décadas.

SIMATIC es la gama de productos que ha ofrecido SIEMENS durante décadas consiguiendo de esta manera soluciones requerimientos de automatización a pequeña, mediana y gran escala (Figura 2.1).



Figura 2.1. Gama de productos SIEMENS

Una gama de estos dispositivos, el cual se va a utilizar en este proyecto son los controladores SIMATIC S7-1200 (Figura 2.2). Esta gama de productos fue lanzada a principios de esta década con la finalidad de sustituir la serie S7-200 y ser la solución perfecta para proyectos de automatización de pequeña escala.



Figura 2.2. Gama PLC SIMATIC S7

Esta gama está compuesta por 5 productos: CPU 1211C, CPU 1212C, CPU 1214C, CPU 1215C, CPU 1217C cuyas características son:

- Son modelos compactos que integran: la fuente, la CPU, conexiones digitales de entrada/salida, dos entradas analógicas (0...10)V y un puerto de comunicación Ethernet/Profinet.
- Capacidad de instalación de 8 módulos de señales a la derecha de la CPU y tres de comunicación a la izquierda de la CPU.
- Tolera y tiene la capacidad de ser acoplado a varias redes industriales de Siemens (AS-I, Profibus, Profinet).
- Velocidad de procesamiento de hasta 85 microsegundos, memorias de almacenamiento del programa de 125 Kbytes y memoria de almacenamiento de datos de 4 Mbytes.

### 2.1.2. ELECCIÓN DEL HARDWARE NECESARIO

Como se ha venido comentado nuestro autómatas programable tiene que tener las siguientes características:

- Velocidad de procesamiento.
- Entradas analógicas para la conexión con los acelerómetros.



- Salidas analógicas para la conexión con el Shaker (en este caso al no tener ninguna salida analógica se le incluirá una Signal board de la cual se hablará más adelante.)
- Capacidad de memoria elevada.
- Económico, pequeño y manejable.

A continuación, se muestra en la Figura 2.3 una comparativa de los diferentes productos de la gama SIMATIC S7-1200, en donde se muestra el PLC que se va a utilizar.

<i>SIMATIC S7-1200 CPUs</i>	CPU 1211C	CPU 1212C	CPU 1214C
3 configuraciones por CPU	<i>DC/DC/DC, AC/DC/RLY, DC/DC/RLY</i>		
Dimensiones W x H x D (mm)	90 x 100 x 75	90 x 100 x 75	110 x 100 x 75

<i>Integrated I/O</i>	CPU 1211C	CPU 1212C	CPU 1214C
Integrated Digital I/O	6 / 4 salidas	8 entradas / 6 salidas	14 entradas / 10 salidas
Integrated Analog I/O	2 entradas	2 entradas	2 entradas
Max. Local I/O – Digital	14	82	284
Max. Local I/O – Analog	3	19	67
Tamaño de imagen de proceso	<i>1024 Bytes for entradas / 1024 Bytes for salidas</i>		

<i>Memoria de usuario integrada</i>	CPU 1211C	CPU 1212C	CPU 1214C
Memoria de trabajo	25 KB	25 KB	50 KB
Memoria de carga	1 MB	1 MB	2 MB
Memoria remanente	2 KB	2 KB	2 KB
Bit Memory (M)	4 KB	4 KB	8 KB

Figura 2.3. Comparativa de productos SIMATIC S7-1200

El PLC que se ajusta a nuestras necesidades y nos aporta todo lo mencionado anteriormente es el PLC SIEMENS SIMATIC S7-1212C AC/DC/Relé.

### 2.1.3. PLC SIEMENS SIMATIC S7-1212C AC/DC/Relé

El PLC Siemens Simatic S7-1212C AC/DC/Relé con referencia 6ES7212-1BE40-0XB0 es un PLC de última generación que brinda seguridad y fiabilidad al sistema de control. Alimentado con corriente alterna en un rango de 85V hasta 220V con frecuencias comprendidas entre 47-63 Hz brinda amplias posibilidades de automatización industrial. Como hace referencia en su título, tiene 8 entradas digitales de corriente continua de las cuales 4 pueden ser de conteo rápido (HSC), 6 salidas digitales en forma de relé con una corriente de 2 A y dos entradas analógicas de 0...10V. Respecto a las salidas analógicas lo que se va a implementar es la colocación de una

Signal board de SIMATIC la cual permita una salida analógica de -10...10V (Figura 2.4). Mencionaremos al finalizar este apartado qué modelo de Signal board es y algunas de sus características.

Como se ha mencionado en el apartado anterior este PLC permite la conexión de 8 módulos de señales a la derecha y 3 de comunicación a la izquierda (Figura 2.5 y 2.6).

Memoria de trabajo de 75 Kbyte no ampliable y memoria de carga de 2 Mbyte ampliable por medio de una memory card de SIMATIC.

Permite la comunicación por medio de la interfaz profinet permitiendo los siguientes protocolos de comunicación:

- TCP/IP
- SNMP
- DCP
- LLDP



Figura 2.4. PLC SIEMENS S7-1212C AC/DC/Relé

General information	
Product type designation	CPU 1212C AC/DC/Relay
Firmware version	V4.2
Engineering with	
<ul style="list-style-type: none"> <li>Programming package</li> </ul>	STEP 7 V14 or higher
Supply voltage	
Rated value (AC)	
<ul style="list-style-type: none"> <li>120 V AC</li> <li>230 V AC</li> </ul>	Yes
permissible range, lower limit (AC)	85 V
permissible range, upper limit (AC)	264 V
Line frequency	
<ul style="list-style-type: none"> <li>permissible range, lower limit</li> <li>permissible range, upper limit</li> </ul>	47 Hz 63 Hz
Input current	
Current consumption (rated value)	80 mA at 120 V AC; 40 mA at 240 V AC
Current consumption, max.	240 mA at 120 V AC; 120 mA at 240 V AC
Inrush current, max.	20 A; at 264 V
Memory	
Work memory	
<ul style="list-style-type: none"> <li>integrated</li> <li>expandable</li> </ul>	75 kbyte No
Load memory	
<ul style="list-style-type: none"> <li>integrated</li> <li>Plug-in (SIMATIC Memory Card), max.</li> </ul>	2 Mbyte with SIMATIC memory card
Backup	
<ul style="list-style-type: none"> <li>present</li> <li>maintenance-free</li> <li>without battery</li> </ul>	Yes Yes Yes

Figura 2.5. Características generales PLC S7-1212C

Digital inputs	
Number of digital inputs	8; Integrated
<ul style="list-style-type: none"> <li>of which inputs usable for technological functions</li> </ul>	4; HSC (High Speed Counting)
Source/sink input	Yes
Digital outputs	
Number of digital outputs	6; Relays
Analog inputs	
Number of analog inputs	2
Input ranges	
<ul style="list-style-type: none"> <li>Voltage</li> </ul>	Yes
Input ranges (rated values), voltages	
<ul style="list-style-type: none"> <li>0 to +10 V</li> <li>Input resistance (0 to 10 V)</li> </ul>	Yes ≥100k ohms
Cable length	
<ul style="list-style-type: none"> <li>shielded, max.</li> </ul>	100 m; twisted and shielded
Analog outputs	
Number of analog outputs	0

Figura 2.6. Características generales PLC S7-1212C

En las Figuras 2.5 y 2.6 se mencionan algunas de sus características generales. Para ver todas sus características se deja el link con el Datasheet del controlador. [5]

Por último mencionar el medio de programación con el que se puede manipular dicho PLC. Este PLC y los PLCs de Siemens se programan con el software de automatización de Siemens TiaPortal (Figura 2.7). Se conecta al PC mediante un cable de ethernet y se le asigna una dirección IP al dispositivo PLC. A partir de ahí ya se puede ver en tiempo real la ejecución del programa y el comportamiento del PLC. En el apartado de SOFTWARE se describe con más detalle el software utilizado.



Figura 2.7. Software TiaPortal para SIEMENS

### 2.1.4. SIGNAL BOARD 1232 – ANALOG OUTPUTS

La Signal Board SB 1232 con referencia 6ES7232-4HA30-0XB0 (Figura 2.8) es un componente adicional que aporta una salida analógica al PLC. Se coloca en el alojamiento que hay en la CPU con las medidas exactas para su integración.



Figura 2.8. Signal Board 1232

Como se ha mencionado anteriormente y se aprecia en la Figura 2.8, dicho componente aporta una salida analógica la cual brinda ciertas ventajas al usuario:

- Adaptación óptima: Permite añadir entradas/salidas analógicas sin necesidad de colocar módulos adicionales, o ampliar el espacio.
- Conexión directa de sensores y actuadores: Conexión directa con los actuadores sin la necesidad de amplificadores adicionales y con 14 bits de resolución.

También su diseño funcional permite mayor comodidad a la hora del montaje, ya que no ocupa espacio adicional por que se incrusta en la parte frontal de la CPU, fácil sustitución de la misma y no varía la dimensión de la CPU.

El funcionamiento del mismo es muy sencillo, ya que transforma las señales digitales del controlador S7-1200 en señales analógicas.

A continuación en la Figura 2.9 se muestran algunos datos técnicos de la Signal Board. Para más información se aporta el link con el datasheet del mismo. [6]

<b>Datos técnicos</b>	
<b>Referencia</b>	<b>6ES7232-4HA30-0XB0</b> Signal Board SB 1232, 1 AO
<b>Información general</b>	
Designación del tipo de producto	SB 1232, AQ 1x12 bit
<b>Intensidad de entrada</b>	
de bus de fondo 5 V DC, típ.	15 mA
<b>Tensión de salida</b>	
<b>Alimentación de transmisores</b>	
• Intensidad de alimentación máx.	25 mA
<b>Pérdidas</b>	
Pérdidas, típ.	1,5 W
<b>Entradas analógicas</b>	
Nº de entradas analógicas	0
<b>Salidas analógicas</b>	
Nº de salidas analógicas	1
Tiempo de ciclo (todos los canales), máx.	Tensión: 300 µS (R), 750 µS (1 uF) Corriente: 600 µS (1 mH), 2 ms (10 mH)
<b>Rangos de salida, tensión</b>	
• -10 V a +10 V	Sí
<b>Rangos de salida, intensidad</b>	
• 0 a 20 mA	Sí

Figura 2.9. Características generales Signal Board 1232

## 2.2. PANTALLA HMI

### 2.2.1. INTRODUCCIÓN

Como se ha comentado anteriormente se van a utilizar componentes de la marca Siemens dadas sus características de robustez y fiabilidad. En el caso del interfaz humano-maquina se ve conveniente utilizar la pantalla HMI KTP400 Basic Panel (Figura 2.10). El HMI es el más básico que proporciona Siemens ya que en este proyecto no es de gran importancia un dispositivo de mayor gama ya que nos incrementaría mucho el presupuesto y no nos aportaría grandes ventajas de software. Para este TFG la pantalla se va a simular, por lo que no se va a tener en cuenta la fuente de alimentación a 24V DC. Pero para el cálculo del coste económico sé que se va a tener en cuenta la fuente de alimentación.

Esta pantalla es compatible al 100% con el PLC elegido y se configura y programa en el mismo software que el PLC, en el software TiaPortal. Para este proyecto la versión de software utilizada es la versión 14.

En este caso la conexión es por medio de ethernet con el PLC y su configuración como se ha mencionado se establece a través del TiaPortal.



Figura 2.10. HMI KTP400 Basic Panel

### 2.2.2. SIEMENS SIMATIC HMI KTP400 basic panel

A continuación se mencionan algunos datos técnicos del HMI KTP400 basic PN.

El HMI tiene como referencia 6AV2 123-2DB03-0AX0 y con la versión de firmware 14.0.1.0. Alimentado con corriente continua de 24V con un consumo de 230 mA. IP (frontal) 65, lo cual garantiza una resistencia mecánica alta.

- Pantalla de 4" TFT
- Resolución en pixeles de 480 x 272
- Colores 64K
- Manejo táctil o con teclado
- 4 teclas de función
- Una entrada PROFINET
- Una entrada USB

Para ver más de sus características se deja el link con la página web de la pantalla HMI.[7]

## 2.3. ACELERÓMETROS

### 2.3.1. INTRODUCCIÓN

Para la medida de la aceleración se van a utilizar dos acelerómetros tipo MEMS (micro-electro-mechanical-systems).

El primero se utiliza para medir la aceleración en la maqueta de la ménsula. Es cierto que dicha maqueta tiene un acelerómetro, pero al no ser de fiabilidad se coloca en la parte final de la ménsula el sensor de aceleración tipo MEMS de la marca POLOLU para obtener una lectura correcta y segura.

El segundo sensor es de la marca MEMSIC y es un acelerómetro tipo MEMS de silicona capacitivo, siendo de mejor calidad que el anterior y con muchas otras ventajas. Este sensor es el que se va a utilizar en la pasarela. El inconveniente principal que tiene es que pesa demasiado y no se puede instalar en la ménsula ya que nos varía el modelo de la misma.

Dicho lo anterior se va dividir este apartado en dos partes, uno para el sensor tipo MEMS marca POLOLU modelo MMA7341L [8] y el otro para el sensor de la marca MEMSIC modelo CXLO4GP1 [9].

### 2.3.2. ACELEROMETRO POLOLU 3 ejes MMA7341L $\pm 3g$



Figura 2.11. Logotipo de la marca POLOLU

Como se ha mencionado anteriormente este acelerómetro es el que se va a acoplar a la ménsula para llevar a cabo las diferentes pruebas sobre la misma. Se ha escogido este sensor dado a su alta fiabilidad en la medición y su semejanza con el acelerómetro final que se va a utilizar en el puente.

Es un acelerómetro tipo MEMS de la marca POLOLU (Logotipo en la Figura 2.11) que mide tres ejes (X, Y, Z) y será colocado en el extremo de la ménsula. Se alimenta entre 2,2-3,6 V desde una fuente de alimentación externa siendo esta su VDD. Sus salidas son analógicas, tiene la capacidad de medir niveles de g bajos y permite seleccionar su sensibilidad, que puede ser entre  $\pm 3g$  (440 mV/g) o  $\pm 11g$  (118 mV/g). En este caso se va a configurar una sensibilidad de  $\pm 3g$  (440 mV/g) que es la más acorde a nuestro proyecto. Unas de sus características principales es que el acelerómetro dispone de un sistema de SLEEP, es decir que cuando no se está utilizando se puede configurar para que el consumo sea menor y así poder ahorrar energía. También dispone de una salida digital que sirve para detectar si el sensor está en caída libre.

A continuación se describen ciertas características del acelerómetro en la Figura 2.12, para más adelante comentar la conexión de los pines de salida y de entrada. [8]

- 3mm x 5mm x 1,0mm
- Consumo de corriente: 400  $\mu A$
- Modo SLEEP: 3  $\mu A$
- Voltaje de trabajo: 2,2-3,6 V
- Sensibilidad ajustable
- Rápido tiempo de encendido: 0,5 ms
- Auto test para detectar diagnosis de caída libre
- Peso: 0,35 g
- Señal de salida con filtro pasas bajas
- Robusto y económico



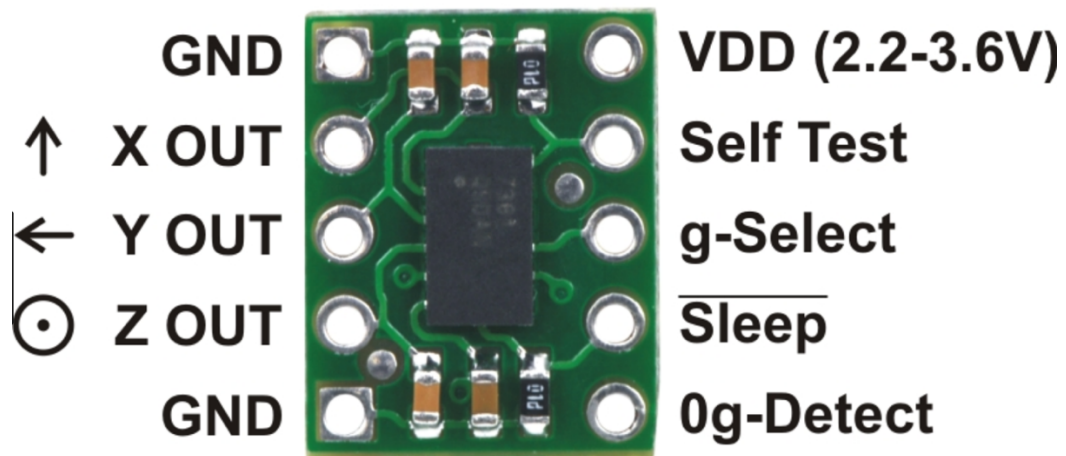


Figura 2.12. Foto-esquema del acelerómetro POLOLU MMA7341L

Se puede observar que los pines de VDD y GND son los de entrada de tensión. Por lo tanto los 0g vas a estar en  $VDD/2$ .

Los pines de Self test, g-select, SLEEP y 0g-Detect van a estar desconectados para realizar las pruebas, ya que no son de utilidad en este proyecto.

Por último, de los pines de salida de los ejes solo se va a utilizar el eje Z ya que se mide la aceleración en esa dirección. El rango de medición es de 0 a VDD, quedando los 0g en  $VDD/2$ . Los valores negativos corresponden a medidas por debajo del equilibrio y en cambio los valores positivos corresponden a medidas superiores al equilibrio.

### 2.3.3. ACELEROMETRO MEMSIC 1 EJE CXL04GP1 $\pm 4g$



Figura 2.13. Logotipo de la marca MEMSIC

Este acelerómetro tipo MEMS se va a colocar en la pasarela. Es mucho más robusto y fiable que el acelerómetro de la marca POLOLU. También soporta se mejor manera la condiciones climatológicas.

Es un acelerómetro tipo MEMS de la marca MEMSIC (Logotipo en la Figura 2.13) que mide un eje de la ménsula. Se alimenta entre 4,9-5,5 V desde una fuente de alimentación externa siendo esta su VDD. Estas son sus

principales diferencias con el acelerómetro de la marca POLOLU que se tendrá en cuenta a la hora de realizar el programa en el PLC. Sus salidas analógicas de alto nivel tienen la capacidad de medir unos g bajos y tiene una sensibilidad única de  $\pm 4g$  (500 mV/g). Una de sus características principales es su alta fiabilidad en la medición y su robustez física. Su forma física se muestra en la Figura 2.14.

A continuación se describen características del acelerómetro, para más adelante comentar la conexión de los pines de entrada y de salida en la Figura 2.15. [9]

- 19,8mm x 44,5mm x 27,2mm
- Consumo de corriente: 1 mA
- Voltaje de trabajo: 4,9-5,5 V
- Alto rango de temperatura de trabajo
- Peso: 46 g
- Excelente respuesta en frecuencia
- Perfecto para trabajar a la intemperie
- Robusto y económico



Figura 2.14. Acelerómetro MEMSIC CLX4GP1

Pin	Color	Function
1	Red	Power In
2	Black	Ground
3	White	X-axis Out
4	Yellow	Y-axis Out
5	Green	Z-axis Out

Figura 2.15. Código de colores del cable del MEMSIC CLX4GP1

En este caso el acelerómetro tiene 3 pines. Uno correspondiente a VDD, otro a GND y el último mide en el eje X. Los colores vienen representados en la Figura 2.15.

En este caso los 0g vienen calibrados de fábrica, que se corresponden a 2,382 V según el papel que nos aporta el fabricante.

## **2.4. SHAKER**

### **2.4.1. INTRODUCCION**

En este apartado se describe al actuador que se va a utilizar para controlar la pasarela. Para este actuador se va a usar el modelo hallado en un trabajo previo [3] y que tendremos en cuenta a la base de sintonizar en controlador PID que se pretende emplear.

El actuador que se va a utilizar para controlar el sistema es un generador de fuerza llamado shaker. Dada a su disponibilidad y su alta fiabilidad, el actuador seleccionado es de la marca alemana APS Dynamics.

Es sistema de divide en dos componentes que se muestran a continuación:

- Excitador de largo recorrido con rodamientos lineales a bolas: APS 400 electro Seis. [10]
- Amplificador modelo 144. [10]

### **2.4.2. APS 400 ELECTRO-SEIS SHAKER**

#### **2.4.2.1. INTRODUCCIÓN**

El shaker APS 400 (Figura 2.16) es un actuador optimizado para trabajar en estructuras con su frecuencia natural de resonancia. Independientemente de la frecuencia y de la carga, la salida de este generador electrodinámico de fuerza depende proporcionalmente del valor instantáneo de la corriente aplicada. Permite configurar la salida para que sea al azar o transitoria así como poder seleccionar las formas de las ondas de la carga.

La armadura ha sido diseñada para soportar amplios rangos de fuerza. El amplio rango de su carrera de inducido permite antinodos en grandes estructuras en bajas frecuencias.

Es un dispositivo autoventilado, con una construcción que proporciona seguridad y su diseño eficiente permite que sea un dispositivo con muy poco mantenimiento. Con imanes permanentes y una bobina configurada de

manera específica en la armadura, aporta un campo constante que en todo el rango de su carrera para asegurar la fuerza lineal. La varilla de empuje sencillo APS 8610 – Modal Stinger proporciona la unión de la armadura al punto de accionamiento.

Un amplificador de la misma marca es necesario para que su funcionamiento sea el correcto. En este caso se va a usar el amplificador APS modelo 144.

A continuación se hará una breve mención a los modos de funcionamiento que aporta el actuador shaker. También se mencionan algunas de sus características en la Tabla 2.1.



*Figura 2.16. Shaker APS 400*

### 2.4.2.2. MODOS DE FUNCIONAMIENTO

#### **Modo armadura libre**

En este modo, la armadura provoca una reacción a la masa que es distribuida a la estructura por medio del cuerpo del shaker. Para operaciones en las que se trabaja con el límite inferior de la frecuencia se recomienda añadir una masa a mayores en la armadura.

El APS 400 y el APS 0412 se puede utilizar en este modo tanto en vertical como en horizontal con una fuerza nominal de al menos 3 Hz. Se añaden unos soportes para brindar facilidad a la hora de fijación del shaker.

### **Modo cuerpo fijo**

En este modo se proporciona una unión rígida entre la masa y el cuerpo. Esto permite que esté disponible para el movimiento una velocidad relativa completa y una capacidad de impacto. La fuerza nominal máxima que se puede entregar es hasta 0,01 Hz y 70% máximo a 0 Hz. La posición de trabajo viene representado en la Figura 2.17.



*Figura 2.17. Shaker en modo cuerpo fijo*

### **Modo del cuerpo libre**

En este modo el cuerpo proporciona la masa de reacción. De esta manera la carga y el movimiento del cuerpo se alojan dentro de la velocidad relativa total y capacidad de impacto. El shaker puede ser colocado a nivel del suelo por medio de líneas de suspensión unido al cuerpo, esto es gracias a que su eje transversal es de alta rigidez. Esta cualidad permite un cómodo montaje a la hora de hacer una fuerza paralela en la superficie. Esto es aplicable en pisos, techos, plataformas, gabinetes, puentes y tanques. La posición de trabajo viene representado en la Figura 2.18.



*Figura 2.18. Shaker en modo del cuerpo libre*

### **Modo excitador de tabla**

Son unos kits de mesa auxiliares que permiten al shaker proporcionar una larga carrera de excitación a los componentes o estructuras de modelos montados en la mesa. La posición de trabajo viene representado en la Figura 2.19.



*Figura 2.19. Shaker en modo excitador de tabla*

**2.4.2.3. CARACTERÍSTICAS GENERALES**

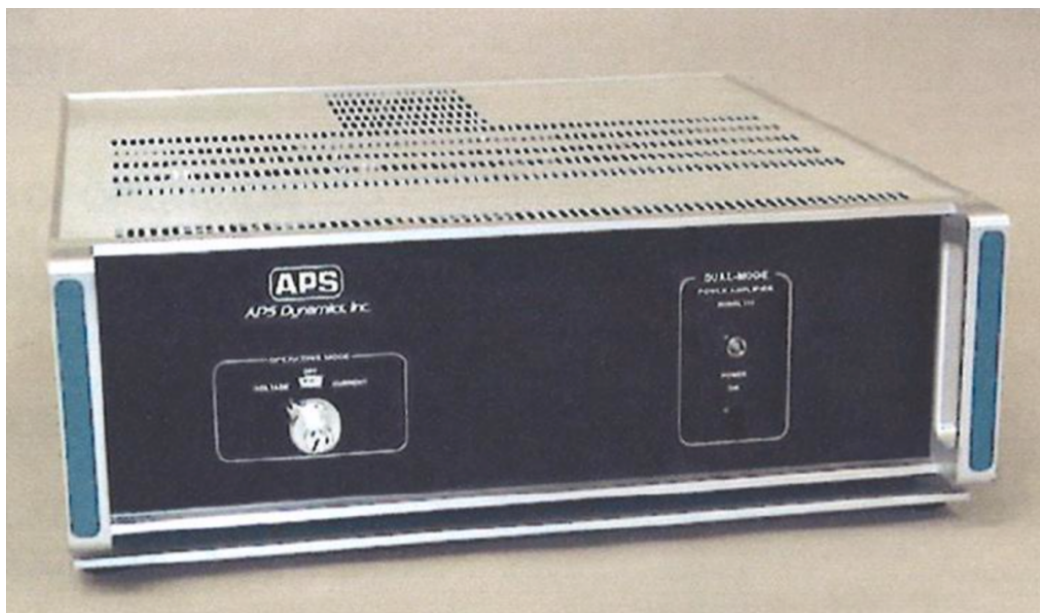
<u>Shaker</u>	<u>APS 400</u>
Fuerza generada (Sine peak)	445 N (100 lbf)
Velocidad (Sine peak)	1,000 mm/s (39 inch/s)
Carrera (Peak – Peak)	158 mm (6,25 inch)
Rango de frecuencias	DC ... 200 Hz
Operación	Horizontal o Vertical
Peso de la armadura	2,8 Kg (6,2 lb)
Impedancia	1,6 Ohm
Peso total del Shaker	73,0 Kg (161 lb)
Max. Carga radial en el punto de unión	9,0 Kg (20 lb)
Peso del producto	86,0 Kg (190 lb)
Dimensiones generales L x W x H	526 x 314 x 178 mm
Temperatura de funcionamiento	5 ... 40 °C

*Tabla 2.1. Características generales Shaker APS 400.*

**2.4.3. AMPLIFICADOR APS MODELO 144**

**2.4.3.1. INTRODUCCIÓN**

El amplificador APS modelo 144 (Figura 2.20) convierte la señal analógica que nos proporciona nuestro PLC en una señal adecuada y adaptada para nuestro shaker. Se mencionan algunas de sus características en al Tabla 2.2.



*Figura 2.20. Amplificador APS modelo 144*

2.4.3.2. CARACTERÍSTICAS GENERALES

<u>Salida Shaker</u>	<u>500V-A rms</u>
Intensidad de salida máxima	15,0 rms
Intensidad de pico	21,2 A de pico
Rango de frecuencias	0 – 2000 Hz
Máxima señal de entrada	2 V de pico
Impedancia de entrada	100 K Ohm
Ruido a salida máxima	-80 dB
Intensidad de salida del monitor	62,5 mV/A
Alimentación	230 V
Peso	35 Kg
Tamaño (H x W x D)	160x432x518 mm
Temperatura de funcionamiento	5 a 40 °C
Humedad de funcionamiento	80 %

*Tabla 2.2. Características generales amplificador APS 144*



## CAPITULO 3. SOFTWARE UTILIZADO

### 3.1. INTRODUCCIÓN

Para poder ejecutar este proyecto se ha utilizado una serie de softwares específicos. Con ellos se han hecho las tareas de programación de los dispositivos, cálculos de parámetros y simulación de sistemas y controladores.

A continuación se hablará de los distintos softwares que se han utilizado para cada caso. Los apartados en los cuales se hará hincapié son los relacionados con la programación del PLC y el HMI para más adelante hacer una pequeña mención a los softwares que se han utilizado para calcular parámetros y hacer la simulación de sistemas y controladores.

Dichos programas son:

- Totally Integrated Automation Portal (TiaPortal V14)
- Matlab y Simulink
- Excel

### 3.2. TOTALLY INTEGRATED AUTOMATION PORTAL (TIA PORTAL V14)

#### 3.2.1. INTRODUCCIÓN

Para realizar la programación en los dispositivos de la marca Siemens, se necesita un software especial llamado TiaPortal [11]. En este caso se ha utilizado la versión 14 (V14) ya que es la que dispone el centro. Este software de programación es un software que permite aumentar la productividad y eficiencia de la automatización en todos sus procesos. Permite el llevar a cabo la etapa de diseño, puesta en marcha y mantenimiento del proceso.

Su diseño innovador y eficiente permite ver el proyecto de programación del PLC y el proyecto de programación del HMI en un mismo proyecto. Todo se guarda en un proyecto común. Es un avance que ha propuesto Siemens a la hora de programación, unificando la parte del PLC (Step 7) y la parte de visualización (WinCC) en un mismo sistema con una base de datos en común.

Estas mejoras hacen una fácil interpretación de la programación mostrando una vez más a Siemens como uno de los líderes en el sector de la automatización industrial. En la Figura 3.1 se ve gráficamente su composición.

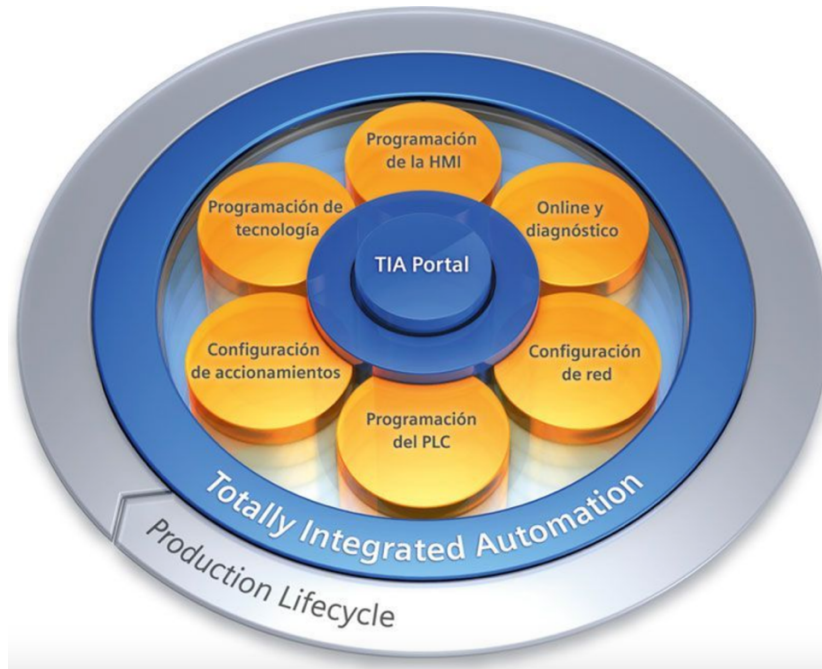


Figura 3.1. Estructura TiaPortal

### 3.2.2. INTERFAZ TIA PORTAL

Una vez instalado y configurado TiaPortal se abre y nos posiciona con la página principal del programa. Una vez allí se selecciona el proyecto con el que se va a trabajar y a continuación se selecciona “vista del proyecto” en la parte inferior izquierda para que se muestre la vista general del proyecto. En esta página es donde se va a configurar todo lo relacionado con el proyecto, es decir la programación del PLC, la programación del HMI y la comunicación entre ambos. La pantalla de vista de proyecto esta representada en la Figura 3.2

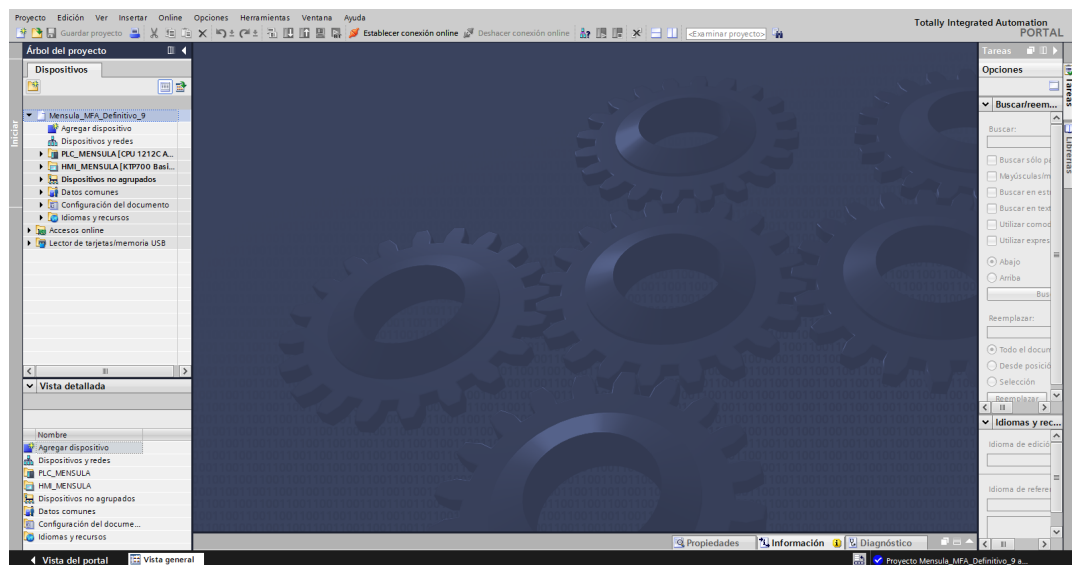


Figura 3.2. Vista de proyecto

A la izquierda de la pantalla se puede ver el árbol del proyecto, el cual nos muestra los dispositivos que tenemos asociados. En este proyecto se verá el PLC llamado “PLC\_MENSULA” y el HMI llamado “HMI\_MENSULA”. En los siguientes apartados se mencionaran las pestañas utilizadas en este proyecto con sus características, la cuales son:

- Dispositivos y redes
- PLC\_MENSULA
- HMI\_MENSULA

### 3.2.3. DISPOSITIVO Y REDES

Esta pestaña es la que permite la comunicación y configuración de los dispositivos que tenemos en el proyecto. Para poder hacer una instalación completa el editor ofrece tres vistas:

#### 3.2.3.1. VISTA DE REDES

Esta pantalla nos permite configurar de una forma gráfica y muy clara la comunicación que hay en nuestro entorno de trabajo. Se pueden observar las distintas estaciones y su conexión. Están detalladas las distintas redes y la configuración de las comunicaciones como se puede ver en la Figura 3.3.

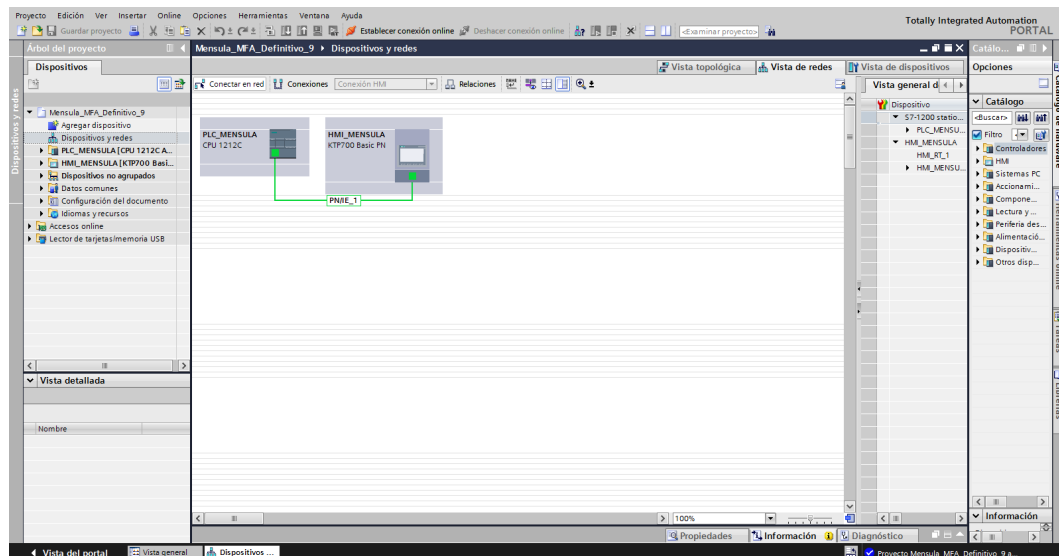


Figura 3.3. Vista de redes

#### 3.2.3.2. VISTA TOPOLÓGICA

Esta pantalla nos muestra las distintas periféricas descentralizadas que hay en el proyecto, los distintos controladores y como están conectados. En la Figura 3.4 viene representada la pantalla de vista topológica.

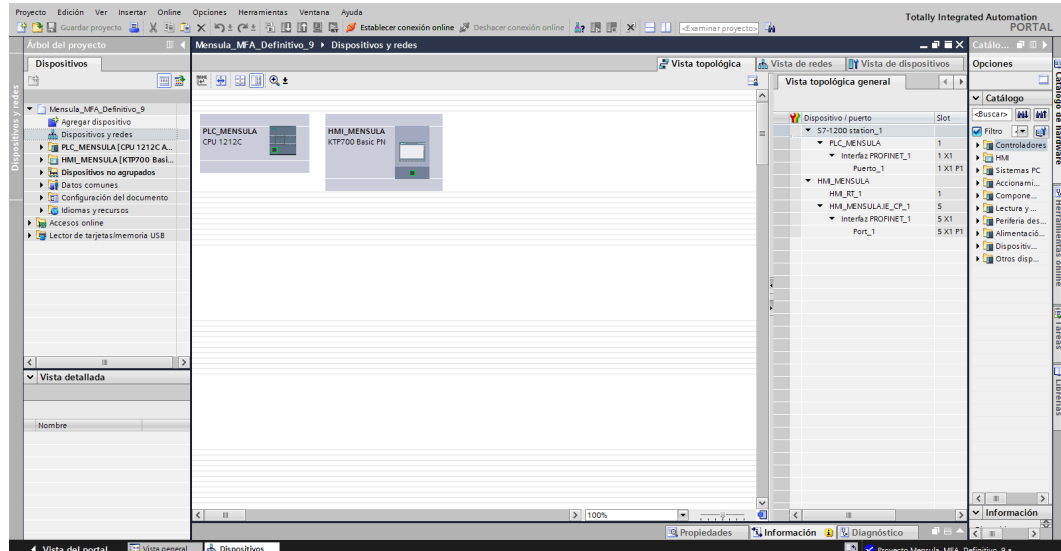


Figura 3.4. Vista topológica

### 3.2.3.3. VISTA DE DISPOSITIVOS

En esta pantalla se visualizan todas las características del dispositivo seleccionado. Entradas y salidas, tipo de conexión, tipo de configuración hardware y software, etc. En la Figura 3.5 viene representada la pantalla de vista de dispositivos.

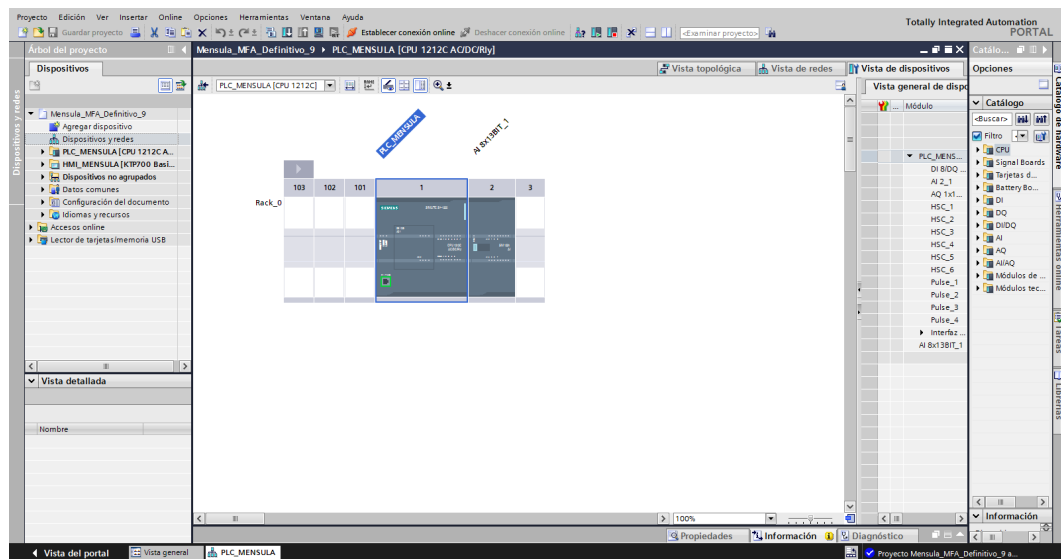


Figura 3.5. Vista de dispositivos

### 3.2.4. PLC\_MENSULA

En esta rama del proyecto se lleva a cabo la programación del PLC que en este caso se le ha llamado "PLC\_MENSULA". Es la rama más importante del proyecto, ya que se configura el hardware y software del PLC. Hay muchos aspectos que comentar referido en este apartado, desde la forma de

programación que nos aporta Siemens hasta la forma de visualización y carga en el PLC.

Primero se comentarán las principales características de la programación de Siemens, es decir cómo está estructurada su programación y sus distintos bloques de programación. Luego se comentaran las opciones de carga y simulación en el PLC. Como se hace para cargar el programa y las formas que hay de verificar su funcionamiento de forma visual. Por último se habla un poco de las seguridades que tiene dicha programación.

En la Figura 3.6 viene representado el esquema de proyecto en TiaPortal que se ha usado en este trabajo.

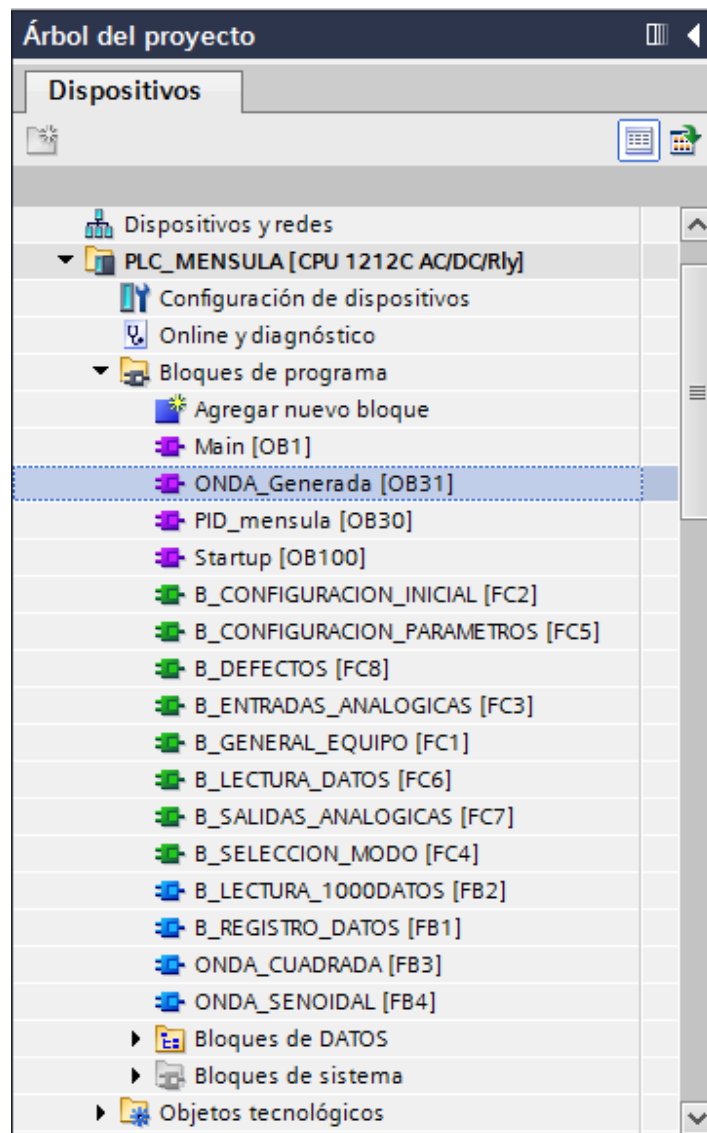


Figura 3.6. Estructura PLC\_MENSULA

### 3.2.4.1. ESTRUCTURA DE PROGRAMACION SIEMENS

La estructura principal en la programación de Siemens consiste principalmente en cuatro bloques de programación (Figura 3.7).



Figura 3.7. Estructura de programación

Como se muestra en la Figura 3.7, el programa se ejecuta siempre en los bloques de organización (OB). El programa principal se ejecuta en el bloque OB1, en el cual se hacen distintas llamadas a otros bloques de función (FB) o a funciones sin bloques de datos (FC) en las cuales se realizan las distintas operaciones. A continuación se mencionan las distintas características de cada bloque:

#### OB (Bloques de organización)

Los bloques de organización son llamados de forma cíclica por el sistema operativo. Son la comunicación entre el usuario y el sistema operativo. Estos bloques OBs hacen distintas llamadas a los bloques de función gestionando de esta manera que bloques se deben ejecutar y en que condición. En el OB1 se ejecuta el programa principal. Existen distintos bloques de organización en los cuales se realizan distintas funciones en el PLC, como puede ser el bloque de organización de arranque en caliente (OB100) o el bloque de ejecución cíclica (OB30).

#### FB (Bloques de función)

Estos bloques de función llevan asociados un área de memoria para cada llamada. Por lo tanto se le asigna un bloque de datos de instancia (FB). A estos datos se accede solo a través de la FB. Si se llama varias veces a un

FB se le asignan varias áreas de memoria. Dentro de los FB se pueden llamar FB y FC.

### **FC (Función)**

En estos bloques una vez ejecutada la función los datos se pierden, esto se debe a que no llevan ningún área de memoria asignada.

### **DB (Bloque de datos)**

Los bloques de datos son los espacios de memoria que sirven para almacenar las variables asignadas a nuestro proyecto. Los DB globales pueden ser leídos o escritos tanto por OB, FB o FC, en cambio los DB de instancia solo pueden ser leídos o escritos por su correspondiente FB.

### **3.2.4.2. LENGUAJES DE PROGRAMACIÓN**

TiaPortal ofrece una forma intuitiva y cómoda de actual a la hora de llevar a cabo la programación. Una de sus ventajas es que permite programar en los 5 distintos lenguajes de programación. Permitiendo de esta manera un lenguaje de nivel más sencillo como es el lenguaje de DIAGRAMAS DE CONTACTOS (Ladder Diagram – LD) y el lenguaje de BLOQUES DE DIAGRAMAS DE FUNCIONES (Function Block Diagram – FBD). Estos lenguajes son llamados KOP y FUP por Siemens. Un lenguaje de más alto nivel como es el de TEXTO ESTRUCTURADO (Structured Text – ST) , llamado SCL por Siemens, o un lenguaje de bajo nivel como LISTA DE INSTRUCCIONES (Instruction List – IL), llamado AWL por Siemens. También en algunos dispositivos se puede utilizar el lenguaje de BLOQUES DE FUNCION SECUENCIALES (Sequential Function Chart – SFC), llamado GRAPH por Siemens.

### **KOP y FUP (Diagrama de contactos y Bloque de diagramas de funciones)**

Gracias a estos lenguajes gráficos la rapidez y comprensión de los programas es mucho mayor. Estos lenguajes permiten una gran variedad de funciones y combinaciones provocando que hoy en día un gran porcentaje de los programas creados sean en este lenguaje. También ayuda mucho al mantenimiento o a una posible modificación del programa ya que su interfaz gráfica es sencilla y de fácil comprensión.

### **SCL y AWL (Texto estructurado y Lista de instrucciones)**

El lenguaje AWL era utilizado anteriormente en STEP7 que es una versión más antigua de TiaPortal. Actualmente TiaPortal permite la programación en SCL que es una mezcla entre lenguaje C y PASCAL. AWL es un lenguaje de bajo nivel parecido al ensamblador y SCL es un lenguaje de

alto nivel que permiten realizar cualquier tipo de acción (muchas acciones no se pueden llevar a cabo con KOP o FUP) optimizando el tiempo de ejecución y el espacio de almacenamiento.

### GRAPH (Bloques de función secuenciales)

Lenguaje de programación destinado a describir sucesos secuenciales con sucesiones de etapas alternativas o paralelas. Es destinado a facilitar la programación permitiendo programar de una forma sencilla y grafica muy parecida al GRAFCET. No todos los dispositivos permiten esta programación. Los dispositivos S7-1200 (como el que se usa en este TFG) no soportan este tipo de lenguaje de programación, en cambio los dispositivos S7-1500 si que lo soportan.

#### 3.2.4.3. OPCIONES DE CARGA Y SIMULACIÓN

Una de las principales características de TiaPortal y que permite que sea un programa fácil e intuitivo es su interfaz gráfica. El programa permite una visualización offline/online del proyecto, permitiendo comparar los bloques que hay en el PLC y los que se tienen en el proyecto. Una vez introducido el programa en el PLC, la opción de vista online permite ver la secuencia de trabajo que se está realizando en tiempo real. Esta forma sencilla y con colores permite una fácil interpretación de lo que está sucediendo y de realizar mejoras de forma inmediata. Todo ello se hace a través del árbol de proyecto con mucha facilidad y agilidad en el proceso. En la Figura 3.8 se puede ver la vista online.

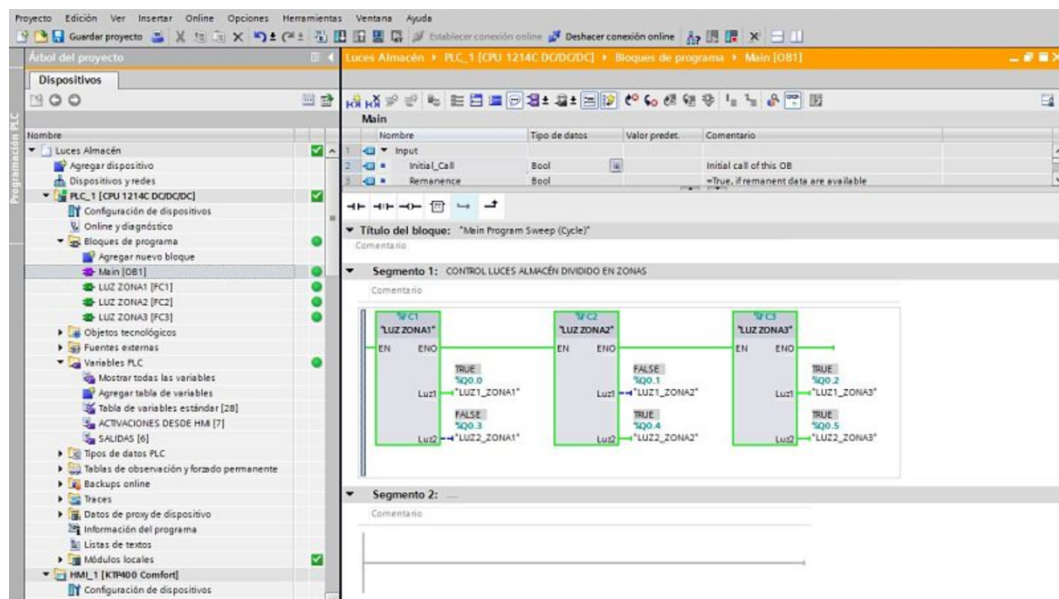


Figura 3.8. Vista ONLINE



### 3.2.4.4. SEGURIDAD

Por ultimo no se puede dejar sin mencionar la seguridad que ofrece el programa. La principal característica en la protección Know-how que la lectura, escritura y modificación del programa o solo de los bloques que deseamos aplicar esta función. También incluye un sistema de usuarios que pueden acceder al programa otorgando distintos permisos a los usuarios.

Hablando de seguridad hay que mencionar su fiabilidad a la hora de llevar a cabo la ejecución del programa y los distintos métodos de alarmas y avisos cuando hay alguna ejecución incoherente en el programa que pueda llevar a un error. La Figura 3.9 muestra una gráfica de los niveles de seguridad que ofrece TiaPortal.

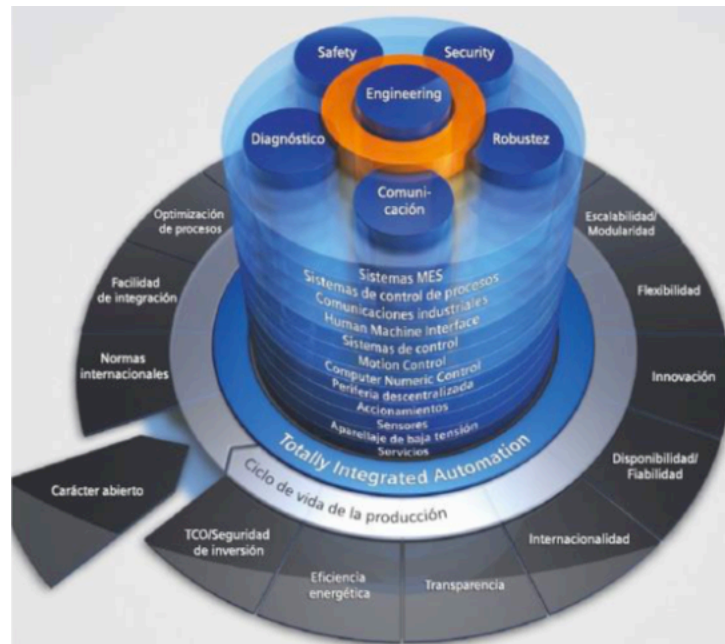


Figura 3.9. Estructura de seguridad

### 3.2.5. HMI\_MENSULA

Esta parte del proyecto es la que permite configurar y programar la pantalla HMI. En este caso la se va a programar la pantalla KTP400 Basic Panel, como se ha mencionado en el capítulo anterior que se han descrito los componentes de trabajo. Su nombre en el proyecto es "HMI\_MENSULA".

TiaPortal permite programar todo lo relacionado con las pantallas, desde las imágenes que se van a mostrar hasta los posibles scripts y alarmas y avisos que tiene nuestro programa. La comunicación con el PLC se hace por TCP/IP por medio de un switch. De esta forma la pantalla tiene su propio IP y su propia configuración. La interfaz de programación es muy fácil e intuitiva, colocando en la parte izquierda de la pantalla (árbol del proyecto) las distintas

acciones que se desean hacer (añadir imagen, script, formulario, etc.) y en la parte derecha las distintas acciones que se pueden hacer en las respectivas opciones, por ejemplo añadir pulsadores, visualizadores, etc. Como se hizo en el apartado anterior, primero se comentará una breve descripción de la estructura de programación, luego se mencionará la forma de carga y simulación y al final se comentará un poco la seguridad que ofrece TiaPortal.

### 3.2.5.1. ESTRUCTURA DE PROGRAMACIÓN

Las pantallas HMI reciben y asocian sus propias variables con las del PLC que trabajan. De esta forma luego en las imágenes que estén programadas, se asocia a cada objeto (pulsador, visualizador, etc.) dicha variable del PLC. En cada objeto se modifica todo lo relacionado con su apariencia y también su comportamiento asociado con una variable asignada. De esta forma se podrá decidir el comportamiento del objeto dependiendo del estado de la variable. En la Figura 3.10 se puede observar la pantalla principal que nos ofrece TiaPortal para programar el HMI.

También se pueden crear formulario, configurar las alarmas y los avisos y distintas opciones que son independientes del PLC. Mejor dicho, lo único que está relacionado con el PLC son las variables, lo demás depende de la programación y el comportamiento que se le haya dado al HMI.

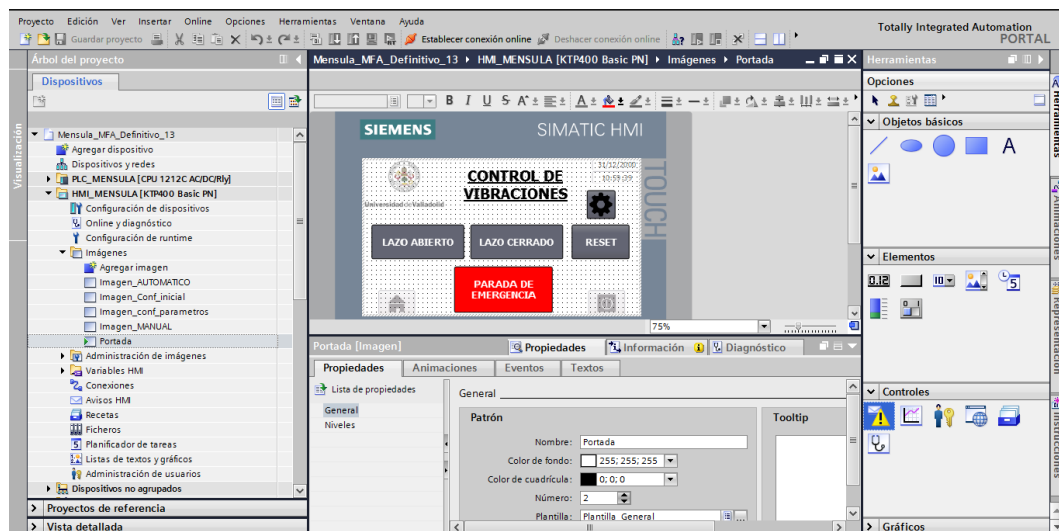


Figura 3.10. Estructura del HMI

### 3.2.5.2. OPCIONES DE CARGA Y SIMULACION

El método de carga en HMI es el mismo que en PLC, se selecciona en el árbol del proyecto el componente HMI y se da al botón de carga en el dispositivo. Al estar todo configurado el programa se cargara en el HMI reiniciando el mismo. Otra opción que ofrece TiaPortal es la de simulación de la pantalla en el ordenador, facilitando de esta manera no tener que tener el

## SOFTWARE UTILIZADO

dispositivo físicamente a la hora de trabajar. En la Figura 3.11 Se puede observar la pestaña de carga del programa en el HMI y en la Figura 3.12 se muestra la opción de simular la pantalla.

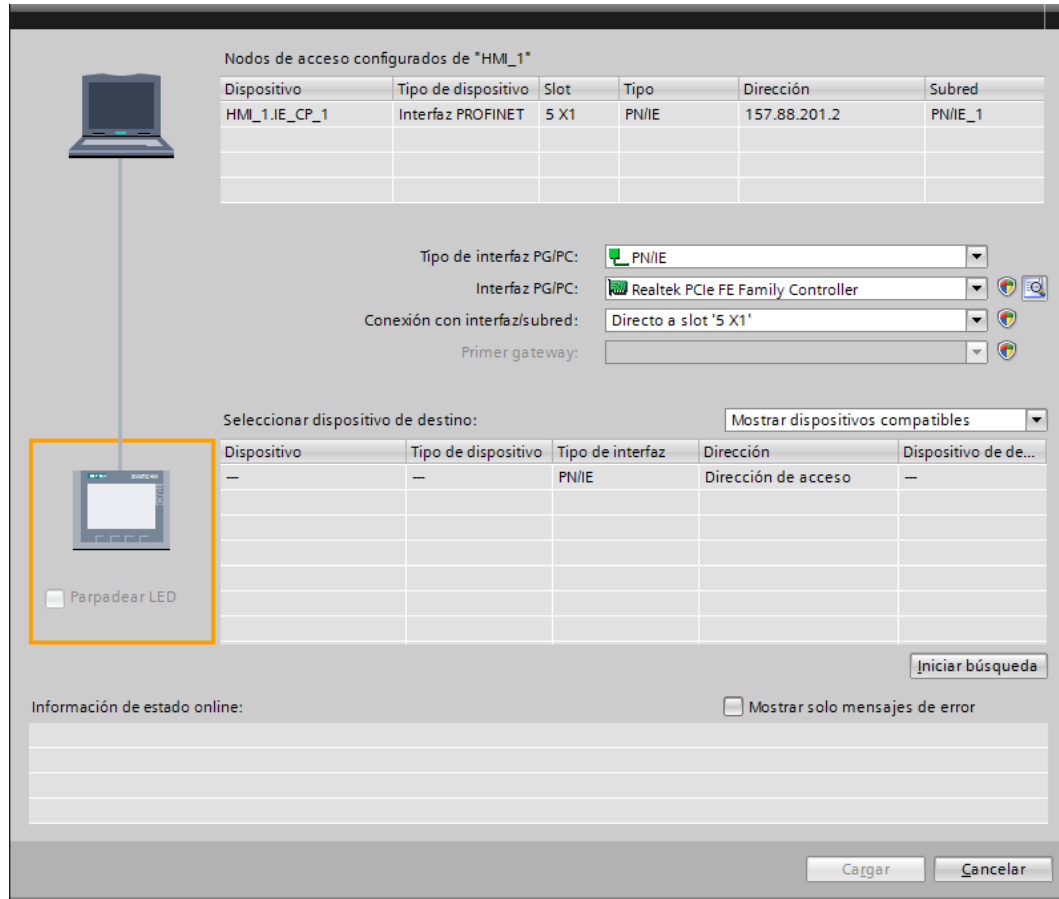


Figura 3.11. Opciones de carga HMI

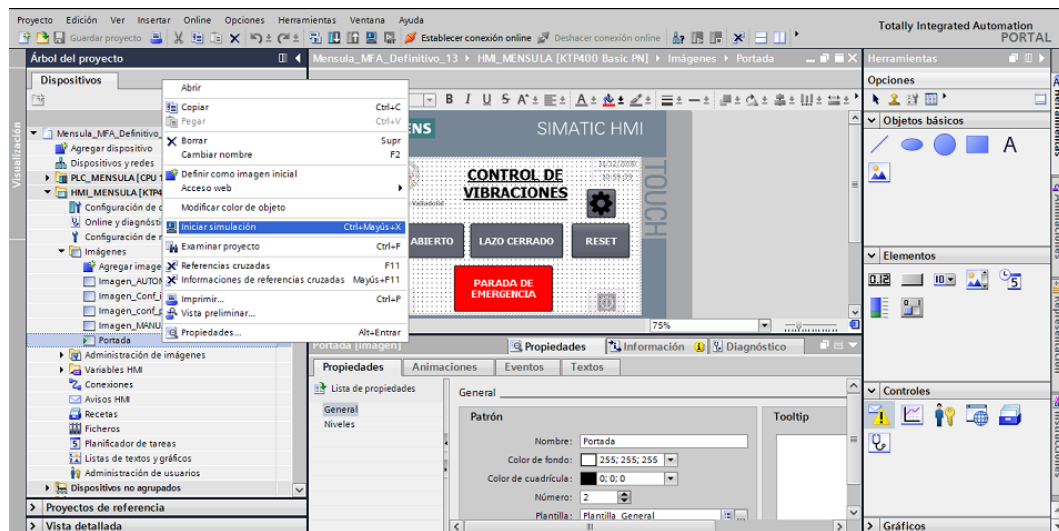


Figura 3.12. Simulación HMI

### 3.2.5.3. SEGURIDAD

Como todo relacionado con TiaPortal, la seguridad es uno de los puntos fuertes del programa. En el caso de los HMI, el programa permite hacer una configuración de usuarios para darles distintos permisos y también permite programar los distintos avisos y alarmas para la visualización y control del proceso. Permite la protección de know-how y la seguridad de que si hay alguna incoherencia el programa no lo ejecuta y salta el aviso correspondiente. En la Figura 3.13 se observa una de las funciones de seguridad.

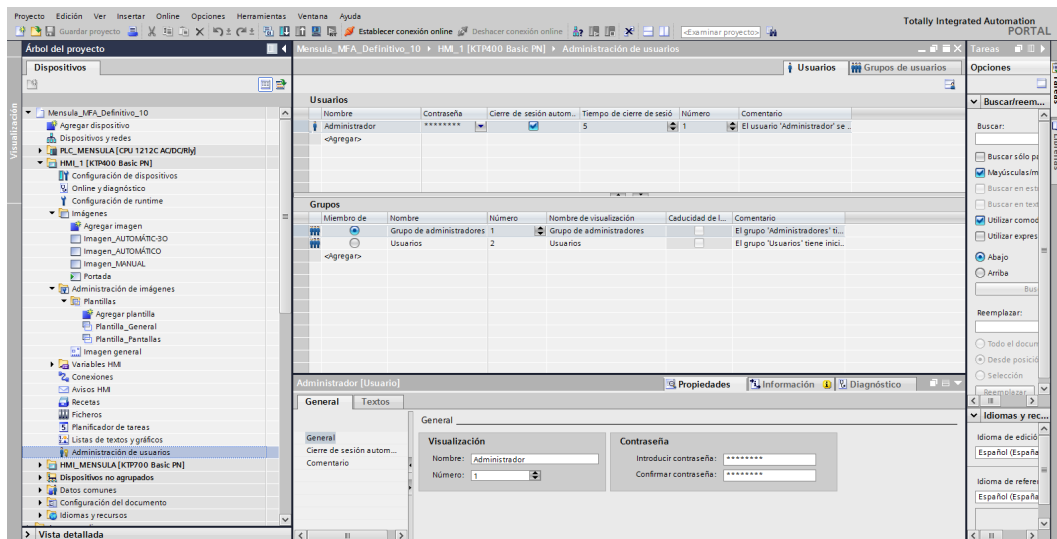


Figura 3.13. Estructura de seguridad HMI

### 3.3. MATLAB Y SIMULINK

Dada la potencia y fiabilidad que aporta Matlab y Simulink © [12](Logotipo en la Figura 3.14), se han utilizado estos programas para realizar primero la simulación de los sistemas hallados y más tarde el cálculo de los distintos controladores para nuestros sistemas.



Figura 3.14. Logotipo de Matlab y Simulink

### 3.4. EXCEL

El software Microsoft Excel © [13] (Logotipo en la Figura 3.15) se ha utilizado en el proyecto para el cálculo de las diferentes tablas y cálculos matemáticos para facilitar los procedimientos.



*Figura 3.15. Logotipo de Excel*



## CAPITULO 4. DISEÑO DEL CONTROLADOR EN LA MENSULA

### 4.1. INTRODUCCIÓN Y DESCRIPCIÓN DE LA MÉNSULA

Una vez seleccionados los componentes con su respectivo software se va estudiar el lazo de control en la maqueta de la ménsula. Esta maqueta se encuentra en laboratorio y es de la marca Alecop correspondiente al modelo MF540 [1]. En la ménsula se va a validar el funcionamiento de los acelerómetros y del controlador mediante todo tipo de pruebas.

Un cambio que se la va a hacer a la maqueta es el de colocar el acelerómetro POLOLU MMA7341L para mejorar la precisión de medición de aceleración y también para utilizar como lector del sensor la entrada analógica del PLC que mide en un rango de (0...10) V. El sensor tiene un rango de (0...3,3) V.

La Figura 4.1 muestra una imagen de la ménsula la cual está compuesta por:

- Un LVDT (transformador diferencial de variación lineal) sensor de desplazamiento
- Un captador de velocidad inductivo
- Un captador de aceleración piezoeléctrico
- Cuatro galgas extensiométricas que funcionan como captadores de esfuerzos flexores

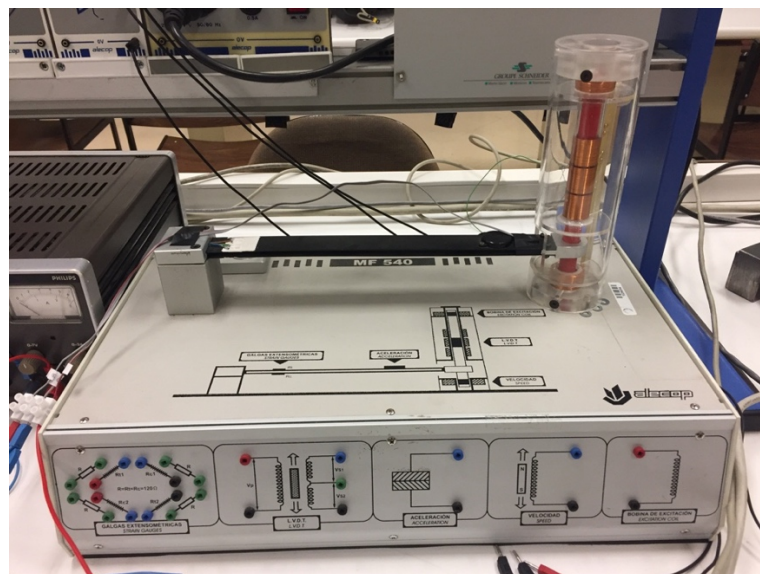


Figura 4.1. Ménsula con acelerómetro integrado

Como actuador, existe una bobina que es excitada por una señal sinusoidal de -10...10V. Esta señal será suministrada por la salida analógica del PLC. Esta bobina está compuesta por un devanado fijo y un imán. Al hacer pasar corriente por el devanado, el flujo magnético creado creará una fuerza sobre el imán en dirección vertical. Esto provoca un movimiento vibratorio en la varilla. A mayor intensidad, mayor será la fuerza de desplazamiento. También a mayor frecuencia, mayor será el movimiento oscilatorio hasta llegar hasta su frecuencia de resonancia.

Se puede observar en la Figura 4.1 que en el panel frontal están las distintas conexiones a los distintos captadores y también está la conexión a la bobina excitadora.

Esta maqueta además de contener los captadores y actuadores, trae consigo los componentes electrónicos para la conexión de cada uno de los captadores y actuadores. En la Figura 4.2 se pueden observar los distintos módulos. Estos módulos sirven para acondicionar la señal procedente de cada captador y acomodarla a un nivel de salida 0...10 Vcc. El offset también puede elegirse.

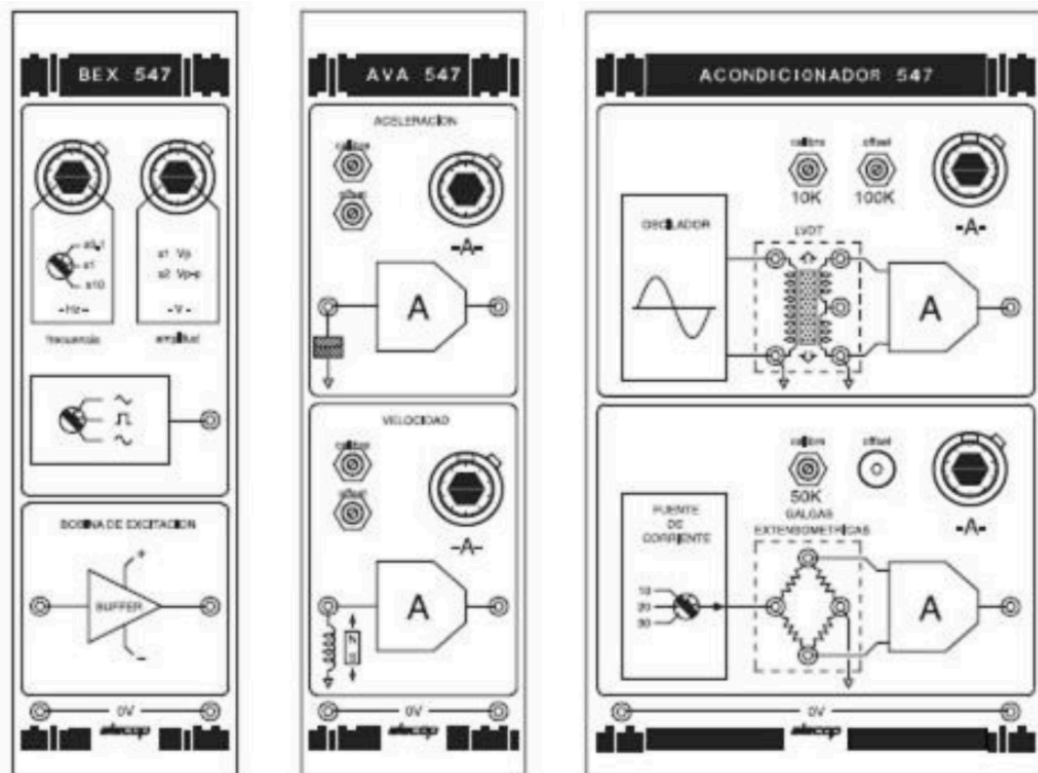


Figura 4.2. Módulos de conexión de los componentes



### **Driver de la bobina osciladora (BEX 547) (Actuador): (Figura 4.2 Izquierda)**

- Oscilador de amplitud variable entre 0 y 10 V. La señal es amplificada por un buffer de corriente que proporciona hasta 0,3 A
- Oscilador de frecuencia variable entre 0,1 y 100 Hz

### **Acondicionador de velocidad y aceleración (AVA 547): (Figura 4.2 Centro)**

- Acondicionadores para la señal de los sensores de velocidad y aceleración
- Preamplificador y filtro pasabanda interno que elimina los ruidos de red
- Amplificador y offset ajustables

### **Acondicionador de LVDT y galgas (Acondicionador 547): (Figura 4.2 Derecha)**

- Acondicionadores de señal de los captadores de desplazamiento (LVDT) y esfuerzos flexores (galgas extensiométricas)
- Mandos de ajuste de desplazamiento de cero, así como de calibre y ganancia para la LVDT
- Acondicionador de galgas con selector rotativo para fijar la corriente del puente de wheatstone
- Mandos de corrección de offset y ajuste de calibre y ganancia

## **4.2. MODELADO DE LA MÉNSULA**

### **4.2.1. INTRODUCCIÓN**

Una vez vistos los resultados y la bondad de los mismos, se pasará a modelar la pasarela en Matlab y Simulink para hallar el controlador correspondiente. Una vez hallado dicho controlador, se pasa a ejecutar de forma física en la pasarela. En este apartado se hará todo lo relacionado con la ménsula.

Identificaremos la ménsula mediante técnicas experimentales.

Esta fase del proyecto es importante ya que si no se haya un correcto modelo matemático el controlador que se calcule estará mal y en la ménsula real no hará efecto deseado.

### **4.2.2. IMPLEMENTACIÓN DEL ACELEROMETRO POLOLU EN LA MÉNSULA**

Lo primero que se va a hacer es colocar el acelerómetro POLOLU MMA7341L en la ménsula para poder medir la aceleración de una forma más precisa y fiable. Es imprescindible destacar que para el modelado de la ménsula no se va a usar el acelerómetro, sino que se va a usar el captador de

posición LVDT. El acelerómetro se instala en antes de hallar su modelo matemático debido que si se instala después, puede provocar cambios en el modelo de la ménsula. En la Figura 4.3 se puede apreciar el acelerómetro que se va a usar y en la Figura 4.4 se muestra la ménsula con el sensor ya incorporado.

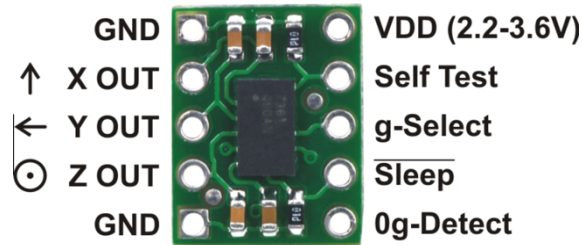


Figura 4.3. Acelerómetro POLOLU MMA7341L

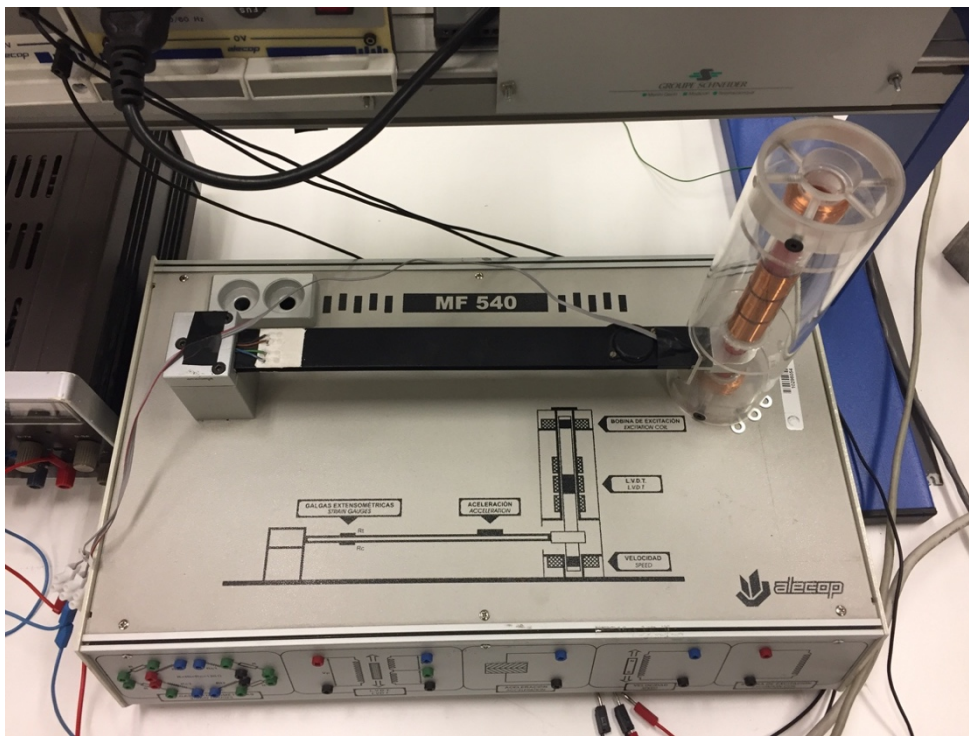


Figura 4.4. Ménsula con acelerómetro POLOLU

Una vez instalado y comprobado se procede a identificar la ménsula mediante las técnicas experimentales.

### 4.2.3. CALIBRACIÓN INICIAL DEL EQUIPO

Una vez colocado el acelerómetro con el que se va a trabajar, se hace una calibración de la ménsula siguiendo su manual de instrucciones.

#### 4.2.4. RESPUESTA EN FRECUENCIA

La respuesta en frecuencia consiste en aportar a la entrada del sistema una serie de señales sinusoidales de amplitud constante y frecuencia variable y ver cómo se comporta la salida en régimen estacionario. En la Figura 4.5 viene representado el gráfico de bloques que hace referencia a este estudio.

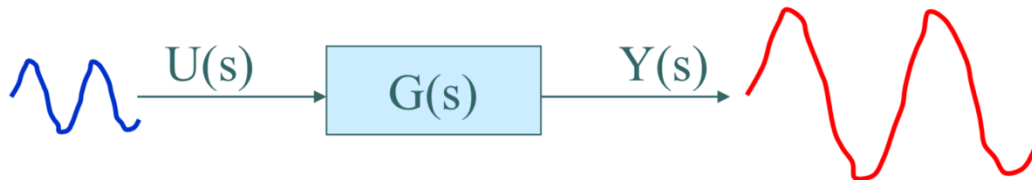


Figura 4.5. Diagrama de bloques de respuesta en frecuencia

Para hallar el modelo se va a medir la posición mientras se va a estar excitando a la ménsula con señales sinusoidales de amplitud  $\pm 1,5 V$  y se va a ir variando la frecuencia poco a poco hasta llegar a su frecuencia de resonancia. Se ha escogido la amplitud máxima en la cual la onda no está distorsionada. Como puede apreciar en las siguientes imágenes a partir del voltaje escogido la onda empieza a distorsionarse. La fuerza que mueve la ménsula se hace por medio de la bobina excitadora y la señal de salida que se mide es por medio del captador de posición LVDT.

A continuación se muestran unas imágenes (Figura 4.6 hasta Figura 4.17) del osciloscopio correspondientes a la señal de entrada (onda superior) y la señal de salida (onda inferior). Las frecuencias que se han estudiado en Hercios son: 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 7,5, 8, 9, 10, 100.

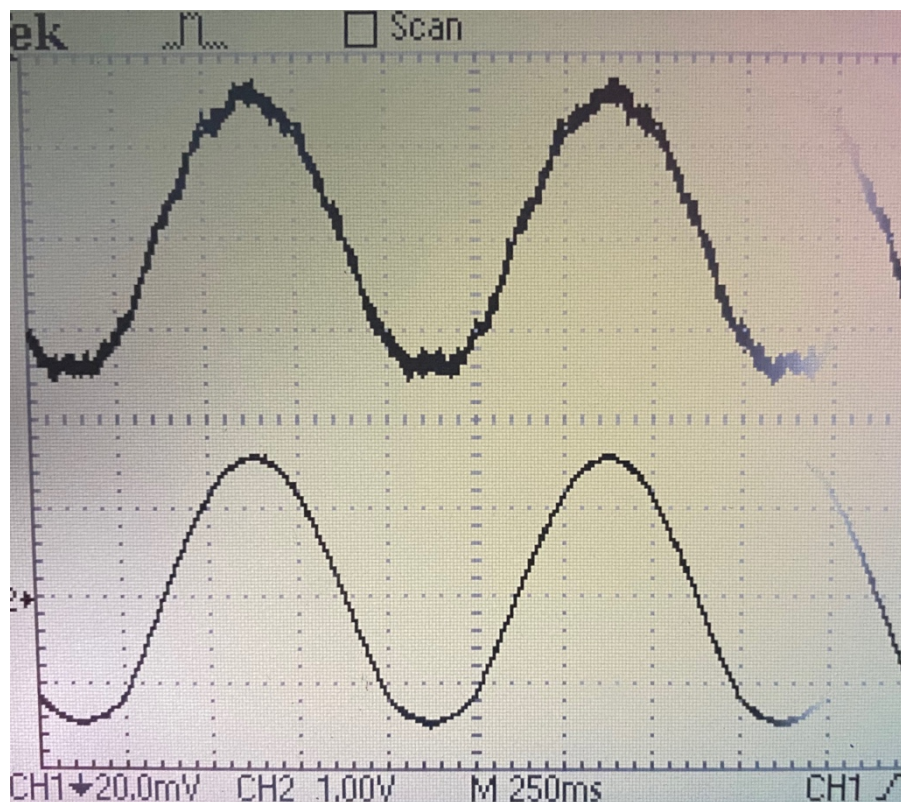


Figura 4.6. Respuesta en frecuencia para 1 Hz

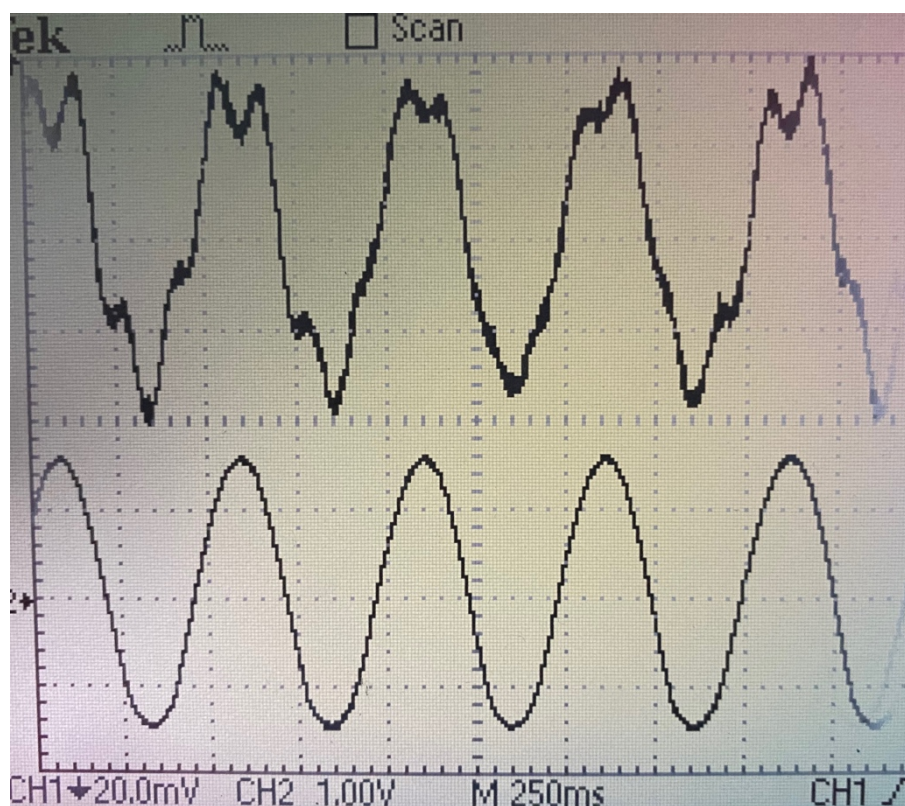


Figura 4.7. Respuesta en frecuencia para 2 Hz

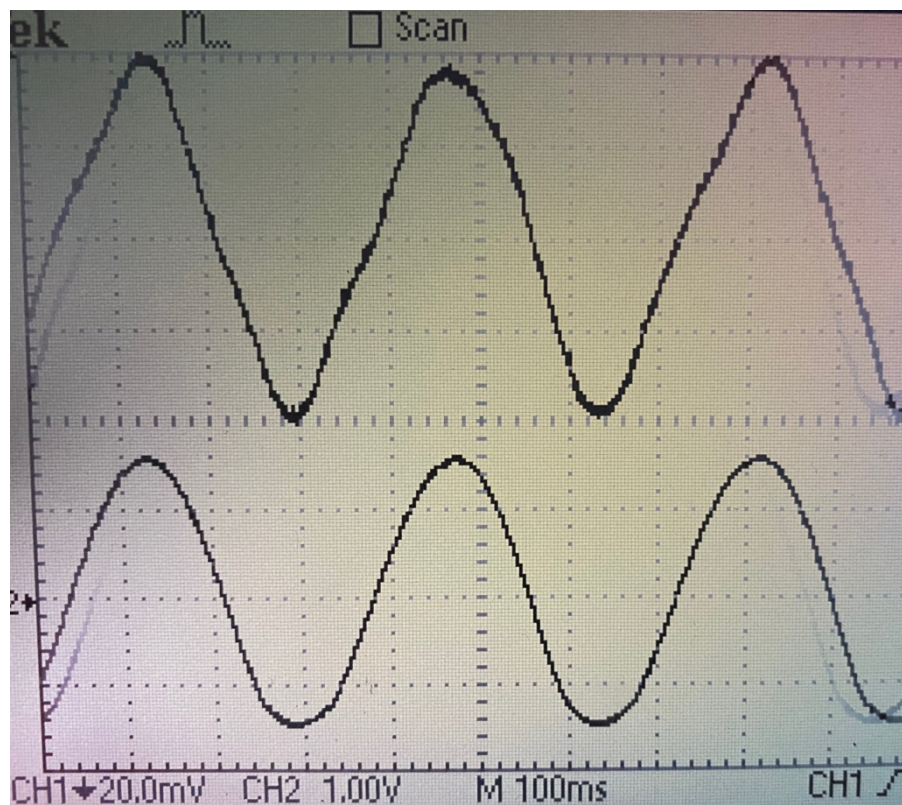


Figura 4.8. Respuesta en frecuencia para 3 Hz

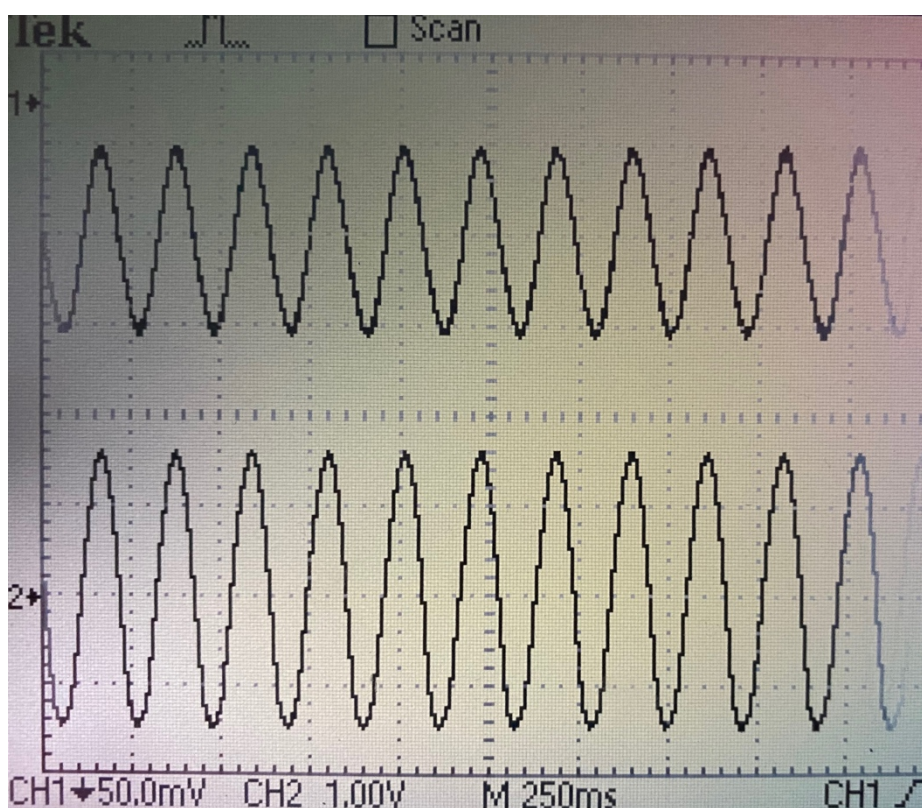


Figura 4.9. Respuesta en frecuencia para 4 Hz

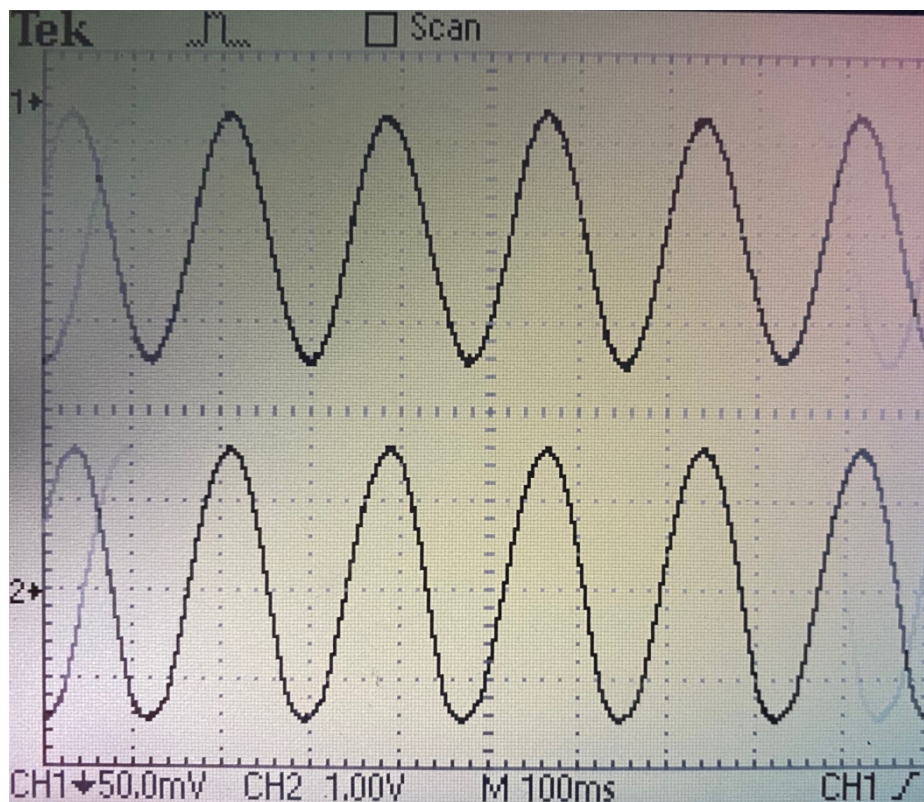


Figura 4.10. Respuesta en frecuencia para 5 Hz

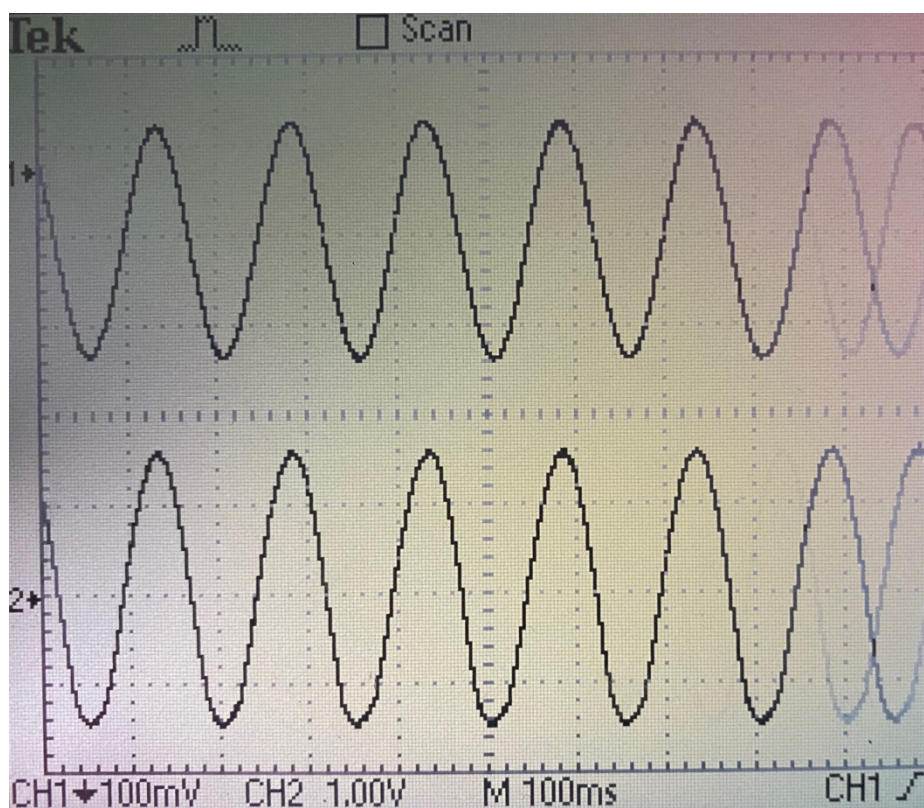


Figura 4.11. Respuesta en frecuencia para 6 Hz

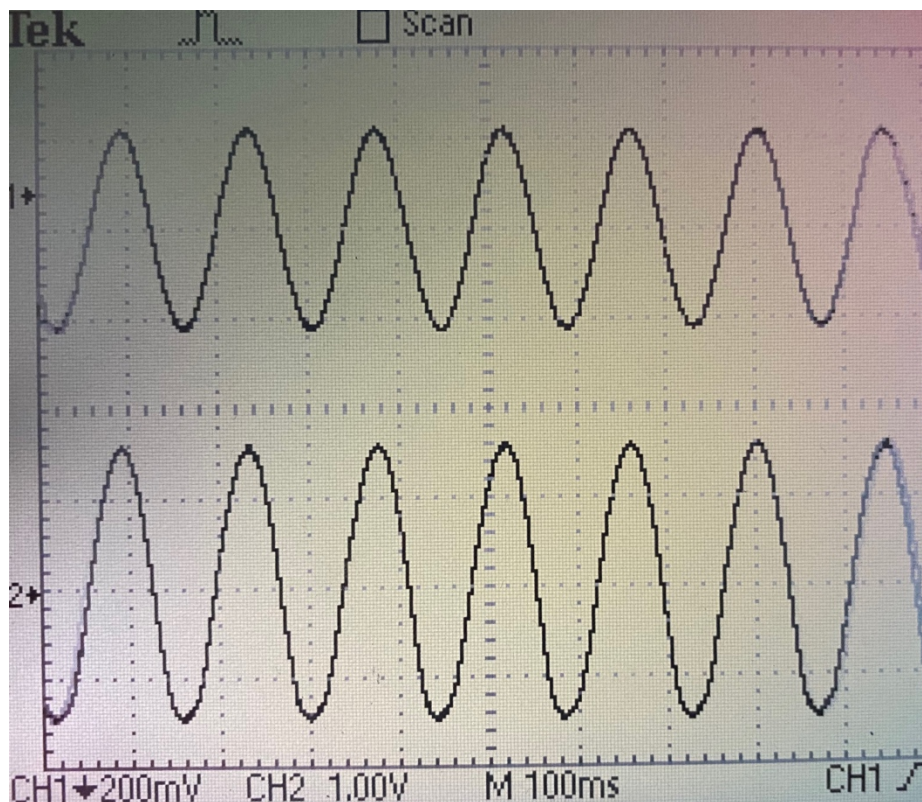


Figura 4.12. Respuesta en frecuencia para 7 Hz

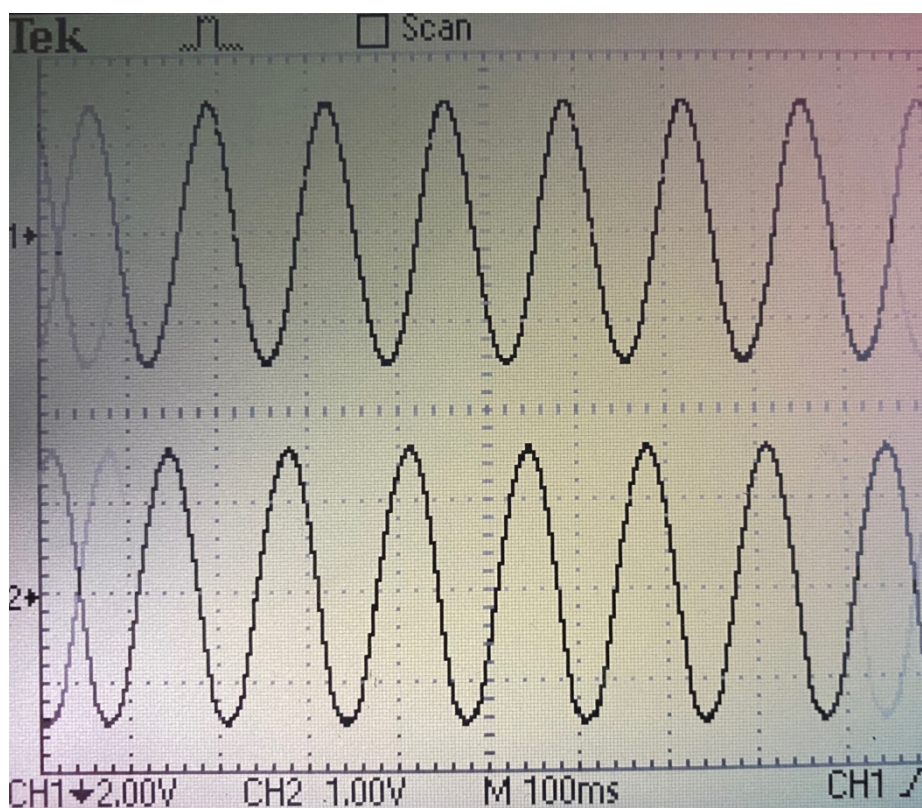


Figura 4.13. Respuesta en frecuencia para 7,5 Hz

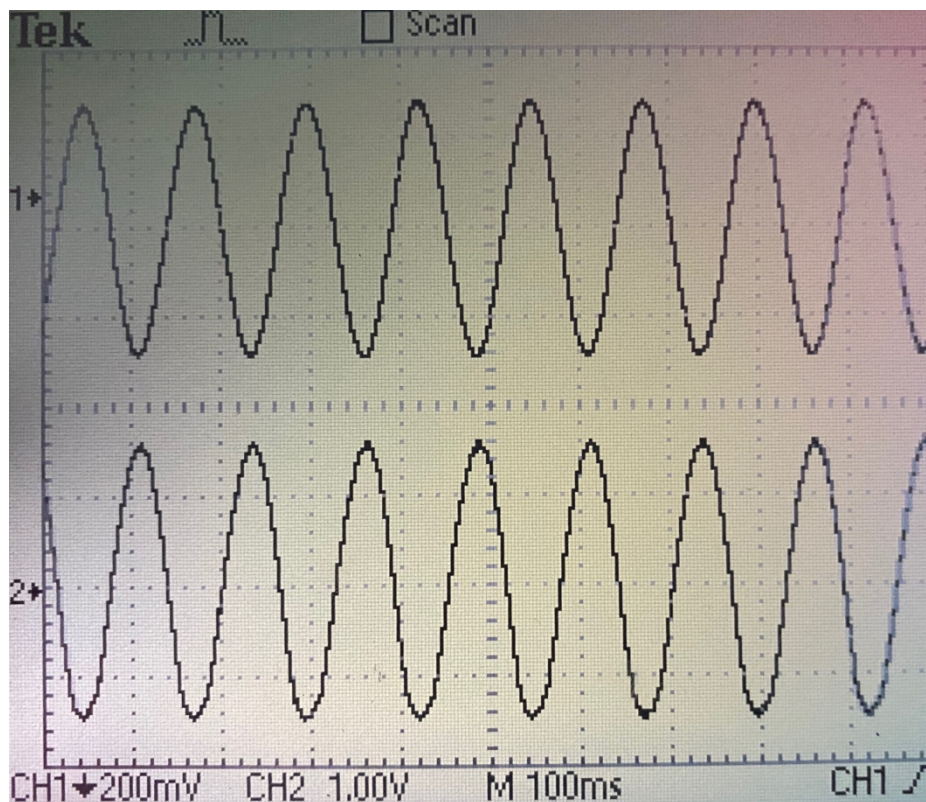


Figura 4.14. Respuesta en frecuencia para 8 Hz

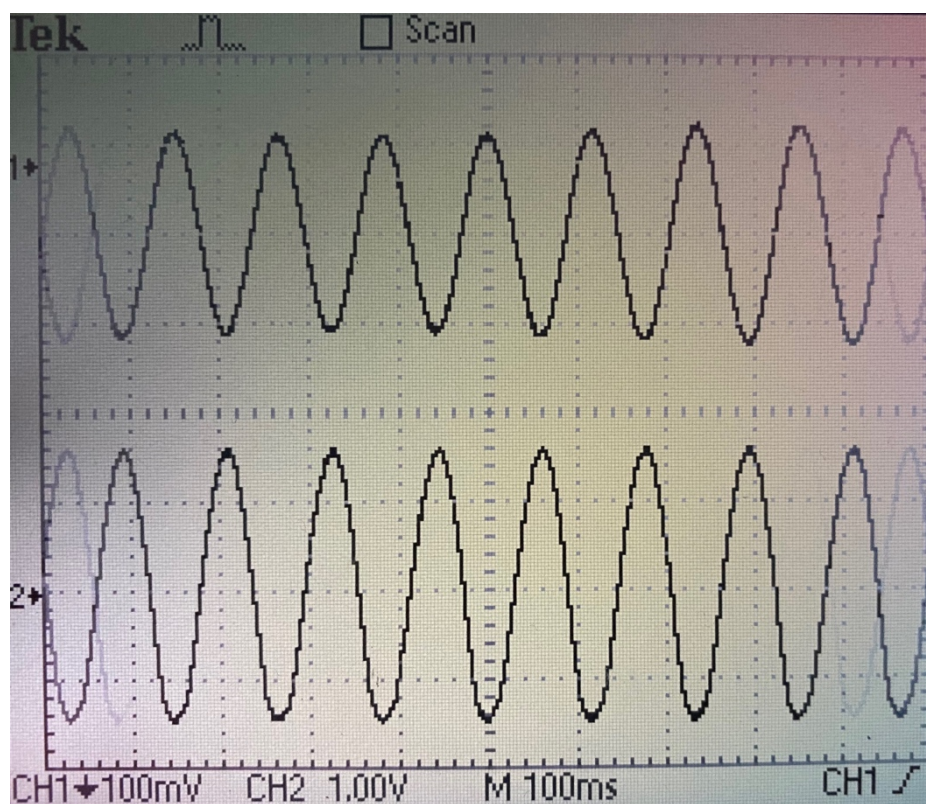


Figura 4.15. Respuesta en frecuencia para 9 Hz



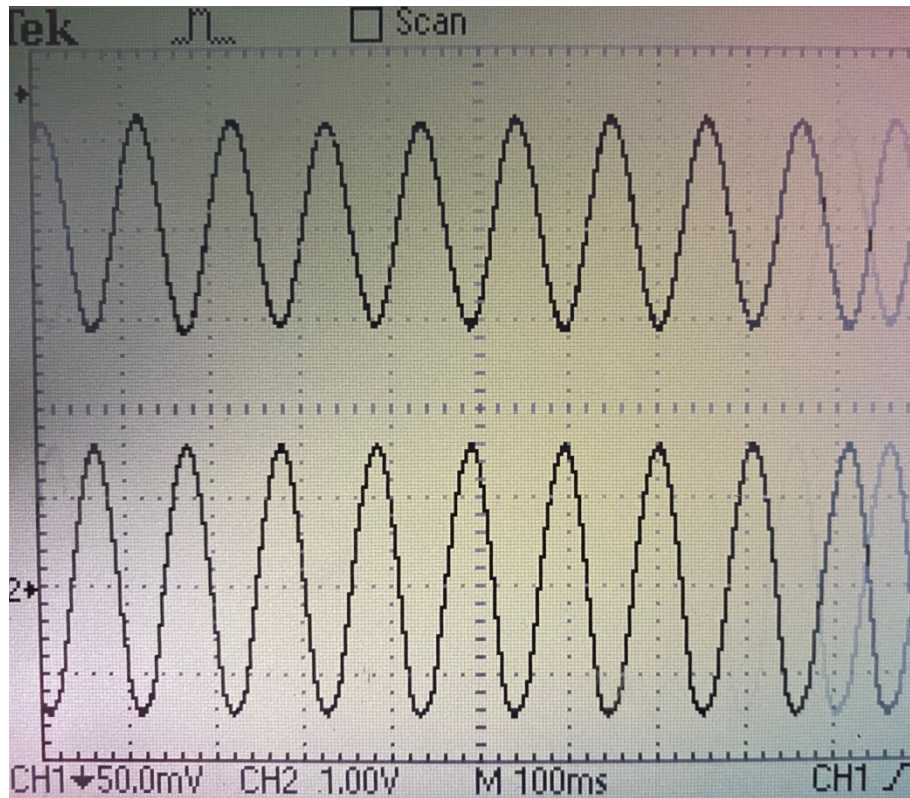


Figura 4.16. Respuesta en frecuencia para 10 Hz

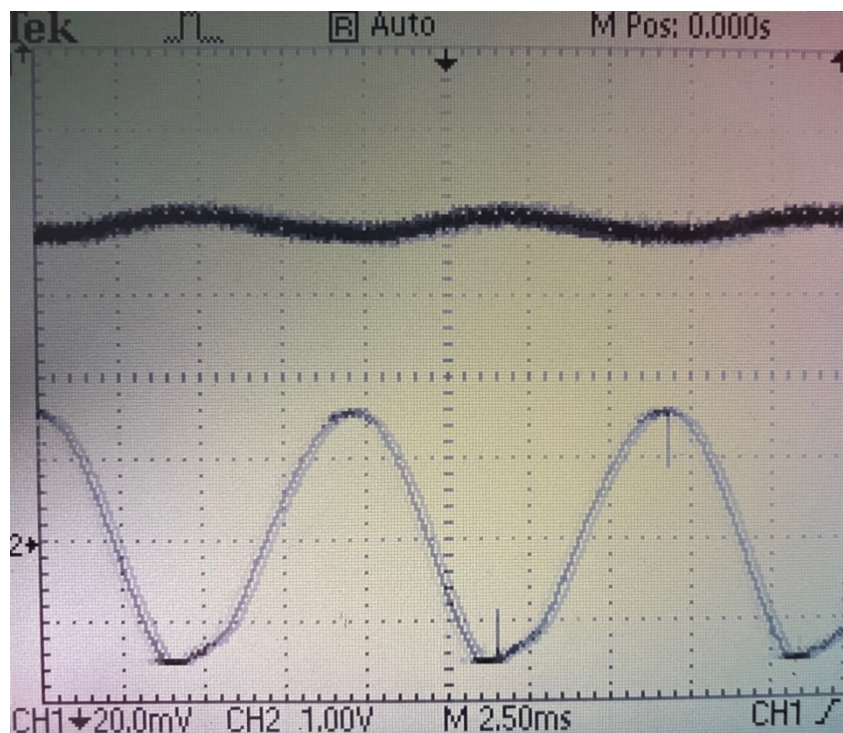


Figura 4.17. Respuesta en frecuencia para 100 Hz

Como se puede observar en las figuras, la frecuencia de resonancia se encuentra en la frecuencia 7,5 Hz. Para este valor la amplitud a la salida se dispara 4 veces el valor de entrada y con desfase del 90°.

Con los valores vistos en las figuras se obtiene la Tabla 4.1:

Frecuencia (Hz)	Periodo (ms)	V. Entrada (V) U <sub>pp</sub>	V. Salida (V) Y <sub>pp</sub>	Desfase (°)
1	1000	3	0,06	0
2	500	3	0,07	0
3	333,33	3	0,08	0
4	250	3	0,1	0
5	200	3	0,15	0
6	166,66	3	0,24	0
7	142,86	3	0,4	0
7,5	133,33	3	6,2	-90
8	125	3	0,54	-180
9	111,11	3	0,2	-180
10	10	3	0,1	-180

Tabla 4.1. Valores de respuesta en frecuencia

Una vez obtenidos los valores de la Tabla 4.1, se procede a elaborar el diagrama de Bode de la respuesta en frecuencia de nuestro sistema. Para dibujar el diagrama de Bode hay que pasar el valor de la diferencia de amplitud a ganancia y también saber el desfase que conlleva asociado a cada ganancia. Sus respectivas formulas son:

$$\text{Ganancia} = 20 \log \left| \frac{Y_{pp}}{U_{pp}} \right| \quad (4.1)$$

$$\text{Fase} = 360 \frac{T_{\text{retardo}}}{T_{\text{señal}}} \quad (4.2)$$

$Y_{pp}$  = Amplitud de la señal de salida pico-pico

$U_{pp}$  = Amplitud de la señal de entrada pico-pico

$T_{\text{retardo}}$  = Tiempo de retraso de la señal de salida

$T_{\text{señal}}$  = Periodo de la señal de entrada

Aplicando las ecuaciones 4.1 y 4.2 se elabora la siguiente tabla (Tabla 4.2) que nos permite elaborar el diagrama de Bode:

NÚMERO	Y <sub>pp</sub> /U <sub>pp</sub>	Ganancia	Fase	Frecuencia (Hz)
1	0,02	-33,98	0	1
2	0,023	-32,76	0	2

## DISEÑO DEL CONTROLADOR EN LA MENSULA

3	0,026	-31,70	0	3
4	0,033	-29,63	0	4
5	0,05	-26,02	0	5
6	0,08	-21,94	0	6
7	0,133	-17,52	0	7
8	2,07	6,32	-90	7,5
9	0,18	-14,89	-180	8
10	0,06	-24,44	-180	9
11	0,03	-30,46	-180	10

Tabla 4.2. Valores del diagrama de bode

Con los datos de la Tabla 4.4 se elabora el diagrama de Bode (Figura 4.18):

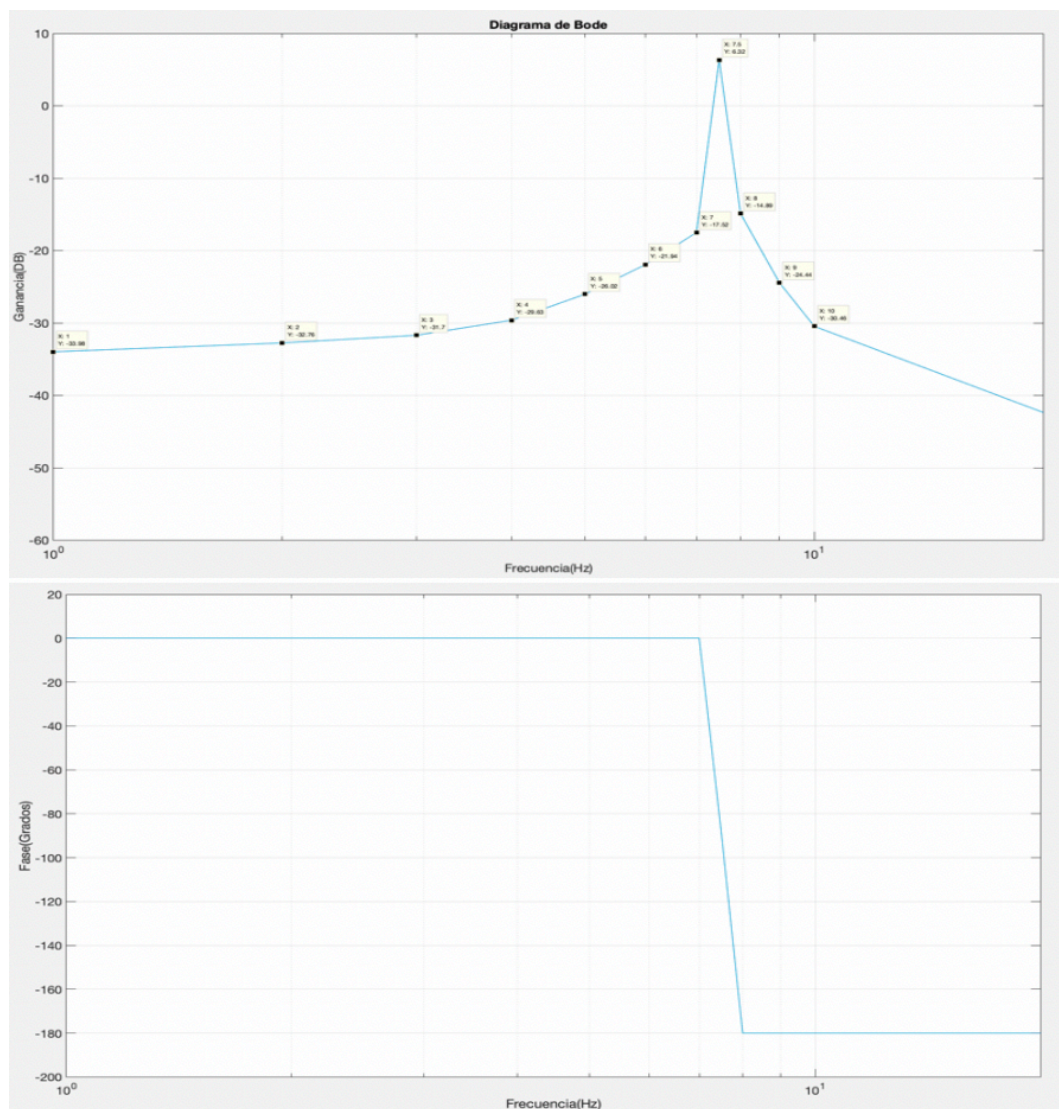


Figura 4.18. Diagrama de Bode de nuestro sistema

Como se puede observar en la Figura 4.18 el diagrama puede corresponder al de un sistema de segundo orden. Tiene el pico de resonancia en 7,5 Hz (47,12 rad/s) y es altamente amortiguado.

#### 4.2.5. FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA

Una vez realizados los ensayos de la respuesta en frecuencia, se va a proceder a hallar la función de transferencia del sistema estudiando el diagrama del Bode.

Como se puede observar el diagrama de Bode coincide con un sistema de segundo orden con polos complejos conjugados. Con un pico de resonancia en la frecuencia correspondiente a 7,5 Hz (47,12 rad/s) y un valor de  $\delta$  (coeficiente de amortiguamiento) por debajo de 0,707 aportando mucha amortiguación al sistema.

A continuación se muestra la Figura 4.19 correspondiente a un diagrama de Bode de un sistema de segundo con polos complejos conjugados y un coeficiente de amortiguamiento menor a 0,707. Esta figura nos sirve para corroborar que nuestro sistema es semejante al teórico.

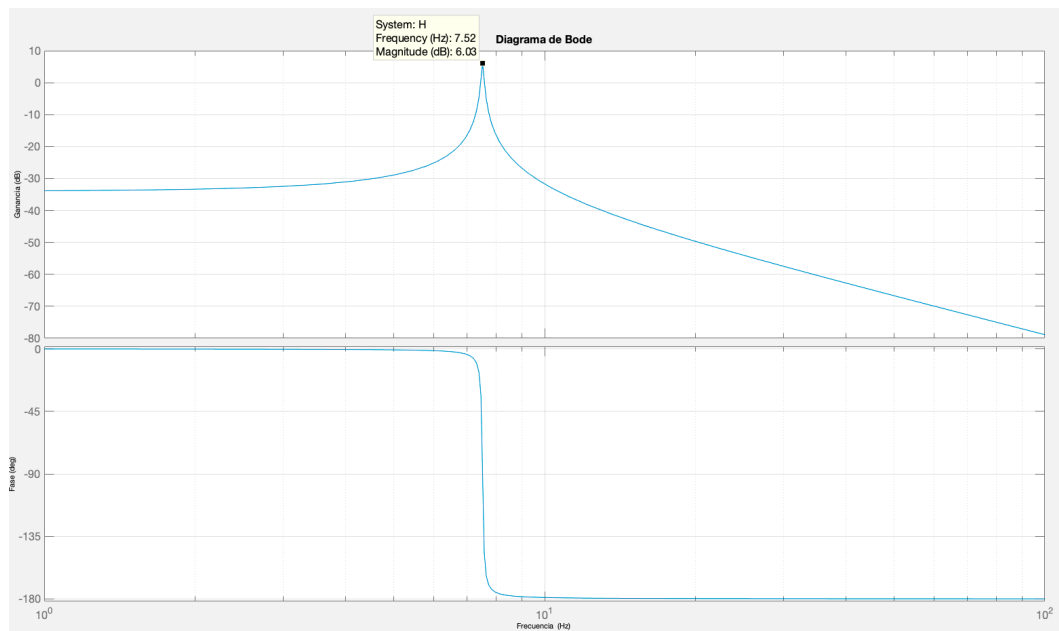


Figura 4.19. Diagrama de bode teórico

En la Figura 4.20 [14] se ve el comportamiento de un modelo con respecto a la variación del coeficiente de amortiguación. Esta figura solo se tiene en cuenta para ver la forma del gráfico variando la amortiguación.

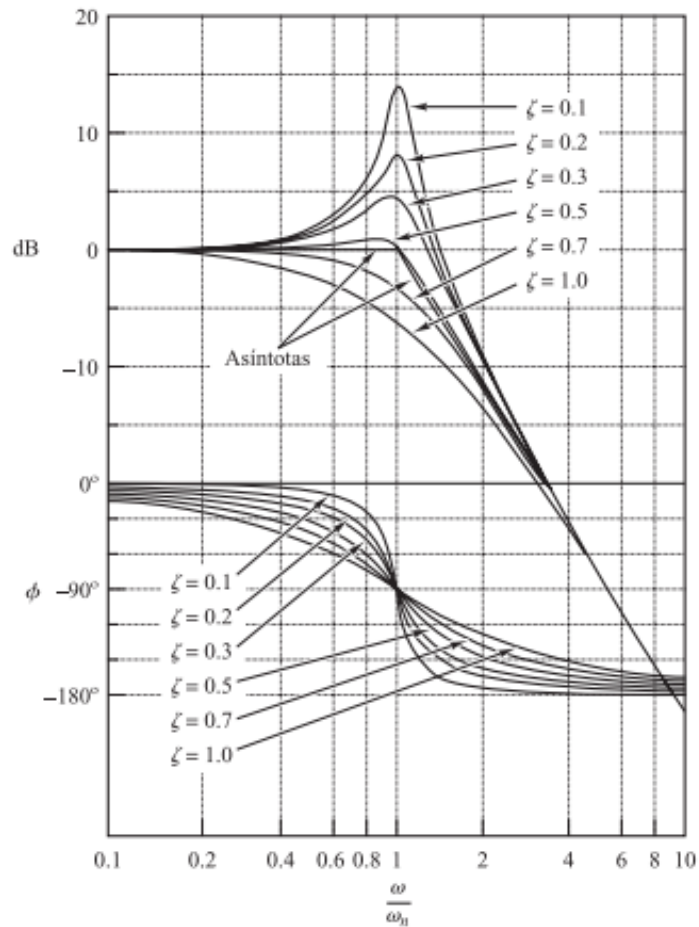


Figura 4.20. Curvas de magnitud logarítmica, asíntotas y curvas de ángulo de fase de una función de transferencia variando su coeficiente de amortiguamiento

Las fórmulas que se muestran a continuación sirven para hallar el coeficiente de amortiguamiento ( $\delta$ ) y frecuencia natural ( $w_n$ ). Con los valores de la Tabla 4.2, se consiguen completar las siguientes ecuaciones.

$$20 \text{ Log } M_r = \text{Ganancia (Frecuencia 7,5 Hz)} - \text{Ganancia (Frecuencia 1Hz)} \quad (4.3)$$

$$M_r * (2\delta\sqrt{1 - \delta^2}) = 1 \rightarrow \delta^2 - \delta^4 = \frac{1}{4 * M_r^2} \quad (4.4)$$

$$w_r = w_n \sqrt{1 - 2\delta^2} \rightarrow w_n = \frac{w_r}{\sqrt{1 - \delta^2}} \quad (4.5)$$

Los valores obtenidos de las formulas anteriores son:

$$M_r = 103,514 \quad (4.6)$$

$$\delta = 0,005 \quad (4.7)$$

$$w_n = 47,24 \text{ rad/s (El valor del } \delta \text{ es muy bajo)} \quad (4.8)$$

Como se comentó con anterioridad el sistema se puede aproximar a un sistema de segundo orden con un par de polos complejos conjugados. Dicho sistema tiene como función de transferencia característica la siguiente:

$$\frac{H(s)}{F(s)} = \frac{K w_n^2}{s^2 + 2\delta w_n s + w_n^2} \quad (4.9)$$

$H$  = Posición vertical

$F$  = Fuerza aplicada

$K$  = Ganancia estática

$\delta$  = Coeficiente de amortiguamiento

$w_n$  = Frecuencia natural

Los valores de  $w_n$  y  $\delta$  ya se han hallado anteriormente, lo único que falta es hallar el valor de  $K$ . La ganancia  $K$  se corresponde a la siguiente formula:

$$20 \text{ Log } K = \text{Ganancia (número 1) (Tabla 4.2)} \quad (4.10)$$

$$\text{Por lo tanto } K = 0,01999 \approx 0,02 \quad (4.11)$$

Con los valores hallados anteriormente la función de transferencia que representa nuestro sistema en función de la posición es:

$$\frac{H}{F} = \frac{44,61}{s^2 + 0,472s + 2230,67} \quad (4.12)$$

Para comprobar que la función de transferencia es correcta, se representa en el software Matlab y se elabora su diagrama de Bode para ver si concuerda (Figura 4.21).

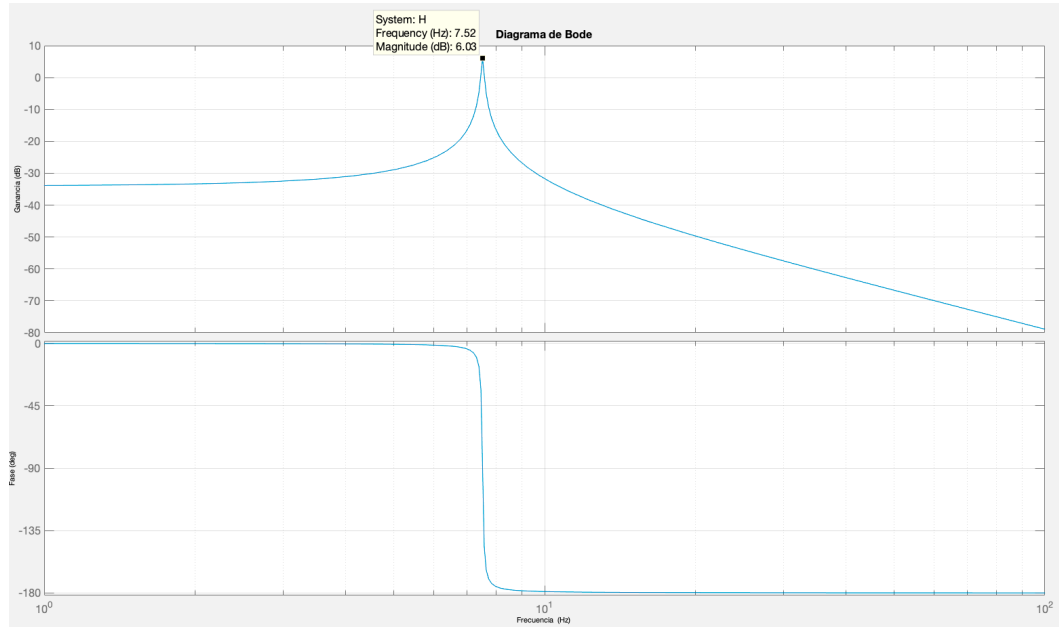


Figura 4.21. Diagrama de bode obtenido por respuesta en frecuencia

Como se puede observar el Bode es exactamente igual al que salió por medio del experimento de la respuesta en frecuencia (Figura 4.21).

Ya obtenida la función de transferencia con respecto a la posición de nuestro sistema, hay que representar la función de transferencia con respecto a la aceleración, ya que es la aceleración la que se va a controlar con el controlador PID. Para ello hay que añadir un  $s^2$  en la parte de numerador. Esto representa los dos ceros en el origen que añade la aceleración al sistema.

$$\frac{a}{F} = \frac{44,61 s^2}{s^2 + 0,472s + 2230,67} \quad (4.13)$$

$a$  = Aceleración vertical de la ménsula

$F$  = Fuerza aplicada

## 4.3. DISEÑO DEL CONTROLADOR

### 4.3.1. INTRODUCCIÓN

Una vez obtenida la función de transferencia de nuestro modelo, lo siguiente es calcular el controlador que más se adecua a nuestro sistema.

Se pretende controlar la ménsula frente a perturbaciones externas (vibraciones). Estos sistemas (estructuras esbeltas y ligeras) se caracterizan por tener un coeficiente de amortiguamiento bajo, lo cual hace que presenten picos de resonancia grandes amplificando enormemente los armónicos presentes en las excitaciones próximas a la frecuencia natural. Al presentarse

este fenómeno en frecuencias bajas, los tiempos de establecimiento son grandes lo cual implica que las vibraciones tardan mucho en atenuarse. Por tanto, mediante los controladores se habrá de buscar como aumentar el coeficiente de amortiguamiento para reducir los picos de resonancia. Mediante el software Matlab se va ir probando distintas configuraciones para al final elegir el controlador más apropiado. Los controladores que se van a estudiar son los siguientes:

- P
- PI
- PID

La función de transferencia con la que vamos a trabajar es la que se muestra en la ecuación 4.13:

$$\frac{a}{F} = \frac{44,61 s^2}{s^2 + 0,472s + 2230,67}$$

El diagrama de Bode de dicha función de transferencia puede verse en la Figura 4.22:

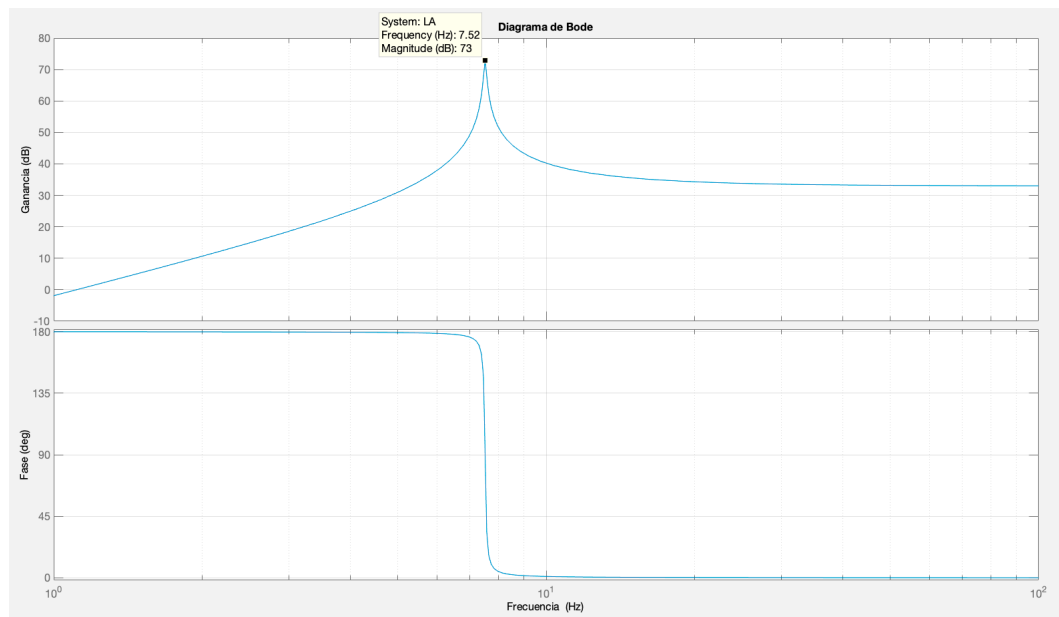


Figura 4.22. Diagrama de bode de nuestro sistema

La estructura de nuestro de control sistema en lazo abierto es la siguiente (Figura 4.23):



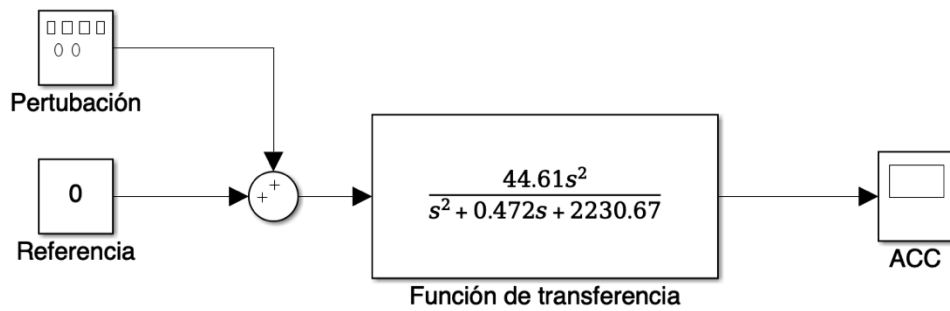


Figura 4.23. Diagrama de bloques del sistema en lazo abierto

Al cerrar el lazo y poner la referencia a cero nos queda el esquema de la Figura 4.24. Como se puede observar los distintos valores de las perturbaciones son las que van a modificar el comportamiento de nuestro sistema.

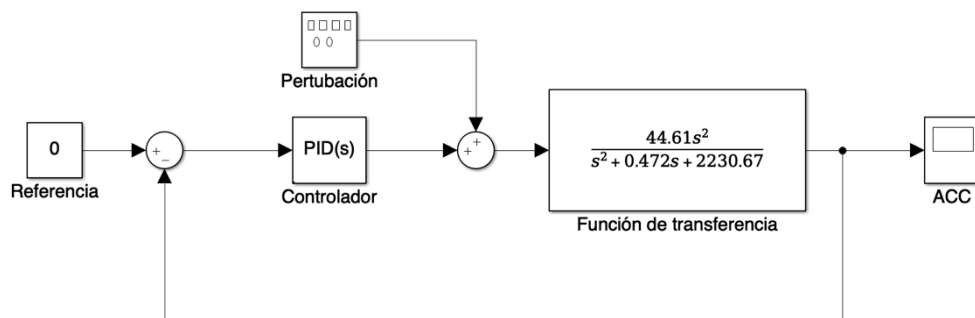


Figura 4.24. Diagrama de bloques del sistema en lazo cerrado

Comenzando de nuevo con el sistema original (ecuación 4.13) en lazo abierto, se pueden observar los siguientes polos y ceros:

Polos:

- $-0,236 + 47,23i$
- $-0,236 - 47,23i$

Ceros:

- 0
- 0

A continuación se va a simular la respuesta temporal del sistema en lazo abierto para una entrada escalón de valor de 0,024Kg (ya que representa una masa adecuada para nuestro sistema y ensayo) (Figura 4.25).

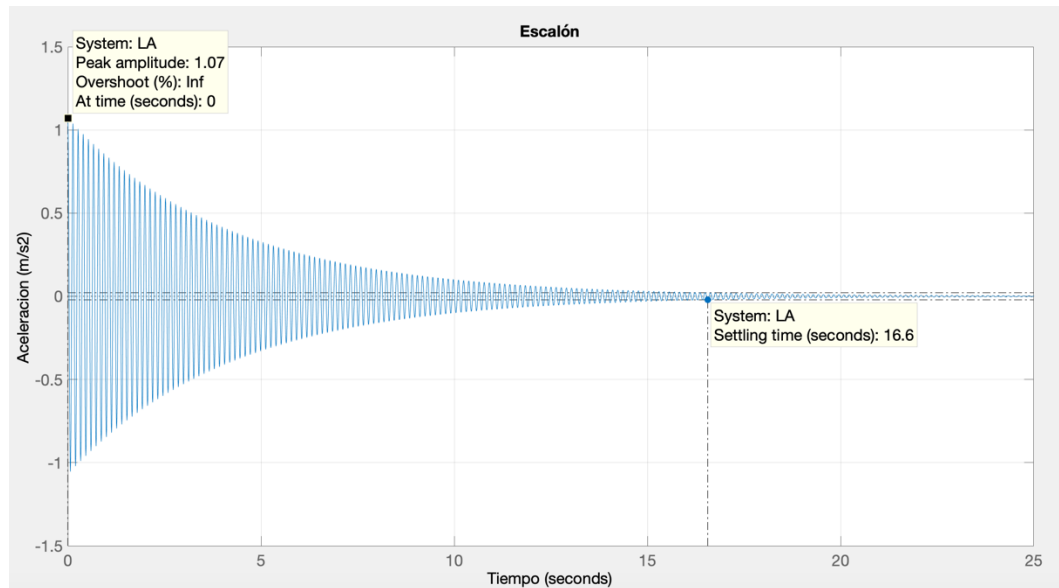


Figura 4.25. Respuesta del sistema en lazo abierto ante entrada escalón

Como se puede observar el sistema necesita 16,6 segundos para que la perturbación desaparezca.

#### 4.3.2. CONTROLADOR PROPORCIONAL P

Se empieza con el estudio del controlador proporcional. En Este controlador la salida es proporcional a la señal de error. Se hace una resta entre el punto de referencia y la salida y se multiplica por una ganancia K. El diagrama de bloques que representa este controlador es el de la Figura 4.26.

La ecuación matemática que se corresponde a este controlador es la siguiente:

$$P_{out} = K e(t) \tag{4.14}$$

$P_{out}$  = Salida del controlador proporcional

K = Ganancia proporcional

$e(t)$  = Error en el instante de tiempo t = SetPoint - Realimentación

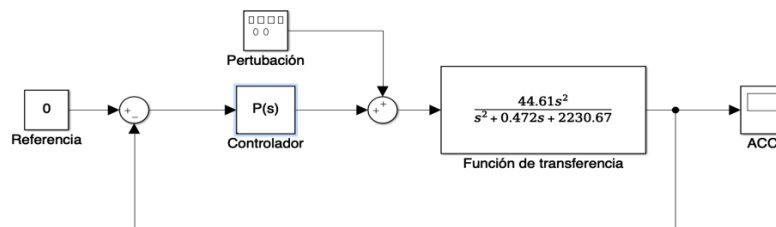


Figura 4.26. Diagrama de bloques para sistema lazo cerrado con controlador P

El lugar de las raíces correspondiente es el de la Figura 4.27.

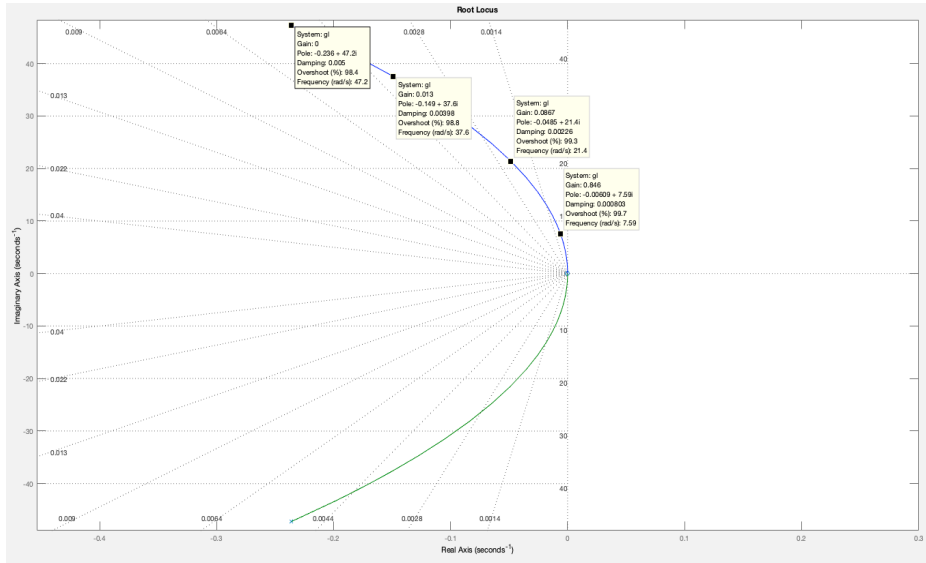


Figura 4.27. Lugar de las raíces sistema lazo cerrado con controlador P

Se puede observar en la Figura 4.27 que a medida que se aumenta la ganancia el coeficiente de amortiguamiento va disminuyendo provocando que el sistema aumente su tiempo de establecimiento por estar los polos más cerca del eje Imaginario. Aunque reduzca mucho la ganancia, el tiempo de establecimiento no es bueno. Para comprobar dicho estudio se simula el sistema en lazo cerrado y ganancia uno ante una entrada escalón (Figura 4.28).

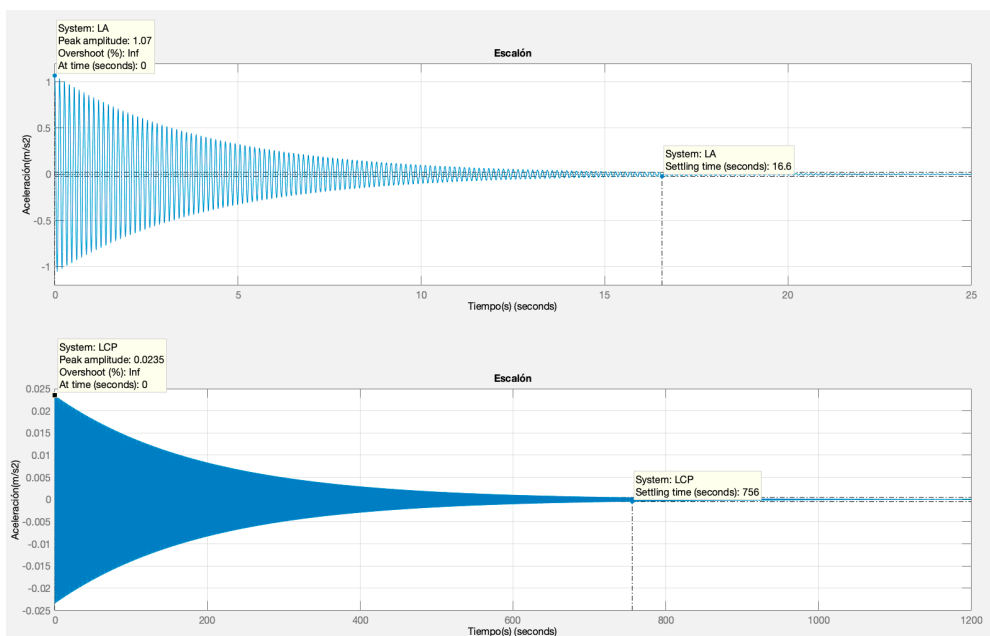


Figura 4.28. Sistema lazo abierto y lazo cerrado con controlador proporcional ante entrada escalón

Como se puede observar en la Figura 4.28, la ganancia se reduce bastante y es bueno para que no haya picos muy altos. Sin embargo, el tiempo de establecimiento se dispara mucho, pasa de valer 16,6 segundos a

valer 756 segundos. Este tiempo de establecimiento no es válido para elegir este controlador.

En la Figura 4.29 se comparan los diagramas de Bode del sistema en lazo abierto con el sistema con el controlador Proporcional.

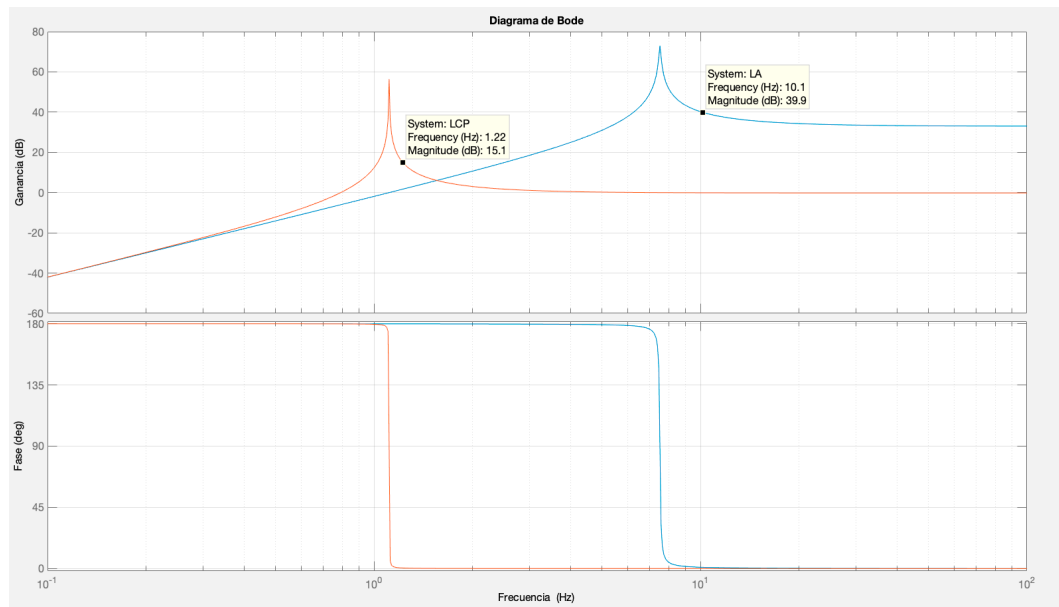


Figura 4.29. Diagrama de bode lazo abierto (azul) y diagrama de bode lazo cerrado con controlador P (rojo)

Como se vuelve a observar en la Figura 4.29, el controlador proporcional reduce la ganancia pero desplaza el bode hacia la izquierda. Esto provoca que el pico de resonancia este a frecuencias muy bajas (1,11 Hz). Para nuestro caso sería mejor que el pico de resonancia se desplazara a frecuencia más altas. De esta manera sería mas difícil conseguir que nuestro sistema entre en resonancia.

Por todo lo comentado anteriormente el control proporcional no es adecuado para controlar nuestro sistema.

#### 4.3.3. CONTROLADOR PROPORCIONAL-INTEGRAL PI

La acción integral del controlador lo que nos mejora es el error estacionario. Es decir, disminuye y elimina el error estacionario que nos provoca el controlador proporcional.

La ecuación matemática que se corresponde a este controlador es la siguiente:

$$P_{out} = K_{pi} \left[ e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) d\tau \right] \quad (4.15)$$

Expresando esta ecuación en el dominio de  $s$  (función de transferencia):

$$G_{PI}(s) = K_{pi} \left( 1 + \frac{1}{T_i s} \right) \quad (4.16)$$

El diagrama de bloques que representa dicho control es el que se puede apreciar en la Figura 4.30:

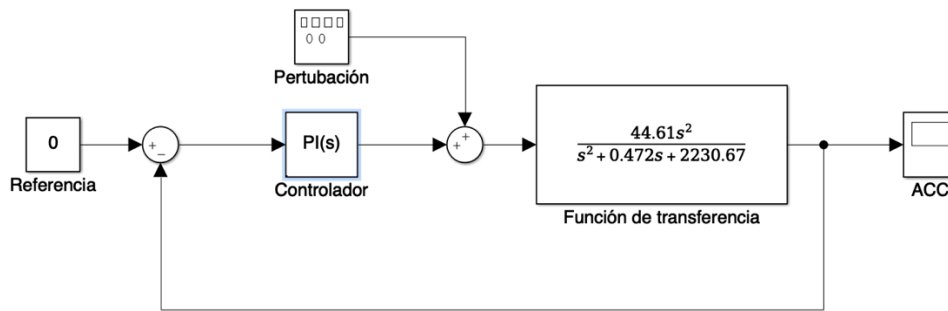


Figura 4.30. Diagrama de bloques para controlador PI

El controlador PI nos aporta al sistema un cero y un polo en el origen. El cero se sitúa a una distancia por lo menos dos veces de la distancia del valor real de los polos originales. Es decir, tenemos los siguientes polos originales:

- $-0,236 + 47,23i$
- $-0,236 - 47,23i$

De estos valores escogemos el valor real y lo multiplicamos por dos para establecer nuestro nuevo cero que aporta el controlador PI:

$$\text{Cero (PI)} = 2 * (-0,236) = -0,472 \quad (4.17)$$

Con este valor de  $s$  pasamos a calcular el valor  $T_i$ :

$$T_i s + 1 = 0 \rightarrow s = -0,472 \rightarrow T_i = \frac{-1}{-0,472} \quad (4.18)$$

$$T_i = 2,119 \quad (4.19)$$

El nuevo lugar de las raíces que se obtiene (Figura 4.31):

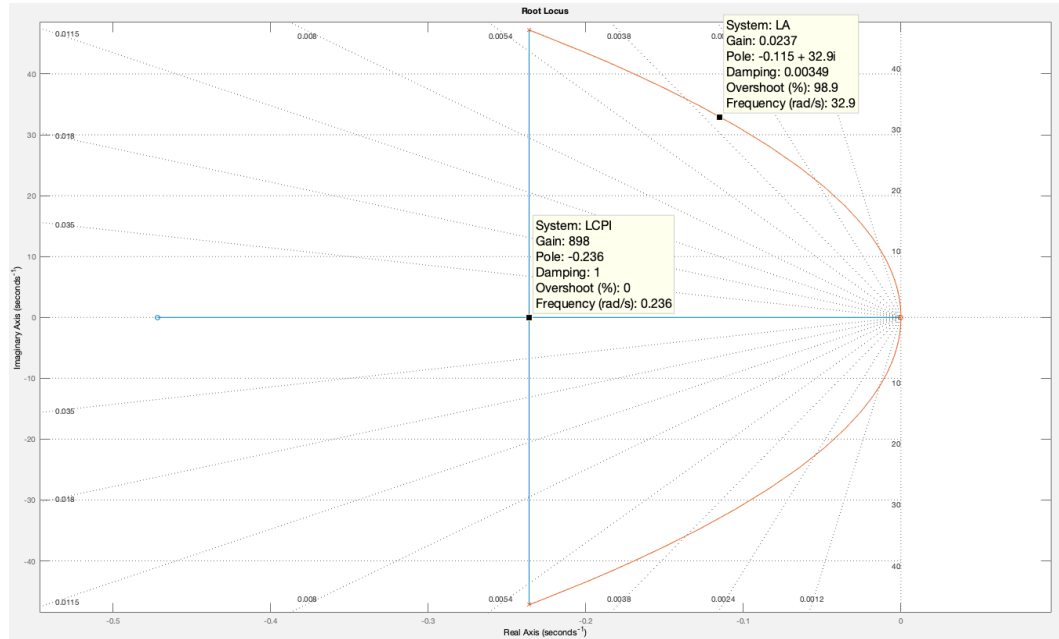


Figura 4.31. Lugar de las raíces lazo abierto (rojo) y lugar de las raíces lazo cerrado con controlador PI (azul)

Como se puede observar en la Figura 4.31, el nuevo sistema con controlador PI tiene los siguientes polos:

- $-0,236 + 47,23i$
- $-0,236 - 47,23i$
- $0$

Y los siguientes ceros:

- $0$
- $0$
- $-0,472$

El parámetro que nos queda por calcular es el valor de la ganancia  $K_{pi}$ . La forma correcta de seleccionar este valor es escoger el punto de ruptura, es decir seleccionar el valor que hay de la ganancia situándonos en el eje real. Este valor tiene asociado un  $\delta = 1$ . El valor mostrado en la Figura 4.31 es el valor de la ganancia total que equivale a:

$$\text{Ganancia Total} = \frac{K_{PI} \cdot K_G}{T_i} \quad (4.20)$$

Por lo tanto:

$$K_{PI} = \frac{\text{Ganancia Total} \cdot T_i}{K_G} = \frac{898 \cdot 2,119}{44,61} = 42,66 \quad (4.21)$$

Por lo tanto el controlador queda de la siguiente manera:

$$G_{PI}(s) = 42,66 \left( 1 + \frac{1}{2,119s} \right) \quad (4.22)$$

Una vez hallado el nuevo controlador se simula su respuesta temporal del sistema en lazo cerrado frente a una perturbación escalón (Figura 4.32).

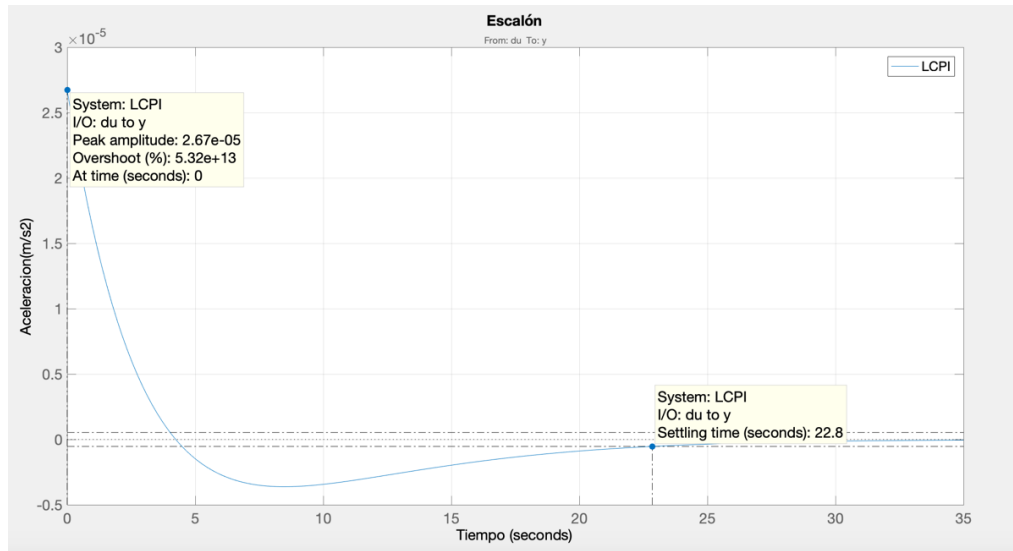


Figura 4.32. Respuesta escalón sistema lazo cerrado con controlador PI

Como se puede observar el resultado obtenido es mucho mejor que el obtenido con el controlador solo proporcional. La corrección de la ganancia es muy buena y el tiempo de establecimiento es mayor que en lazo abierto pero la ganancia es sumamente pequeña. A continuación, se ve el comparativo de la respuesta en frecuencia (Figura 4.33) para ver mejor los resultados.

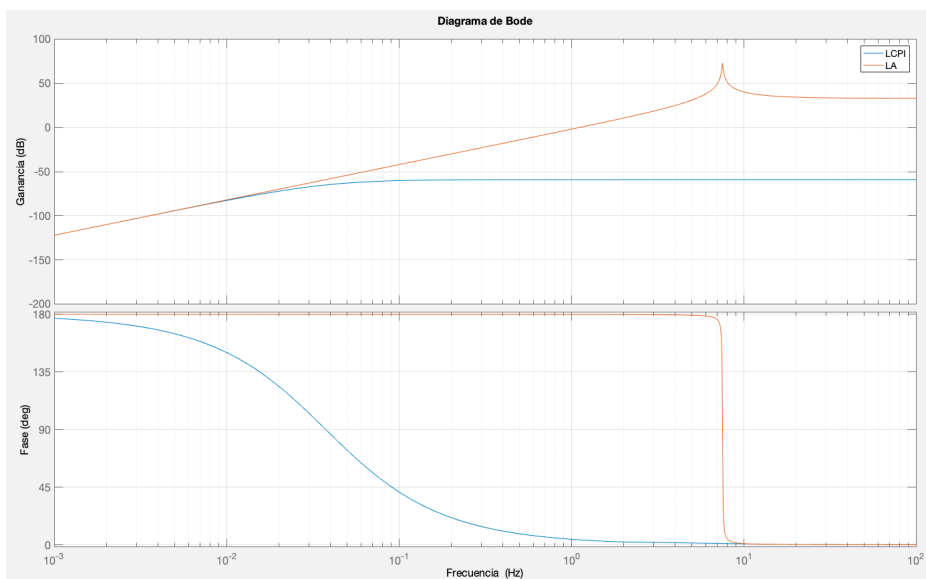


Figura 4.33. Respuesta en frecuencia lazo abierto (rojo) y respuesta en frecuencia lazo cerrado con controlador PI (azul)

En la Figura 4.33 se puede apreciar más que nada como la ganancia es reducida y principalmente como es eliminado el pico de resonancia. Esto significa una gran mejora y es una solución muy viable a la hora de controlar el sistema.

Una de los aspectos a tener en cuenta es que la parte integral tiene que tener un sistema anti-windup (Figura 4.34). Este fenómeno se produce por saturación del término integral al superar los límites el actuador.

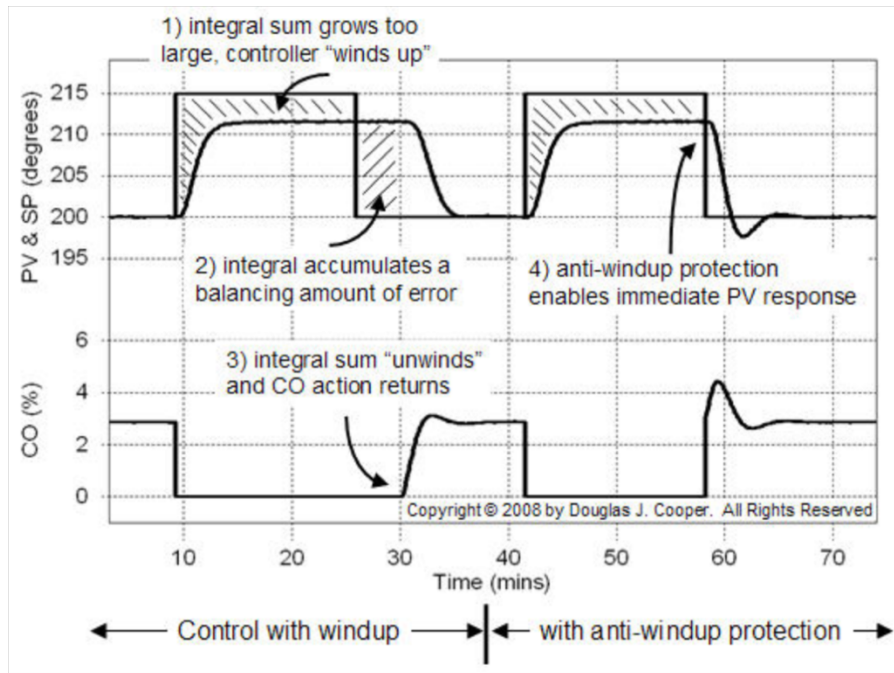


Figura 4.34. Controlador PI anti-windup

Con el controlador PID\_compact que se va a utilizar de Siemens, este sistema anti-windup ya viene integrado.

#### 4.3.4. CONTROLADOR PROPORCIONAL INTEGRAL DERIVATIVO PID

El control PID (Figura 4.35) se compone de tres partes: una proporcional, una integral y una derivativa. Las partes proporcional e integral se comentaron en los apartados anteriores. La acción derivativa actúa cuando hay un cambio en el valor instantáneo del error. Es decir, prevee que si va a haber un cambio en el error actúa corrigiéndolo y manteniendo a este en el menor valor posible.



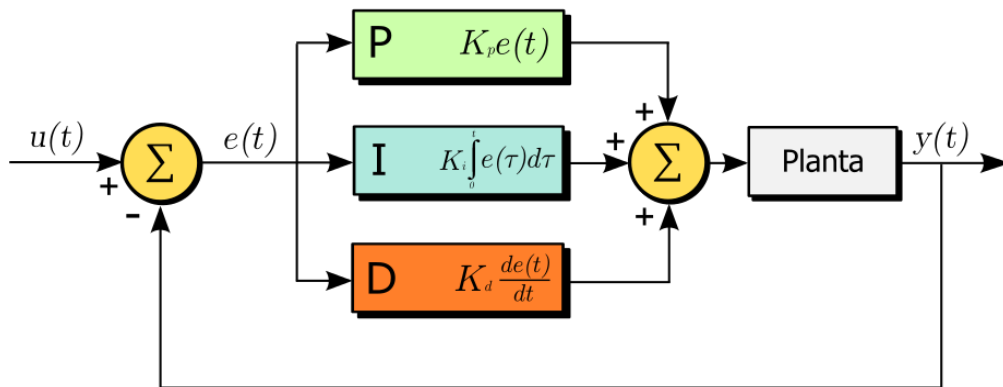


Figura 4.35. Diagrama de bloques para sistema lazo cerrado con controlador PID

La ecuación matemática que se corresponde a este controlador es la siguiente:

$$P_{out} = K_{PID} \left[ e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau + T_d \frac{de(t)}{dt} \right] \quad (4.23)$$

Expresando esta ecuación en el dominio de s (función de transferencia):

$$G_{PID}(s) = K_{PID} \left( 1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \quad (4.24)$$

Por medio de prueba y error en el lugar de las raíces se hallan los valores más adecuados para  $T_i$  y  $T_d$ .

Por medio de varias pruebas. Fijamos los valores de  $T_i$  y  $T_d$ :

$$T_i = 0,323 \quad (4.25)$$

$$T_d = 0,025 \quad (4.26)$$

Por lo tanto el lugar de las raíces (Figura 4.36) obtenido es el siguiente:

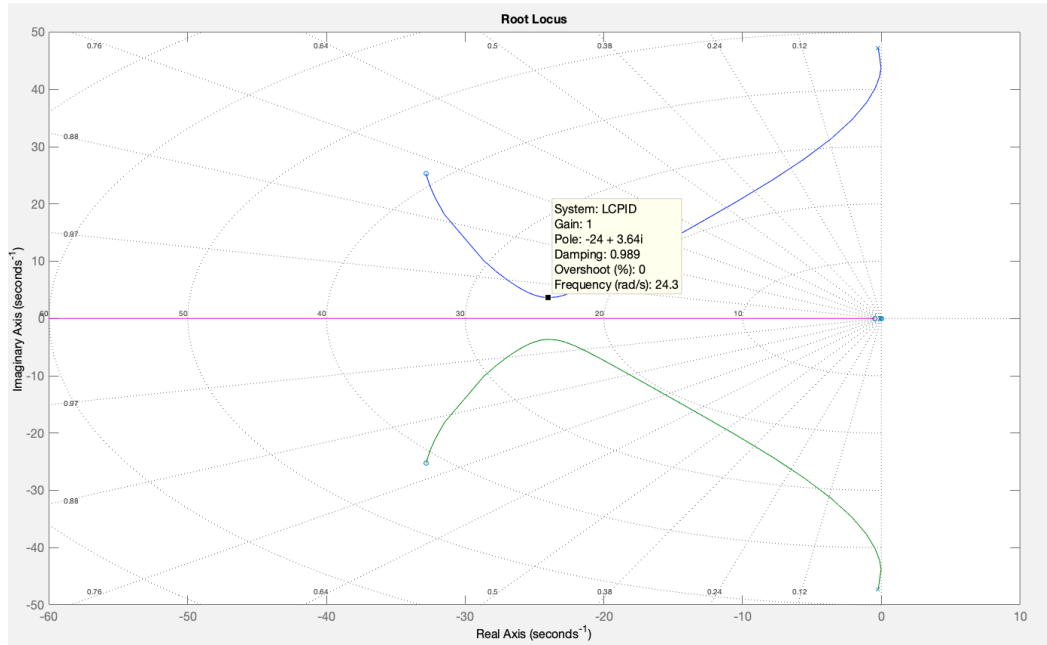


Figura 4.36. Lugar de las raíces sistema lazo cerrado con controlador PID

Como se puede observar en la Figura 4.36, para ningún valor de K el sistema es inestable. Se añaden dos ceros complejos conjugados:

- $-32,8 + 25,3i$
- $-32,8 - 25,3i$

El valor de la ganancia  $K_{PID}$  es hallado tomando la ganancia total del sistema en el punto más bajo de la rama del lugar de las raíces (Figura 4.36).

$$K_{PID} = 1 \quad (4.27)$$

$$K_i = \frac{K_{PID}}{T_i} = \frac{1}{0,323} = 3,096 \quad (4.28)$$

$$K_d = K_{PID} * T_d = 1 * 0,025 = 0,025 \quad (4.29)$$

Una vez obtenido los valores del controlador PID, se estudia su respuesta temporal frente a una entrada escalón (Figura 4.37).

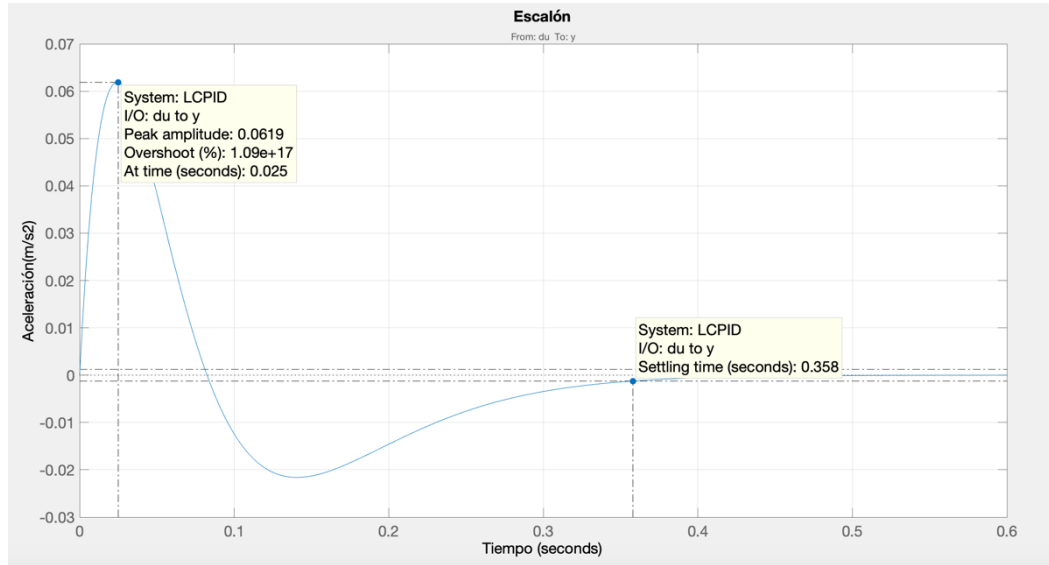


Figura 4.37. Respuesta escalón sistema lazo cerrado con controlador PID

Como se puede observar este controlador refleja una mejora considerable en la ganancia y en el tiempo de establecimiento. La repuesta temporal es mejor que en el caso del controlador PI. El tiempo de establecimiento es el menor obtenido y la corrección de la ganancia es buena. Para poder estudiar mejor los resultados en la Figura 4.38 se muestra la comparativa de la respuesta en frecuencia con el sistema en LA con la respuesta en frecuencia del sistema en LC con controlador PID.

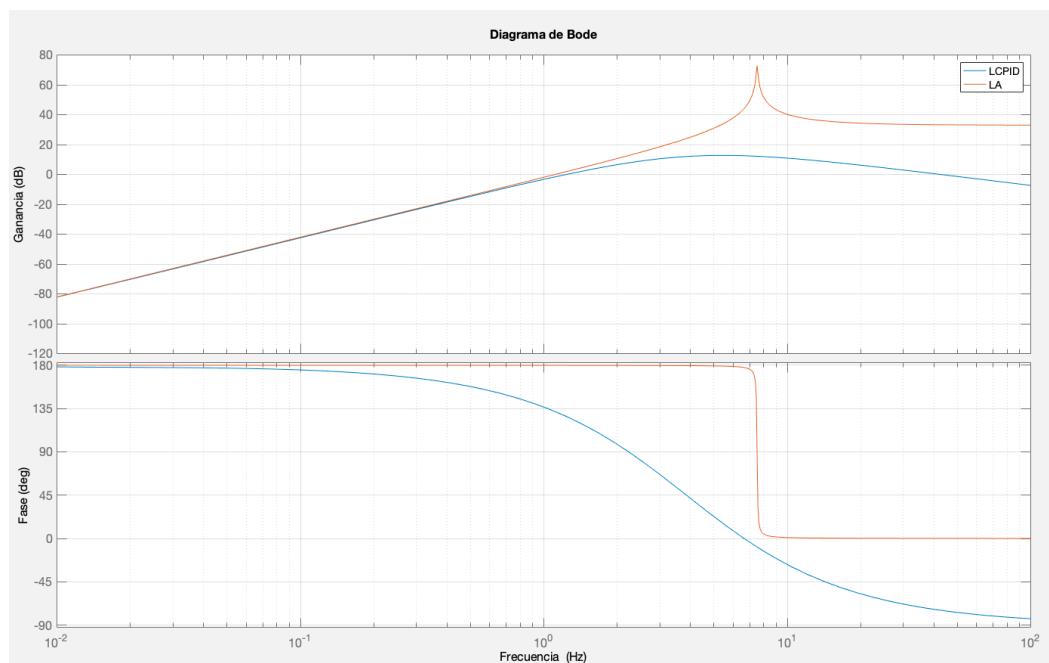


Figura 4.38. Diagrama de bode LA (rojo) y diagrama de bode controlador PID (azul)

En cuanto a frecuencias bajas el comportamiento es el mismo. A frecuencias medias el comportamiento mejora reduciendo bastante el pico de

resonancia. A frecuencias altas la ganancia mejora pero no es mejor que en caso del controlador PI.

Igual que en el caso del controlador PI, hay que tener en cuenta que en la parte derivativa hay que incluir un filtro *pasa bajos*. Por lo tanto la ecuación matemática del controlador quede de la siguiente manera:

$$G_{PID}(s) = K_{PID} \left( 1 + \frac{1}{T_i s} + \frac{T_d s}{1 + s \frac{T_d}{N}} \right) \quad (4.30)$$

En donde el parámetro N tiene que tener un valor entre 5 y 10, en este caso en valor N es de 5.

Para finalizar se muestra una comparativa de la repuesta en frecuencia del sistema en lazo abierto con el sistema en lazo cerrado y con los controles P, PI, PID (Figura 4.39). También se muestra una tabla comparativa de los término de aceleración máxima y tiempo de establecimiento (Tabla 4.3).

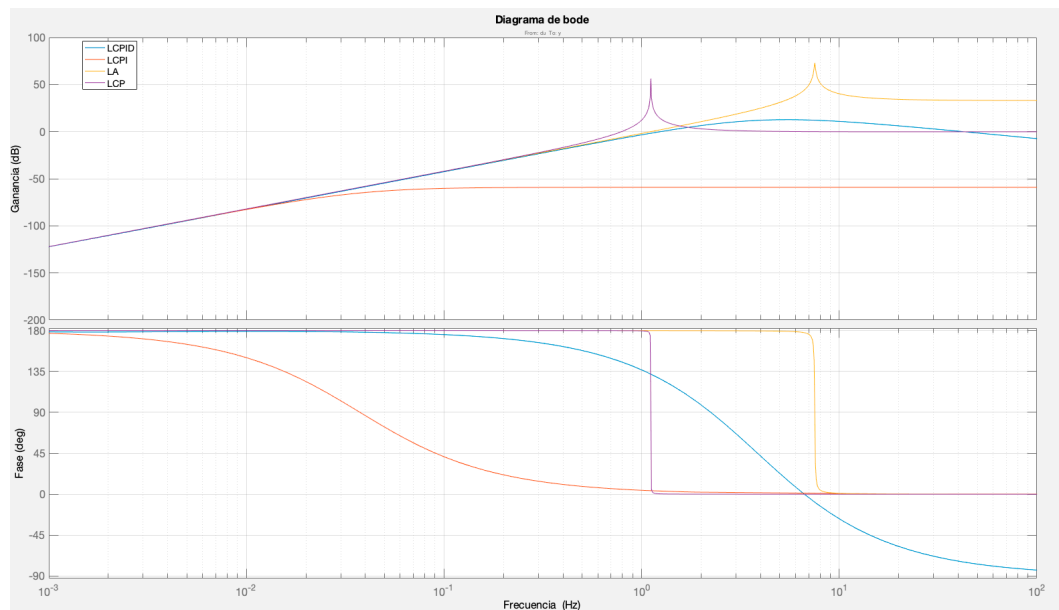


Figura 4.39. Respuesta en frecuencia del sistema en LA, LCP, LCPI y LCPID

En la Figura 4.39 se puede observar la comparativa de la respuesta en frecuencia de los controles. En base a esta respuesta, se puede decir que el controlador PI es el más adecuado para controlar el sistema dado que no presenta pico de resonancia y la amplificación en altas frecuencias es baja en todos los casos.

ENTRADA/SISTEMA	$a_{cc} \text{ MAX (m/s}^2\text{)}$	$T_{ss} \text{ (s)}$
ESCALÓN/LA	1,07	16,6
ESCALÓN/LCP	0,0235	756
ESCALÓN/LCPI	$2,67 \times 10^{-5}$	22,8
ESCALÓN/LCPID	0,0619	0,358

Tabla 4.3. Comparativa lazo abierto con controladores P, PI, PID

Observando la Tabla 4.3 la solución más adecuada es la del controlador PID.

## 4.4. MODELADO DEL ACTUADOR

### 4.4.1. INTRODUCCIÓN – MODELADO DEL ACTUADOR

A la hora de hacer los ensayos en la ménsula hay que tener en cuenta el modelo del actuador. Dado que el actuador en realidad es un generador de funciones (según el fabricante) está fabricado para el análisis y no para el control como se está usando en este TFG. Para evitar la saturación del actuador, se han modificado las ganancias de las ecuaciones 4.20 y 4.26 dentro de los valores permitidos. Por lo tanto se va a modelar el actuador de la forma más sencilla, excitándola con una onda cuadrada de muy baja frecuencia y amplitud 1 Vcc, se deja que el sistema se estabilice, se mide el desplazamiento estacionario  $h_{ss}$  y se calcula la fuerza del actuador. Este ensayo se ve en la Figura 4.40.

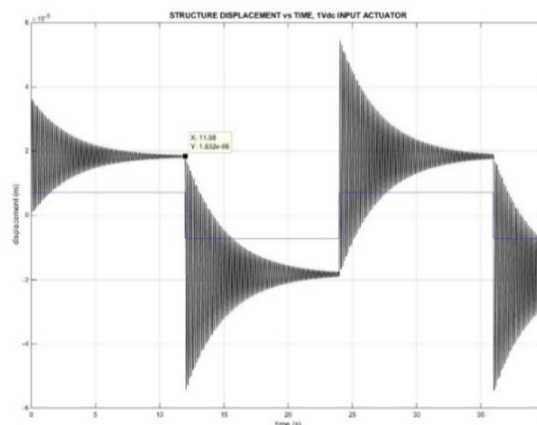


Figura 4.40. Modelado del actuador de la ménsula correspondiente al artículo de la referencia 2

Con referencia a trabajos anteriores [2], el valor de la fuerza del actuador es de 7,09 mN/V. Tomando este valor como expresión de función de transferencia del actuador se vuelve a simular los casos del apartado anterior.

Hay que tener en cuenta la saturación que tiene el actuador de -10V...+10 V. El esquema resultante en lazo cerrado es el que se ve en la Figura 4.41.

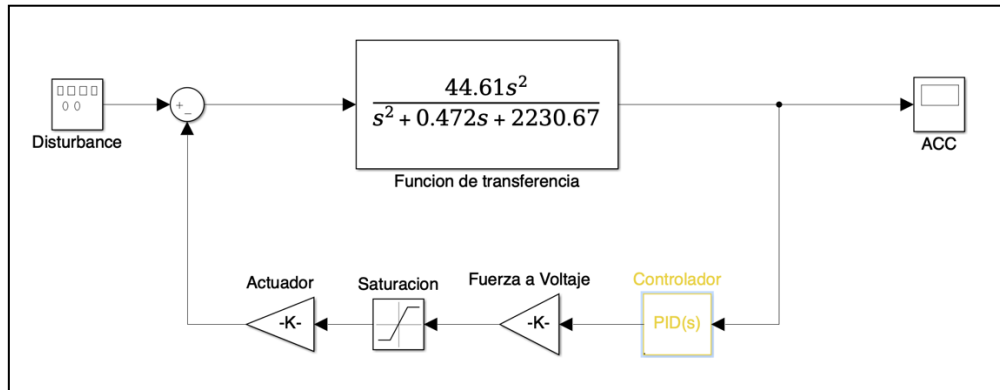


Figura 4.41. Modelo del sistema en lazo cerrado con el actuador

Una vez obtenido este modelo, se van a estudiar los casos en los que se usan el controlador PI y PID.

#### 4.4.2. CONTROLADOR PI CON FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA DEL ACTUADOR

El actuador aparece después de la saturación de -10...+10V, por lo que baja mucho la ganancia del controlador aunque se aumente. En la Figura 4.42 se puede ver la respuesta temporal frente a una entrada escalón.

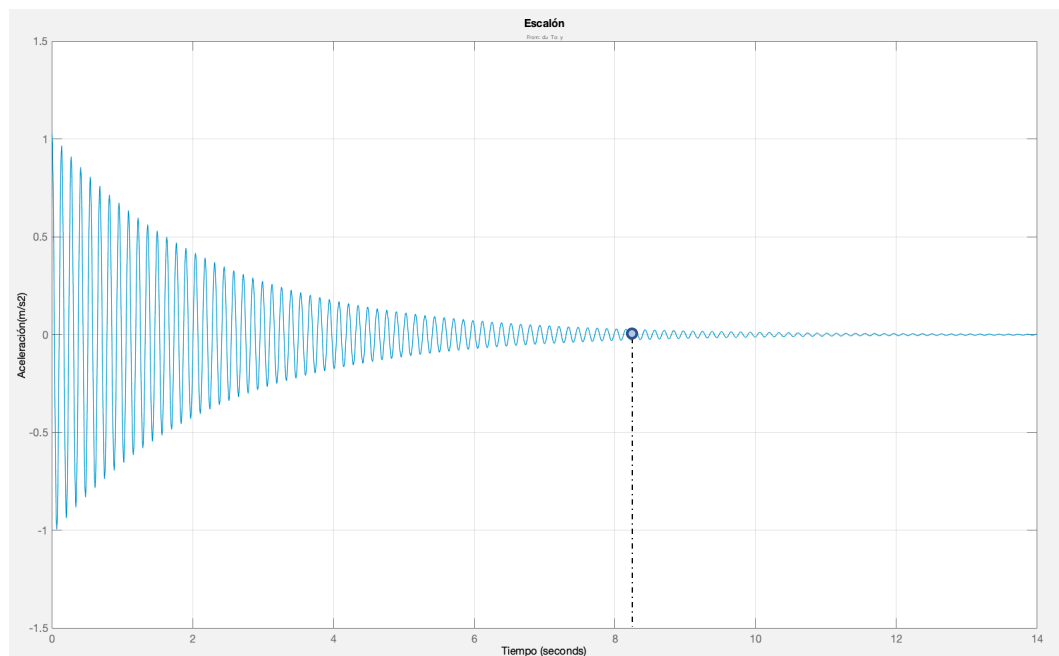


Figura 4.42. Respuesta escalón con controlador PI con actuador

Se puede apreciar en la Figura 4.42 que el actuador mejora la calidad del control permitiendo que el tiempo de establecimiento baje a 8,2 segundos pero se queda muy por debajo de los resultados sin el actuador.

### 4.4.3. CONTROLADOR PID CON FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA DEL ACTUADOR

En este apartado se estudia el caso del controlador PID contemplando la acción del actuador, como se ha hecho en el apartado anterior con el controlador PID. En la Figura 4.43 se ve la respuesta temporal del controlador con el actuador frente a una entrada escalón.

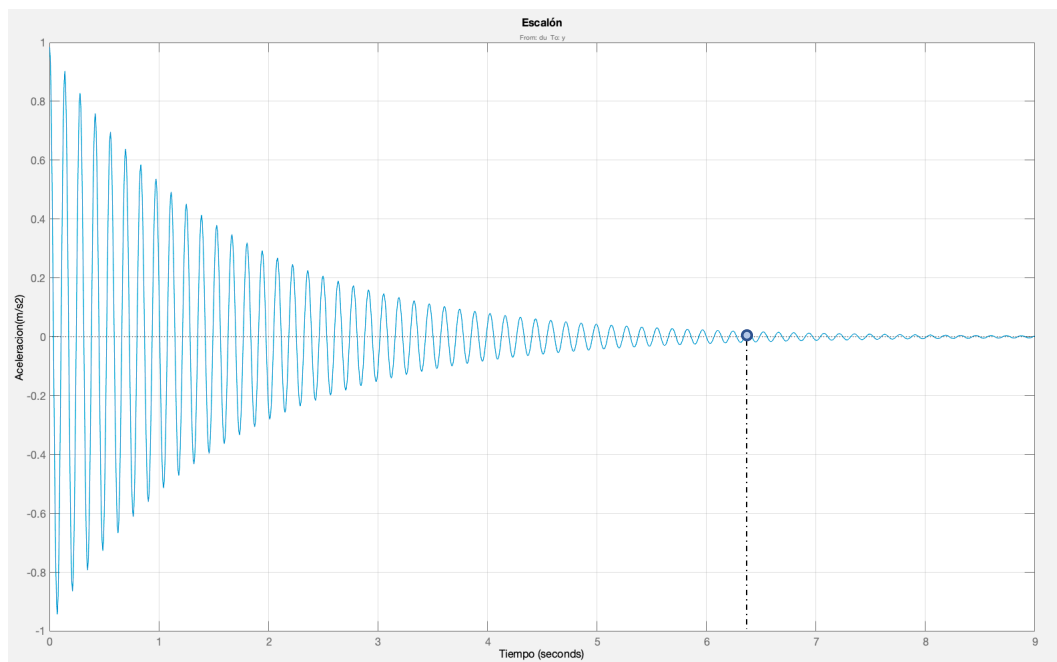


Figura 4.43. Respuesta escalón con controlador PID con actuador

Como se puede observar en la Figura 4.43 el controlador PID con el actuador es el que mejor se comporta. Ambos controles no actúan sobre la ganancia pero si corrigen el tiempo de establecimiento.

### 4.4.4. COMPARATIVA DEL LAZO ABIERTO FRENTE A LOS CONTROLES PI, PID CON ACTUADOR

Por último se comparan los resultados obtenidos con el fin de ver que control es el que mas adecua. La primera comparación es la que se muestra en la Figura 4.44, que refleja la repuesta temporal del sistema en lazo abierto frente al sistema controlado por el controlador PI y el controlador PID ambos considerando el efecto del actuador.

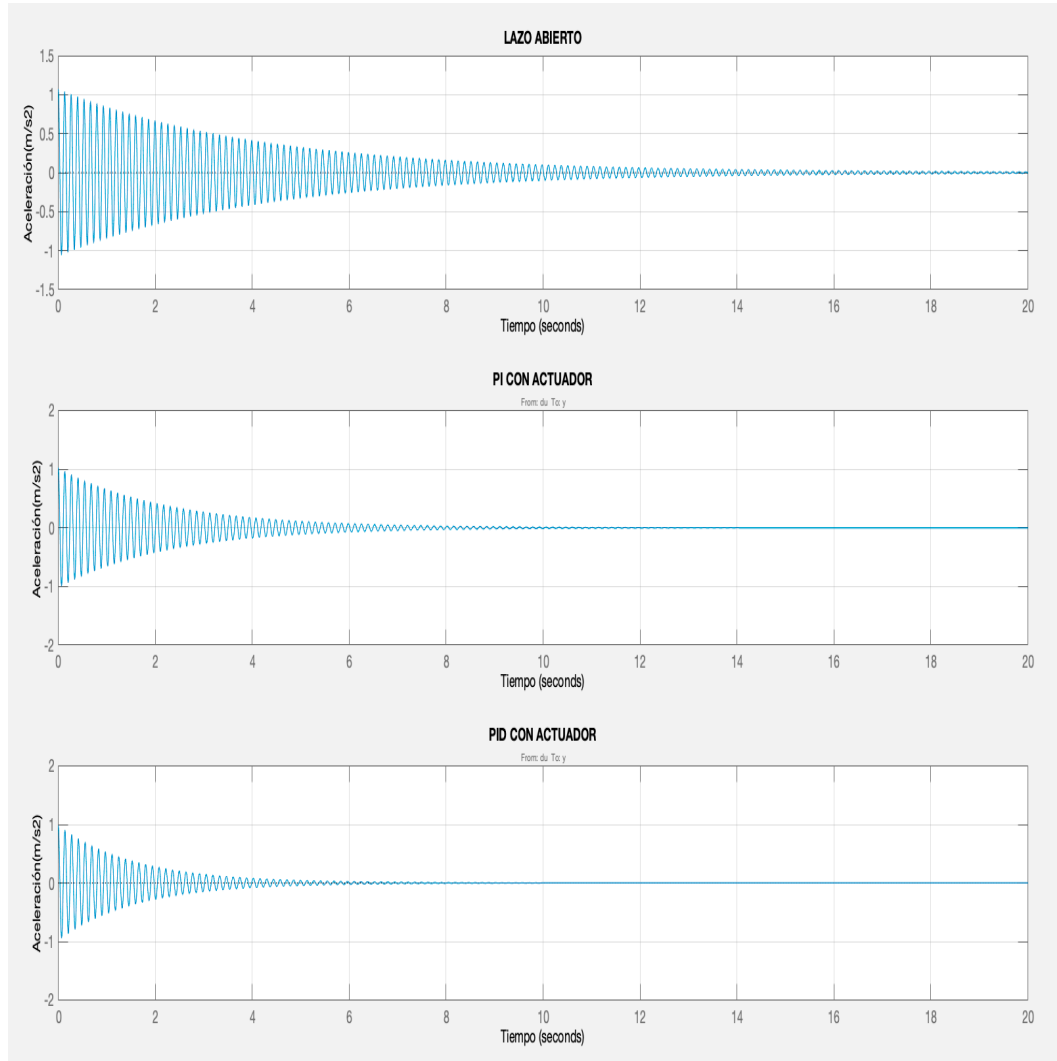


Figura 4.44. Comparativa respuesta temporal del sistema LA con PI y PID con actuador

En la Figura 4.44 se ve la comparativa la respuesta temporal para los casos comentados anteriormente. Se deduce de la figura que el controlador que mejor se comporta es el PID con actuador.

Otra comparación es mirar sus respuestas en frecuencia. En la Figura 4.45 se ve la comparativa de la respuesta en frecuencia de los casos anteriores.



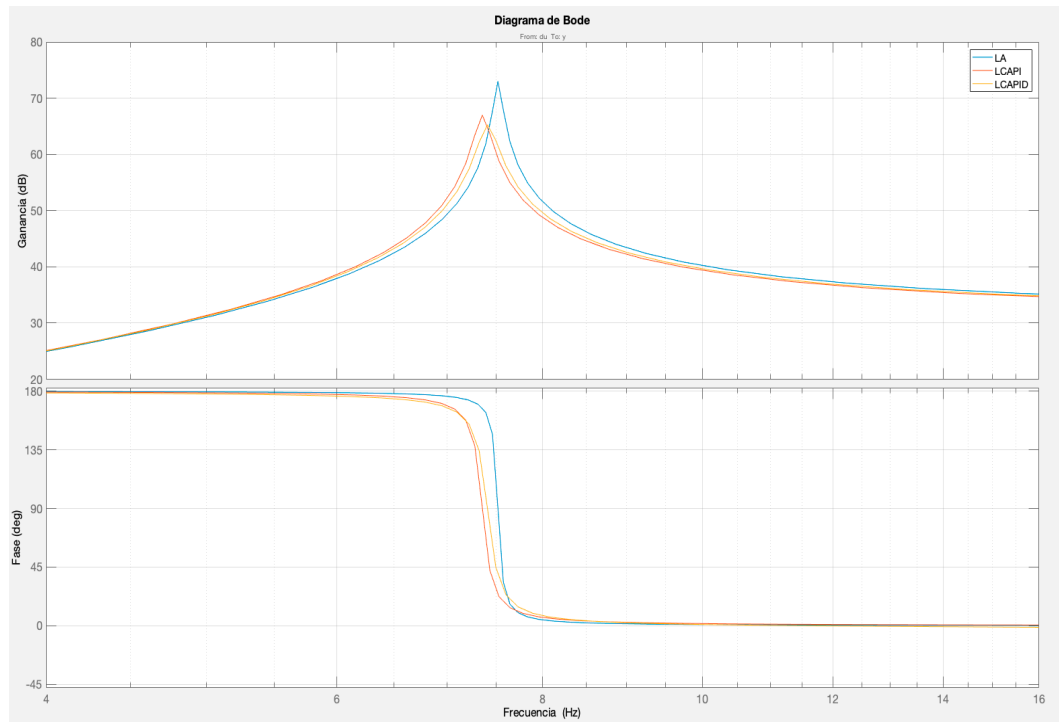


Figura 4.45. Comparativa respuesta frecuencia del sistema LA con PI y PID con actuador

En la Figura 4.45 se ve que la respuestas en frecuencia son parecidas, ambas presentan picos de resonancia pero el PID a frecuencia superior a la del PI. Esto implica que el PID deberá ser más rápido que el PI (mayor ancho de banda).

Reflejando los resultados en la Tabla 4.4 se ve el comportamiento en los distintos casos.

ENTRADA/SISTEMA	acc MAX (m/s <sup>2</sup> )	T <sub>ss</sub> (s)
ESCALÓN/LA	1,07	16,6
ESCALÓN/LCPI ACT	0,97	8,2
ESCALÓN/LCPID ACT	0,9	6,4

Tabla 4.4. Comparativa LA, PI y PID

Dada la poca potencia del actuador el control empeora bastante. Mejora las aceleraciones máximas y los tiempos de establecimiento. Igualmente si que muestra unos resultado interesantes y anticipa lo que sucederá en las pruebas reales sobre la ménsula.



## CAPITULO 5. DISEÑO DEL CONTROLADOR PARA LA ESTRUCTURA REAL

### 5.1. INTRODUCCIÓN

Una vez hallado el controlador para la ménsula se va a estudiar el caso real en el que se va a aplicar. Este caso es la pasarela peatonal del museo de la Ciencias en Valladolid (Figura 5.1).

La pasarela fue construida en el 2004 y es una estructura de celosía de 234m compuesta por cuatro vanos: tres de vigas tubulares de acero y una de hormigón blanco, todos ellos con un piso de chapa perforada (antes de madera).

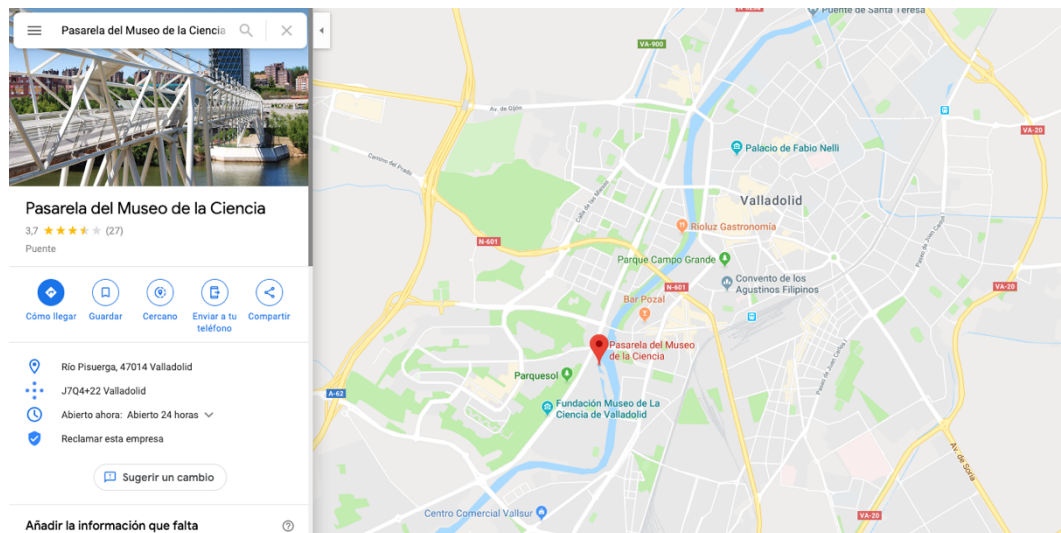


Figura 5.1. Localización de la pasarela peatonal del museo de la ciencia

Está ubicada en Valladolid (España) y cruza el rio Pisuerga uniendo el museo de la Ciencias con el centro de la ciudad (Figura 5.2).



Figura 5.2. Foto aérea de la pasarela del museo de la ciencia

El vano principal (vano 3) (Figura 5.3), con post-tensado por dos sistemas de cables externos (transversal y longitudinal), es de 111m; el segundo vano (vano 2) es de 51 m, y los otros dos vanos son más cortos y más rígidos. El sistema de cables externos del vano 3 tiene razones estéticas (el diseño original del arquitecto José Rafael Moneo se basó en la forma de una cesta de pescado) y razones estructurales.



Figura 5.3. Localización de los vanos en la pasarela

### 5.1.1. OBJETO DE ESTUDIO

En este TFG el vano de estudio es el vano 2 (Figura 5.4), ya que es el más sensible a la vibración. Estas vibraciones son producidas por el paso de los peatones produciendo incomodidad e inestabilidad en la estructura.



Figura 5.4. Vano 2 de la pasarela peatonal

## 5.2. MODELADO DE LA PASARELA PEATONAL

### 5.2.1. CARACTERIZACIÓN DE LA PASARELA

El modelo de la pasarela peatonal se ha identificado de manera precisa y correcta en trabajos anteriores [3]. Hay que tener en cuenta que en este modelo antiguo el suelo de la pasarela era de madera y ahora es de chapa perforada.

El modelo está formado por la suma de modelos de sistemas de segundo orden:

$$G(s) = \frac{\text{aceleración}}{\text{Fuerza}} = \frac{a(s)}{F(s)} = \sum_{i=1}^N \frac{\alpha_i s^2}{s^2 + 2\delta_i w_i s + w_i^2} \quad (5.1)$$

La entrada es la fuerza aplicada y la salida la aceleración que sufre el sistema (pasarela):

$N$  = Numero de modos

$\alpha$  = Inverso de la masa modal del modo correspondiente

$\delta$  = Amortiguamiento del modo correspondiente

$w$  = Frecuencia natural del modo correspondiente

El modelo identificado (OMA, Operation Modal Analysis, Análisis modal operacional) dio como resultado:

$$G(s) = \frac{5,40 \cdot 10^{-5} s^2}{s^2 + 0,3079s + 483,6} + \frac{5,85 \cdot 10^{-5} s^2}{s^2 + 0,5887s + 3451} \quad (5.2)$$

$$G(s) = \frac{0,0001125s^4 + 4,98 \cdot 10^{-5} s^3 + 0,2146s^2}{s^4 + 0,8966s^3 + 3935s^2 + 1347s + 1,669 \cdot 10^6} \quad (5.3)$$

Como se puede observar el sistema tiene dos términos de segundo orden, por lo tanto tiene dos modos. A continuación, en la Figura 5.5 se simula su respuesta en frecuencia desde 0,1 a 100 Hz.

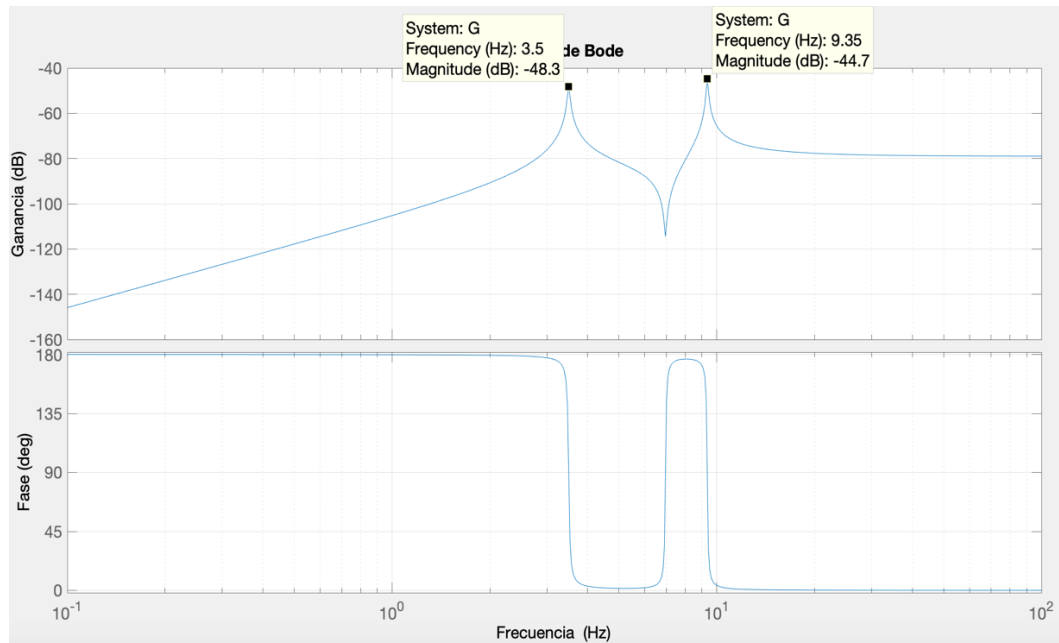


Figura 5.5. Respuesta en frecuencia del sistema de la pasarela peatonal

Se puede observar que tiene dos picos de resonancia. Uno se produce a 3,5 Hz y el otro a 9,3 Hz.

### 5.2.2. CARACTERIZACIÓN DEL ACTUADOR

El actuador que se va a utilizar es el shaker APS 400 ELECTRO-SEIS de la marca APS Dynamics [10]. Este actuador ya está descrito en el capítulo 2 de esta memoria. Este dispositivo también fue objeto de estudio en trabajos anteriores y es de ahí de donde se va a tomar su función de transferencia [3].

Su función de transferencia corresponde al siguiente modelo:

$$G_A(s) = \left( \frac{K_A s^2}{s^2 + 2\delta_A w_A s + w_A^2} \right) * \left( \frac{1}{s + \varepsilon} \right) \quad (5.4)$$

Dónde:

$\alpha$  = Inverso de la masa modal

$\delta$  = Coeficiente de Amortiguamiento = 0,21

$w$  = Frecuencia natural = 8,17 rad/s = 1,3 Hz

$\varepsilon$  = Polo para la frecuencia de corte del actuador = 131,94

Dando valores a las variables la función de transferencia que nos queda es la siguiente:

$$G_A(s) = \frac{22400s^2}{s^3 + 135,4s^2 + 519,4s + 8803} \quad (5.5)$$

La respuesta en frecuencia del actuador es la que se muestra en la Figura 5.6:

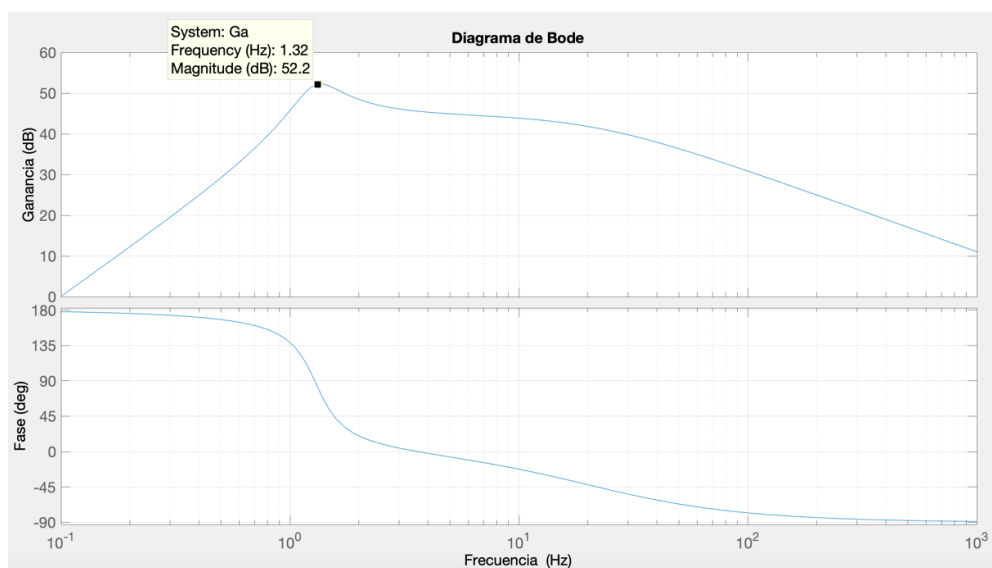


Figura 5.6. Respuesta en frecuencia del actuador SHAKER

### 5.3. DISEÑO DEL CONTROLADOR

En este apartado se va a diseñar el controlador para el sistema pasarela peatonal. El procedimiento es el mismo que en el de la ménsula, por medio del lugar de las raíces, se va a elegir los polos y los ceros más adecuados para diseñar el controlador más apropiado.

En este caso se tiene en cuenta el sistema de la pasarela interactuando con el modelo del actuador. También se va a utilizar un acelerómetro distinto al de la ménsula, que es el de la marca MEMSIC [9]. El actuador es el shaker de la marca APS Dynamics que está limitado en 400 N con una entrada de  $\pm 2V$ . Todo esto se ve reflejado en el siguiente esquema que representa la Figura 5.7.

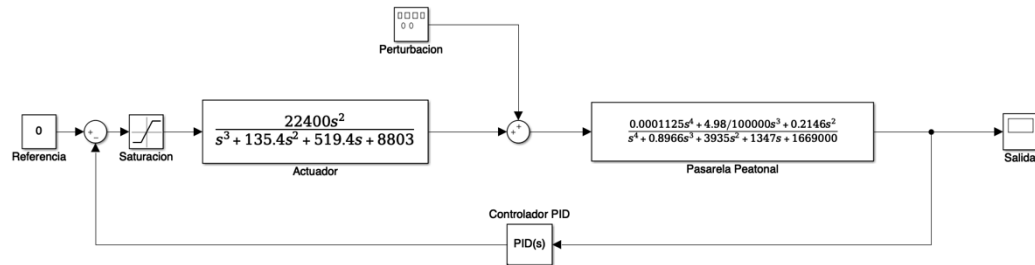


Figura 5.7. Sistema en lazo cerrado en SIMULINK

Con el esquema propuesto, en la Figura 5.8 se representa su lugar de las raíces del sistema completo.

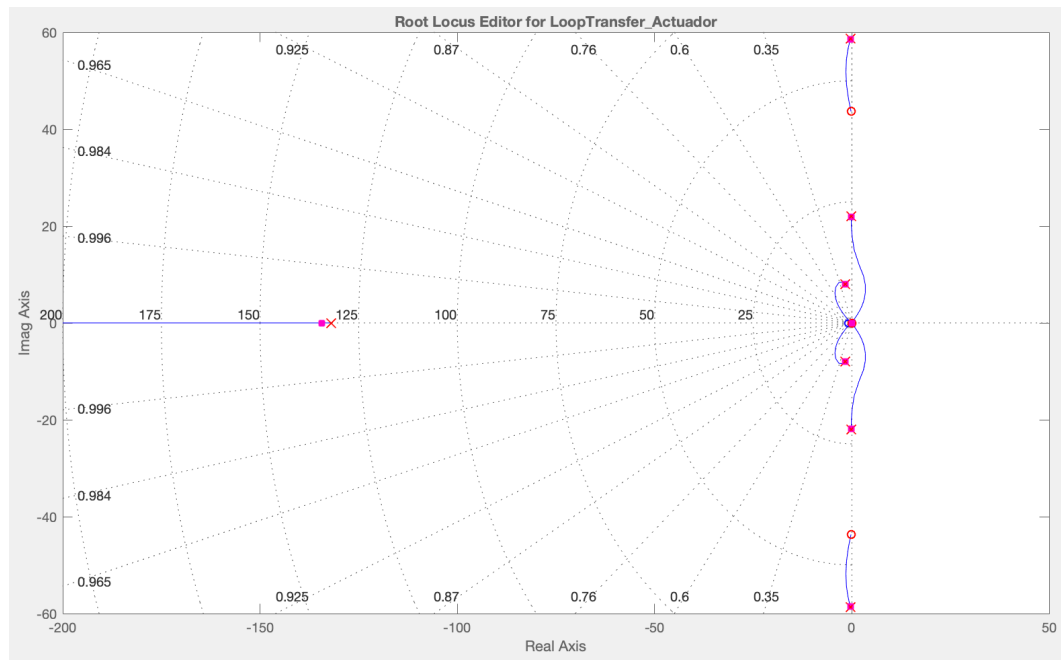


Figura 5.8. Lugar de las raíces del sistema



Como se puede observar parte del lugar de las raíces se encuentra en el lado derecho de la parte real. Esto provoca que el sistema sea inestable.

Con el controlador PID se debe conseguir que el sistema no trabaje en esta parte inestable y si es posible también que elimine dicha zona de inestabilidad.

Otro factor a tener en cuenta es la respuesta en frecuencia del sistema en lazo abierto (Figura 5.9), con el objetivo de observar su comportamiento y eliminar frecuencias de resonancia o por lo menos disminuirlos.

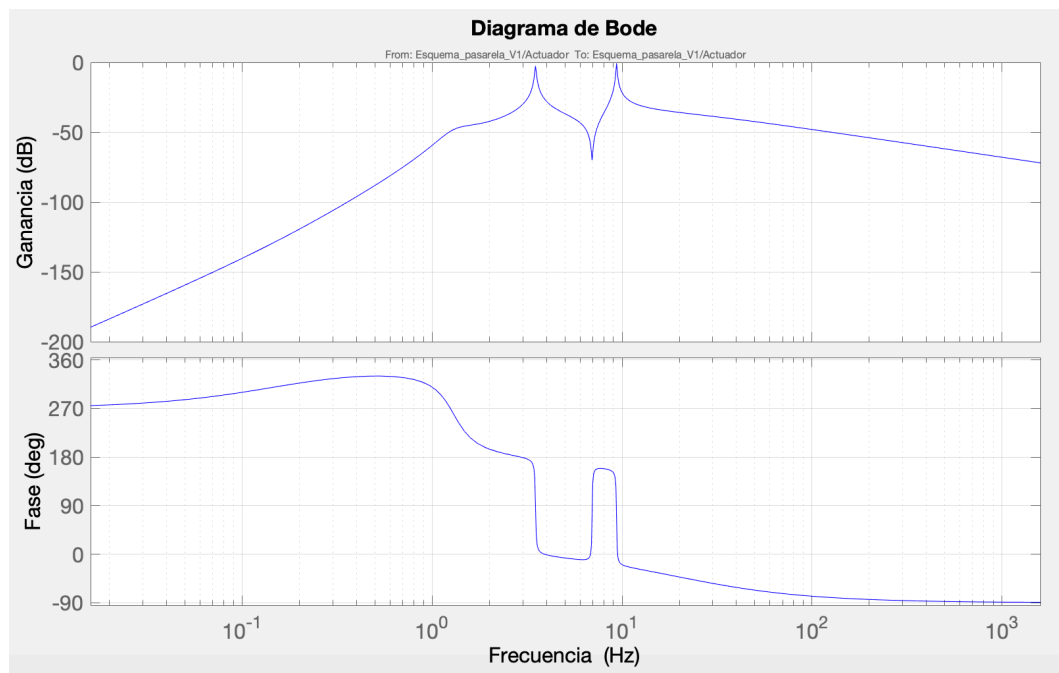


Figura 5.9. Comportamiento del sistema en lazo abierto

Por medio de simulaciones y pruebas en la herramienta Matlab y Simulink todo ello basado en la teoría de sistemas de control, el PID que se obtiene es el siguiente:

$$\begin{aligned} K &= 2 \\ T_i &= 0.01 \\ T_d &= 0.02 \end{aligned}$$

La función de transferencia que se corresponde con el control PID es la siguiente:

$$PID(s) = \frac{0,00048s^2 + 0,028s + 2}{4e - 5s + 0,01} \quad (5.6)$$

El lugar de las raíces del sistema con el PID es el que se muestra en Figura 5.10 y en la Figura 5.11 se muestra la zona ampliada del lugar de las raíces sobre la cual se va a trabajar.

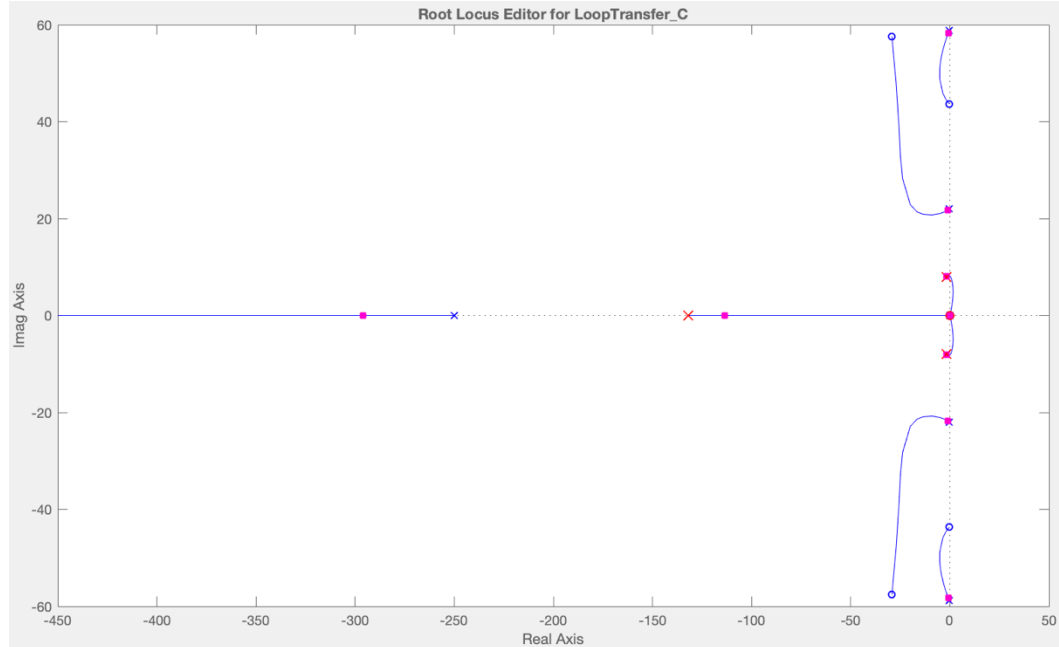


Figura 5.10. Lugar de las raíces con controlador PID

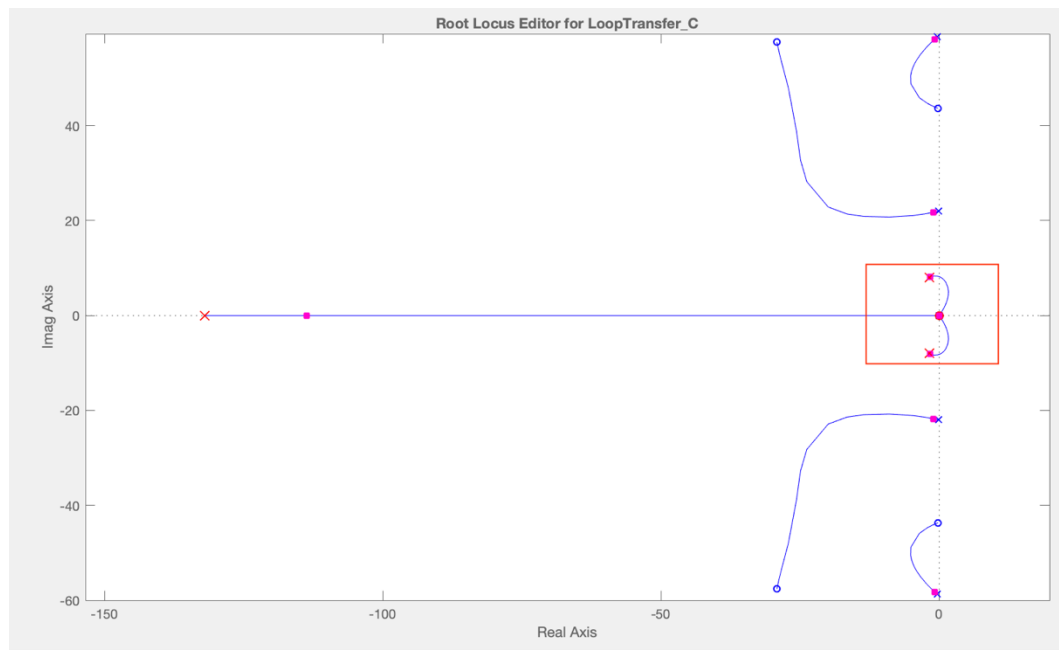


Figura 5.11. Zona en el lugar de las raíces en la que se va a trabajar

Se puede observar que la parte que entra en el semiplano derecho es debida a la dinámica del actuador, provocando de esta manera inestabilidad. La ganancia limite antes del que el sistema se vuelva inestable es de  $K_c=10,3$  N/(m/s<sup>2</sup>).

En nuestro caso el valor escogido de  $K_c=2$  lejos del valor inestable citado.

Hay que recordar que el actuador tiene limitada la entrada en  $\pm 2V$  provocando una no linealidad en forma de saturación ayudando a que el sistema no sea inestable.

El siguiente paso es hacer una comparativa de la respuesta en frecuencia del sistema en lazo abierto con actuador y del sistema en lazo cerrado y con el controlador PID. En la Figura 5.12 se muestran dichas comparaciones.

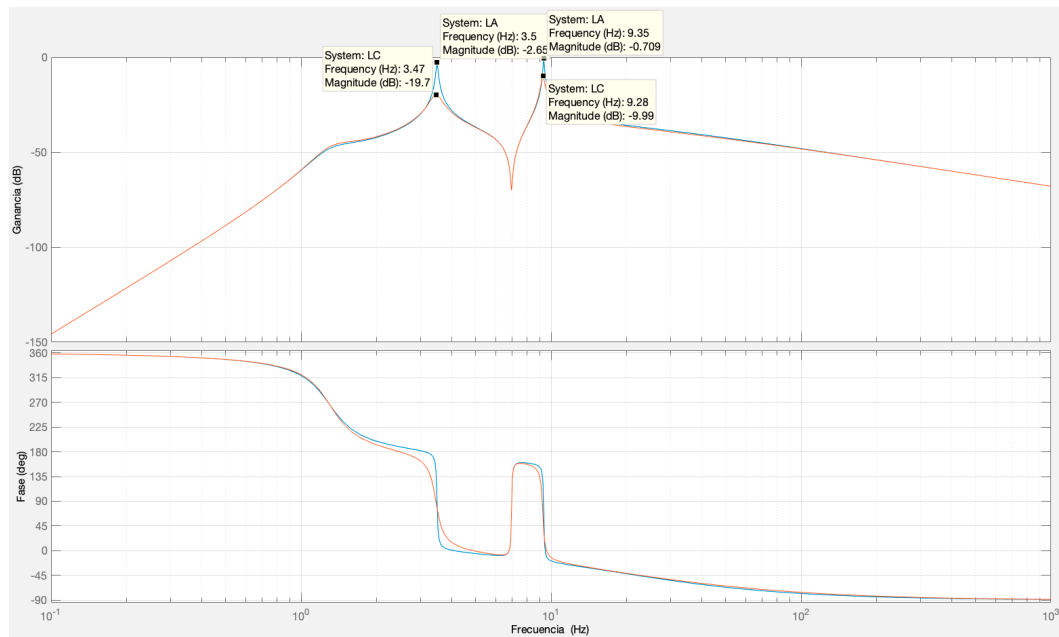


Figura 5.12. Diagrama de bode del sistema sin controlador con controlador PID

Como se puede observar el controlador reduce los dos picos de resonancia. El primero lo reduce en 17,1 dB y el segundo lo reduce en 4,2 dB.

Otra prueba que se realiza es el comportamiento del sistema ante una entrada impulso. En la Figura 5.13 se ve la comparativa.

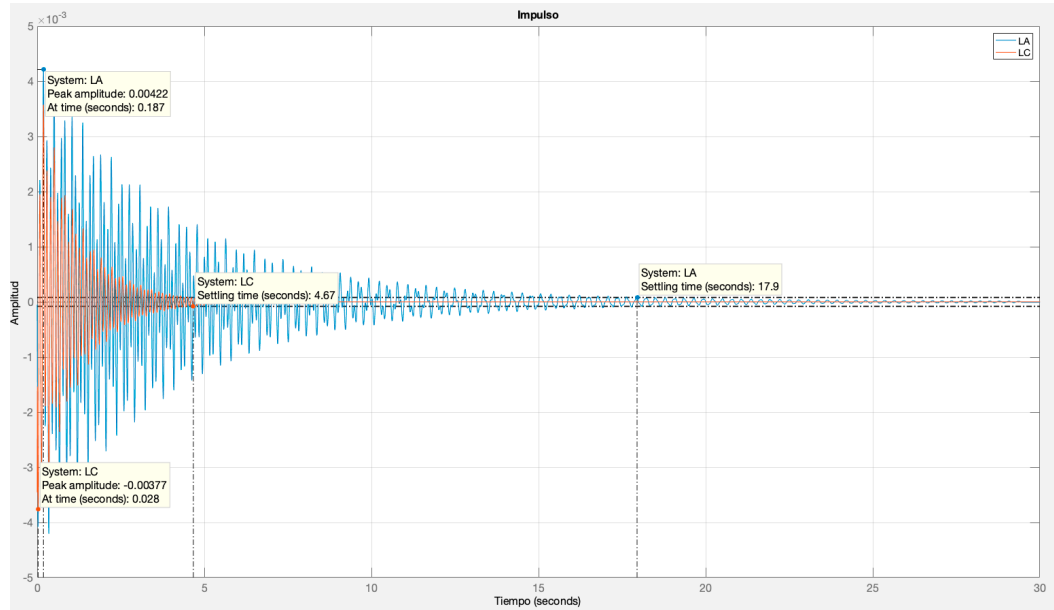


Figura 5.13. Comparativa del sistema ante entrada impulso

Como se puede apreciar en la Figura 5.13 la amplitud de pico respecto con el lazo abierto no se ha reducido mucho. La mejora considerable se produce en el tiempo de establecimiento. Pasa de un tiempo de 17,9 segundos en lazo abierto a un tiempo de 4,67 segundos con el controlador PID.

En la Figura 5.14 se observa el modelo del sistema pasarela en lazo abierto y el sistema de la pasarela en lazo cerrado controlado por el PID y con el limitador de voltaje de  $\pm 2V$ . Se introduce una fuerza de 1000 N que equivale a una persona de 100 Kg saltando. Esta fuerza se expresa en forma de onda cuadrada de frecuencia 3,5 Hz con amplitud de pico a pico de 1000N (-500,500) con el offset en cero. Es decir se lleva el sistema a resonancia para ver el comportamiento sin control y con control.

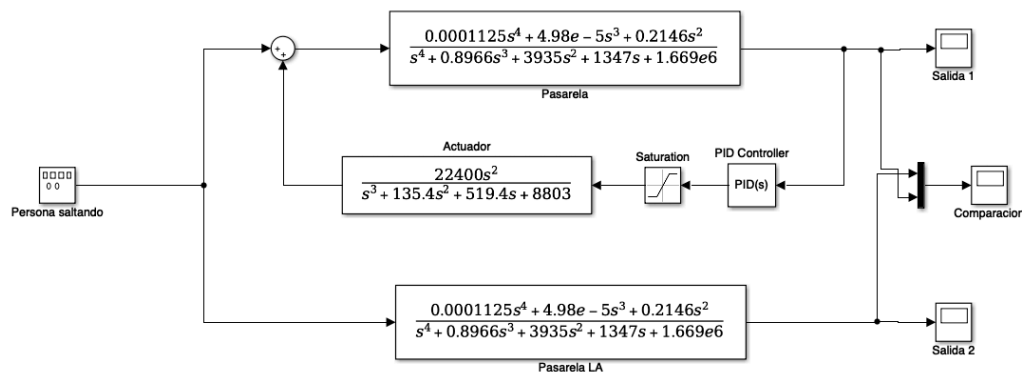


Figura 5.14. Diagrama de bloques del sistema en lazo abierto con sistema controlado

Si comparamos las señales de salida de ambos bloques nos queda la gráfica que se ve en la Figura 5.15.

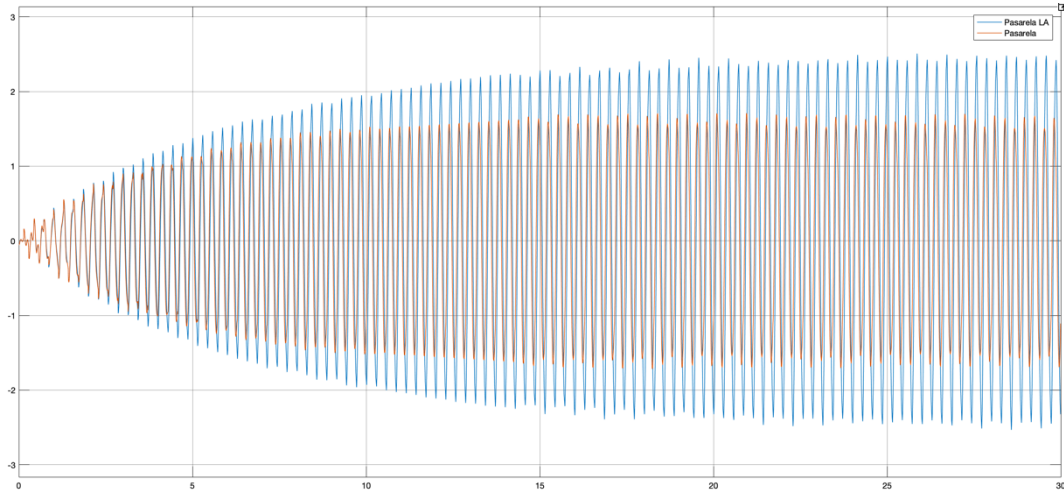


Figura 5.15. Sistema en lazo abierto vs sistema controlado con PID ante entrada onda cuadrada

Se puede observar que la salida con el PID mejora respecto a la salida en lazo abierto. La amplitud con el PID es de 1,8 y la amplitud sin el PID es de 2,5. Haciendo cálculos nos queda lo siguiente:

$$\frac{\text{Amplitud con PID}}{\text{Amplitud sin PID}} = \frac{1,8}{2,5} = 0,72 = 72\% \quad (5.7)$$

Como se deduce en la ecuación 5.7, el controlador PID mejora en un 28% la amplitud generada.

En la norma UNE-ISO 2631-1:2008, *Vibraciones y choques mecánicos. Evaluación de la exposición humana a las vibraciones del cuerpo entero* [15] se utiliza otro indicador para medir la aceleración que afectan a las personas. Este indicador es el MTWV y su fórmula es la siguiente:

$$\text{MTWV} = \max [a_w(t_0)] \quad (5.8)$$

$$a_w(t_0) = \left\{ \frac{1}{\tau} \int_{t_0-\tau}^{t_0} [a_w(t)]^2 dt \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (5.9)$$

Donde:

$a_w(t)$  = aceleración instantánea

$\tau$  = Tiempo de integración para el promedio móvil

$t$  = Tiempo (variable de integración)

$t_0$  = Tiempo de observación (tiempo instantáneo)

Es decir, es el valor máximo de la vibración transitoria durante un periodo de medición. Según la norma se recomienda utilizar una constante de

tiempo de integración ( $\tau$ ) igual a 1 segundo, correspondiendo a una constante de tiempo de integración “baja”, en sonómetros.

Analizando las respuestas que se generan en la Figura 5.16, lo que se hace es calcular el RMS con frecuencia 1 Hz y después se calculan los valores máximos para ver la mejora producida. Estos valores de aceleración están expresados en la unidad de medida  $m/s^2$ .

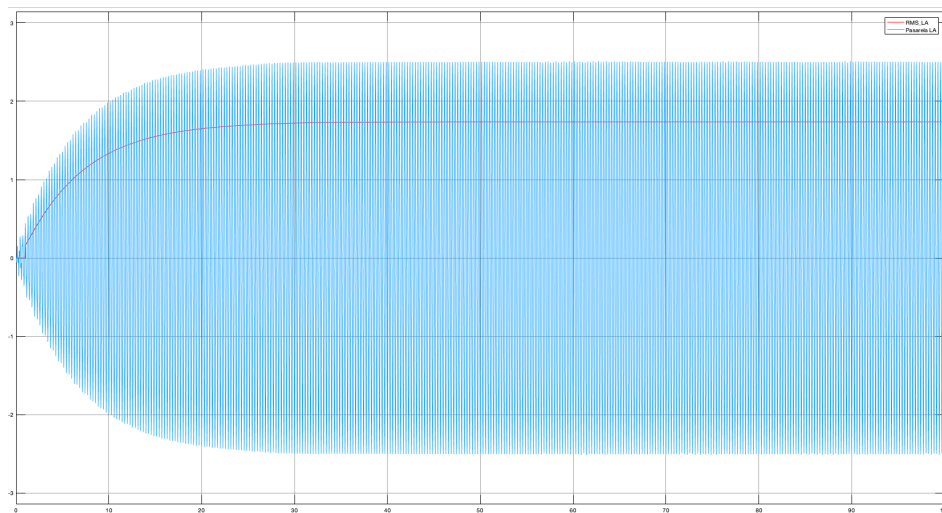


Figura 5.16. MTW con sistema en LA

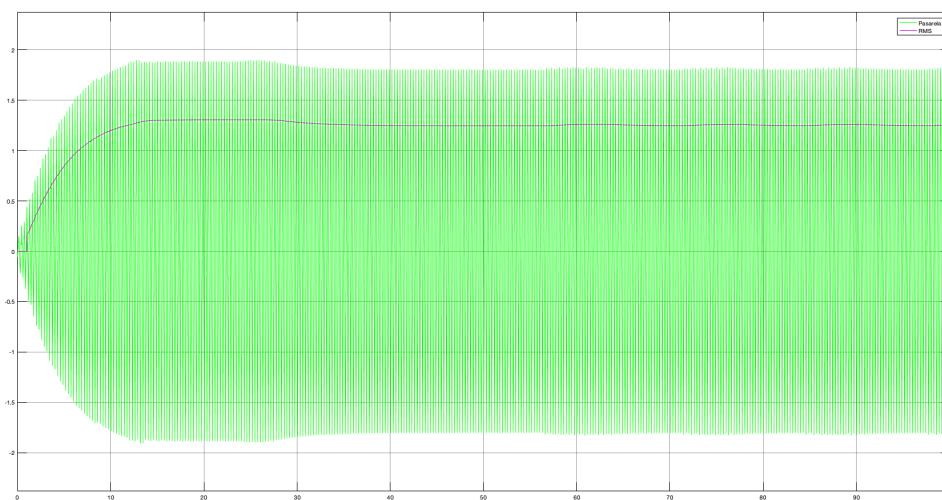


Figura 5.17. MTW con sistema controlado con PID

Si se calculan los máximos en cada caso, se observa lo siguiente:

$$\text{Max (RMS sin PID)} = 1.7369$$

$$\text{Max (RMS con PID)} = 1.2841$$

La relación que se haya para este caso es el siguiente:

$$\frac{\text{RMS con PID}}{\text{RMS sin PID}} = \frac{1.2841}{1.7369} = 0.73 = 73\% \quad (5.10)$$

Se obtienen los mismos resultados que estudiando la amplitud. La mejoría es del 27%, un resultado suficiente que cumple con los objetivos.

Como se puede observar el siguiente paso es el desarrollo del software con el hardware mencionado en el capítulo 2 para implementarlo en la pasarela peatonal y realizar las pruebas oportunas.

### 5.4. IMPLEMENTACION EN LA PASARELA

El último paso es la implementación del PID calculado en el apartado anterior en la pasarela peatonal. La forma de implementar el controlador es llevando de forma física el Shaker con su amplificador y un armario de control donde se encuentra el PLC con el HMI y el acelerómetro.

El sensor que se va a usar en este caso es el de la marca MEMSIC modelo CXL04GP1 [9]. El controlador que se va a utilizar es el mismo que el de la ménsula, el PLC Siemens 1212C [5]. Por último, el actuador que se va a utilizar es el shaker APS 400 ELECTRO-SEIS de la marca APS Dynamics [10]. Estos dispositivos ya se han comentado en el capítulo 2 referido al hardware utilizado. Como el sensor y el actuador de la pasarela tienen distintas características que el sensor y el actuador de la ménsula, mediante HMI se va a poder hacer una configuración inicial que nos permita seleccionar si nos encontramos en la ménsula o en la pasarela.

El producto que se ha diseñado en este TFG es un equipo portátil con el que se realizan las pruebas en campo. El diseño del equipo con sus componentes se pueden ver en la Figura 5.18 y en la Figura 5.19.

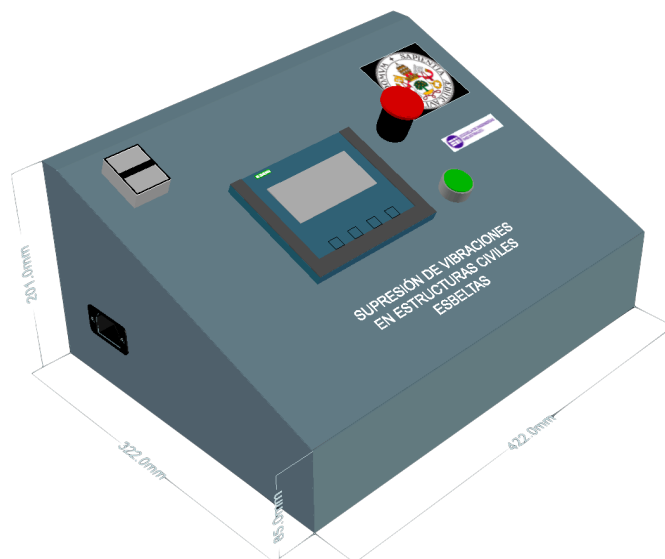
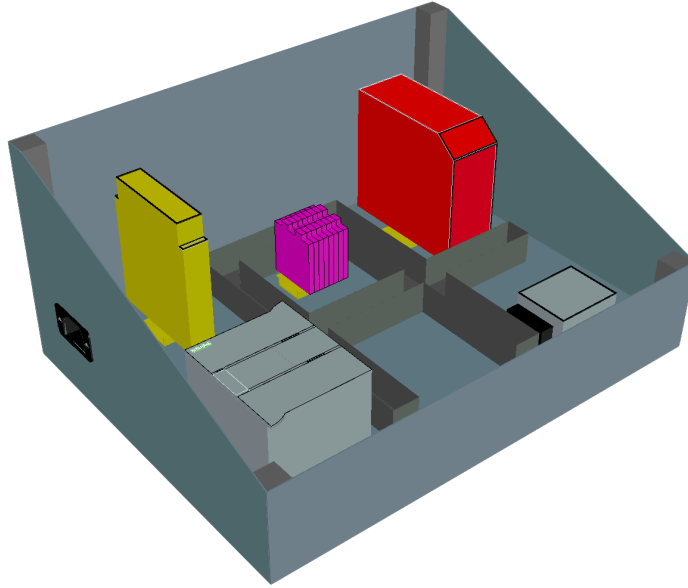


Figura 5.18. Exterior del producto para comercializar



*Figura 5.19. Interior del producto a comercializar*

Esta figura se corresponde con el diseño del maletín completo que se comentará más a fondo en el capítulo 8.

Una vez situados en la pasarela el shaker y el acelerómetro (parte vibratoria del vano), el equipo esta listo para hacer con él las pruebas correspondientes a los ajustes previos y validación de resultados.

Estas pruebas quedan propuestas para un TFG posterior dado que al haber modificado el piso de la pasarela cabe esperar que sean necesarios cambios en el PID.



## **CAPITULO 6. IMPLEMENTACION DEL PROGRAMA DE CONTROL**

### **6.1. INTRODUCCIÓN**

En los capítulos anteriores se ha estudiado la viabilidad del controlador PID en la ménsula. En este capítulo se estudiará la solución que se propone en este TFG para aplicar tanto en la ménsula como en la pasarela peatonal.

La configuración del sistema de control de la estructura que se va a gobernar se hará por HMI. Toda la parametrización de sensores y del controlador se va a poder ejecutar a través de una pantalla HMI.

Esta aplicación se ha desarrollado con la finalidad de que sea versátil y robusta.

Este capítulo se dividirá en dos partes:

- Explicación de la estructura del programa en el PLC
- Explicación de la programación y configuración del HMI

### **6.2. ESTRUCTURA DEL PROGRAMA EN EL PLC**

#### **6.2.1. INTRODUCCIÓN**

En este apartado se comentará la estructura del programa del PLC y de su esquema de programación.

El programa principal es un único programa el cual controla tanto parámetros de la ménsula como los parámetros de la pasarela peatonal. También gestiona las entradas y las salidas de HMI como su comportamiento para mostrar las pantallas. Toda interacción que se hace por HMI varía parámetros de programa y de su funcionamiento.

Se ha diseñado de esta manera para que la gestión sea fácil y permita posibles variaciones y mejoras en el futuro. También es una de las ventajas por la cual se ha escogido el uso de dispositivos Siemens, ya que gestionar todo de un solo código y de manera intuitiva permite una comprensión y un mantenimiento de lo más eficiente.

El bloque de condiciones generales de seguridad se ejecuta en cada ciclo de scan y verifica el estado de la seta de emergencia, el pulsador de emergencia que hay en el HMI, el pulsador de rearme y del relé de seguridad.

Este bloque permite la ejecución del programa de manera segura. Si las condiciones de seguridad no son las apropiadas, el programa no se ejecutará y se mostrará una alarma en el HMI (Figura 6.1).

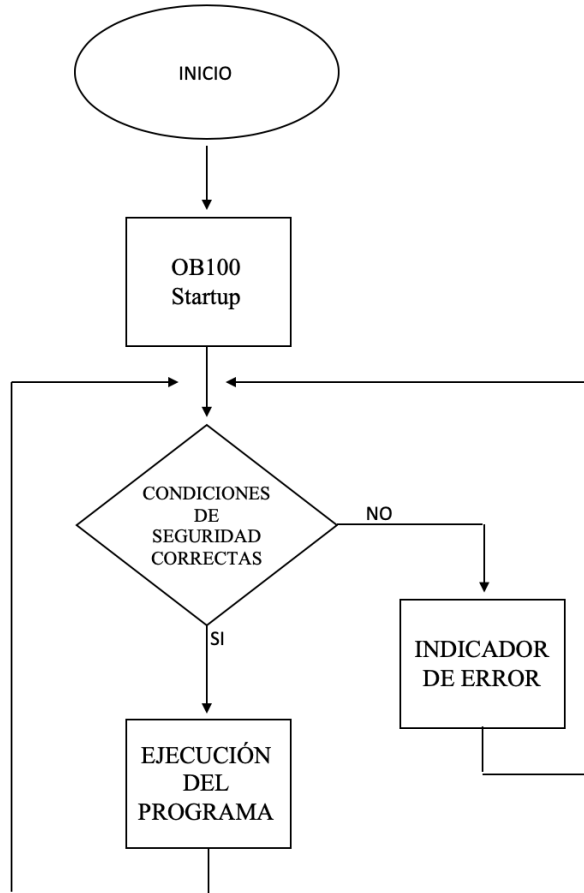


Figura 6.1. Estructura condiciones de seguridad

Una vez que se cumplen las condiciones de seguridad el programa se ejecuta siguiendo su estructura (Figura 6.2).

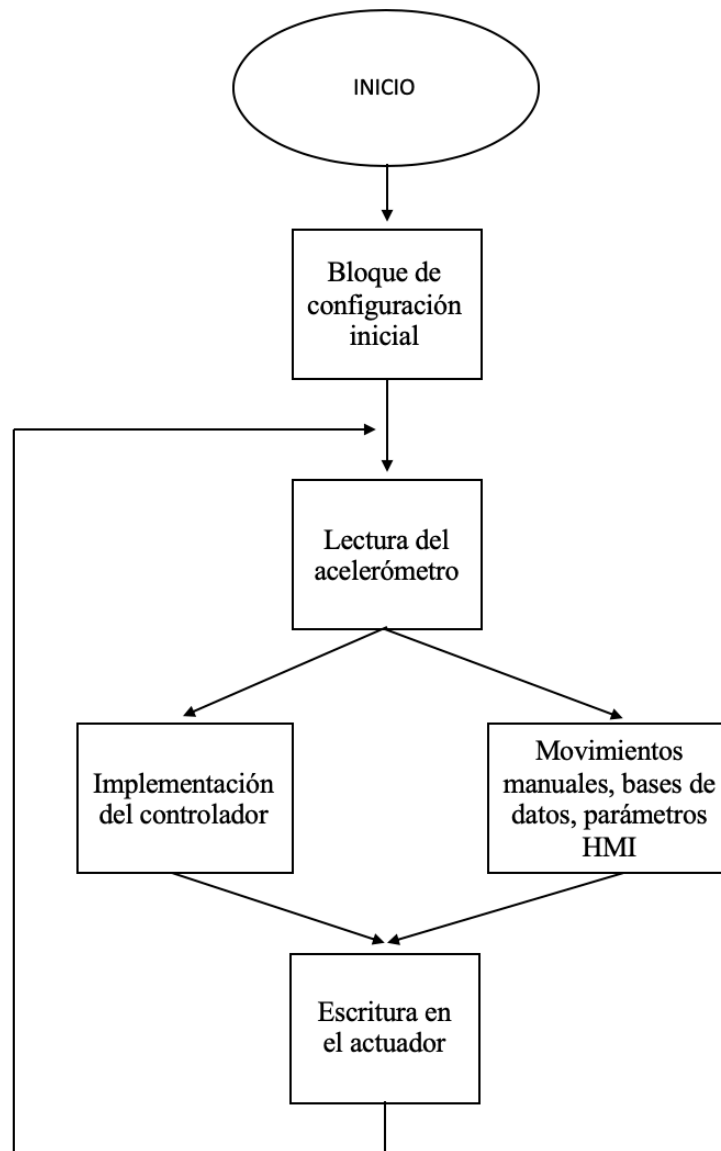


Figura 6.2. Estructura del programa

En los siguientes apartados se van a desarrollar cada uno de los bloques siguiendo las estructuras mencionadas anteriormente en las Figuras 6.1 y 6.2. Primero se mencionara el comportamiento de los distintos bloques en la ejecución del programa.

### 6.2.2. BLOQUES DEL PROGRAMA

La carpeta “Bloques de programa” está compuesta por cada uno de los bloques que ejecutan nuestro programa. Está compuesta por 4 OB, 8 FC, 4 FB y 7 DB (Bloques de datos). Figura 6.3. Se hará una breve mención en este apartado pero más adelante se detallará cada uno de los bloques.

Main [OB1]	B_CONFIGURACION_INICIAL [FC2]
ONDA_Generada [OB31]	B_CONFIGURACION_PARAMETROS [FC5]
PID_mensula [OB30]	B_DEFECTOS_MENSAJES [FC8]
Startup [OB100]	B_ENTRADAS_ANALOGICAS [FC3]
B_DATOS_ACELEROMETRO [DB8]	B_GENERAL_EQUIPO [FC1]
B_DEFECTOS_DB [DB1]	B_LECTURA_DATOS [FC6]
B_LECTURA_9999DATOS_DB [DB9]	B_SALIDAS_ANALOGICAS [FC7]
B_MENSAJES_DB [DB16]	B_SELECCION_MODO [FC4]
B_ONDA_Cuadrada_DB [DB3]	B_LECTURA_9999DATOS [FB2]
B_ONDA_Senoidal_DB [DB13]	B_REGISTRO_DATOS [FB1]
B_REGISTRO_DATOS_DB [DB7]	ONDA_CUADRADA [FB3]
	ONDA_SENOIDAL [FB4]

Figura 6.3. Bloques del programa

### 6.2.2.1. BLOQUES OB

Hay 4 bloques OB en el programa (de color morado en la Figura 6.3) los cuales tienen distinto comportamiento. El bloque OB1 (Main) es el bloque principal del programa y en el cual se desarrolla toda la ejecución del mismo. Los bloques OB30 (PID\_mensula) y OB31 (ONDA\_Generada) son bloques de ejecución cíclica que se ejecutan con un periodo de tiempo definido por el usuario y funcionan de forma paralela al OB1. Lo que comparten son las mismas variables globales. Por último el OB100 (Startup, arranque) es un bloque inicial que solo se ejecuta en el primer ciclo de scan. Este bloque se activa cuando se pasa el PLC de STOP a RUN. En la Figura 6.4 se observa el funcionamiento de los bloques en este programa.

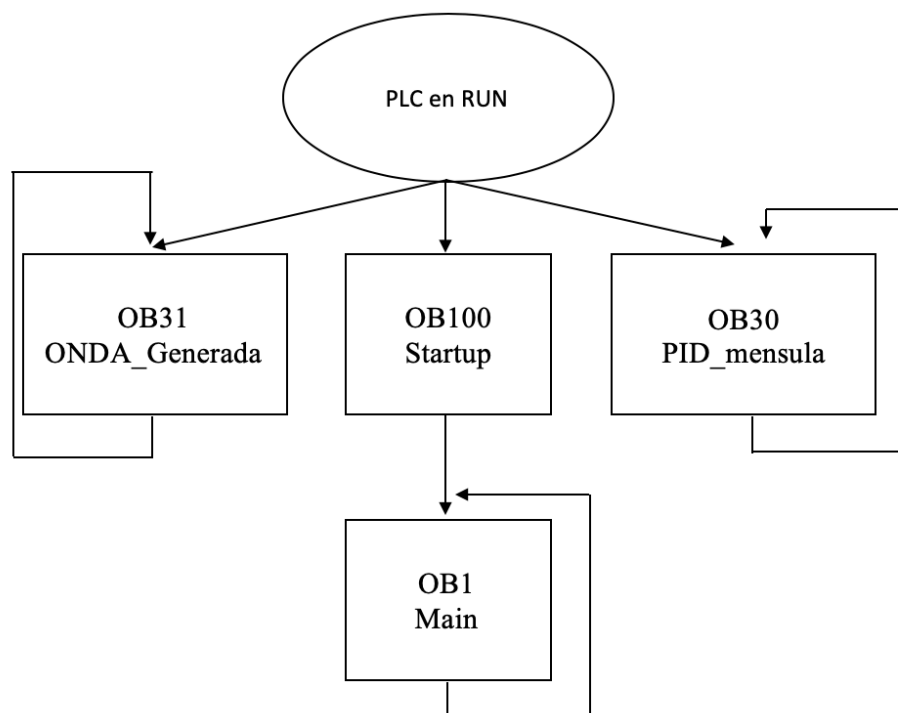


Figura 6.4. Funcionamiento bloques OB

### 6.2.2.2. BLOQUES FC

Los bloques FC se utilizan para realizar operaciones sin la necesidad de guardar estados o valores numéricos en las variables. Otra utilidad es la de separar y organizar operaciones para no tener todo desarrollado en el bloque en el main. Haciendo un pequeño repaso, las funciones que se utilizan son: FC1 (Condiciones generales de seguridad), FC2 (Configuración inicial de los parámetros), FC3 (Entradas analógicas), FC4 (Selección de modo del PID), FC5 (Configuración de los parámetros), FC6 (Lectura de datos y almacenado en una DB), FC7 (Salidas analógicas) y FC8 (Bloque de administración de defectos y mensajes). Todos estos bloques se ejecutan de forma cíclica en el bloque Main.

### 6.2.2.3. BLOQUES FB

Los bloques FB son utilizados para realizar operaciones que conlleven un almacenamiento temporal de variables y para la gestión de datos a la hora de almacenarlos. En este caso los bloques son: FB1 (Registro de datos en archivo CSV), FB2 (Lectura de los 9999 datos), FB3 (Generador de onda cuadrada) y FB4 (Generador de onda senoidal). Los bloques FB2, FB3 y FB4 están programados en lenguaje SCL.

### 6.2.2.4. BLOQUES DB

Hay 7 bloques DB (bloques de datos) y sirven para almacenar el valor de las variables que se les asocia.

### 6.2.3. OB100: STARTUP

El OB100 es el primer bloque en ejecutarse y asigna a ciertas variables del programa un valor de arranque seguro. Es un bloque de organización que se ejecuta en el arranque cuando el PLC pasa de STOP a RUN. Tiene máxima prioridad y es el primero en ejecutarse.

En nuestro caso solo se utiliza para asignar valores seguros a las variables y de esta manera garantizar un arranque seguro. En la Figura 6.5 se puede ver que solo tiene programado un segmento el cual asigna el valor a las variables. Este bloque activa el bit de la variable "conf\_inicial", la cual nos direcciona directamente al bloque de configuración inicial.

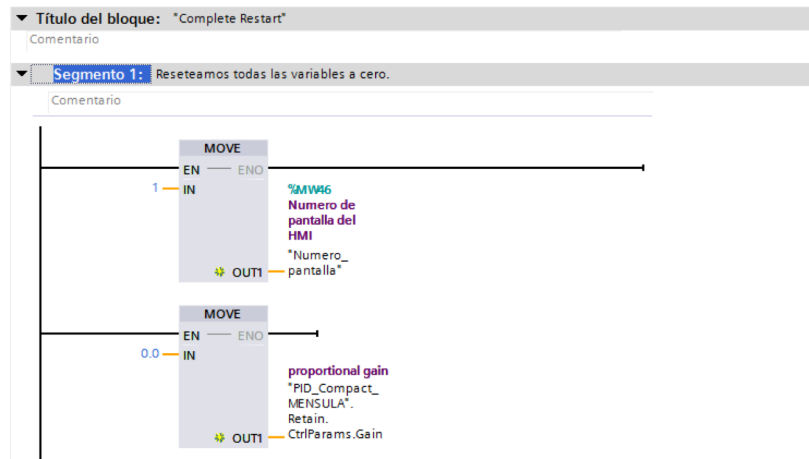


Figura 6.5. OB Startup

### 6.2.4. PROGRAMA PRINCIPAL: BLOQUE MAIN

El control se gestiona todo desde el bloque main (OB1) (Figura 6.6), que a su vez hace distintas llamadas a FC, FB y OB cíclicas. Todos los bloques están programados en contactos, salvo algún bloque con alguna función específica como la de almacenar bloques de datos que está escrito en texto estructurado (SCL).

El bloque de configuración inicial arranque “startup (OB100)” pone todas las variables en su estado inicial cuando el PLC pasa de STOP a RUN, permitiendo de esta forma hacer la configuración inicial en el HMI.

La estructura de ejecución de este bloque (OB1) es cíclica, y varía dependiendo de los valores del acelerómetro y de la configuración que aporte la persona en el HMI.

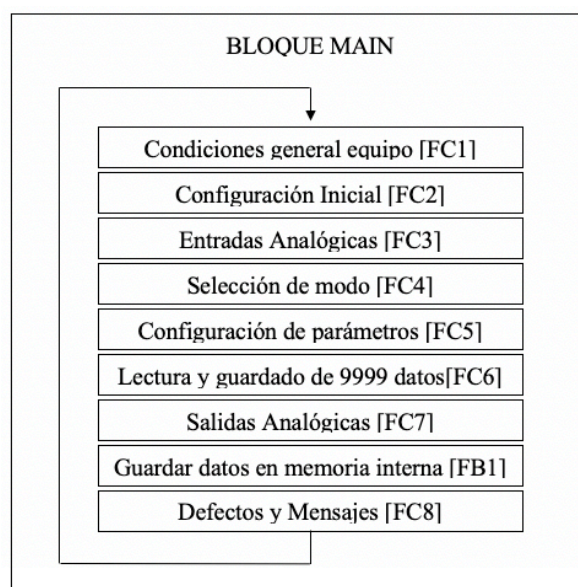


Figura 6.6. Estructura del main (OB1)

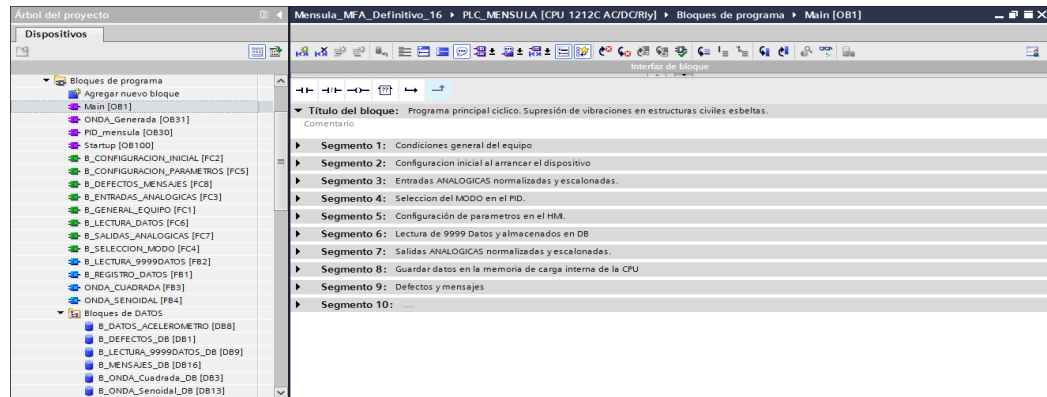


Figura 6.7. Estructura del bloque main en TiaPortal

Como se puede observar en la Figura 6.7 el bloque main (OB1) en TiaPortal respeta la estructura de la Figura 6.6. En el primer segmento se encuentra el bloque de funciones que sirve para controlar las condiciones generales de seguridad del equipo. En el segundo segmento está el bloque de funciones correspondiente a la configuración inicial de los parámetros, es decir que se ejecuta una vez al principio del programa para que el usuario pueda elegir la estructura a controlar. En el tercer segmento se configuran las entradas analógicas. En el cuarto segmento se selecciona el modo de funcionamiento del bloque PID\_Compact, es decir lazo abierto, lazo cerrado o inactivo. El quinto segmento sirve para administrar las distintas funcionalidades del HMI. El sexto segmento permite la lectura y almacenaje de 9999 valores del acelerómetro en la DB8 (B\_DATOS\_ACCELEROMETRO). El séptimo segmento permite la configuración de las salidas analógicas. El octavo segmento sirve para guardar valores del acelerómetro en la memoria de carga interna de la CPU. El noveno y último segmento permite la configuración de los defectos y los mensajes que se muestran por el HMI.

Este bloque main es el más importante, ya que hace las llamadas a los otros bloques y gestiona de manera cíclica la ejecución del programa.

A continuación se va a describir los distintos bloques que tienen el main y su lenguaje de programación.

#### 6.2.4.1. SEGMENTO 1: CONDICIONES GENERAL DEL EQUIPO

Este bloque (Figura 6.8) comprueba en todo momento las condiciones generales de seguridad del equipo. Después de que el bloque OB100 (startup) se ejecute, el bloque MAIN entra en funcionamiento y ejecuta el programa. El FC1 (B\_GENERAL\_EQUIPO) tiene que estar activando el bit correspondiente a la variable "CGSg" en todo momento para que el programa se ejecute con normalidad, si se rompe una de las condiciones de seguridad, el programa se para y muestra un mensaje de error por la pantalla del HMI.

Una vez resuelto el problema, el programa continúa en un modo de funcionamiento seguro.

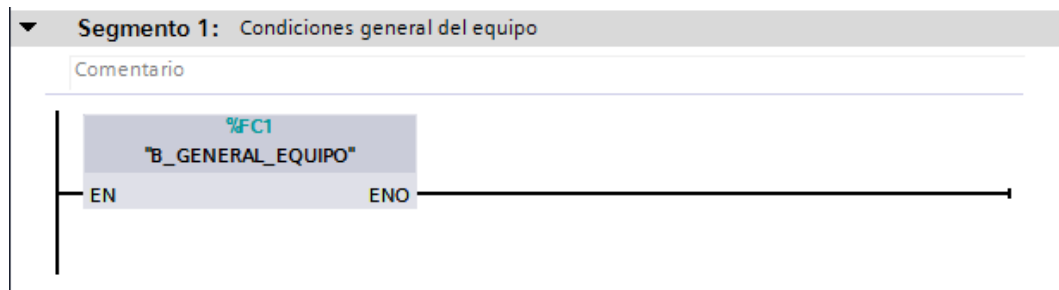


Figura 6.8. Bloque GENERAL\_EQUIPO

Las condiciones de seguridad que se pueden ver en la figura 6.9 son: no tener pulsado la seta de emergencia, no tener pulsado el interruptor del HMI “Parada de emergencia” y el relé de seguridad tiene que estar operativo. Para activar esta condición hay que dar al botón de rearme.

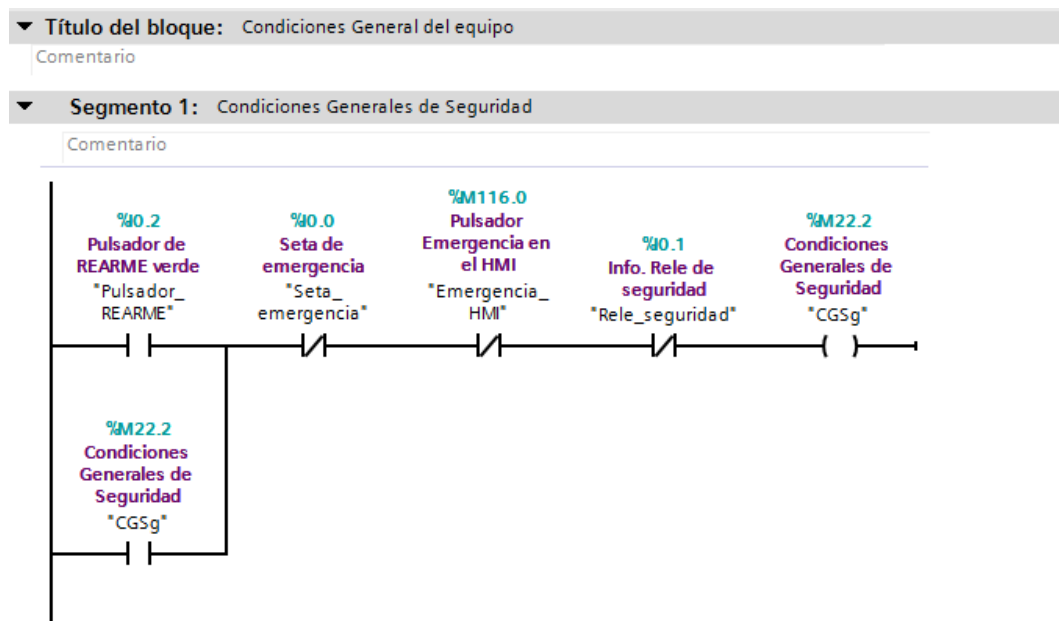


Figura 6.9. Estructura bloque GENERAL\_EQUIPO

En el segmento 2 de la FC se muestra las condiciones que activa el no cumplirse las condiciones de seguridad. De esa manera se cumple una situación segura del equipo en el cual no hay ningún movimiento peligroso.

Este bloque permite añadir más condiciones de seguridad y poder tratar todo lo relacionado con la seguridad del equipo.

#### 6.2.4.2. SEGMENTO 2: BLOQUE CONFIGURACION INICIAL

Este bloque (Figura 6.10) hace la configuración inicial de nuestra estructura de trabajo cuando el autómatas pasa de STOP a RUN. El que



habilita este bloque es el OB100 startup que pone todas las variables en su estado de inicio y nos dirige a esta FC. En esta FC se elige la estructura de trabajo en la que se va a trabajar. Las opciones que se pueden elegir son: Ménsula, Pasarela o Configuración Personal. Una vez elegido la estructura a trabajar, se activa el bit correspondiente a la variable “conf\_inicial” y ya no se vuelve a entrar en este bloque hasta que se vuelva a pasar el estado del autómatas de STOP a RUN. También al activar este bit, permite seguir con la ejecución del programa. Como se puede observar en la Figura 6.10, si las condiciones de seguridad no se cumplen, el FC de configuración inicial no se ejecutará.

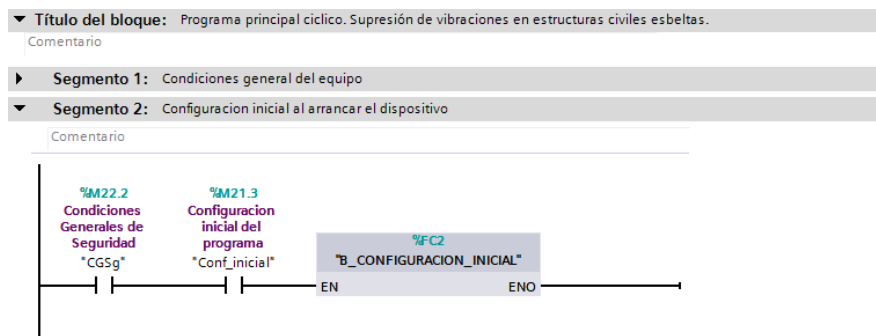


Figura 6.10. Bloque CONFIGURACION\_INICIAL

En la Figura 6.11 se puede observar sus tres segmentos. En el primer segmento está programado la elección de la estructura de trabajo, en el segmento dos se hace la elección de los valores del acelerómetro y del actuador cuando se elige la opción de configuración personal y en el segmento tres direcciona al programa a la pantalla de inicio del HMI. Este paso es obligatorio y se hace una sola vez al inicio del programa.

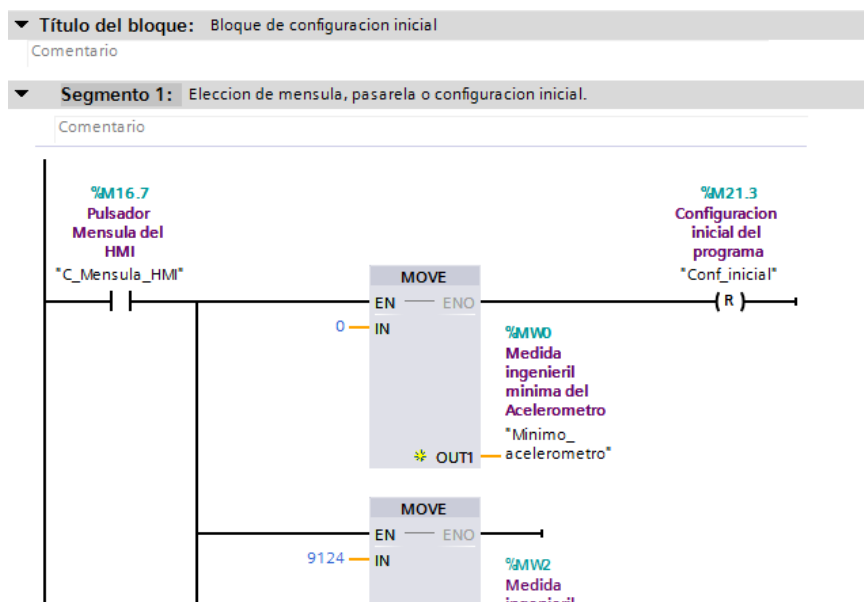


Figura 6.11. Estructura bloque CONFIGURACION\_INICIAL

Una vez elegido una de las opciones el programa se ejecuta sin entrar de nuevo en este bloque.

### 6.2.4.3. SEGMENTO 3: BLOQUE ENTRADAS ANALOGICAS

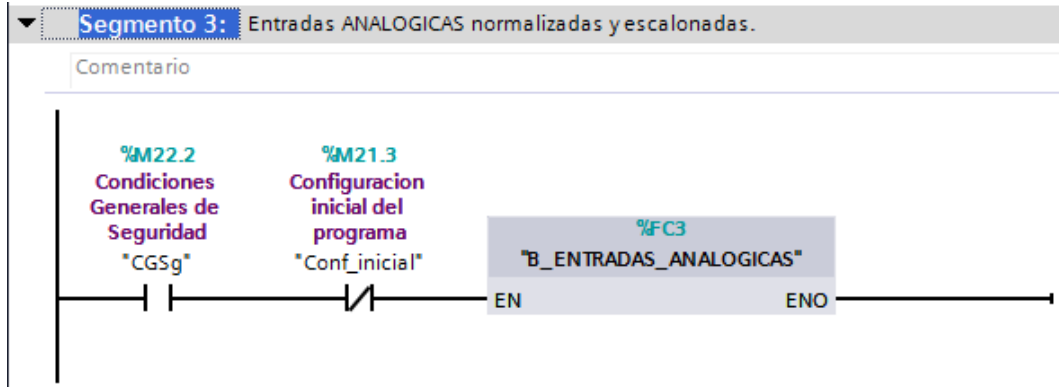


Figura 6.12. Bloque ENTRADAS\_ANALOGICAS

Esta FC se encarga de leer los datos analógicos aportados por el acelerómetro. Estos datos están en unidades ingenieriles, por lo tanto hay que normalizarlos y escalonarlos. Este escalonamiento nos permite tener los datos en la unidad voltios y así poder ejecutarlos en el PID de la manera más correcta. En la Figura 6.13 se puede observar la programación de este bloque.

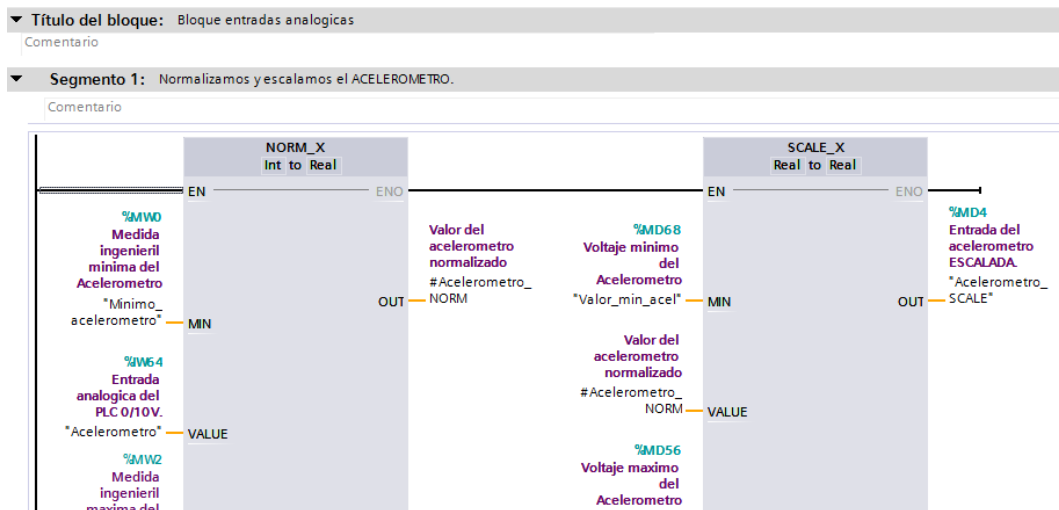


Figura 6.13. Estructura del bloque ENTRADAS\_ANALOGICAS

Como se puede observar el bloque está preparado para poder configurar cualquier tipo de acelerómetro mientras se especifique su voltaje de salida.

6.2.4.4. SEGMENTO 4: BLOQUE SELECCIÓN DE MODO

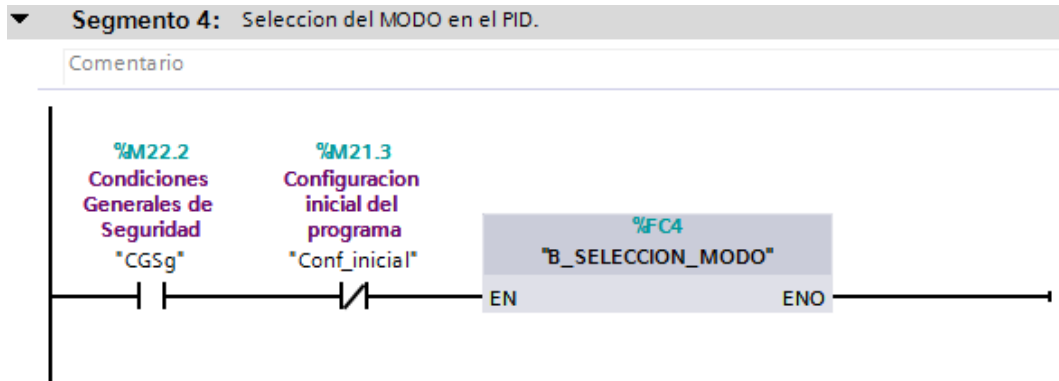


Figura 6.14. Bloque SELECCIÓN\_MODO

Este bloque FC (Figura 6.14) permite configurar el modo en el cual queremos trabajar en nuestro Bloque PID. El bloque PID nos permite estar en 3 modos: automático (Lazo cerrado), manual (Lazo abierto) o inactivo (Apagado). Una vez elegido el modo, el bloque PID\_compact situado en el OB30 actúa de la manera indicada.

Es un FC (Figura 6.15) de mucha importancia en el programa, ya que gestiona el lazo abierto, el lazo cerrado y el modo inactivo de nuestro PLC.

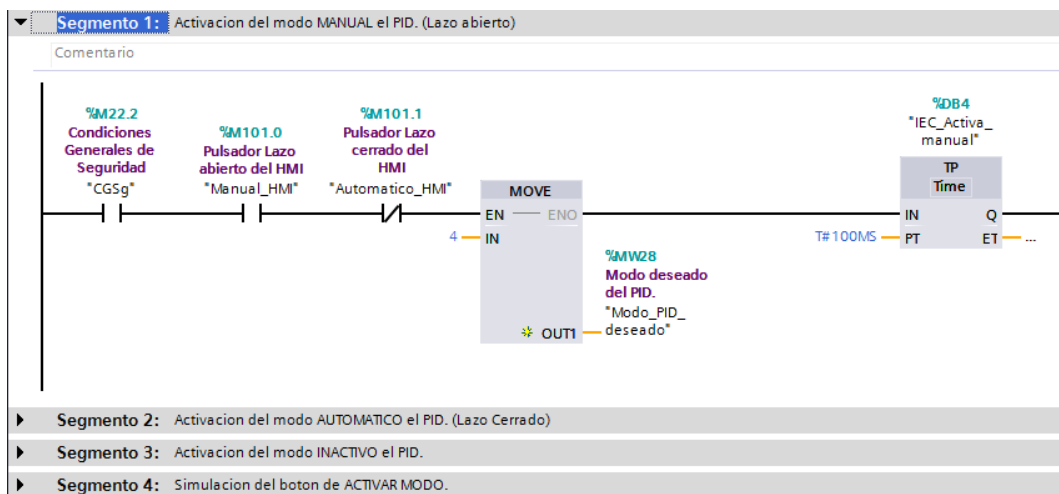


Figura 6.15. Estructura del bloque SELECCIÓN\_MODO

**MODO MANUAL (LAZO ABIERTO)**

El modo manual es la opción que se le da al usuario de generar su propia onda. La onda puede ser senoidal o cuadrada y con una frecuencia de 0,1 a 10 Hz. Este modo está pensado para excitar al sistema hasta llevarlo a resonancia, y una vez estabilizado, es decir en régimen estacionario, poder medir el tiempo en desvanecerse la vibración (tss). Así mismo desde el estacionario "resonante" se puede pasar a automático (lazo cerrado) para ver la bondad del sistema diseñado y volver a medir tiempos.

La onda se genera en el bloque ONDA\_Generada (OB31) que se ejecuta de forma cíclica en paralelo al main con un ciclo de 1 ms. Este bloque da la opción de elegir la amplitud de la onda junto con la frecuencia.

La onda senoidal y la onda cuadrada se generan en las FB3 y FB4, las cuales están escritas en SCL ya que el KOP no nos permite desarrollar esta programación tan exacta. En la Figura 6.16 se muestra el bloque escrito en SCL correspondiente a la onda senoidal. Un bloque similar es el que genera la onda cuadrada.

```

1 //El boton RESET inicia todo de nuevo.
2 IF #Reset = TRUE THEN
3   #Inicio := 0;
4   #Contador := 0;
5   END_IF;
6
7 IF #Inicio = 0 THEN
8   #Amplitud := (#Voltaje_max - #Voltaje_min)/2;
9   #Referencia := #Voltaje_min + #Amplitud;
10  #Radianes := ((2 * #PI) / #Periodo) * #Contador;
11  #Onda_senoidal := #Amplitud * SIN(#Radianes);
12  #Contador := #Contador + 1;
13  #Inicio := 1;
14  END_IF;
15
16 //Recorrido de la funcion SENO.
17 #Radianes := ((2 * #PI) / #Periodo)*#Contador;
18 #Onda_senoidal := #Amplitud * SIN(#Radianes);
19 #Contador := #Contador + 1;
20
21 //Reinicio de la funcion SENO.
22 IF #Contador = #Periodo THEN
23   #Radianes := ((2 * #PI) / #Periodo) * #Contador;
24   #Onda_senoidal := #Voltaje_max * SIN(#Radianes);
25   #Contador := 0;
26  END_IF;
  
```

Figura 6.16. Estructura del bloque ONDA\_SENOIDAL

Esta configuración de la onda se hace mediante HMI y el usuario puede probar distintas ondas con sus diferentes variantes.

### MODO AUTOMÁTICO (LAZO CERRADO)

El modo automático es la ejecución del PID para controlar la ménsula o la estructura deseada.

Una vez seleccionado este modo, el bloque PID\_Compact se activa y con las variables configuradas por el usuario empieza a realizar el control del sistema.

El bloque PID\_Compact se desarrolla en la OB30 PID\_Mensula. Es un requisito impuesto por Siemens que el bloque PID\_Compact se desarrolle en una OB3X cíclica (Bloque organización cíclica). El periodo de muestreo de esta OB cíclica es de 10 ms (Figura 6.17) y se puede configurar solo con el programa TiaPortal. Uno de los objetivos de este TFG era poder cambiar el periodo de muestro del PID para poder hallar el más apropiado, con el PLC de

Siemens se puede cambiar el periodo de muestreo solo con el programa TiaPortal, no a través del HMI.

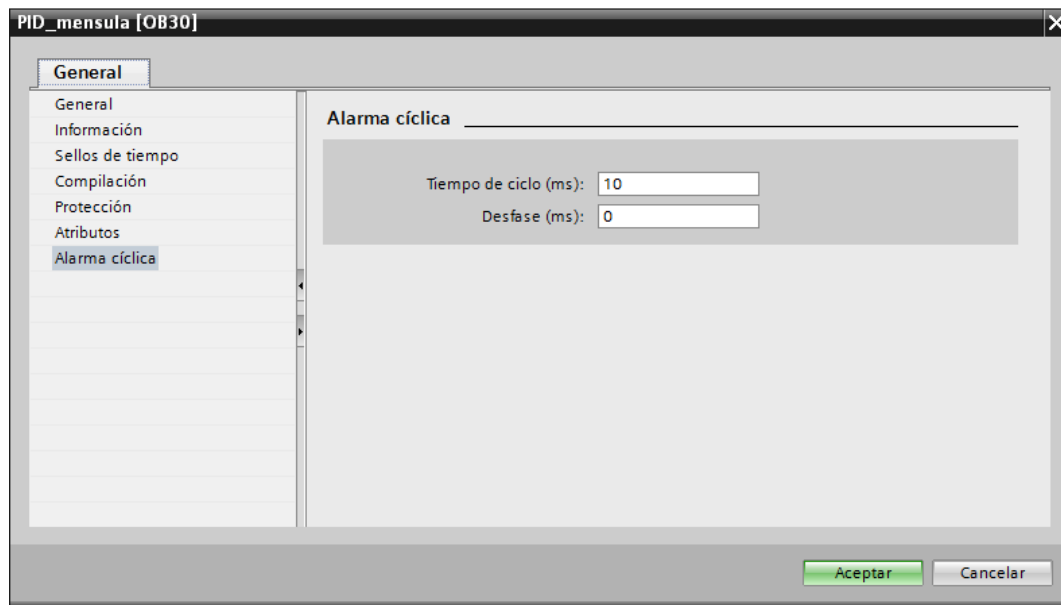


Figura 6.17. Periodo de muestreo de OB31

Aquí se desarrolla todo el control del sistema. Mediante el bloque PID\_Compact el cual está configurado para soportar cualquier estructura, se pueden variar sus distintas variables de entrada para que efectúe el control que más se adecua. En la Figura 6.18 se puede ver el bloque PID\_Compact con las distintas entradas que se han configurado para el control.

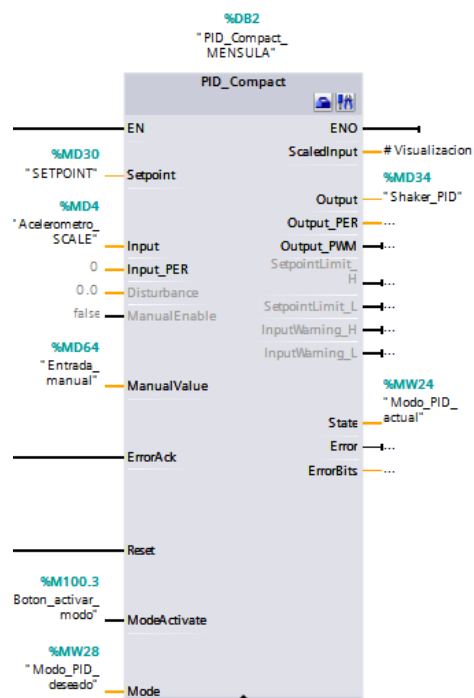


Figura 6.18. Bloque PID\_compact

Entradas:

- *Setpoint*: Es la entrada de Setpoint de nuestro control. Para controlar estructuras civiles el setpoint siempre va a ser cero.
- *Input*: La entrada escalada del acelerómetro.
- *ManualValue*: Entrada de la onda manual que deseamos generar. senoidal o cuadrada.
- *Error/ACK*: Reseteamos errores cuando se pulsa reset.
- *Reset*: Distintas condiciones para resetear el PID.
- *Mode*: Selección de modo que se desea para ejecutar el PID.

Salidas:

- *Output*: Salida en porcentaje del actuador respecto a la entrada.
- *State*: estado en el que se encuentra el PID actualmente.

En el apartado que se describe a la OB30 (PID\_mensula) se detalla mejor y se describen más las distintas funcionalidades del bloque PID\_Compact.

### MODO INACTIVO (APAGADO)

Este modo es el modo de desconexión del bloque PID\_Compact. Está activado cuando se hace un reset, cuando no se cumplen las condiciones generales de seguridad o cuando no hay ninguno de los otros dos modos activos.

#### 6.2.4.5. SEGMENTO 5: BLOQUE CONFIGURACION PARAMETROS

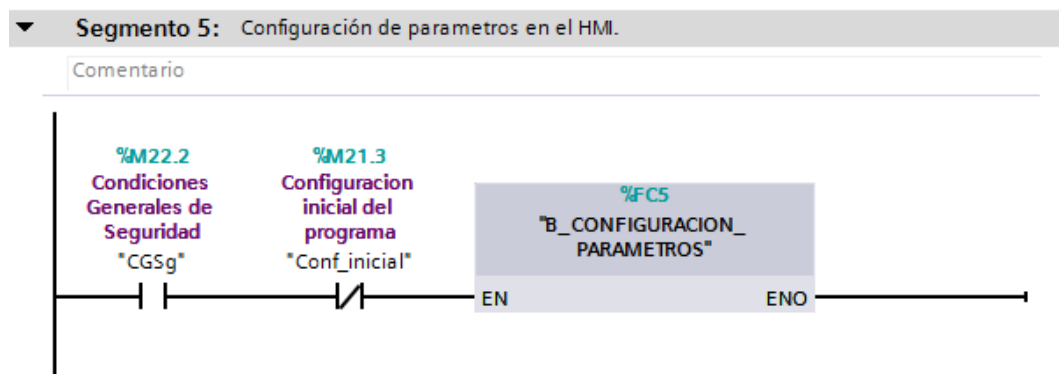


Figura 6.19. Bloque CONFIGURACION\_PARAMETROS

Es un bloque muy sencillo que hace la comunicación con el HMI (Figura 6.19). Las variables que cambiamos en el HMI se gestionan en este bloque y se asignan a cada variable.

Se controla la frecuencia de la oscilación en lazo abierto, la configuración de nuevos acelerómetros y actuadores, los valores del PID en lazo cerrado y hace la gestión de pasar de lazo abierto a lazo cerrado (Figura 6.20). Para líneas futuras si se quisiera aportar más controles por HMI este bloque es que habría que cambiar para gestionar dichos cambios.

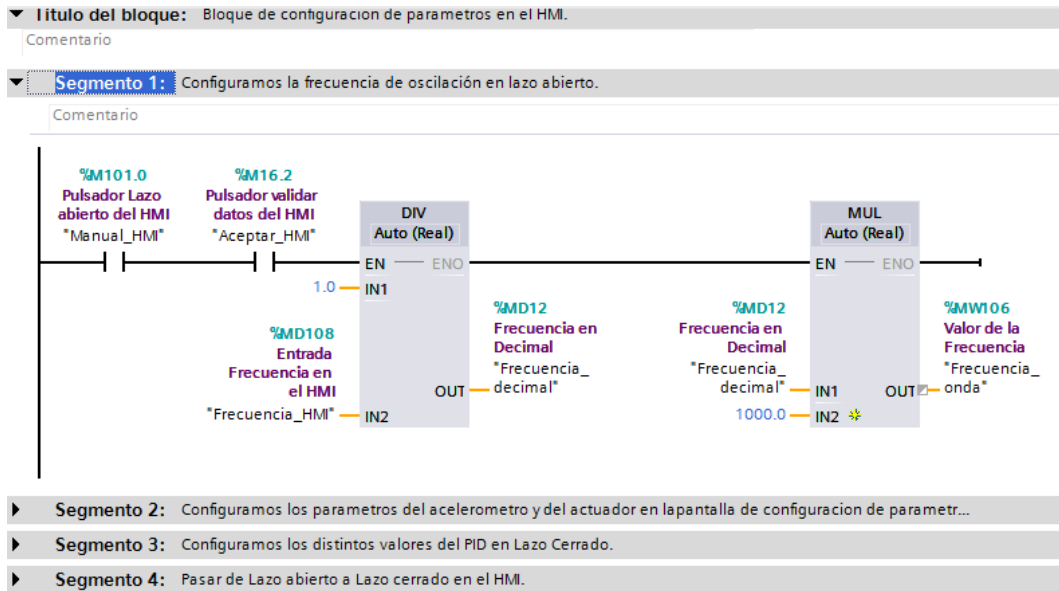


Figura 6.20. Estructura del bloque CONFIGURACION\_PARAMETROS

#### 6.2.4.6. SEGMENTO 6: BLOQUE LECTURA DATOS

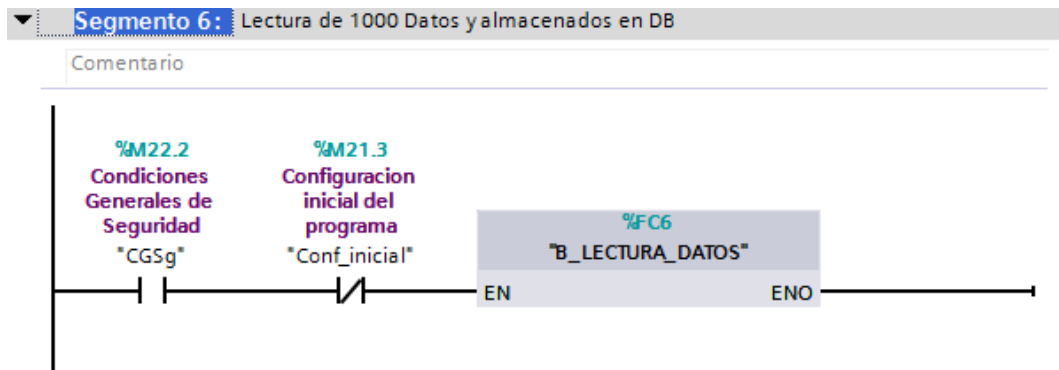


Figura 6.21. Bloque LECTURA\_DATOS

Esta FC (Figura 6.21) sirve para almacenar 9999 datos en el DB8 (DATOS\_ACCELEROMETRO). No es imprescindible en el funcionamiento del programa para el control del sistema. Se almacenan 9999 datos dado que en CPUs Siemens con memorias menores a 8 GB, este valor es el máximo que se puede visualizar para elementos ARRAY. Al almacenar los valores del acelerómetro en unidades ingenieriles en el DB8 (Figura 6.22), se puede hacer un tratamiento de datos en el futuro. TiaPortal permite exportar datos de un DB a un fichero Excel. Facilitando de esta manera la adquisición de datos y su tratamiento científico.

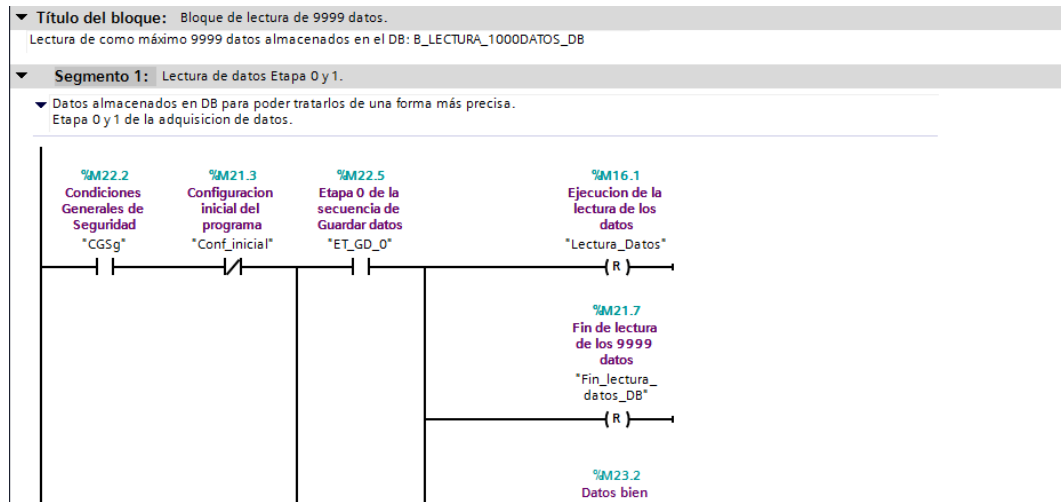


Figura 6.22. Estructura del bloque LECTURA\_DATOS

Para almacenar los datos se establece la secuencia que se observa en la Figura 6.23:

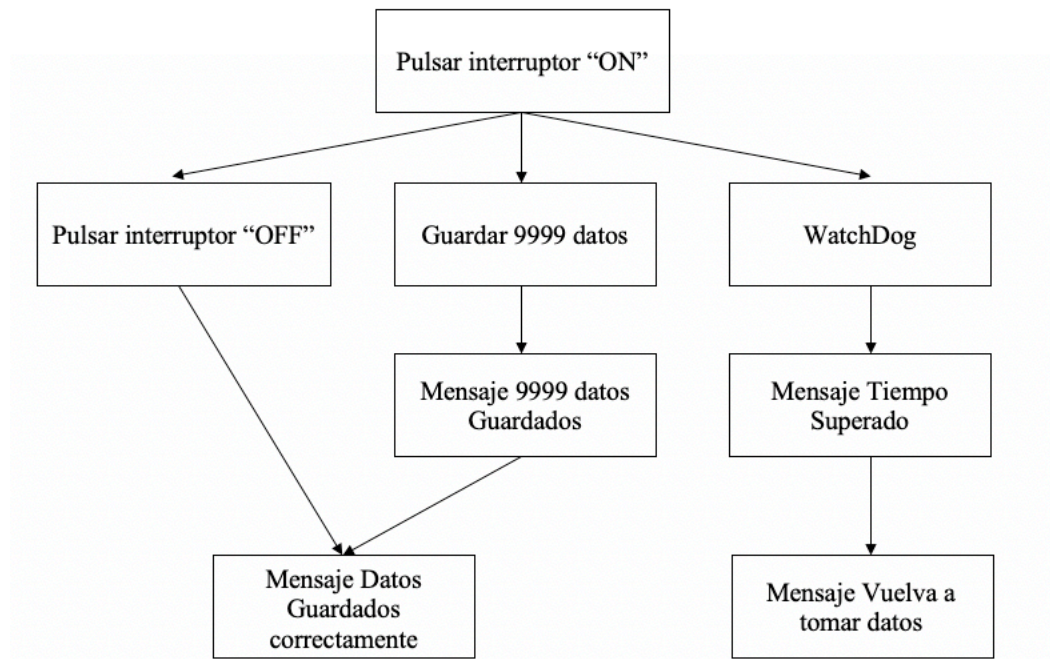


Figura 6.23. Estructura de adquisición de datos

Hay 3 vías que ofrece la adquisición de datos: Guardar los datos a gusto del usuario activando y desactivando mediante el interruptor del HMI, guardar datos hasta llegar al cupo de 9999 datos del DB o que salte el watchdog en el caso de que no haya variación en el valor del acelerómetro o se deje pulsado el interruptor. En el caso de que salte el watchdog, se recomienda volver a adquirir datos ya que esto es una medida de seguridad. También el tiempo del watchdog se puede a través del TiaPortal a gusto del usuario, estando este valor por defecto en minuto y medio.



Para almacenar los datos se utiliza la FB2 (LECTURA\_9999DATOS). Esta FB programada en SCL, recoge los datos del acelerómetro y los va guardando de forma consecutiva en el bloque de datos DB8 (DATOS\_ACCELEROMETRO) (Figura 6.24).

B_DATOS_ACCELEROMETRO								
	Nombre	Tipo de datos	Valor de arranq...	Remanen...	Accesible d...	Escrib...	Visible en ..	Valor de a...
1	Static			<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
2	DATO	Array[0..101...		<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
3	DATO[0]	Int	0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
4	DATO[1]	Int	0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
5	DATO[2]	Int	0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
6	DATO[3]	Int	0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
7	DATO[4]	Int	0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
8	DATO[5]	Int	0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
9	DATO[6]	Int	0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
10	DATO[7]	Int	0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
11	DATO[8]	Int	0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
12	DATO[9]	Int	0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
13	DATO[10]	Int	0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
14	DATO[11]	Int	0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
15	DATO[12]	Int	0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
16	DATO[13]	Int	0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
17	DATO[14]	Int	0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
18	DATO[15]	Int	0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
19	DATO[16]	Int	0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
20	DATO[17]	Int	0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
21	DATO[18]	Int	0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
22	DATO[19]	Int	0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
23	DATO[20]	Int	0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
24	DATO[21]	Int	0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Figura 6.24. Estructura del bloque DATOS\_ACCELEROMETRO

### 6.2.4.7. SEGMENTO 7: BLOQUE SALIDAS ANALÓGICAS

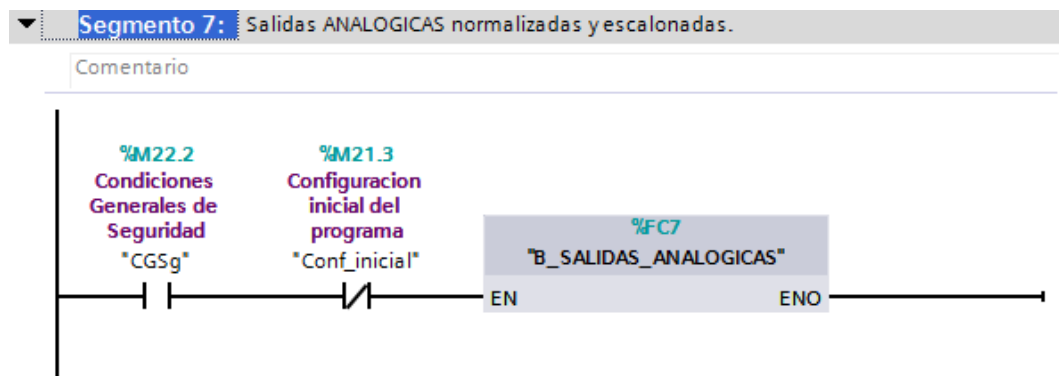


Figura 6.25. Bloque SALIDAS\_ANALOGICAS

Esta FC (Figura 6.25) se encarga de leer la salida en porcentaje del PID y pasarlos a unidades ingenieriles que define el comportamiento del actuador. Estos datos están en porcentaje, por lo tanto hay que normalizarlos y escalarlos. Este escalonamiento nos permite tener los datos en la unidad medidas ingenieriles y así poder ejecutarlos en el actuador de la manera más correcta. En la Figura 6.26 se puede observar la programación de este bloque.

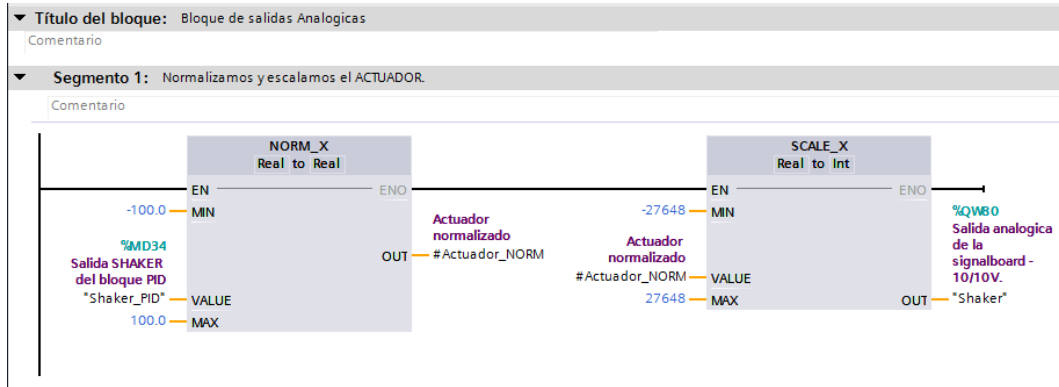


Figura 6.26. Estructura del bloque SALIDAS\_ANALOGICAS

Como se puede observar el bloque está preparado para poder configurar cualquier tipo de actuador mientras se especifique su voltaje.

#### 6.2.4.8. SEGMENTO 8: BLOQUE REGISTRO DATOS

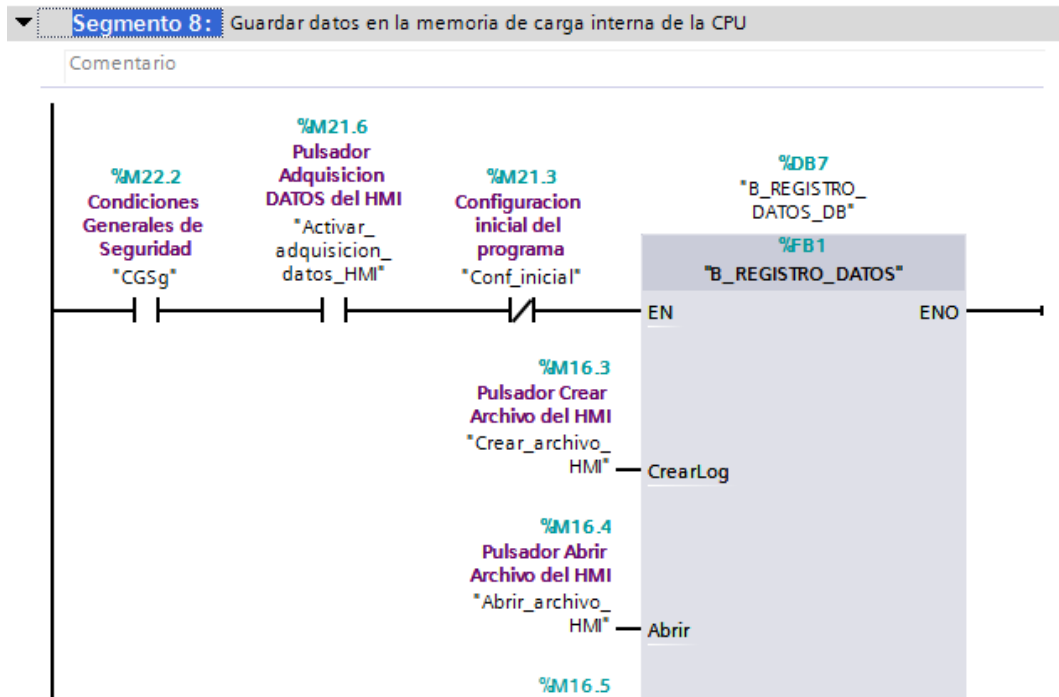


Figura 6.27. Bloque REGISTRO\_DATOS

Otra forma de adquirir y almacenar datos que ofrece el programa es a través de una utilidad que ofrece Siemens llamada Datalogging (Figura 6.27). Esta forma almacena los datos en la memoria de carga interna de la CPU. También se puede configurar para que almacene datos en una tarjeta MMC de Siemens. Es una forma rápida y alternativa para almacenar datos para su posterior tratamiento. Lo que hace es generar un archivo CSV que se almacenara en la memoria interna de la CPU. Hay que tener en cuenta que la memoria de carga es finita, en nuestro caso al usar una CPU S1200 el tamaño máximo del archivo CSV generado es de 500.000.000 bytes. Una vez

que se llegue al máximo de ocupación, se va sobrescribiendo el registro más antiguo.

Está compuesto por la FB1 que crea, abre, escribe y cierra el archivo donde van almacenado los datos (Figura 6.28). En el HMI muestra la secuencia que hay que seguir para que se guarden los datos.

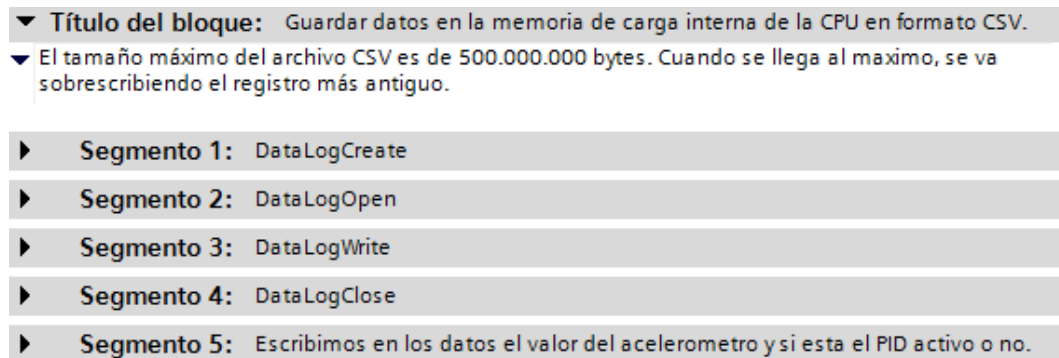


Figura 6.28. Estructura del bloque REGISTRO\_DATOS

Dentro de este bloque están los bloques que se corresponde a crear, abrir, escribir y cerrar el archivo CSV que almacena los datos. Dichos bloques se colocan y se configuran según las instrucciones que aporta Siemens. Es muy importante seguir la secuencia de crear, abrir, escribir y cerrar el archivo, sino puede provocar algún error y guardar mal los datos. Dichos bloques son:

- DataLogCreate
- DataLogOpen
- DataLogWrite
- DataLogClose

Para acceder al archivo CSV hay que conectarse a la red del PLC y en el navegador WEB (ejemplo: Google Chrome) hay que poner la IP del PLC (Figura 6.29). Pulsar “INTRO” y en el menú desplegable de la izquierda pulsar “Navegador de archivos”.

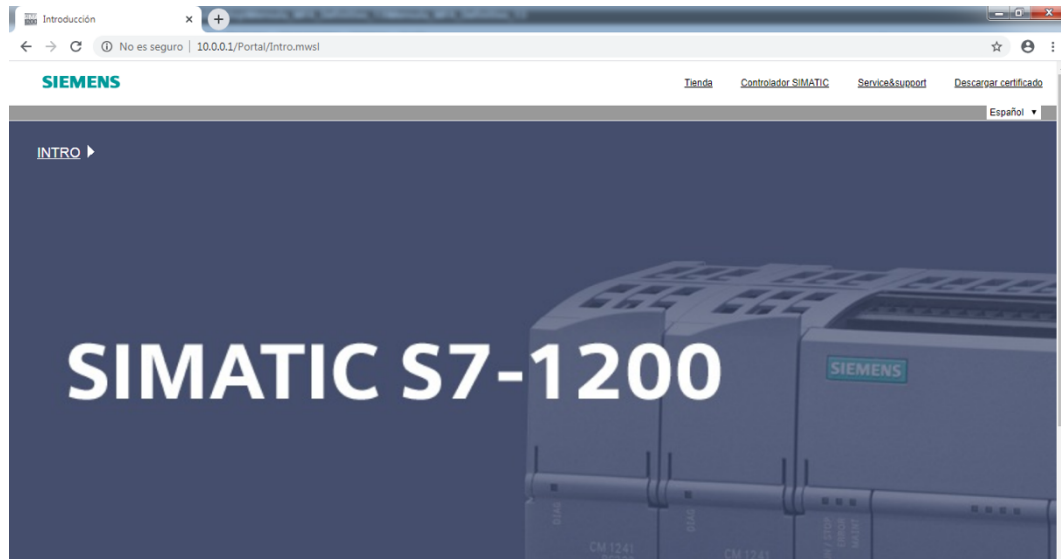


Figura 6.29. Navegador Google Chrome con la pantalla de inicio del PLC

Pulsar la carpeta “DataLogs” y el archivo se llama “Acelerometro.csv” (Figura 6.30).

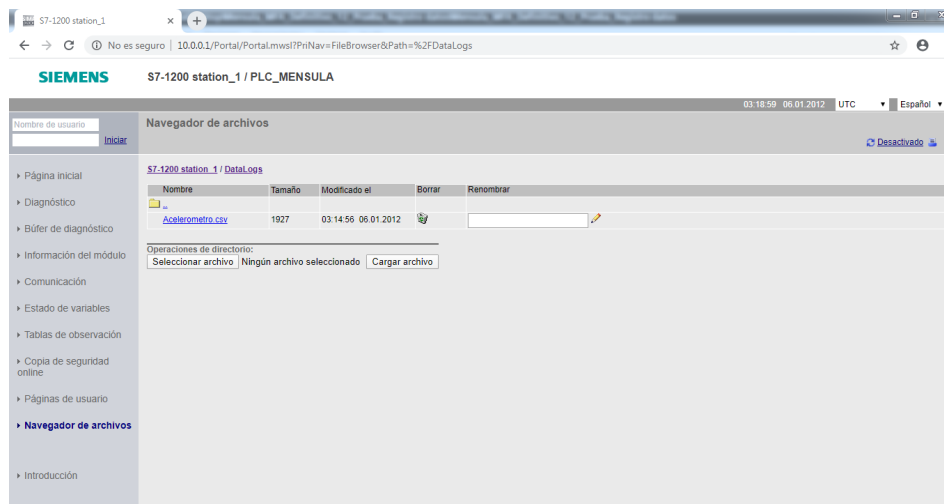


Figura 6.30. Archivo "Acelerometro.csv"

## 6.2.4.9. SEGMENTO 9: BLOQUE DEFECTOS MENSAJES

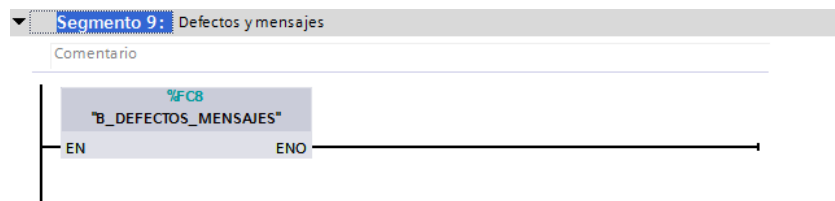


Figura 6.31. Bloque DEFECTOS MENSAJES

Esta FC (Figura 6.31) permite configurar los mensajes de defectos y mensajes que se muestran por el HMI. En la Figura 6.32 se puede ver la estructura de esta FC en la que cada segmento es un mensaje de error o un

mensajes mostrado en el HMI. A medida que se quieran ir incorporando más mensajes de errores o mensajes en el HMI, se añaden más segmentos habilitando el bit correspondiente en el HMI que muestra el mensaje.

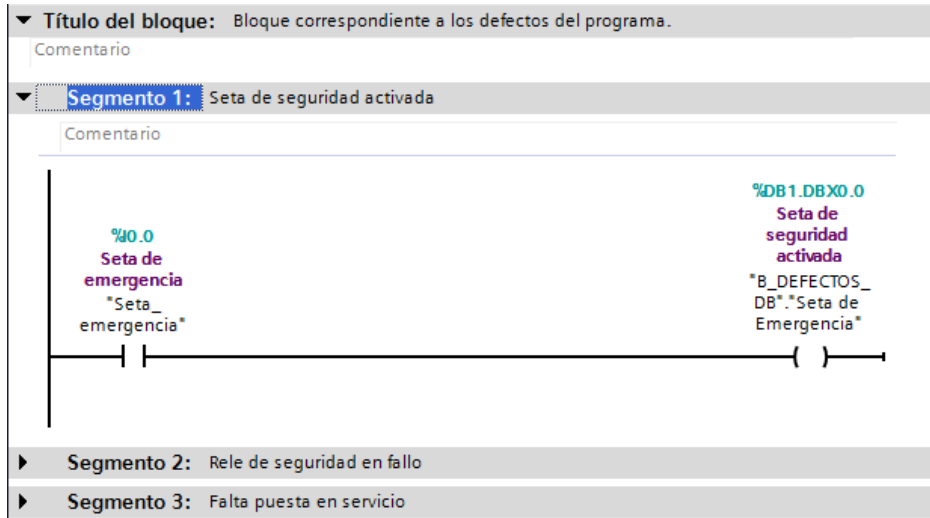


Figura 6.32. Estructura del bloque DEFECTOS MENSAJES

Para mostrar defectos se asocia el bit en el DB1 y para mostrar mensajes se asocia el bit en el DB16. Estos DBs están compuestos por ARRAY que dejan bits de reserva para añadir mas defectos o mensajes.

Una vez habilitado el bit en el PLC, en la pestaña de "Avisos HMI" en el HMI se asocia dicho bit y se escribe el mensaje de error o el mensaje que se quiere mostrar por pantalla (Figura 6.33).

Avisos de bit									
ID	Nombre	Texto de aviso	Categoría	Variable de di...	Bit de ..	Dirección de ...	Variable de ac...	Bit de ..	Dire...
1	Aviso de bit_1	Seta de seguridad pulsada	Errors	Defectos	8	%DB1.DBX0.0	<Ninguna var...	0	
2	Aviso de bit_2	Rele de seguridad activado	Errors	Defectos	9	%DB1.DBX0.1	<Ninguna var...	0	
3	Aviso de bit_3	Falta puesta en servicio	Errors	Defectos	10	%DB1.DBX0.2	<Ninguna var...	0	
<Agregar>									

Figura 6.33. Pantalla Avisos HMI en el HMI

### 6.2.5. OB30. PID\_mensula

Esta OB ejecuta de forma cíclica el bloque PID\_Compact (Figura 6.34). El periodo de muestreo es de 10 ms y se puede variar cambiando su valor en la pestaña de "Propiedades" del bloque. Uno de los objetivos de este proyecto era buscar un periodo de muestreo que más se adapte a la estructura. La pestaña de "propiedades" del programa da la posibilidad de poner el periodo de muestreo que desea el usuario, descartando de esta manera tener que trabajar con un periodo de muestreo fijo e invariable.

Otro requisito impuesto por Siemens es que el valor de la variable “Tiempo de muestro algoritmo PID” tiene que ser el mismo que el del bloque OB cíclico, por eso hay que tener en cuenta que al variar el periodo de muestreo del bloque OB, también hay que ponerle el mismo valor a esta variable.

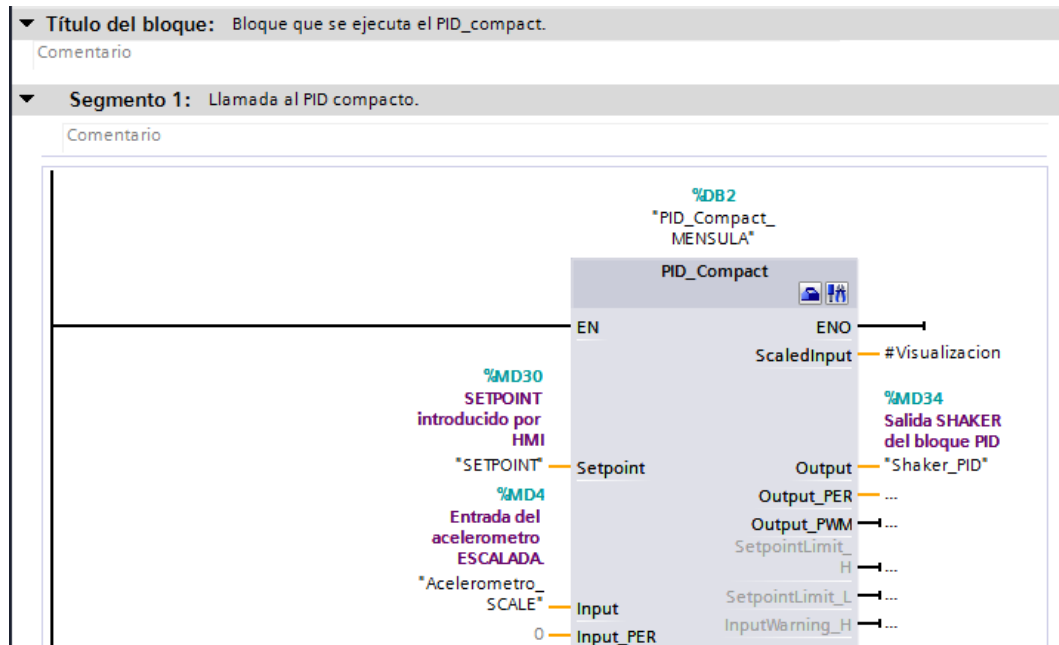


Figura 6.34. OB30 PID\_mensula

El bloque PID\_Compact solo se puede ejecutar en una OB cíclica como se comentó con anterioridad.

La elección del bloque PID\_Compact de Siemens es porque ofrece varias herramientas para su configuración y optimización que resultan muy útiles a la hora de trabajar. Las dos herramientas que ofrece son: la ventana de “Configuración” y la ventana de “Puesta en Servicio”.

### 6.2.5.1. CONFIGURACION

La ventana de “Configuración” (Figura 6.35) es donde se configura el bloque PID\_Compact. Se empieza configurando los ajustes básicos que son: la magnitud con la que se está trabajando (Fuerza, Tensión, Velocidad...) y los parámetros de entrada/salida del bloque. A continuación de escala y se limitan los valores de entrada/salida. Por último se establecen los valores del PID con los que se van a trabajar en lazo cerrado. Hay más variables que se pueden configurar que se muestran en la pestaña de “Vista de parámetros”. Estos valores se van modificando en el programa dependiendo de la configuración que el usuario haya elegido para la estructura de trabajo.

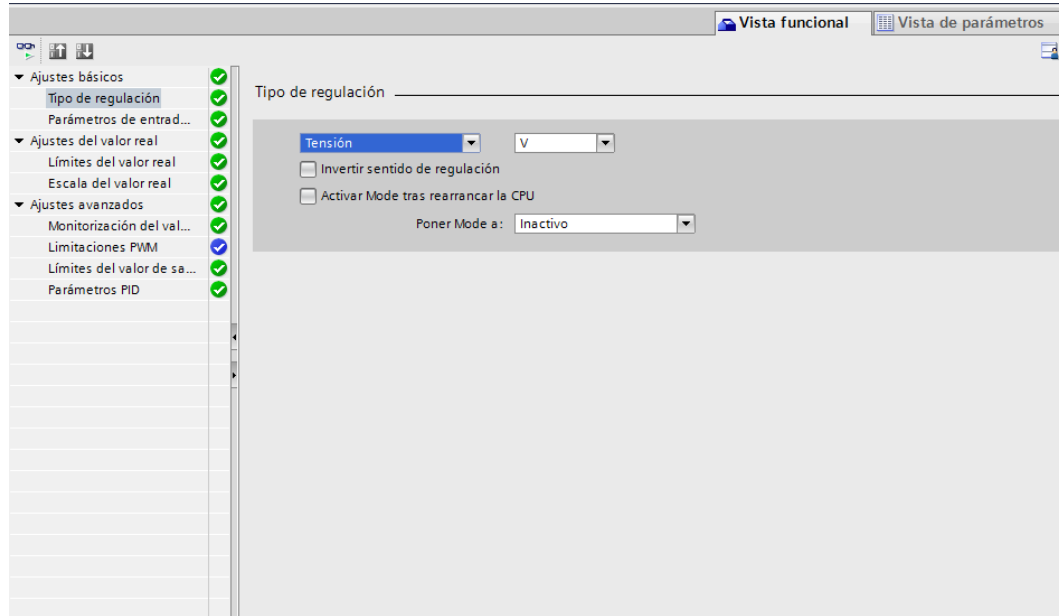


Figura 6.35. Ventana “Configuración”

Un dato importante es que los valores del PID se introducen en continuo, como se puede ver en la Figura 6.36 que el bloque PID\_Compact utiliza la ecuación que muestra la figura a la hora de cerrar el lazo y calcular el PID.

**Algoritmo PID**

PID\_Compact es un regulador PIDT1 con Anti-Windup y ponderación de las acciones P y D. El algoritmo PID funciona de acuerdo con la siguiente fórmula:

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

Símbolo	Descripción
y	Valor de salida del algoritmo PID
$K_p$	Ganancia proporcional
s	Operador laplaciano
b	Ponderación de la acción P
w	Consigna
x	Valor real
$T_i$	Tiempo de integración
$T_D$	Tiempo derivativo
a	Coefficiente para el retardo de la acción derivada (retardo de la acción derivada $T1 = a \times T_D$ )
c	Ponderación de la acción D

Figura 6.36. Ecuación de PID utilizada por el bloque PID\_Compact

**6.2.5.2. PUESTA EN SERVICIO**

La ventana “Puesta en servicio” (Figura 6.37) es una herramienta muy útil que sirve para poner a punto y optimizar el control del PID. Como se puede observar tiene un visor de gráficos que muestra el valor de la entrada, el valor de la salida y el valor de la consigna. De esta manera se puede ver el comportamiento del PID en tiempo real y se puede optimizar tocando diferentes pestañas. Una función muy buena que ofrece el bloque

PID\_Compact y que se utiliza mucho en esta ventana es el modo de Optimización inicial y el modo de Optimización Fina. Estos modos permiten una sintonización automática del PID de la manera más eficiente, en nuestro caso no se ha podido utilizar ninguno de estos modos debido a que no están preparados para sintonizar PID para movimientos vibratorios.

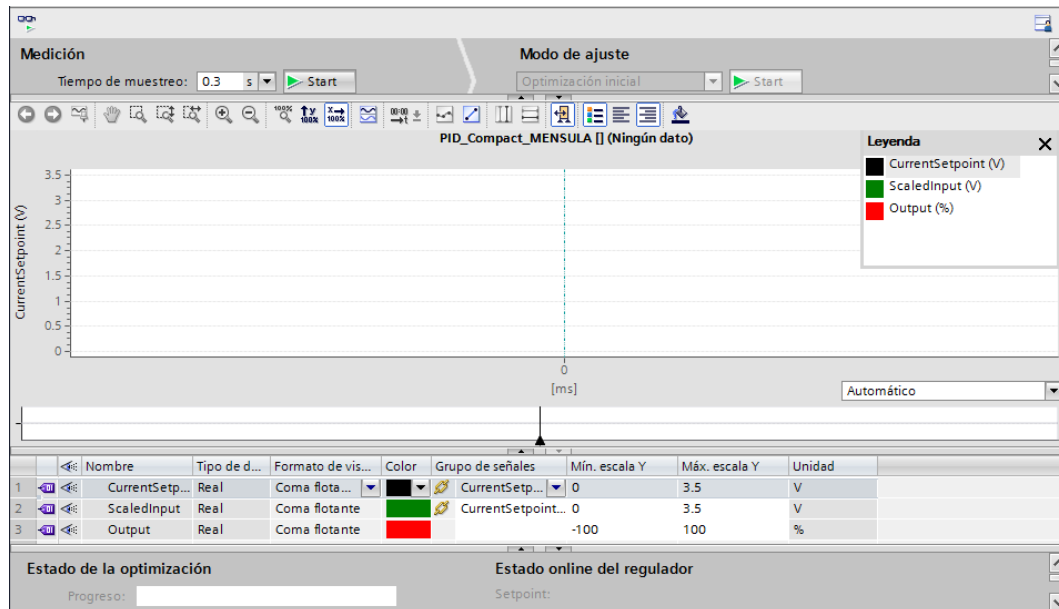


Figura 6.37. Ventana "Puesta en Servicio"

### 6.2.6. OB31. ONDA\_Generada

En este OB (Figura 6.38) se ejecuta el bloque de onda senoidal y el bloque de onda cuadrada. Al ser un OB cíclica de 1 ms de periodo esto permite que variando un contador determinado por la frecuencia que se introduce por el HMI, se pueda generar la onda senoidal o cuadrada que desea el usuario. También se puede elegir la amplitud. Además de generar las ondas en lazo abierto también gestionan la lógica del programa que permite la ejecución de una onda u otra y cuando tiene que transmitir dichos valores al bloque PID\_Compact.



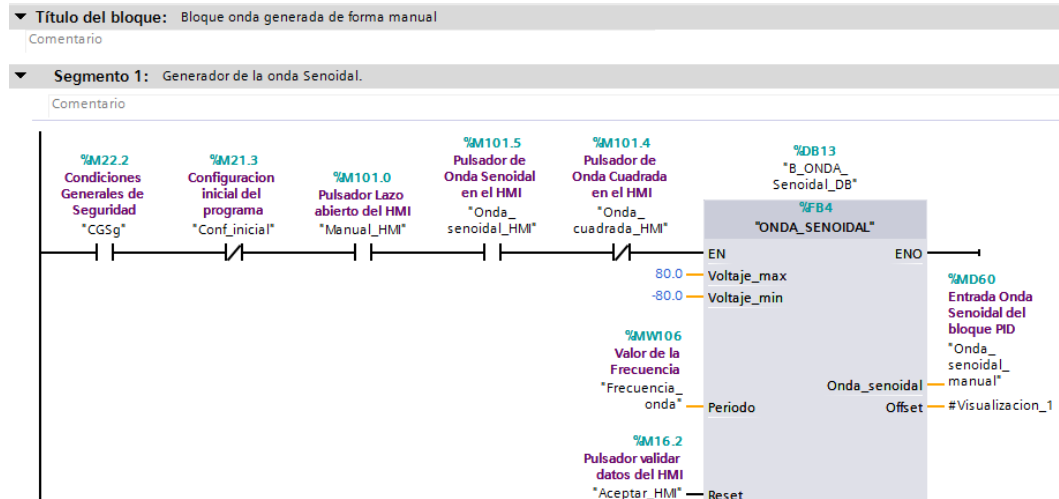


Figura 6.38. OB31 ONDA\_Generada

## 6.2.7. TRACE

La función TRACE y de analizador lógico permite registrar las variables de un dispositivo y evaluar los registros. Las variables son las entradas o salidas del dispositivo o cualquier variable internada utilizada por el usuario. Estos registros se guardan en la memoria de carga del PLC y se pueden tratar una vez finalizado su recopilación. Es similar a un osciloscopio, aportando las grandes ventajas de tener un dispositivo así en el programa. Esta herramienta es una herramienta muy potente que se ha utilizado durante todo el TFG para ver el comportamiento de las variables tanto en tiempo real como guardando sus valores, sintonizar el PID y ver el funcionamiento del programa.

Para agregar un nuevo trace hay que hacer doble clic en la pestaña de "Agregar nuevo trace" en la ventana de navegación (Figura 6.39). En esta CPU solo se pueden cargar dos traces.

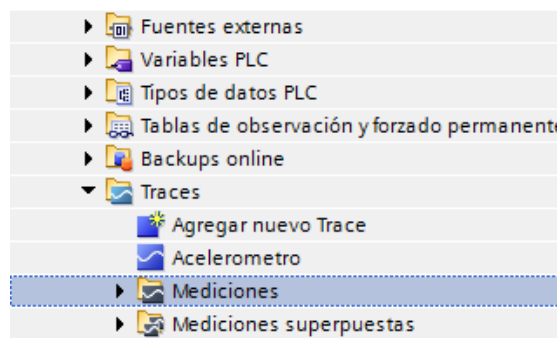


Figura 6.39. Ventana de navegación para agregar nuevo trace

Una vez creado el trace se procede a su configuración (Figura 6.40).

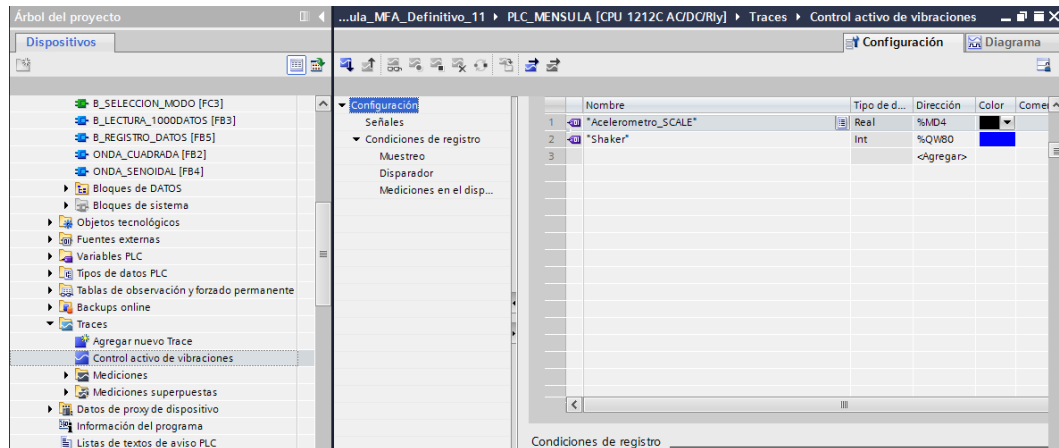


Figura 6.40. Ventana de Configuración

La configuración básica y utilizada en este TFG ha sido el introducir las señales que se iban a muestrear en la pestaña de señales, en la pestaña de muestreo se ha seleccionado el OB30 como momento de registro y se ha habilitado la casilla de “Utilizar la duración de registro máx.”.

Una vez que se acaba la configuración se pulsa sobre la ventana de Diagrama (Figura 6.41), se carga el trece en el PLC y se pueden observar las variables configuradas en tiempo real. El trace utilizado en el TFG tiene como nombre “Acelerómetro”. También se puede configurar para que guarde los valores de dichas variables durante un tiempo para poder analizarlos más adelante.

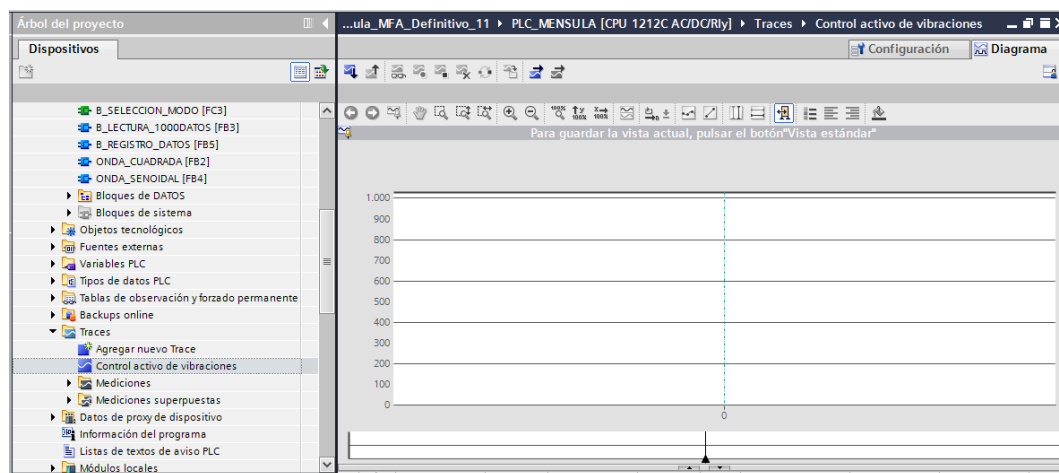


Figura 6.41. Ventana de Diagrama

## 6.3. PROGRAMACIÓN Y CONFIGURACION DEL HMI

### 6.3.1. INTRODUCCIÓN

En el apartado anterior se ha comentado el programa del PLC que gestiona todo lo correspondiente con el control activo y las distintas

funcionalidades del programa desarrollado. En este apartado se van a detallar las distintas pantallas que se han configurado para que el usuario pueda seleccionar los distintos modos de funcionamiento y sus distintas configuraciones. En la Figura 6.42 se puede la estructura de ejecución de las pantallas en el HMI. Hay que destacar que las variables que se modifican en el HMI también se modifican en el programa PLC. Es muy importante conocer el método de uso de las pantallas del HMI ya que desde ellas se va a gestionar todo el programa.

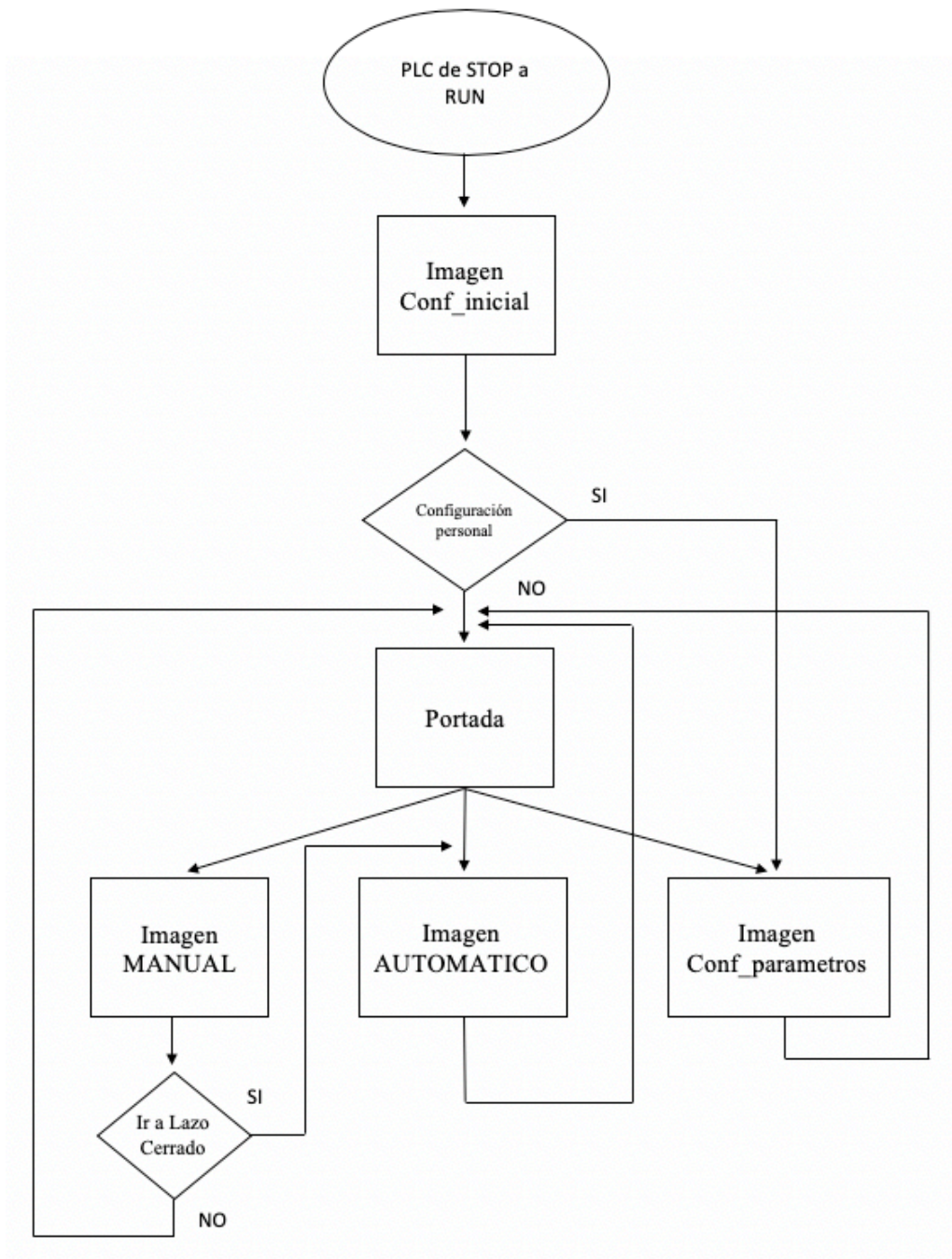


Figura 6.42. Estructura de ejecución de las pantallas en el HMI

La estructura de este apartado será de tal manera que se irán explicando las distintas pantallas una por una con su funcionalidad. En total hay 9 pantallas. En el proyecto HMI hay 5 pantallas de las cuales alguna se modifican según hay seleccionado un modo u otro. La estructura del programa HMI viene detallada en la Figura 6.43, en donde se pueden apreciar las distintas pantallas y otras funcionalidades más del HMI.

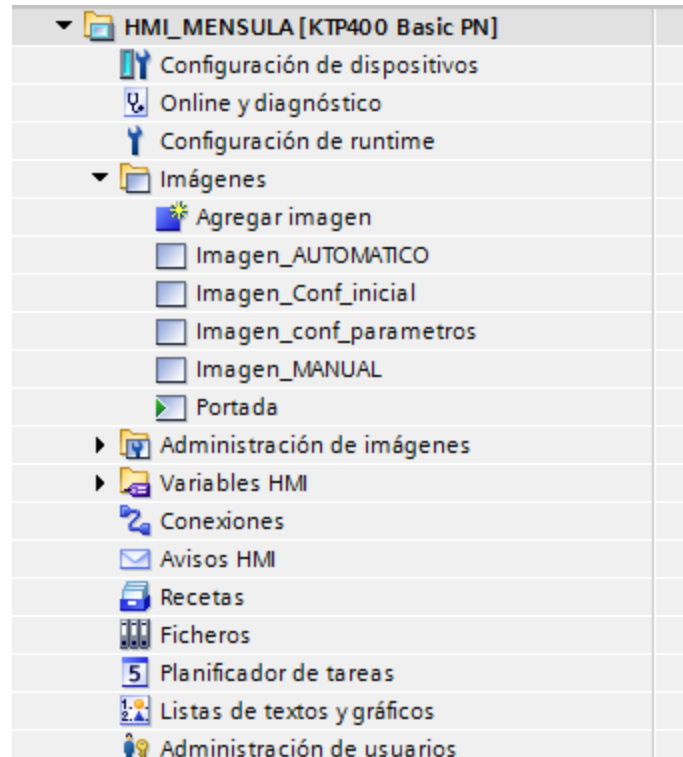


Figura 6.43. Estructura de proyecto HMI

Todas las pantallas tienen el día y la hora actual en la que se está trabajando como el logo de la Universidad de Valladolid. En la pantalla de portada también se da la opción de apagar el HMI o de apagar la aplicación para ver el SO Windows de la pantalla. Todas las pantallas vienen con el pulsador de PARADA DE EMERGENCIA, el cual inhabilita todas las funciones hasta que la parada de emergencia este inactiva.

### 6.3.2. ALARMAS

Cuando no se cumple una de las condiciones generales de seguridad, sale un mensaje de alarma en el HMI. Al estar en una situación de riesgo se deshabilitan todos los movimientos peligrosos y el HMI se sitúa en una pantalla que no genere ningún riesgo. En la Figura 6.44 se puede observar el diagrama de funcionamiento del HMI cuando no se cumple las condiciones generales de seguridad.

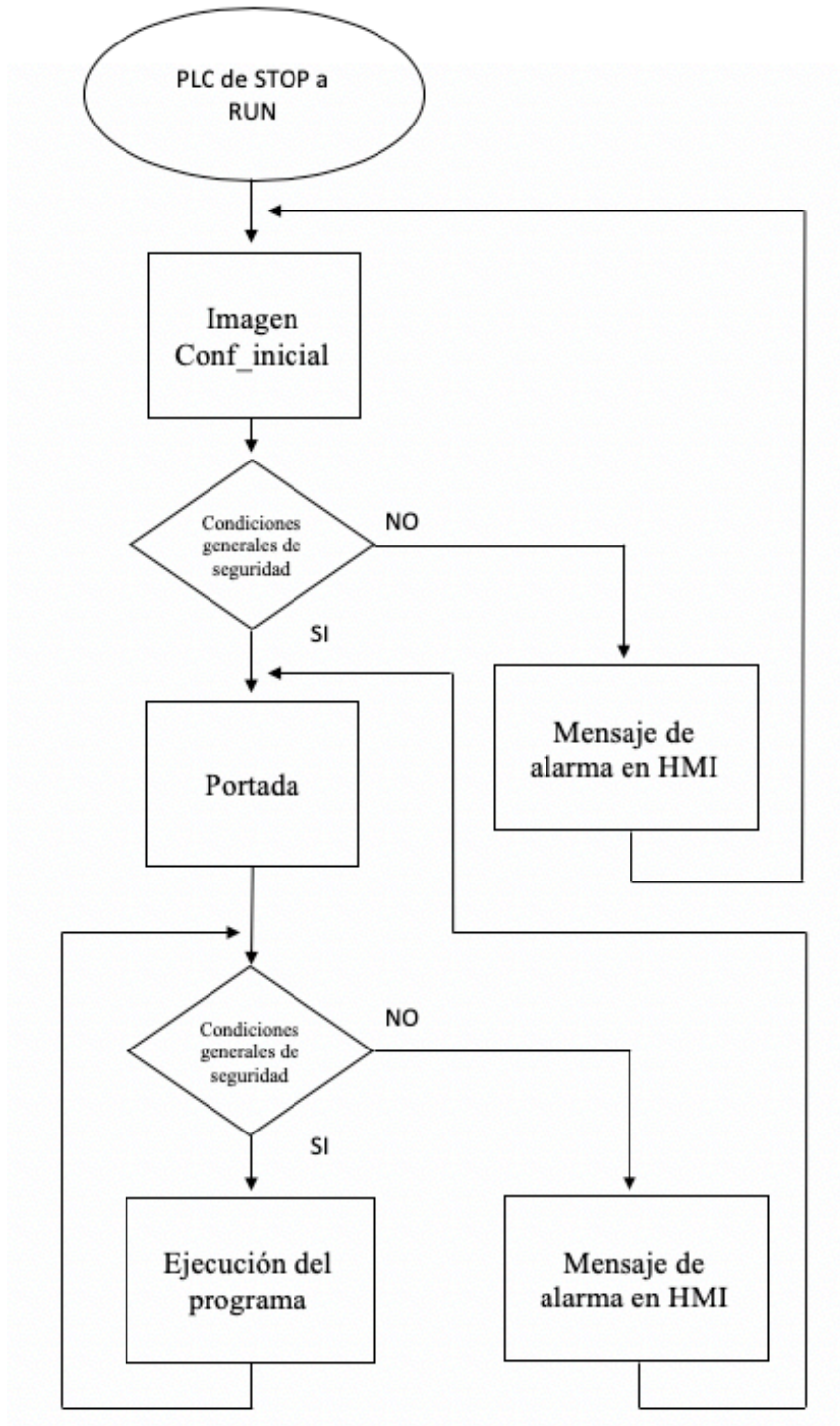


Figura 6.44. Estructura de condiciones de seguridad en el HMI

Como se puede observar en la Figura 6.44, si al inicio del programa no se cumplen las condiciones generales de seguridad, la pantalla del HMI será la de “Conf\_inicial”. No dejará pasar a otras pantallas y seguir con la ejecución del programa hasta que se resuelvan los problemas y se acusen las alarmas. En el caso de que se haya completado ese paso y se esté ejecutando el programa, la pantalla a la que te lleva cuando se genera una

alarma es a la pantalla de “Portada”. El programa se establece en esta pantalla y no deja seguir ejecutando el programa hasta que se resuelva el problema y se acusen las alarmas. En la Figura 6.45 se muestra el mensaje de alarma en el HMI.

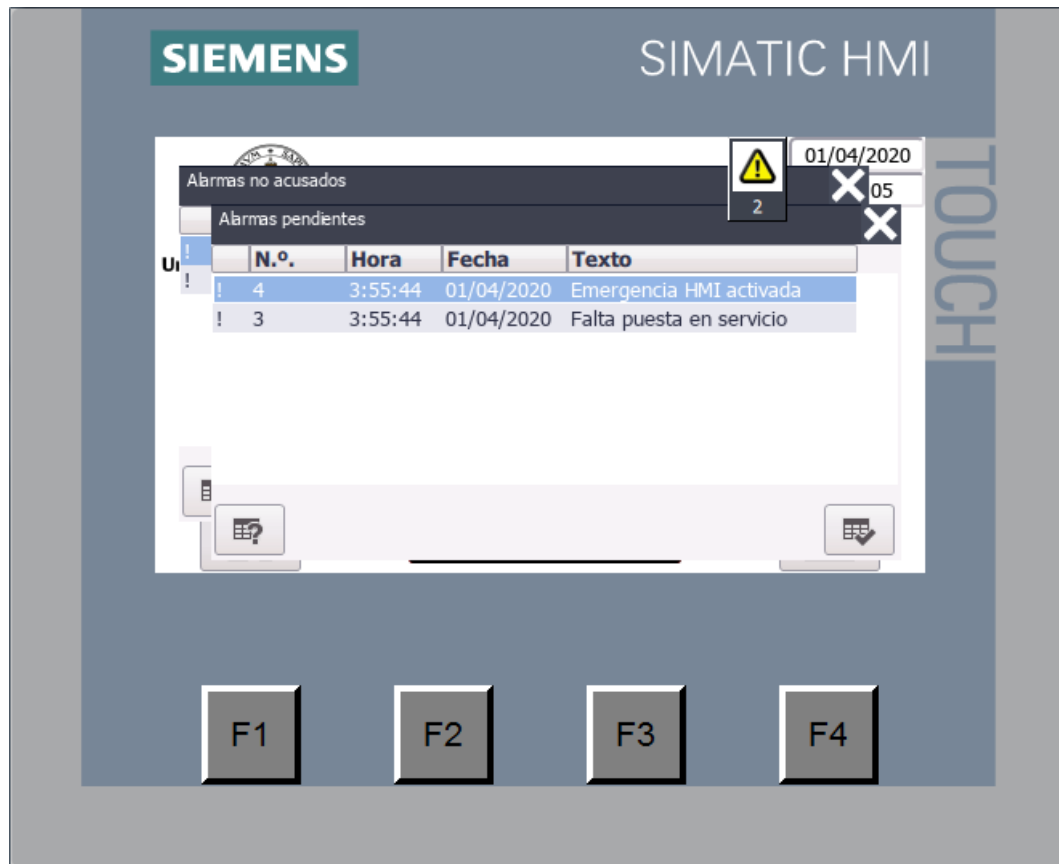


Figura 6.45. Mensaje de alarma en el HMI

En la Figura 6.46 se puede observar como al quitar el mensaje de alarma y no acusarlo, se muestra símbolo de advertencia en la parte superior derecha hasta que se acusen los mensajes de alarmas. Aunque no se acuse, el programa se sigue ejecutando, solo que sale el símbolo de advertencia en todo momento. El no acusar una alarma no impide no seguir con la ejecución del programa.



Figura 6.46. Símbolo de advertencia indicativo de alarma no acusada

### 6.3.3. IMAGEN 1: CONF\_INICIAL



Figura 6.47. Imagen CONF\_INICIAL

Esta imagen (Figura 6.47) se corresponde a la imagen inicial del programa. Esta pantalla es de suma importancia ya que establece el entorno en el cual se va a trabajar. Al encender el dispositivo PLC y ponerse en RUN, se precisa de una configuración inicial. Dependiendo del tipo de entorno que se desea trabajar, los acelerómetros, actuadores y demás configuraciones del programa van a estar configurados de distinta manera.

Como se puede ver en la Figura 6.47 hay tres tipos de entornos configurados para trabajar:

- Ménsula: Acelerómetro 0...+3,3V, Actuador -10...+10V (Laboratorio)
- Pasarela peatonal: Acelerómetro 0...+5V, Actuador -2,5...+2,5V
- Configuración personal: Esta opción te lleva a la pantalla "Conf\_parametros". Como se muestra en la Figura 6.48, esta pantalla da la posibilidad de configurar los valores máximo y mínimo del acelerómetro y del actuador.

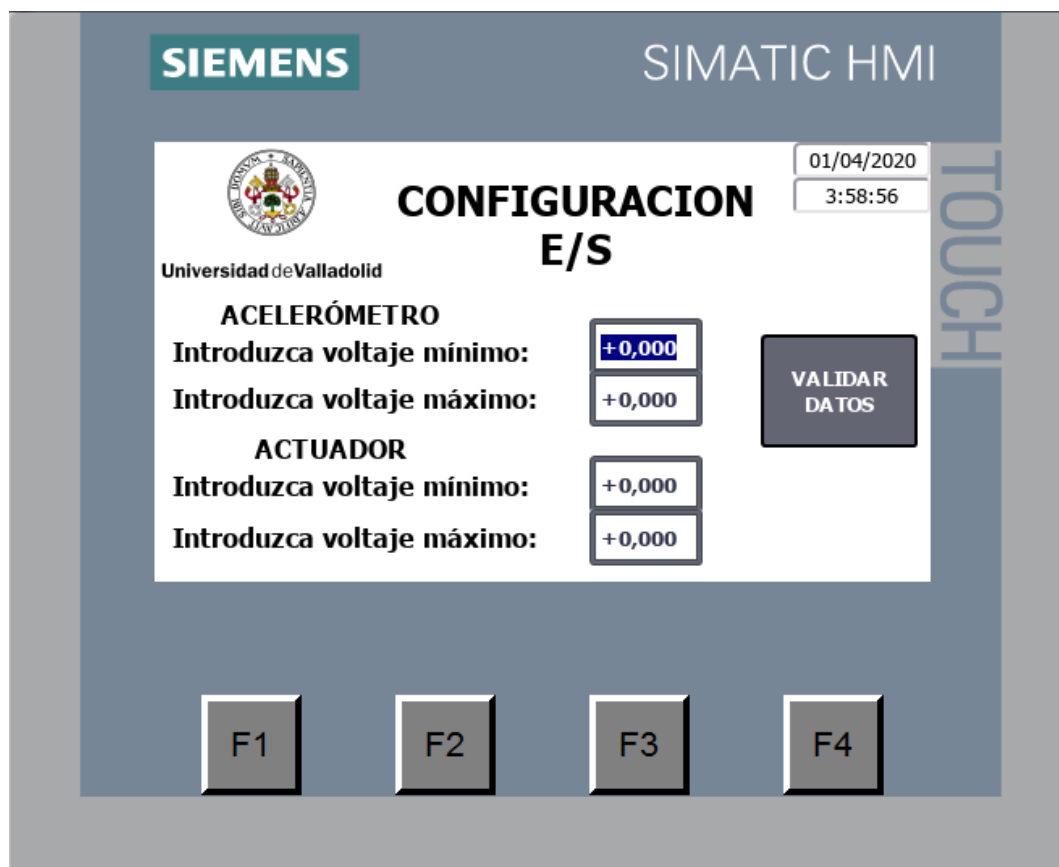


Figura 6.48. Imagen CONF\_PARAMETROS

Una vez elegido una de las tres opciones y en el caso de "CONFIGURACION PERSONAL" haber configurado los valores del acelerómetro y del actuador la siguiente pantalla es la de "Portada".



Al elegir la opción de MÉNSULA, el acelerómetro y el actuador tendrán los valores establecidos para a ménsula. El bloque PID\_Compact también estará acondicionado para trabajar en dicha estructura. Pasa lo mismo al elegir la opción de PASARELA PEATONAL. La pestaña de CONFIGURACION PERSONAL permite trabajar con otro acelerómetro y con otro actuador en el caso de que se quiera experimentar o modificar los componentes estipulados para cada estructura. Esta opción de variar la configuración del acelerómetro y del actuador también se puede llevar a cabo una vez iniciado el programa.

Estas pantallas volverán a salir cuando se pase el PLC de STOP a RUN. Son pantallas de configuración inicial que solo se ejecutan una vez en el programa.

### 6.3.4. IMAGEN 2: PORTADA



Figura 6.49. Imagen PORTADA

Como se puede observar en la Figura 6.49 esta es la pantalla de “Portada” la cual es la pantalla principal de nuestro programa. Desde aquí se van a gestionar todos los modos de funcionamiento de nuestro control activo, así como las configuraciones deseadas. Esta pantalla es la que hace de nexo con las otras pantallas y nos sitúa en un estado de seguridad del equipo. Por

eso cuando no se cumplen las condiciones de seguridad el estado de alarma nos mantiene en esta pantalla.

Como se comentaba en la introducción esta pantalla dispone a mayores de un botón para apagar el HMI y de otro para apagar la aplicación y situarnos en el SO Windows del HMI.

Las opciones que te permite seleccionar son:

- Lazo abierto: Te lleva a la pantalla MANUAL
- Lazo cerrado: Te lleva a la pantalla AUTOMÁTICO
- Reset: Resetea el PID
- Símbolo de configuración: Te lleva a la pantalla “Conf\_parametros”

### 6.3.5. IMAGEN 3: MANUAL



Figura 6.50. Imagen MANUAL

La imagen MANUAL (Figura 6.50) se corresponde con el funcionamiento en lazo abierto de nuestro sistema. Esta pantalla es la que permite introducir una onda senoidal o cuadrada al sistema. La frecuencia de dicha onda también está a elección del usuario. También ofrece al usuario la posibilidad de excitar la estructura con una de las ondas y pasar directamente

a lazo cerrado para comprobar la bondad de control. Esta función es muy útil ya que se puede comparar comportamientos entre lazo abierto y lazo cerrado.

Al pulsar el símbolo normalizado de la puerta con la flecha que hay abajo a la derecha, el HMI se situara en la pantalla de portada desactivando el modo lazo abierto.

### 6.3.6. IMAGEN 4: AUTOMÁTICO

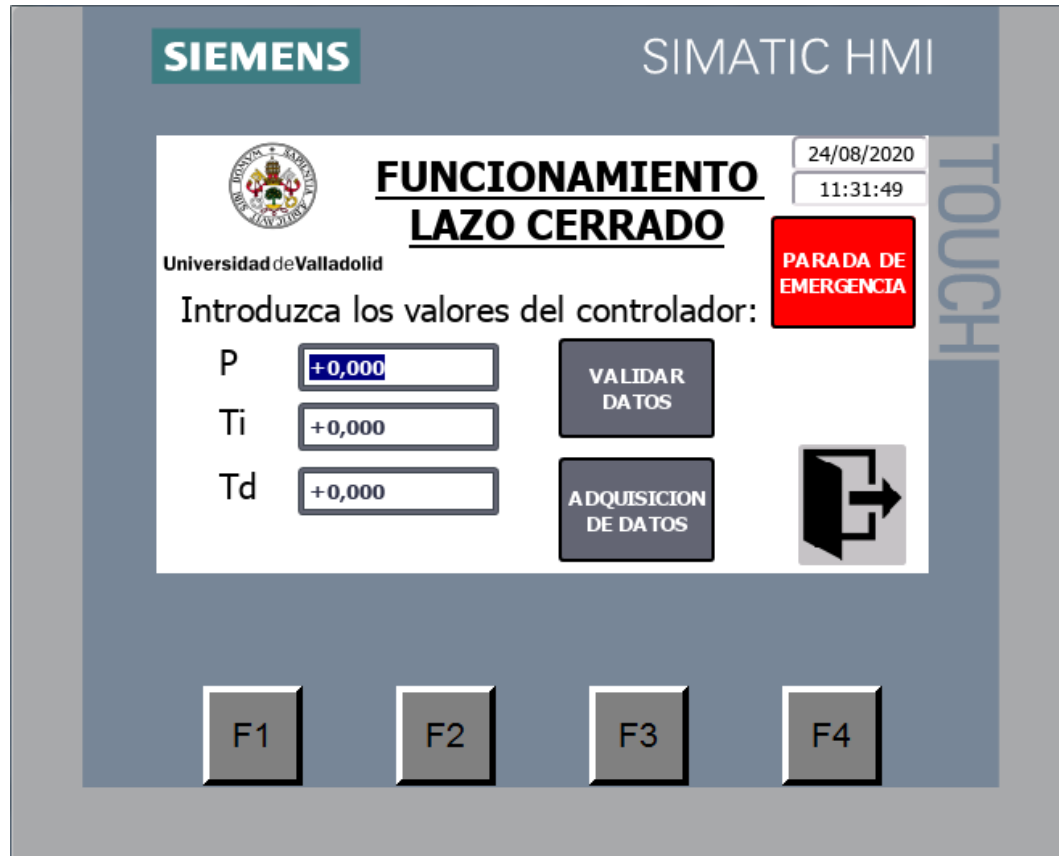


Figura 6.51. Imagen AUTOMÁTICO

La Figura 6.51 se corresponde a la imagen AUTOMATICO que es donde se gestiona el sistema en lazo cerrado. El modo lazo cerrado de este programa te permite controlar el sistema mediante un control activo. Dejando a cero los valores de P, Ti, Td permite realizar los distintos controles: P, PI, PD, PID. Para que estos valores se establezcan en el control, se debe pulsar el botón “VALIDAR DATOS” que se encuentra a la derecha de las entradas. También da la posibilidad de adquirir datos mientras se está en lazo cerrado, para ello hay que pulsar el botón de “ADQUISICION DE DATOS”.

Al pulsar el símbolo normalizado de la puerta con la flecha que hay abajo a la derecha, el HMI se situara en la pantalla de portada desactivando el modo lazo cerrado.

## 6.3.7. IMAGEN 5: CONF\_PARAMETROS



Figura 6.52. Imagen CONF\_PARAMETROS

La Figura 6.52 corresponde a la pantalla de configuración de parámetros. Desde aquí se pueden volver a elegir los valores del acelerómetro y actuador. Como se comentó anteriormente, esta opción permite configurar otro acelerómetro o actuador y también da la posibilidad de verificar los valores actuales de nuestros periféricos y cambiarlos en caso de que haya algún error.

Otra opción que se da es la guardar los datos. Para ello se pulsa en el botón de “ADQUISICION DE DATOS” y nos lleva a la pantalla de adquisición de datos que se puede observar en la Figura 6.53. En esta pantalla se pueden guardar los datos de las dos maneras explicadas en los apartados 6.2.4.6 y 6.2.4.8.



Figura 6.53. Pantalla ADQUISICION DE DATOS

Esta pantalla nos permite guardar los datos en el DB8 pulsando el botón "GUARDAR DATOS EN DB" o también da la posibilidad de guardar los datos en su memoria interna en un archivo CSV. Para guardar los datos en la memoria interna es muy importante seguir la secuencia descrita en la pantalla, sino puede que de error a la hora de guardar estos datos.

Al pulsar el símbolo normalizado de la puerta con la flecha que hay abajo a la derecha, el HMI se situara en la pantalla de portada desactivando el modo de configuración.



## CAPITULO 7. ENSAYOS Y PRUEBAS EN LA MENSULA

### 7.1. INTRODUCCIÓN

Una vez estudiado el comportamiento teórico de la ménsula y de haber hecho los cálculos de sus controladores, se pasa a estudiar el comportamiento real de la ménsula con los datos estudiados anteriormente. Como se ha dicho con anterioridad, este ensayo práctico sirve para verificar si con el PLC industrial somos capaces de mejorar el estado vibratorio de una estructura tipo ménsula con un esquema de control PID y de esta manera poder llevarla a cabo en la pasarela peatonal que es la estructura final.

Para ello se cablea la ménsula con el PLC, el acelerómetro y todas las conexiones descritas en capítulos anteriores para realizar los ensayos. En la Figura 7.1 se puede apreciar el sistema el cual se va a realizar los ensayos y experimentos.

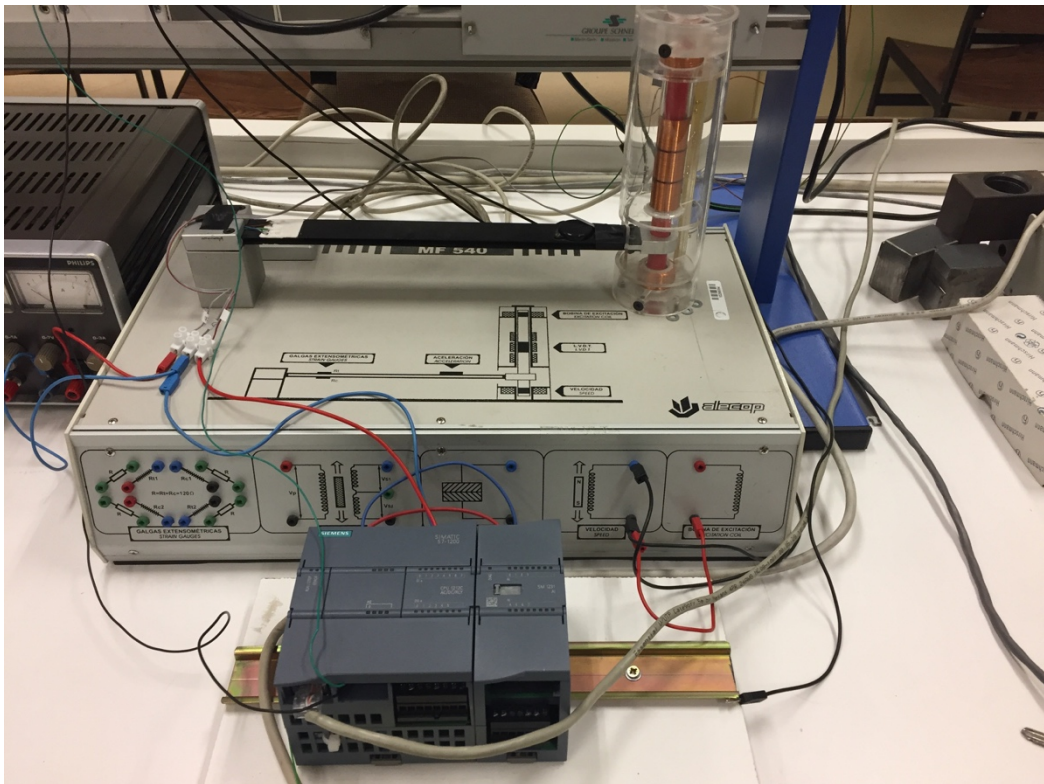


Figura 7.1. Ménsula equipada para ensayos y experimentos

El ensayo que se va a realizar refleja el comportamiento del sistema en el caso de que no esté controlado comparándolo con el caso en el que esté controlado. Para realizar los ensayos, se va a utilizar el captador de velocidad que nos proporciona la ménsula pero será usado como segundo excitador

dato que básicamente es como el shaker. Es decir no leeremos su salida sino que la bobina la usaremos para excitar al imán asociado al este sensor de velocidad. El experimento consiste en llevar la ménsula a resonancia con el captador de velocidad y controlarla con la bobina de excitación con su respectivo control. A continuación en la Figura 7.2 se muestra el esquema eléctrico utilizado.

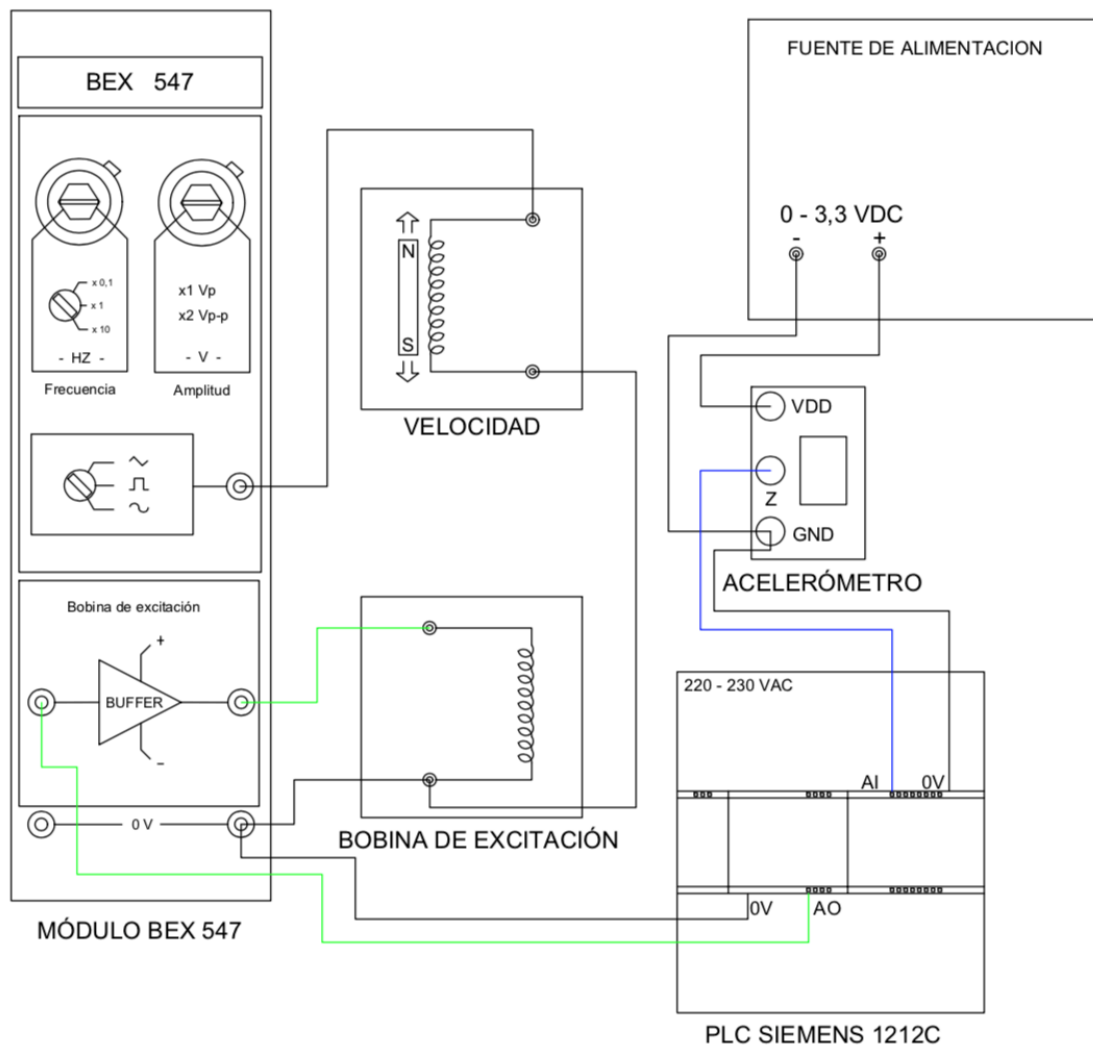


Figura 7.2. Esquema para la segunda prueba con el excitador

El ensayo que se va a realizar consiste en:

- Programar el PLC para que incorpore el controlador P, PI y PID.
- Conectar la señal del acelerómetro al PLC.
- Conectar la salida analógica del PLC al driver de la bobina excitadora para proporcionar la potencia a la bobina excitadora.
- Encender el PLC y los demás dispositivos.



- Se conecta el captador de velocidad con frecuencia de resonancia (7,5 Hz) y amplitud 1 V.
- Anotar y analizar los datos generados.
- Realizar pruebas alternando lazo abierto con el sistema en lazo cerrado y con controlador P, PI, PID.
- Anotar y analizar los datos generados.

La adquisición de datos se lleva a cabo con el PLC, ya que brinda la posibilidad de tomar los valores del acelerómetro en un tiempo determinado por el usuario.

Para realizar los experimentos con el sistema controlado con P, PI y PID se utiliza la función PID\_Compact de Siemens. Esta función ya fue comentada con anterioridad y se explica con más detalle en el capítulo 6.

### 7.2. SISTEMA EN LAZO ABIERTO

Se empieza por ver el comportamiento del sistema en lazo abierto al liberarlo de la carga sin acción del controlador. En la Figura 7.3 se puede ver el comportamiento del sistema en lazo abierto.

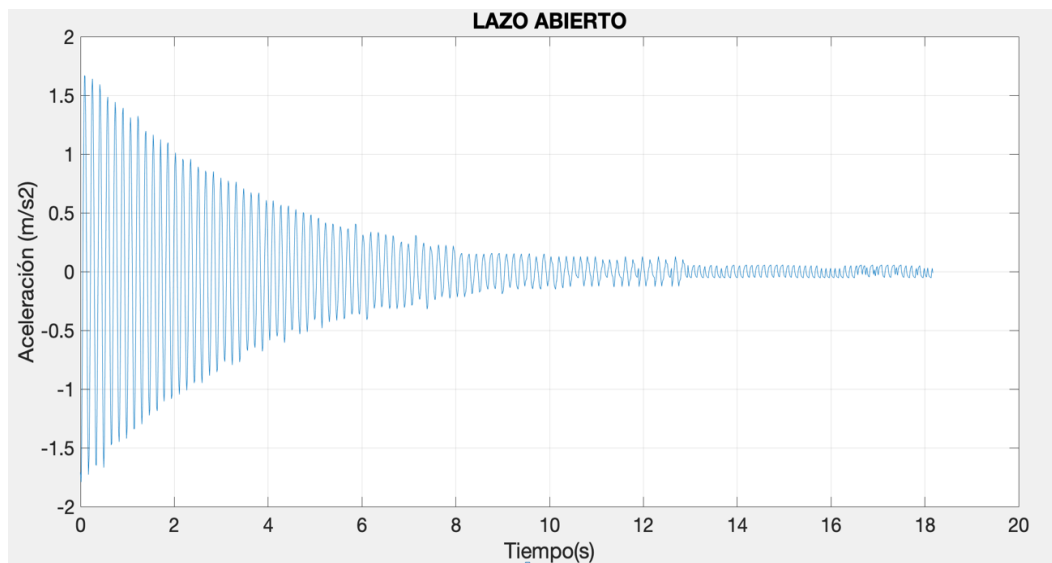


Figura 7.3. Sistema en lazo abierto excitado por entrada escalón

Como se puede observar en la Figura 7.3 el eje Y está con valores en m/s<sup>2</sup>. La amplitud máxima es de 1,71 m/s<sup>2</sup>. El tiempo de establecimiento está en 12,9 segundos. El valor estacionario está provisto de ruido pero no es de importancia en este caso, ya que es minúsculo.

Uno de los indicadores que permite medir la aceleración que afectan a las personas cuantificando el valor de la vibración es el MTVV (Maximum Transient Vibration Value) [15]. Este indicador con sus fórmulas fue explicado

en el capítulo 5 en las ecuaciones 5.8 y 5.9, se corresponde al valor máximo de la vibración transitoria durante un periodo de medición. Según la norma se recomienda utilizar una constante de tiempo de integración ( $\tau$ ) igual a 1 segundo. El MTVV para el caso del sistema en lazo abierto es el que se muestra en la Figura 7.4.

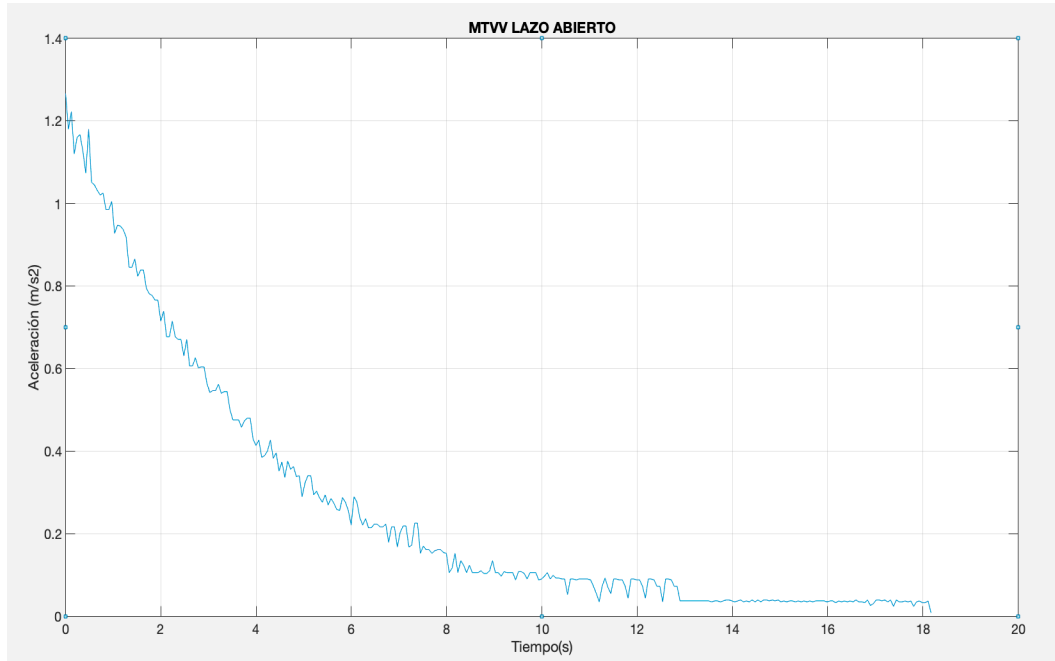


Figura 7.4. MTVV sistema en lazo abierto

El valor máximo es de 1,27 m/s<sup>2</sup>. Más adelante se compararán los MTVV en los diferentes casos para sacar conclusiones y observaciones.

### 7.3. EXPERIMENTO ALTERNANDO LAZO ABIERTO CON LAZO CERRADO Y CONTROLADOR PROPORCIONAL

El experimento se realiza alternando lazo abierto con lazo cerrado gobernado por el controlador proporcional. Con el captador de velocidad se lleva la ménsula a resonancia (frecuencia 7,5 Hz y amplitud 1 V) y con la bobina de excitación se intenta controlar las vibraciones. El lazo abierto corresponde a que la bobina de excitación este desactivada, por lo tanto la ménsula oscila libremente. Al activar la bobina de excitación se cierra el lazo. Para este ensayo, el controlador utilizado es el proporcional, con un valor de 175. Se ha comprobado experimentalmente que este valor es el que mejor se ajusta para controlar las vibraciones. En la Figura 7.5 se puede observar el experimento realizado y representado en la función Trace que ofrece TiaPortal.

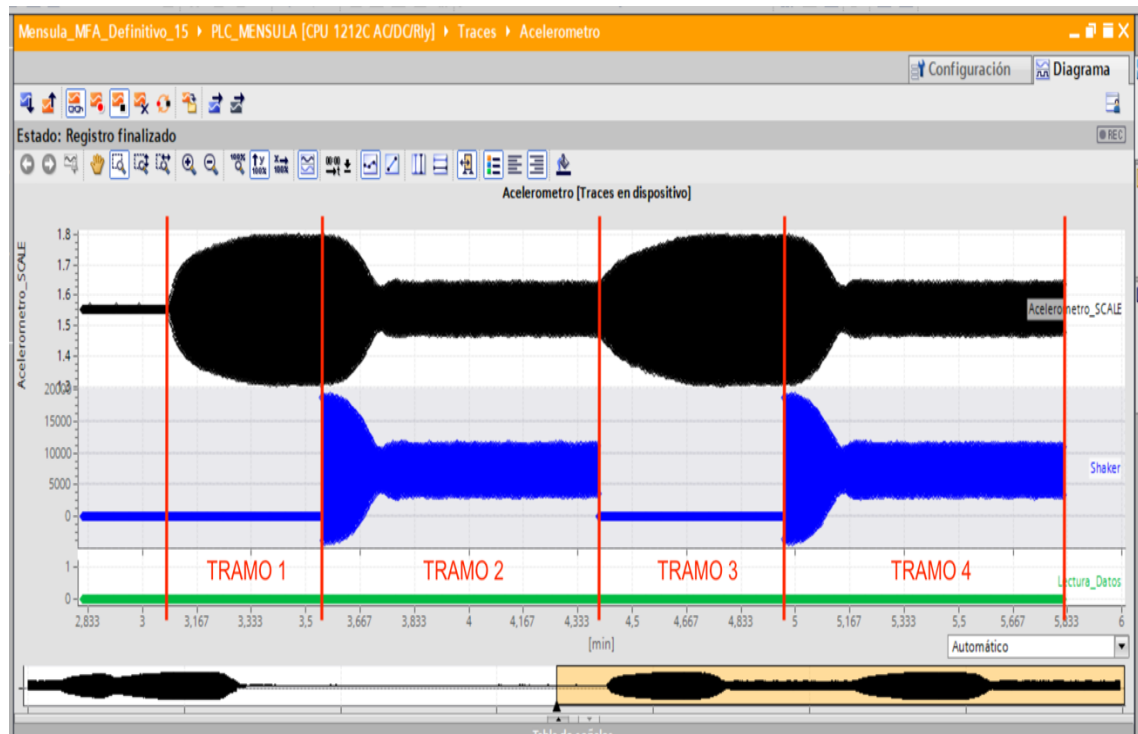


Figura 7.5. Ensayo alternado lazo abierto con lazo cerrado y controlador proporcional

Como se puede ver en la Figura 7.5, se ha dividido en cuatro tramos el ensayo. En el tramo 1 y 3 se observa que el sistema está en resonancia y en lazo abierto. En el tramo 2 y 4 el sistema está en resonancia pero en lazo cerrado con el controlador proporcional activo. La primera gráfica que se muestra con el color negro, se corresponde a los valores en voltios del acelerómetro, la segunda gráfica que está en color azul se corresponde a los valores de la bobina de excitación utilizados para controlar las vibraciones. Tanto en el tramo 1 como en el tramo 3 el valor de la bobina de excitación es cero por que está desactivada. Haciendo un estudio más detallado del ensayo se observa lo siguiente:

**TRAMO 1:** Arrancando de reposo, se pone la ménsula en resonancia (frecuencia 7,5 Hz y amplitud 1 V) con una onda senoidal, registrando el acelerómetro unos valores comprendidos entre 1,29..1,81 Voltios una vez alcanzado el estado estacionario de resonancia. El valor de la bobina de excitación es cero ya que está desactivada por que nos encontramos en lazo abierto.

**TRAMO 2:** Alcanzado el estado estacionario en resonancia se pasa a lazo cerrado y controlador proporcional. Al estar en lazo cerrado y activar la bobina excitadora, se puede ver que la amplitud de las vibraciones se reducen en cuestión de 7 segundos. La respuesta de la bobina excitadora se asemeja al comportamiento de las vibraciones provocando mitigarlas. Alcanzado el estado estacionario con la ménsula controlada, los valores

registrados por el acelerómetro están comprendidos entre 1,47..1,63 Voltios. Una reducción bastante considerable que se puede apreciar en la imagen.

**TRAMO 3:** Viniendo del tramo 2 donde la ménsula se encontraba en estado estacionario pero controlada por el controlador proporcional, se vuelve a lazo abierto provocando que la ménsula esté igual que en tramo 1, registrando el acelerómetro unos valores comprendidos entre 1,29..1,81 Voltios una vez alcanzado el estado estacionario de resonancia. El valor de la bobina de excitación vuelve a cero.

**TRAMO 4:** Volviendo a cerrar el lazo con el controlador proporcional, el comportamiento es el mismo que en tramo 2, corroborando de esta forma que el controlador proporcional mitiga las vibraciones de forma considerada.

Como se comentó en el apartado anterior, uno de los indicadores utilizados que permite medir la aceleración que afectan a las personas cuantificando el valor de la vibración es el MTVV (Maximum Transient Vibration Value) [15]. Con la adquisición de datos que ofrece el programa PLC se ha guardado el experimento que se ha llevado a cabo y con los valores obtenidos se ha podido graficar el MTVV del experimento y compararlo con las graficas que hay en la Figura 7.5. En la Figura 7.6 se observa el valor del MTVV del experimento.

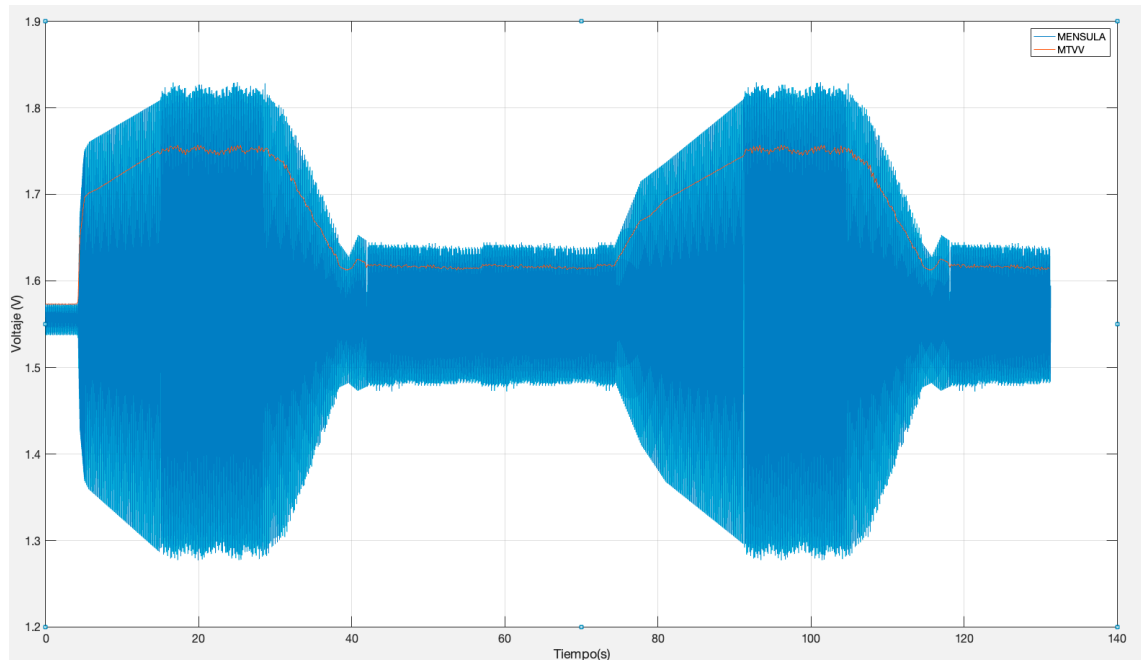


Figura 7.6. MTVV del ensayo 1

En la Figura 7.6 se muestra con línea roja el MTVV a lo largo del experimento. El valor de offset del acelerómetro es de 1,558. Con los valores adquiridos por medio del ensayo se puede ver el valor de pico positivo y

negativo restándole el valor de offset del acelerómetro. Para estudiar el comportamiento del experimento se elabora la Tabla 7.1 que refleja los resultados para poder estudiarlos más adelante.

ESTADO/SISTEMA	Voltaje MAX	Voltaje pico MAX	Voltaje MIN	Voltaje pico MIN	MTVV	MTVV pico
RESONANCIA/LA	1,81	0,252	1,29	0,268	1,751	0,193
RESONANCIA/LCP = 175	1,63	0,072	1,49	0,068	1,616	0,058

Tabla 7.1. Resultados del ensayo 1

Analizando los datos de la Tabla 7.1 se demuestra lo siguiente:

$$\frac{\text{Voltaje pico máximo LCP}}{\text{Voltaje pico máximo LA}} = \frac{0,072 \text{ V}}{0,252 \text{ V}} = 0,286 = 28,6 \% \quad (7.1)$$

$$\frac{\text{Voltaje pico mínimo LCP}}{\text{Voltaje pico mínimo LA}} = \frac{0,068 \text{ V}}{0,268 \text{ V}} = 0,254 = 25,4 \% \quad (7.2)$$

$$\frac{\text{MTVV pico LCP}}{\text{MTVV pico LA}} = \frac{0,058}{0,193} = 0,301 = 30,1 \% \quad (7.3)$$

Se observa en las ecuaciones 7.1, 7.2 y 7.3 que la mejora en el pico máximo es de 71,4 %, la mejora en el pico mínimo es de 74,6 % y la mejora en el MTVV es de 69,9 %.

#### 7.4. EXPERIMENTO ALTERNANDO LAZO ABIERTO CON LAZO CERRADO Y CONTROLADOR PROPORCIONAL-INTEGRAL

Para finalizar se realiza la última prueba que es idéntica a la prueba anterior, solo que se añade a mayores el controlador proporcional-integral en el lazo cerrado. Los valores utilizados en cada control se mencionan cuando se detalle cada tramo por separado. En la Figura 7.7 se puede ver el ensayo realizado.

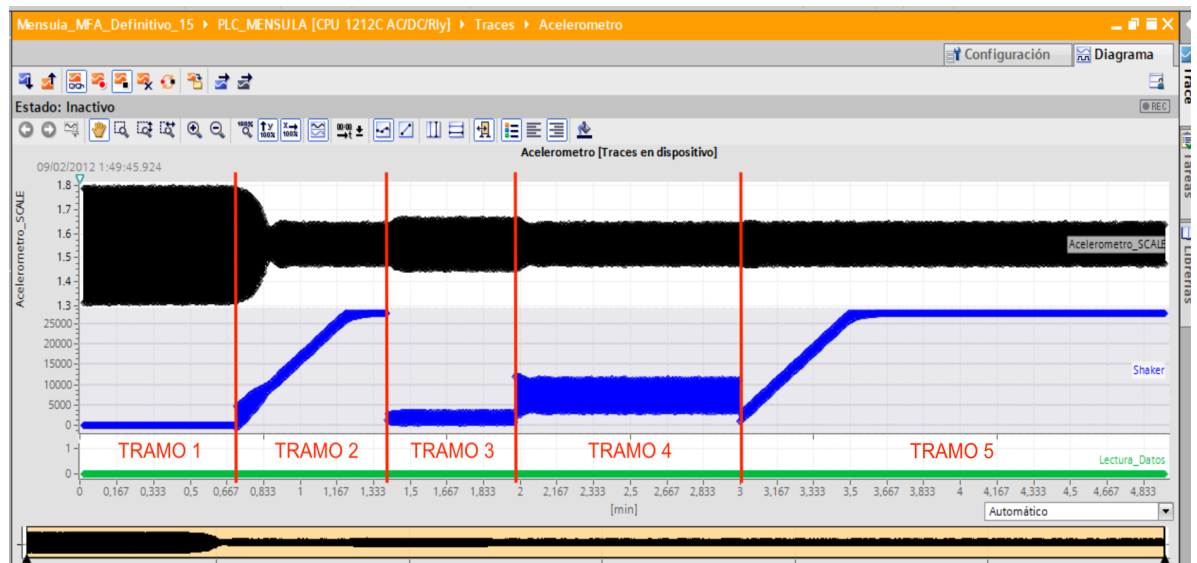


Figura 7.7. Sistema con controlador PID y entrada escalón

Como se puede ver en la Figura 7.7, se ha dividido en cinco tramos el ensayo. En el tramo 1 se observa que el sistema está en resonancia y en lazo abierto. En el tramo 2 y 5 el sistema está en resonancia pero en lazo cerrado con el controlador proporcional-integral activo. En el tramo 3 y 4 el sistema está en resonancia pero en lazo cerrado con el controlador proporcional activo con distintos valores. A continuación se estudian los tramos por separado:

**TRAMO 1:** Se pone la ménsula en resonancia (frecuencia 7,5 Hz y amplitud 1 V) con una onda senoidal, registrando el acelerómetro unos valores comprendidos entre 1,29..1,81 Voltios una vez alcanzado el estado estacionario de resonancia. El valor de la bobina de excitación es cero ya que está desactivada por que nos encontramos en lazo abierto.

**TRAMO 2:** Alcanzado el estado estacionario en resonancia se pasa a lazo cerrado y controlador proporcional-integral. Los valores utilizados son los que se muestran en capítulo 4, los cuales corresponden a lo analizado teóricamente para el control proporcional-integral. Estos valores son:  $P = 42,66$  P y  $T_i = 2,119$ . Al estar en lazo cerrado y activar la bobina excitadora, se puede ver que la amplitud de las vibraciones se reducen en cuestión de 7 segundos. La respuesta de la bobina excitadora se va elevando hasta saturarse. Esto es producido por la parte integral. A pesar de que la bobina excitadora este saturada, las vibraciones son mitigadas de la misma manera que utilizando el controlador proporcional con un valor de 175. Alcanzado el estado estacionario con la ménsula controlada, los valores registrados por el acelerómetro están comprendidos entre 1,47..1,63 Voltios. Una reducción bastante considerable que se puede apreciar en la imagen.

**TRAMO 3:** En este tramo el controlador utilizado es el proporcional con un valor de 40. La respuesta de la bobina excitadora se asemeja al comportamiento de las vibraciones provocando mitigar las vibraciones. Alcanzado el estado estacionario con la ménsula controlada, los valores registrados por el acelerómetro están comprendidos entre 1,45..1,67 Voltios. A pesar de que el control empeora, sigue siendo efectivo respecto al lazo abierto. Para mejorar este control en el tramo 4 se pone el valor de  $P = 175$ .

**TRAMO 4:** En este tramo el controlador utilizado es el proporcional con un valor de 175. Se hace esto para mejorar el control y demostrar que el control proporcional con un valor de 175 es igual el control proporcional-integral de la teoría. La respuesta de la bobina excitadora se asemeja al comportamiento de las vibraciones provocando mitigar las vibraciones. Alcanzado el estado estacionario con la ménsula controlada, los valores registrados por el acelerómetro están comprendidos entre 1,47..1,63 Voltios. Este control es el más adecuado ya que no satura a la bobina excitadora como ocurre en control proporcional-integral.

**TRAMO 5:** Se vuelve a poner el sistema con el controlador proporcional-integral para afianzar las deducciones del tramo 2.

En este caso también se avalúa el MTVV. En la Figura 7.8 se puede ver la gráfica con el MTVV.

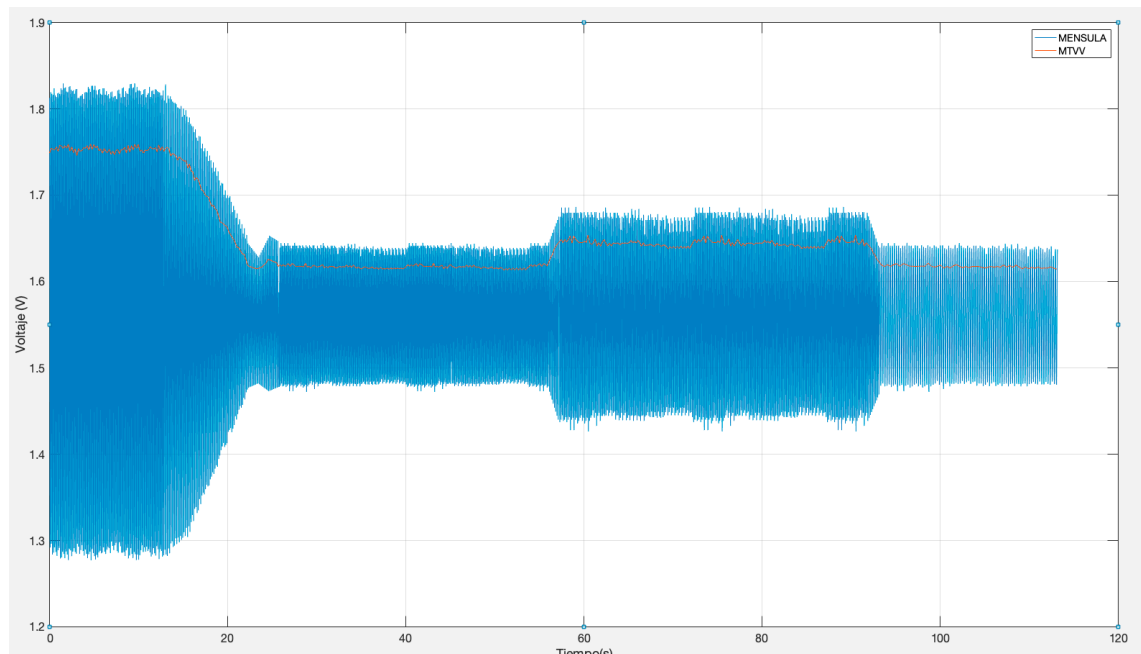


Figura 7.8. MTVV del ensayo 2

En la Figura 7.8 se muestra con línea roja el MTVV a lo largo del experimento. El valor de offset del acelerómetro es de 1,558. Con los valores

adquiridos por medio del ensayo se puede ver el valor de pico positivo y negativo restándole el valor de offset del acelerómetro. Para estudiar el comportamiento del experimento se elabora la Tabla 7.2 la cual esta separada por tramos.

ESTADO/SISTEMA	Voltaje MAX	Voltaje pico MAX	Voltaje MIN	Voltaje pico MIN	MTVV	MTVV pico
TRAMO 1/LA	1,81	0,252	1,29	0,268	1,751	0,193
TRAMO 2/LCPI P = 42,66 I = 2,119	1,63	0,072	1,49	0,068	1,616	0,058
TRAMO 3/LCP = 40	1,67	0,112	1,47	0,088	1,644	0,086
TRAMO 4/LCP = 175	1,63	0,072	1,49	0,068	1,616	0,058

Tabla 7.2. Resultados del ensayo 2

Para evaluar los tramos 2 y 4 se utilizan las ecuaciones 7.1, 7.2 y 7.3. De la Tabla 7.2 se obtienen los datos referidos al tramo 3:

$$\frac{\text{Voltaje pico máximo LCP}}{\text{Voltaje pico máximo LA}} = \frac{0,112 \text{ V}}{0,252 \text{ V}} = 0,444 = 44,4 \% \quad (7.4)$$

$$\frac{\text{Voltaje pico mínimo LCP}}{\text{Voltaje pico mínimo LA}} = \frac{0,088 \text{ V}}{0,268 \text{ V}} = 0,328 = 32,8 \% \quad (7.5)$$

$$\frac{\text{MTVV pico LCP}}{\text{MTVV pico LA}} = \frac{0,086}{0,193} = 0,446 = 44,6 \% \quad (7.6)$$

Se observa en las ecuaciones 7.4, 7.5 y 7.6 que la mejora con el controlador proporcional valiendo 40 en el pico máximo es de 55,6 %, la mejora en el pico mínimo es de 67,2 % y la mejora en el MTVV es de 55,4 %. El controlador proporcional del tramo 3 presenta una mejora pero es inferior al controlador proporcional del tramo 4.

## 7.5. ANALISIS DE LOS RESULTADOS

A lo largo del capítulo se ha identificado al controlador de forma aceptable en el sistema y como consecuencia se ha calculado el PID que se adapta al mismo.

En la Tabla 7.3 se puede ver el resultado de mejora de cada control:



SISTEMA	% MEJORA V MAX	% MEJORA V MIN	% MEJORA MTVV
LCP = 40	55,6	67,2	55,4
LCP = 175	71,4	74,6	69,9
LCPI P = 42,66 I = 2,119	71,4	74,6	69,9

Tabla 7.3. Mejora de los distintos controladores sobre el sistema

Como se ha podido ver en los experimentos y los resultados, la parte de la teoría no ha coincidido con la práctica. El sistema en lazo cerrado con el controlador proporcional es el que mejor se adapta sobre el sistema. Aunque el sistema en lazo cerrado con en controlador PI presentar los mismos resultados que el sistema en lazo cerrado con el controlador proporcional, la bobina excitadora en este caso está saturada, provocando que trabaje en saturación en todo momento y eso no es correcto. El hecho de que lo teórico no coincida con lo práctico se debe fundamentalmente a la poca fuerza que tiene el actuador, el cual limita al controlador del sistema.

Gracias a esto se cumplen dos de los objetivos que se tenían planteando para este TFG. El primero es controlar una estructura civil tipo pasarela peatonal con un PLC industrial de gama baja y el segundo es usar como esquema de control un PID.

Esta experiencia permite dar por válido que el control propuesto se puede implementar en la pasarela peatonal del museo de la Ciencia.



## CAPITULO 8. ESTUDIO ECONÓMICO

### 8.1. INTRODUCCIÓN

El apartado económico en los proyectos es una parte con mucho peso y a tener en cuenta para poder desarrollarlo. En este proyecto se va a estudiar el coste económico que tiene cada uno de los componentes y de su posible explotación. Hay que valorar que el producto que se puede comercializar sea utilizado en una pasarela peatonal, ya que los componentes utilizados en la ménsula, como se ha comentado en apartados anteriores, eran solo para el estudio del funcionamiento del PID. Para empezar, se hace mención a la lista de materiales que contiene el producto y como va a ser enfocado en el mercado. A continuación se mencionan los costes directos que se corresponden a los gastos del material y los gastos del personal. En el siguiente apartado se comentan los costes indirectos que son los gastos que se llevan acabo de forma indirecta para poder realizar el producto. Por último se comentan sus posibles mercados de explotación y el valor final de los distintos módulos del producto.

### 8.2. PRESENTACION DEL MATERIAL

Para empezar el producto que se va a comercializar en un armario de control de aluminio el cual incorpora los materiales que vienen expresados en la Tabla 8.1.

PLC Siemens S7-1212C AC/DC/RLY	HMI KTP400 Basic Panel
Magnetotérmico 2P 30A 230V	SignalBoard SIEMENS
Fuente de Alimentación 230AC/24DC	Fuente de Alimentación 230AC/5DC
Bornas para rail DIN	Enchufe tipo Schuko
Cables de potencia 1,5mm	Cables de mando 1mm
Relé de seguridad	Seta de emergencia
Pulsador luminoso verde	Canaleta para cables
Conector C22	Cable alimentación externa

Tabla 8.1. Materiales del producto

Además de estos materiales hay que añadirles los elementos de campo que hay fuera del armario de control y son fundamentales para el producto. Estos materiales son los descritos en la Tabla 8.2:

Acelerómetro MEMSIC CLXLO4GP1	Cable apantallado del sensor
-------------------------------	------------------------------

Tabla 8.2. Elementos de campo

La referencia económica que se va a utilizar para saber el valor de los materiales es la que se encuentra al buscar por internet en el mes de Mayo del 2020, por lo tanto si se produce de una forma industrial el valor de cada

material será más barato. En este caso se expone el valor más caro que es el valor crítico que hay que tener en cuenta para hacer el estudio económico.

La fuente de alimentación para la pantalla HMI que se propone en el proyecto es la recomendada por Siemens. El modelo de la fuente de la alimentación es la SITOP PSU100S 24 V/5 A.

La fuente de alimentación para el sensor MEMSIC es una fuente económica la cual al estudiar sus características técnicas se da por válida para este proyecto.

El relé de seguridad es de la marca PILZ. Esta es una de las marcas líderes en el mercado en materiales de seguridad. De esta forma se garantiza un alto nivel de seguridad a la hora de pulsar la seta de emergencia. También se le instala un pulsador luminoso verde el cual es obligatorio pulsar para que el equipo se ponga en marcha. De esta forma el equipo no se rearma automáticamente al soltar la seta de emergencia. El esquema eléctrico del PILZ se muestra en la Figura 8.1.

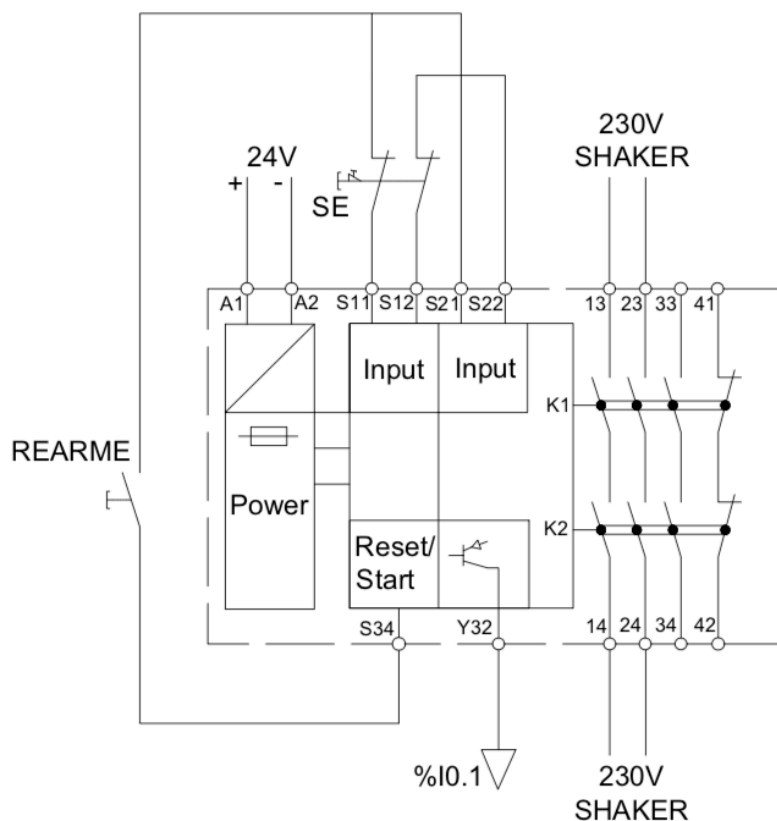


Figura 8.1. Esquema eléctrico PILZ

Los elementos seleccionados en este proyecto son los que más se adecuan al objetivo del proyecto que es elaborar un sistema que mitigue las

vibraciones en estructura civiles esbeltas tipo pasarelas peatonales empleando como controlador un PLC industrial de gama baja y no sea de gran impacto económico.

### 8.3. ESTRUCTURA DEL PRODUCTO

Una vez mencionados los materiales que se van a utilizar, se describe el producto que se ofrece al cliente.

#### PRODUCTO:

- Controlador de vibraciones que incluye pantalla de diálogo con el usuario y acelerómetro para la estructura a controlar.

Como se puede observar se ofrece un sistema completo totalmente acondicionado y listo para trabajar. También se daría servicio de venta de repuestos con servicio técnico, para darle al cliente un servicio completo y satisfactorio.

La venta del producto puede llevar consigo un aprendizaje del personal que lo va a manipular y una puesta en marcha.

El layout del producto es el que se ve en la Figura 8.2 y en la Figura 8.3. En los anexos se adjunta el esquema eléctrico.

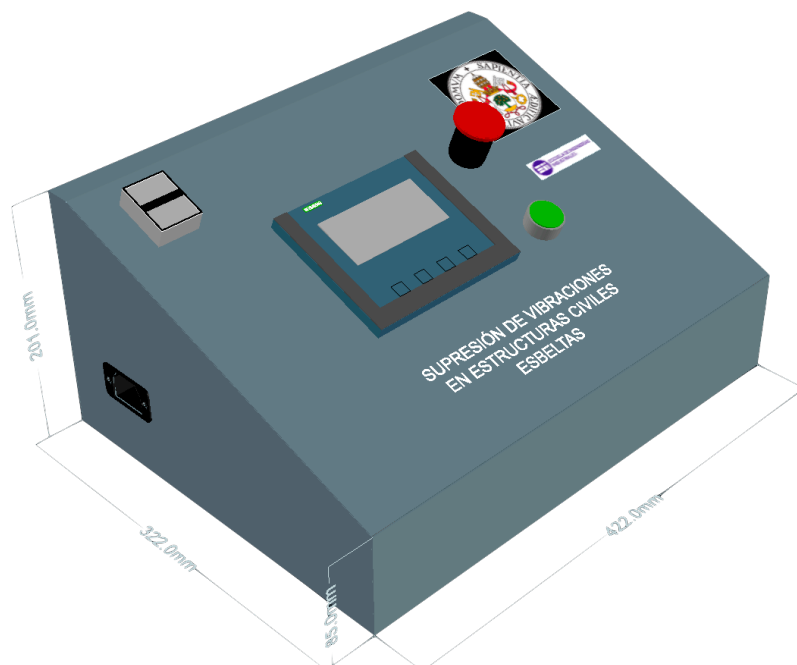


Figura 8.2. Layout del producto

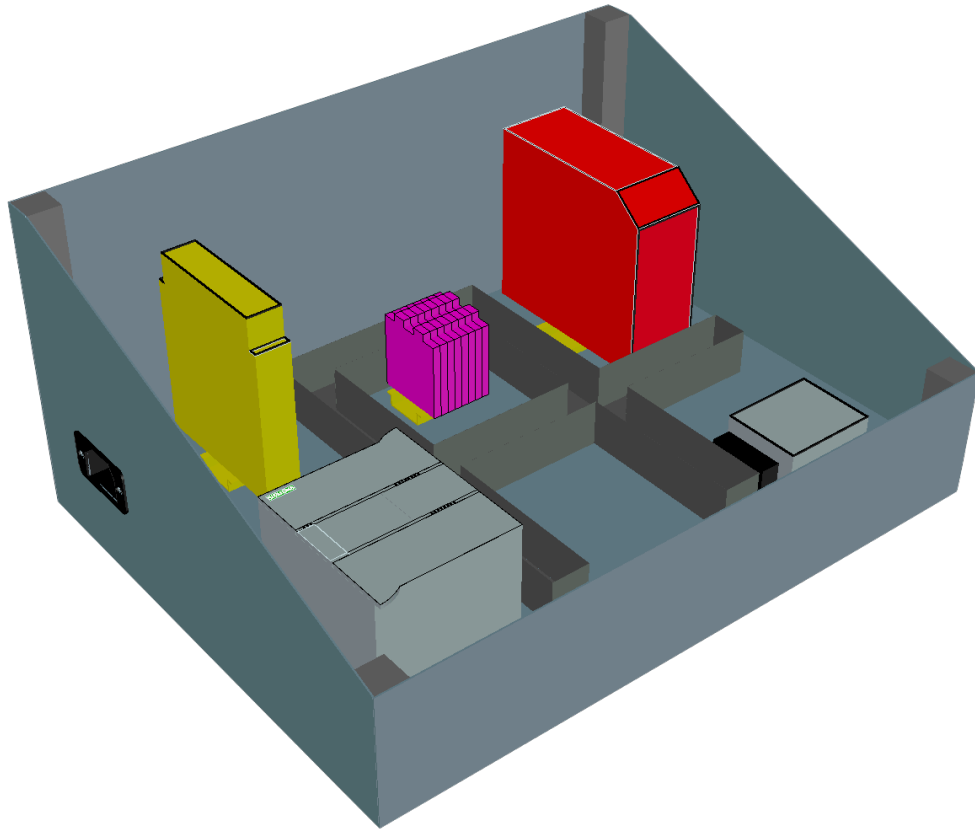


Figura 8.3. Layout interior del producto

## 8.4. COSTES DIRECTOS

Una vez visto los materiales y la estructura del producto en el mercado se calcula el coste económico directo. Este coste económico es un cálculo de los costes directos, es decir del precio del material y de su montaje y el coste directo de desarrollo del proyecto. El coste del material del producto es el coste de cada elemento presente, y el coste de desarrollo es un coste que se tiene en cuenta al inicio del proyecto.

### 8.4.1. COSTE DEL MATERIAL DEL PRODUCTO

Para empezar, en capítulo 2 “HARDWARE PROPUESTO” solo se mencionan los materiales principales que se hacía falta calcular para llevar a cabo este proyecto. Pero como se pudo ver en el apartado 8.2 la lista de materiales es más grande a la hora de elaborar un producto final.

Lo primero que hace falta es elaborar el armario de control. El Armario de control esta hecho con una estructura de tubos de aluminio huecos soldados de 20x20 mm. Se recubren los lados con paredes de chapa de

aluminio de 1mm de espesor y se sujetan a la estructura mediante tornillos. Esto facilita su montaje, desmontaje y manipulación (Figura 8.3).

El armario de control cumple con las medidas perfectas para poder instalar todos los materiales y por encima dejar un poco de espacio libre para tener una estructura interior de fácil acceso y manipulación para llevar a cabo un buen uso o mantenimiento. El que sea de aluminio proporciona que no pese mucho y que sea rígido a golpes o malos tratos.

Los materiales con su coste económico directo sin IVA son descritos en la Tabla 8.3.

CANTIDAD	MATERIAL	IMPORTE UNITARIO (€)	IMPORTE total (€) sin IVA
1	Perfil de aluminio 20x20x2600 mm	7,10	7,10
1	Chapa aluminio de 1 mm espesor. 2000x1000 mm	58,79	58,79
1	PLC Siemens S7-1212C AC/DC/RLY	194,18	194,18
1	Signal Board Siemens SB 1232 AO	98,49	98,49
1	HMI Siemens KTP400 Basic Panel	309,10	309,10
1	Fuente de alimentación Siemens SITOP PSU100S V/5 A	85,42	85,42
1	Fuente de alimentación 230VAC/ 5VDC	13,20	13,20
1	Acelerómetro MEMSIC CLXLO4GP1	446,94	446,94
1	Relé de seguridad PILZ PNOZ s4	240,05	240,05
1	Seta de emergencia	46,88	46,88
1	Pulsador luminoso verde	15,58	15,58
1	Magnetotérmico 2P 30A 230V	9,90	9,90
8	Bornas para riel DIN	1,09	8,72
1	Conector tipo C22	3,41	3,41
1	Enchufe tipo Schuko	2,13	2,13
1	Cable alimentación externa	32,89	32,89
5 Metros	Cables de potencia 1,5mm	0,25	1,25
5 Metros	Cables de mando 1mm	0,22	1,10
1	Rail DIN 7,5x35x755	2,42	2,42
2	Canaleta ranurada 30x25. Tira 1 metro	1,79	3,58
	Tornillos y otro medios de sujeción	20,00	20,00
	<b>TOTAL</b>		<b>1601,13</b>

Tabla 8.3. Coste económico del material

#### 8.4.2. COSTE DIRECTO DE FABRICACION Y MONTAJE

Una visto lo que cuestan los materiales se describe el costo de fabricación y montaje del producto. En este apartado se comenta lo

relacionado con el mecanizado, montaje y cableado del armario de control. El operario que realiza la fabricación y el montaje es un oficial de primera con salario anual de 18.342,15 € según el convenio del metal en Valladolid (Tabla 8.4). El salario del oficial representa el 70% del costo que le representa a la empresa, el otro 30% restante es el resultado de la suma de seguros sociales, prestación social y aportación al plan de pensiones. Por lo tanto a la empresa el empleado le cuesta 23.844,80 € anuales. Si se divide el costo anual entre 1.800 horas laborales que tiene el año, queda un costo por hora de 13,25 €. En la Tabla 8.5 se ve reflejado el costo de fabricación y montaje.

	DIVISION	CATEGORIA	SALARIO	PLUS	SALARIO	SALARIO	HORA
GRUPO	FUNCIONAL	PROFESIONAL	BASE	CONVENIO	TOTAL	ANUAL	EXTRA
1	Técnicos	Ingenieros y Licenciados	776,49	1.206,67	1.983,16/mes	27.569,79	19,47
2	Técnicos	Peritos y Ayudantes	761,01	956,48	1.717,49/mes	23.876,51	16,84
		Graduados Sociales	743,01	847,39	1.590,40/mes	22.109,65	15,63
	Empleados	Jefe 1º Administrativo	755,3	967,67	1.722,97/mes	23.952,68	16,9
	Operarios	Jefe taller (F.Cualificada)	743,04	919,91	1.662,95/mes	23.118,25	16,33
3	Técnicos	Delineante Proyectista	739,26	851,14	1.590,40/mes	22.109,65	15,63
	Empleados	Jefe 2º Administrativo	737,4	847,61	1.585,01/mes	22.034,74	15,54
	Operarios	Maestro Industrial	734,96	775,29	1.510,25/mes	20.995,45	14,85
		Contraaestrestre	730,13	749,28	1.479,41/mes	20.566,69	14,55
		Maestro de 1º	729,06	750,03	1.479,09/mes	20.562,21	14,5
4	Empleados	Delineante de 1º	728,39	706,84	1.435,23/mes	19.952,52	14,1
	Operarios	Maestro de 2º	727,85	692,3	1.420,15/mes	19.742,90	13,94
		Encargado	728,41	694,01	1.422,42/mes	19.774,43	13,98
5A	Empleados	Oficial de 1º Administrativo	728,41	694,01	1.422,42/mes	19.774,43	13,98
	Operarios	Oficial de 1º	23,99	19,47	43,46/día	18.342,15	12,94
		Chófer de Camión	23,99	19,47	43,46/día	18.342,15	12,94
5B	Empleados	Delineante de 2º	722,02	563,09	1.285,11/mes	17.865,54	12,62
		Oficial de 2º Administrativo	722,97	562,54	1.285,51/mes	17.871,09	12,62

Tabla 8.4. Salarios según el convenio del metal en Valladolid

CANTIDAD (HORAS)	CONCEPTO	IMPORTE UNITARIO (€)	IMPORTE total (€) sin IVA
2	Mecanizado del armario	13,25	26,50
1	Montaje del armario	13,25	13,25
2	Cableado de los componentes	13,25	26,50
<b>TOTAL</b>			<b>66,25</b>

Tabla 8.5. Coste de fabricación y montaje

### 8.4.3. COSTE DIRECTO DE DESARROLLO

Como se pudo ir viendo a lo largo de la memoria lo que en lo que más tiempo se ha invertido ha sido en el estudio, diseño y desarrollo del sistema. Por lo tanto se puede deducir que el costo en desarrollo es una parte importante en este proyecto. Es este caso al ser un proyecto de investigación



tan técnico las personas que han trabajado en él han sido dos ingenieros. Un ingeniero experto (tutor y profesor) y un ingeniero recién graduado. Observando la categoría del producto y de los profesionales que trabaja, el sueldo se corresponde al convenio de empresas de ingeniería y oficinas de estudios técnicos.

Para hallar el coste por horas de los ingeniero, nos referenciamos al convenio colectivo del sector de empresas de ingeniería y de oficinas de estudios técnicos con resolución el día 7 de Octubre de 2019 y referencia BOE-A-2019-14977[16]. Tabla 8.6.

	Niveles	Tabla salarial según art. 33		Plus convenio anual según art. 38 convenio	Total anual
		Mes x 14	Anual		
1	LICENCIADOS Y TITULADOS 2.º Y 3.º CICLO UNIVERSITARIO Y ANALISTA	1.712,42	23.973,88	2.349,69	26.323,57
2	DIPLOMADOS Y TITULADOS 1.º CICLO UNIVERSITARIO. JEFE SUPERIOR	1.291,04	18.074,56	2.349,69	20.424,25
3	TÉCNICO DE CÁLCULO O DISEÑO, JEFE DE 1.ª Y PROGRAMADOR DE ORDENADOR	1.244,93	17.429,02	2.349,69	19.778,71
4	DELINEANTE-PROYECTISTA, JEFE DE 2.ª Y PROGRAMADOR DE MAQ. AUXILIARES	1.141,36	15.979,04	2.349,69	18.328,73
5	DELINEANTE, TÉCNICO DE 1.ª, OFICIAL 1.ª ADMTVO. Y OPERADOR DE ORDENADOR	1.019,82	14.277,48	2.349,69	16.627,17
6	DIBUJANTE, TÉCNICO DE 2.ª, OFICIAL 2.ª ADMTVO., PERFORISTA, GRABADOR Y CONSERJE	878,63	12.300,82	2.349,69	14.650,51
7	TELEFONISTA-RECEPCIONISTA, OFICIAL 1.ª OFICIOS VARIOS Y VIGILANTE	849,16	11.888,24	2.349,69	14.237,93
8	AUXILIAR TÉCNICO, AUX. ADMTVO., TELEFONISTA, ORDENANZA, PERSONAL DE LIMPIEZA Y OFICIAL 2.ª OFICIOS VARIOS	790,36	11.065,04	2.349,69	13.414,73
9	AYUDANTE OFICIOS VARIOS	757,29	10.602,06	2.349,69	12.951,75

Tabla 8.6. Convenio colectivo del sector de empresas de ingeniería y oficinas de estudios técnicos

En la Tabla 8.6 se puede apreciar que el sueldo por convenio de un ingeniero Licenciado y titulado 2º y 3º Ciclo universitario y analista (tutor y profesor) es de 26.323,57 €/anuales y el sueldo de técnico de cálculo o diseño, jefe de 1ª y programador de ordenador (ingeniero recién graduado) es de 19.778,71 €/anuales. A estos sueldos hay que agregarles un 30% de costes de seguros sociales, prestaciones sociales y aportaciones a plan de pensiones. De esta forma el ingeniero licenciado y titulado 2º y 3º ciclo universitario cuesta 34.220,64 € anuales, dividido 1.800 horas que tiene el año, queda 19,01 €/hora y el técnico de cálculo o diseño cuesta 25.712,32 € anuales, dividido 1.800 horas que tiene el año, queda 14,28€/hora.

En la Tabla 8.7 una lista de tareas realizadas por los ingenieros con sus correspondientes horas.

ACTIVIDAD	HORAS
Estudio de sensores y PLCs disponibles en el mercado	16
Diseño del producto	50
Estudio del sistema en Matlab/Simulink	150
Estudio de la documentación Siemens	100
Desarrollo del Software en TiaPortal	60

Elaboración de la memoria	100
<b>TOTAL</b>	<b>476</b>

Tabla 8.7. Tareas a realizar por los ingenieros y sus horas empleadas

Por lo tanto el coste directo del personal de desarrollo queda expresado en la Tabla 8.8.

PERSONAL	COSTE HORARIO (€/HORA)	HORAS EMPLEADAS	TOTAL (€)
Ingeniero Licenciado	19,01	476	9048,76
Técnico de cálculo	14,28	476	6797,28
<b>TOTAL</b>			<b>15846,04</b>

Tabla 8.8. Coste del personal de desarrollo

A este coste hay que sumarle el gasto de equipos (ordenador, SW y licencias) que conlleva el desarrollo de la aplicación para el PLC y el HMI. En este caso el material empleado es un ordenador y la licencia de TiaPortal. En la Tabla 8.9 se le suman estos gastos.

PRODUCTO	COSTE (€)
Coste del personal de desarrollo	15846,04
Ordenador	835,00
Licencia profesional de TiaPortal	1900,92
<b>TOTAL</b>	<b>18581,96</b>

Tabla 8.9. Coste directo de desarrollo

El coste derivado del desarrollo es de 18581,96€.

## 8.5. GASTOS INDIRECTOS

Los costes indirectos son aquellos que derivan en la actividad de la empresa. Se pueden clasificar en dos partes principales: los costes administrativos y los costes de explotación.

Los coste administrativos se estiman unos 400 €/mes.

Los costes de explotación se detallan más brevemente en la siguiente Tabla 8.10.

CONCEPTO	COSTE (€/mes)
Consumo eléctrico	250,00
Documentación	50,00
Material de oficina	30,00
<b>TOTAL</b>	<b>330,00</b>

Tabla 8.10. Coste de explotación

## 8.6. COSTES TOTALES Y MERCADOS DE EXPLOTACIÓN

### 8.6.1. COSTES TOTALES

El coste total de nuestro producto se rige por la siguiente fórmula:

$$\text{COSTE TOTAL} = \text{coste material} + \text{coste de fabricación y montaje} + \text{coste desarrollo} + \text{Gastos} \quad (8.1)$$

El coste total es reflejado en la Tabla 8.11.

CONCEPTO	COSTE (€)
Costes de material (sin IVA)	1601,13
Costes de fabricación y montaje	66,25
Costes de desarrollo	18581,96
Gastos indirectos	730,00
<b>TOTAL</b>	<b>20979,34</b>

*Tabla 8.11. Costes totales del producto*

Como se puede observar el coste total es de 20979,34 €.

Para finalizar se propone un precio final de venta del producto. Este precio final de venta sería de **4000,00€**. Dado que por cada producto vendido se estima que se obtiene un beneficio de 2332,62 € ((Precio del producto) – (Costes de material) – (costes de Fabricación y montaje)), se supone que es un beneficio suficiente para cubrir los costes de desarrollo, gastos directos y obtener ganancias.



## CAPITULO 9. CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

### 9.1. CONCLUSIONES

Las conclusiones que se presentan están referidas al modelo de la ménsula. Respecto al modelo de la pasarela peatonal solo se pueden sacar conclusiones teóricas ya que no se pudo experimentar físicamente en la misma.

Tras la finalización de los diferentes estudios y ensayos se puede dar por válido que un PLC industrial de gama baja utilizando como esquema de control un PID puede mejorar el estado vibratorio de la ménsula. Ha habido alguna discordancia con los resultados teóricos respecto con los resultados experimentales, ocasionados principalmente por la poca fuerza del actuador de la ménsula. Igualmente con los ensayos realizados se ha demostrado que el control activo mejora el estado vibratorio. Con estos resultados se podría dar por válido para experimentar en la pasarela peatonal del Museo de la Ciencia que es la estructura que se desea controlar.

También se ha observado que se obtienen ventajas en cuanto al uso de pantallas HMI para manipular el esquema control de una forma más visual y sencilla pudiendo además guardar los datos del comportamiento de la estructura estudiada.

Por último, el hecho de que todos los componentes de trabajo estén en un mismo armario y pueda ser transportable, genera que se puedan realizar pruebas de campo en distintas estructuras.

## 9.2. LINEAS FUTURAS

Las líneas futuras que se pueden deducir de este trabajo son las que se exponen a continuación.

Una de las líneas futuras es la que se describe en el paper:

- “Desing of devices for protecting civil structures using fixed-order H & control” de Alfonso Poncela, Carlos Casado, Enrique Baeyens y Jose R. Perán.

En él se propone:

- Usos de sistemas híbridos de control. Un control compuesto por un sistema activo de control y por un sistema pasivo de control.
- El probar además el control H infinity.

Mas líneas futuras son mencionadas en el TFM realizado por Alberto Domingo de la Rubia en el año 2014:

- Utilizar una realimentación de estado.
- Utilizar controladores dinámicos.
- Utilizar un control multivariable: Con varios Shakers.

En nuestro proyecto las líneas futuras que se pueden añadir son:

- Optimizar el programa para que pueda incorporar más tipos de estructuras.
- Incorporar más sensores de aceleración de la pasarela para mejorar el control.
- Elaborar un dispositivo que recoja los datos del PLC y realice una las estadísticas definidas por el usuario para ver el comportamiento del control en un periodo de tiempo.

## CAPITULO 10. BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS

- [1] Ménsula ALECOP MF540: Página web: <https://www.alecop.com/equipamiento-didactico/areas/captadores-regulacion-de-procesos-y-automatas-programables/estudio-de-los-captadores-de-magnitudes-fisicas-serie-540-3/> [Fecha de último acceso: 23-05-2020].
- [2] Casado CM, Muñoz I, Sebastián J, Poncela A, Lorenzana A. "Implementation of passive and active vibration control on an in-service footbridge". Structural control and health Monitoring 2013; 20:70-87.
- [3] Casado CM, Muñoz I, Sebastián J, Poncela A, Lorenzana A. "Control de vibraciones en pasarelas peatonales". Dyna (ISSN: 0012-7361 ISSN digital: 1989-1490) 2011.
- [4] Domingo A, Poncela A. "Sistema para control de vibraciones basado en hardware arduino". TFM de la Universidad de Valladolid en 2014.
- [5] Datasheet PLC Siemens 1212C: Página web: <https://mall.industry.siemens.com/mall/en/us/Catalog/Product/6ES7212-1BE40-0XB0> [Fecha de último acceso: 23-05-2020].
- [6] Datasheet SignalBoard Siemens 1232: Página web: <https://mall.industry.siemens.com/mall/en/us/Catalog/Product/6ES72324H A300XB0> [Fecha de último acceso: 23-05-2020].
- [7] Datasheet HMI Siemens KTP400: Página web: <https://mall.industry.siemens.com/mall/en/us/Catalog/Product/6ES72324H A300XB0> [Fecha de último acceso: 23-05-2020].
- [8] Página oficial de POLOLU. Página web: <https://www.pololu.com/> [Fecha de último acceso: 23-05-2020].
- [9] Página de MEMSIC. Página web: <https://www.memsic.com/> [Fecha de último acceso: 23-05-2020].
- [10] Página oficial de APSDynamics. Página Web: <https://apsdynamics.com/en/> [Fecha de último acceso: 23-05-2020].
- [11] TiaPortal. Página Web: <https://new.siemens.com/global/en/products/automation/industry-software/automation-software/tia-portal.html> [Fecha de último acceso: 23-05-2020].

[12] Página oficial de Matlab&Simulink. Página Web: <https://es.mathworks.com/products/matlab.html> [Fecha de último acceso: 23-05-2020].

[13] Página oficial de Microsoft Excel. Página Web: <https://www.microsoft.com/es-es/microsoft-365/excel> [Fecha de último acceso: 23-05-2020].

[14] OGATA K., (2010). *Ingeniería de control moderna, 5ª edición*. Madrid. Pearson educación s.a., materia: Ingeniería de control automático.

[15] UNE - ISO 2631-1:2008, *Vibraciones y choques mecánicos - Evaluación de la exposición humana a las vibraciones de cuerpo entero - Parte 1: Requisitos generales*. AENOR 2008.

[16] Convenio colectivo del sector de empresas de ingeniería y de oficinas de estudios técnicos con resolución el día 7 de Octubre de 2019. Página web: [https://www.boe.es/diario\\_boe/txt.php?id=BOE-A-2019-14977](https://www.boe.es/diario_boe/txt.php?id=BOE-A-2019-14977) [Fecha de último acceso: 23-05-2020].