

COMPARACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS Y COMPORTAMIENTO DE UN
CONTROLADOR PID INDUSTRIAL CON LA FUNCIÓN PID DE UN PLC
(CONTROLADOR LÓGICO PROGRAMABLE).

JAVIER ORLANDO VILLAMIZAR CONTRERAS

JOSÉ CARLOS BITAR RODRIGUEZ

GUSTAVO ADOLFO YERENA BAYONA



UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

FACULTAD DE INGENIERIAS FÍSICO – MECÁNICAS

ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA, ELÉCTRONICA Y
TELECOMUNICACIONES

BUCARAMANGA

2013

COMPARACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS Y COMPORTAMIENTO DE UN
CONTROLADOR PID INDUSTRIAL CON LA FUNCIÓN PID DE UN PLC
(CONTROLADOR LÓGICO PROGRAMABLE).

JAVIER ORLANDO VILLAMIZAR CONTRERAS

Trabajo de grado para optar por el título de ingeniero electricista

JOSÉ CARLOS BITAR RODRIGUEZ

Trabajo de grado para optar por el título de ingeniero electricista

GUSTAVO ADOLFO YERENA BAYONA

Trabajo de grado para optar por el título de ingeniero electricista

Director

JULIO AUGUSTO GÉLVEZ FIGUEREDO

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

FACULTAD DE INGENIERIAS FÍSICO – MECÁNICAS

ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA, ELÉCTRONICA Y
TELECOMUNICACIONES

BUCARAMANGA

2013

DEDICATORIA

A Dios y a la Virgen santísima por todo lo recibido en esta vida.

A mi madre Blanca Cecilia Contreras Florez por su apoyo incondicional.

A mi padre Miguel Antonio Villamizar Montañez por sus buenos consejos.

A mi nonita Rosa Amira Florez de Contreras por su cariño

A mis padrinos Luisa Mirian Florez de Méndez y Manuel Méndez Rojas por su comprensión y apoyo.

A todos mis tíos por su gran apoyo y enseñarme que el trabajo duro trae sus frutos.

A mis hermanas y hermanos por escucharme cuando necesitaba que alguien me escuchara.

A mis primos y primas por los momentos de alegría.

A mis amigos por los momentos felices.

A el profesor Julio Gélvez Figueredo por ser nuestro guía en el proyecto, gracias por su buena disposición.

A Gustavo Latorre por su colaboración en el laboratorio.

A todos muchas gracias.

JAVIER ORLANDO VILLAMIZAR CONTRERAS

DEDICATORIA

A dios todo poderoso y la virgen por bendecirme con una familia maravillosa, por darme salud y por llenar mi vida de éxitos.

A mis padres por estar siempre conmigo apoyándome en cada decisión que tomo en mi vida.

A mi novia Milena Jaimes por estar siempre a mi lado.

Al profesor Julio Gelvez por ser nuestro guía durante este proyecto, gracias por su disposición.

A la compañera Ángela Arias por su colaboración desinteresada

GUSTAVO ADOLFO YERENA BAYONA

DEDICATORIA

A Dios por llenarme de tantas bendiciones y darme la familia que me dio.

A mi madre Rebeca Del Carmen Rodríguez Fernández por no solo ser mi madre sino mi confidente, mi cómplice, mi amiga, mi todo te amo mamá.

A mi padre José Joaquín Bitar González por su infalible apoyo y por sus buenos consejos y por ser el mejor ser humano que haya podido conocer gracias totales, te quiero padre.

A mi abuela Teodora González por su cariño.

A mis Hermanos José David Bitar, José Joaquín Bitar y mi hermana Claudia Bitar que sin ellos mi vida no tendría sentido.

A Carlos Rodríguez y Javier Villamizar que más que amigos son mis hermanos.

A Verónica Bustamante por ser luz en la oscuridad y no dejarme fallecer, te adoro.

A Julio Gélvez por ser nuestro guía y por su gran disposición a la hora de realizar este trabajo.

A Gustavo Latorre por su colaboración en el laboratorio.

A Ángela Arias por ser mi mejor amiga y a nene por su hospitalidad cuando la necesitamos.

A todos mis amigos de la universidad muchas gracias sin ustedes esto no hubiera sido posible.

JOSÉ CARLOS BITAR RODRÍGUEZ

CONTENIDO

1. GENERALIDADES DEL PROYECTO	26
1.1. OBJETIVO GENERAL	26
1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	26
1.3. MOTIVACIÓN Y JUSTIFICACIÓN	26
1.4. ALCANCE DEL PROYECTO	27
2. CONCEPTOS FUNDAMENTALES.....	29
2.1. ESPECIFICACIONES DE LA RESPUESTA TRANSITORIA	29
2.2. ECUACIÓN DE LA FUNCIÓN PID	30
2.3. TÉCNICA DE SINTONIZACIÓN PARA LA FUNCIÓN PID.....	31
2.3.1. Primer método de Ziegler-Nichols.....	31
2.4. CÁLCULO DEL MOMENTO DE INERCIA DE UN MOTOR DE DC DE EXCITACIÓN INDEPENDIENTE 34	
2.4.1. Primer método	34
2.4.2. Segundo método	36
2.5. CONTROLADORES	38
2.5.1. PLC S7 200 DE SIEMENS.....	38
2.5.2. PLC TWIDO (TWDLCAE40DRF) DE TELEMECANIQUE (SCHNEIDER)	41
2.5.3. CONTROLADOR UNIVERSAL UDC 1200 DE HONEYWELL	44
2.6. MODELADO DE LAS PLANTAS	45
2.6.1. MOTOR DE CORRIENTE CONTINUA DE EXCITACIÓN INDEPENDIENTE.....	45
2.6.2. HORNO ELÉCTRICO	47
2.6.3. LABVIEW	48
3. OBTENCIÓN DE PARÁMETROS DE LOS MODELOS.....	50
3.1. OBTENCIÓN DE LOS PARÁMETROS Y MODELO DE LA PANTA DE UN MOTOR DE EXCITACIÓN INDEPENDIENTE.....	50
3.1.1. Resistencia de armadura	50
3.1.2. Inductancia de la armadura.....	51
3.1.3. Constante de magnetización	52
3.1.4. Constante de fricción.....	52

3.1.5.	Momento De Inercia.....	53
3.2.	OBTENCIÓN DEL MODELO DEL HORNO	68
4.	CONSTRUCCIÓN DE LA PLANTA EN LABVIEW	70
4.1.	IMPLEMENTACIÓN DE LA PLANTA EN LABVIEW	70
4.1.1.	Descripción de los bloques funcionales.....	70
4.1.2.	Planta del horno con control continuo de alimentación.....	73
4.1.3.	Planta para el horno. Control con Triac.....	74
4.1.4.	Planta del motor control continuo de alimentación	76
4.1.5.	Control del motor con transistor.....	77
4.2.	CIRCUITOS INTEGRADOS	78
4.2.2.	Obtención de momento de inercia	78
4.2.3.	Circuito de aislamiento entre la tarjeta de adquisición y los controladores.....	80
4.2.4.	Circuito de acople al UDC1200	81
5.	ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS	83
5.1.	OBTENCIÓN DE LOS PARÁMETROS DE CONTROL PARA EL HORNO	83
5.2.	PRUEBAS CON EL HORNO	86
5.2.1.	CONTROL EN FORMA CONTINUA DE LA EXCITACIÓN PARA EL HORNO.....	86
5.2.2.	CONTROL CON TRIAC EN EL HORNO	89
5.3.	MEJORAMIENTO DE CONTROL DEL HORNO MEDIANTE UNA SINTONIZACIÓN FINA	91
5.3.1.	CONTROL CONTINUO EN EL HORNO CON PARAMETROS MEJORADOS	92
5.3.2.	CONTROL CON TRIAC EN EL HORNO CON PARAMETROS MEJORADOS.....	94
5.4.	OBTENCIÓN DE LOS PARÁMETROS DE CONTROL PARA EL MOTOR	96
5.5.	PRUEBAS EMPLEANDO EL MODELO DEL MOTOR	99
5.5.1.	SINTONIZACIÓN FINA PARA EL MOTOR SIN CARGA.....	99
5.5.2.	MOTOR CON CARGA.....	107
5.6.	Comportamiento del UDC con los parámetros del Siemens y comportamiento del Twido y del Siemens con los parámetros del UDC	114
6.	CONCLUSIONES Y OBSERVACIONES.	117
	BIBLIOGRAFÍA	121
	ANEXOS.....	123

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Curva respuesta mostrando parámetros t_d , t_s , M_p , t_r , t_p	29
Figura 2. Método de Ziegler-Nichols.....	31
Figura 3. Esquema de montaje para la medición del momento de inercia por el segundo método.....	37
Figura 4. Diagrama de control PID implementado por Twido de Schneider	42
Figura 5. Modelo del motor corriente continua excitación independiente.....	45
Figura 6. Sumatoria de fuerzas para un sistema masa-polea.....	54
Figura 7. Gráfica velocidad – tiempo con el método 1 para medir momento de inercia con una masa de 1 kg	56
Figura 8. Gráfica velocidad – tiempo con el método 1 para medir momento de inercia con una masa de 1.5 kg.....	57
Figura 9. Gráfica velocidad – tiempo con el método 1 para medir momento de inercia con una masa de 2 kg	58
Figura 10. Gráfica velocidad – tiempo con el método 1 para medir momento de inercia con una masa de 2.5 kg.....	59
Figura 11. Gráfica masa – $a/(g-a)$ para el método 2	61
Figura 12. Método 3 Curva de desenergización del Motor DC sin acople	62
Figura 13. Método 3 Curva de desenergización del Motor DC con acople	64
Figura 14. Método 3 Obtención de J midiendo la velocidad	66
Figura 15. Curva de calentamiento del horno eléctrico	68
Figura 16. Comparación curva de calentamiento real contra curva simulada	69
Figura 17. Planta para el horno -Control continuo de alimentación implementado en LABVIEW	73
Figura 18. Planta para el horno. Control con Triac implementado en LABVIEW	74
Figura 19. Planta para el motor. Control continuo implementado en LABVIEW	76
Figura 20. Planta del motor. Control continuo implementado en LABVIEW Planta del motor control continuo implementado en LABVIEW	77
Figura 21. Etapa de adecuación y aislamiento de tensión.....	79
Figura 22. Diagrama de conexiones para las señales digitales.....	79
Figura 23. Esquema de conexión del circuito de aislamiento TAD - controlador.....	80
Figura 24. Diagrama de conexiones de la señales analógicas.....	81
Figura 25. Esquema de conexión del convertidor XTR110.....	82
Figura 26. Diagrama de conexión de las señales analógicas para la comunicación con el UDC	82
Figura 27. Lazo cerrado de control sencillo.....	83
Figura 28. Respuesta del horno empleando Simulink con $K_p=2$, $T_i=335$	85

Figura 29. Control continuo de alimentación con el Controlador S7-200 de Siemens con $K_p=2$ y $T_i=335$ con Setpoint de $66,25\text{ }^{\circ}\text{C}$	86
Figura 30. Control continuo de alimentación con el Controlador Twido de Schneider con $K_p=2$ y $T_i=335$ con Setpoint de $66,25\text{ }^{\circ}\text{C}$	87
Figura 31. Control continuo de alimentación con el Controlador UDC1200 de Honeywell con parámetros $K_p=2$ y $T_i=335$ con Setpoint de $66,25\text{ }^{\circ}\text{C}$	87
Figura 32. Control de temperatura con Triac empleando el controlador S7-200 de Siemens con $K_p=2$ y $T_i=335$ y setpoint de $66,25\text{ }^{\circ}\text{C}$	89
Figura 33. Control de temperatura con Triac con el Twido de Schneider con parámetros $K_p=2$ y $T_i=335$ y Setpoint de $66,25\text{ }^{\circ}\text{C}$	89
Figura 34. Control de temperatura con Triac con el UDC1200 de Honeywell con parámetros $K_p=2$ y $T_i=335$ con Setpoint de $66,25\text{ }^{\circ}\text{C}$	90
Figura 35. . Respuesta por Simulink con parámetros $K_p=4$ $T_i=335$	91
Figura 36. Control continuo de alimentación mejorado empleando el controlador S7-200 de Siemens con $K_p=4$ $T_i=335$ con Setpoint de $66,25\text{ }^{\circ}\text{C}$	92
Figura 37. Control continuo de alimentación mejorado empleando el controlador Twido de Schneider con $K_p=4$ $T_i=335$ con Setpoint de $66,25\text{ }^{\circ}\text{C}$	92
Figura 38. Control continuo de alimentación mejorado empleando el controlador UDC1200 de Honeywell con $K_p=4$ $T_i=335$ con Setpoint de $66,25\text{ }^{\circ}\text{C}$	93
Figura 39. Control mejorado de temperatura con Triac empleando el controlador S7-200 de Siemens con $K_p=4$ $T_i=335$ con Setpoint de $66,25\text{ }^{\circ}\text{C}$	94
Figura 40. Control mejorado de temperatura con Triac empleando el controlador Twido de Schneider con $K_p=4$ $T_i=335$ con Setpoint de $66,25\text{ }^{\circ}\text{C}$	95
Figura 41. Control mejorado de temperatura con Triac empleando el controlador UDC1200 de Honeywell con $K_p=4$ $T_i=335$ con Setpoint de $66,25\text{ }^{\circ}\text{C}$	95
Figura 42. Implementación del método Ziegler y Nichols para el control del motor DC excitación independiente en MATLAB - Respuesta al escalón unitario.....	97
Figura 43. Sintonización fina por medio de Simulink con parámetros $K_p=1$ $T_i=0,004$ y $T_d=0,1$ con Setpoint de $107,5\text{ rad/seg}$	98
Figura 44. Curva obtenida por Simulink para sintonización fina del control del motor por variación continua de alimentación.....	100
Figura 45. Control continuo de velocidad (sin Carga) empleando Controlador S7-200 de Siemens con $K_p=0,1$ $T_i=0,1$ y $T_d=0,1$ con Setpoint de $107,5\text{ rad/seg}$	101
Figura 46. Control continuo de velocidad (sin carga) empleando Controlador Twido de Schneider con $K_p=0,1$ $T_i=0,1$ y $T_d=0,1$ con Setpoint de $107,5\text{ rad/seg}$	101
Figura 47. Sintonización fina para el UDC1200 con Setpoint de $107,5\text{ rad/seg}$	102
Figura 48. Control continuo de velocidad (sin Carga) empleando UDC 1200 de Honeywell con $K_p=50$ y $T_i=4$ con Setpoint de $107,5\text{ rad/seg}$	103
Figura 49. Control con transistor (sin Carga) empleando Controlador S7-200 de Siemens con $K_p=0,01$ $T_i=1$ y $T_d=0,1$ con Setpoint de $107,5\text{ rad/seg}$	104

Figura 50. Respuesta en Simulink para control de motor (sin carga) con transistor con nuevas constantes.....	105
Figura 51. Control con transistor (sin Carga) empleando Controlador Twido de Schneider con $K_p=0.01$ $T_i=1$ y $T_d=0.1$ con Setpoint de 107.5 rad/seg	105
Figura 52. Control con transistor (sin Carga) empleando Controlador UDC1200 de Honeywell con $K_p=50$ y $T_i=4$ con Setpoint de 107.5 rad/seg	106
Figura 53. Respuesta en Simulink para el control continuo del motor con carga para el PLC Siemens y Twido $K_p=0.1$ $T_i=0.1$ y $T_d=0.1$ con Setpoint de 107.5 rad/seg	107
Figura 54. Respuesta en Simulink para el control continuo del motor con carga para el UDC1200 $K_p=50$ $T_i=4$ con Setpoint de 107.5 rad/seg	108
Figura 55. Control continuo de velocidad (con Carga) empleando Controlador S7-200 de Siemens con $K_p=0.1$ $T_i=0.1$ y $T_d=0.1$ con Setpoint de 107.5 rad/seg.....	108
Figura 56. Control continuo de velocidad (con Carga) empleando Controlador Twido de Schneider con $K_p=0.1$ $T_i=0.1$ y $T_d=0.1$ con Setpoint de 107.5 rad/seg	109
Figura 57. Control continuo de velocidad (con Carga) empleando Controlador UDC1200 de Honeywell con $K_p=50$ y $K_i=4$ con Setpoint de 107.5 rad/seg.....	109
Figura 58. Simulación en MATLAB control del motor (con carga) con transistor.....	111
Figura 59. Control con transistor (con Carga) empleando Controlador S7-200 de Siemens con $K_p=0.01$ $T_i=1$ y $T_d=0.1$ con Setpoint de 107.5 rad/seg	112
Figura 60. Control con transistor (con Carga) empleando Controlador Twido de Schneider con $K_p=0.01$ $T_i=1$ y $T_d=0.1$ con Setpoint de 107.5 rad/seg	112
Figura 61. Control con transistor (con Carga) empleando Controlador UDC1200 de Honeywell con $K_p=50$ y $T_i=4$ con Setpoint de 107.5 rad/seg	113
Figura 62. Respuesta de UDC1200 control continuo del motor. Parámetros $K_p=0.1$ $T_i=0.1$ $T_d=0.1$	114
Figura 63. Respuesta del PLC Siemens control continuo del motor. Parámetros $K_p=50$ $T_i=4$	115
Figura 64. Respuesta del PLC Twido por control continuo del motor. Parámetros $K_p=50$ y $T_i=4$	115
Figura 65. Pantalla capturada del software V4.0 STEP 7 MicroWIN SP5 para la visualización de la carpeta Asistentes.	128
Figura 66. Pantalla capturada del software V4.0 STEP 7 MicroWIN SP5 para la selección de lazo de control	129
Figura 67. Pantalla capturada del software V4.0 STEP 7 MicroWIN SP5 para la programación de los parámetros de lazo	130
Figura 68. Pantalla capturada del software V4.0 STEP 7 MicroWIN SP5 para la configuración de entradas y salidas	131
Figura 69. Pantalla capturada del software V4.0 STEP 7 MicroWIN SP5 para la configuración de alarmas	132
Figura 70. Pantalla capturada del software V4.0 STEP 7 MicroWIN SP5 para agregar la memoria de cálculo	133

Figura 71. Pantalla capturada del software V4.0 STEP 7 MicroWIN SP5 para dar nombre a la rutina y a la subrutina.....	133
Figura 72. Pantalla capturada del software V4.0 STEP 7 MicroWIN SP5 para finalizar la configuración del asistente.....	134
Figura 73. Pantalla capturada del software V4.0 STEP 7 MicroWIN SP5 para visualizar el PID en la pestaña principal.....	135
Figura 74. Pantalla capturada del software V4.0 STEP 7 MicroWIN SP5 para la visualización del bloque SBR_0 en la pestaña SBR_0.....	135
Figura 75. Pantalla capturada del software V4.0 STEP 7 MicroWIN SP5 para visualizar la colocación de las entradas y salidas del bloque PID.....	136
Figura 76. Pantalla capturada del software V4.0 STEP 7 MicroWIN SP5 para visualizar la tabla de estados.....	136
Figura 77. Pantalla capturada del software V4.0 STEP 7 MicroWIN SP5 para visualizar los mensajes de error.....	137
Figura 78. Pantalla capturada del software V4.0 STEP 7 MicroWIN SP5 para visualizar la ventana Comunicación.....	138
Figura 79. Pantalla capturada del software V4.0 STEP 7 MicroWIN SP5 para visualizar la ventana Cargar en CPU.....	139
Figura 80. Pantalla capturada del software V4.0 STEP 7 MicroWIN SP5 para visualizar en la tabla de estado el nuevo valor.....	140
Figura 81. Pantalla capturada del software V4.0 STEP 7 MicroWIN SP5 para visualizar en la tabla de estados el comportamiento de la variables.....	140
Figura 82. Pantalla capturada del software V4.0 STEP 7 MicroWIN SP5 para visualizar la colocación de los nuevos parámetros.....	141
Figura 83. Pantalla capturada del software TwidoSoft para la visualización de los módulos de expansión.....	142
Figura 84. Pantalla capturada del software TwidoSoft para la visualización de la configuración de las entradas analógicas.....	143
Figura 85. Pantalla capturada del software TwidoSoft para la visualización del código para la activación del PID.....	144
Figura 86. Pantalla capturada del software TwidoSoft para la visualización de la configuración del periodo de exploración.....	145
Figura 87. Pantalla capturada del software TwidoSoft para la visualización de la ventana de configuración de datos.....	146
Figura 88. Pantalla capturada del software TwidoSoft para la visualización de la selección del PID.....	147
Figura 89. Pantalla capturada del software TwidoSoft para la visualización de la configuración del estado PID.....	148
Figura 90. Pantalla capturada del software TwidoSoft para la visualización de la pestaña entrada.....	149

Figura 91. Pantalla capturada del software TwidoSoft para la visualización de la configuración de la pestaña entrada	150
Figura 92. Pantalla capturada del software TwidoSoft para la visualización de la pestaña PID	151
Figura 93. Pantalla capturada del software TwidoSoft para la visualización de la pestaña PID con los parámetros configurados	152
Figura 94. Pantalla capturada del software TwidoSoft para la visualización de la pestaña salida.	152
Figura 95. Pantalla capturada del software TwidoSoft para la visualización de la pestaña Salida con los parámetros configurados	154
Figura 96. Pantalla capturada para la visualización de la dirección IP	155
Figura 97. Pantalla capturada para la visualización de correcta comunicación con le PLC. ...	156
Figura 98. Pantalla capturada del software TwidoSoft para la visualización de la pestaña describir para configurar la dirección IP.....	157
Figura 99. Pantalla capturada del software TwidoSoft para la visualización para configurar la dirección IP.	158
Figura 100. Pantalla capturada del software TwidoSoft para la visualización del icono Preferencias.....	159
Figura 101. Pantalla capturada del software TwidoSoft para la visualización de la gestión de las conexiones.....	159
Figura 102. Pantalla capturada del software TwidoSoft para la visualización de la conexión de puesta a punto.....	160
Figura 103. Pantalla capturada del software TwidoSoft para la visualización de la transferencia al autómatas.....	160
Figura 104. Pantalla capturada del software TwidoSoft para la visualización de la tabla de animación.....	161
Figura 105. Pantalla capturada del software TwidoSoft para la visualización de introducción de nuevos valores	162
Figura 106. Foto de la pantalla principal del UDC.....	163
Figura 107. Diagrama de conexiones UDC1200	163
Figura 108. Foto de la pantalla del UDC en el modo selección	164
Figura 109. código de los modos	165
Figura 110. Foto de la pantalla en modo configuración del UDC 1200.	166
Figura 111. Foto de la pantalla para introducir el código de acceso al modo configuración del UDC 1200.	166
Figura 112. Foto de la pantalla del UDC 1200 donde se muestra la ubicación de los códigos del controlador	167
Figura 113. Imagen capturada del manual básico del UDC1200 con los códigos de las entradas.	168
Figura 114. Foto de la pantalla del UDC 1200 en el parámetro entrada.....	168

Figura 115. Foto de la pantalla del UDC 1200 en el parámetro límite superior de amplitud de escala	169
Figura 116. Foto de la pantalla del UDC 1200 en el parámetro límite inferior de amplitud de escala	170
Figura 117. Foto de la pantalla del UDC 1200 en el parámetro posición del punto decimal.....	171
Figura 118. Códigos de las opciones de tipo de control.....	171
Figura 119. Foto de la pantalla del UDC 1200 en el parámetro tipo de control.....	172
Figura 120. Foto de la pantalla del UDC 1200 en el parámetro acción de control de salida ...	172
Figura 121. Códigos de las opciones de acción de control de salida	172
Figura 122. Foto de la pantalla del UDC 1200 en el parámetro tipo de alarma.	173
Figura 123. opciones de selección para el parámetro tipo de alarma	173
Figura 124. Foto de la pantalla del UDC 1200 en el parámetro alarma de lazo.	174
Figura 125. Foto de la pantalla del UDC 1200 en el parámetro alarma inhibida	174
Figura 126. opciones de configuración del parámetro alarma inhibida.....	175
Figura 127. Foto de la pantalla del UDC 1200 en el parámetro uso de salida 1.....	175
Figura 128. Opciones de configuración del parámetro uso de salida 1.....	176
Figura 129. Foto de la pantalla del UDC 1200 en el parámetro rango salidas analógicas.....	177
Figura 130. Opciones de salidas para el controlador	177
Figura 131. Foto de la pantalla del UDC 1200 en el parámetro retransmisión de la escala del parámetro de salida.....	178
Figura 132. Foto de la pantalla del UDC 1200 en el parámetro retransmisión de escala mínimo del parámetro de salida	178
Figura 133. Foto de la pantalla del UDC 1200 en el parámetro módulo de visualización.	179
Figura 134. Foto de la pantalla del UDC 1200 en el parámetro protocolo de comunicación. ...	179
Figura 135. Opciones de comunicación del UDC100.....	179
Figura 136. Opciones de velocidad en baudios del controlador	180
Figura 137. Opciones del Parámetro escritura de comunicación.	180
Figura 138. Foto de la pantalla del UDC 1200 en la entrada del modo ajuste.....	181
Figura 139. Foto de la pantalla del UDC 1200 en el parámetro constante de tiempo de filtro de entrada	182
Figura 140. Foto de la pantalla del UDC 1200 en el parámetro Offset de variable de Proceso	182
Figura 141. Foto de la pantalla del UDC 1200 en el parámetro Proporcional primaria.....	183
Figura 142. Foto de la pantalla del UDC 1200 en el parámetro constante de tiempo integra .	183
Figura 143. Foto de la pantalla del UDC 1200 en el parámetro constante de tiempo derivativo	184
Figura 144. Foto de la pantalla del UDC 1200 en el parámetro Reset manual.....	184
Figura 145. Foto de la pantalla del UDC 1200 en el parámetro límite superior del punto de consigna.....	185

Figura 146. Foto de la pantalla del UDC 1200 en el parámetro límite de potencia de salida principal.	185
Figura 147. Foto de la pantalla del UDC 1200 en el parámetro pre ajuste automático	186
Figura 148. Foto de la pantalla del UDC 1200 en el parámetro selección del control automatico/manual	187
Figura 149. Foto de la pantalla del UDC 1200 en el parámetro Ajuste de rampa en el punto de consigna mostrado en el modo operario.....	187
Figura 150. Foto de la pantalla del UDC 1200 en el parámetro valor punto de consigna.	188
Figura 151. Planta para el horno implementada en Simulink.....	189
Figura 152. Programa para la implementación del motor sin carga en Simulink	190
Figura 153. Programa para la implementación del motor con carga en Simulink	191
Figura 154. Programa en simulink para el motor con un torque resistente constante, el momento de inercia de la carga visto en el motor es despreciable	192
Figura 155. Resultado obtenido en Simulink despreciando el momento de inercia de la carga	193
Figura 156. Programa en simulink para el motor con un torque resistente constante, teniendo en cuenta el momento de inercia de la carga.	193
Figura 157. Programa en simulink para el motor con un torque resistente constante, teniendo en cuenta el momento de inercia de la carga.	194
Figura 158. Programa en Labview para el motor con un torque resistente constante (una carga elevadora).	195
Figura 159. Resultado con el PLC de siemens despreciando el efecto del momento de inercia de la carga.	196
Figura 160. Visualización de pantalla de ingreso del bloque DAQ Assist	197
Figura 161. Visualización de pantalla de elección de tipo de señal	198
Figura 162. Visualización de pantalla de elección de tipo de entrada o salida	198
Figura 163. Visualización de pantalla selección de tipo de señal.....	199
Figura 164. Visualización de pantalla de selección de entrada física en la tarjeta	199
Figura 165. Visualización de pantalla de configuración de los parámetros de la señal	200
Figura 166. Visualización de pantalla de diagrama de conexión	201
Figura 167. Visualización de pantalla de verificación de comunicación	201

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Formulas Primer Método Z-N.....	32
Tabla 2. Efecto de las constantes de control	33
Tabla 3. Medición tensión-corriente de motor DC	51
Tabla 4. Medición de Inductancia del Motor DC	51
Tabla 5. Determinación de la constante K_m	52
Tabla 6. Determinación de la constante de fricción.	53
Tabla 7. Método 1 para medir momento de inercia con una masa de 1 kg	56
Tabla 8. Método 1 para medir momento de inercia con una masa de 1.5 kg	57
Tabla 9. Método 1 para medir momento de inercia con una masa de 2 kg	58
Tabla 10. Método 1 para medir momento de inercia con una masa de 2.5 kg	59
Tabla 11. Determinación del momento de inercia por el método 1 promediando resultados	60
Tabla 12. Método 3 -medición del momento de inercia sin acople.....	63
Tabla 13. Determinación de la constante de fricción B	64
Tabla 14. Determinación de la constante mecánica τ_m	65
Tabla 15. Método 3 –Determinación de la constante mecánica τ_m por medición de velocidad	66
Tabla 16. Medición del momento de inercia por el Método 3	67
Tabla 17. Comparación entre controladores para el control continuo de la alimentación para el horno. Parámetros $K=2$ y $T_i=335$ y Setpoint de $66,25^\circ\text{C}$	88
Tabla 18. Comparación entre controladores para el control con Triac para el horno. Parámetros $K_p=2$ y $T_i=335$ con Setpoint de $66,25^\circ\text{C}$	90
Tabla 19. Comparación entre controladores para el control continuo de alimentación mejorado para el horno. Parámetros $K_p=4$ $T_i=335$ con Setpoint de $66,25^\circ\text{C}$	93
Tabla 20. Comparación entre controladores para el control mejorado de temperatura con Triac. Parámetros $K_p=4$ $T_i=335$ con Setpoint de $66,25^\circ\text{C}$	96
Tabla 21. Determinación de constantes por Ziegler y Nichols	97
Tabla 22. Comparación entre controladores para el control continuo de velocidad para el motor. Parámetros $K_p=0,1$ $T_i=0,1$ y $T_d=0,1$ para los PLC Twido y Siemens y $K_p=50$ $T_i=4$ para el UDC 1200 con Setpoint de 107.5 rad/seg	103
Tabla 23. Comparación entre controladores para el control con transistor para el motor. Parámetros $K_p=0.01$ $T_i=1$ y $T_d=0,1$ para los PLC Siemens y Twido y $K_p=50$ y $T_i=4$ para UDC 1200 con Setpoint de 107.5 rad/seg	106
Tabla 24. Comparación entre controladores para el control continuo de la alimentación para el motor (con carga). Parámetros $K_p=0,1$ $T_i=0,1$ y $T_d=0,1$ para los PLC Twido y Siemens y $K_p=50$ $T_i=4$ para el UDC 1200 con Setpoint de 107.5 rad/seg	110
Tabla 25. Comparación entre controladores para el control con transistor de la alimentación para el motor(con carga). Parámetros $K_p=0,01$ $T_i=1$ y $T_d=0,1$ para los PLC Twido y Siemens y $K_p=50$ y $T_i=4$ con Setpoint de 107.5 rad/seg	113

LISTA DE ANEXOS

ANEXO A	123
ANEXO B	128
ANEXO C	142
ANEXO D	163
ANEXO E	189
ANEXO F	197

RESUMEN

TÍTULO: COMPARACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS Y COMPORTAMIENTO DE UN CONTROLADOR PID INDUSTRIAL CON LA FUNCIÓN PID DE UN PLC (CONTROLADOR LÓGICO PROGRAMABLE)*

AUTORES: JAVIER ORLANDO VILLAMIZAR CONTRERAS, JOSÉ CARLOS BITAR RODRÍGUEZ, GUSTAVO ADOLFO YERENA BAYONA**.

PALABRAS CLAVES: Motor DC de Excitación Independiente, PLC (controlador lógico programable), Controlador PID, LabVIEW.

CONTENIDO:

El trabajo descrito en este documento consistió en un estudio el cual busca comparar las características y funcionamiento de un controlador PID industrial con la función PID de un PLC, usando como planta un motor DC de excitación independiente y un horno eléctrico, ambos simulados en el software LabVIEW valiéndose de su función de transferencia.

El objetivo del estudio era evaluar que tan eficiente era el controlador PID Industrial con respecto a la función PID embebida en los PLC que se tienen en la Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones de la UIS y lograr aportar a la industria y academia algunos criterios que permitieran seleccionar o descartar el uso de ellos para aplicaciones de control de velocidad y temperatura.

Como trabajo previo a este análisis se debió realizar la medición del momento de inercia de motor DC para su posterior caracterización, para lo cual se desea implementar varios métodos con el fin de contrastar estas mediciones y dejar a la escuela una práctica de laboratorio para la asignatura de accionamientos eléctricos.

Como aporte a la academia y a las futuras generaciones se escribieron tres manuales de la configuración e implementación detallada de cada uno de los equipos utilizados.

* Proyecto de Grado.

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones. Director: Julio Augusto Gélvez Figueredo

ABSTRACT

Title: COMPARISON OF THE CHARACTERISTICS AND BEHAVIOR OF AN INDUSTRIAL PID CONTROLLER AGAINST PID FUNCTION OF A PLC (PROGRAMABLE LOGIC CONTROLLER) *

AUTHORS: JAVIER ORLANDO VILLAMIZAR CONTRERAS, JOSÉ CARLOS BITAR RODRÍGUEZ GUSTAVO ADOLFO YERENA BAYONA**.

KEYWORDS: Independent Excitement DC motor, PLC (programmable logic controller), PID controller, LabVIEW.

DESCRIPTION:

The work described in this document was based on a study that wanted to compare the characteristics and operation of a PID industrial controller against the PID function of a PLC using as an independent excitement DC motor plant and an electrical oven, both simulated on LabVIEW and using their transfer function.

The purpose of this study is to evaluate how efficient is the PID controller in regards to the PLC owned by the Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones of the UIS and provide the industry and academic field judgements that let them select or reject the use of them for speed and temperature control.

As previous work, we require to measure the inertia moment of the DC motor for its following characterization with the result that need to implement lot of methods in order to compare those measurements and leave a lab training for the *accionamientos eléctricos* course.

As a contribution to the academy and future generations were written three manuals for detailed configuration and implementation of each of the equipment used.

* Undergraduate Degree Project.

** Physics and mechanics engineering faculty. Escuela de Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones.
Director: Julio Augusto Gélvez Figueredo

INTRODUCCIÓN

Hoy en día más de la mitad de los controladores industriales utilizan esquemas PID o PID modificados, encontrando diferentes tipos de controladores para procesos neumáticos, hidráulicos, mecánicos, eléctricos entre otros, actualmente muchos de ellos han tomado forma en micro controladores digitales aprovechando las ventajas que brinda la electrónica.

Los controladores PID industriales han mostrado ser robustos en aplicaciones industriales razón por la cual son los más usados en la actualidad. La estructura de un controlador PID es sencilla, haciéndolo práctico pero a su vez su simpleza puede llegar a ser una debilidad debido a que existen plantas que exigen parámetros de control más específicos que lo que un control PID puede proveer. Un controlador industrial es básicamente un controlador digital basado en un microprocesador, siendo posible la aplicación de las técnicas de cálculo de controladores por lo cual es necesario el ajuste de parámetros como las constantes proporcional, integral y derivativa inherentes de un control PID.

En la industria siempre existirá la necesidad de controlar motores ya sea del par entregado, su velocidad o posición; razón por la cual, las empresas necesitan tener un buen criterio para escoger el controlador más adecuado para sus procesos.

En el control de una planta se debe considerar aspectos tales como la rapidez de respuesta ante un cambio en una variable específica; además del error que se presente en la variable a controlar para mantener estable el proceso. Las plantas presentan constantes de tiempo que dependen de las características propias del mismo y que pueden tener mayor o menor valor incidiendo en la velocidad en que responde ante un cambio y a la acción del controlador que debe estabilizar el sistema; por lo tanto es preciso caracterizar el proceso para que quede plenamente definido y conocer las características del control que se asocia a dicha planta con el fin de garantizar que el sistema se estabiliza en el menor tiempo posible.

En este trabajo se analizó y configuro la función de control PID de un PLC para contrastarla con un controlador PID industrial con el propósito de revisar los principales aspectos que inciden en el sobrepaso, tiempo de establecimiento y el porcentaje de error de modo tal que el futuro ingeniero este en capacidad tanto de configurar el bloque PID de un PLC y conocer las limitante y virtudes que poseen estos al ser utilizados en un proceso industrial.

1. GENERALIDADES DEL PROYECTO

1.1. OBJETIVO GENERAL.

Comparar las principales características y el funcionamiento que ofrece un controlador PID industrial contra la función PID de los PLC que dispone la escuela E3T aplicado al control de un motor de DC y el control de temperatura de un horno eléctrico.

1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.

Para el cumplimiento del objetivo general del trabajo de grado se deben realizar las siguientes actividades:

- Analizar y contrastar las diferentes respuestas al control PID que nos ofrecen los PLC Simatic S7-200 de Siemens y Twido de Telemecanique; y un controlador industrial.
- Escribir un manual que permita, a los estudiantes, configurar de una manera práctica la función PID de los PLC (Twido y S7-200) y un controlador PID industrial.
- Implementar dos métodos para determinar el momento de inercia de un motor eléctrico (de los que se encuentran en el laboratorio de máquinas de la E3T) con el propósito que queden como material para las prácticas de laboratorio de la asignatura de accionamientos eléctricos.

1.3. MOTIVACIÓN Y JUSTIFICACIÓN.

Actualmente en la industria el control PID es usado en procesos neumáticos, hidráulicos, mecánicos, eléctricos; sin embargo en la academia, por lo general, se limita a enseñar la teoría de los controladores PID dejando de lado la configuración y sintonización y para ser usado del controlador en una planta física. Con el propósito de facilitar el aprendizaje de la configuración y uso de los controladores PID se redactará un manual referente a la implementación y sintonización del bloque funcional PID de los PLC y el controlador industrial.

Con el fin de optimizar recursos cuando se requiera utilizar un controlador PID, los fabricantes de PLC han configurado el bloque funcional PID el cual se comparará con un controlador industrial, buscando identificar sus ventajas y desventajas. Para hacer dicha identificación se implementará el control de plantas fácilmente parametrizables como lo son un motor de corriente continua de excitación independiente y un horno eléctrico para que sean utilizadas como ejemplos de la configuración de los controladores PID.

El momento de inercia es un parámetro inherente al control de velocidad de los motores por lo cual es necesario determinar su valor bien sea por catálogo o empleando métodos experimentales de fácil implementación en el laboratorio.

En este trabajo se implementaron dos métodos [1],[2] para determinar el momento de inercia, que servirán como una práctica de laboratorio para la asignatura de accionamientos eléctricos.

1.4. ALCANCE DEL PROYECTO.

En este trabajo se desea comparar las características del controlador PID industrial y la función PID que poseen los PLC, realizando pruebas con las plantas del motor de DC excitación independiente y un horno eléctrico, teniendo como finalidad identificar cuáles son las ventajas y desventajas de cada uno de ellos según el tipo de planta en la que se implemente; para lograr esto se tendrá como criterio de comparación los diferentes parámetros como los son sobrepaso, tiempo de establecimiento y error, sin olvidar el aspecto económico que es uno de los criterios de selección en cualquier proyecto.

Se implementarán dos métodos para el cálculo del momento de inercia del motor, parámetro que es requisito para configurar la planta que será controlada tanto por el bloque funcional PID como por el controlador industrial.

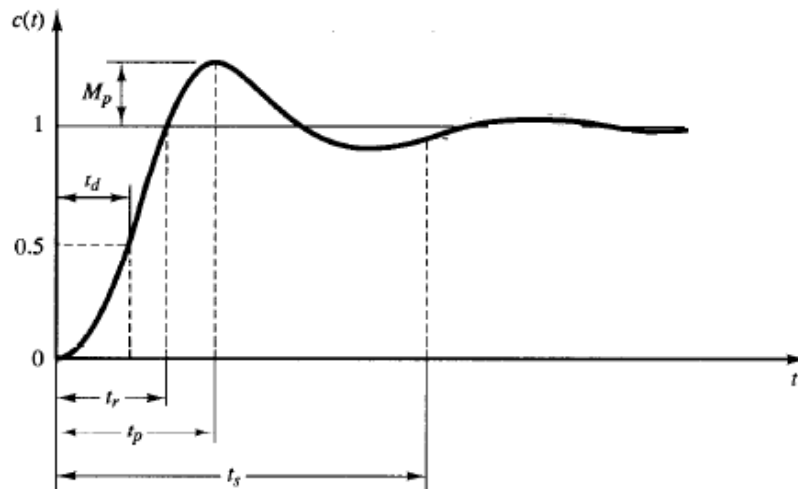
Los resultados obtenidos se utilizaran para redactar y escribir un documento que contenga las principales características de cada controlador, los parámetros para su configuración y sus principales ventajas, constituyéndose este como un documento de consulta para las asignaturas de sistemas de control y accionamientos eléctricos.

2. CONCEPTOS FUNDAMENTALES

2.1. ESPECIFICACIONES DE LA RESPUESTA TRANSITORIA

Para encontrar que tan eficiente es sistema de control se analizarán varios parámetros en el dominio del tiempo como lo son[1]:

Figura 1. Curva respuesta mostrando parámetros t_d , t_s , M_p , t_r , t_p



Fuente: KATSUHIKO OGATA, Modern control Engineering, Third Edition, PrenticeHall. 1998. [1]

Tiempo de retardo, t_d

Es el tiempo requerido para que la respuesta alcance por primera vez la mitad de su valor final.

Tiempo pico, t_p

Es el tiempo requerido para que la respuesta del sistema alcance su primer pico.

Sobrepaso máximo, Mp

Es el máximo valor pico que alcanza la respuesta medido en por unidad.

Tiempo de asentamiento, ts

Es el tiempo que tarda la respuesta en alcanzar el estado estable.

Error de Estado Estable

Es el error en porcentaje con respecto al valor de consigna cuando la gráfica de la respuesta se considera se ha estabilizado o tiene un comportamiento uniforme

2.2. ECUACIÓN DE LA FUNCIÓN PID

La ecuación de la función PID es la que se presenta a continuación

$$G_c(s) = K_c \left(1 + \frac{1}{sT_i} + sT_d \right) \quad (1)$$

K_c : es la ganancia

T_i : es el tiempo integral

T_d : es el tiempo derivativo

Otra forma equivalente es la siguiente:

$$G_c(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s \quad (2)$$

Los parámetros están relacionados con la forma de la ecuación 1 a través de la siguiente conversión

$$K_p = K_c$$

$$K_i = \frac{K_c}{T_i}$$

$$K_d = K_c T_d$$

K_p : es la constante de proporcionalidad

K_i : es la contante de integración

K_d : es la contante de derivación

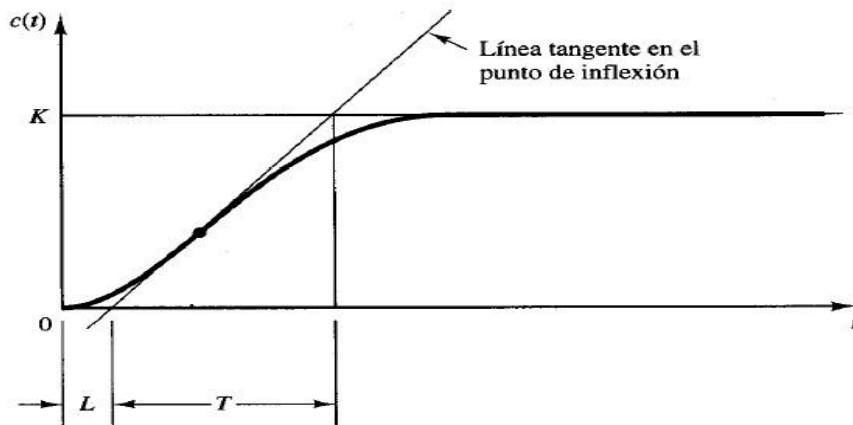
2.3. TÉCNICA DE SINTONIZACIÓN PARA LA FUNCIÓN PID

Para la sintonización de la función PID existen diferentes técnicas, pero en este caso se utilizará el método conocido como primer método de Ziegler-Nichols, con este método se obtienen parámetros como la constante proporcional, tiempo de integración, tiempo derivativo.

2.3.1. Primer método de Ziegler-Nichols

Este método solo se puede aplicar a sistemas cuya respuesta al escalón tenga forma de S antes de alcanzar el estado estable como se puede observar en la gráfica siguiente.

Figura 2. Método de Ziegler-Nichols



Fuente: KATSUHIKO OGATA, Modern control Engineering, Third Edition Prentice Hall, 1998 [1]

Donde:

L: tiempo de retraso (Delay time). Tiempo en el cual la pendiente en el punto de inflexión corta el eje horizontal

T: tiempo constante (Time constant). Tiempo que se demora la pendiente en el punto de inflexión desde el corte con el eje horizontal hasta alcanzar el valor de consigna.

K: valor de consigna (setpoint)

El método consiste en calcular los tiempos L y T, una vez obtenidos estos se procede a hacer uso de la tabla 1.

Tabla 1. Formulas Primer Método Z-N

Tipo de controlador	K_p	T_i	T_d
P	$\frac{T}{L}$	∞	0
PI	$0.9 * \frac{T}{L}$	$\frac{L}{0.3}$	0
PID	$1.2 * \frac{T}{L}$	$2L$	$0.5L$

Fuente: KATSUHIKO OGATA, Modern Control Engineering, Third Edition, Prentice Hall,1998 [1]

En la siguiente tabla se resume el efecto de aumentar o disminuir las constantes de un control PID.

Tabla 2. Efecto de las constantes de control

Control	Término	Efecto
P	Constante proporcional K_p	Afecta el error ya que es una constante multiplicada por la señal de error. Si la incrementamos nos acercamos más rápido al setpoint..
PI	Constante proporcional K_p +Constante integral K_i	Cuando es añadido al término proporcional desacelera el proceso de movimiento hacia el setpoint y elimina el error residual de estado estable que agrega un control P. Otro efecto es reducir el sobreimpulso y aumenta el periodo de oscilación.
PD	Constante proporcional K_p + Constante derivativa	El termino derivativo hace más rapida la rata de cambio de la salida del controlador y este efecto es más notable entre más cerca se este del setpoint. El control PD disminuye el tiempo de asentamiento sin embrago debe aumentarse para reducir el error de estado estable. La diferenciación de la señal puede amplificar el ruido y hacer el proceso inestable.
PID	Constante proporcional K_p +Constante integral K_i + Constante derivativa K_d	La acción derivativa es usada para reducir la magnitud del sobreimpulso producido por la componente integral y mejorar la estabilidad y la acción integral usada para eliminar el error de estado estable. Usando las 3 acciones removemos el error de estado estable, disminuimos el tiempo de asentamiento y mejoramos la respuesta transitoria

Fuente: Autores

2.4. CÁLCULO DEL MOMENTO DE INERCIA DE UN MOTOR DE DC DE EXCITACIÓN INDEPENDIENTE

Existen varias formas de medir el momento de inercia de un motor pero solo se trataran dos métodos que se muestran a continuación:

2.4.1. Primer método

Este método [2] se encuentra basado en el modelo matemático del motor Excitación Independiente y tiene como objetivo principal calcular las constantes de magnetización y de tiempo mecánica.

Para hallar la constante de magnetización del motor Excitación Independiente se parte de la fuerza contraelectromotriz.

$$E_a = K * I_f * \omega \quad (3)$$

Donde

E_a : Fuerza contra electromotriz para el motor (voltaje interno de la máquina).

K : es la constante propia de la máquina.

I_f : es la corriente de excitación del motor.

ω : es la velocidad angular del motor.

Si se mantiene constante la corriente de excitación del motor se puede remplazar $K * I_f$ por K_m . Por lo tanto la expresión queda de la siguiente manera:

$$E_a = K_m * \omega \quad (4)$$

Además; del circuito equivalente del motor DC en estado estable:

$$V_a = E_a + I_a * R_a \quad (5)$$

Donde V_a, I_a, R_a son respectivamente tensión de alimentación de armadura, corriente de armadura, y resistencia de armadura.

Remplazando E_a :

$$V_a = K_m * \omega + I_a * R_a \quad (6)$$

Y despejando K_m obtenemos:

$$K_m = \frac{V_a - I_a * R_a}{\omega} \quad (8)$$

Y de esta forma se obtiene la constante de magnetización.

Para encontrar la constante de tiempo mecánica (τ_m) se energiza el motor en vacío hasta que alcance la velocidad cercana a la nominal, una vez esto suceda se desenergiza la armadura del motor y se toma el tiempo que tarda en descender la velocidad al 36.8%, siendo este tiempo el τ_m (constante de tiempo mecánica).

Considerando los datos de tensión, velocidad angular, K_m y τ_m se puede calcular el momento eléctrico mecánico de donde podemos obtener una expresión para el momento de inercia (9)

$$T_e = T_a + T_r = K_m * I_a = J * \frac{d\omega}{dt} + B * \omega \quad (9)$$

Donde

T_e : Es el par electromagnético (tiene en cuenta las pérdidas por fricción que para este caso son 0 aun estando en vacío)

T_a es el par de aceleración

T_r es el par de resistente

J : El momento de inercia del motor

B : es el coeficiente de fricción

Cuando el sistema se estabiliza el par de aceleración es nulo, por lo tanto,

$$T_a = J * \frac{d\omega}{dt} = 0 \rightarrow T_e = K_m * I_a = B * \omega \quad (10)$$

Donde

T_a es el par de aceleración

El coeficiente de fricción es igual a:

$$B = \frac{K_m * I_a}{\omega} \quad (11)$$

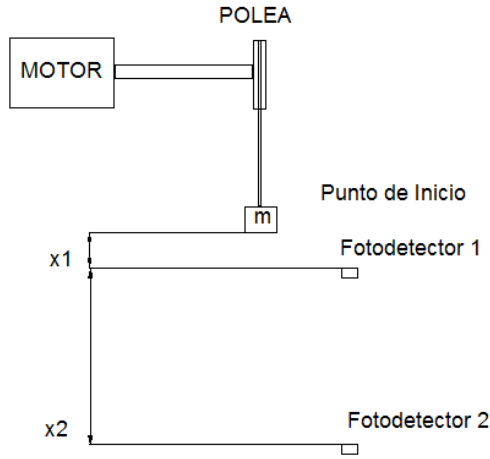
Obtenido el coeficiente de fricción se calcula el momento de inercia a partir de la siguiente expresión:

$$J = B * \tau_m \quad (12)$$

2.4.2. Segundo método

Este método [2,3] se basa en las caídas de cuerpos libres y en la física clásica [4], en el cual se utiliza una polea, dos masas y dos foto-detectores como se observa en el diagrama:

Figura 3. Esquema de montaje para la medición del momento de inercia por el segundo método



Fuente: Autores

Para calcular la aceleración de cada una de las masas se utiliza la siguiente ecuación:

$$a_1 = \frac{2*(x_1+x_2)-4*(x_1*x_2)}{(t_2-t_1)^2} \quad (13)$$

Donde $t_2 - t_1$ es el tiempo que transcurre en recorrer la distancia entre los puntos x_1 (ubicación del fotodetector 1) y x_2 (ubicación del fotodetector 2). Se toman datos para, como mínimo, dos masas diferentes

Por lo tanto el momento de inercia del motor es calculado mediante la siguiente expresión:

$$J_m = \frac{[(m_2-m_1)g-(m_2a_2-m_1a_1)]*r^2}{(a_2-a_1)} - J_p \quad (14)$$

Siendo:

a_1, a_2 : Aceleración de la masa 1 y 2 respectivamente.

m_1, m_2 : Masa 1 y 2 respectivamente.

J_p : Momento de inercia de la polea

r : Radio de la polea.

2.4.3 Tercer método

Como una tercera alternativa se consultó otro método para ampliar y contrastar las respuestas obtenidas. Ver descripción del método en anexo A (práctica de laboratorio) [6].

2.5. CONTROLADORES

2.5.1. PLC S7 200 DE SIEMENS

Este PLC se configura y programa con en el software STEP 7-Micro/WIN 32, el cual permite tres lenguajes de programación que son el KOP, AWL y el FUP.

KOP: este lenguaje permite hacer los diseños del programa en forma de contactos y de bobinas, es decir permite programar el control de forma similar a como se programa en lógica cableada(Lenguaje a contactos o Ladder)

AWL: Es una programación en lista de instrucciones, en la cual vienen dos columnas una con la función a utilizar y la otra con las variables.

FUP: utiliza una programación de compuertas lógicas muy parecido a los circuitos de puertas lógicas.

Ver anexo B MANUAL DE PROGRAMACIÓN DE LA FUNCIÓN PID DEL PLC S7-200 DE SIEMENS

2.5.1.1. Función PID

Las definiciones y expresiones para esta sección fueron tomadas de manual STEP 7 MicroWin de Siemens. Ver anexo B

El PLC S7-200 usa una función PID discreta sintetizada para mejorar el tiempo de cálculo. La salida es la suma de tres términos así:

$$M_n = MP_n + MI_n + MD_n \quad (15)$$

$$\text{salida} = \text{término proporcional} + \text{término integral} + \text{término diferencial}$$

Donde.

M_n : es el valor de la salida del lazo calculado en el muestreo n-ésimo.

MP_n : es el valor del término proporcional de la salida del lazo en el muestreo n-ésimo.

MI_n : es el valor del término integral de salida del lazo en el muestreo n-ésimo.

MD_n : es el valor del término diferencial de la salida del lazo en el muestreo n-ésimo.

Término proporcional

Este término la CPU del controlador lo resuelve con la siguiente expresión:

$$MP_n = K_c * (SP_n - PV_n) \quad (16)$$

Donde

K_c : es la ganancia del lazo.

SP_n : es el valor de consigna en el muestreo n-ésimo

PV_n : es el valor de la variable del proceso en el muestreo n-ésimo.

Término integral

La ecuación con la cual la CPU resuelve este término es la siguiente:

$$MI_n = K_c * \frac{T_s}{T_i} * (SP_n - PV_n) + MX \quad (17)$$

Donde

T_s : es el tiempo de muestreo del lazo.

T_i : es el periodo de integración del lazo (también llamado tiempo de acción integral).

MX : es el valor previo del término integral (en el muestreo (n-1)-ésimo) (también llamado suma integral o “bias”)

SP_n : es el valor de consigna en el muestreo n-ésimo

PV_n : es el valor de la variable del proceso en el muestreo n-ésimo

Término diferencial

La ecuación del término diferencial es la siguiente:

$$MD_n = K_c * \frac{T_D}{T_s} * ((SP_n - PV_n) - (SP_{n-1} - PV_{n-1})) \quad (18)$$

Para evitar cambios bruscos de la salida debido a cambios de la acción derivativa o de la consigna, el punto de consigna se toma constante durante todo el proceso simplificándose la ecuación de la siguiente forma:

$$MD_n = K_c * \frac{T_D}{T_s} * (PV_{n-1} - PV_n) \quad (19)$$

Donde

T_D : es el período de diferenciación de lazo (también llamado tiempo de acción derivativa).

K_c : es la ganancia del lazo.

PV_{n-1} : es el valor de la variable del proceso en el muestreo (n-1)-ésimo

Para programación y configuración ver anexo B

2.5.2. PLC TWIDO (TWDLC4E40DRF) DE TELEMECANIQUE (SCHNEIDER)

Este PLC emplea como herramienta de programación y configuración el software Twido Suite, el cual permite programar en tres lenguajes de programación que son el lenguaje Instruction List (lista de instrucciones), Ladder Diagrams (diagrama de contactos), y el lenguaje Grafcet (sucesiones de pasos y transiciones).

PROGRAMACIÓN EN LISTA: Este lenguaje está compuesto por una serie de instrucciones ejecutadas de forma secuencial por el autómata empleando tres columnas donde la primera columna define el número de la línea, la segunda columna asigna un comando y la tercera columna un operando. Se escriben de forma literal de acuerdo a una sintaxis definida. La forma de programación se presenta en el anexo C

PROGRAMACIÓN EN LADDER: Los diagramas LADDER o de Contactos son similares a los diagramas lógicos de relé que representan circuitos de control de relé. Las principales diferencia entre los dos son que todas las entradas se representan por un símbolo de contacto “| |”, todas las salidas están representadas por un símbolo de bobinas “()” y las operaciones numéricas están incluidas en el conjunto de instrucciones de LADDER [8].

PROGRAMACIÓN EN GRAFCET: Las instrucciones de GRAFCET ofrecen un método sencillo para traducir una secuencia de ajuste (Diagrama Grafcet). La cantidad máxima de pasos del grafcet depende del tipo de autómata y la cantidad de pasos activados depende solo de la cantidad total de pasos.[8]

Para el PLC Twido de Telemecanique se puede emplear la estructura (sintaxis) de programación Ladder o lista, pero no la programación gráfica.

Para más información consultar Anexo C y Ref [8]

2.5.2.1 Función PID

La función PID que posee el PLC Twido de Schneider aplica una corrección del PID mixta explicada más adelante, a través de una medida y consigna analógica en el formato [0 – 10.000]

La función de regulación PID es una función de lenguaje de programación TwidoSuite. Permite programar bucles de regulación PID en módulos compatibles con Twido. Esta función está especialmente adaptada para: responder a la necesidad de proceso secuenciales que precisen funciones de regulación auxiliar (ejemplo máquinas de embalaje, máquina de tratamiento de superficies, presas, etc) y responder a las necesidades de los procesos de regulación simples (hornos para cerámica, pequeños grupos frigoríficos, etc) [8].

La función PID mixta la cual ejecuta el controlador se representa en la siguiente gráfica.:

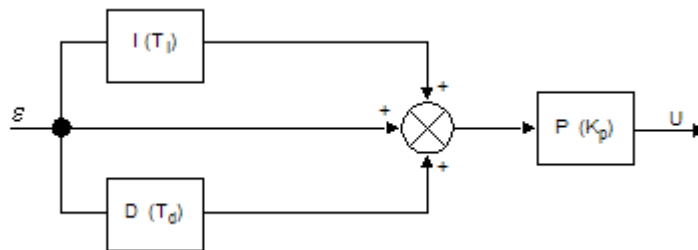


Figura 4. Diagrama de control PID implementado por Twido de Schneider

Fuente: Manual de programación TwidoSuite.[8]

Donde:

I(Ti): es la acción integral.

D(Tc): es la acción derivativa.

P(Kp): es la acción proporcional

U: es la repuesta del autómata.

ε : La desviación (consigna – variable del proceso).

La ecuación PID del controlador tiene la siguiente expresión:

$$u(i) = K_p * \left\{ \varepsilon(i) + \frac{T_s}{T_i} \sum_{j=1}^i \varepsilon(j) + \frac{T_d}{T_s} [\varepsilon(i) - \varepsilon(i-1)] \right\} \quad (20)$$

Donde

K_p : Constante proporcional

T_i : Constante de tiempo integral

T_d : Constante de tiempo derivada

T_s : Periodo de muestreo

$\varepsilon(i)$: La desviación (consigna – variable del proceso).

Para configuración y programación ver anexo C y Ref [8]

2.5.3. CONTROLADOR UNIVERSAL UDC 1200 DE HONEYWELL

Para la configuración de este controlador no se hace necesario de un software de computadora puesto que este ya viene embebido en el controlador haciendo esta labor de configuración más sencilla. La configuración se hace solamente introduciéndole al controlador datos como son las variables de control, la constante de proporcional y el tiempo de integración. Para otros parámetros de configuración ver anexo D

2.5.3.1. Función PID

En la función PID no solamente se tiene en cuenta el error de control sino también el anterior y el cambio de velocidad de desviación para el cálculo¹.

El control independiente se describe por la siguiente ecuación [10]:

$$F(s) = K_p + \frac{1}{T_i * s} + \frac{T_d * s}{1 + T_1 * s} \quad (22)$$

Dónde:

K_p : es la constante del proporcional

T_i : Tiempo integral.

T_d : El tiempo derivativo.

T_1 : Limitador de acción derivativa.

¹ Adaptado del manual UDC 1200. [10].

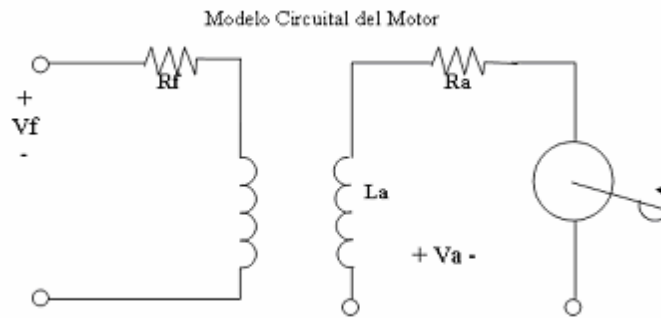
2.6. MODELADO DE LAS PLANTAS

2.6.1. MOTOR DE CORRIENTE CONTINUA DE EXCITACIÓN INDEPENDIENTE

Para la obtención del modelo se debe tener en cuenta la relación que hay entre la parte eléctrica y mecánica del motor.

Partiendo del modelo eléctrico del motor y partiendo del reposo se obtiene la siguiente en expresión en el dominio de la frecuencia:

Figura 5. Modelo del motor corriente continua excitación independiente



Fuente: OGATA HATSUHIKO, Modern Control Engineering, Third edition, Prentice Hall, 1998. [1]

$$V_a(s) = I_a(s) * (R_a + L_a * s) + E(s) \quad (23)$$

Dónde:

$$E(s) = K * I_f * \omega(s) \quad (24)$$

Teniendo en cuenta que la corriente de excitación I_f es constante y K es la constante característica de la máquina la ecuación se puede expresar así:

$$E(s) = K_m * \omega(s) \quad (25)$$

Despejando de la ecuación (23) la corriente de armadura se obtiene:

$$I_a(s) = \frac{V_a(s) - K_m * \omega(s)}{R_a - L_a * s} \quad (26)$$

Además expresando el torque en el dominio de la frecuencia como

$$T_e(s) = K_m * I_a(s) \quad (27)$$

T_e : es el torque electromagnético del motor.

Sabiendo que el momento de aceleración en el dominio del tiempo se puede expresar como:

$$T_m = J * \frac{d\omega}{dt} \quad (28)$$

T_m : es el torque electromecánico en el eje del motor

Aplicando la transformada de Laplace para la condición inicial de velocidad cero y que el momento resistente sea cero (considerando solo la fricción) se tiene:

$$T_m(s) = J * s * \omega(s) \quad (29)$$

La ecuación que relaciona las variables mecánicas y eléctricas (teniendo en cuenta las condiciones iniciales de velocidad y de carga antes mencionadas), están dadas por las expresiones:

$$T_m(s) = T_e(s) - B * \omega(s) \quad (30)$$

Entonces

$$T_e(s) = T_m(s) + B * \omega(s) \quad (31)$$

Reemplazando se obtiene:

$$K_m * \frac{V_a(s) - K_m * \omega(s)}{R_a - L_a * s} = J * s * \omega(s) + B * \omega(s) \quad (32)$$

Realizando operaciones algebraicas (simplificando y reordenando) se llega a la función de transferencia del motor la cual se expresa así:

$$\frac{\omega(s)}{V_a(s)} = \frac{K_m}{(R_a + L_a * s) * (J * s + B) + K_m^2} \quad (33)$$

2.6.2. HORNO ELÉCTRICO

Para la implementación de la planta del horno en LabVIEW se trabajó con un modelo de primer orden como se muestra a continuación [1].

$$\frac{T(s)}{V_a(s)} = \frac{A}{(\tau * s + 1)} \quad (34)$$

Donde

$V_a(s)$: tensión de alimentación

$T(s)$: Temperatura del horno.

τ : Tiempo que demora en alcanzar el 63,2% de su valor de temperatura nominal.

A : Se calcula con el teorema de valor final de Laplace.

Del modelo térmico presentado en libro “principio de accionamientos eléctricos” [11] tomaremos la ecuación que describe el fenómeno de calentamiento de una maquina rotativa la cual se expone como una función exponencial similar a la que abordamos en la expresión (34)

$$\Delta T(t) = \Delta T_{\infty} * (e^{-t/\tau_c}) \quad (35)$$

$$\Delta T(s) = \frac{1}{s + \tau_c} * \Delta T_{\infty}$$

Donde

ΔT_{∞} =Diferencia de temperatura de la máquina cuando el tiempo tiende a infinito

τ_c = constante de tiempo del calentamiento

Comparando la ecuación (35) y (34) en la frecuencia se establece una relación y se deduce:

$$\Delta T_{\infty} = A * V_N \quad (36)$$

$$\tau = \tau_c = \frac{C}{B}$$

Donde

C Capacidad calorífica

B Constante que depende del superficie de radiación, el medio refrigerante y la naturaleza del material

V_N Tensión de alimentación nominal

2.6.3. LABVIEW

LABVIEW ofrece un entorno de programación gráfico, el cual sirve para realizar el control de un proceso a partir de datos adquiridos mediante una tarjeta de adquisición de datos permitiendo visualizar los resultados en un entorno gráfico. Esta herramienta consta de dos partes muy importantes que son el panel frontal y el diagrama de bloques.

2.6.3.1. Panel frontal

Es la parte que interactúa con el usuario mientras el programa está en funcionamiento. En esta se podrán ver los resultados del programa actualizados en tiempo real.

2.6.3.2. Diagrama de bloques

Esta parte es donde se realiza el programa, es decir es donde se coloca el código que interviene en el programa. Ya que este es un entorno de programación gráfico, facilita la utilización de esta herramienta.

Para este trabajo de grado se emplea la LABVIEW para simular la planta (motor DC y horno eléctrico) y las fuentes de energía. Se logra la interacción con los controladores mediante una tarjea de adquisición de datos, recibiendo y enviando las señales correspondientes al PLC o controlador industrial según sea el caso

3. OBTENCIÓN DE PARÁMETROS DE LOS MODELOS

Obtener el modelo exacto de una planta real es dispendioso puesto que son muchos los parámetros que influyen en ella y por cada parámetro se le introduce un error en la medición de éste, pero se puede obtener una aproximación adecuada, mediante una serie de pruebas que se le realizan al sistema para obtener los parámetros característicos de este.

En este documento se obtendrán los modelos aproximados de un horno y un motor de cc de excitación independiente los cuales se presentan a continuación.

3.1. OBTENCIÓN DE LOS PARÁMETROS Y MODELO DE LA PANTA DE UN MOTOR DE EXCITACIÓN INDEPENDIENTE.

Como ya se presentó en el capítulo anterior, para obtener el modelo del motor de corriente continua excitación independiente, se necesitan los siguientes parámetros:

K_m , R_a , L_a , J , B , velocidad nominal, tensión de alimentación y corriente nominal del motor.

3.1.1. Resistencia de armadura

Existen varios métodos para medir la resistencia de armadura de un motor. Lo primero es medirla con un óhmetro cuyo propósito es determinar cuál es el máximo valor de tensión a la que se puede alimentar para no superar la corriente nominal (11A) en ninguna situación.

Otro método consiste en aplicar una tensión pequeña en la armadura la cual se ira aumentando para obtener diferentes valores de corriente, todo esto sin sobrepasar la

tensión máxima calculada anteriormente y con estos datos de tensión y corriente se procede a calcular la resistencia empleando la ley de ohm.

Los resultados obtenidos fueron los siguientes:

Resistencia medida por el óhmetro: 3.88Ω , $V_{\max} = 42,68 [V]$

Tabla 3. Medición tensión-corriente de motor DC

Tensión [V]	Corriente [A]	Resistencia [Ω]	Promedio [Ω]
16,9	4,6	3,67	3,7
18,25	5	3,65	
20,05	5,4	3,7	

Fuente: Autores

Por lo tanto se asume que la resistencia de armadura es de $3,67895867 \Omega$

3.1.2. Inductancia de la armadura

Mediante un medidor de LCR se obtuvieron las siguientes medidas

Tabla 4. Medición de Inductancia del Motor DC

Medida	La
1	70 mH
2	70 mH
3	70 mH

Fuente: Autores

3.1.3. Constante de magnetización

Para el cálculo de la constante de magnetización hay que apoyarse en la siguiente ecuación (ecuación de armadura del motor) para estado estable en vacío.

$$K_m = \frac{V_a - R_a \cdot I_a}{\omega} \quad (37)$$

El método consiste en variar la tensión de armadura para obtener el valor de K_m .

Tabla 5. Determinación de la constante K_m

Tensión [V]	Corriente [A]	Velocidad [rad/s]	Resistencia [Ω]	K_m
190	0,34	187,13	3,68	1,01
180,1	0,35	176,45	3,68	1,01
170	0,33	166,82	3,68	1,01
160,1	0,32	156,77	3,68	1,01
150,5	0,31	147,13	3,68	1,02
140	0,3	135,93	3,68	1,02
Promedio				1,01

Fuente: Autores

Los valores de K_m obtenidos para las diferentes tensiones fueron muy similares lo cual demuestra que la medición se realizó correctamente. Se aclara que la medición se hizo para el motor DC Excitación Independiente con flujo nominal.

3.1.4. Constante de fricción

La constante de fricción se basa en la siguiente operación. Ver ecuación (11) capítulo 2

$$B = \frac{K_m * I_a}{\omega}$$

Se hace variar la corriente de armadura con el fin de obtener una mayor cantidad de datos y así mismo una mayor precisión.

Tabla 6. Determinación de la constante de fricción.

Corriente [A]	Velocidad [rad/s]	Km	B
0,34	187,134202	1,01	$1,83 * 10^{-3}$
0,35	176,452787	1,01	$2,01 * 10^{-3}$
0,33	166,81857	1,01	$2 * 10^{-3}$
0,32	156,765473	1,01	$2,1 * 10^{-3}$
0,31	147,1316	1,02	$2,14 * 10^{-3}$
0,3	135,926242	1,02	$2,26 * 10^{-3}$
Promedio			$2,1 * 10^{-3}$

Fuente: Autores

Como es de notar se obtiene un valor casi constante de B sin importar cuál sea el valor de la corriente.

3.1.5. Momento De Inercia

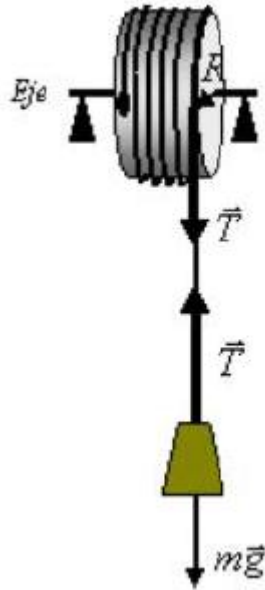
Para medir el momento de inercia existen varios métodos. En este trabajo de grado se presentan tres de ellos.

Los dos primeros métodos se basan en las leyes de newton, las cuales son:

$$\sum F = ma \quad (38)$$

$$\sum M = J * \alpha \quad (39)$$

Figura 6. Sumatoria de fuerzas para un sistema masa-polea



Fuente: SERWAY RAYMOND AND JEWETT JHON, Physics for Scientist and Engineers editorial Cengage Learning, 2008. [6]

Donde

F : Fuerza [N]

m : Masa [kg]

a : Aceleración lineal [m/s^2]

M : Momento de la fuerza [Nm]

J : Momento de inercia del cuerpo [$kg * m^2$]

α : Aceleración angular [rad/s^2]

T : tensión en la cuerda [N]

g : gravedad [m/s^2]

Cuando se presenta una aceleración constante para las masas se puede afirmar que

$$\frac{dv}{dt} = a = \alpha * R \quad (40)$$

3.1.5.1. Método 1 para medir el momento de inercia [3]

Para poder aplicar este método se hace necesario asumir la constante de fricción en la máquina como una constante de magnitud muy pequeña. Ver Ref [3]

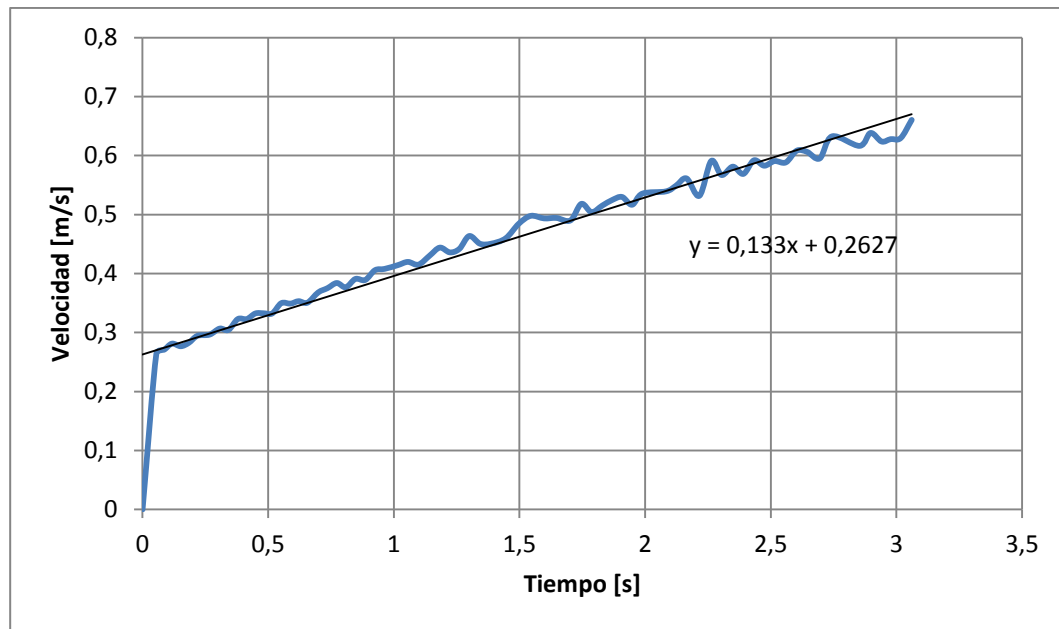
En la implementación de este método se utilizaron los siguientes elementos: Un Encoder de referencia CB-360-HC acoplado al eje del motor para obtener por pulsos de tensión la velocidad de la máquina, una tarjeta de adquisición de datos con referencia USB 6009 de National Instrument y el software LabVIEW para el procesamiento de los datos. Con este conjunto de elementos se logró medir la aceleración con la que cae cada masa.

Para esta prueba se usaron cuatro masas de 1, 1.5, 2 y 2.5 kg con el objetivo de obtener una aceleración para cada masa, haciendo entre 5 y 6 pruebas con cada masa y promediando los resultados para obtener el menor error posible.

Masa De 1 kg

A continuación se muestra el resultado gráfico para la masa de 1kg solo para la primera prueba. Los resultados de las otras pruebas para la masa de 1kg se muestran en tabla 7. La aceleración $\frac{dv}{dt} = a$ corresponde a la magnitud de la pendiente de la gráfica $v(t)$.

Figura 7. Gráfica velocidad – tiempo con el método 1 para medir momento de inercia con una masa de 1 kg



Fuente: Autores

Tabla 7. Método 1 para medir momento de inercia con una masa de 1 kg

Prueba	Aceleración m/s	Promedio [m/s^2]
1	0,133	0.1480
2	0,1394	
3	0,1595	
4	0,1602	
5	0,1037	

Fuente: Autores

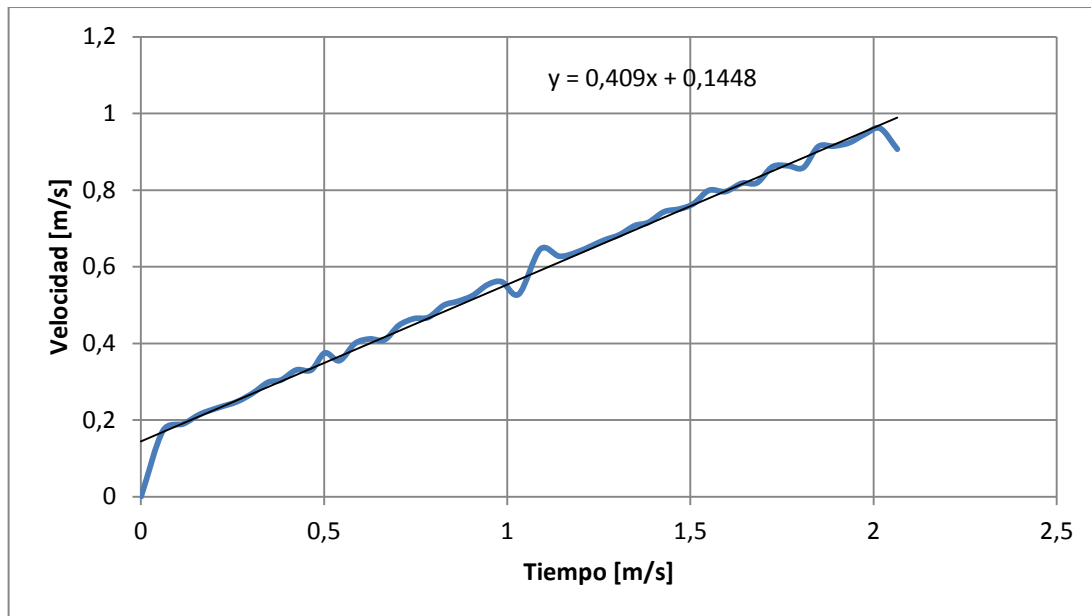
Se descarta la aceleración de la prueba 5 ya que presenta una desviación de más del 25% con respecto a la media aritmética.

Se observa que existen fuentes de error debidos a la forma de enrollar la cuerda, la tensión de la cuerda y su elongación.

Masa De 1.5 kg

A continuación se muestra el resultado gráfico para la masa de 1,5kg de la sexta prueba y los resultados de las otras pruebas de la masa de 1,5kg se muestran en la tabla 8.

Figura 8. Gráfica velocidad – tiempo con el método 1 para medir momento de inercia con una masa de 1.5 kg



Fuente: Autores

Tabla 8. Método 1 para medir momento de inercia con una masa de 1.5 kg

Prueba	Aceleración	Promedio [m/s^2]
1	0,3037	0,4033
2	0,3944	
3	0,4059	
4	0,4042	
5	0,4004	
6	0,409	

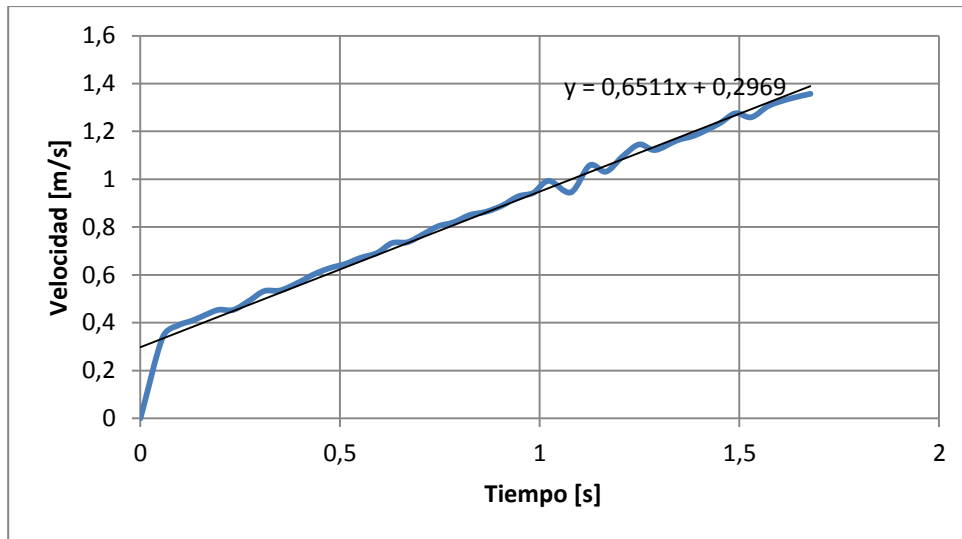
Fuente: Autores

Se descarta la aceleración de la prueba 1 ya que presenta una desviación de más del 20% con respecto a la media.

Masa De 2 kg.

A continuación se muestra el resultado gráfico para la masa de 2kg de la primera prueba y los resultados de las otras pruebas de la masa de 2kg se muestran en la tabla 9.

Figura 9. Gráfica velocidad – tiempo con el método 1 para medir momento de inercia con una masa de 2 kg



Fuente: Autores

Tabla 9. Método 1 para medir momento de inercia con una masa de 2 kg

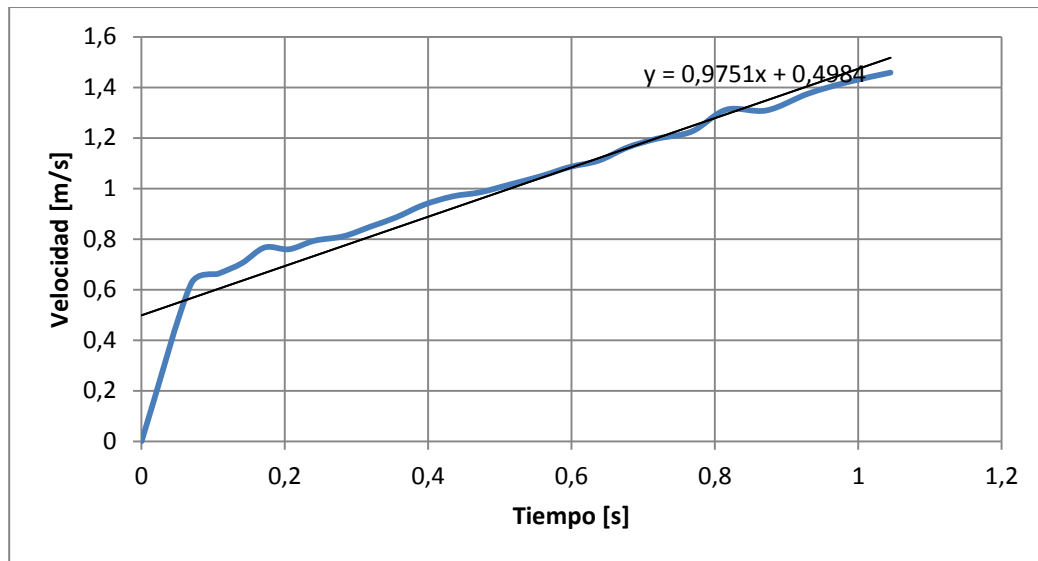
Prueba	Aceleración	Promedio [m/s^2]
1	0,6511	0,66752
2	0,6556	
3	0,6463	
4	0,6793	
5	0,7053	

Fuente: Autores

Masa De 2.5 kg

A continuación se muestra el resultado gráfico para la masa de 2,5kg de la primera prueba y los resultados de las otras pruebas de la masa de 2,5kg se muestran en la tabla 10.

Figura 10. Gráfica velocidad – tiempo con el método 1 para medir momento de inercia con una masa de 2.5 kg



Fuente: Autores

Tabla 10. Método 1 para medir momento de inercia con una masa de 2.5 kg

Prueba	Aceleración	Promedio [m/s^2]
1	0,9751	0,90272
2	0,9264	
3	0,8773	
4	0,8878	
5	0,847	

Fuente: Autores

Con estas aceleraciones se procede a calcular el momento de inercia mediante la siguiente ecuación [6]:

$$J = \frac{[(m_1 - m_2) * g - (m_1 a_1 - m_2 a_2)] r^2}{(a_1 - a_2)} \quad (41)$$

Donde r es el radio de la polea y tiene un valor de $r = 0,0185 \text{ [m]}$.

Se realizaron todas las combinaciones posibles con las distintas masas obteniendo los resultados de la tabla 11 para J

Tabla 11. Determinación del momento de inercia por el método 1 promediando resultados

Masa1 [kg]	Masa2 [kg]	$J \text{ [kg} \cdot \text{m}^2]$	$J \text{ Promedio [kg} \cdot \text{m}^2]$
1	1.5	$6,22 * 10^{-3}$	$5,6 * 10^{-3}$
1	2	$5,57 * 10^{-3}$	
1	2.5	$5,64 * 10^{-3}$	
1.5	2	$5,01 * 10^{-3}$	
1.5	2.5	$5,37 * 10^{-3}$	
2	2.5	$5,79 * 10^{-3}$	

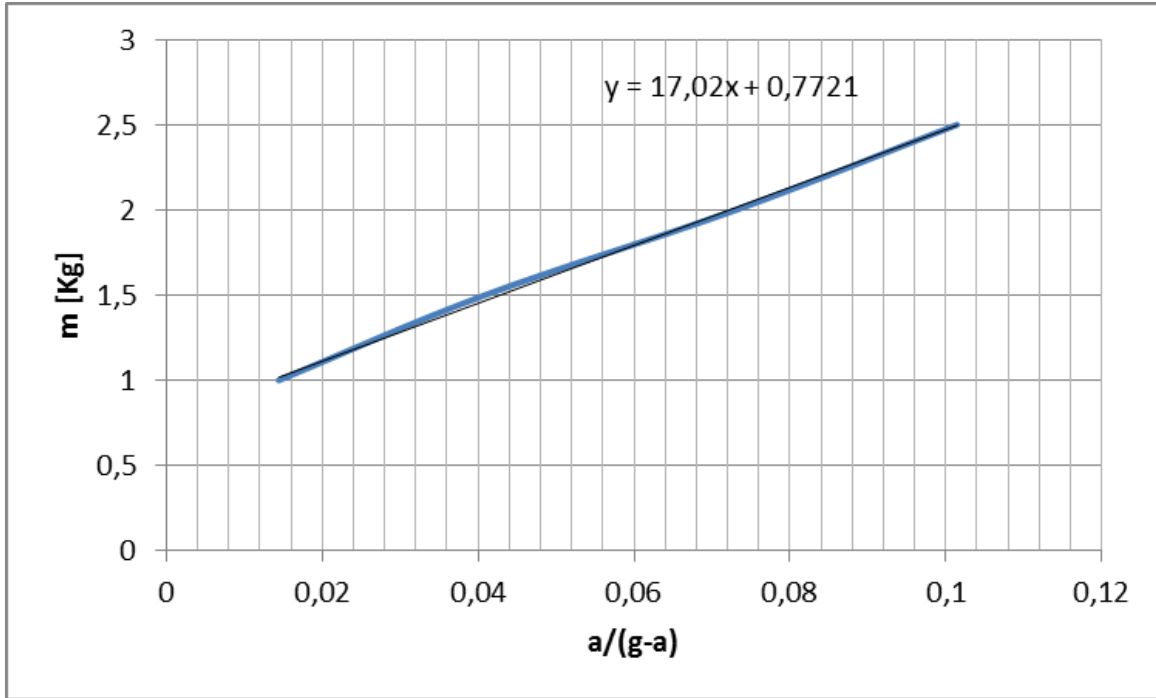
Fuente: Autores

3.1.5.2. Método 2 para medir el momento de inercia

Este método se apoya en las aceleraciones obtenidas en el método anterior, y se desprecia la fricción, este método consiste en graficar colocando en el eje vertical las

masas y en el eje horizontal se coloca $\frac{a}{g-a}$ obteniendo la pendiente $\frac{J}{r^2}$ y de ahí se despeja J [6].

Figura 11. Gráfica masa – $a/(g-a)$ para el método 2



Fuente: Autores

$$J = 0.0185^2 * 17,02 = 5,82 * 10^{-3} [kg * m^2]$$

$$J = 5,82 * 10^{-3} [kg * m^2]$$

3.1.5.3. Método 3 para medir el momento de inercia [2]

Este método consiste en obtener la constante de tiempo mecánica (τ_m) la cual se puede encontrar de dos formas. En ambos casos se lleva al motor a una velocidad estable y luego se procede a desenergizar el motor, pero en el primero se mide tensión de armadura mediante un osciloscopio y en el segundo la velocidad mediante el

encoder. El τ_m es el tiempo en que se demora en descender hasta el 36,8% de su valor estable ya sea de velocidad o de tensión.

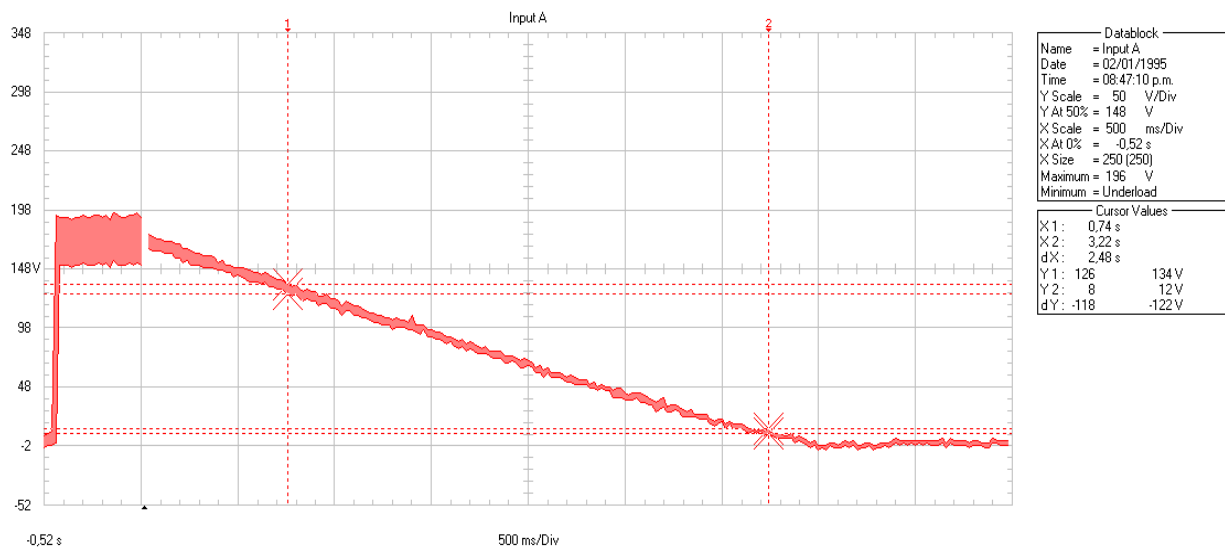
Una vez obtenido el τ_m y con la constante de fricción obtenida anteriormente se calcula el momento de inercia J .

Para la obtención de J mediante el osciloscopio se realizó la prueba para dos casos distintos, en la primera se realizó con el motor sin carga (vacío) y en la segunda se le acoplo como carga un motor con las mismas características del motor en prueba para obtener un momento de inercia que fuera el doble al anterior, para corroborar la medida.

- Obtención de J sin acople

Para esta parte se realizaron 10 pruebas para obtener el τ_m

Figura 12. Método 3 Curva de desenergización del Motor DC sin acople



Fuente: Autores

Tabla 12. Método 3 -medición del momento de inercia sin acople

Prueba	τ_m
1	1,96
2	1,84
3	1,96
4	2
5	2,28
6	2
7	2,02
8	1,98
9	2,04
10	2,08

Fuente: Autores

Se toma el promedio para reducir errores dando como resultado 2,016 [s], con este dato y con la constante de fricción obtenida anteriormente se procede a calcular la J

$$J = B * \tau_m = 2,05 * 10^{-3} * 2,016 = 4,14 * 10^{-3} \text{ kg} * \text{m}^2$$

- Obtención de J con acople

Para obtener el valor del momento de Inercia J del motor cuando se le acopla al eje otro motor de las mismas características, es importante tener en cuenta que la constante de fricción la cual puede variar por factores como la presión de las escobillas, lubricación de los rodamientos, entre otros, por lo cual se hace necesario calcularla nuevamente y se tomaron los siguientes datos.

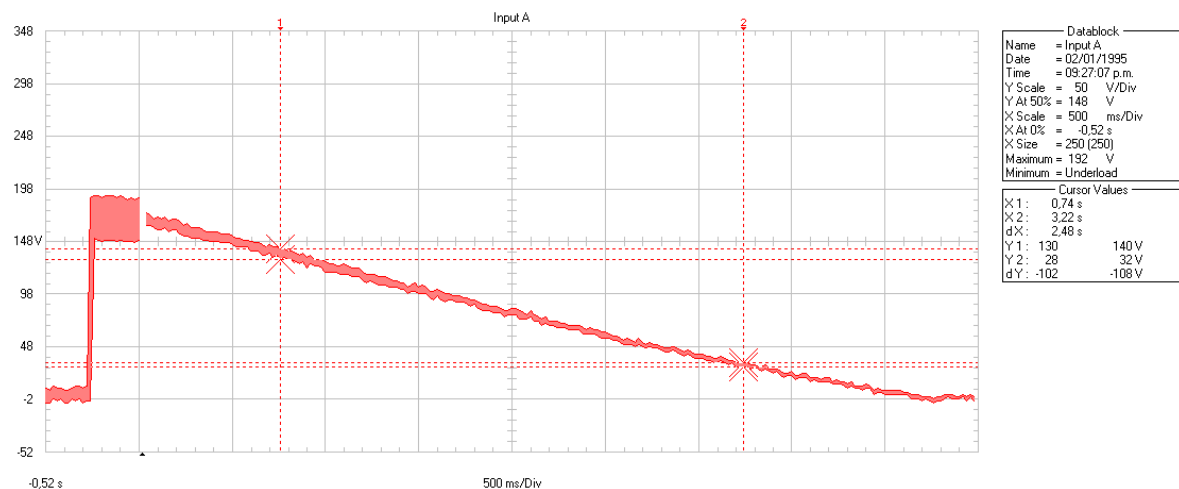
Tabla 13. Determinación de la constante de fricción B

Tensión [V]	Corriente [A]	Velocidad [rad/s]	Resistencia [Ω]	Km	<i>B</i>
180	0,62	177,185826	3,68	1	$3,51 \cdot 10^{-3}$
159,1	0,55	160,116506	3,68	0,98	$3,37 \cdot 10^{-3}$
140,2	0,51	141,371669	3,68	0,98	$3,53 \cdot 10^{-3}$
111,2	0,48	111,526539	3,68	0,98	$4,22 \cdot 10^{-3}$
Promedio					$3,66 \cdot 10^{-3}$

Fuente: autores

Claramente el nuevo valor de *B* difiere del antes hallado debido a que al acoplarle una carga cambia la velocidad, por lo tanto cambian las pérdidas y por ende el coeficiente de fricción *B*. Como ya se tiene la nueva constante de fricción se procede a obtener el τ_m mediante la gráfica de desenergización.

Figura 13. Método 3 Curva de desenergización del Motor DC con acople



Fuente: Autores

Para la realización de esta prueba se hicieron 6 tomas de datos las cuales se muestran a continuación.

Tabla 14. Determinación de la constante mecánica τ_m

Prueba	τ_m	τ_m Promedio
1	2,36	2,33
2	2,38	
3	2,26	
4	2,32	
5	2,3	
6	2,36	

Fuente: Autores

Una vez obtenido el valor de τ_m y con la constante de fricción B (la B calculada para los dos motores) se procede a obtener el momento de inercia de los motores acoplados:

$$J_2 = \tau_m * B = 2,33 * 3,66 * 10^{-3} = 8,52 * 10^{-3} \text{ kg} * \text{m}^2$$

Como el acople es entre dos motores con la misma características el momento de inercia de cada motor es la mitad del momento de inercia J_2 por lo tanto

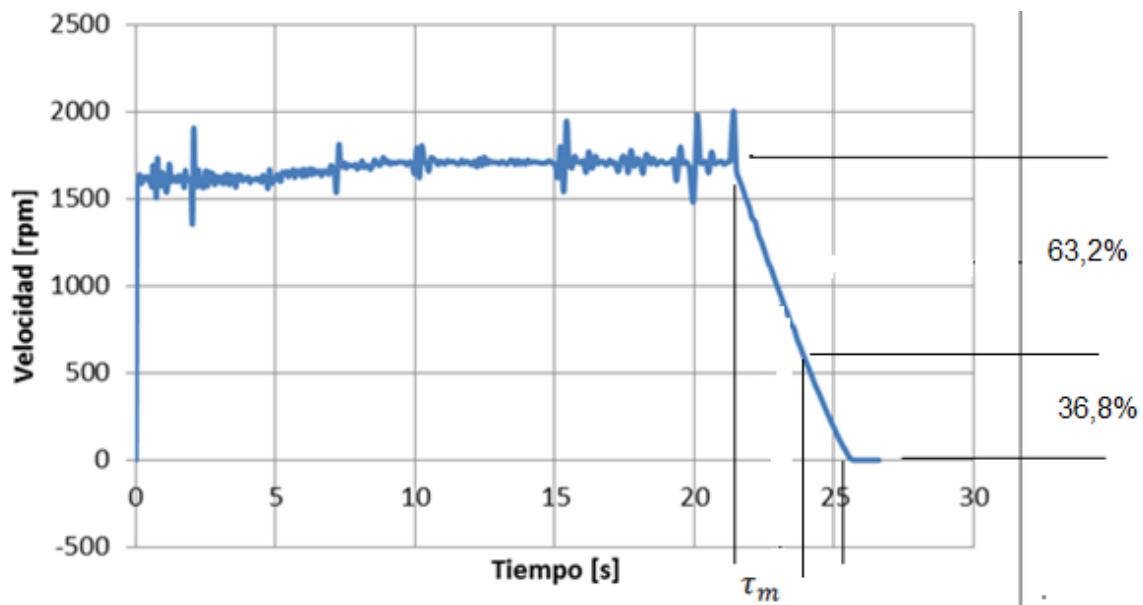
$$J = \frac{8,52 * 10^{-3}}{2} = 4,26 * 10^{-3} \text{ kg} * \text{m}^2$$

Como se puede observar es un buen resultado ya que arroja un valor muy aproximado que en la prueba del motor sin acople lo cual le da más confiabilidad a este método [18].

- Obtención de J midiendo la velocidad

El método consiste en medir la velocidad del motor al momento de desenergizarlo y a partir de esta gráfica encontrar el τ_m . tiempo el cual se tarda en alcanzar el 36,8% de la velocidad que llevaba. Para esta medición se usa el Encoder acoplado al motor DC. Los resultados conseguidos se muestran a continuación.

Figura 14. Método 3 Obtención de J midiendo la velocidad



Fuente: Autores

Para este método se hicieron tres pruebas las cuales arrojaron los siguientes resultados:

Tabla 15. Método 3 –Determinación de la constante mecánica τ_m por medición de velocidad

Prueba	τ_m	τ_m Promedio
1	2,224	2,10766667
2	2,33	
3	1,769	

Fuente: Autores

Por lo que el momento de inercia sería igual a:

$$J = \tau_m * B = 2,11 * 2,05 * 10^{-3} = 4,32 * 10^{-3} kg * m^2$$

Como se puede ver en la implementación del método 3 (calculando el J con acople y sin acople y promediando y midiendo la velocidad con el encoder) se presentan valores muy similares por lo tanto es el método validado. Promediaremos los tres valores y este último será el que usaremos para continuar nuestro trabajo.

Tabla 16. Medición del momento de inercia por el Método 3

Método de medición(método 3)	$J [kg * m^2]$	$J \text{ promedio}$
J con acople de motor DC y promediando(medición con Fluke)	$4,14 * 10^{-3}$	$4,2 * 10^{-3}$
J sin acople de motor DC(medición con Fluke)	$4,26 * 10^{-3}$	
J sin acople (usando Encoder)	$4,32 * 10^{-3}$	

Fuente: Autores

$$J = 0,004201173 Kg * m^2$$

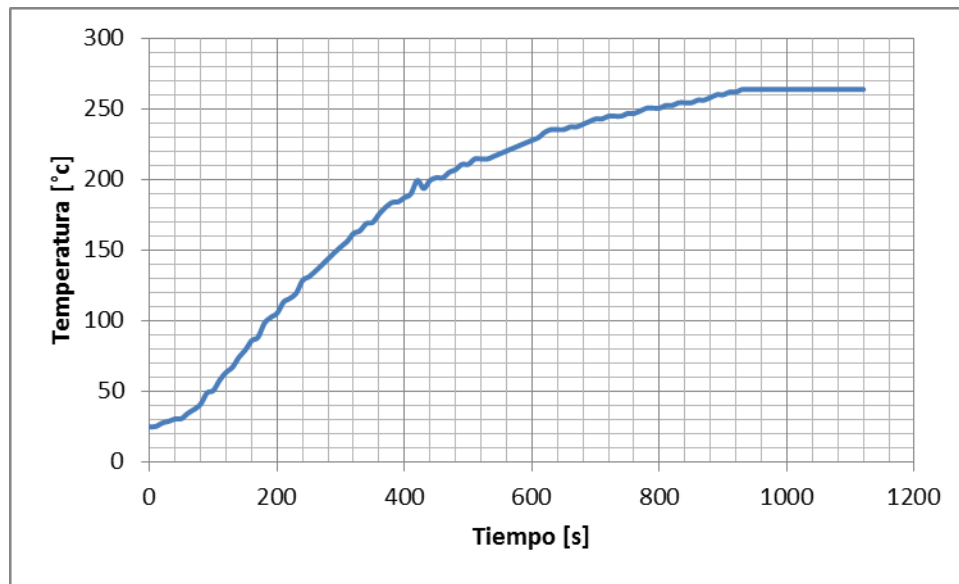
Por lo tanto el modelo obtenido del motor es el siguiente (ver ecuación 33):

$$\frac{\omega(s)}{V_a(s)} = \frac{1,01409162}{(3,678958 + 0,07 * s)(0,004201173 * s + 0,0020512) + 1,01409162}$$

3.2. OBTENCIÓN DEL MODELO DEL HORNO

Para la obtención del modelo del horno se parte de la respuesta que se obtuvo al energizarlo a la red de 120 Volts AC la cual se muestra en la siguiente figura

Figura 15. Curva de calentamiento del horno eléctrico



Fuente: Autores

Como se puede observar es una gráfica muy parecida a la respuesta de un sistema de primer orden, por lo tanto se aproximará uno de estos.

El objetivo principal de este modelo es calcular la constante de calentamiento (τ_c), el cual se puede encontrar cuando la curva alcanza el 63,2% de su valor estable, por lo tanto con los datos obtenidos podemos decir que $\tau_c = 335[s]$

Con lo dicho anteriormente se puede afirmar que la función de transferencia tiene la siguiente forma (ver numeral 2.6.2):

$$H(s) = \frac{A}{s + \frac{1}{335}}$$

Para la obtención de A aplicamos el teorema del valor final. Se energiza el horno con la alimentación de la red a cual es 120 Vrms por los tanto el sistema tiene un valor final de 263,748 °C

$$\lim_{t \rightarrow \infty} f(t) = \lim_{s \rightarrow 0} s * F(s) = \lim_{s \rightarrow 0} s * \frac{A * 120}{\left(s + \frac{1}{335}\right) * s} = \frac{A * 120}{\frac{1}{335}} = 263,748$$

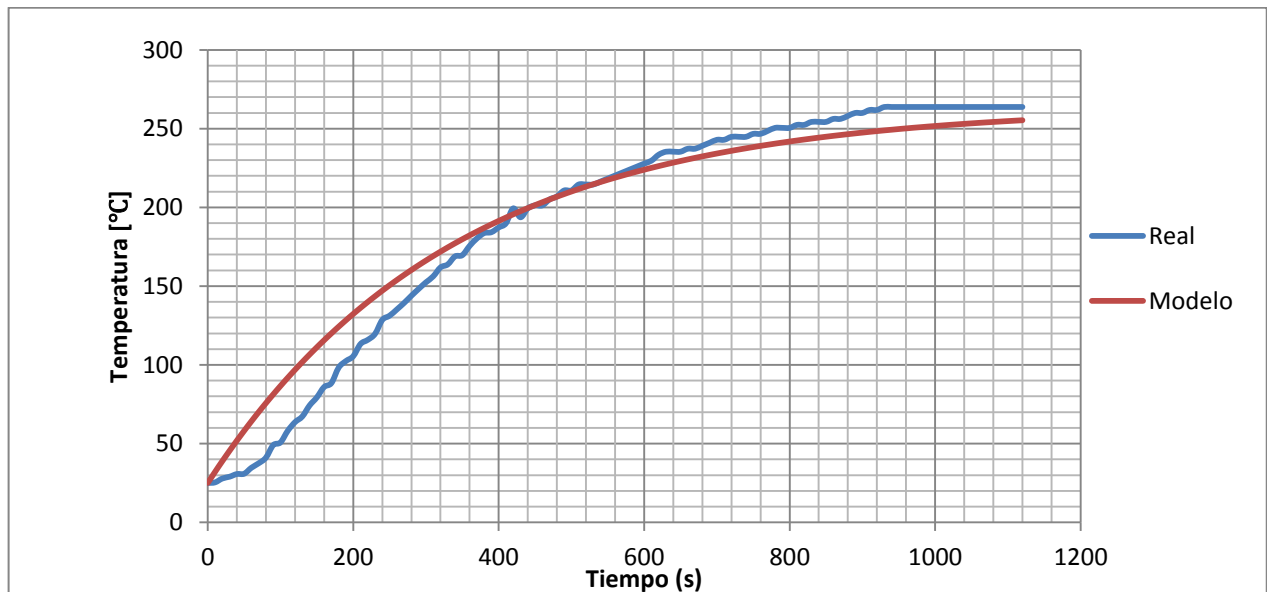
$$A = 0.006561$$

Por lo tanto la función de transferencia del horno es la siguiente:

$$H(s) = \frac{0.006561}{s + \frac{1}{335}} \quad (42)$$

A continuación se muestra la gráfica de comparación entre la respuesta dada por el sistema real y la respuesta dada por el modelo calculado.

Figura 16. Comparación curva de calentamiento real contra curva simulada



Fuente: Autores

Como se puede observar el modelo obtenido tiene una gran similitud con el real.

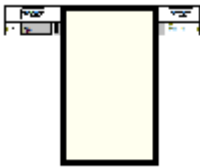
4. CONSTRUCCIÓN DE LA PLANTA EN LABVIEW

4.1. IMPLEMENTACIÓN DE LA PLANTA EN LABVIEW

Con la finalidad de no implementar las plantas físicas, se utilizó el software Labview con el fin de no preocuparnos por la implementación de la etapa de potencia en las plantas y enfocarnos más en la etapa de control por medio de los controladores el cual es nuestro objetivo. Para poder controlar las plantas implementadas en Labview y empleando los controladores (Twido, Siemens y UDC1200), se utilizó la tarjeta de adquisición de datos (USB 6009) de National Instrument para la recepción y envío de datos entre el controlador y el PC.

A continuación se presentan algunas de los bloque funcionales de LABVIEW implementadas en la programación de las plantas.

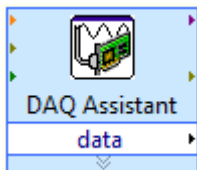
4.1.1. Descripción de los bloques funcionales



Control & Simulation Loop: Ejecuta el diagrama de simulación contenido dentro del bloque hasta que el Control & Simulación Loop llega el tiempo final de simulación o hasta que la función de simulación “Halt” detiene la ejecución mediante programación. Los datos requeridos para su configuración son los siguientes:

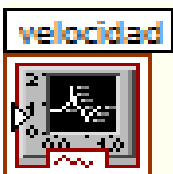
- Tiempo inicial de la simulación.
- Tiempo final de la simulación.
- Método de solución de la simulación: en esta casilla da la posibilidad de escoger el método a utilizar ya sea Runge-Kutta 27, Runge-Kutta 4, etc. para resolver la planta.

- Paso de tiempo continuo o tolerancia: como su nombre lo indica en esta casilla se coloca el paso de tiempo continuo para la solución de la planta y el error permitido en la solución.

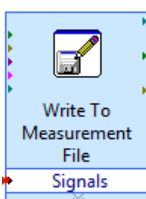


DAQ Assistant: Se utiliza cuando se requiere utilizar una entrada o salida de la tarjeta de adquisición de datos para comunicarla con el programa elaborado. Este bloque permite configurar el tipo de entrada o salida que se requiere, es decir una de tensión o una de corriente, cabe aclarar que también depende de las características de la tarjeta, después de configurar esto, permite escoger (en el caso de entradas) el número de muestras por segundo y el modo de adquisición de datos, para la salida permite escoger el modo generación (analógico o digital) y los rangos de salida de tensión.

Transfer function: se utiliza para implementar la función de transferencia de plantas, los datos a introducir son el denominador y el numerador. Se da doble clic sobre este para introducir los datos de la planta. La entrada de este es la alimentación de la planta y la salida es la respuesta de la planta frente a esta entrada.

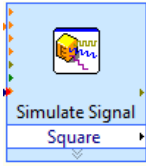


Charting Waveform: Permite visualizar mediante una gráfica el comportamiento de la planta.



Write To Measurement File: Permite almacenar en un bloc de notas todos los datos obtenidos de la simulacion. Este permite configurar el

formato de texto, la presentación de los datos (numero de columnas), da la opción del nombramientos de archivos



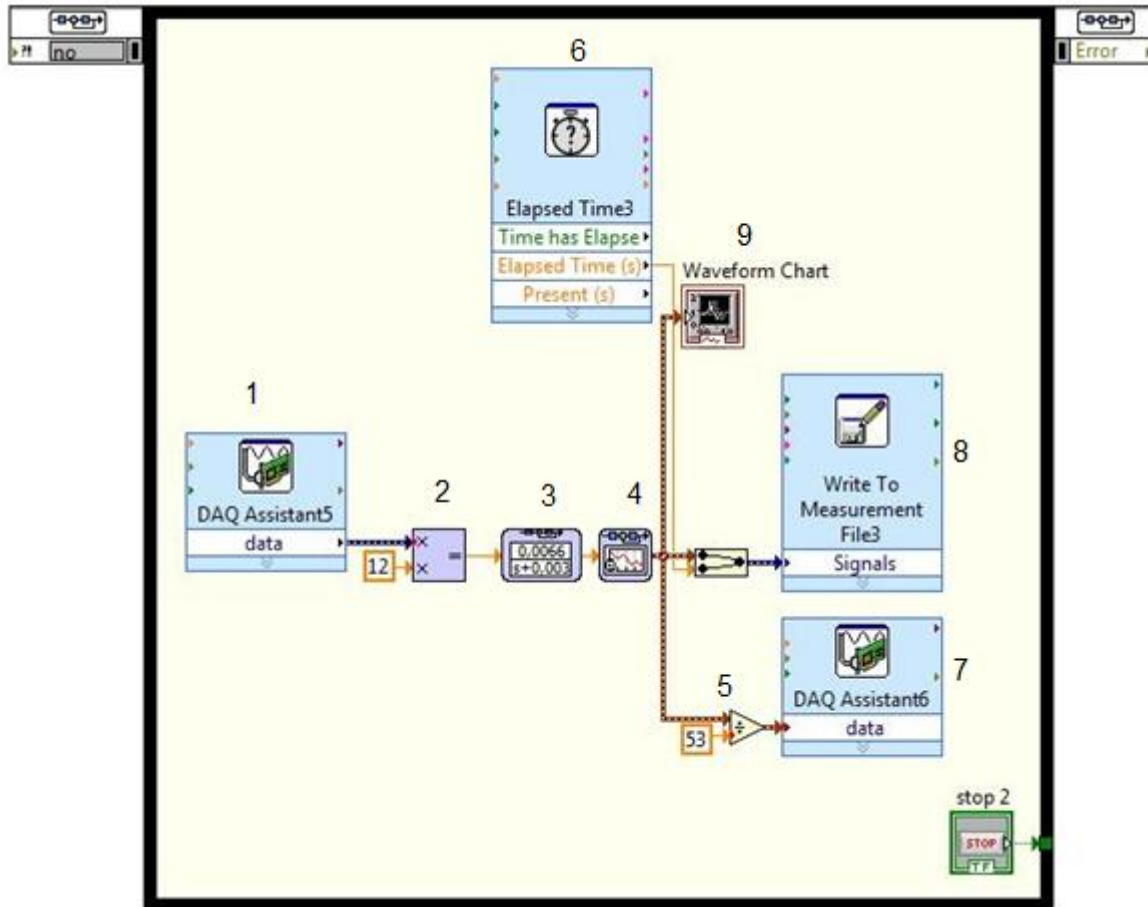
Simulate Signal: Se usa para simular las fuentes de excitación con forma de onda sinusoidal, onda cuadrada, onda triangular, diente de sierra, o la señal de ruido. Las entradas a este son las siguientes:

- Amplitud: es la amplitud de la señal
- Ciclo útil: este se utiliza cuando se tiene una señal de pulsos, y sirve para modificar el porcentaje en que permanece la señal en alto.
- Frecuencia: se utiliza para modificar la frecuencia de la señal.
- Offset: se utiliza para agregar a la señal un valor constante que provoca un desplazamiento de la señal en el eje y.
- Fase: produce un desfase en la señal y se utiliza para señales sinusoidales.
- Resetear señal: con una señal en alto reinicia la señal.

A continuación se muestran alguno de los programas utilizados en este trabajo.

4.1.2. Planta del horno con control continuo de alimentación.

Figura 17. Planta para el horno -Control continuo de alimentación implementado en LABVIEW



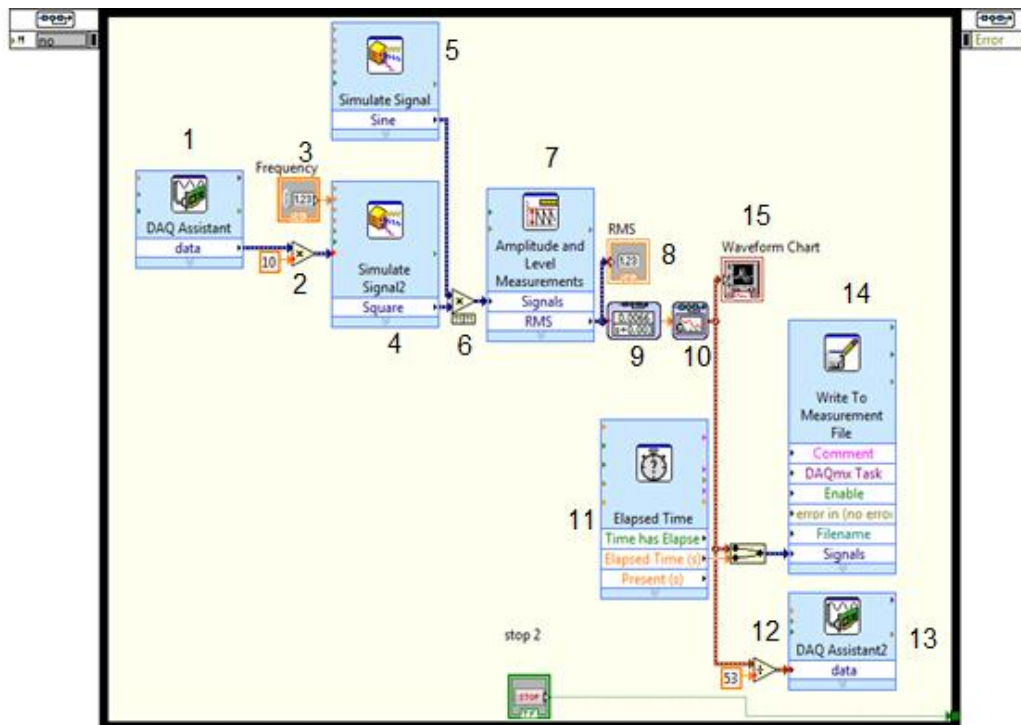
Fuente: Autores

1. Adquiere y transmite la señal de control dada por los controladores a través de la tarjeta de adquisición de datos.
2. La señal de control se multiplica por 12 debido a que la señal de control se mueve entre los rangos de 0 a 10 V y cuando la señal de control es de 10 V la entrada a la planta debe ser de 120 V, es decir se necesita una relación lineal entre la señal de control y la tensión de alimentación de la planta.
3. Simula la función de transferencia del horno
4. Ayuda a mostrar los datos de la simulación correctamente.

5. Transforma los valores de la temperatura en una tensión de 0 a 5 V que son los permitidos por la tarjeta USB 6009.
6. Es un medidor de tiempo de la duración de la simulación.
7. Transmite la temperatura que posee el horno al controlador a través de la tarjeta USB 6009
8. Guarda el comportamiento de la temperatura durante la simulación.
9. Muestra el comportamiento de la temperatura mediante una gráfica.

4.1.3. Planta para el horno. Control con Triac

Figura 18. Planta para el horno. Control con Triac implementado en LABVIEW

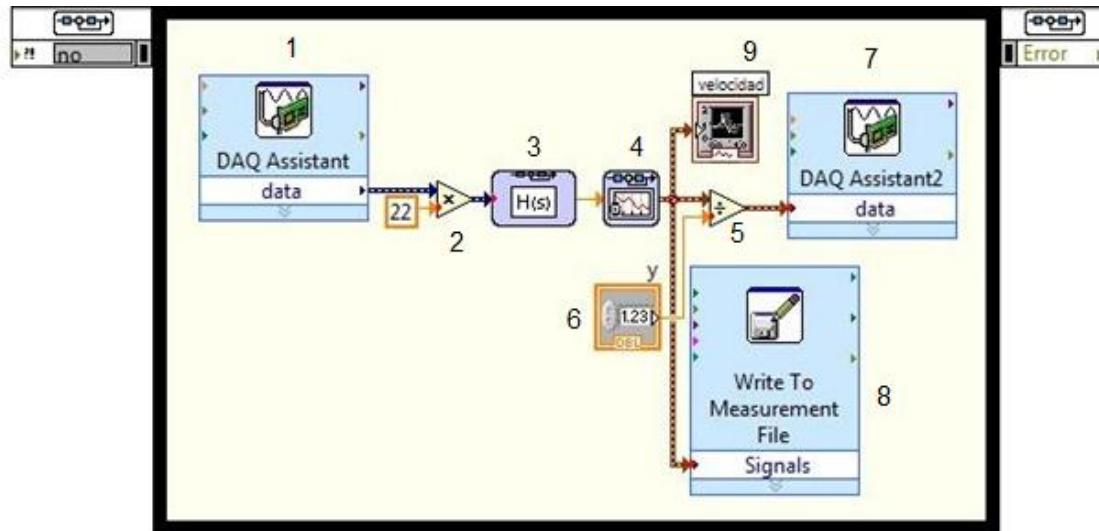


Fuente: Autores

1. Adquiere y transmite la señal de control dada por los controladores a través de la tarjeta de adquisición de datos
2. Se multiplica la señal de control por 10 porque hay que convertir esta señal en un valor de 0 a 100, debido a que esta va a ser el porcentaje de ciclo de trabajo del pulso.
3. Es la frecuencia de la señal PWM
4. Es el generador de la señal PWM provocada por la señal de control
5. Es la Fuente: de alimentación sinusoidal que alimenta el horno
6. Cumple la función del triac
7. Calcula el valor RMS de la señal para transmitírselo a la planta.
8. Muestra el valor RMS de la señal
9. Simula la función de transferencia del horno
10. Ayuda a mostrar los datos de la simulación correctamente
11. Es un medidor de tiempo de la duración de la simulación
12. Transforma los valores de la temperatura en una tensión de 0 a 5 V que son los permitidos por la tarjeta USB 6009.
13. Transmite la temperatura que posee el horno al controlador a través de la tarjeta USB 6009
14. Guarda el comportamiento de la temperatura durante la simulación.
15. Muestra el comportamiento de la temperatura mediante una gráfica.

4.1.4. Planta del motor control continuo de alimentación

Figura 19. Planta para el motor. Control continuo implementado en LABVIEW



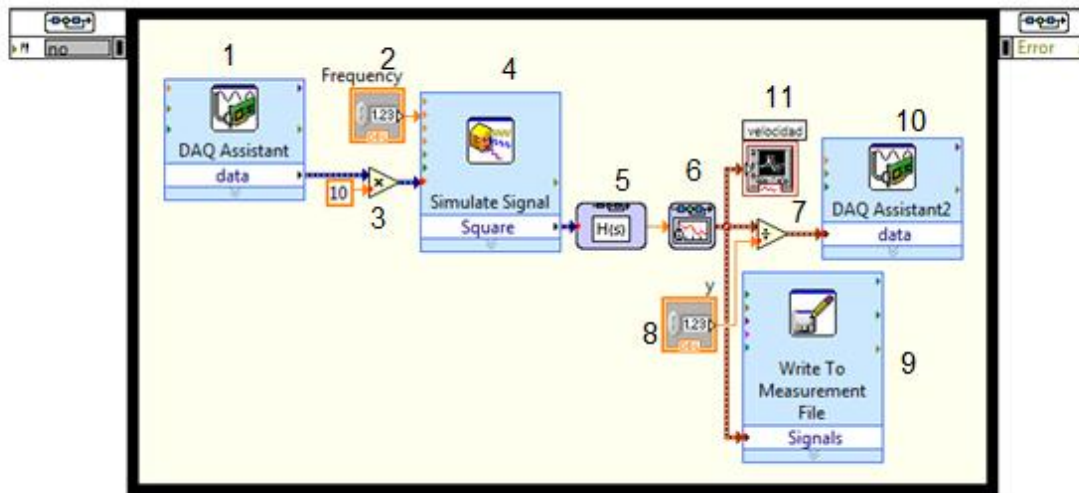
Fuente: Autores

1. Adquiere y transmite la señal de control dada por los controladores a través de la tarjeta de adquisición de dato
2. La señal de control se multiplica por 22 debido a que la señal de control se mueve entre los rangos de 0 a 10 V y cuando la señal de control es de 10 V la entrada a la planta debe ser de 220 V, es decir se necesita una relación lineal entre la señal de control y la tensión de alimentación de la planta.
3. Simula la función de transferencia del motor
4. Ayuda a mostrar los datos de la simulación correctamente
5. Transforma los valores de la Velocidad en una tensión de 0 a 5 V que son los permitidos por la tarjeta USB 6009
6. Es el valor con el cual transformo el valor de velocidad en una tensión entre 0 y 5 [V].

7. Transmite la velocidad que posee el motor al controlador a través de la tarjeta USB 6009
8. Guarda el comportamiento de la temperatura durante la simulación.
9. Muestra el comportamiento de la temperatura mediante una gráfica.

4.1.5. Control del motor con transistor

Figura 20. Planta del motor. Control continuo implementado en LABVIEW



Fuente: Autores

1. Adquiere y transmite la señal de control dada por los controladores a través de la tarjeta de adquisición de datos la cual es una señal de tensión.
2. Frecuencia de operación del PWM.
3. Se multiplica la señal de control por 10 porque hay que convertir esta señal en un valor de 0 a 100, debido a que esta va a ser el porcentaje de ciclo de trabajo del pulso.
4. Es la Fuente al mismo tiempo es la señal de control PWM y la operación del transistor.
5. Simula la función de transferencia del motor.

6. Ayuda a mostrar los datos de la simulación correctamente.
7. Transforma los valores de la Velocidad en una tensión de 0 a 5 V que son los permitidos por la tarjeta USB 6009.
8. Es el valor con el cual transformo el valor de velocidad en una tensión entre 0 y 5 [V].
9. Guarda el comportamiento de la temperatura durante la simulación.
10. Transmite la velocidad que posee el motor al controlador a través de la tarjeta USB 6009.
11. Muestra el comportamiento de la temperatura mediante una gráfica.

4.2. CIRCUITOS INTEGRADOS

4.2.1 Justificación

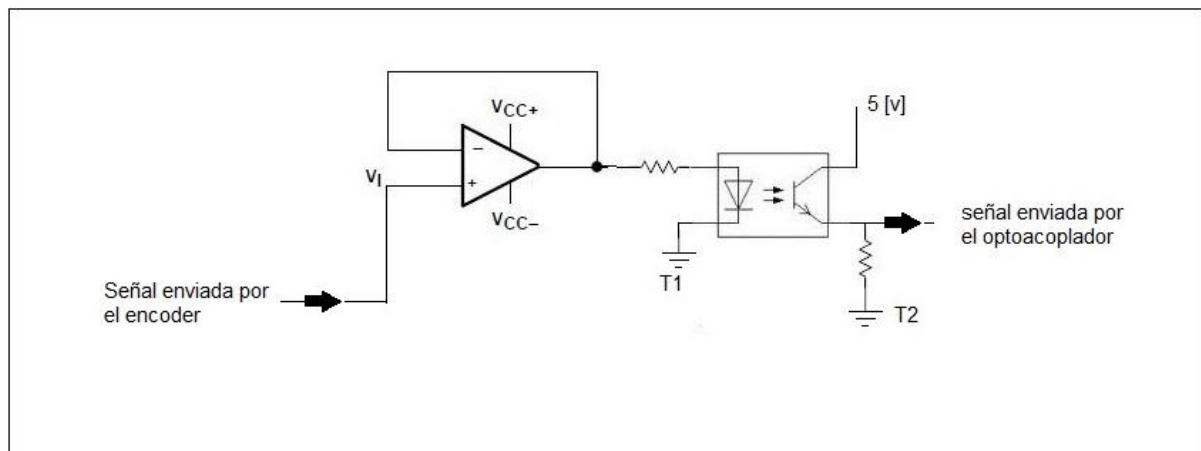
Estos circuitos integrados se emplean porque es necesario adaptar la señal a los niveles adecuados para poder ser leídos por la tarjeta de adquisición de datos, pero además de esto es preciso aislar galvánicamente (diferentes tierras) la tarjeta y el controlador.

4.2.2. Obtención de momento de inercia

Para determinar el momento de inercia del motor surgió la necesidad de implementar un circuito de aislamiento digital, este circuito consta de dos etapas una de adecuación de tensión y otra de aislamiento, en la etapa de adecuación lo que se busca es limitar la tensión enviada desde el Encoder hacia la tarjeta lo cual se logra con el amplificador LM324.

En la etapa de aislamiento lo que se busca es proteger los dos circuitos de modo tal que las fuentes que energizan dichos circuitos queden aisladas galvánicamente y el efecto de una no interfiera en la otra. Este aislamiento se logra usando el integrado MCT6.

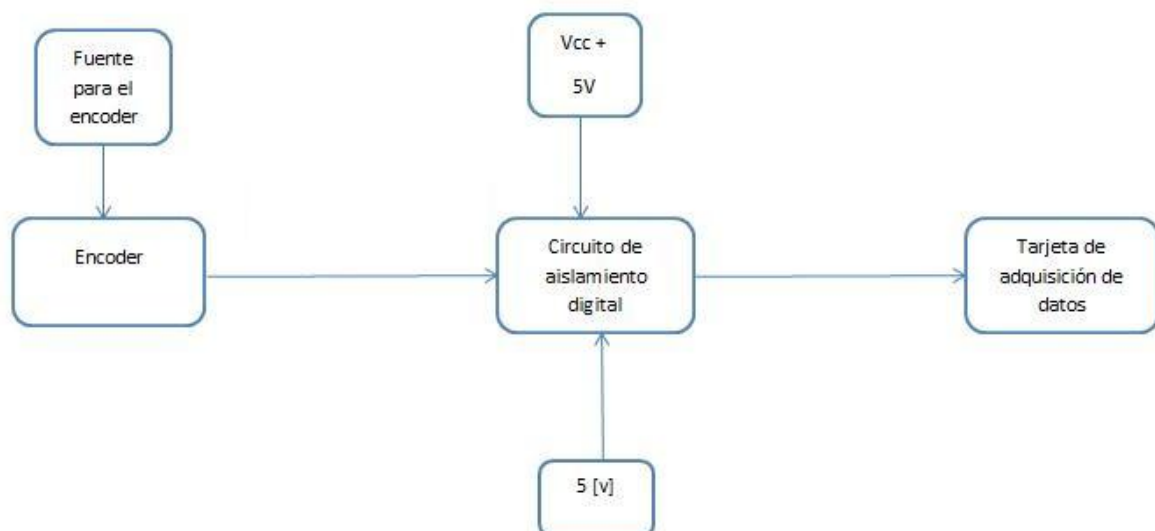
Figura 21. Etapa de adecuación y aislamiento de tensión



Fuente: Autores

En la figura 22 se muestra un esquema de conexión visualizando la ubicación de la etapa de aislamiento, alimentación y señales.

Figura 22. Diagrama de conexiones para las señales digitales

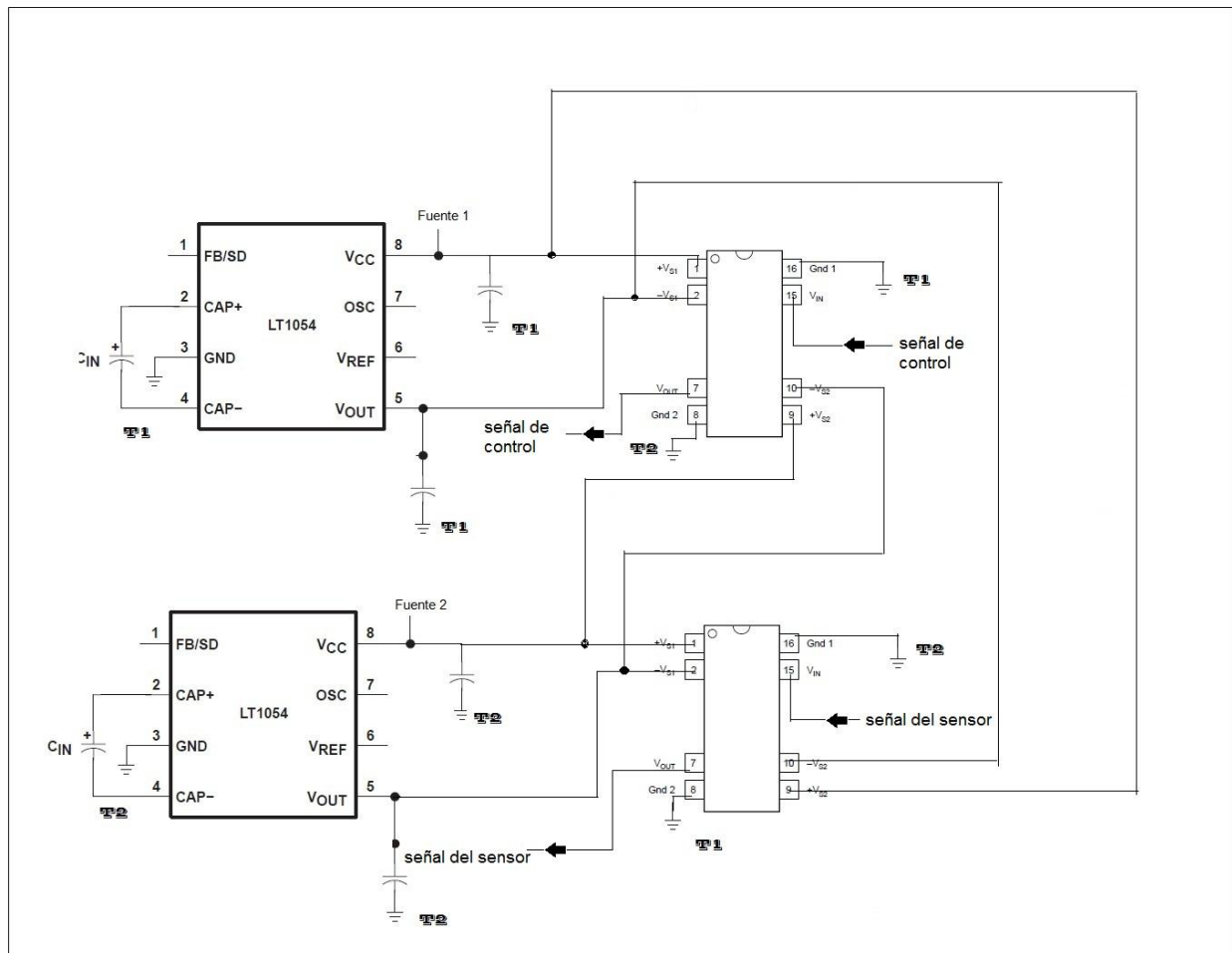


Fuente: Autores

4.2.3. Circuito de aislamiento entre la tarjeta de adquisición y los controladores.

Se realizó una etapa de aislamiento para proteger la tarjeta o el controlador de forma tal que en caso de falla los circuitos sean independientes. Los integrados utilizados fueron el LT1054 cuya función es invertir la tensión de entrada por ejemplo; si la entrada es de 12V la salida será de -12V esto es necesario para poder alimentar los ISO124 utilizados para el aislamiento de señales analógicas puesto que estos requieren una señal dual.

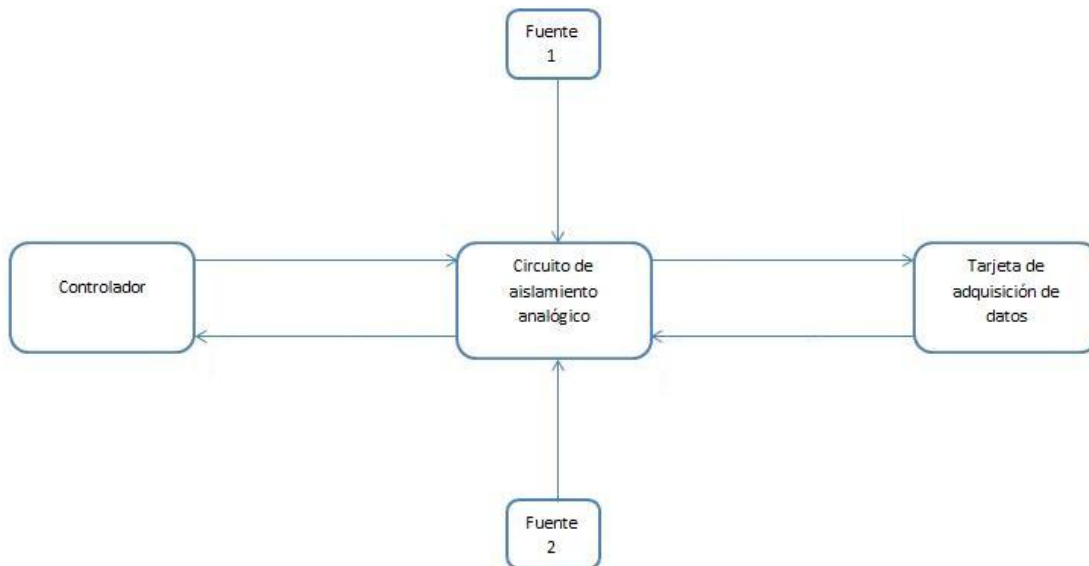
Figura 23. Esquema de conexión del circuito de aislamiento TAD - controlador



Fuente: adaptada del datasheet del ISO12 y LT1054. [19][20]

En la figura 24 se muestra un esquema de conexión visualizando la ubicación de la etapa de aislamiento, alimentación y señales.

Figura 24. Diagrama de conexiones de la señales analógicas



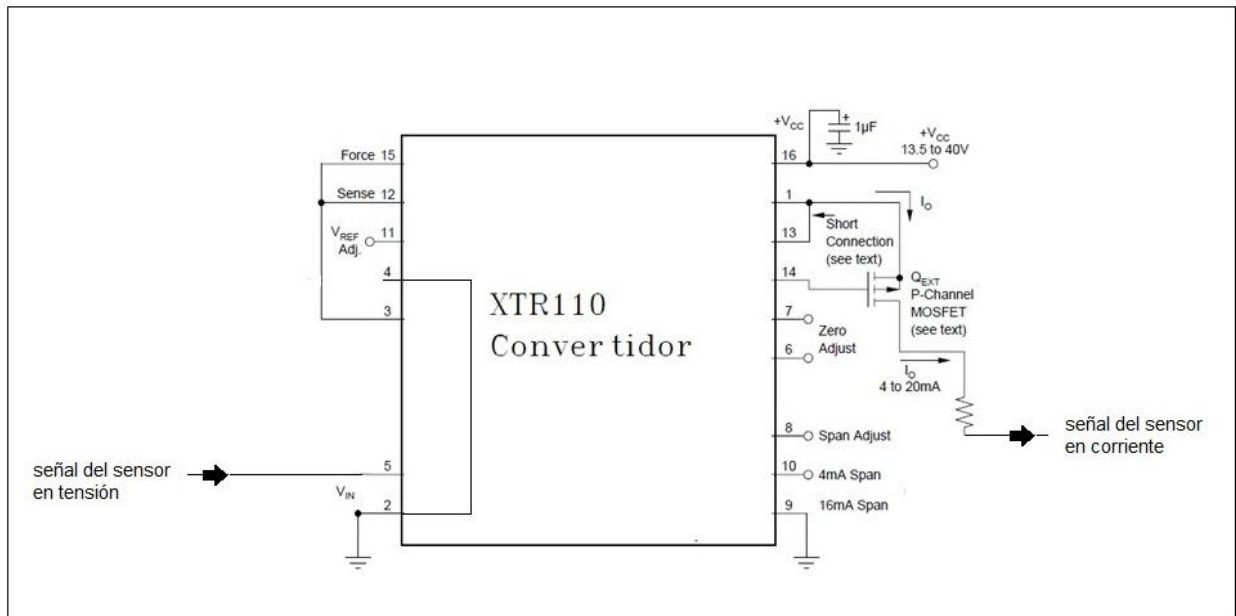
Fuente: Autores

La función de este circuito es aislar las tierras de donde T1 irá conectado al negativo de la Fuente: 1 y T2 al negativo de la Fuente: 2.

4.2.4. Circuito de acople al UDC1200

Debido a que la entrada del controlador UDC es de corriente fue necesaria la implementación de un circuito convertidor de tensión a corriente que estaría ubicado entre la tarjeta de adquisición de datos y el controlador (UDC1200). El integrado utilizado para esta función fue el XTR110 y el esquema de conexión se muestra a continuación.

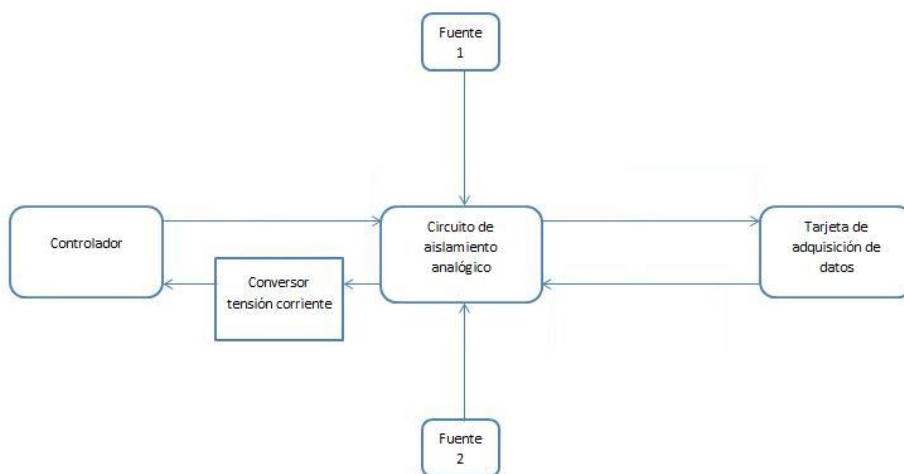
Figura 25. Esquema de conexión del convertidor XTR110



Fuente: Adaptada del Datasheet convertidor XTR110 [7]

En la figura 26 se muestra un esquema de conexión visualizando la ubicación de la etapa de aislamiento, alimentación y señales.

Figura 26. Diagrama de conexión de las señales analógicas para la comunicación con el UDC



Fuente: Autores

5. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS

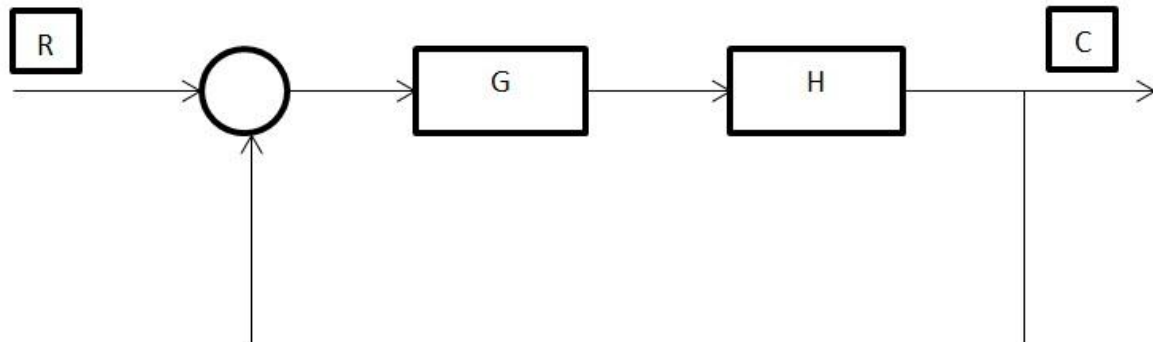
Basados en la información previamente determinada para las plantas (función de transferencia), se procede a calcular los valores de las constantes de control (Término Proporcional, integral y derivativo). Para el horno los parámetros se escogen de forma teórica y para el motor se sustenta en el primer método de Ziegler-Nichols.

5.1. OBTENCIÓN DE LOS PARÁMETROS DE CONTROL PARA EL HORNO

Como el horno es una función de primer orden y es un proceso lento la mejor forma de controlarlo es mediante un PI[1]. A continuación se presenta la forma como fueron calculados los parámetros.

A partir de la siguiente figura se determinan los parámetros del controlador.

Figura 27. Lazo cerrado de control sencillo



Fuente: Autores

Donde:

$G(s)$ controlador PI para la planta del horno

$H(s)$ planta para el horno hallada en la sección 3.1.5.3.

De la figura se obtiene la siguiente ecuación

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{G(s)*H(s)}{1+G(s)*H(s)} \quad (39)$$

De la ecuación (39) y sabiendo para un control PI [1] que $G(s)$ es

$$G(s) = K_p \left(\frac{T_i*s+1}{T_i*s} \right) \quad (40)$$

Demás de la sección 3.1.5.3 se tiene que $H(s)$

$$H(s) = \frac{2,1979*K_p}{335*s+1} \quad (41)$$

El siguiente paso es asumir que $T_i=335$ lo cual facilita algunos cálculos.

Por lo tanto

$$G(s) * H(s) = \frac{2,1979}{335 * s + 1} * K_p \left(\frac{335 * s + 1}{335 * s} \right)$$

$$G(s) * H(s) = \frac{2,1979}{335 * s}$$

Dando la relación

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{2,1979*K_p}{335*s+2,1979*K_p} \quad (42)$$

Se quiere que el tiempo de asentamiento sea menor a 1000 segundos como un valor inicial de prueba. Además sabemos [11] que la respuesta debe establecerse aproximadamente a los $5 \tau_c$

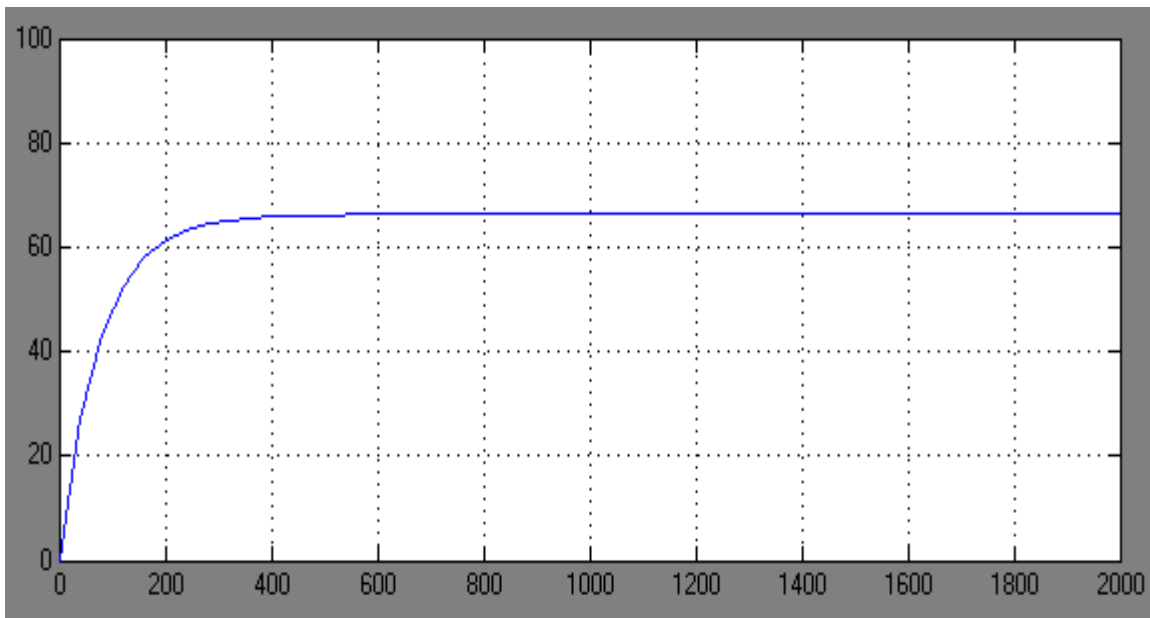
$$\tau_c = \frac{335}{2,1979 * K_p}$$

$$5 * \tau_c = 5 * \frac{335}{2,1979 * K_p} \leq 1000$$

$$K_p \geq 0,7623$$

Entonces se escoge un $K_p = 2$, con los parámetros obtenidos se simulara en el software Matlab por medio de la herramienta Simulink para ver el tipo de respuesta del sistema. Ver anexo E programa de simulación en Simulink

Figura 28. Respuesta del horno empleando Simulink con $K_p=2$, $T_i=335$



Fuente: Autores

De esta simulación se puede concluir que el tiempo de establecimiento lo alcanza en aproximadamente 500 segundos. Lo que demuestra que estos parámetros son adecuados para el modelo que se está tratando.

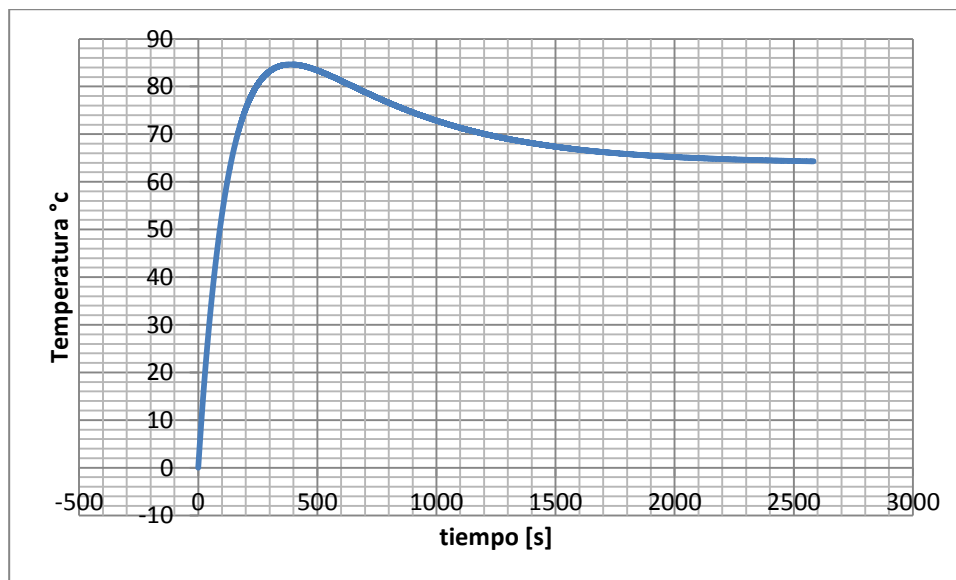
5.2. PRUEBAS CON EL HORNO

Para la realización de estas pruebas se tuvieron en cuenta dos formas de control. Una de ellas era que se pudiera controlar la tensión linealmente, es decir que se pueda controlar la amplitud de la señal y así mismo poder modificar el valor RMS de esta y la otra es realizar el control de la señal mediante un modulador de pulsos (PWM) cuya frecuencia de operación es de 30Hz (debido a que a esta frecuencia se comportaron bien los controladores), la señal del PWM activa un Triac que cumple la función de interruptor en la línea de alimentación AC 120 Vrms. A continuación se muestran los resultados obtenidos con cada controlador cuando se hizo un control continuo de alimentación para el horno. Las gráficas se obtuvieron empleando Excel

5.2.1. CONTROL EN FORMA CONTINUA DE LA EXCITACIÓN PARA EL HORNO

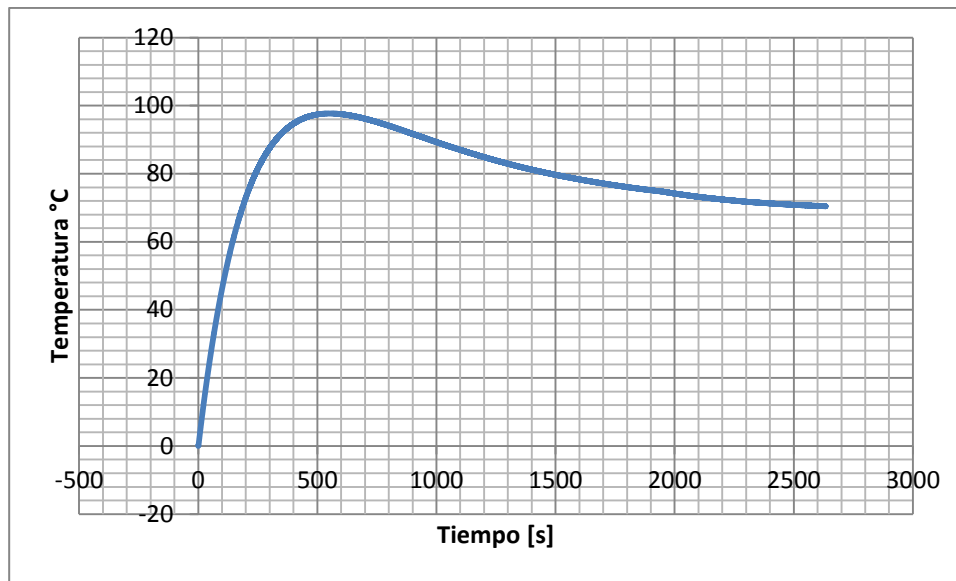
Las figuras 29 a 31 muestran la respuesta de la temperatura del horno cuando se realiza un control continuo de la excitación con cada uno de los tres controladores

Figura 29. Control continuo de alimentación con el Controlador S7-200 de Siemens con $K_p=$ y $T_i=335$ con Setpoint de 66,25 °C



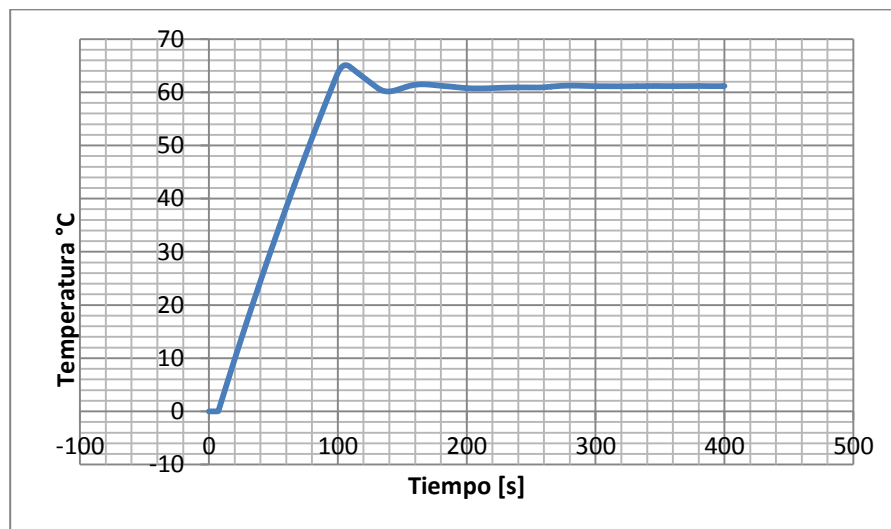
Fuente: Autores

Figura 30. Control continuo de alimentación con el Controlador Twido de Schneider con $K_p=2$ y $T_i=335$ con Setpoint de $66,25^\circ\text{C}$



Fuente: Autores

Figura 31. Control continuo de alimentación con el Controlador UDC1200 de Honeywell con parámetros $K_p=2$ y $T_i=335$ con Setpoint de $66,25^\circ\text{C}$



Fuente: Autores

Tabla 17. Comparación entre controladores para el control continuo de la alimentación para el horno. Parámetros $K=2$ y $T_i=335$ y Setpoint de $66,25\text{ }^{\circ}\text{C}$

	Siemens	Twido	UDC 1200
Tiempo de Retardo [s]	52	66,3	52,4
Tiempo de levantamiento [s]	147,1	168,8	95,8
Tiempo pico [s]	387,8	553,1	106,2
Sobrepaso Máximo	1,28	1,475	1,06
Tiempo de asentamiento [s]	2582,8	2633	275
Error de estado estable[%]	2,9	6,8	7,6

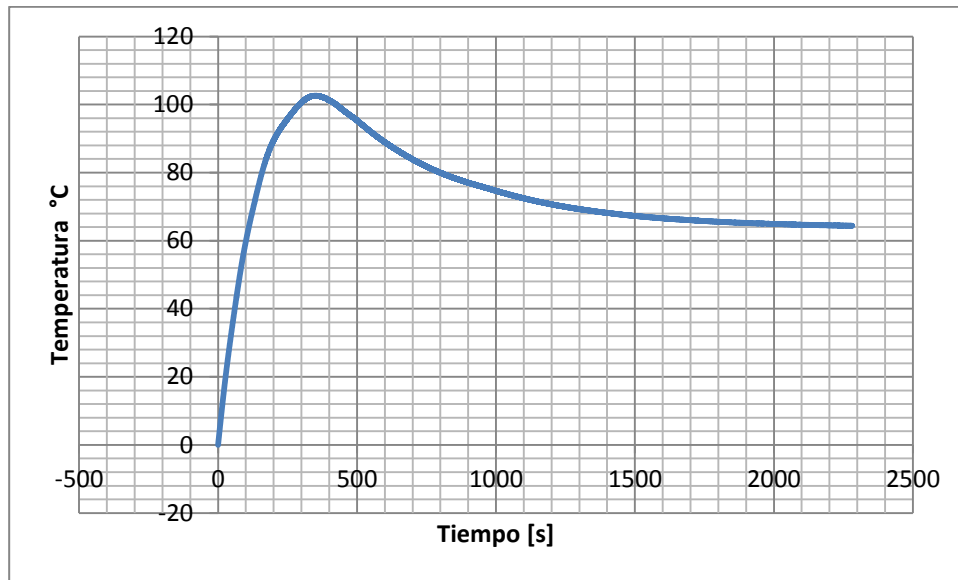
Fuente: Autores

Analizando la tabla anterior no podemos decir que un controlador es mejor que otro puesto que no existe ninguno que sobresalga en los tres aspectos más importantes que son sobrepaso máximo, tiempo de asentamiento y error de estado estable sin embargo cabe aclarar que el UDC 1200 tuvo un buen desempeño en dos de estos (Sobrepaso M. Tiempo de A.) pero fue el peor en el otro (Error en estado Estable.)

En la sección 5.3 se modifican las constantes mediante una sintonización fina para mejorar la respuesta y ver los cambios.

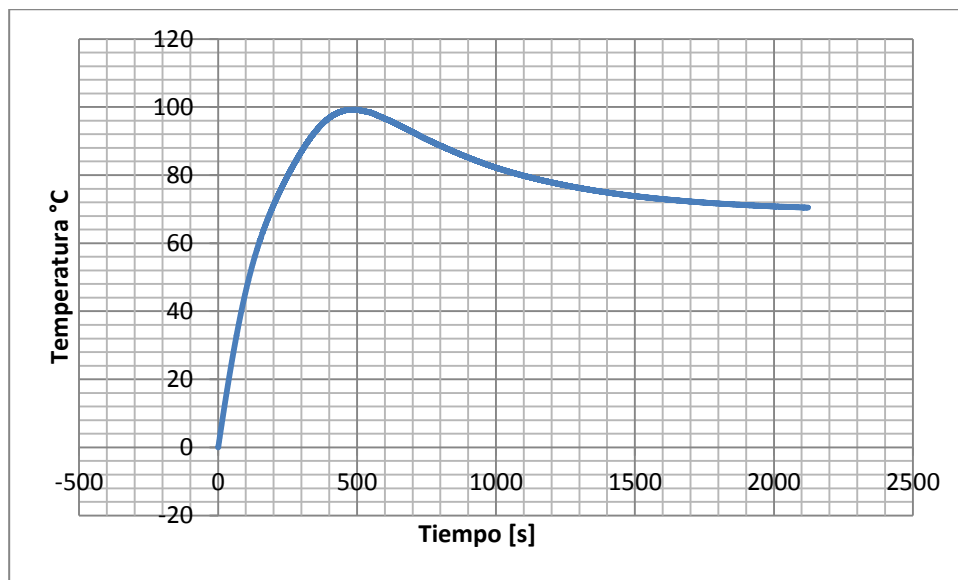
5.2.2. CONTROL CON TRIAC EN EL HORNO

Figura 32. Control de temperatura con Triac empleando el controlador S7-200 de Siemens con $K_p=2$ y $T_i=335$ y setpoint de 66.25°C



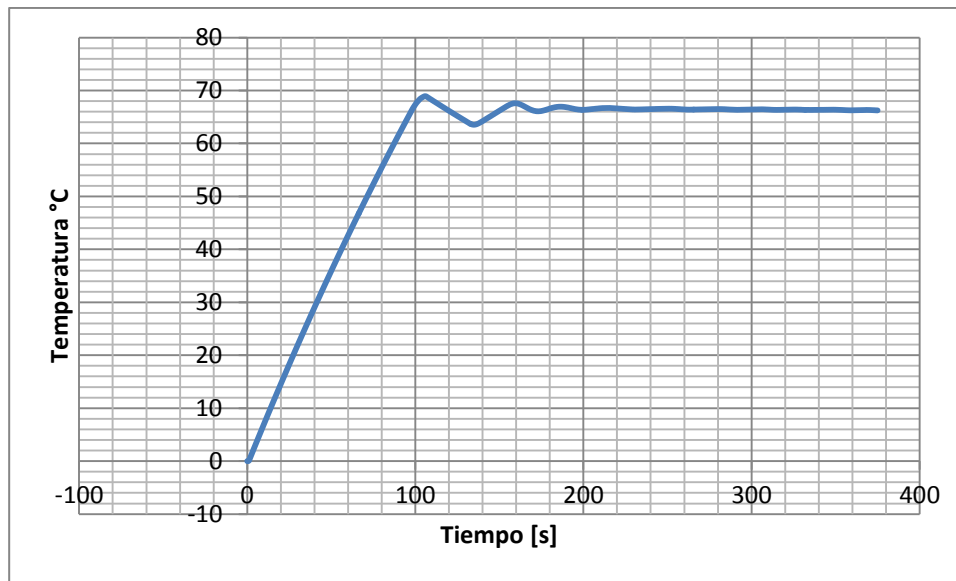
Fuente: Autores

Figura 33. Control de temperatura con Triac con el Twido de Schneider con parámetros $K_p=2$ y $T_i=335$ y Setpoint de $66,25^\circ\text{C}$



Fuente: Autores

Figura 34. Control de temperatura con Triac con el UDC1200 de Honeywell con parámetros $K_p=2$ y $K_i=335$ con Setpoint de $66,25\text{ }^{\circ}\text{C}$



Fuente: Autores

Tabla 18. Comparación entre controladores para el control con Triac para el horno. Parámetros parámetros $K_p=2$ y $T_i=335$ con Setpoint de $66,25\text{ }^{\circ}\text{C}$

	Siemens	Twido	UDC 1200
Tiempo de Retardo [s]	48,1	67,1	45,9
Tiempo de levantamiento [s]	116,8	147,5	97,8
Tiempo pico [s]	377,7	489,8	110,9
Sobrepaso Máximo	1,542	1,5	1,026
Tiempo de asentamiento [s]	2282,1	2120,2	225
Error de estado estable[%]	2,82	6,3	0,25

Fuente: Autores

Para esta prueba el controlador que mejor se comportó fué el UDC con el menor sobrepaso máximo, tiempo de asentamiento y error en estado estable, es meritorio mencionar que si se comparan los resultados de los tres controladores utilizando el

control por Triac con los resultados de estos mismos cuando se realizó un control continuo de alimentación, fue mucho mejor el rendimiento de los tres utilizando el Triac.

Una posible causa a a este comportamiento puede ser que la respuesta se logra estabilizar en un tiempo menor porque la planta se desenergiza totalmente.en el control con triac. Recordemos que en el control con triac, primero se energiza y en el momento que se pasa la temperatura deseada se quita le energía por lo que cae más rápido. En cambio el control continuo de alimentación consiste en reducir al menor valor posible (diferente de 0) al momento de sobrepasar el setpoint.

5.3. MEJORAMIENTO DE CONTROL DEL HORNO MEDIANTE UNA SINTONIZACIÓN FINA

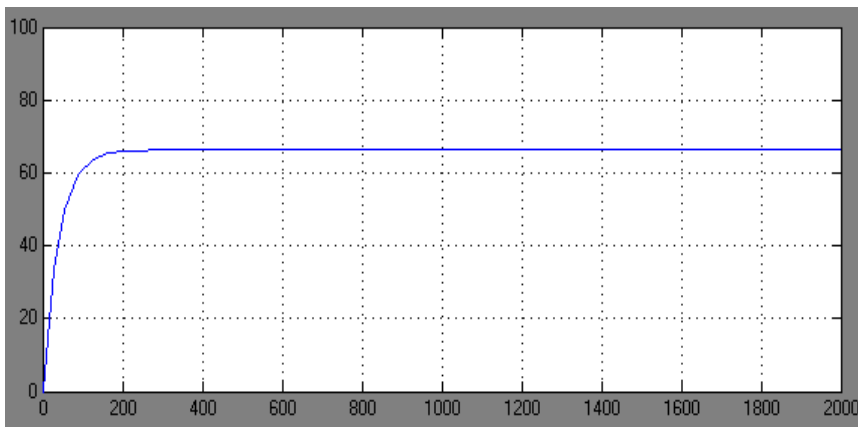
Utilizando la herramienta de Matlab se realizó una sintonización fina con el objetivo de mejorar la respuesta transitoria del sistema. Dando como resultado

$$K_p = 4$$

$$T_i = 335$$

A continuación se muestra la respuesta obtenida en Simulink

Figura 35. . Respuesta por Simulink con parámetros Kp=4 Ti=335

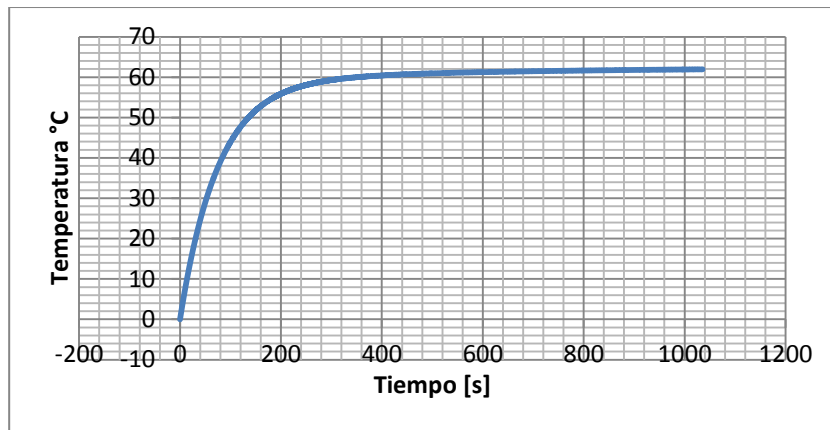


Fuente: Autores

En la gráfica podemos notar que el tiempo de asentamiento disminuye a 230 segundos aproximadamente (anteriormente se encontraba en 500) logrando de esta forma un mejoramiento en el control.

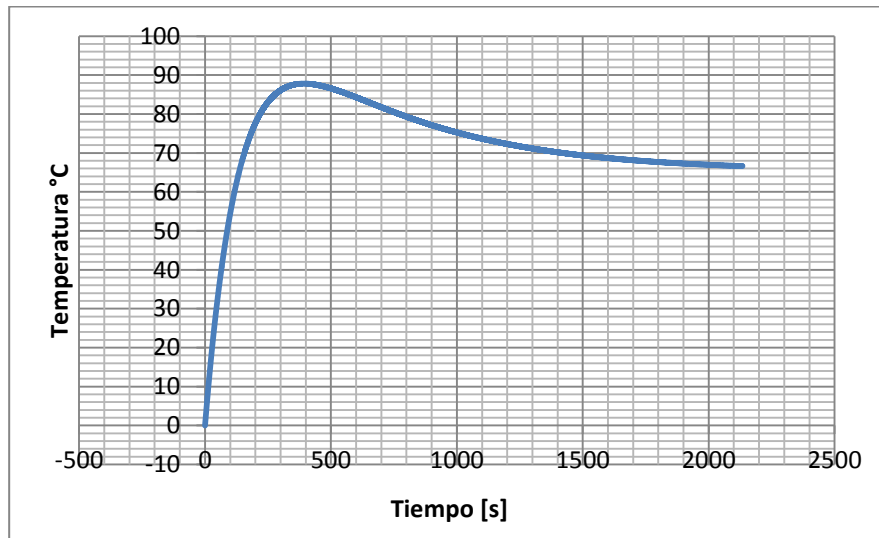
5.3.1. CONTROL CONTINUO EN EL HORNO CON PARAMETROS MEJORADOS

Figura 36. Control continuo de alimentación mejorado empleando el controlador S7-200 de Siemens con $K_p=4$ $T_i=335$ con Setpoint de $66,25\text{ }^{\circ}\text{C}$



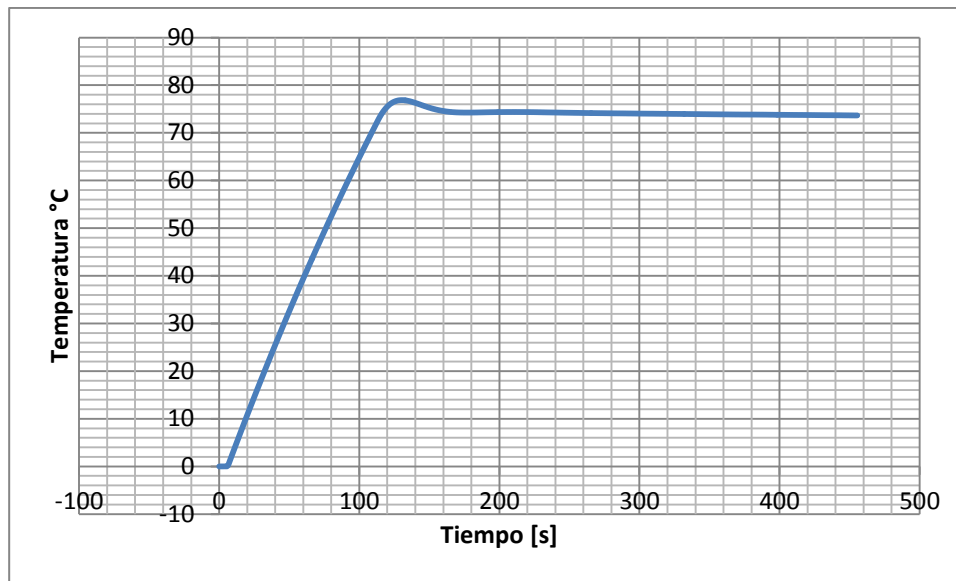
Fuente: Autores

Figura 37. Control continuo de alimentación mejorado empleando el controlador Twido de Schneider con $K_p=4$ $T_i=335$ con Setpoint de $66,25\text{ }^{\circ}\text{C}$



Fuente: Autores

Figura 38. Control continuo de alimentación mejorado empleando el controlador UDC1200 de Honeywell con $K_p=4$ $T_i=335$ con Setpoint de 66,25 °C



Fuente: Autores

Tabla 19. Comparación entre controladores para el control continuo de alimentación mejorado para el horno. Parámetros $K_p=4$ $T_i=335$ con Setpoint de 66,25 °C

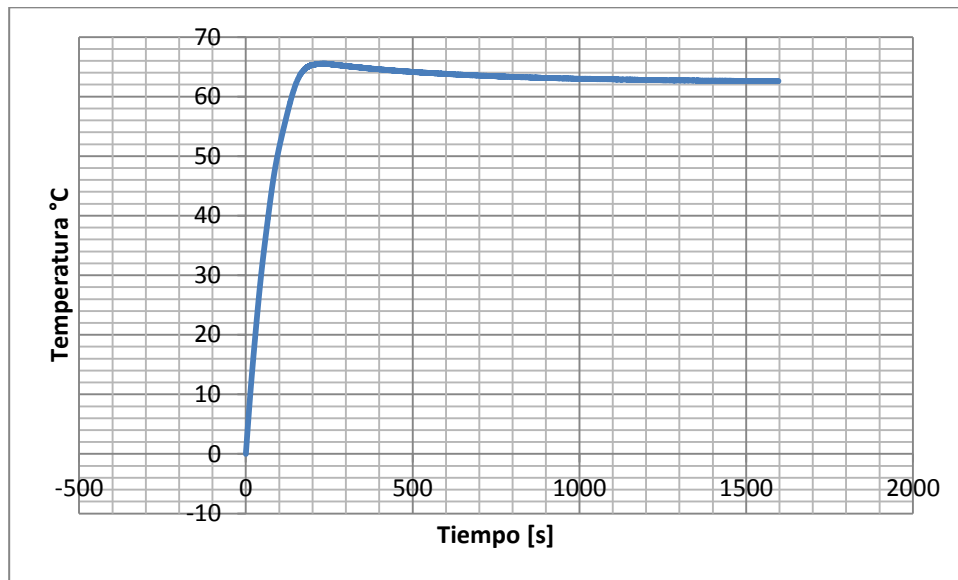
	Siemens	Twido	UDC 1200
Tiempo de Retardo [s]	60,9	50,9	50,8
Tiempo de levantamiento [s]	400	139,8	102,2
Tiempo pico [s]	400	391,1	130,4
Sobrepaso Máximo	1	1,325	1,16
Tiempo de asentamiento [s]	400	2134,1	200
Error de estado estable[%]	6,5	0,546	11,1

Fuente: Autores

A pesar de que la sintonización fina en simulink mostraba una mejoría en el control, uno de los controladores se vio afectado negativamente con estos nuevos parámetros tal es el caso del UDC1200 que tuvo un notable aumento en el error de estado estable y en el sobrepaso máximo más sin embargo se podría decir que el balance fue positivo especialmente para el Twido que a pesar de que en esta ocasión fue el más lento de los tres, arrojó un error en estado estable casi nulo.

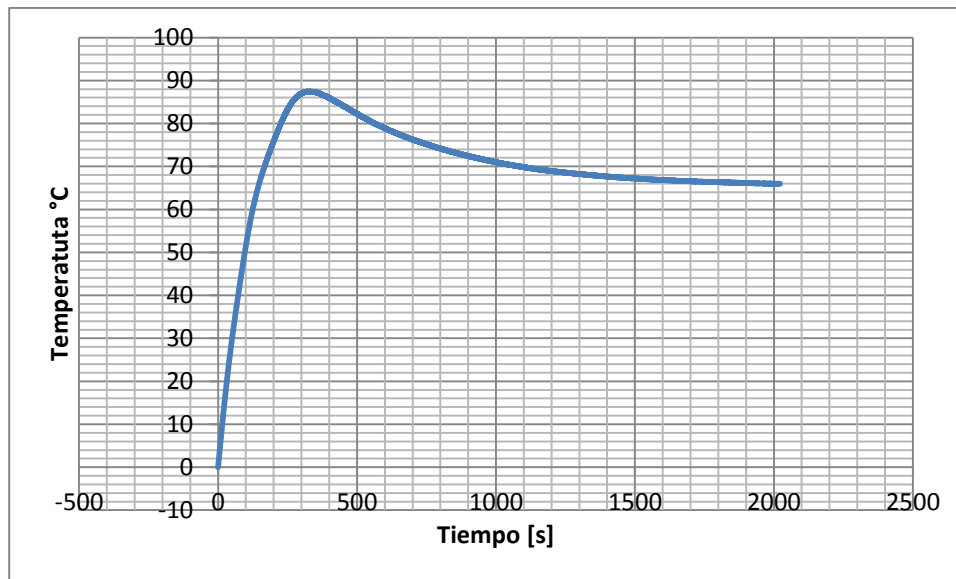
5.3.2. CONTROL CON TRIAC EN EL HORNO CON PARAMETROS MEJORADOS

Figura 39. Control mejorado de temperatura con Triac empleando el controlador S7-200 de Siemens con $K_p=4$ $T_i=335$ con Setpoint de $66,25^\circ\text{C}$



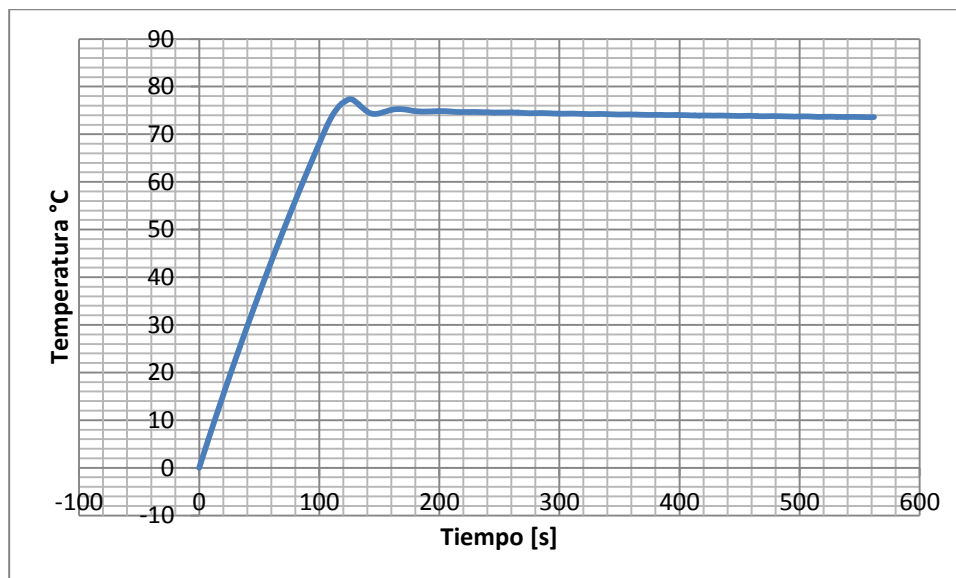
Fuente: Autores

Figura 40. Control mejorado de temperatura con Triac empleando el controlador Twido de Schneider con $K_p=4$ $T_i=335$ con Setpoint de $66,25\text{ }^{\circ}\text{C}$



Fuente: Autores

Figura 41. Control mejorado de temperatura con Triac empleando el controlador UDC1200 de Honeywell con $K_p=4$ $T_i=335$ con Setpoint de $66,25\text{ }^{\circ}\text{C}$



Fuente: Autores

Tabla 20. Comparación entre controladores para el control mejorado de temperatura con Triac. Parámetros $K_p=4$ $T_i=335$ con Setpoint de $66,25\text{ }^{\circ}\text{C}$

	Siemens	Twido	UDC 1200
Tiempo de Retardo [s]	52,2	57,1	45
Tiempo de levantamiento [s]	185,9	148,7	96,9
Tiempo pico [s]	228,6	325,5	125,8
Sobrepaso Máximo	1,1	1,32	1,168
Tiempo de asentamiento [s]	675	2021,9	225
Error de estado estable[%]	5,5	0,42	11,1

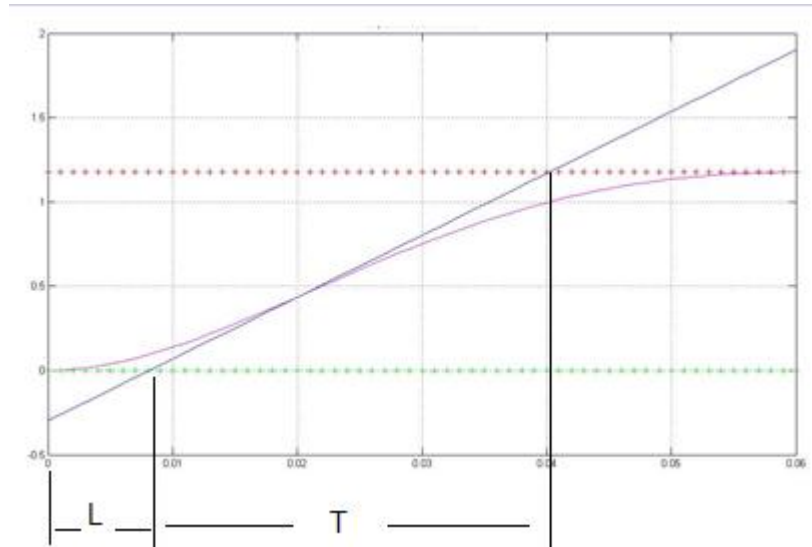
Fuente: Autores

Es una característica notable que el controlador UDC1200 es el que tiene menor tiempo de establecimiento en los procesos de temperatura. El Twido continuó con su mejora en el error en estado estable destacándose como el mejor en esta característica, como se había mencionado anteriormente los controladores reaccionan mejor cuando se utiliza el triac.

5.4. OBTENCIÓN DE LOS PARÁMETROS DE CONTROL PARA EL MOTOR

La obtención de los parámetros del controlador están basados en el primer método de Ziegler-Nichols, los resultados se presentan a continuación

Figura 42. Implementación del método Ziegler y Nichols para el control del motor DC excitación independiente en MATLAB - Respuesta al escalón unitario



Fuente: Autores

$$T = 0,032 \text{ s}$$

$$L = 0,008 \text{ s}$$

La línea azul es la pendiente en el punto de inflexión de la curva

Ver Sección 2.3.1. para consultar como se sacan los parámetro L y T.

Tabla 21. Determinación de constantes por Ziegler y Nichols

Tipo de controlador	K_p	T_i	T_d
PID	$1,2 * \frac{T}{L} = 4,8$	$2 * L = 0.016$	$0,5 * L=0.004$

Fuente: OGATA KATSUHIKO, Modern Control Engineering, Third edition, Prentice Hall, 1998.[1]

No se graficó la respuesta con estos parámetros debido a que la tarjeta de adquisición de datos arroja un error, por lo tanto se hace necesario hallar nuevos valores.

Una vez obtenidos estos valores se procede a realizar una sintonía fina por medio de la herramienta Simulink de Matlab, dando como resultado los siguientes valores.

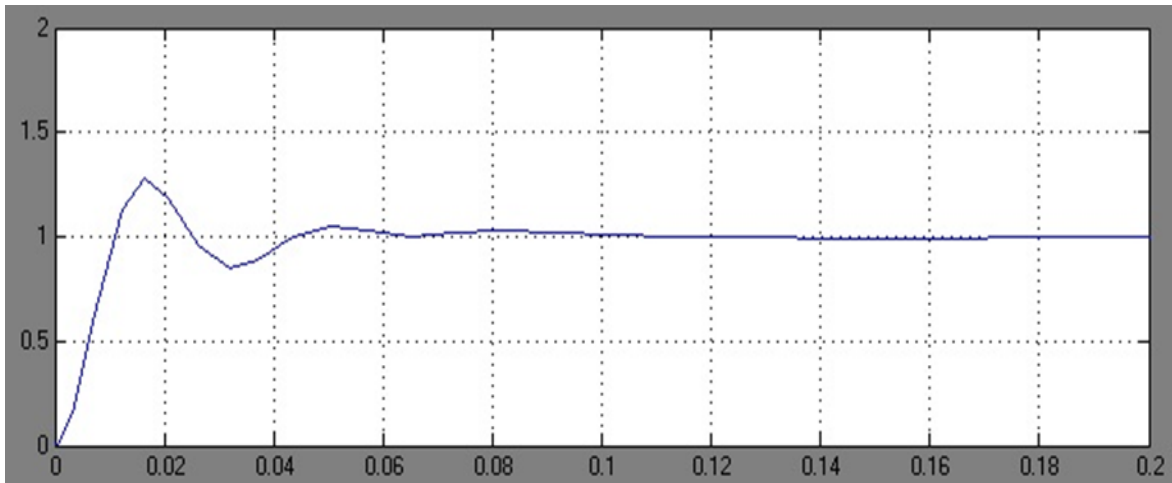
$$K_p = 1$$

$$T_i = 0.004$$

$$T_d = 0.1$$

Con estos valores se consigue la siguiente gráfica.

Figura 43. Sintonización fina por medio de Simulink con parámetros $K_p=1$ $T_i=0,004$ y $T_d=0,1$ con Setpoint de 107.5 rad/seg



Fuente: Autores

Después de haber hecho la sintonía fina con simulink se tomaron los resultados y fueron con los que finalmente se empezó a trabajar en los controladores.

5.5. PRUEBAS EMPLEANDO EL MODELO DEL MOTOR

Para las pruebas en el motor se tienen en cuenta dos situaciones una de ellas es que el motor este en vacío y la otra en la que tiene carga, con el fin de contrastar como varia el comportamiento de una situación a la otra. Cuando se va a realizar la prueba con carga lo que se hace es aumentar el momento de inercia el motor 5 veces en el modelo de LabVIEW, simulando de esta forma una carga de tipo rotativa, diferente a la que sería si fuera una carga de tracción o de elevación. Al igual que en el horno para el motor también se implementaron dos formas de control con la diferencia que en este caso no es un triac sino un transistor trabajando en corte y saturación

Nuevamente la herramienta utilizada para obtener los parámetros de control fue Simulink pero en este caso surgió un problema con los valores obtenidos ya que al introducirlos en los controladores se generaba un pico muy grande en la velocidad y como esta velocidad es transformada en voltaje para luego ser emitida desde la tarjeta hacia el controlador, este pico de velocidad causa que la tensión de salida excediera la tensión máxima permitida por la tarjeta que es de 5V. Por lo tanto se hizo una sintonización fina directamente con los equipos junto con la planta en Labview, obteniendo unos nuevos parámetros los cuales se muestran a continuación para cada uno de los controladores.

5.5.1. SINTONIZACIÓN FINA PARA EL MOTOR SIN CARGA

5.5.1.1. Motor con control continuo de alimentación

PLC Siemens S7-200

Como se mencionó anteriormente, se realizó una sintonización fina con el equipo para disminuir el pico generado, dando así unos nuevos parámetros para este equipo y estos fueron utilizados en los demás equipos y en Simulink con el fin de contrastarlos a todos bajo las mismas condiciones. Las constantes obtenidas fueron las siguientes

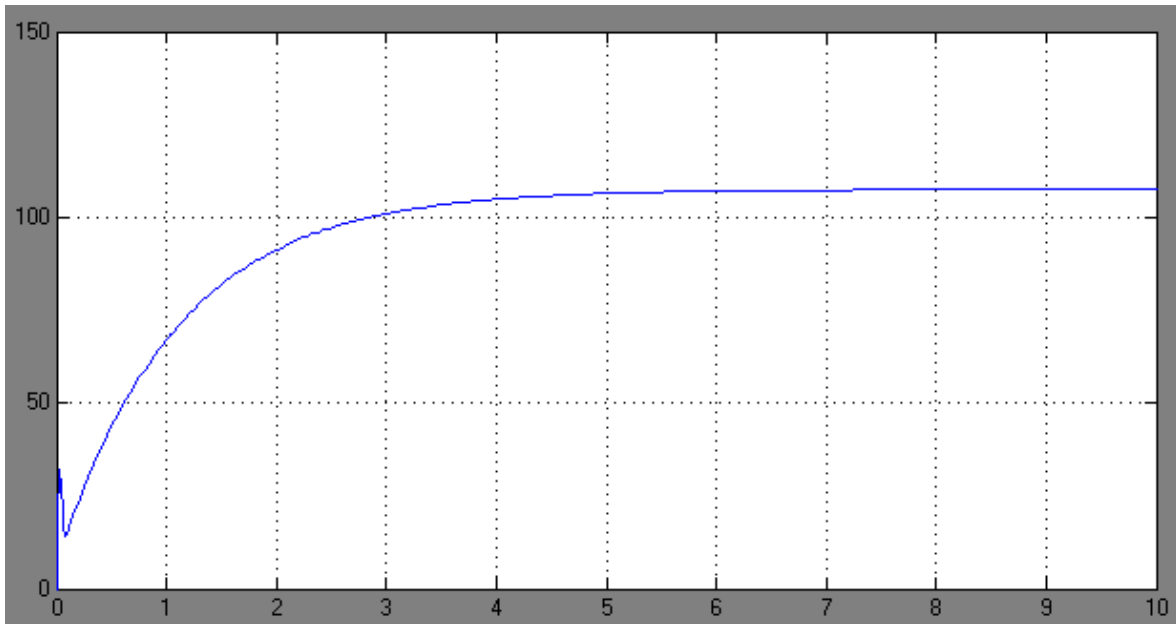
$$K_p = 0.1$$

$$T_i = 0,1 \text{ [s]}$$

$$T_d = 0,1 \text{ [s]}$$

Que simuladas en Simulink dieron la siguiente respuesta

Figura 44. Curva obtenida por Simulink para sintonización fina del control del motor por variación continua de alimentación

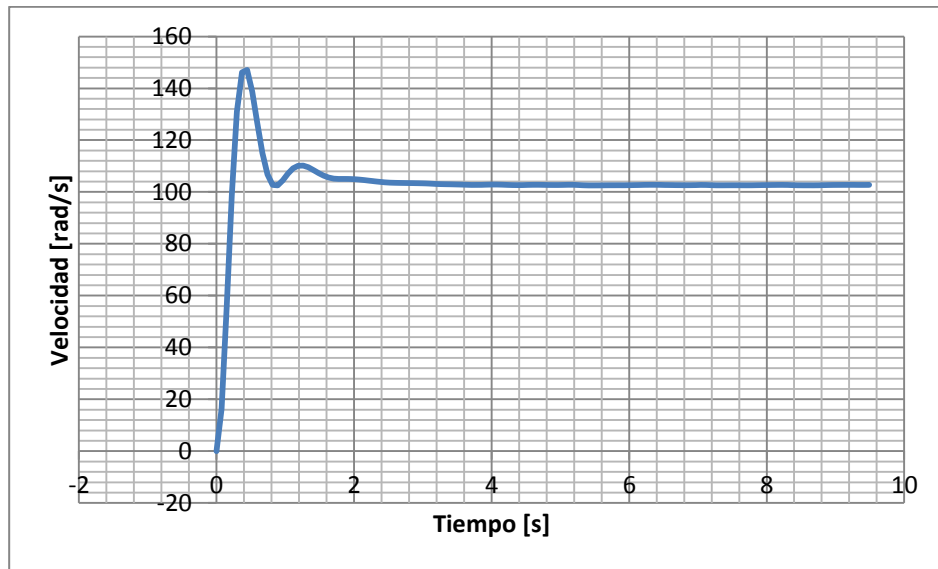


Fuente: Autores

Se aclara que la carga es rotativa y no de tracción/ elevación. Recordemos que, por ejemplo, para una carga de elevación, la fricción es mínima y se puede despreciar, en cambio una rotativa como una mezcladora el modelo es muy particular y el comportamiento diferente.

Y los resultados con el controlador fueron

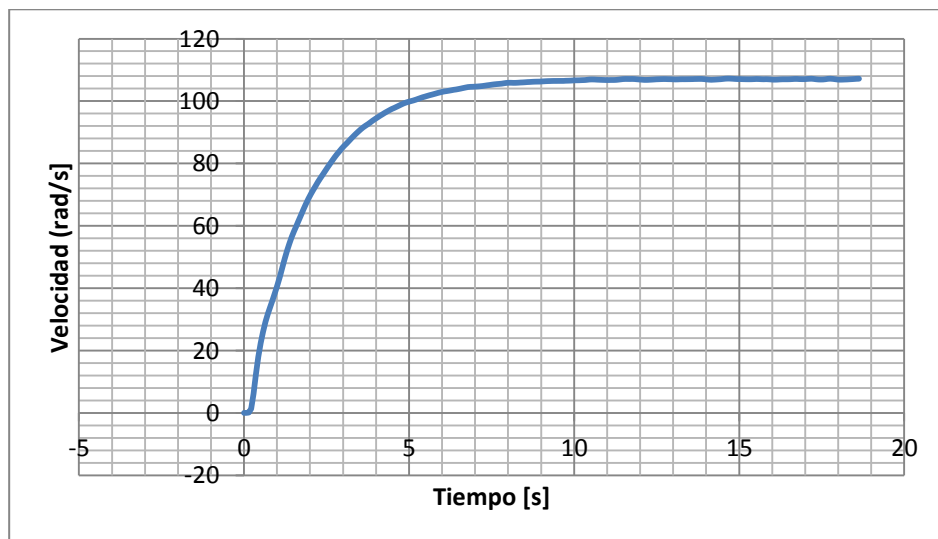
Figura 45. Control continuo de velocidad (sin Carga) empleando Controlador S7-200 de Siemens con $K_p=0,1$ $T_i=0,1$ y $T_d=0,1$ con Setpoint de 107.5 rad/seg



Fuente: Autores

Al configurar los parámetros hallados con la sintonización con el Siemens en el PLC Twido se obtuvo el siguiente resultado.

Figura 46. Control continuo de velocidad (sin carga) empleando Controlador Twido de Schneider con $K_p=0,1$ $T_i=0,1$ y $T_d=0,1$ con Setpoint de 107.5 rad/seg



Fuente: Autores

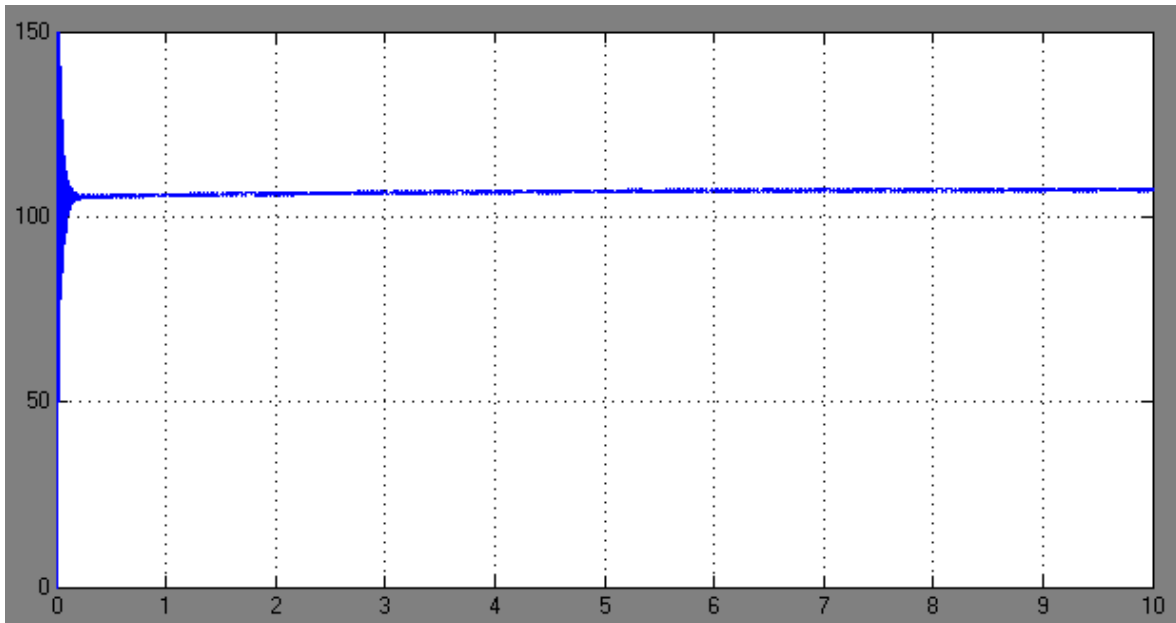
Al introducir los parámetros en el UDC1200 no se logró controlar el motor con la función PID, debido a que cualquier valor introducido en el tiempo derivativo ocasionaba una oscilación brusca en la respuesta, por lo que se optó por hacer un control PI y una sintonización fina obteniendo los siguientes parámetros. Los resultados se muestran en la sección 5.6. Debido a que la sintonización por Ziegler y Nichols presentaba valores muy grandes (ver tabla 21) y estos no se pueden introducir en el controlador UDC1200 por lo tanto no se hizo dicha sintonización

$$K_p = 50$$

$$T_i = 4 [s]$$

Tomando estos nuevos parámetros y simulando en Simulink un control PI se obtuvo la siguiente respuesta.

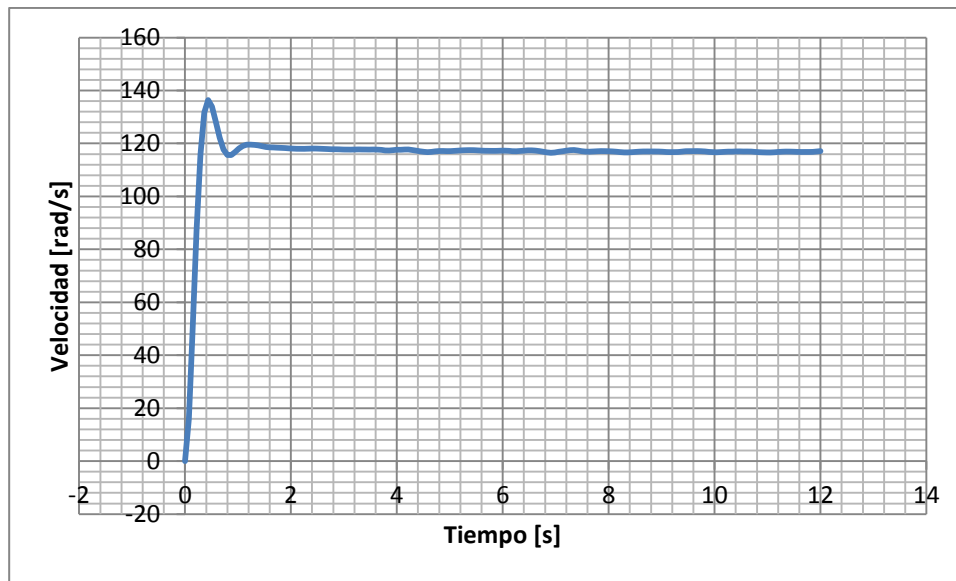
Figura 47. Sintonización fina para el UDC1200 con Setpoint de 107.5 rad/seg



Fuente: Autores

Y en el controlador se obtuvo la respuesta mostrada a continuación

Figura 48. Control continuo de velocidad (sin Carga) empleando UDC 1200 de Honeywell con $K_p=50$ y $T_i=4$ con Setpoint de 107.5 rad/seg



Fuente: Autores

Tabla 22. Comparación entre controladores para el control continuo de velocidad para el motor. Parámetros $K_p=0,1$ $T_i=0,1$ y $T_d=0,1$ para los PLC Twido y Siemens y $K_p=50$ $T_i=4$ para el UDC 1200 con Setpoint de 107.5 rad/seg

	Siemens	Twido	UDC 1200
Tiempo de Retardo [s]	0,148	1,371	0,145
Tiempo de levantamiento [s]	0,222	11,481	0,290
Tiempo pico [s]	0,444	11,481	0,436
Sobrepaso Máximo	1,368	1	1,269
Tiempo de asentamiento [s]	4,226	11,481	4,14
Error de estado estable[%]	4,43	0,3	8,93

Fuente: Autores

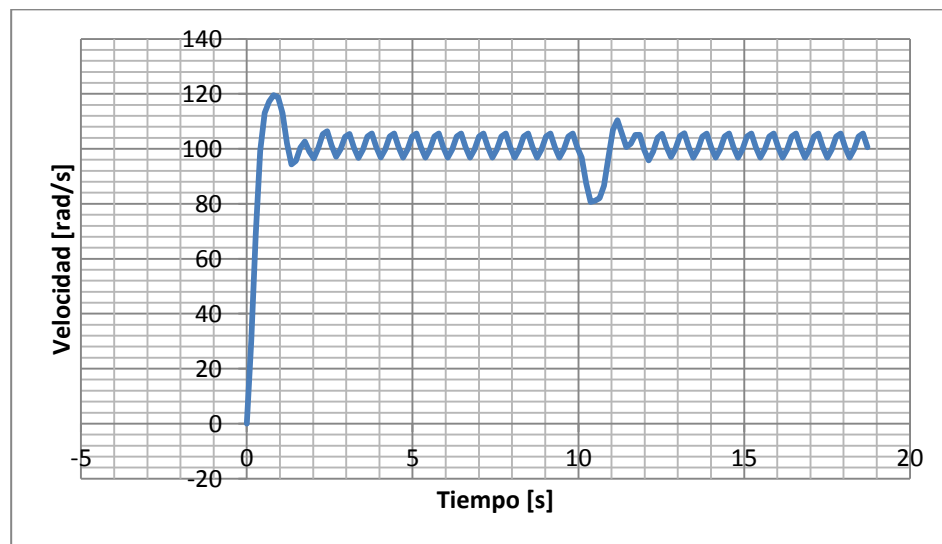
Teniendo en cuenta que el control implementado en el UDC es un PI y lo implementado en los otros dispositivos fue un PID, es fácil notar en la tabla que la mejor respuesta fué la del Twido con el menor sobrepaso y el menor error en estado estable, y además de eso su respuesta es muy semejante a la mostrada por Simulink.

5.5.1.2. Control del Motor utilizando Transistor como interruptor de potencia

Como parámetros iniciales se intentó utilizar las constantes anteriormente utilizadas en el control continuo de alimentación pero surgió la necesidad de encontrar nuevas constantes para la implementación del control por transistor debido a que las anteriores no sirvieron (a excepción del UDC1200 el cual se comportó adecuadamente) arrojando *error* en la simulación. Las nuevas constantes son:

$$K_p = 0.01 \quad T_i = 1 [s] \quad T_d = 0,1 [s]$$

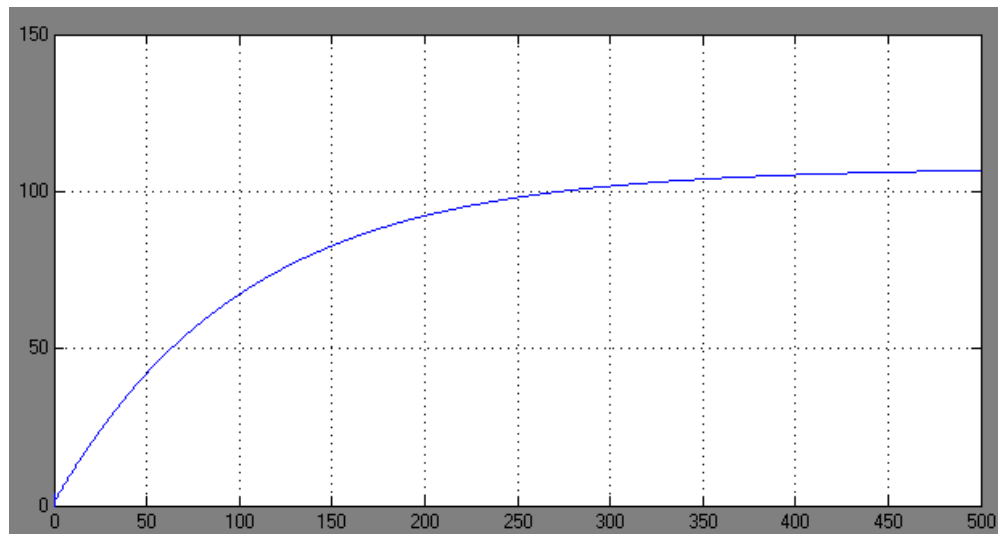
Figura 49. Control con transistor (sin Carga) empleando Controlador S7-200 de Siemens con $K_p=0.01$ $T_i=1$ y $T_d=0,1$ con Setpoint de 107.5 rad/seg



Fuente: Autores

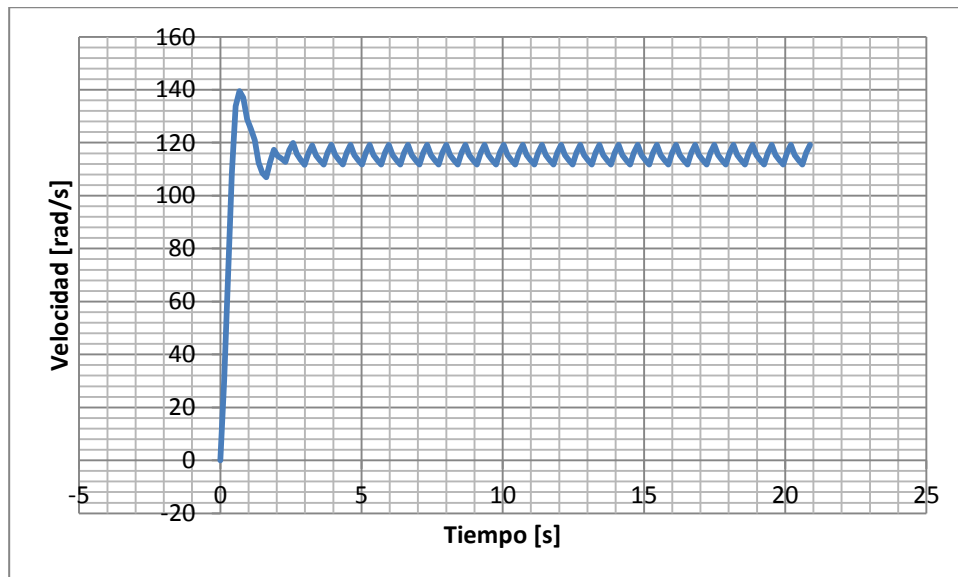
Después de probadas estas constantes en PLC Siemens se implementó en Simulink con estas nuevas constantes obteniendo la siguiente curva.

Figura 50. Respuesta en Simulink para control de motor (sin carga) con transistor con nuevas constantes



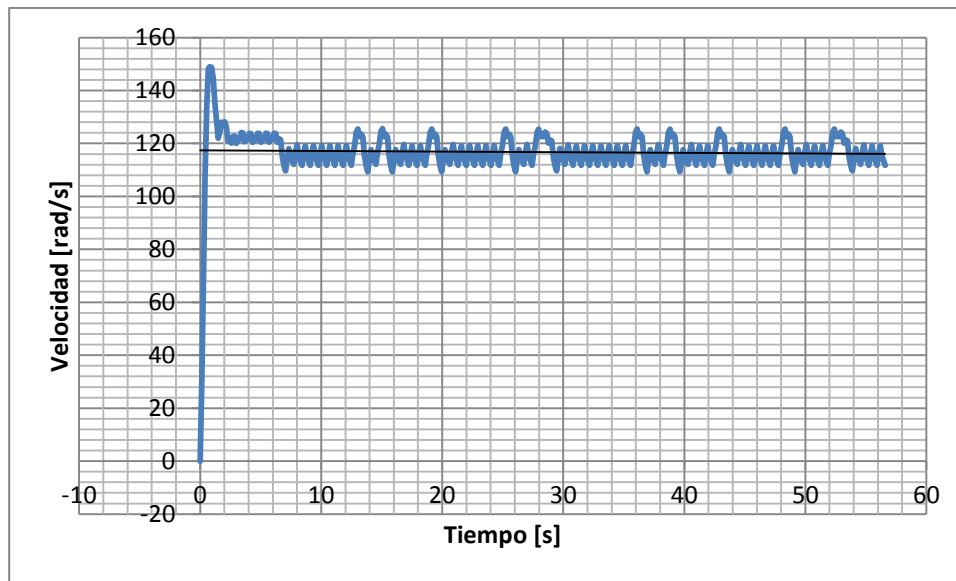
Fuente: Autores

Figura 51. Control con transistor (sin Carga) empleando Controlador Twido de Schneider con $K_p=0.01$ $T_i=1$ y $T_d=0.1$ con Setpoint de 107.5 rad/seg



Fuente: Autores

Figura 52. Control con transistor (sin Carga) empleando Controlador UDC1200 de Honeywell con $K_p=50$ y $T_i=4$ con Setpoint de 107.5 rad/seg



Fuente: Autores

Tabla 23. Comparación entre controladores para el control con transistor para el motor. Parámetros $K_p=0.01$ $T_i=1$ y $T_d=0.1$ para los PLC Siemens y Twido y $K_p=50$ y $T_i=4$ para UDC 1200 con Setpoint de 107.5 rad/seg

	Siemens		Twido		UDC 1200	
Tiempo de Retardo [s]	0,2		0,24		0,18	
Tiempo de levantamiento [s]	0,538		0,406		0,407	
Tiempo pico [s]	0,808		0,677		0,814	
Sobrepaso Máximo	1,112		1,297		1,368	
Tiempo de asentamiento [s]	2,289		2,44		7,329	
Error de estado estable máximo y mínimo[%]	7,2	1,786	10,862	3,948	10,782	3,93

Fuente: Autores

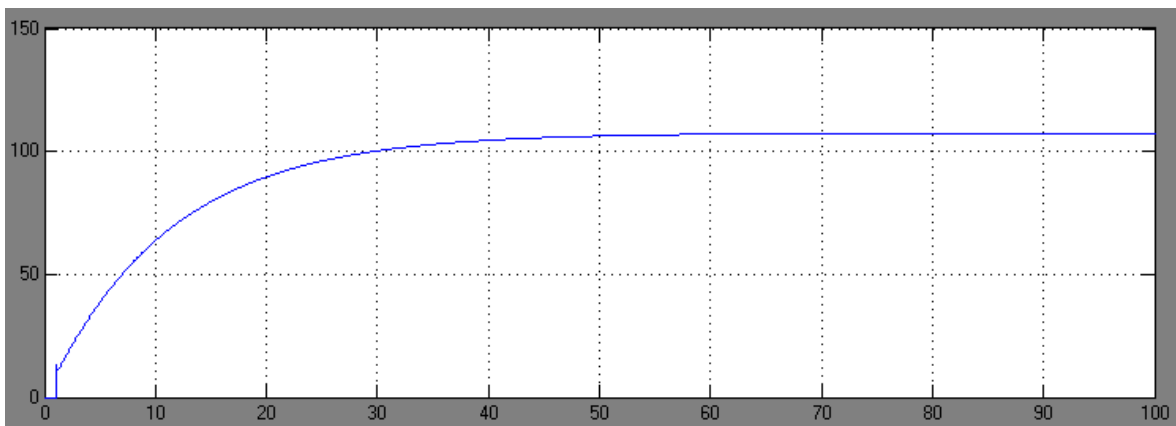
Para esta prueba el que mejor comportamiento lo tuvo el PLC Siemens. En comparación con el control continuo de alimentación se mejoraron algunos parámetros como el tiempo de asentamiento pero otros empeoraron.

5.5.2. MOTOR CON CARGA

5.5.2.1. Motor con control continuo de alimentación

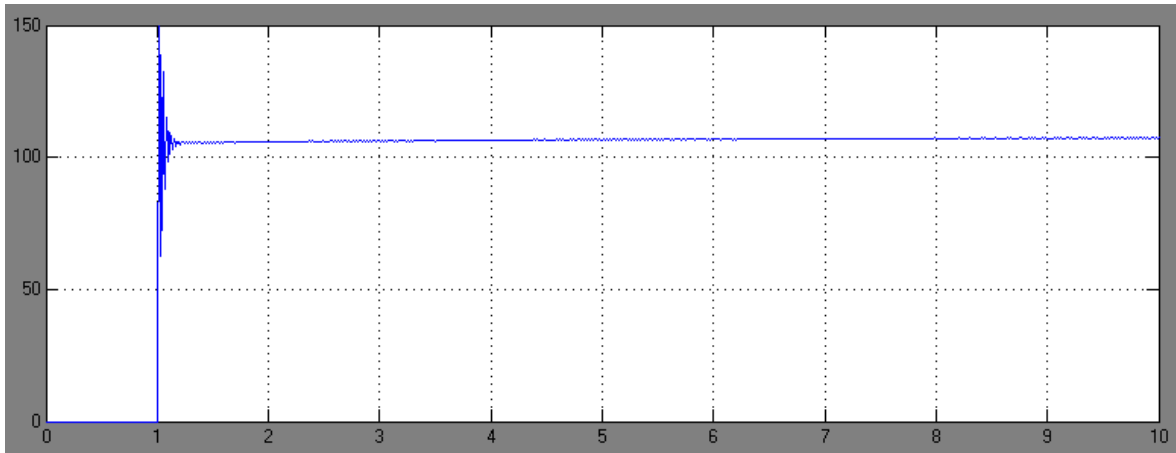
Para esta prueba se mantuvieron las mismas constantes de control utilizadas anteriormente ($K_p=0.1$ $T_i=0,1$ y $T_d=0,1$) y el objetivo principal era observar cómo se comportaba el sistema cuando se lea adiciona una carga rotacional (volante de inercia). A continuación se muestran las gráficas obtenidas en Simulink bajo estas condiciones. Con las constantes del Siemens y del Twido para el control continuo de alimentación

Figura 53. Respuesta en Simulink para el control continuo del motor con carga para el PLC Siemens y Twido $K_p=0,1$ $T_i=0,1$ y $T_d=0,1$ con Setpoint de 107.5 rad/seg



Fuente: Autores

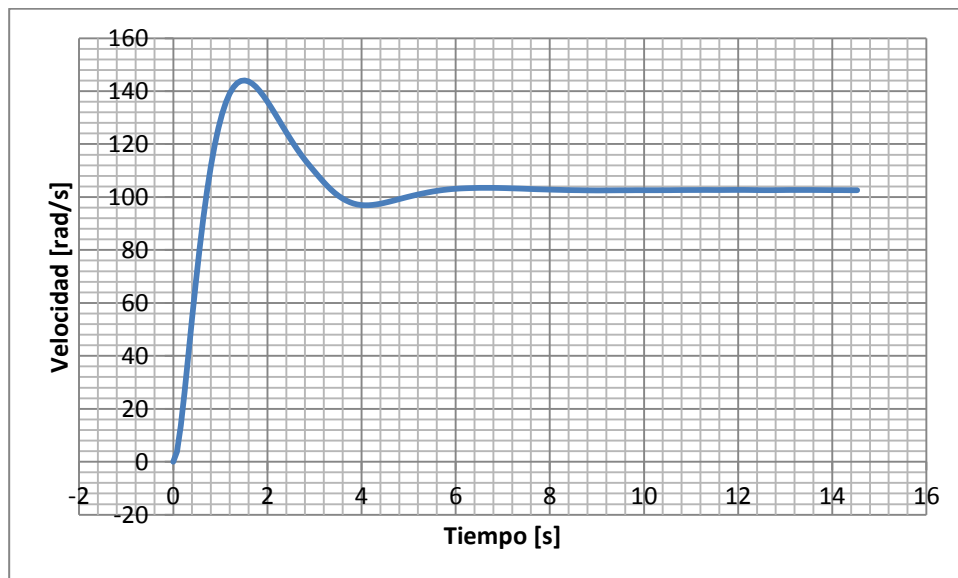
Figura 54. Respuesta en Simulink para el control continuo del motor con carga para el UDC1200 $K_p=50$ $T_i=4$ con Setpoint de 107.5 rad/seg



Fuente: Autores

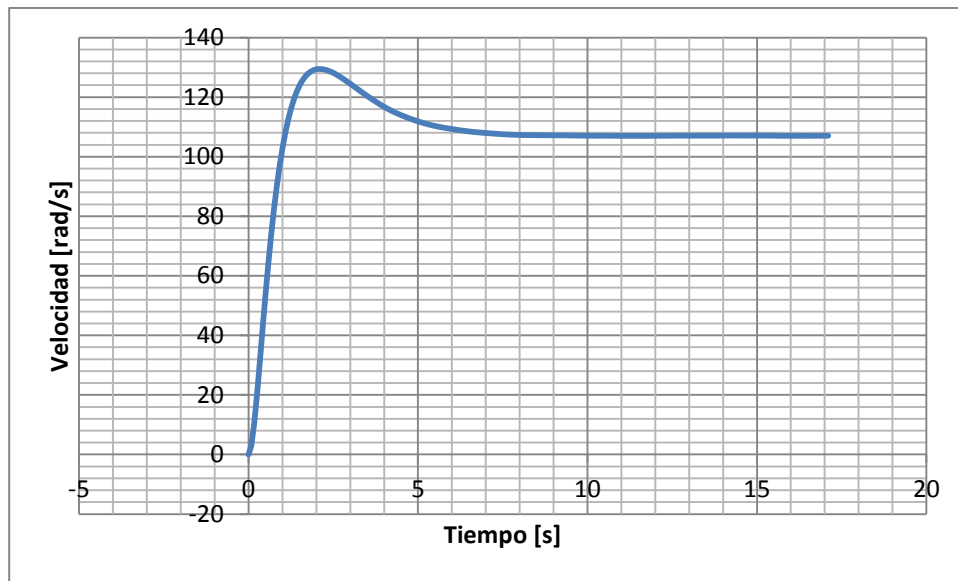
A continuación se presentan las gráficas obtenidas con los equipos

Figura 55. Control continuo de velocidad (con Carga) empleando Controlador S7-200 de Siemens con $K_p=0,1$ $T_i=0,1$ y $T_d=0,1$ con Setpoint de 107.5 rad/seg



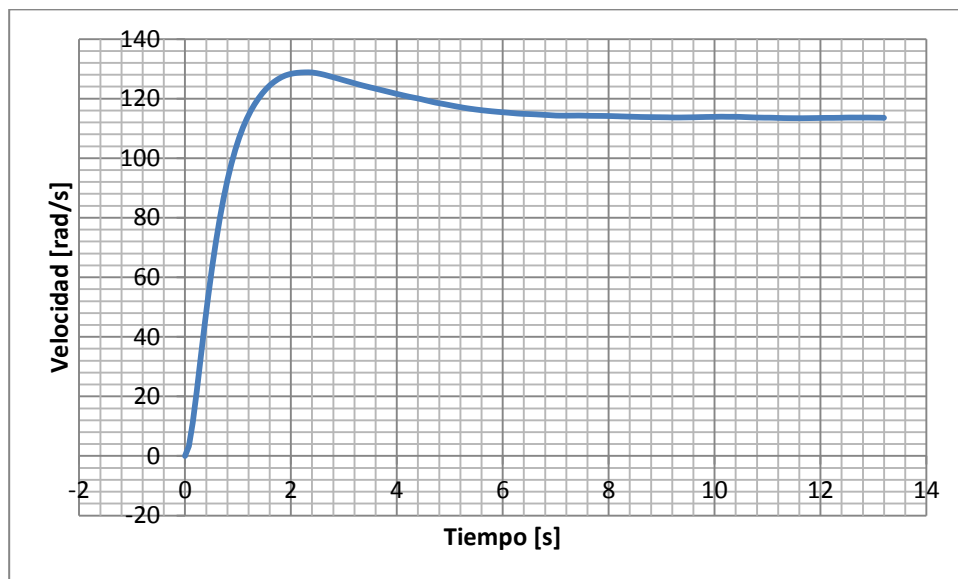
Fuente: Autores

Figura 56. Control continuo de velocidad (con Carga) empleando Controlador Twido de Schneider con $K_p=0,1$ $T_i=0,1$ y $T_d=0,1$ con Setpoint de 107.5 rad/seg



Fuente: Autores

Figura 57. Control continuo de velocidad (con Carga) empleando Controlador UDC1200 de Honeywell con $K_p=50$ y $K_i=4$ con Setpoint de 107.5 rad/seg



Fuente: Autores

Tabla 24. Comparación entre controladores para el control continuo de la alimentación para el motor (con carga). Parámetros $K_p=0,1$ $T_i=0,1$ y $T_d=0,1$ para los PLC Twido y Siemens y $K_p=50$ $T_i=4$ para el UDC 1200 con Setpoint de 107.5 rad/seg

	Siemens	Twido	UDC 1200
Tiempo de Retardo [s]	0,3991	0,5	0,4375
Tiempo de levantamiento [s]	0,798	1,084	1,02
Tiempo pico [s]	1,516	2,086	2,26
Sobrepaso Máximo	1,34	1,204	1,198
Tiempo de asentamiento [s]	8,7	10,263	8,824
Error de estado estable[%]	4,57	0,43	5,63

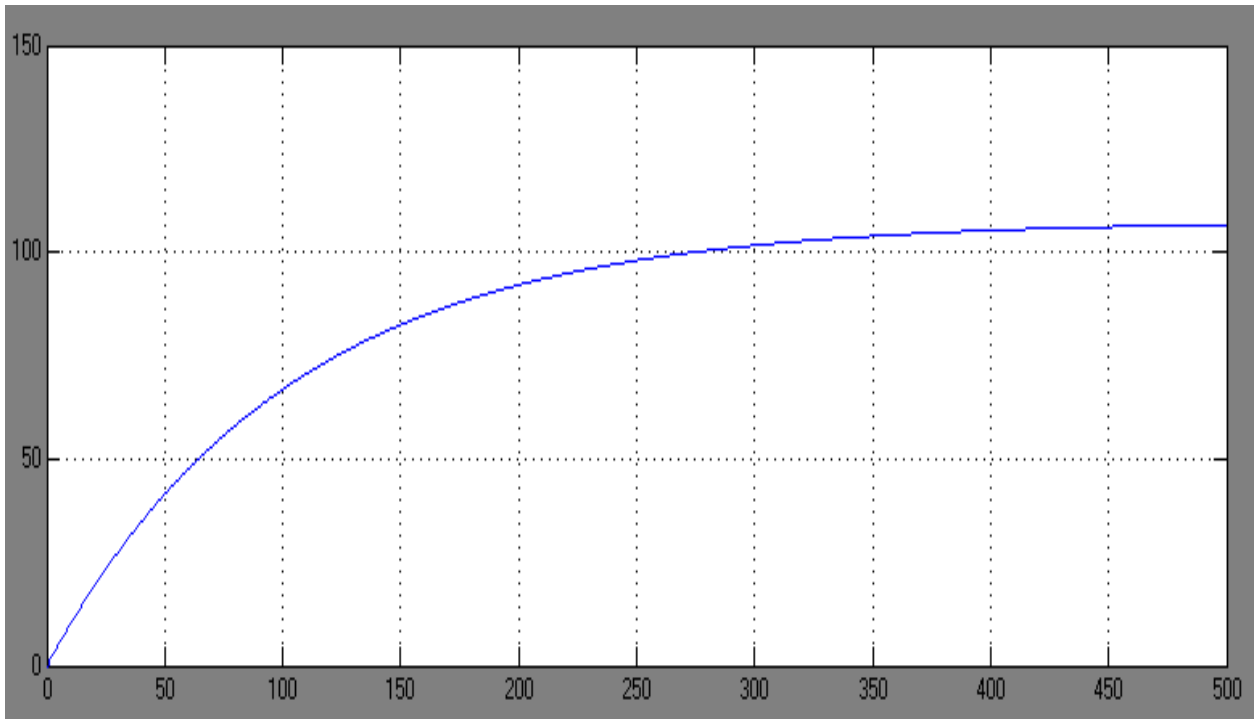
Fuente: Autores

De nuevo el equipo que mejor se comportó fue el Twido sobresaliendo en los parámetros de sobrepaso máximo y error en estado estable, además el comportamiento del UDC y del Siemens tuvo cierta similitud en el tiempo de establecimiento y error en estado estable, mas sin embargo no existió una mejoría muy notable en ellos.

5.5.2.2. Control del Motor utilizando transistor

Para esta prueba se mantuvo las mismas constantes del proceso de control del motor sin carga con transistor revisado en la sección 5.5.1.2.

Figura 58. Simulación en MATLAB control del motor (con carga) con transistor

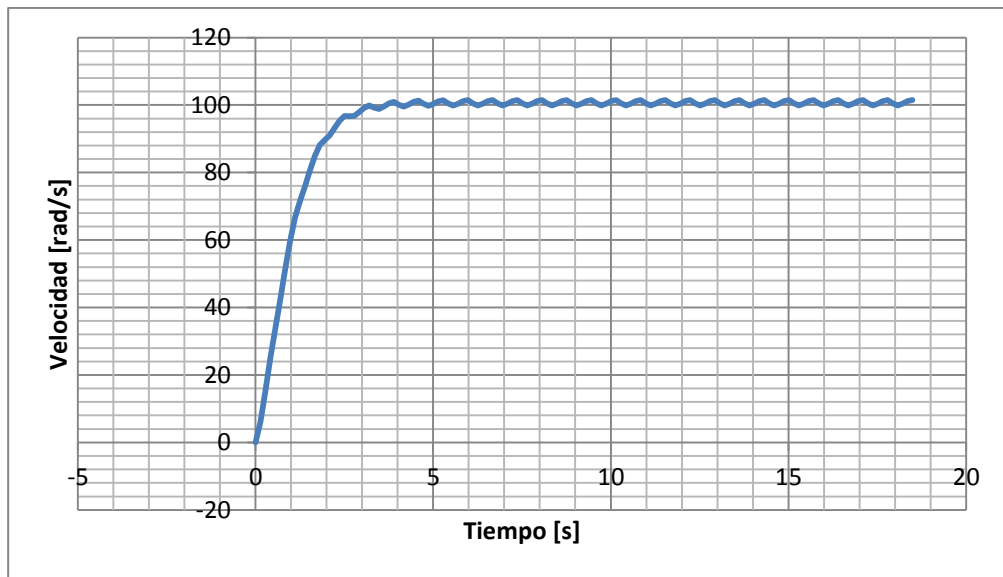


Fuente: Autores

La gráfica implementado las constantes del UDC ($K_p=50$ y $T_i=4$) es similar a la gráfica obtenida para el control continuo debido a que estas constantes no cambiaron.

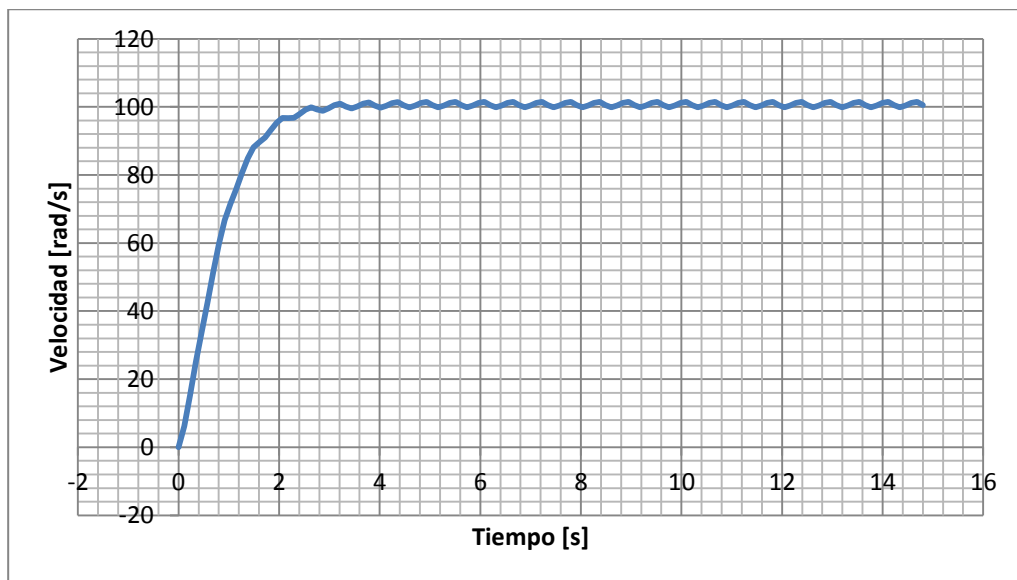
A continuación se muestran las gráficas de los resultados de cada controlador para una frecuencia de 1500 Hz ya que fue la frecuencia por prueba y error con la que mejor se comportó el sistema en la Simulación de la planta en Labview.

Figura 59. Control con transistor (con Carga) empleando Controlador S7-200 de Siemens con $K_p=0,01$ $T_i=1$ y $T_d=0,1$ con Setpoint de 107.5 rad/seg



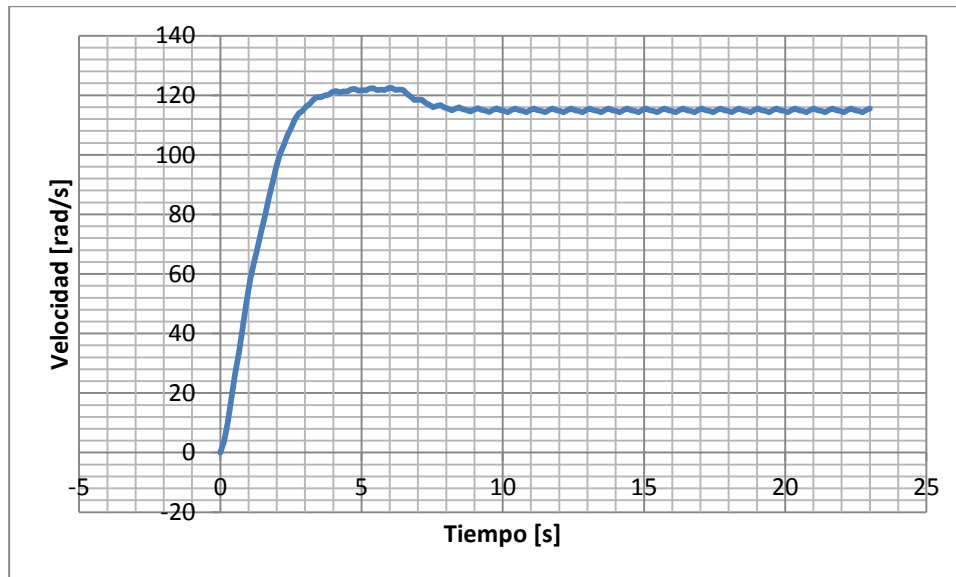
Fuente: Autores

Figura 60. Control con transistor (con Carga) empleando Controlador Twido de Schneider con $K_p=0,01$ $T_i=1$ y $T_d=0,1$ con Setpoint de 107.5 rad/seg



Fuente: Autores

Figura 61. Control con transistor (con Carga) empleando Controlador UDC1200 de Honeywell con $K_p=50$ y $T_i=4$ con Setpoint de 107.5 rad/seg



Fuente: Autores

Tabla 25. Comparación entre controladores para el control con transistor de la alimentación para el motor(con carga). Parámetros $K_p=0,01$ $T_i=1$ y $T_d=0,1$ para los PLC Twido y Siemens y $K_p=50$ y $T_i=4$ con Setpoint de 107.5 rad/seg

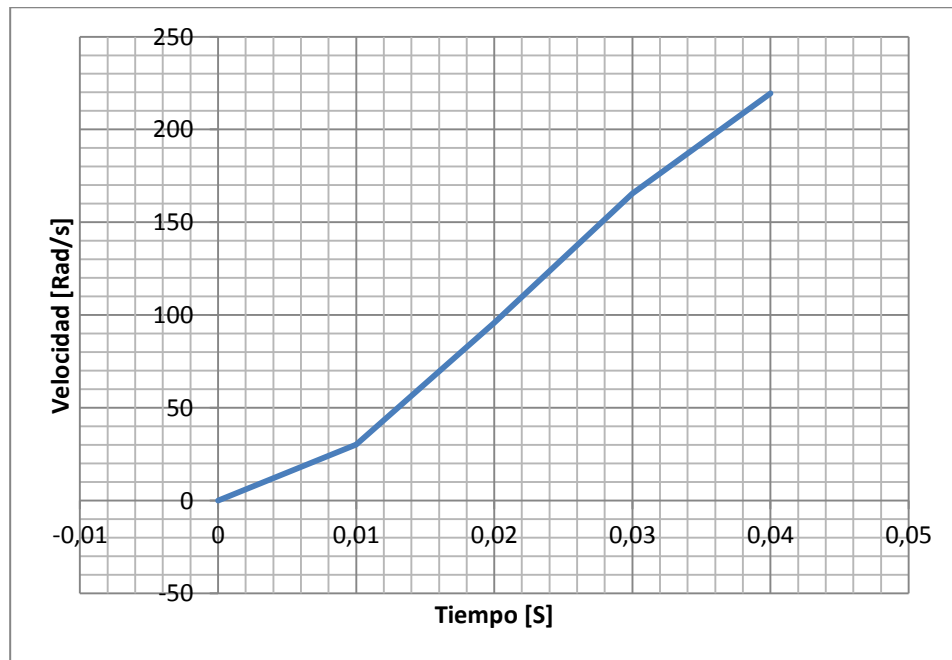
	Siemens	Twido	UDC 1200
Tiempo de Retardo [s]	0,834	0,688	0,925
Tiempo de levantamiento [s]	4,587	3,786	2,379
Tiempo pico [s]	4,587	3,786	4,09
Sobrepaso Máximo	1	1	1,13
Tiempo de asentamiento [s]	4,587	3,786	9,517
Error de estado estable:[%]	5,76	5,6	7,48

Fuente: Autores

Para esta última prueba fué mejor el controlador Twido aunque se destaca el comportamiento del Siemens que fué muy similar al del Twido. En comparación entre la situación de carga y sin carga se destaca la disminución del rizado presentado por el motor.

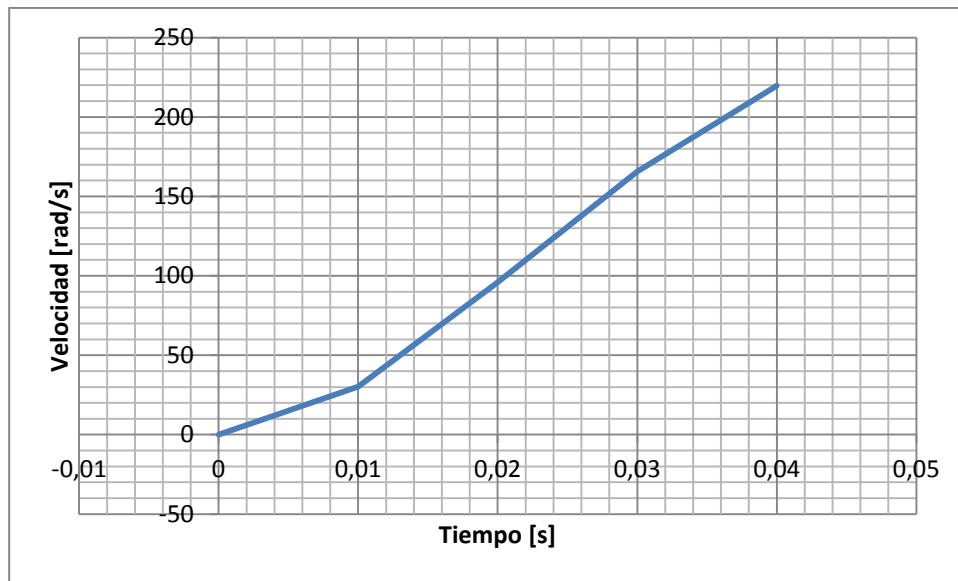
5.6. Comportamiento del UDC con los parámetros del Siemens y comportamiento del Twido y del Siemens con los parámetros del UDC

Figura 62. Respuesta de UDC1200 control continuo del motor. Parámetros $K_p=0,1$ $T_i=0,1$ $T_d=0,1$



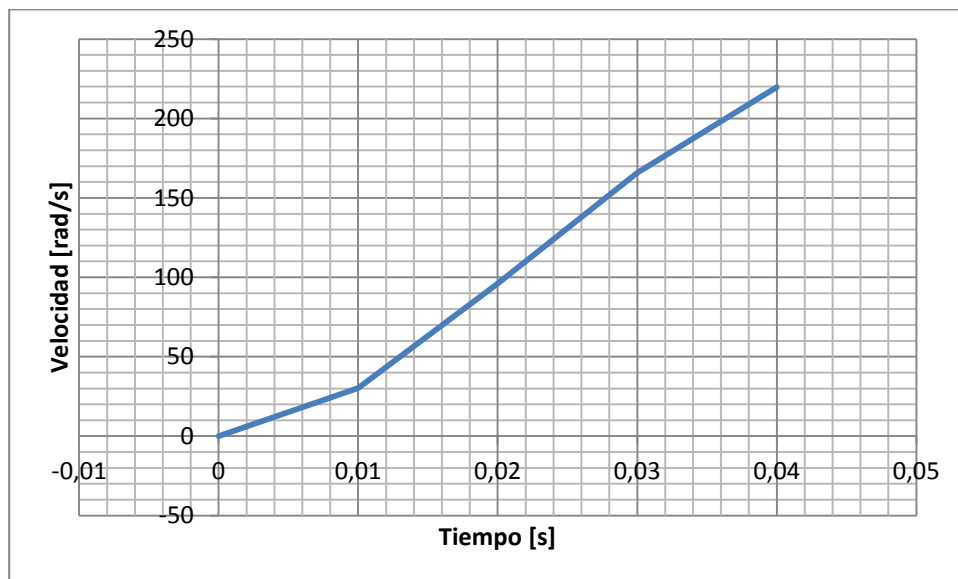
Fuente: Autores

**Figura 63. Respuesta del PLC Siemens control continuo del motor. Parámetros $K_p=50$
 $T_i=4$**



Fuente: Autores

**Figura 64. Respuesta del PLC Twido por control continuo del motor. Parámetros $K_p=50$
y $T_i=4$**



Fuente: Autores

Como se puede observar los PLC no reaccionaron de la misma manera a las constantes dadas por el controlador UDC , y este no respondió en forma similar a las constantes de los PLCs respondiendo con un sobreimpulso excesivo que generaba en la tarjeta un error inmediatamente se daba la orden de correr. Se colocó en cada prueba el setpoint en 0.5 (valor nominal de la planta) pero como se observa en las gráficas se generó un sobre impulso (cualquier valor por encima de 215 es visto como un sobreimpulso y fuerza el error) el cual superaba en más de dos veces el valor de estado estable lo que provoca dicho error en la tarjeta de adquisición de datos de National Instrument.

6. CONCLUSIONES Y OBSERVACIONES.

En el proceso de sintonización del UDC para controlar el motor se notó que para la función PI la constante de tiempo integral se limitaba a un rango que estaba en el intervalo de los 2 segundos hasta 4 segundos, saliendo de este rango el sistema se salía de control y hacia inestable la planta; además tiene una limitante en el momento de controlar con respecto a los otros controladores, debido a que el mínimo valor que podemos ingresar para la constante proporcional es de 0.5 y la de tiempo integral y de derivativo es de 1s; por lo que se puede decir que este controlador tiene limitaciones de configuración lo cual dificulta su implementación en procesos rápido como lo es el control de velocidad de un motor DC. Por esto surge la necesidad de implementar un control PI con el cual se obtuvo un mejor comportamiento. Por otro lado si la necesidad es de controlar temperatura (proceso lento) el comportamiento de este controlador es satisfactorio presentado pequeños valores de error y tiempo de asentamiento

Analizando las características del controlador Twido de Telemecanique se destaca el buen comportamiento que presentó con un bajo error de estado estable, un comportamiento intermedio en el valor del sobrepaso y un tiempo de asentamiento regular. En general, mostró la mejor respuesta de control en el proceso de velocidad del motor DC en comparación con los demás controladores y un asentamiento lento en el proceso de control de temperatura, por lo que decimos que tiene un buen comportamiento para procesos rápidos, no el mejor, y presenta deficiencias en procesos lentos.

El controlador Simatic de Siemens presentó una muy buena respuesta con un bajo error de estado estable en la mayoría de los procesos. Tuvo un comportamiento aceptable en el sobrepaso y en el tiempo de asentamiento estando siempre en medio de los demás controladores. Fue el controlador que en general considerando todos los parámetros, se comportó mejor en todos los procesos.

Para el control del motor, la respuesta de los controladores fue más adecuada cuando se colocó carga a éste, debido a que el rizado disminuyó notablemente por el incremento en el momento de inercia.

Para el control continuo de alimentación en general se observó un mayor tiempo de asentamiento para el caso en el que el momento de inercia es mayor. Esto es debido a que al incrementar el momento se incrementa también la oposición al cambio de velocidad.

En el proceso de control de temperatura del horno en general se obtuvo un mejor comportamiento en la disminución del error en estado estable cuando se implementó el control por Triac. Una posible causa puede ser que la respuesta se logra estabilizar en un tiempo menor porque en el control con Triac la planta se desenergiza totalmente en cambio el control continuo de alimentación se reducía al menor valor posible (diferente de 0).al momento de sobrepasar el setpoint lo cual producía que el tiempo de asentamiento fuera mayor.

Después de hallar unos parámetros iniciales para el control de temperatura fue necesario hacer una sintonización fina en Simulink para luego implementarla en los equipos y se observó una mejora, obteniendo un menor tiempo de asentamiento. Cabe resaltar que la respuesta del Simatic de Siemens mejoró notablemente en comparación con los demás.

El proceso de autosintonización no se pudo hacer debido a que los controladores enviaban impulsos (que sobrepasan la capacidad de la tarjeta) para saber cómo se comporta la planta pero esto hace que la tarjeta arroje un error. Para poder lograr la autosintonización es necesario trabajar con una tarjeta de adquisición de datos con mejores características o con la planta física.

El método de sintonización de Ziegler y Nichols no fue una herramienta útil al momento de hallar los parámetros para el control porque al ser solo una aproximación se hizo

necesario por medio de prueba y error ajustarlos, para hallar los que realmente servirían para el proceso.

Los parámetros (K_p , T_i , T_d) de un controlador que permiten un adecuado control no necesariamente sirven para los otros controladores, esto quedó evidenciado cuando se le introdujeron los valores de un controlador en los otros equipos. Esto se debe a que cada controlador tiene una forma diferente de implementación de la función PID razón por la cual existen controladores dedicados a procesos específicos los cuales ajustan su algoritmo de programación PID según sea la necesidad.

Los parámetros obtenidos en una sintonización fina en Simulink no generalmente son los adecuados para la planta, ya que depende mucho del controlador que se esté utilizando, debido a que este tiene en cuenta otros aspectos en su forma de realizar el control, diferentes a los que tiene en cuenta Simulink.

Al medir el momento de inercia, los resultados de la implementación por medio los foto detectores fueron descartados debido a que presentaba resultados inconsistentes al analizarlos, por ejemplo, para la masa de 1.5 kg mostraba la misma aceleración que la masa de 2 y 2.5 kg lo cual no es lógico. Es posible atribuir este error a la precisión en la medida de los instrumentos utilizados o retardos de tiempos generados por los fotodetectores.

Se encontró un error en el método medición del momento de inercia el del artículo de la IEEE (PAUL I-HAI LIN AND EDWARD E. MESSAL. Design of Real -Time Rotor inertia estimation System for DC Motors with a Personal Computer 1991.) [3], el cual consistió en un mal despeje en la fórmula final que expresaba el momento de inercia de un motor DC.

Para medir el momento de inercia de un motor existen varios métodos por lo tanto se debe escoger el más adecuado según las dimensiones de la máquina, por ejemplo si se tiene un motor de gran tamaño la forma más apropiada sería mediante el método

de desenergización debido que llevar el motor a una determinada altura no sería lo adecuado.

Cuando se mide el momento de inercia indirectamente siempre se presenta algún pequeño error en los resultados, esto es debido a que la medición será afectada por diferentes parámetros por ejemplo, en la medición del momento de inercia con la caída de masas se presentarían errores debido a la elongación de la cuerda y a la fuerza de fricción que presenta la máquina.

Para finalizar se quiso hacer una prueba adicional con el controlador Simatic de Siemens para verificar como era el comportamiento con un momento resistente constante (una carga de tipo elevación), haciendo dos pruebas, una donde el momento de inercia es aumentado 5 veces y en la otra permanece invariante. Para la prueba de carga de elevación fue necesario modificar las constantes de control para evitar que la carga hiciera girar en sentido contrario el motor por lo tanto se disminuyó el tiempo integral (disminuyendo el tiempo de asentamiento pero aumentando el sobrepaso), Los resultados fueron que se estabilizó primero el motor con el momento de inercia en vacío debido a que este es el parámetro que más influye en el tiempo de asentamiento. Se resalta la facilidad de la modificación del programa de simulación de Labview para agregar el efecto de un par resistente.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] OGATA KATSUHIKO, Modern Control Engineering, Third edition, Prentice Hall, 1998.
- [2] AMAYA REYES RAFAEL MAURICIO AND ANGEL SILVA MIGUEL ANGEL, Troceador de 4 cuadrantes circuito de control. 1999. Tesis de grado. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga.
- [3] Lin, P.I.-H.; MESSAL, E.E., "Design of a real-time rotor inertia estimation system for DC motors with a personal computer," *Instrumentation and Measurement Technology Conference, 1991. IMTC-91. Conference Record., 8th IEEE* , vol., no., pp.292,296, 14-16 May 1991.
- [4] SERWAY RAYMOND AND JEWETT JHON, Physics for Scientist and Engineers, Sixth Edition, Vol 1, Editorial Cencage Learning, 2008.
- [5] CHAPMAN, STEPHEN J, Maquinas eléctricas, Tercera edición Mc Graw Hill.
- [6] GRUPO HEUREMA. EDUCACIÓN SECUNDARIA ENSEÑANZA DE LA FÍSICA Y LA QUÍMICA/ [www.heurema.com /pdf16.htm](http://www.heurema.com/pdf16.htm)
- [7] TEXAS INSTRUMENT/
<http://www.datasheetcatalog.org/datasheet/texasinstruments/xtr110.pdf>
- [8] TELEMECANIQUE/ www.adtecnologias.com/Catalogos/Manual_Twido.pdf
- [9] SIEMENS/
http://cache.automation.siemens.com/dnl/jExNDU0NwAA_18652056_HB/S7prv54_s.pdf
- [10] HONEYWELL/ [www.honeywell.de /FP /Regler /reglerparametrierung.pdf](http://www.honeywell.de/FP/Regler/reglerparametrierung.pdf)
- [11] MARTINEZ ANGEL ROBERTO, Principio de Accionamientos Eléctricos. Conferencias de clases de accionamientos eléctricos.1990.

- [12] HONEYWELL/
<https://www.honeywellprocess.com/library/support/Public/Documents/51-52-25-123-SP.pdf>
- [13] HONEYWELL/
<https://www.honeywellprocess.com/library/support/Public/Documents/51-52-25-122.pdf>
- [14] UNIVERSIDAD DE CHILE/
http://automatica.li2.uchile.cl/exp/files/man_motor/modelacion_motor_cc.pdf
- [15] NATIONAL INSTRUMENT, CONTROL DE CICLO CERRADO CON LABVIEW Y UN MOTOR DC/ <http://www.ni.com/white-paper/12944/es>
- [16] NATIONAL INSTRUMENT, USER GUIE AND SPECIFICATIONS NI USB 6008/6009/ <http://www.ni.com/pdf/manuals/371303m.pdf>
- [17] NATIONAL INSTRUMENT, USER GUIE AND SPECIFICATIONS NI USB 6008/6009/ http://www.tau.ac.il/~electro/pdf_files/computer/ni_6008_ADC_manual.pdf
- [18] AMAYA REYES RAFAEL MAURICIO AND ANGEL SILVA MIGUEL ANGEL.
Troceador de cuatro cuadrantes circuito de control. 1999. Bucaramanga.
- [19] TEXAS INSTRUMENT/ <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lt1054.pdf>
- [20] TEXAS INSTRUMENT/ <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/iso124.pdf>

ANEXOS

ANEXO A

PRACTICA

MEDICIÓN DEL MOMENTO DE INERCIA

RESUMEN: Entre las características importantes de un motor se encuentra el momento de inercia, el cual es muy importante a la hora de controlar la velocidad debido al par motor. En esta práctica se presentan tres métodos para obtener una aproximación al valor del momento de inercia para un motor de corriente continua de excitación independiente y de un motor jaula de ardilla. El primer método se basa en las ecuaciones del modelo del motor de excitación independiente. Se calcula el valor del momento de inercia en vacío del motor de excitación independiente, para luego acoplarle el motor de inducción y calcular el momento de Inercia del acople y obtener el momento de inercia (J) del motor de inducción se le resta el del motor de DC. El segundo método se basa en la mecánica clásica aplicada a caída de cuerpos en la cual la aceleración de caída es la más importante en este método.

1. MARCO TEÓRICO

1.1 OBTENCIÓN DEL MOMENTO DE INERCIA MEDIANTE LA CONSTANTE DE TIEMPO MECÁNICA

Este método tiene como objetivo principal calcular las constantes de magnetización y de tiempo mecánica.

1.1.1 CÁLCULO DE LA CONSTANTE DE MAGNETIZACIÓN.

Para hallar la constante de magnetización se parte de la expresión de estado estable de la Fuerza Contra electromotriz [5].

$$E_a = K * I_f * \omega \quad (1)$$

Donde

E_a : es el voltaje interno de la máquina [V].

K : es la constante que depende de la corriente de campo.

I_f : es la corriente de excitación del motor [A].

ω : es la velocidad angular del motor [Rad/s].

Si se mantiene constante la corriente de excitación del motor se puede reemplazar ($K * I_f$) por K_m que se desea calcular. Por lo tanto la expresión queda de la siguiente manera:

$$E_a = K_m * \omega \quad (2)$$

Del circuito equivalente del motor en estado estable se tiene:

$$V_a = E_a + I_a * R_a \quad (3)$$

Donde V_a, I_a, R_a son respectivamente tensión de alimentación de armadura, corriente de armadura, y resistencia de armadura. Remplazando E_a

$$V_a = K_m * \omega + I_a * R_a \quad (4)$$

Y despejando K_m obtenemos:

$$K_m = \frac{V_a - I_a * R_a}{\omega} \quad (5)$$

Y de esta forma se obtiene la constante de “magnetización” que se desea calcular.

1.1.2 OBTENCIÓN DE LA CONSTANTE DE TIEMPO MECÁNICA

Para encontrar la constante de tiempo mecánica (τ_m) se energiza el motor hasta que alcance la velocidad nominal, una vez esto suceda se desenergiza la armadura del motor y se toma el tiempo que tarda en descender la velocidad o la tensión inducida de armadura al 36.8%, siendo este tiempo la constante de tiempo mecánica τ_m .

1.1.3 DETERMINACIÓN DEL MOMENTO DE INERCIA

Junto con los datos de tensión, velocidad y constante de tiempo mecánica se realiza la sumatoria de momentos del motor sin carga para poder calcular el momento de inercia.

$$T_e = K_m * I_a = J * \frac{d\omega}{dt} + B * \omega \quad (6)$$

Donde :

T_e : Es el torque electromecánico [N*m]

J : El momento de inercia del motor [$kg * m^2$]

B : es el coeficiente de fricción [$N * m * s^2$]

Cuando el sistema se estabiliza

$$J * \frac{d\omega}{dt} = 0 \rightarrow T_e = K_m * I_a = B * \omega \quad (7)$$

Por lo tanto el coeficiente de fricción es igual a:

$$B = \frac{K_m * I_a}{\omega} \quad (8)$$

Para calcular el momento de inercia se emplea la siguiente expresión:

$$J = B * \tau_m \quad [kg * m^2] \quad (9)$$

1.2 CALCULO DEL MOMENTO DE INERCIA BASADO EN LA FÍSICA CLÁSICA

Partiendo de la primera ley de Newton se tiene:

$$\sum F = ma \quad (10)$$

$$\sum M = J * \alpha \quad (11)$$

Donde

F : Fuerza [N]

m : Masa [m]

a : Aceleración lineal [$\frac{m}{s^2}$]

M : Torque [N*m]

J : Momento de inercia del cuerpo [$kg * m^2$]

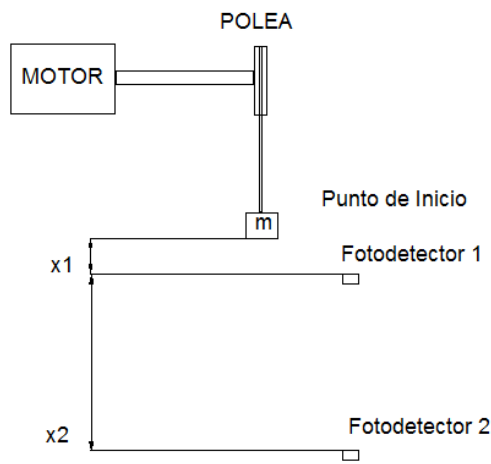
α : Aceleración angular [$\frac{rad}{s^2}$]

Para una aceleración constante se puede afirmar lo que

$$a = \alpha * R \quad (12)$$

El método consiste en acoplarle una masa mediante una polea en el eje del motor permitiendo su caída libre desde una altura suficiente para que la masa alcance una aceleración constante. Se halla la aceleración de la masa y se calcula el momento de inercia.

Figura 1. Esquema de montaje para la medición del momento de inercia



Existen dos formas similares para calcular el momento de inercia basándose en las anteriores ecuaciones, los métodos se presentan a continuación.

1.2.1 MÉTODO 1

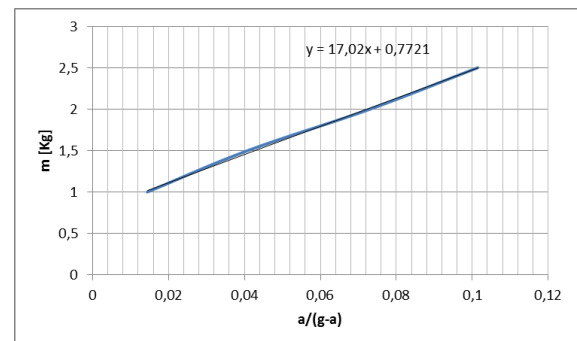
Este método se basa en la suposición de que la fricción es constante y pequeña y se utilizan al menos dos masas para la prueba. A continuación se presenta la fórmula para calcular el momento de inercia [2]

$$J = \frac{[(m_1 - m_2) * g - (m_1 a_1 - m_2 a_2)] r^2}{(a_1 - a_2)} \quad (13)$$

1.2.2 MÉTODO 2

En este método se hace la suposición que la fricción es despreciable [5]. Podemos tomar los datos de aceleración hallados en el método anterior. El método consiste en graficar colocando en el eje vertical las masas y en el eje horizontal se coloca $\frac{a}{g-a}$ obteniendo de la pendiente $\frac{J}{r^2}$ (siendo r el radio de la polea) y se despeja J. Ver figura 2

Figura 2. Gráfica de obtención de momento de inercia Método 2



Para este ejemplo de la gráfica tenemos que $\frac{J}{r^2} = 17,02$, para un radio de la polea de 0,05m tenemos $J = 0,042 \text{ kg m}^2$.

2. REALIZACIÓN DE LA PRÁCTICA

2.1 OBTENCIÓN DEL MOMENTO DE INERCIA CON EL MÉTODO 1

Para realizar esta prueba es necesario tener los siguientes equipos

- Osciloscopio
- Encoder
- PC con el software de reconocimiento para el osciloscopio,
- Programa en LabVIEW para comunicar con el encoder
- Tarjeta de adquisición de datos
- Voltímetro
- Amperímetro
- Tacómetro

Para realizar la prueba es necesario obtener la constante de magnetización y de fricción

Tensión[V]	Corriente[A]	Velocidad[rad/s]	Resistencia[Ω]	Km
Promedio				

Corriente [A]	Velocidad[rad/s]	Km[V.s]	β
Promedio			

Obtenemos la constante de tiempo mecánica τ_m por dos métodos. Primero realicelo con la tensión utilizando el osciloscopio y el segundo mediante la velocidad utilizando el encoder. Compare ambos resultados.

Tensión

Prueba	Tm	J

Velocidad

Prueba	Tm	J

Para obtener la j del el motor de inducción, este se acopla al motor de corriente continua y se repiten los pasos para calcular la constante de fricción debido a que esta se modifica.

Obtenga la constante de tiempo mecánica τ_m y compare los resultados

Tensión

Prueba	Tm	J

Velocidad

Prueba	Tm	J

Como el momento de inercia hallado corresponde al acople motor DC - motor de inducción y ya se conoce el momento del motor de continua se procede a utilizar la siguiente formula

$$J_{ind} = J_{acop} - J_{dc} \quad (14)$$

2.2 OBTENCIÓN DEL MOMENTO DE INERCIA CON EL MÉTODO BASADO EN LA MECÁNICA CLÁSICA. MÉTODO 2.

Coloque el motor a una altura suficiente para que la masa alcance una aceleración constante, para después dejarla caer libremente haciendo girar el eje del motor. Obtenga la aceleración lineal de las masas mediante el encoder y repita mínimo tres veces la prueba con cada masa.

Masa [kg]	Aceleración [m/s ²]

Con los datos obtenidos aplique los dos métodos explicados en el marco teórico y compare estos resultados con los métodos anteriores y explique a que se deben las diferencias.

	Método 1	Método 2
J [kg m ²]		

3. BIBLIOGRAFÍA

[1] AMAYA REYES RAFAEL MAURICIO AND ANGEL SILVA MIGUEL ANGEL. Troceador de cuatro cuadrantes circuito de control. 1999. Bucaramanga.

[2] Lin, P.I.-H.; Messal, E.E., "Design of a real-time rotor inertia estimation system for DC motors with a personal computer," *Instrumentation and Measurement Technology Conference, 1991. IMTC-91. Conference Record., 8th IEEE*, vol., no., pp.292,296, 14-16 May 1991.

[3] GUSTAVO ADOLFO YERENA BAYONA, JAVIER ORLANDO VILLAMIZAR Y JOSE CARLOS BITAR. Comparación de las características y comportamiento de un controlador PID industrial con la función PID de un PLC. 2013. Bucaramanga. Trabajo de grado de Grado

[4] CHAPMAN, STEHPEN J, Maquinas eléctricas, Tercera edición Mc Graw Hill.

[5] [www.heurema.com /pdf16.htm](http://www.heurema.com/pdf16.htm).

[6] MEJIA URIBE DANIEL Y MARTINEZ RAMOS HUGO ALEJANDRO. Motores Eléctricos: Frenado Dinámico y A Contracorriente. Universidad Industrial de Santander. 2000.

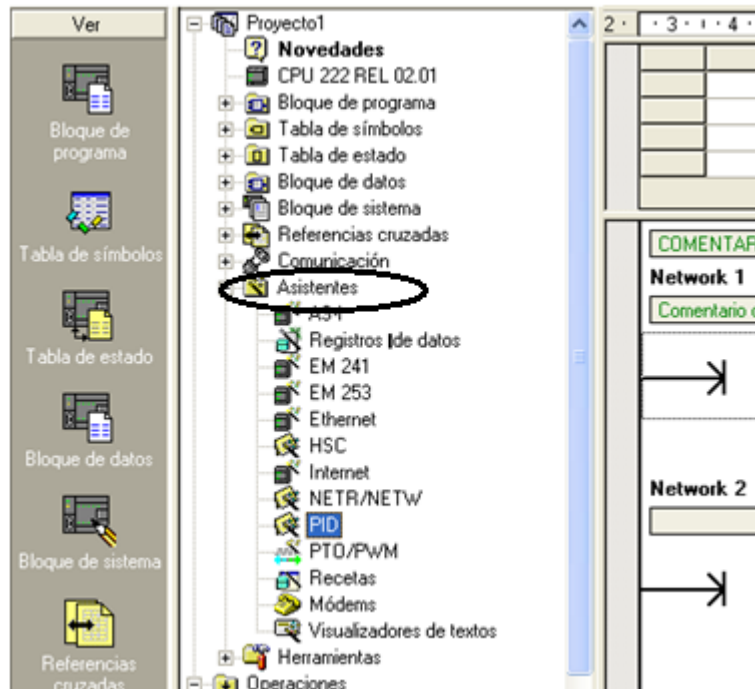
ANEXO B

MANUAL DE PROGRAMACIÓN DE LA FUNCIÓN PID DEL PLC S7-200 DE SIEMENS

Para programación de la función PID del S7-200 es necesario apoyarse en el software V4.0 STEP 7 MicroWIN SP5.

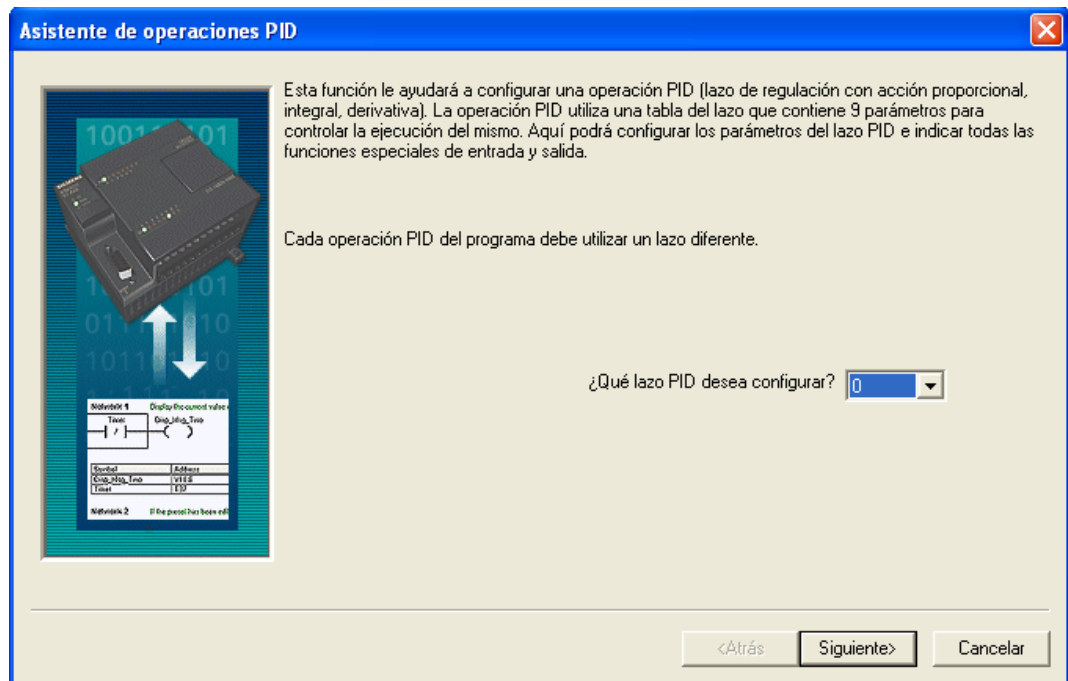
- 1) Se va a la carpeta de nombre **Asistentes** que está ubicada a la parte izquierda y se selecciona la opción **PID** haciendo doble click sobre el icono (ver figura 65) y debe aparecer un pantallazo como se muestra en la figura 66.

Figura 65. Pantalla capturada del software V4.0 STEP 7 MicroWIN SP5 para la visualización de la carpeta Asistentes.



- 2) Se selecciona el lazo que se desea configurar como se muestra en la figura 66. Por defecto se recomienda dejarlo como Lazo 0

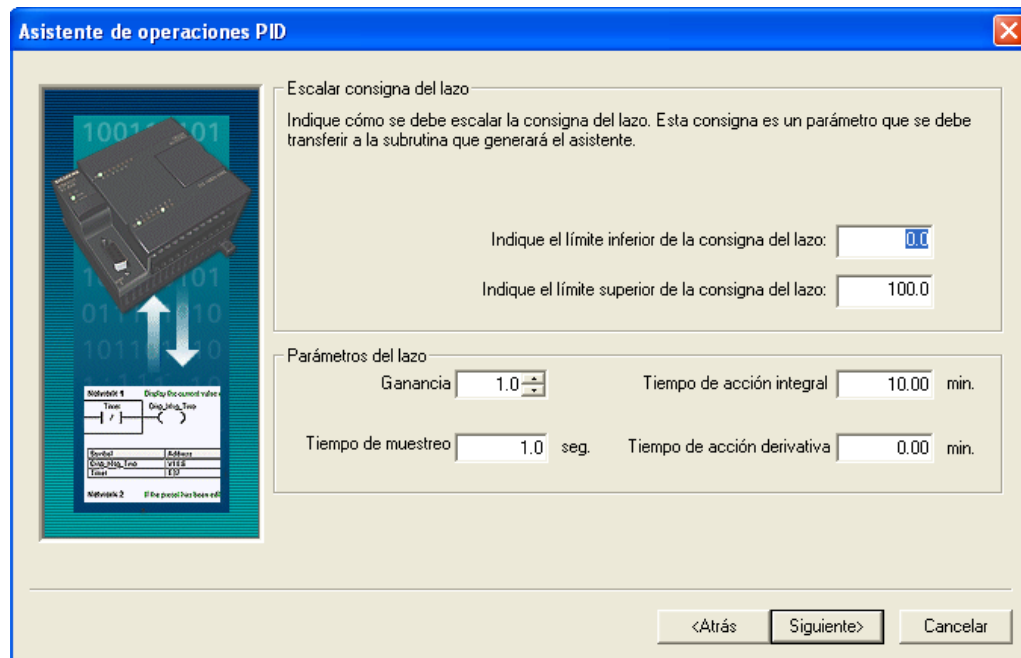
Figura 66. Pantalla capturada del software V4.0 STEP 7 MicroWIN SP5 para la selección de lazo de control



Una vez escogido el lazo se da clic en siguiente.

- 3) El siguiente paso es programar los parámetros del lazo, como se muestra en la figura 67

Figura 67. Pantalla capturada del software V4.0 STEP 7 MicroWIN SP5 para la programación de los parámetros de lazo



Escalar consigna del lazo: en esta parte es donde se configura el rango de trabajo del punto de consigna (SETPOINT), es decir si se escoge una escala de 0 a 1 y se está controlando la velocidad de un motor entonces al colocar un setpoint de 0.5 que está dentro de la escala, el controlador ordenara que el motor vaya a una velocidad del 50 %. El ajuste estándar es un valor comprendido entre 0,0 y 100,0 pero se recomienda por los Autores usar valores desde 0 a 1 para no tener que forzar el punto de consigna.

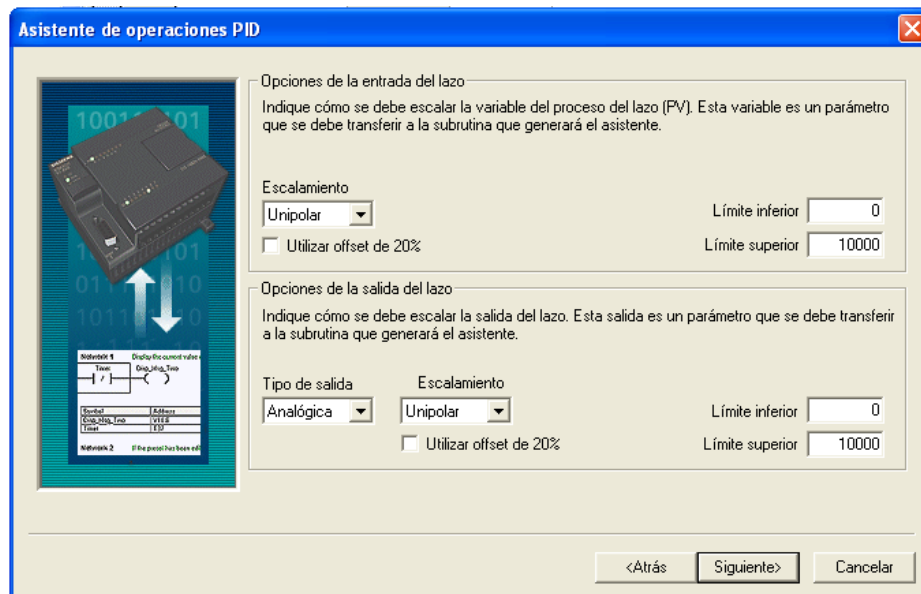
Parámetros del lazo: en esta casilla se introducen los valores de:

- Ganancia: si se quiere una acción de control directa este valor se introduce positivo, y se quiere una acción de control indirecta se coloca un valor negativo
- Tiempo de acción integral: constante integral

- Tiempo de acción derivativa : constante derivativa
- Tiempo de muestreo: entre más pequeño sea este tiempo más exacto será pero el proceso se hará más lento.

4) Se procede a hacer la configuración de parámetros de entrada y de salida como se muestra en la figura 68.

Figura 68. Pantalla capturada del software V4.0 STEP 7 MicroWIN SP5 para la configuración de entradas y salidas



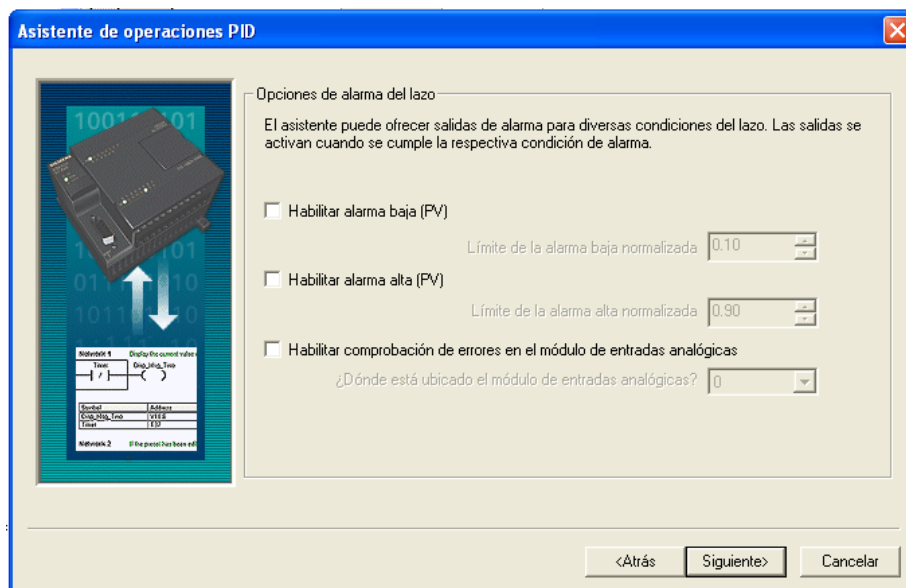
En la entrada el escalamiento puede ser unipolar (valores positivos). Otra opción es una entrada bipolar (valores positivos y negativos) con la opción de agregar un offset si requiere del 20%. También se tienen las casillas para agregar los valores de límites máximos y mínimos de las escalas de la entrada, cuando se escoge en el límite superior una escala de 32000 la máxima tensión recibida es

10 V o 5 V según la configuración de la entrada, para valores menores a 32000 se empieza a disminuir la tensión máxima de entrada.

Para configurar la salida se aplica lo mismo que para las entradas. Además tenemos la opción de escoger el tipo de salida que puede ser analógico o digital.

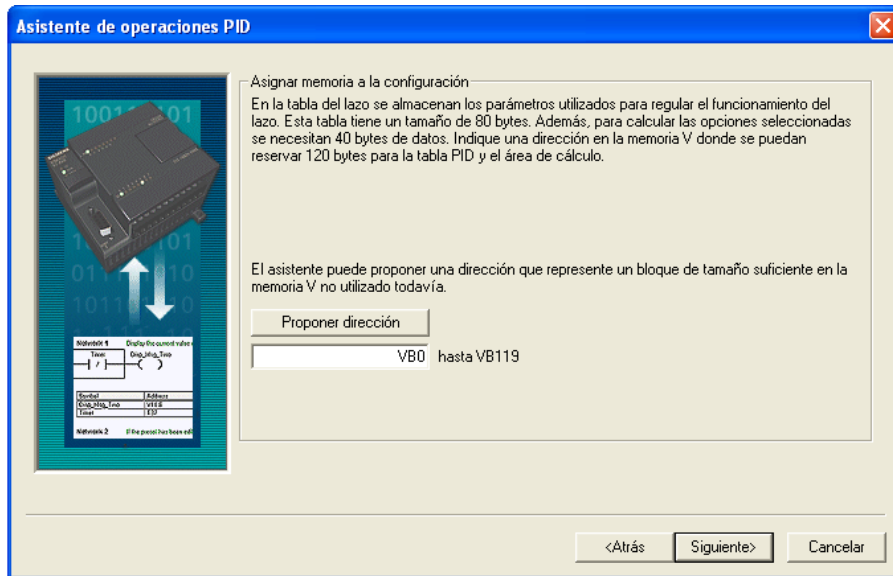
- 5) Se escogen los límites de mínimos y máximos para las alarmas si es necesario, sino estas opciones se dejan deshabilitadas como se muestra en la figura 69.

Figura 69. Pantalla capturada del software V4.0 STEP 7 MicroWIN SP5 para la configuración de alarmas



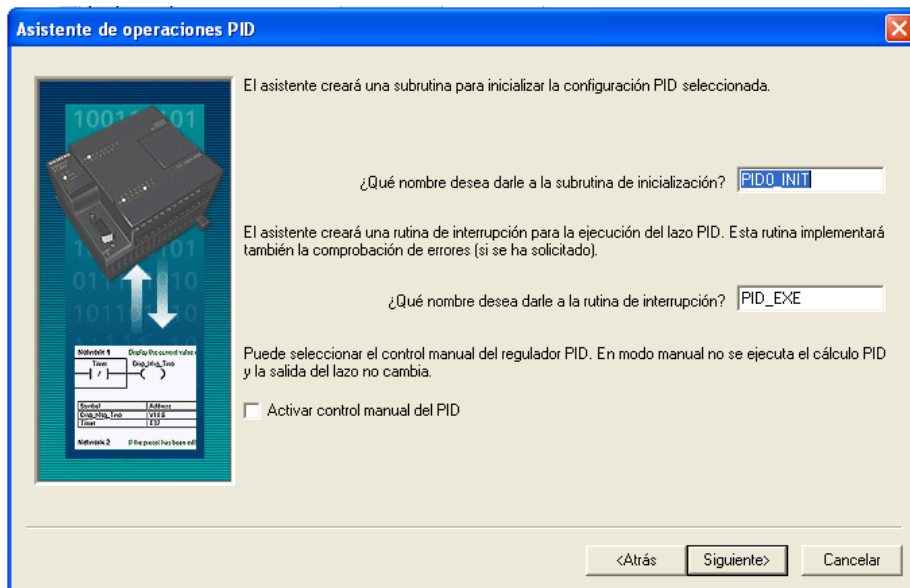
- 6) Se agrega la memoria de cálculo de la configuración como se muestra en la figura 70.

Figura 70. Pantalla capturada del software V4.0 STEP 7 MicroWIN SP5 para agregar la memoria de cálculo



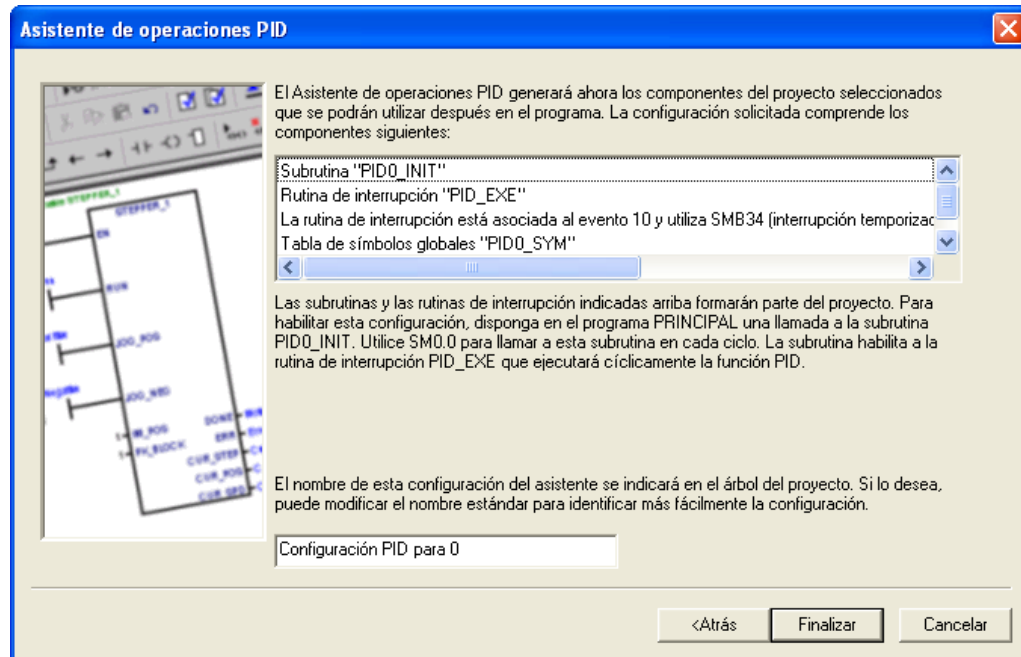
- 7) El siguiente paso es darle nombres a la subrutina y a la rutina de interrupción como se muestra en la figura 71.

Figura 71. Pantalla capturada del software V4.0 STEP 7 MicroWIN SP5 para dar nombre a la rutina y a la subrutina



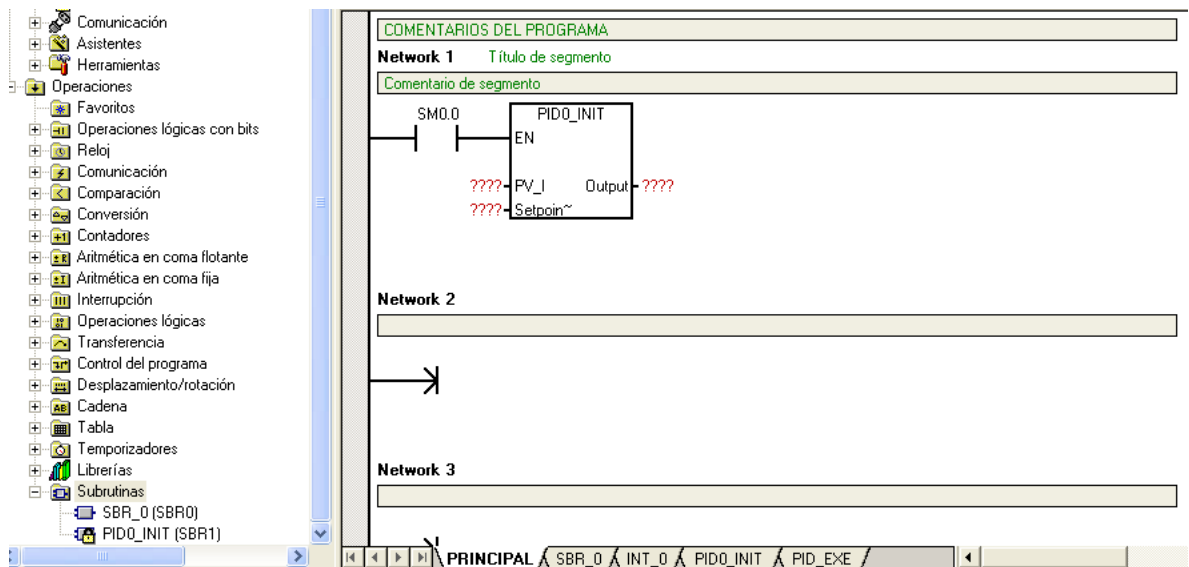
- 8) Se finaliza la configuración del asistente PID como se muestra en la figura 72.

Figura 72. Pantalla capturada del software V4.0 STEP 7 MicroWIN SP5 para finalizar la configuración del asistente



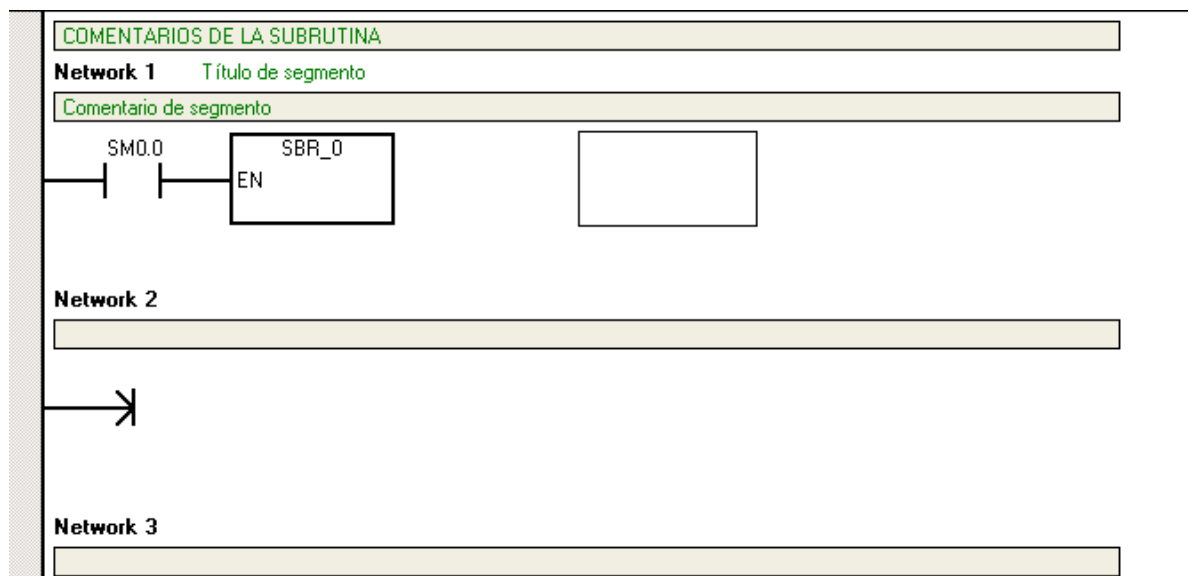
- 9) Se va a subrutina y se escoge PID0_INT y se coloca en pestaña principal del programa, también se coloca un contacto SM0.0 como se muestra en la figura 73

Figura 73. Pantalla capturada del software V4.0 STEP 7 MicroWIN SP5 para visualizar el PID en la pestaña principal



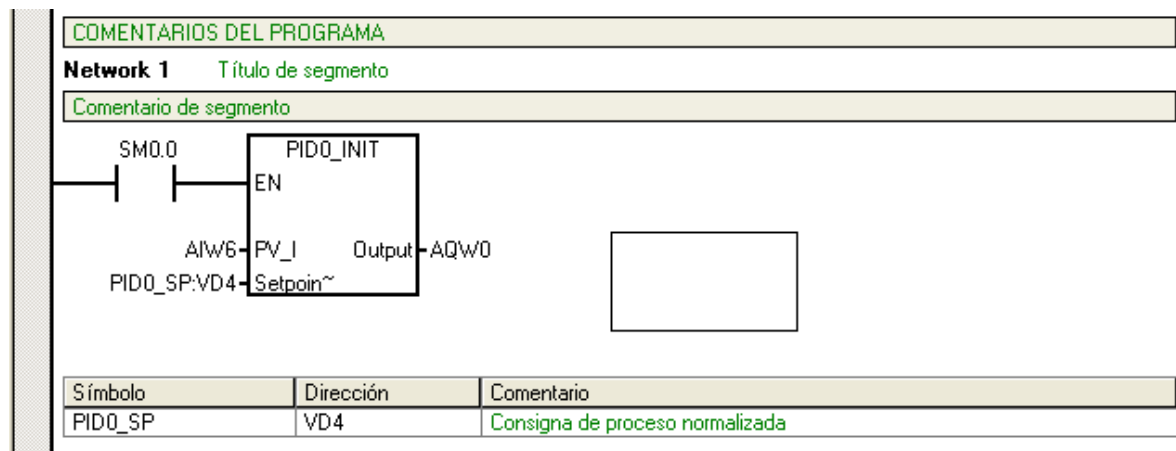
- 10) También se debe colocar el bloque SBR0_0 en la pestaña de SBR_0 como se muestra en la figura 74.

Figura 74. Pantalla capturada del software V4.0 STEP 7 MicroWIN SP5 para la visualización del bloque SBR_0 en la pestaña SBR_0



11) Se colocan los parámetros con los que va a trabajar la función PID es decir la entrada, el setpoint y la salida como se muestra en la figura 75

Figura 75. Pantalla capturada del software V4.0 STEP 7 MicroWIN SP5 para visualizar la colocación de las entradas y salidas del bloque PID



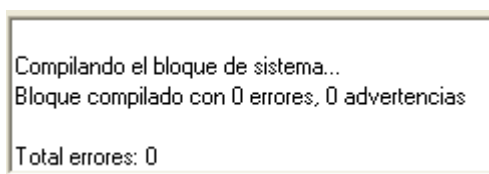
12) Se dirige a la tabla de estados y se introducen el setpoint (VD4-variable digital) en el primer cuadro y luego pulsamos Enter hasta que aparezca la casilla de la constante derivativa VD24, después de esto se introduce la salida y la entrada, tal como se muestra en la figura 76

Figura 76. Pantalla capturada del software V4.0 STEP 7 MicroWIN SP5 para visualizar la tabla de estados

	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
	Dirección	Formato	Valor actual	Nuevo valor												
1	PIDQ_SP:VD4	Con signo														
2	PIDQ_Output:VD8	Con signo														
3	PIDQ_Gain:VD12	Con signo														
4	PIDQ_SampleTime:VD16	Con signo														
5	PIDQ_I_Time:VD20	Con signo														
6	PIDQ_D_Time:VD24	Con signo														
7	AIW6	Con signo														
8	AQW0	Con signo														
9		Con signo														

13) El siguiente paso es darle en el icono  para verificar que el programa es correcto. Si es esta bien aparece un mensaje en la parte inferior del programa como se muestra en la figura 77

Figura 77. Pantalla capturada del software V4.0 STEP 7 MicroWIN SP5 para visualizar los mensajes de error



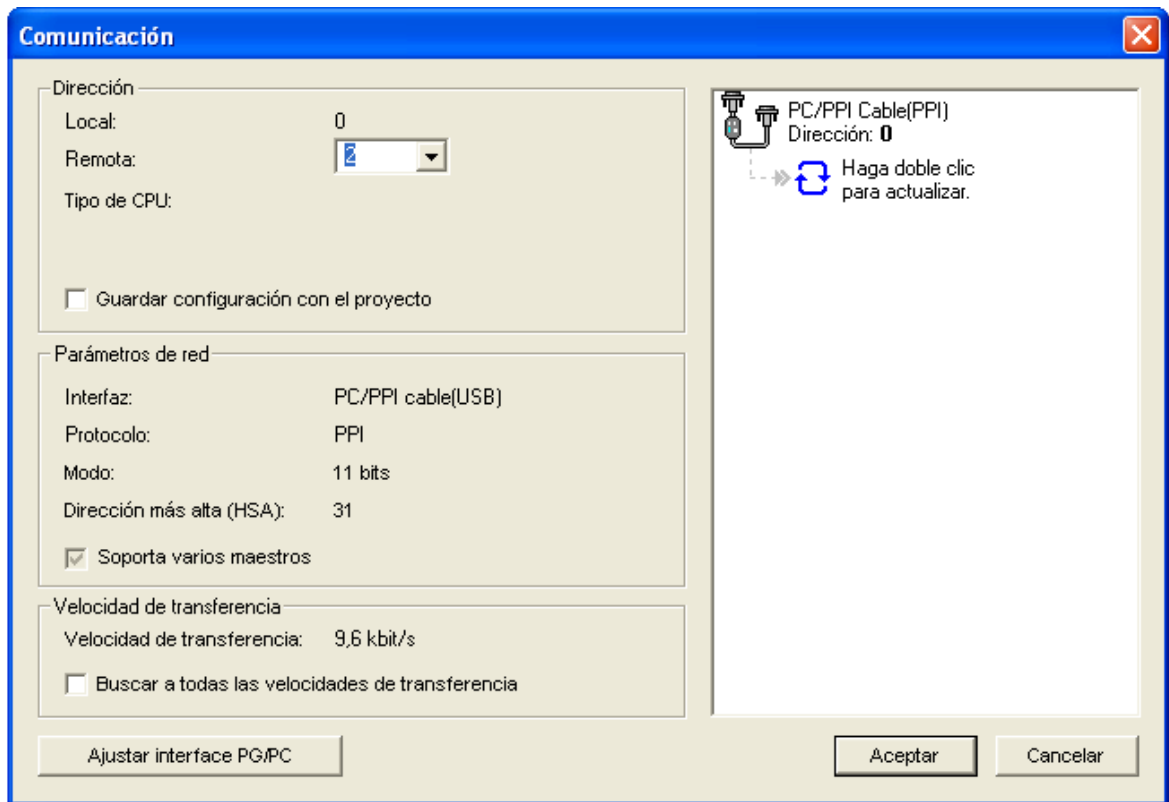
14) Mediante el cable PC/PPI cable (PPI) establezca la comunicación entre el PC y el PLC

15) Una vez conectados el PC y el PLC S7-200 diríjase al icono de comunicación



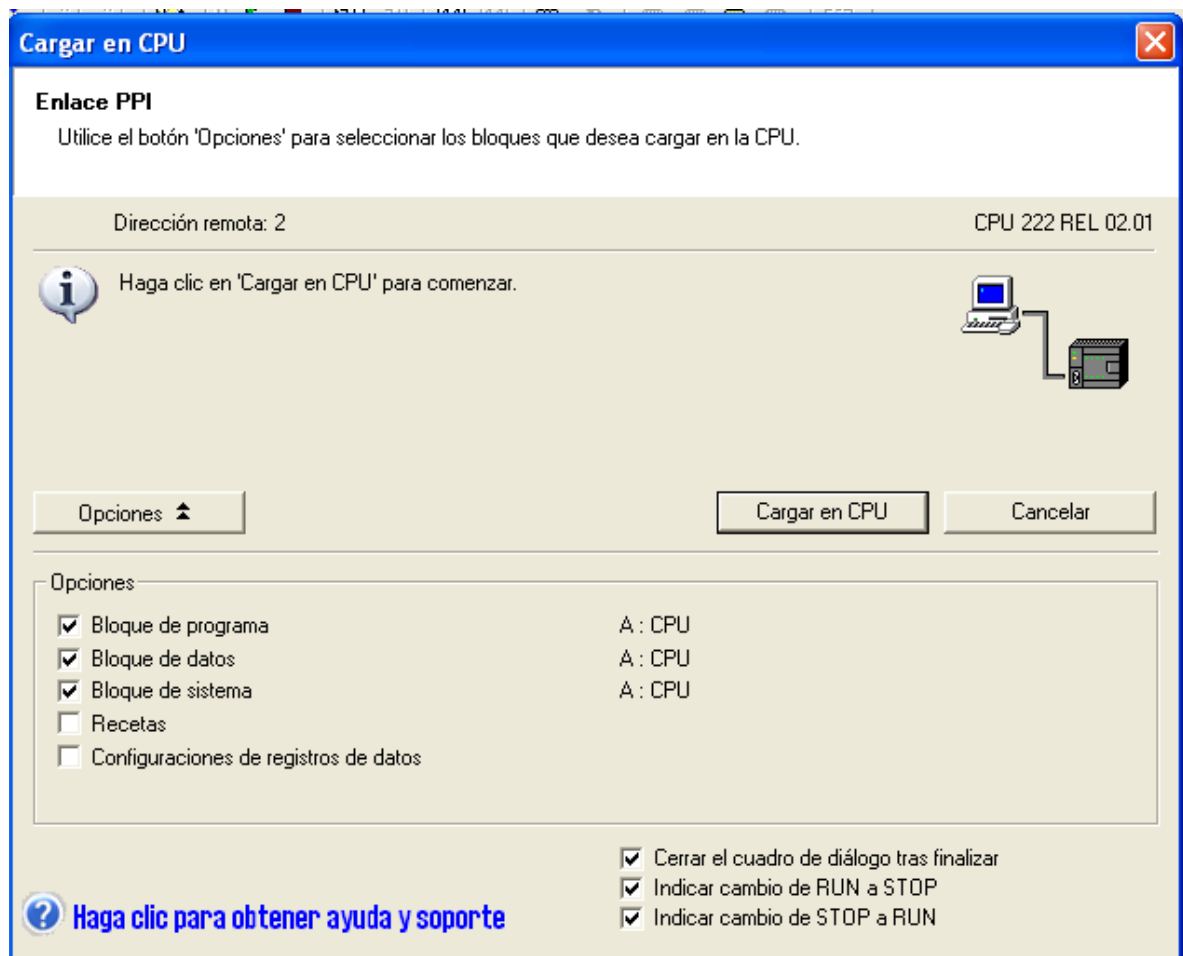
ubicado en la parte inferior de la pestaña **Ver** y aparecerá una nueva ventana para ajustar los parámetros de **Comunicación**. Ver figura 78. Haga doble clic en el icono  Haga doble clic para actualizar. y luego de aceptar.

Figura 78. Pantalla capturada del software V4.0 STEP 7 MicroWIN SP5 para visualizar la ventana Comunicación



16) Transmita el programa al PLC mediante el icono  Ver figura 70 .
Oprime la opción *cargar a CPU*.

Figura 79. Pantalla capturada del software V4.0 STEP 7 MicroWIN SP5 para visualizar la ventana Cargar en CPU



17) Se da clic en el icono  y en la tabla de *Nuevo valor* se coloca los valores deseados para el setpoint, constante Proporcional, tiempo integral, etc Ver figura 80.

Figura 80. Pantalla capturada del software V4.0 STEP 7 MicroWIN SP5 para visualizar en la tabla de estado el nuevo valor

· 3 ·	· 4 ·	· 5 ·	· 6 ·	· 7 ·	· 8 ·	· 9 ·	· 10 ·	· 11 ·	· 12 ·	· 13 ·	· 14 ·	· 15 ·	· 16 ·	· 17 ·	· 18 ·
	Dirección	Formato	Valor actual	Nuevo valor											
1	PID0_SP:VD4	Coma flotante		0.5											
2	PID0_Output:VD8	Coma flotante													
3	PID0_Gain:VD12	Coma flotante		1.0											
4	PID0_SampleTime:VD16	Coma flotante													
5	PID0_I_Time:VD20	Coma flotante		2.0											
6	PID0_D_Time:VD24	Coma flotante		0.3											
7	AIW6	Sin signo													
8	AQW0	Sin signo													
9		Con signo													
10		Con signo													
11		Con signo													

18) El siguiente paso es dar en el icono  para poner a correr el programa, luego se da en el icono  para observar el comportamiento de las variables, como se muestra en la figura 81

Figura 81. Pantalla capturada del software V4.0 STEP 7 MicroWIN SP5 para visualizar en la tabla de estados el comportamiento de las variables

· 3 ·	· 4 ·	· 5 ·	· 6 ·	· 7 ·	· 8 ·	· 9 ·	· 10 ·	· 11 ·	· 12 ·	· 13 ·	· 14 ·	· 15 ·	· 16 ·	· 17 ·	· 18 ·
	Dirección	Formato	Valor actual	Nuevo valor											
1	PID0_SP:VD4	Coma flotante	0.0	0.5											
2	PID0_Output:VD8	Coma flotante	0.002535002												
3	PID0_Gain:VD12	Coma flotante	1.0	1.0											
4	PID0_SampleTime:VD16	Coma flotante	1.0												
5	PID0_I_Time:VD20	Coma flotante	10.0	2.0											
6	PID0_D_Time:VD24	Coma flotante	0.0	0.3											
7	AIW6	Sin signo	85												
8	AQW0	Sin signo	25												
9		Con signo													
10		Con signo													
11		Con signo													

19) Para introducir los valores que están en la columna de *Nuevo valor* se da clic en el icono  como se muestra en la figura 82. Para cambiar valores se escribe en la columna de *nuevo valor* y se oprime el icono  de nuevo.

Figura 82. Pantalla capturada del software V4.0 STEP 7 MicroWIN SP5 para visualizar la colocación de los nuevos parámetros

· 3 · · 4 · · 5 · · 6 · · 7 · · 8 · · 9 · · 10 · · 11 · · 12 · · 13 · · 14 · · 15 · · 16 · · 17 · · 18 ·				
	Dirección	Formato	Valor actual	Nuevo valor
1	PID0_SP:VD4	Coma flotante	0.5	
2	PID0_Output:VD8	Coma flotante	0.5807464	
3	PID0_Gain:VD12	Coma flotante	1.0	
4	PID0_SampleTime:VD16	Coma flotante	1.0	
5	PID0_I_Time:VD20	Coma flotante	2.0	
6	PID0_D_Time:VD24	Coma flotante	0.3	
7	AIW6	Sin signo	76	
8	AQW0	Sin signo	18584	
9		Con signo		
10		Con signo		
11		Con signo		

ANEXO C

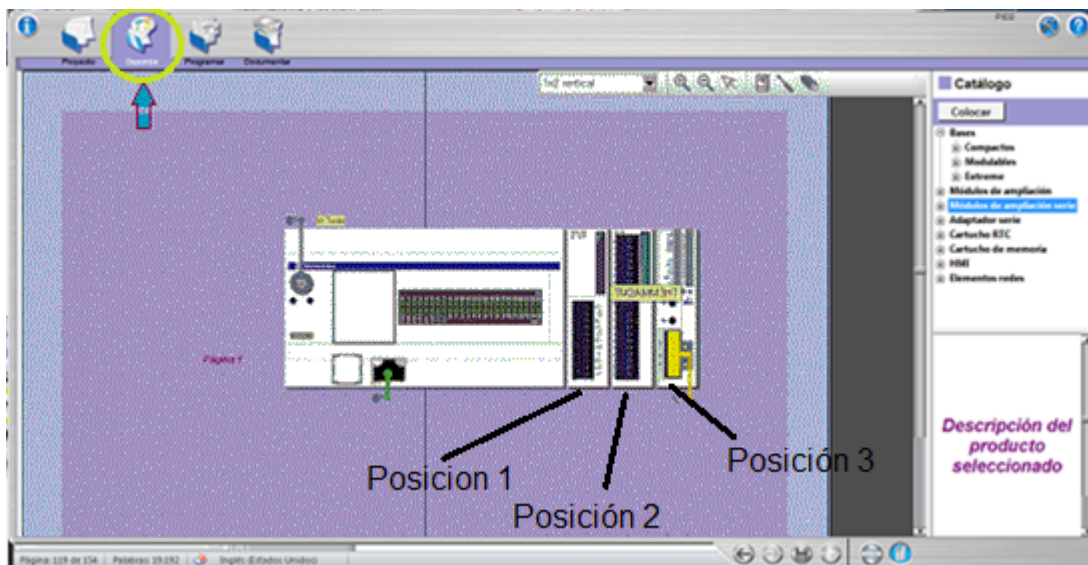
MANUAL DE LA FUNCIÓN PID DEL PLC TWIDO DE TELEMECANIQUE

En este manual se explicara de forma sencilla la configuración de la función PID

Paso 1: configuración de los canales analógicos

1. Como el PID necesita entradas analógicas hay que utilizar un módulo de expansión con entradas y salidas analógicas que puede ser el TM2AMM3HT. Para colocar el módulo es necesario ir al programa a la opción de **Describir** como se muestra en la figura 83.

Figura 83. Pantalla capturada del software TwidoSoft para la visualización de los módulos de expansión

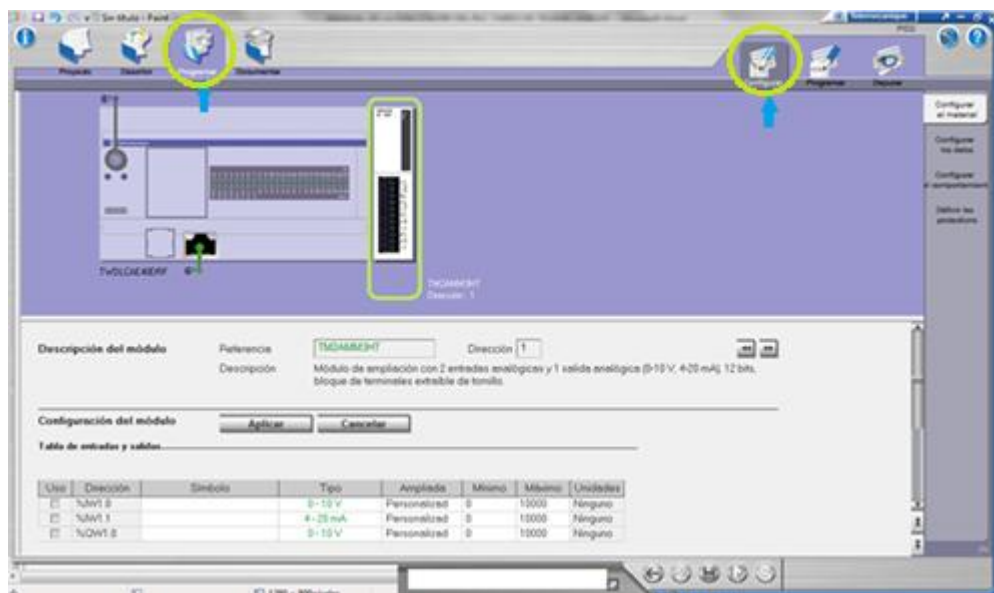


Fuente: Autores.

Nota: es muy importante respetar el orden de configuración (ubicación) de los módulos de expansión, es decir que si el módulo está como se muestra en la figura 83 en la primera posición y hay más módulos de ampliación en el PLC debe estar conectado físicamente en la misma posición (para este ejemplo en la primera posición).

2. Se procede a configurar las entradas analógicas del módulo de extensión. Esto se hace en la opción **Programar** y luego **Configurar** y se selecciona el módulo de extensión deseado. Proseguimos a configurar las entradas como se muestra en la figura 84.

Figura 84. Pantalla capturada del software TwidoSoft para la visualización de la configuración de las entradas analógicas



Fuente: Autores. Pantalla capturada del software TwidoSoft

En la columna *Tipo* se selecciona la clase de señal de la entrada o salida del controlador, en este caso los tipos son: Señal de tensión de 0-10 V y una de corriente de 4-20 mA.

En la columna **Ampliada** se puede escoger la opción “normal” o “personalizada”. En “normal” la columna de mínimo y máximo se deja por defecto, en cambio, si se escoge “personalizada” se puede escoger el valor del mínimo y el máximo.

Cuando en las columnas de mínimo y máximo se colocan valores como por ejemplo: un 0 en mínimo y en la de máximo 32000, esto quiere decir que cuando la entrada lea 0 volts, el PLC va a convertir ese valor en 0, en cambio si lee 10 volts el convierte ese valor en 32000.

Paso 2: Habilitación del PID y configuración del periodo de exploración

1. La función PID puede ser habilitada mediante una entrada o un bit interno, como por ejemplo %M0.

A continuación se dirige a la pantalla de programación y se copia el código para activar la función PID, como se muestra en la figura 85.

Figura 85. Pantalla capturada del software TwidoSoft para la visualización del código para la activación del PID



Figura 85.a

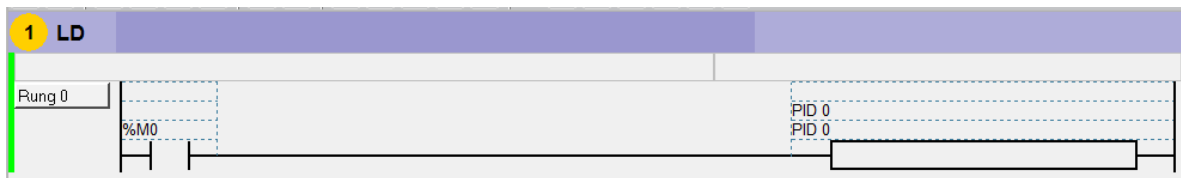


Figura 85.b

Fuente: Autores. Pantalla capturada del software TwidoSoft

2. Para la configuración del periodo de exploración (Modifica el periodo de ciclo del autómata definido en la configuración) se recomienda establecer el modo de exploración del ciclo del PLC en periódico. También se recomienda que el periodo de exploración sea un múltiplo exacto del periodo de muestreo T_s mediante la siguiente regla. Periodo de exploración = T_s/n donde n es un entero positivo. Además se debe seleccionar n de forma que el periodo de exploración sea un entero positivo en el rango de [2 a 150 ms]. A continuación se muestran los pasos para la configuración.

2.1 Se coloca en **Programar** → **Configurar** → **Configurar el comportamiento**

2.2 Active la casilla **Periodo** como se muestra en la figura 86

Figura 86. Pantalla capturada del software TwidoSoft para la visualización de la configuración del periodo de exploración

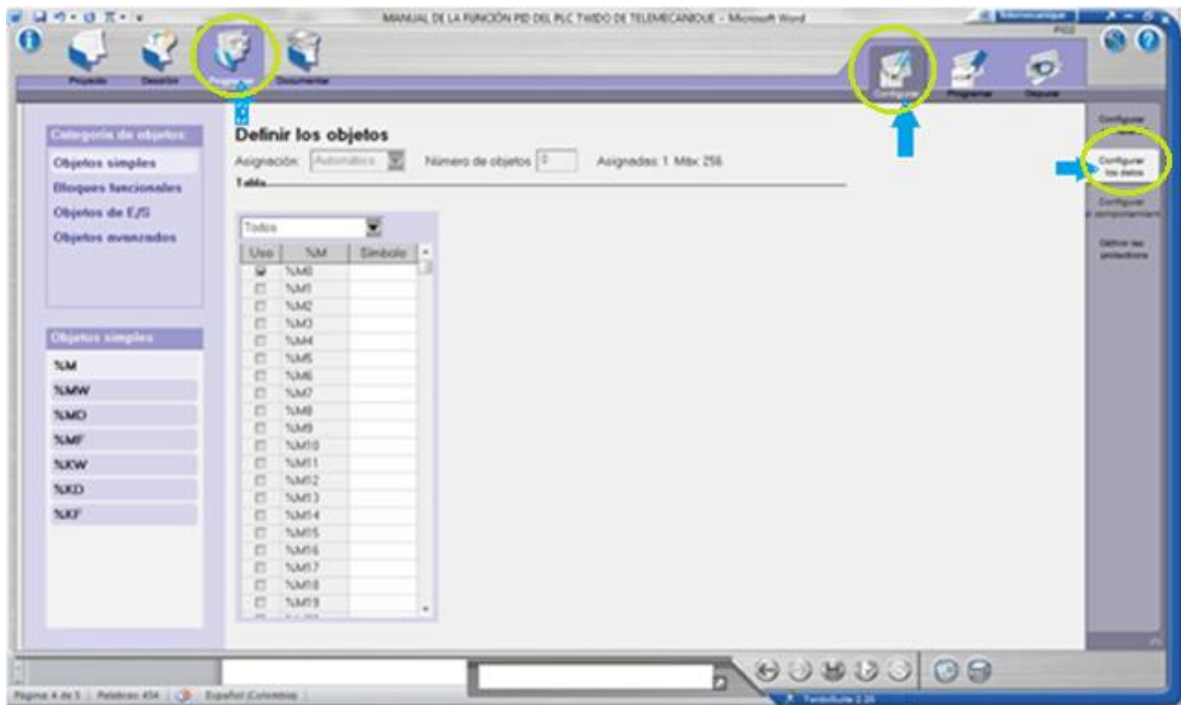
Fuente: Autores. Pantalla capturada del software TwidoSoft

Nota: el valor de duración del periodo depende del rendimiento deseado, aunque un valor de muestreo más rápido puede hacer que el cálculo se haga más lento (un valor adecuado es 50 ms).

Paso 3: Configuración de la función PID

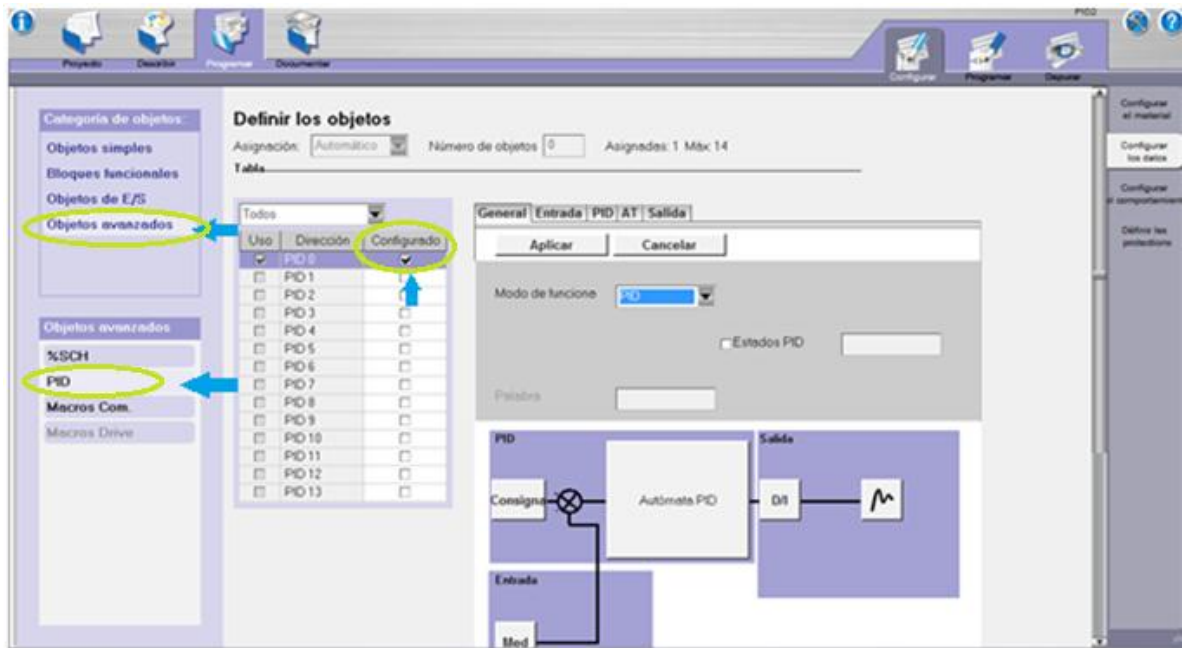
1. Seleccione **Programar** → **Configurar** → **Configurar los datos**, como se observa en la figura 87.

Figura 87. Pantalla capturada del software TwidoSoft para la visualización de la ventana de configuración de datos.



2. Se procede a seleccionar **Objetos avanzados** → **PID** y se selecciona el PID a utilizar en este caso es el *PID 0* como se observa en la figura 88.

Figura 88. Pantalla capturada del software TwidoSoft para la visualización de la selección del PID



Fuente: Autores. Pantalla capturada del software TwidoSoft

3. En la pestaña general se escoge el modo de función y las opciones que se visualizan son:

PID: solamente la función PID

PID + AT: esta da la posibilidad de escoger si quiere la función PID sola o con auto-sintonización.

AT: es la función PID con auto-sintonización.

Palabra: esta configuración permite utilizar cualquiera de las anteriores funciones más la función PI (la función PI esta por separado) si se escribe en el cuadro de “Palabra” cualquiera de las siguientes palabras:

- ☐ %MW1 (sólo para establecer PID)
- ☐ %MW2 (para establecer AT + PID)
- ☐ %MW3 (sólo para establecer AT)
- ☐ %MW4 (sólo para establecer PI)

4. En la pestaña general también aparece *Estados PID*. Esta opción se activa cuando no se ha seleccionado en el modo de función “Palabra”. Cuando se activa se coloca una palabra interna (%MW0 a %MW2999) la cual almacena el estado actual del PID. Ver figura 89

Figura 89. Pantalla capturada del software TwidoSoft para la visualización de la configuración del estado PID

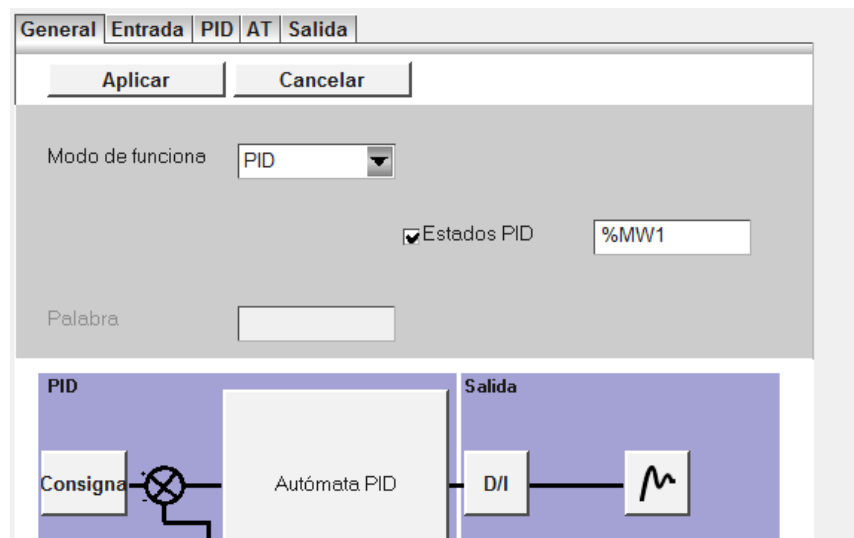


Figura 88.

Fuente: Autores. Pantalla capturada del software TwidoSoft

5. Se selecciona la pestaña **Entrada** y aparece una pantalla con las opciones de medida, conversión y alarma como se muestra en la figura 90.

Figura 90. Pantalla capturada del software TwidoSoft para la visualización de la pestaña entrada.

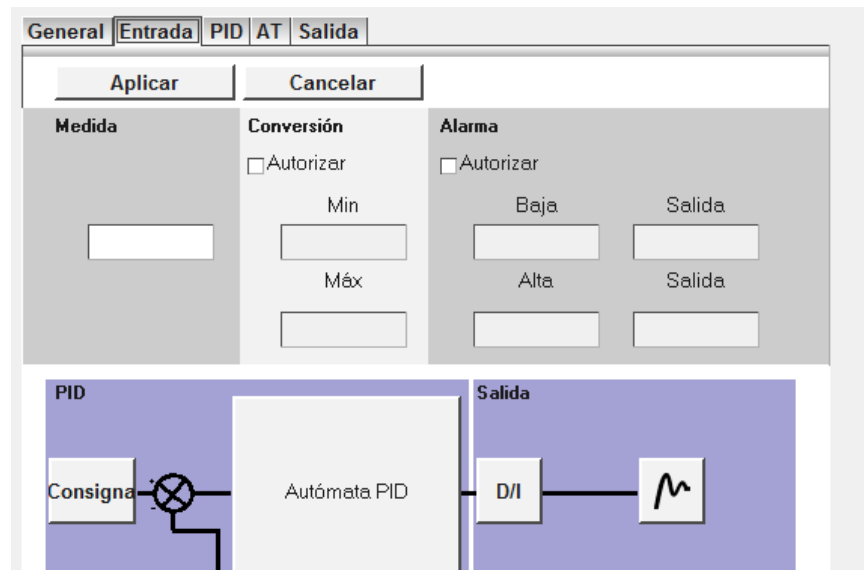


Figura 89.

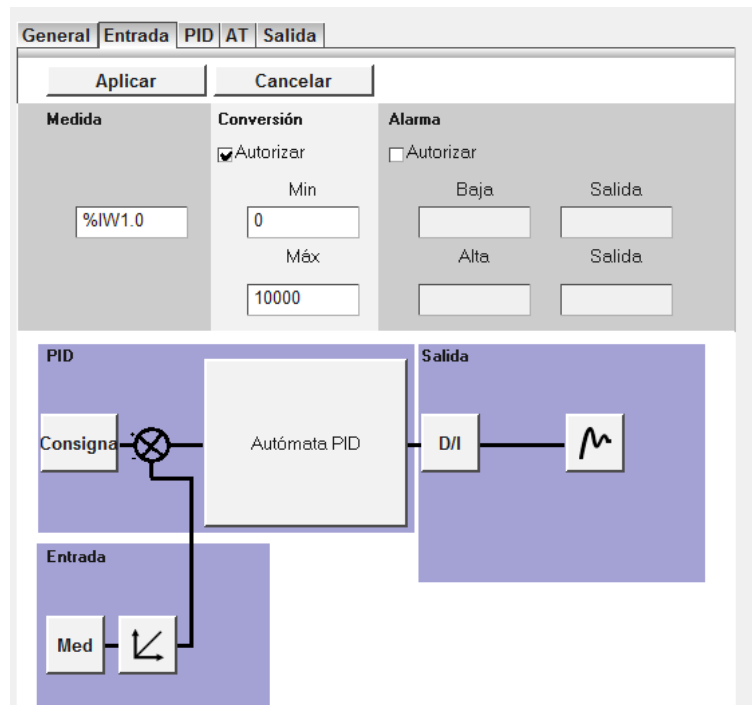
Fuente: Autores. Pantalla capturada del software TwidoSoft

En **Medida** se coloca la entrada en que se conecta el sensor del proceso (%IW1.1) como se presenta en la figura 90.

En **Conversión** active esta casilla si desea convertir la variable del proceso especificada como entrada del PID. Activando ésta se activan los campos de valor mínimo y máximo, los cuales se puede poner en el mínimo un valor de -32768 y en el máximo un valor de 32767. Pero en este caso utilizaremos un valor de 0 para el mínimo y uno de 10000 para el máximo como se presenta en la figura 90.

En **Alarmas** esta casilla se utiliza si se quiere dar una alarma cuando el sensor detecte que el valor sensado se ha salido del rango dado, para eso se utilizan las casillas de baja y alta para dar este rango. En este caso no se programan.

Figura 91. Pantalla capturada del software TwidoSoft para la visualización de la configuración de la pestaña entrada



Fuente: Autores. Pantalla capturada del software TwidoSoft

6. Se selecciona la pestaña **PID**. Ver figura 92.

Figura 92. Pantalla capturada del software TwidoSoft para la visualización de la pestaña PID

The screenshot shows the TwidoSoft software interface with the PID configuration tab selected. The interface is divided into several sections:

- Tabs:** General, Entrada, PID (selected), AT, Salida.
- Buttons:** Aplicar, Cancelar.
- Consigna:** A text input field for the setpoint.
- Corrector tipo:** A dropdown menu currently set to PID.
- Parámetros:** Three input fields for PID parameters:
 - Kp (x 0,01)
 - Ti (x 0,1 s)
 - Td (x 0,1 s)
- Período de muestreo:** A text input field for the sampling period, with a default value of (10ms) shown.
- Visualizers:** At the bottom, there are two large blue areas labeled PID and Salida. Between them is a block labeled Autómata.PID. The PID area shows a sine wave, and the Salida area shows a square wave.

Fuente: Autores. Pantalla capturada del software TwidoSoft

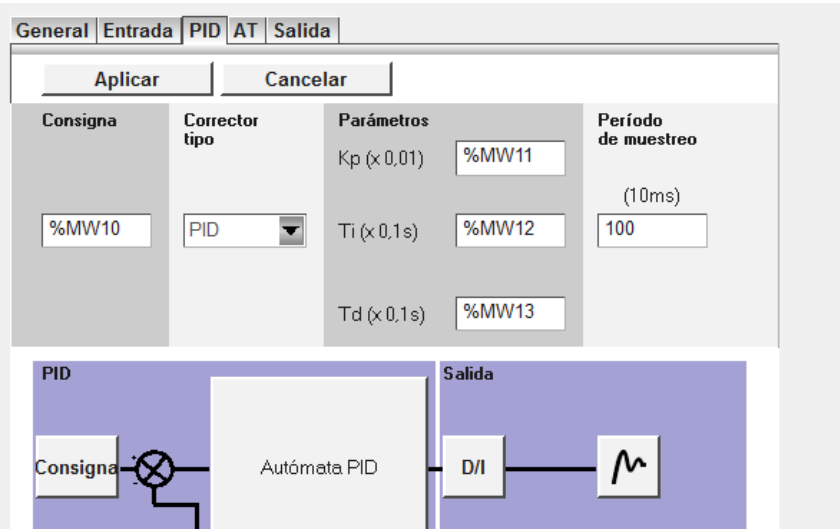
Consigna es el valor de setpoint. En este cuadro se coloca una palabra (%MW0 a %MW2999) de las que no se hayan utilizado anteriormente como se presenta en la figura 93, esta palabra brinda la facilidad de cambiar el setpoint desde el programa, esto se ampliara más adelante.

Corrector tipo: en éste se selecciona el tipo de control que se desea.

Parámetros en esta casilla se introducen las palabras (%MW0 a %MW2999) que son las que van a guardar los valores de las constantes Proporcional, tiempo integral, tiempo derivativo. Ver figura 93.

Periodo de muestreo: es el periodo de muestreo del PID y puede ser una palabra o un número que va desde 1 y 10000 y este valor va multiplicado por un valor base de 10 ms. Como se muestra en la figura 93.

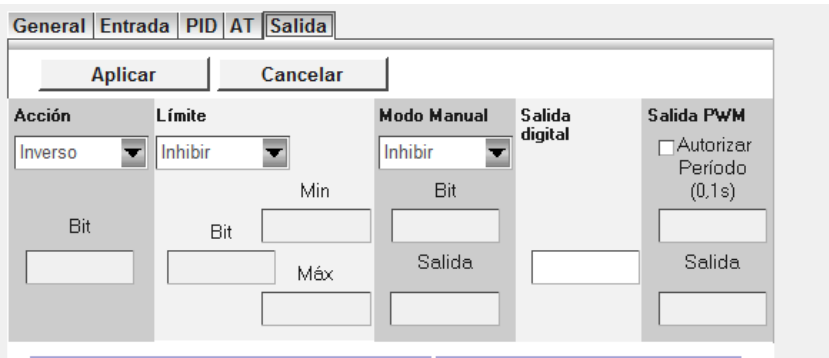
Figura 93. Pantalla capturada del software TwidoSoft para la visualización de la pestaña PID con los parámetros configurados



Fuente: Autores. Pantalla capturada del software TwidoSoft

7. Seleccione la pestaña **Salida** como en la figura 94

Figura 94. Pantalla capturada del software TwidoSoft para la visualización de la pestaña salida.



Fuente: Autores. Pantalla capturada del software TwidoSoft

Acción: en esta casilla se escoge la acción de control, hay tres opciones que son la directa, inversa y dirección de bit.

- **Directa:** cuando la señal de medición aumenta la señal de salida del PID aumenta.
- **Inversa:** cuando la señal de medición disminuye la señal del PID aumenta.
- **Bit:** se puede utilizar un bit interno (%M0 a %M255) o una entrada (%Ix.0 a %Ix.32) para habilitar. La acción es directa si el bit está establecido en 1 e inversa en caso contrario.

Límite: éste se utiliza si desea limitar la salida del PID, existen tres opciones

- **Inhibir:** se utiliza para no limitar la salida
- **Autoriza:** si se selecciona esta opción se habilitan las casillas de mínimo y máximo para limitar la salida.
- **Bit:** si se selecciona esta opción se habilita la casilla de bit para colocar el bit (%M0 a %M255) también se puede utilizar una entrada (%Ix.0 a %Ix.32) donde 1 habilita los límites y 0 los deshabilita.

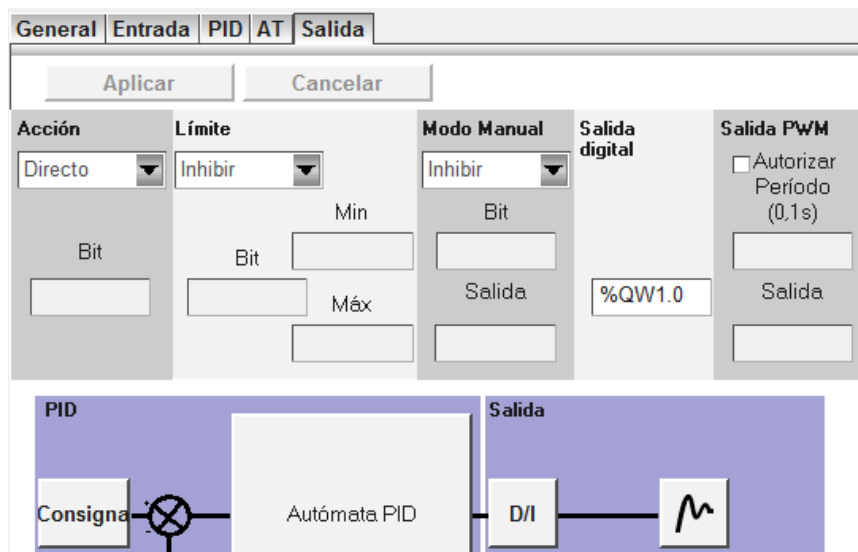
Modo manual: se utiliza si se quiere dar una salida al PID constante. Tiene tres opciones que son:

- **Inhibir:** deshabilita la salida manual
- **Autoresizar:** habilita la salida de forma manual y la casilla donde se puede colocar la salida que se quiere (0 a 10000) o una palabra (%MW0 a %MW2999).
- **Bit:** si selecciona bit puede habilitar (1) o deshabilitar (0) el modulo manual, puede utilizar bit internos o entradas digitales.

Salida analógica: en esta casilla se coloca la salida que se va a utilizar como se observa en la figura 95. Como observación, la versión en español muestra **Salida Digital** lo cual es un error. La versión en inglés trae este error corregido y se aclara que el nombre correcto del bloque es *Salida Analógica*

Salida PWM: Seleccione la casilla si desea utilizar la función PWM del PID. Especifique el período de modulación en la casilla **Período** (0,1 s). Este período debe estar comprendido entre 1 y 500 y puede ser una palabra interna (%MW0 a %MW2999) o una constante interna (%KW0 a %KW255). La precisión del PWM depende de los períodos de PWM y de exploración.

Figura 95. Pantalla capturada del software TwidoSoft para la visualización de la pestaña Salida con los parámetros configurados



Fuente: Autores. Pantalla capturada del software TwidoSoft

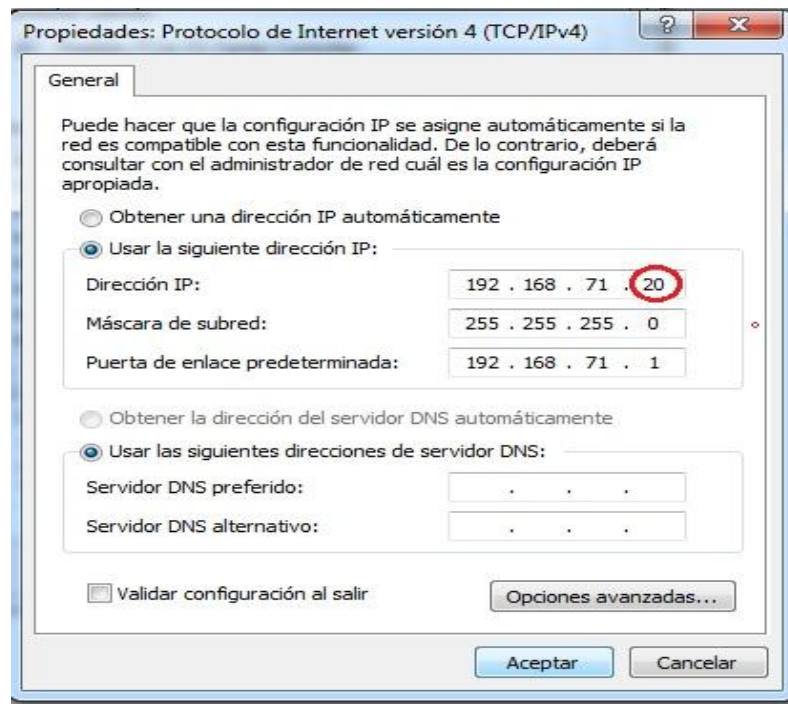
Paso 4: Comunicación entre el PLC Twido y el computador.

Una vez conectado el PLC con el computador por medio del cable RJ45 (usado comúnmente para conectarse a internet por cable) se deben seguir los pasos propuestos a continuación

Pasos a seguir:

1. Entrar en el centro de redes y recursos compartidos del computador y luego oprimir en la opción **Cambiar la configuración del adaptador** y luego oprimir en la opción **conexión de área local**, seguidamente se selecciona donde dice propiedades y en la parte de **Protocolo de internet versión 4 (TCP/IPv4)** se procede a introducir los siguientes valores.

Figura 96. Pantalla capturada para la visualización de la dirección IP

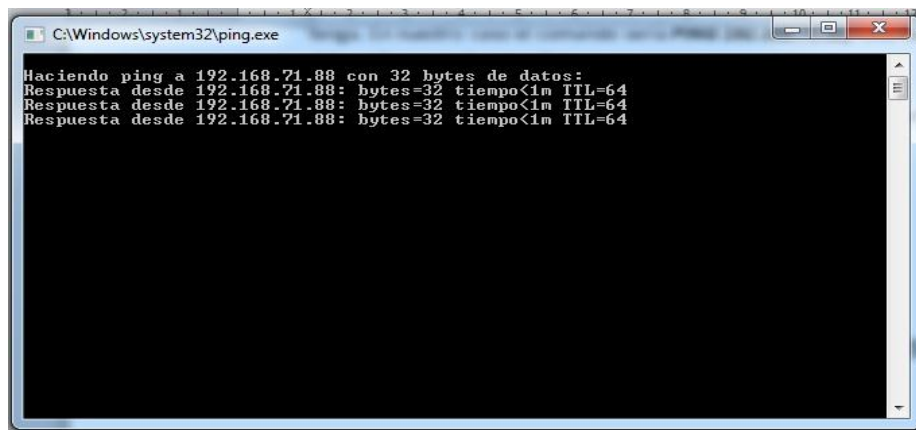


Fuente: Autores. Pantalla capturada del software TwidoSoft

Nota: El numero 20 encerrado con el círculo no debe ser fijo puede ser cualquier valor siempre y cuando sea diferente al que tiene la dirección IP del PLC

Por último le damos **Aceptar** y **Cerrar** y luego se dirige a inicio  y en la parte del buscador se ejecuta el comando **"PING" espacio y la dirección IP del PLC** que este caso es **"192.168.71.88"**. Si el PLC tiene otro IP entonces se coloca el que tenga. Para este caso el comando sería **PING 192.168.71.88**, Una vez hecho esto debe salir un cuadro como el que se muestra a continuación

Figura 97. Pantalla capturada para la visualización de correcta comunicación con le PLC.



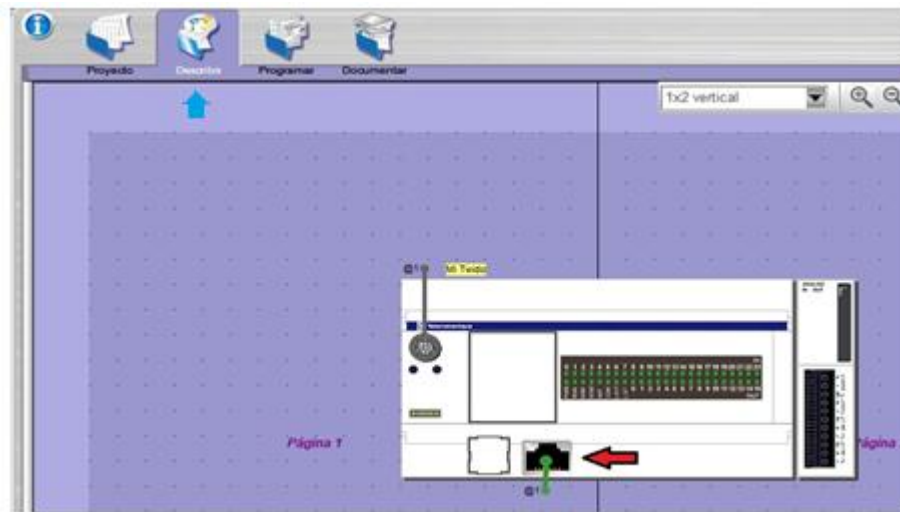
Fuente: Autores. Pantalla capturada del software TwidoSoft

Si el cuadro que aparece no muestra el tiempo de respuesta es porque se cometió algún error o la dirección IP del PLC no es la correcta, debido a que se le asignó otra dirección IP.

2. Después de haber realizado satisfactoriamente el paso 1 procedemos a configurar el IP en el software de TwidoSoft de la siguiente forma.

Primero seleccionamos en la opción **Describir** y le damos doble clic en el conector *ETHERNET* como se muestra en la imagen.

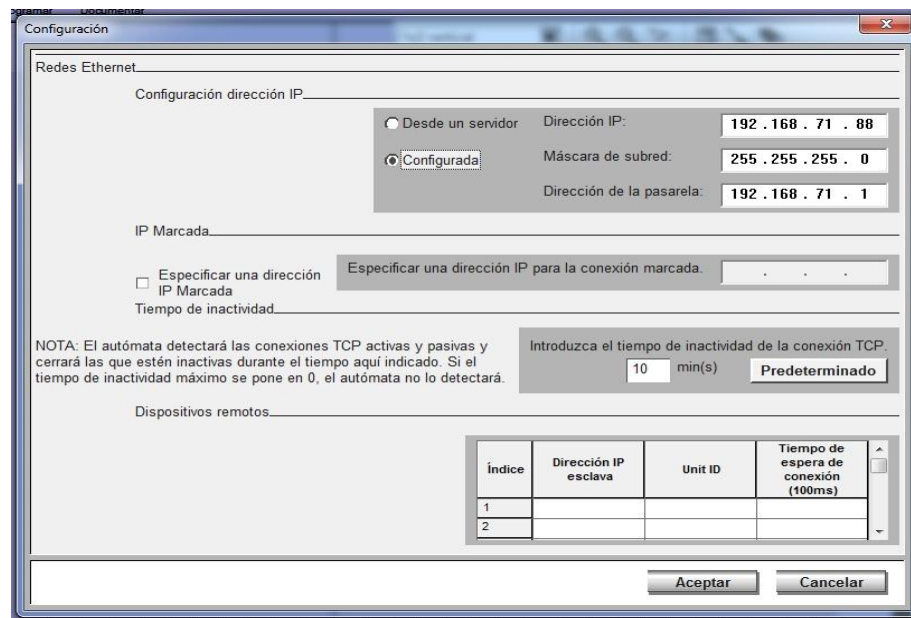
Figura 98. Pantalla capturada del software TwidoSoft para la visualización de la pestaña describir para configurar la dirección IP.



Fuente: Autores. Pantalla capturada del software TwidoSoft

Inmediatamente después se oprime doble clic y se abre una ventana en la cual se debe seleccionar la opción “*Configurada*” e introducir la IP del PLC como se muestra en la imagen.

Figura 99. Pantalla capturada del software TwidoSoft para la visualización para configurar la dirección IP.



Fuente: Autores. Pantalla capturada del software TwidoSoft

Nota1: El único valor que se puede cambiar en esta configuración es la dirección IP que depende de cada PLC que para este ejemplo es **192.168.71.88** mientras que la máscara y la dirección de la pasarela deben ser siempre las mismas que se muestran en la imagen siempre y cuando se halla configurado la red local del computador como se indica en este manual (Paso 1) en caso contrario podrían llegar a ser diferentes.

Nota 2: cada vez que se abra un nuevo programa se debe realizar este paso o si no se puede cometer el error de borrar la dirección IP del plc.

3. Una vez configurada la dirección IP del PLC se debe transferir el programa del PC al PLC y este paso se realiza de la siguiente forma.

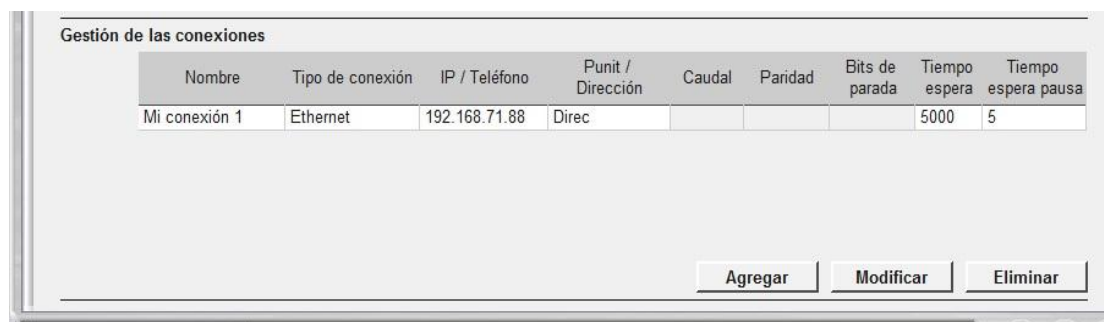
El primer paso es configurar una conexión que contenga la dirección IP del PLC y esto se hace oprimiendo en el siguiente símbolo llamado *Preferencias*, ubicado en la esquina superior derecha del programa.

Figura 100. Pantalla capturada del software TwidoSoft para la visualización del icono Preferencias



Seguidamente se abre una ventana y se dirige al final de esta y en la casilla **Gestión de las conexiones** le damos **Agregar** y nos crea una nueva conexión y se procede a introducir el IP del PLC (192.168.71.88) en la casilla **IP/Teléfono** como se presenta a continuación

Figura 101. Pantalla capturada del software TwidoSoft para la visualización de la gestión de las conexiones.

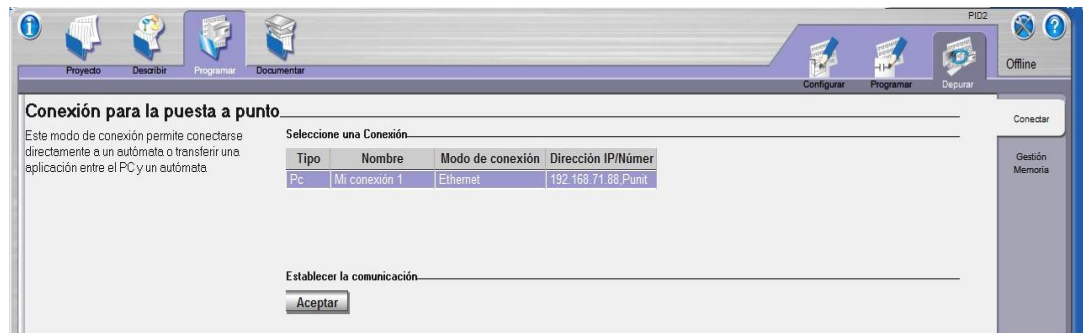


Fuente: Autores. Pantalla capturada del software TwidoSoft

Por ultimo nos vamos al principio de la ventana y le damos **Aplicar**

Luego de haberle dado *Aplicar* oprimimos nuevamente en el símbolo *Preferencias* antes mostrado y después se oprime **Depurar** y se abre una ventana como la siguiente

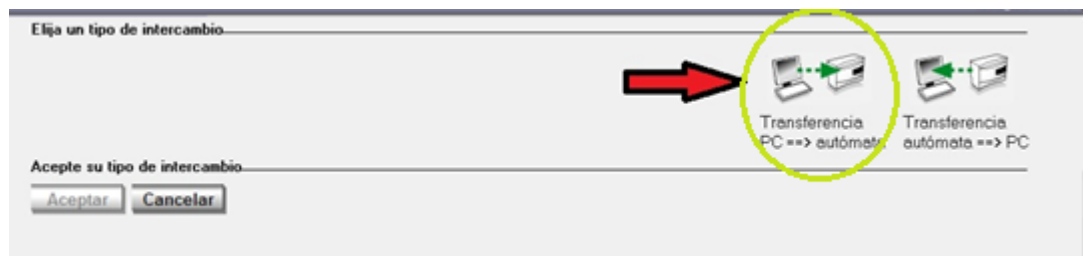
Figura 102. Pantalla capturada del software TwidoSoft para la visualización de la conexión de puesta a punto



Fuente: Autores. Pantalla capturada del software TwidoSoft

Verificar que la dirección IP corresponda con el IP del PLC y se oprime **Aceptar** y luego seleccionamos la opción que dice **Transferencia PC $\Rightarrow$ Autómata**.

Figura 103. Pantalla capturada del software TwidoSoft para la visualización de la transferencia al autómata..



Fuente: Autores. Pantalla capturada del software TwidoSoft

Y por último se oprime **Aceptar**, y aparece un mensaje de advertencia que dice que está a punto de sobrescribir la aplicación del controlador le damos **Aceptar** y con esto se termina la parte de transferencia del programa.

Paso 5: Realización del control.

Una vez transferido el programa al controlador se procede a correrlo e introducir los valores de los parámetros de control como el setpoint, Kp, Ti, Td, Esto lo se realiza a través de una tabla llamada *Tabla de Animación*. Para acceder a esta tabla debemos oprimir en **Gestionar tabla de animación** después de haber ejecutado el programa y se procede a escribir en la casilla *Dirección* cada dirección asignada a cada variable, por ejemplo, el setpoint se estableció como %MW10 luego de haber asignado todas se tiene una tabla como la siguiente

Figura 104. Pantalla capturada del software TwidoSoft para la visualización de la tabla de animación

	Us	Dirección	Símbolo	Actual	Guardado	Formato
1	☒	%M0		0	1	Decimal
2	☒	%IW1.0		0	0	Decimal
3	☒	%MW10		0	1500	Decimal
4	☒	%MW11		0	100	Decimal
5	☒	%MW12		0	999	Decimal
6	☒	%MW13		0	0	Decimal
7	☒	%QW1.0		0	0	Decimal
8						

Fuente: Autores. Pantalla capturada del software TwidoSoft

Para introducir los valores de las constantes se procede a escribir en la columna de *Guardado* y se cargan al PLC oprimiendo el símbolo mostrado en la siguiente imagen.

Figura 105. Pantalla capturada del software TwidoSoft para la visualización de introducción de nuevos valores



Con esto se termina la configuración de la función PID del PLC Twido de Telemecanique.

ANEXO D

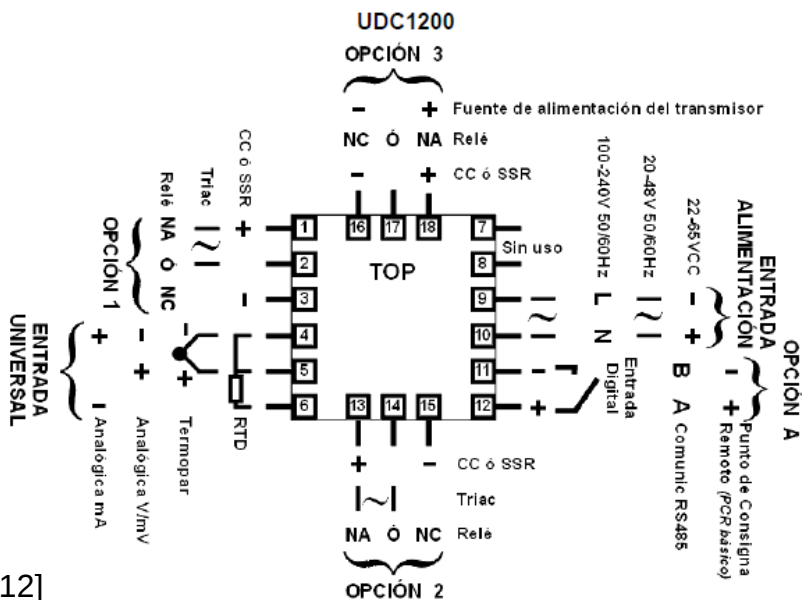
MANUAL DE PROGRAMACIÓN DE LA FUNCIÓN PID DEL UDC1200

El UDC 1200 de Honeywell es un controlador que tiene una pantalla doble de cuatro dígitos. La figura 106 muestra la pantalla principal y en la figura 106 los terminales de conexión para las entradas y salidas.

Figura 106. Foto de la pantalla principal del UDC



Figura 107. Diagrama de conexiones UDC1200



Fuente: [12]

<https://www.honeywellprocess.com/library/support/Public/Documents/51-52-25-123-SP.pdf>

Nota 1: hay que tener en cuenta que el UDC 1200 no tiene todas las entradas y salidas mostradas en la figura 107. Para saber que entradas y salidas posee el controlador se debe mirar el *key Number* y el documento 51-51-16U-78-Issue 14 de Honeywell, por ejemplo el equipo con el *Key Number* DC1203 13731400 (actualmente adquirido por la escuela E3T) no tiene entrada de tensión.

1. MODO SELECCIÓN (SELECT)

El modo selección se utiliza para acceder a las funciones del modo de configuración y funcionamiento.

- 1.1 Para acceder a este modo se mantiene presionado el botón  y  enseguida debe aparecer la figura 108

Figura 108. Foto de la pantalla del UDC en el modo selección



- 1.2 Luego presione  o  para escoger el modo a modificar, las opciones que salen son las que se muestran en la figura 109.

Figura 109. código de los modos

Modo	Pantalla superior	Pantalla inferior
Operario	OPtr	SLCt
Ajuste	SEtP	SLCt
Configuración	ConF	SLCt
Información de producto	inFo	SLCt
Ajuste automático	Atun	SLCt

Fuente: <https://www.honeywellprocess.com/library/support/Public/Documents/51-52-25-123-SP.pdf>. [12]

Operario: al seleccionar este, regresa al estado inicial, es decir muestra el setpoint y el valor del proceso (señal del sensor).

Ajuste: se utiliza para adecuar los parámetros del controlador, es decir por ejemplo la constante de proporcionalidad, tiempo integral etc.

Configuración: este se utiliza para configurar los parámetros de entradas, salidas y alarmas.

Información del Producto: se utiliza para comparar la información del hardware con la información dada por el proveedor.

1.3 Presione  para entrar al modo que desea configurar. El modo configuración y ajuste necesitan un código de acceso, para el de

configuración por defecto es 20 y el de ajuste es 10, presione  o  para introducir el valor del código y luego  para entrar.

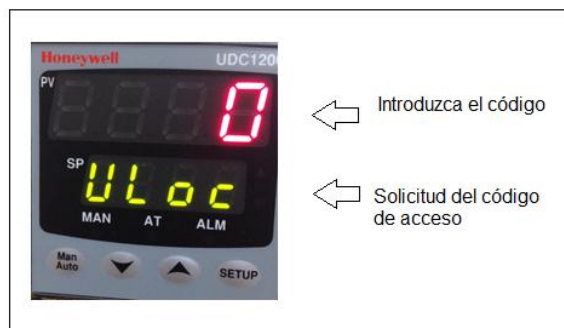
2. MODO CONFIGURACIÓN

2.1 Se procede a entrar en modo configuración como se explicó en el módulo de selección. En este paso debe mostrarse lo que se observa en la figura 110 y 111

Figura 110. Foto de la pantalla en modo configuración del UDC 1200.

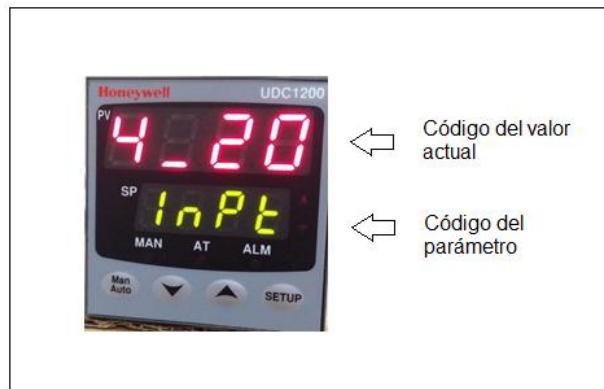


Figura 111. Foto de la pantalla para introducir el código de acceso al modo configuración del UDC 1200.



- 2.2 Una vez estando en el modo configuración en la pantalla inferior a parece el parámetro y en la superior el código del valor actual del parámetro como se muestra en la figura 112.

Figura 112. Foto de la pantalla del UDC 1200 donde se muestra la ubicación de los códigos del controlador



- 2.3 Presione **SETUP**, para desplazarse por los parámetros, después presione **▲** o **▼**, para ajustar el valor necesario, presione **Man Auto** para confirmar la modificación. Tiene dos minutos para confirmar con el botón **Man Auto**, sino volverá al estado anterior.

- 2.4 El primer parámetro a configurar es el tipo de entrada que se va a utilizar, el código del parámetro es **InPt**. Los códigos de las entradas son los mostrados en la figura 113. Como se observa las entradas pueden ser termocuplas, señales de tensión y de corriente, pero el controlador no trae todas estas entradas como se mencionó anteriormente en la nota.

Figura 113. Imagen capturada del manual básico del UDC1200 con los códigos de las entradas.

Rango / tipo de entrada		Consulte en esta tabla los códigos posibles			
Código	Rango y tipo de entrada	Código	Rango y tipo de entrada	Código	Rango y tipo de entrada
bC	B: 100 - 1824 °C	LC	L: 0.0 - 537.7 °C	$P24F$	PtRh20% vs 40%: 32 - 3362 °F
bF	B: 211 - 3315 °F	LF	L: 32.0 - 999.9 °F		
CC	C: 0 - 2320 °C	NC	N: 0 - 1399 °C	PtC	Pt100: -199 - 800 °C
CF	C: 32 - 4208 °F	NF	N: 32 - 2551 °F	PtF	Pt100: -328 - 1472 °F
JC	J: -200 - 1200 °C	rc	R: 0 - 1759 °C	$PtLC$	Pt100: -128.8 - 537.7 °C
JF	J: -328 - 2192 °F	rf	R: 32 - 3198 °F	$PtLF$	Pt100: -199.9 - 999.9 °F
LC	L: -128.8 - 537.7 °C	SC	S: 0 - 1762 °C	0.20	0 a -20 mA*
LF	L: -199.9 - 999.9 °F	SF	S: 32 - 3204 °F	4.20	4 - 20 mA CC
KC	K: -240 - 1373 °C	tC	T: -240 - 400 °C	0.50	0 - 50 mV CC
KF	K: -400 - 2503 °F	tF	T: -400 - 752 °F	10.50	10 - 50 mV CC
LC	L: -128.8 - 537.7 °C	tC	T: -128.8 - 400.0 °C	0.5	0 - 5 V CC
LF	L: -199.9 - 999.9 °F	tF	T: -199.9 - 752.0 °F	1.5	1 - 5 V CC
LC	L: 0 - 762 °C	$P24C$	PtRh20% vs. 40%: 0 - 1850 °C	0.10	0 - 10 V CC
LF	L: 32 - 1403 °F			2.10	2 - 10 V CC

Nota: El punto decimal mostrado en la tabla indica una resolución de 0.1°

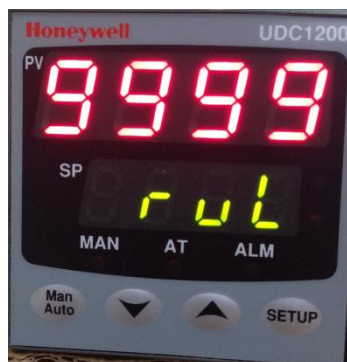
Fuente: <https://www.honeywellprocess.com/library/support/Public/Documents/51-52-25-123-SP.pdf>. [12]

Figura 114. Foto de la pantalla del UDC 1200 en el parámetro entrada



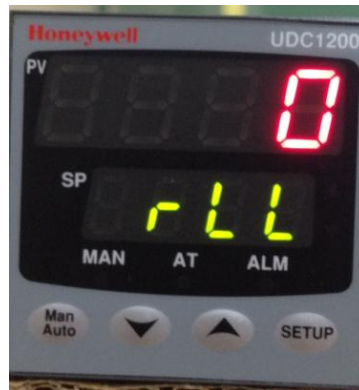
2.5 El siguiente parámetro para configurar es el límite superior de amplitud de escala el cual tiene como código de parámetro **rul** tal como se muestra en la figura 115. En la pantalla superior se coloca el límite superior de la entrada, es decir si la entrada seleccionada es de 0 a 10 V, y se coloca un valor de 9999, cuando la entrada sea 10 el valor leído por el controlador va a ser 9999.

Figura 115. Foto de la pantalla del UDC 1200 en el parámetro límite superior de amplitud de escala



2.6 El parámetro a continuación es el límite inferior de la amplitud de escala y su código de parámetro es **rlL** como se muestra en la figura 116. En la pantalla superior se coloca el límite inferior que se quiere usar, es decir si se escoge una entrada de 4 a 20 mA y se coloca que el valor de límite inferior es de 0, cuando la señal de entrada sea 4 mA la lectura del controlador va a ser 0.

Figura 116. Foto de la pantalla del UDC 1200 en el parámetro límite inferior de amplitud de escala



- 2.7 El parámetro de “posición del punto decimal” tiene como código  como se muestra en la figura 117. Este se puede variar en la pantalla superior desde 0 hasta 3, donde:

0=xxxx.

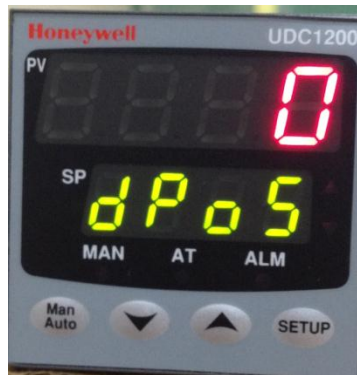
1=xxx.x

2=xx.xx

3=x.xxx

Este parámetro se utiliza para modificar el punto decimal de la entrada es decir si se escoge 2 en la pantalla superior y anteriormente en el límite superior de escala se había escogido 9999 se transforma en 99.99.

Figura 117. Foto de la pantalla del UDC 1200 en el parámetro posición del punto decimal



2.8 El código del parámetro de tipo control es **CLYP** como se observa en la figura 119. Este parámetro se puede configurar de dos formas las cuales se muestran con sus respectivos códigos en la figura 118. Por defecto viene solo con control primario.

Figura 118. Códigos de las opciones de tipo de control

SnGL	Sólo primario
duAL	Primario y secundario (p.ej. calor y frío)

Fuente: <https://www.honeywellprocess.com/library/support/Public/Documents/51-52-25-123-SP.pdf>. [12]

Figura 119. Foto de la pantalla del UDC 1200 en el parámetro tipo de control



2.9 El siguiente parámetro es la acción de control de salida y su código es **Ctrl** como se muestra en la figura 120. Este parámetro se configura en acción de control directa o inversa, en la figura 121 se muestra sus respectivos códigos.

Figura 120. Foto de la pantalla del UDC 1200 en el parámetro acción de control de salida



Figura 121. Códigos de las opciones de acción de control de salida

rEu	Acción inversa (p. ej. calentamiento)
d ir	Acción directa (p. ej. enfriamiento)

Fuente: <https://www.honeywellprocess.com/library/support/Public/Documents/51-52-25-123-SP.pdf>. [12]

Acción Directa: si la variable aumenta, la salida aumenta y si la variable disminuye la salida disminuye.

Inversa: Se considera cuando a punto de ajuste constante si la variable aumenta la salida disminuye.

- 2.10 Hay dos parámetros de alarma que es la tipo 1 y tipo 2, sus códigos respectivos son **ALA1**, **ALA2**. Estas se pueden configurar en la pantalla superior con los valores mostrados en la figura 123.

Figura 122. Foto de la pantalla del UDC 1200 en el parámetro tipo de alarma.



Figura 123. opciones de selección para el parámetro tipo de alarma

P_Hi	Alarma alta de proceso
P_Lo	Alarma baja de proceso
dE	Alarma de desviación
bAnd	Alarma de banda
none	Ninguna alarma

- 2.11 El parámetro de alarma de lazo tiene como código **LAEn**, tiene para seleccionar en la pantalla superior **dISA** (deshabilita) y **EnAb** (habilita). Este

parámetro tiene la función de una alarma especial, que detecta las fallas en el bucle de realimentación de control.

Figura 124. Foto de la pantalla del UDC 1200 en el parámetro alarma de lazo.



2.12 El parámetro alarma inhibida tiene como código **Inh** , es un alarma en el arranque. Se puede configurar en la pantalla superior con los códigos mostrados en la figura 126.

Figura 125. Foto de la pantalla del UDC 1200 en el parámetro alarma inhibida



Figura 126. opciones de configuración del parámetro alarma inhibida

none	Ninguna alarma inhibida
ALA 1	Alarma 1 inhibida
ALA2	Alarma 2 inhibida
both	Alarma 1 y alarma 2 inhibidas

Fuente: <https://www.honeywellprocess.com/library/support/Public/Documents/51-52-25-123-SP.pdf>. [12]

2.13 El parámetro “uso de salida 1” tiene como código **USE 1**, este se utiliza para escoger como se va utilizar la salida 1, es decir si este va a ser una salida de una alarma o va a ser la señal de control. En la figura 128 se muestran los códigos de las posibles configuraciones de este parámetro.

Figura 127. Foto de la pantalla del UDC 1200 en el parámetro uso de salida 1



Figura 128. Opciones de configuración del parámetro uso de salida 1

Pr_1	Potencia primaria
SEc	Potencia secundaria
Al_d	Alarma 1, directa
Al_r	Alarma 1, inversa
A2_d	Alarma 2, directa
A2_r	Alarma 2, inversa
LP_d	Alarma de lazo, directa
LP_r	Alarma de lazo, inversa
Or_d	Alarma lógica 1 OR 2, directa
Or_r	Alarma lógica 1 OR 2, inversa
Ad_d	Alarma lógica 1 AND 2, directa
Ad_r	Alarma lógica 1 AND 2, inversa
rEtS	Retransmisión del pto. de consigna
rEtP	Retransmisión de la variable de proceso

Fuente: <https://www.honeywellprocess.com/library/support/Public/Documents/51-52-25-123-SP.pdf>. [12]

- 2.14 Para los parámetros uso salida 2 y uso salida 1 es lo mencionado en el paso 13.
- 2.15 Para los parámetros “rango de salida analógica 1”, “rango de salida analógica 2”, “rango de salida analógica 3” tiene los siguientes códigos respectivamente **LYP1**, **LYP2**, **LYP3**. La configuración de estos parámetros consiste en escoger el tipo de señal que tendrán las salidas por ejemplo la salida 2 como se muestra en la figura 129 es una de tensión de 0 a 10 V. Los códigos de las señales de salida se muestran en la figura 129.

Figura 129. Foto de la pantalla del UDC 1200 en el parámetro rango salidas analógicas



Figura 130. Opciones de salidas para el controlador

0.5	0 a 5 V CC salida 1
0.10	0 a 10 V CC salida
2.10	2 a 10 V CC salida
0.20	0 a 20 mA CC salida
4.20	4 a 20 mA CC salida

Fuente: <https://www.honeywellprocess.com/library/support/Public/Documents/51-52-25-123-SP.pdf>. [12]

2.16 El siguiente parámetro es la retransmisión de escala máximo del parámetro de salida el cual tiene para cada salida el siguiente código `ro1H`, `ro2H`, `ro3H`. En la pantalla superior se puede modificar entre -1999 a 9999, si se escoge por ejemplo en este parámetro 9999 y en el de rango de salida 0-5V, el valor de visualización de la salida será en 5V un valor de 9999.

Figura 131. Foto de la pantalla del UDC 1200 en el parámetro retransmisión de la escala del parámetro de salida



- 2.17 El siguiente parámetro es la retransmisión de escala mínimo del parámetro de salida el cual tiene para cada salida el siguiente código **ro1L**, **ro2L**, **ro3L**. En la pantalla superior se puede modificar entre -1999 a 9999, si se escoge por ejemplo en este parámetro 0 y en el de rango de salida 0-5V, el valor de visualización de la salida será en 0V un valor de 0.

Figura 132. Foto de la pantalla del UDC 1200 en el parámetro retransmisión de escala mínimo del parámetro de salida



- 2.18 El siguiente parámetro es módulo de visualización en este caso se escogió 1 para ver el PV y el setpoint como se muestra en la figura 133

Figura 133. Foto de la pantalla del UDC 1200 en el parámetro módulo de visualización.



2.19 El parámetro “protocolo de comunicación serie” tiene como código **Prot** , este se utiliza para escoger el protocolo de comunicación con otros equipo, estos se pueden escoger en la pantalla superior, los códigos de los protocolo de comunicación se muestran en la figura 134.

Figura 134. Foto de la pantalla del UDC 1200 en el parámetro protocolo de comunicación.



Figura 135. Opciones de comunicación del UDC100

ASC I	ASCII
r7bn	Modbus sin paridad
r7bE	Modbus con paridad par
r7bo	Modbus con paridad impar

2.20 El siguiente parámetro es “velocidad en baudios” su código es **bAud** . los valores posibles de la velocidad son los mostrados en la figura 136.

Figura 136. Opciones de velocidad en baudios del controlador

1.2	1.2 kbps
2.4	2.4 kbps
4.8	4.8 kbps
9.6	9.6 kbps
19.2	19.2 kbps

Fuente: <https://www.honeywellprocess.com/library/support/Public/Documents/51-52-25-123-SP.pdf>. [12]

2.21 El parámetro de dirección del equipo tiene como código **Rddr** , las direcciones que se le pueden dar al equipo son 1 a 225 (Modbus) y 1 a 99 (ASCII)

2.22 El parámetro de escritura de comunicaciones tiene como código **CoEn** , el cual se puede configurar con lectura/escritura o solo lectura, los códigos para la pantalla superior se muestran en la figura 137.

Figura 137. Opciones del Parámetro escritura de comunicación.

r_w	Lectura / escritura
r_0	Sólo lectura

Fuente: <https://www.honeywellprocess.com/library/support/Public/Documents/51-52-25-123-SP.pdf>. [12]

- 2.23 El parámetro “configuración del código de acceso” tiene como código **CLoc**. Este parámetro se utiliza para cambiar la clave de acceso al modo configuración, se puede meter valores entre 0 – 9999.

- 2.24 Presionado el botón  y  para volver al modo selección

3. MODO AJUSTE

- 3.1 Se procede a entrar en modo Ajuste como se explicó en el módulo de selección.

Figura 138. Foto de la pantalla del UDC 1200 en la entrada del modo ajuste.



- 3.2 Presione  para desplazarse por los parámetros, después presione  o , para ajustar el valor necesario.

- 3.3 El parámetro “constante de tiempo de filtro de entrada” tiene como código **FILT**. Tiene la función de eliminar impulsos extraños de la variable del Proceso, se puede poner un valor que este en el rango de 0 hasta 100 donde 0 es apagado.

Figura 139. Foto de la pantalla del UDC 1200 en el parámetro constante de tiempo de filtro de entrada



- 3.4 El parámetro “Offset de variable de proceso” tiene como código **OFFS**. Se utiliza para agregarle un offset a la variable del proceso cuando presenta algún error, es decir por ejemplo cuando el PV (valor del proceso) da un valor de 20 y debe ser de 40 en el offset se coloca 20.

Figura 140. Foto de la pantalla del UDC 1200 en el parámetro Offset de variable de Proceso



- 3.5 El parámetro “Potencia primaria de salida” tiene como código **PPLW**. Este parámetro es de lectura es decir no se configuran porque lo que hacen es mostrar la potencia de salida que está enviando el controlador.
- 3.6 Parámetro “proporcional primaria” tiene como código **Pb_P**. En este se introduce el valor de la constante proporcional necesitada por el sistema como se muestra en la figura 141

Figura 141. Foto de la pantalla del UDC 1200 en el parámetro Proporcional primaria.



- 3.7 La constante de tiempo integral tiene como código **ArSt**. Esta se puede seleccionar desde 1 segundo hasta 99 minutos con 59 segundos. Esta opción también se puede desactivar.

Figura 142. Foto de la pantalla del UDC 1200 en el parámetro constante de tiempo integra



- 3.8 La constante de tiempo derivativo tiene como código **rALE**, la cual puede variar desde 0 segundos hasta 99 minutos con 59 segundos.

Figura 143. Foto de la pantalla del UDC 1200 en el parámetro constante de tiempo derivativo



- 3.9 Reset manual tiene como código **bAS**. Se utiliza para ajustar la salida proporcional con el objetivo de compensar ante variaciones del proceso. Se expresa como un porcentaje de la salida y se ajusta en el rango de 0 a 100% (cuando solo hay una salida) y de -100 a 100% (cuando hay dos salidas). El valor por defecto es 25%.

Figura 144. Foto de la pantalla del UDC 1200 en el parámetro Reset manual.



- 3.10 Límite superior del punto de consiga tiene como código **SPUL**. Este parámetro se coloca para que el valor de consigna no sobrepase ese valor, por

ejemplo si se coloca en este parámetro 2000 y luego se pone en el setpoint 3000 solo va a llegar a 2000.

Figura 145. Foto de la pantalla del UDC 1200 en el parámetro límite superior del punto de consigna.



- 3.11 Límite inferior del punto de consigna tiene como código **SPLL**. Este parámetro se coloca para que el valor de consigna no descienda de ese valor, por ejemplo si se coloca en este parámetro 1000 y luego se pone en el setpoint 500 solo va a llegar a 1000.
- 3.12 Límite de potencia de salida principal tiene como código **OPuL** en este parámetro se limita la potencia de salida entre el 0 al 100%, es decir si se escoge una señal de salida de 0 a 10 V y se coloca un porcentaje en este parámetro de 80% la tensión de salida máxima es de 8 V.

Figura 146. Foto de la pantalla del UDC 1200 en el parámetro límite de potencia de salida principal.



- 3.13 “El tiempo de ciclo de salida” tiene para cada salida los siguientes códigos **CL1**, **CL2**, **CL3**. En este parámetro se pueden colocar los siguientes valores 0.5, 1, 2, 4, 8, 16, 32, 64, 128, 256 o 512 seg, entre más pequeño sea este valor es mejor la señal de control. Este se utiliza para la operaciones de relés, pero entre más pequeño sea el tiempo de este parámetro la vida útil del relé es menor.
- 3.14 El pre ajuste automático tiene como código **APt**. Este parámetro se puede activar o desactivas, se activa cuando se quiere que el autoajuste se inicie cuando empieza el proceso.

Figura 147. Foto de la pantalla del UDC 1200 en el parámetro pre ajuste automático



- 3.15 Selección del control automático/manual este parámetro tiene como código **PaEn**, este parámetro se puede activar o desactivar, cuando se activa se puede modificar la señal de control manualmente, es decir se puede colocar una señal de control constante. En este caso se desactivo.

Figura 148. Foto de la pantalla del UDC 1200 en el parámetro selección del control automatico/manual



- 3.16 Ajuste de rampa en el punto de consigna mostrado en modo operativo tiene como código **SP_r**, habilita o deshabilita la visualización del parámetro Valor de rampa del punto de consigan.

Figura 149. Foto de la pantalla del UDC 1200 en el parámetro Ajuste de rampa en el punto de consigna mostrado en el modo operativo



- 3.17 Valor de rampa del punto de consigan tiene como código **rP**. Este parámetro es la velocidad a la que el valor del setpoint actual se moverá hacia su valor del setpoint establecido.

- 3.18 Valor del punto de consigna su código es **SP**. En este parámetro se introduce el valor del setpoint que se quiere como se muestra en la figura 148

Figura 150. Foto de la pantalla del UDC 1200 en el parámetro valor punto de consigna.



- 3.19 Puede cambiar la clave de acceso al modo ajuste

- 3.20 Presionado el botón  y  para volver al modo selección

ANEXO E

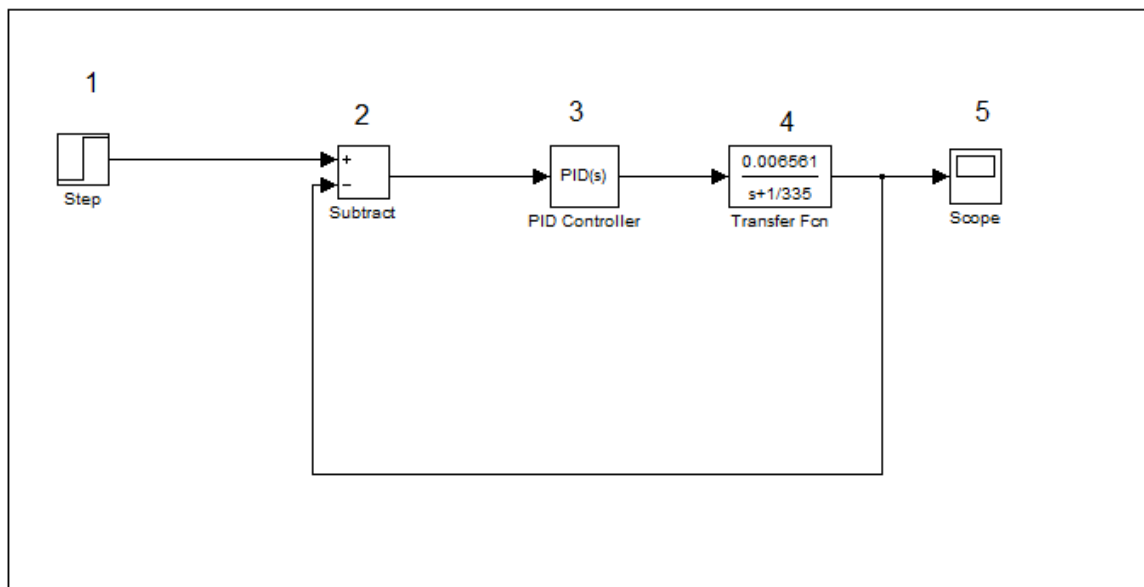
PROGRAMAS DE SIMULACIÓN EN SIMULINK

Este anexo muestra los diferentes programas elaborados en la herramienta Simulink del Software Matlab, que fueron necesarios para dar un mayor soporte a la realización del proyecto.

E1. PROGRAMA DE SIMULACIÓN DE CONTROL PARA EL HORNO

Para la simulación con la planta del horno se colocó un tiempo de simulación de 2000 segundos para poder observar todo el comportamiento de la planta. A continuación se muestra el programa.

Figura 151. Planta para el horno implementada en Simulink



Fuente: Pantalla de captura Software Simulink

1. El Step genera el punto de consigna (setpoint)
2. Subtract genera la señal de error.

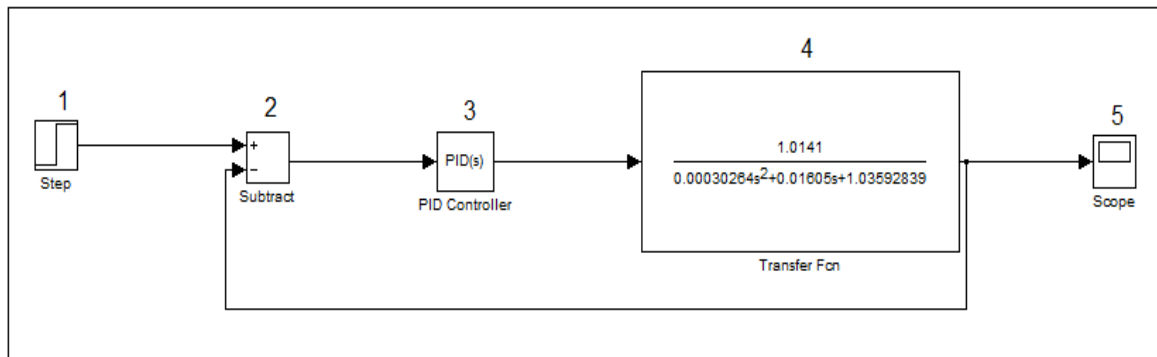
3. PID Controller crea la señal de control, este deja modificar los diferentes parámetros del PID para poder obtener los más adecuados. Los parámetros que se pueden cambiar son las constantes proporcional, integral y derivativo
4. Transfer Fcn simula la planta
5. Scope crea la gráfica de comportamiento de la planta.

E2. PROGRAMAS DE SIMULACIÓN DE CONTROL PARA EL MOTOR CON CARGA Y SIN CARGA

Para simular el motor con carga rotacional se multiplicó el momento de inercia del motor por 5, dando así una nueva planta. A continuación se muestran los programas para el motor con car y sin carga.

Motor sin carga

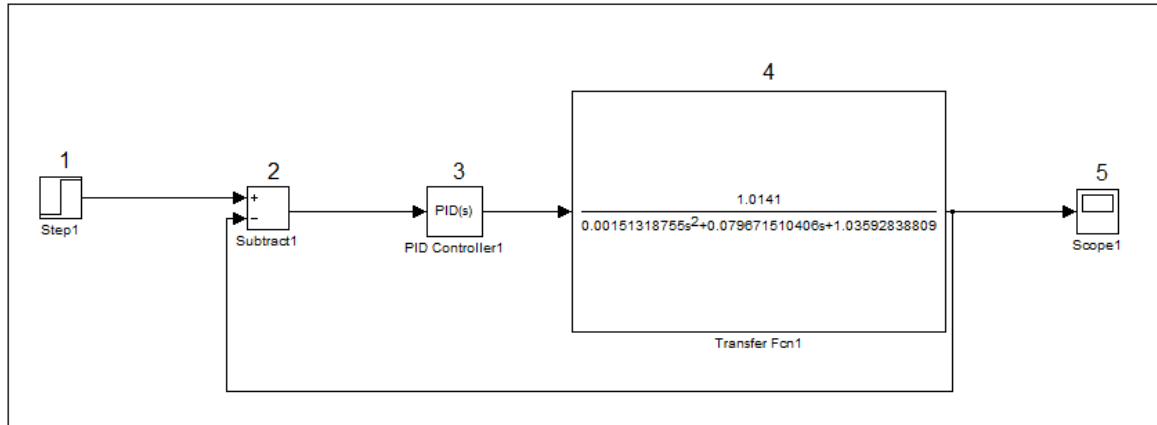
Figura 152. Programa para la implementación del motor sin carga en Simulink



Fuente: Pantalla de captura Software Simulink

Motor con carga

Figura 153. Programa para la implementación del motor con carga en Simulink



Donde

1. El Step genera el punto de consigna (setpoint)
2. Subtract genera la señal de error.
3. PID Controller crea la señal de control, este deja modificar los diferentes parámetros del PID para poder obtener los más adecuados.
4. Transfer Fcn simula la planta
5. Scope crea la gráfica de comportamiento de la planta.

E3. MOTOR CON CARGA DE ELEVACIÓN

Se quiso comprobar el comportamiento de uno de los controladores cuando el motor tuviera una carga de elevación. Para esta prueba fue escogido el PLC de Siemens. Se tuvieron que buscar nuevos constantes de control quedando de la siguiente forma:

$$k_p = 0.01$$

$$T_i = 9 * 10^{-5} [min]$$

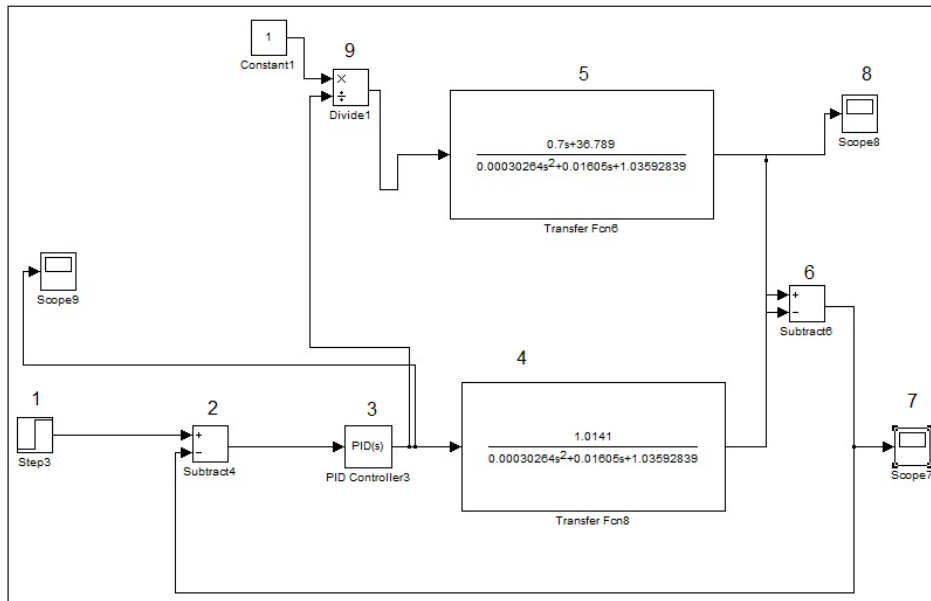
$$T_d = 0.0003166 [min]$$

El modelo utilizado en Laplace para la simulación fue el siguiente:

$$\omega = \frac{k_m * V_a}{(R_a + s * l_a)(J * s + b) + k_m^2} - \frac{(R_a + s * l_a) * T_r}{s * ((R_a + s * l_a)(J * s + b) + k_m^2)}$$

A continuación se muestran los programas utilizados en simulink y en Labview con sus respectivos resultados.

Figura 154. Programa en simulink para el motor con un torque resistente constante, el momento de inercia de la carga visto en el motor es despreciable



Se utiliza para colocar el punto de consigna

1. Calcula el error del proceso
2. Hace el control PID
3. Es la planta del motor.
4. efecto del par resistente
5. Le agrega el efecto del par resistente al motor.
6. Muestra el comportamiento de la planta.
7. Muestra el efecto de torque resistente
8. Bloque divisor

Figura 155. Resultado obtenido en Simulink despreciando el momento de inercia de la carga

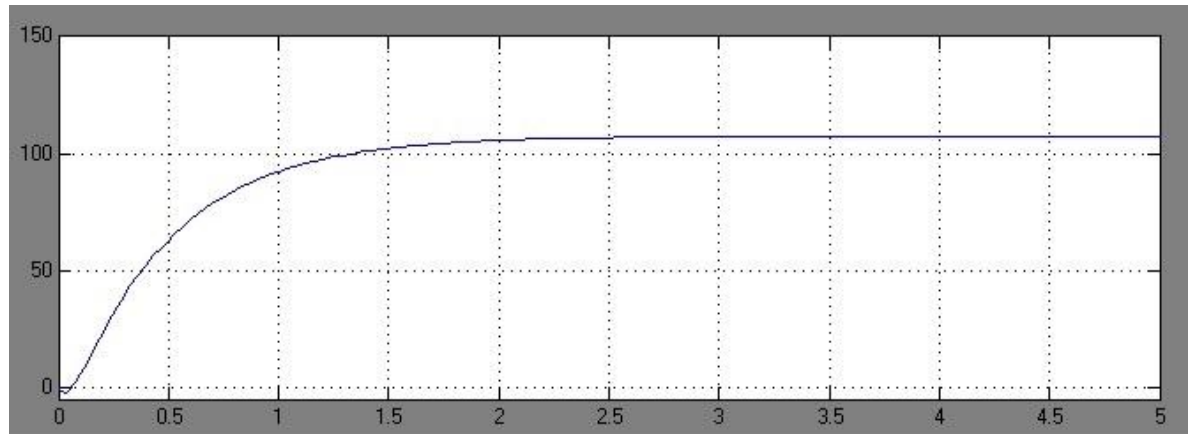
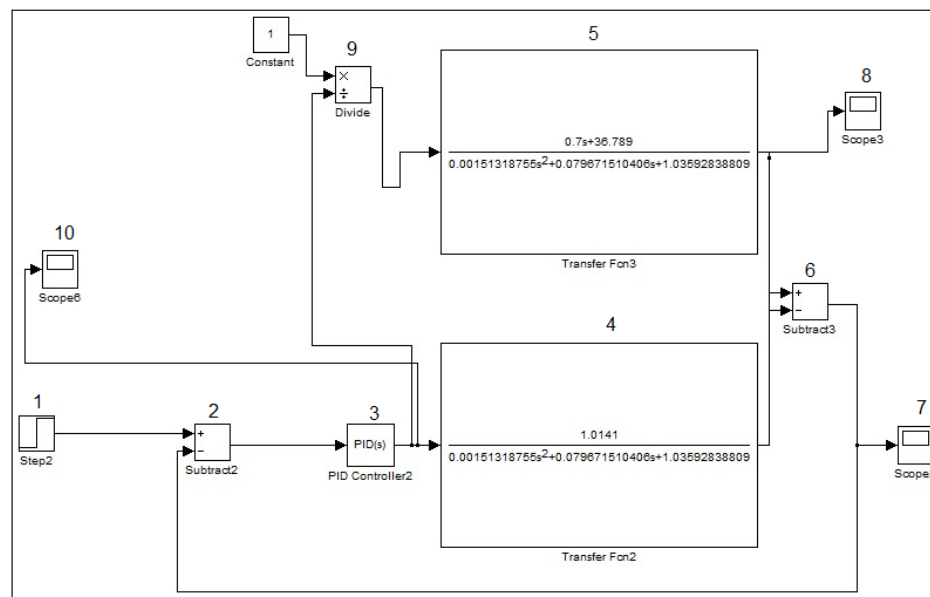


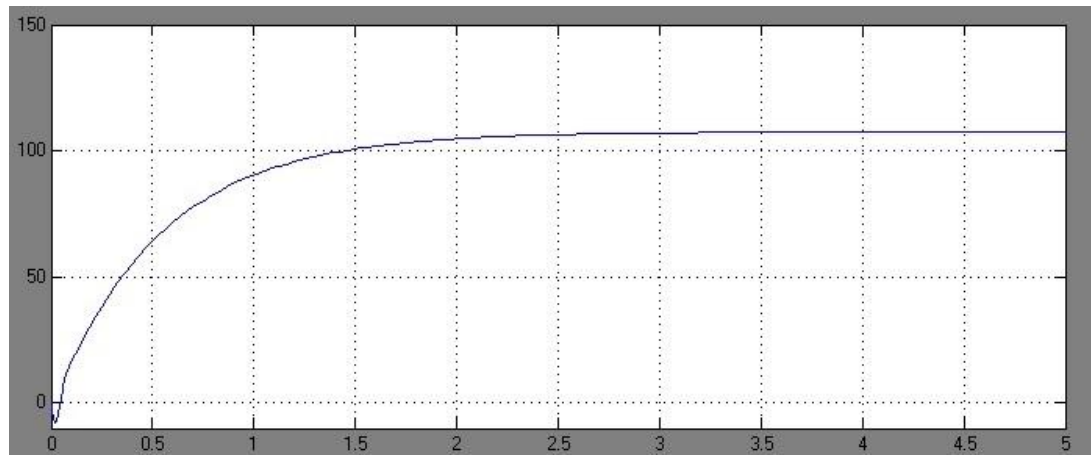
Figura 156. Programa en simulink para el motor con un torque resistente constante, teniendo en cuenta el momento de inercia de la carga.



1. Se utiliza para colocar el punto de consigna
2. Calcula el error del proceso
3. Hace el control PID
4. Es la planta del motor.
5. Simula el efecto del par resistente en la velocidad
6. Le agrega el efecto del par resistente al motor.

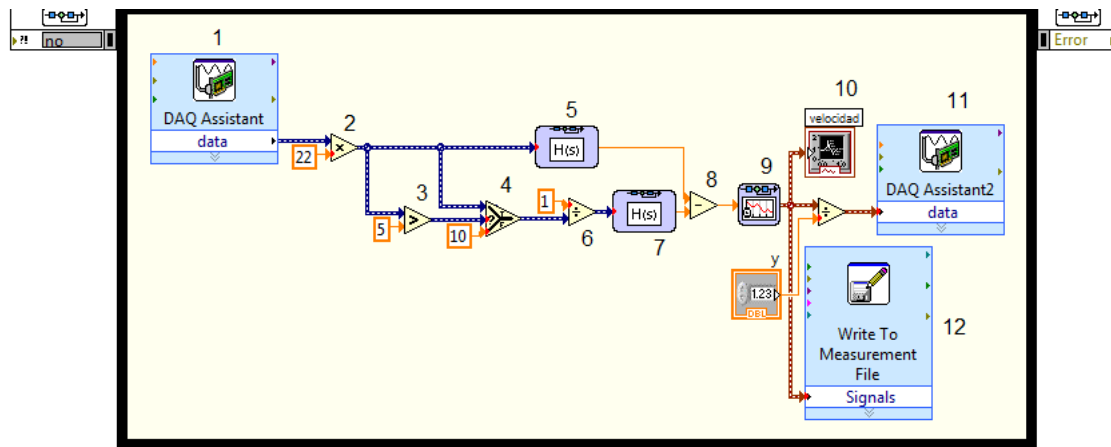
7. Muestra el comportamiento de la planta.
8. Muestra el efecto de torque resistente
9. Bloque divisor
10. Muestra el comportamiento de la fuente de alimentación.

Figura 157. Programa en simulink para el motor con un torque resistente constante, teniendo en cuenta el momento de inercia de la carga.



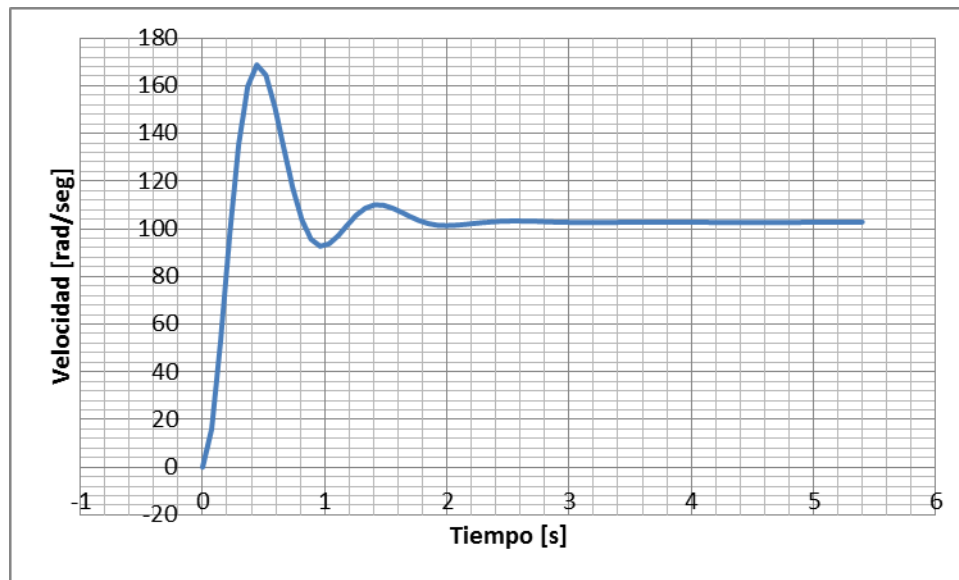
Comparando los resultados en simulink se observa que la simulación echa con el motor despreciando el momento de inercia de la carga obtuvo el tiempo de asentamiento menor.

Figura 158. Programa en Labview para el motor con un torque resistente constante (una carga elevadora).

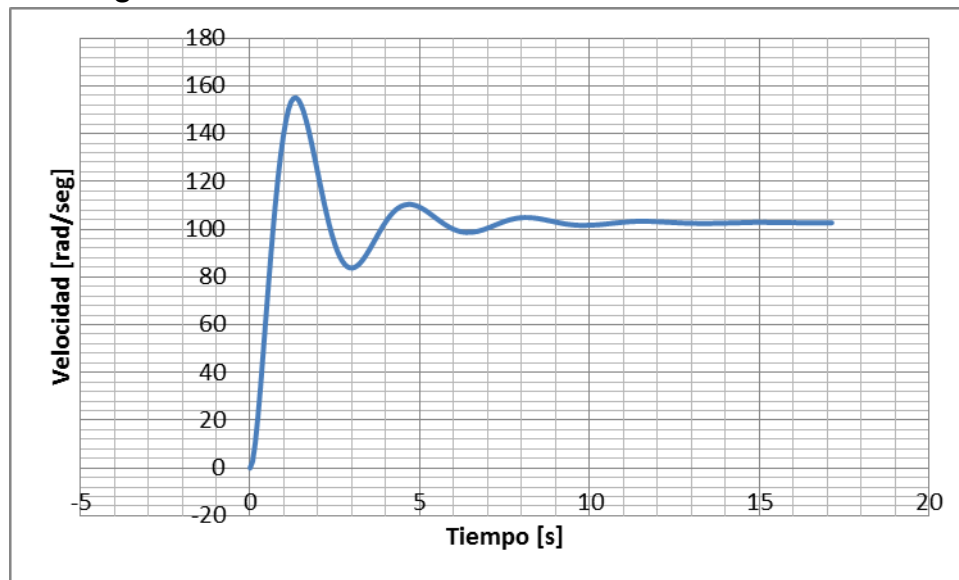


1. Adquiere la señal de control a través de la tarjeta de adquisición de datos USB6009
2. Transforma la señal de control en la señal de alimentación de la planta.
3. Verifica que la tensión del motor sea mayor que 5.
4. Deja pasar la señal de tensión si esta es mayor que 5 si no impone una tensión de 10, esto se hizo con el objeto de evitar que la planta generara velocidades negativas.
5. Es la planta del motor
6. Bloque divisor.
7. comportamiento del torque resistente.
8. Le agrega el efecto del torque.
9. Ayuda a mostrar los datos de la simulación correctamente
10. Grafica el comportamiento del motor
11. Envía la señal del sensor
12. Guarda la información en un bloc de notas.

Figura 159. Resultado con el PLC de Siemens despreciando el efecto del momento de inercia de la carga.



Resultado con el PLC de Siemens teniendo en cuenta el efecto del momento de inercia de la carga.



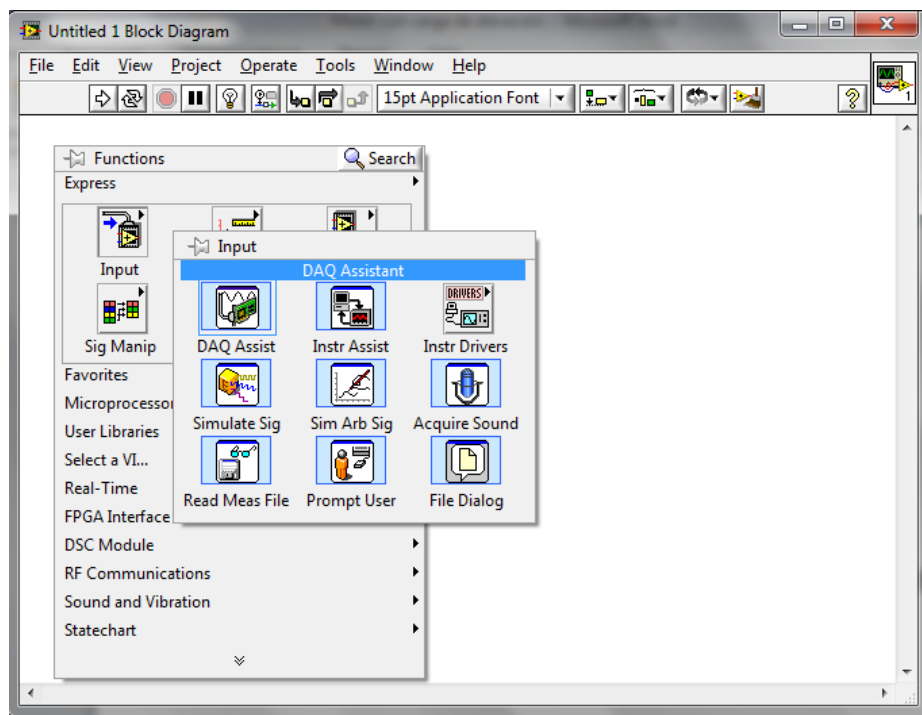
Como se observa en las simulaciones hechas por Simulink y por Labview, el tiempo de asentamiento en ambas fue similar para el caso en el que momento de inercia es menor (en vacío).

ANEXO F

CONFIGURACIÓN DE LA TARJETA DE ADQUISICIÓN DE DATOS USB6009

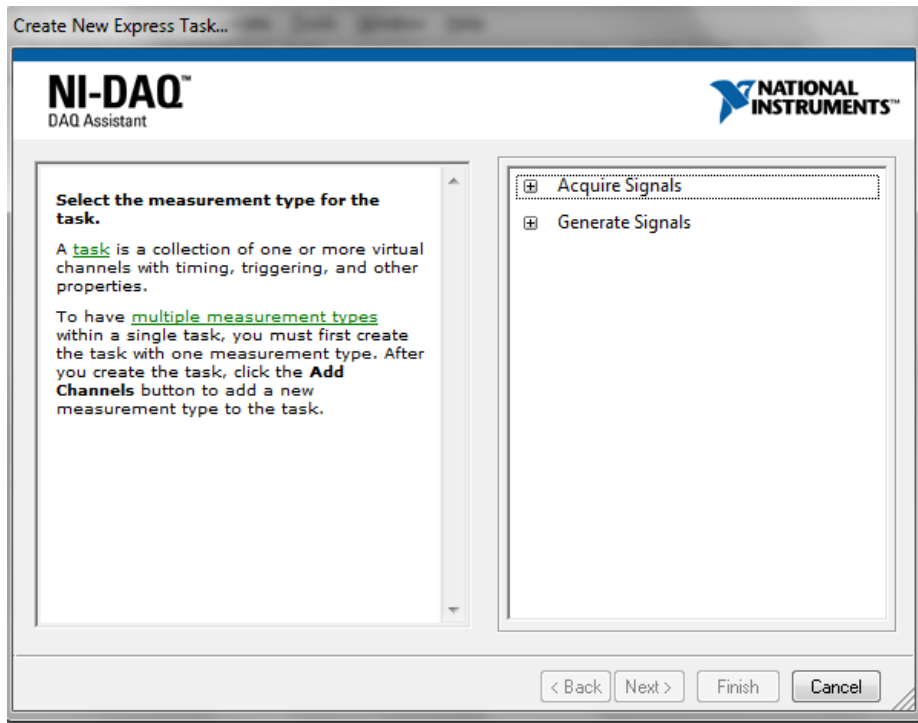
1. Instalar el software de reconocimiento de la tarjeta
2. Abrir el programa Labview que se desea comunicar.
3. En la pantalla presione clic derecho →express→input→DAQ Assist como se observa en la figura 2323

Figura 160. Visualización de pantalla de ingreso del bloque DAQ Assist



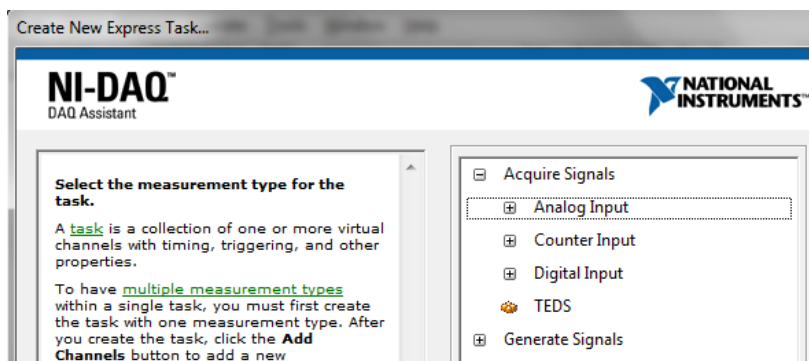
4. El siguiente paso se selecciona la opción de generar señal o adquirir una señal. Ver figura 333

Figura 161. Visualización de pantalla de elección de tipo de señal



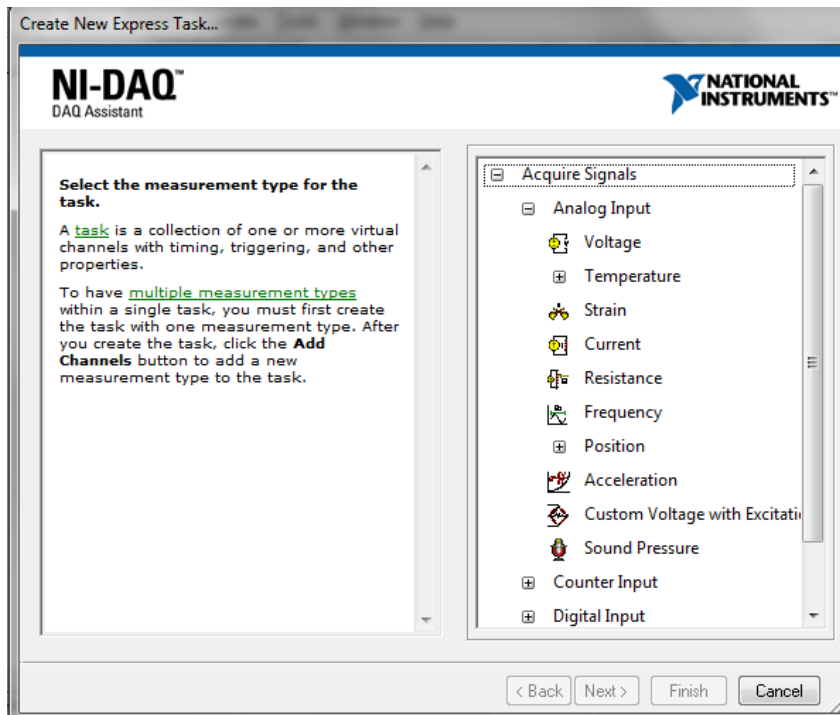
5. Para el caso que se seleccione *Adquirir* señal se selecciona el tipo de señal. Tener en cuenta que para una entrada analógica solo se puede seleccionar la opción Voltaje debido a las especificaciones de la tarjeta USB6009.

Figura 162. Visualización de pantalla de elección de tipo de entrada o salida



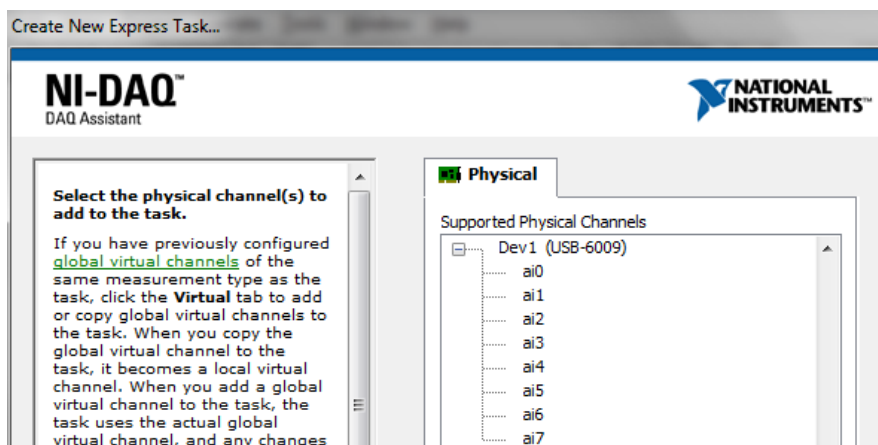
6. Para el ejemplo se selecciona Adquirir entrada→entrada analógica → Voltaje.

Figura 163. Visualización de pantalla selección de tipo de señal



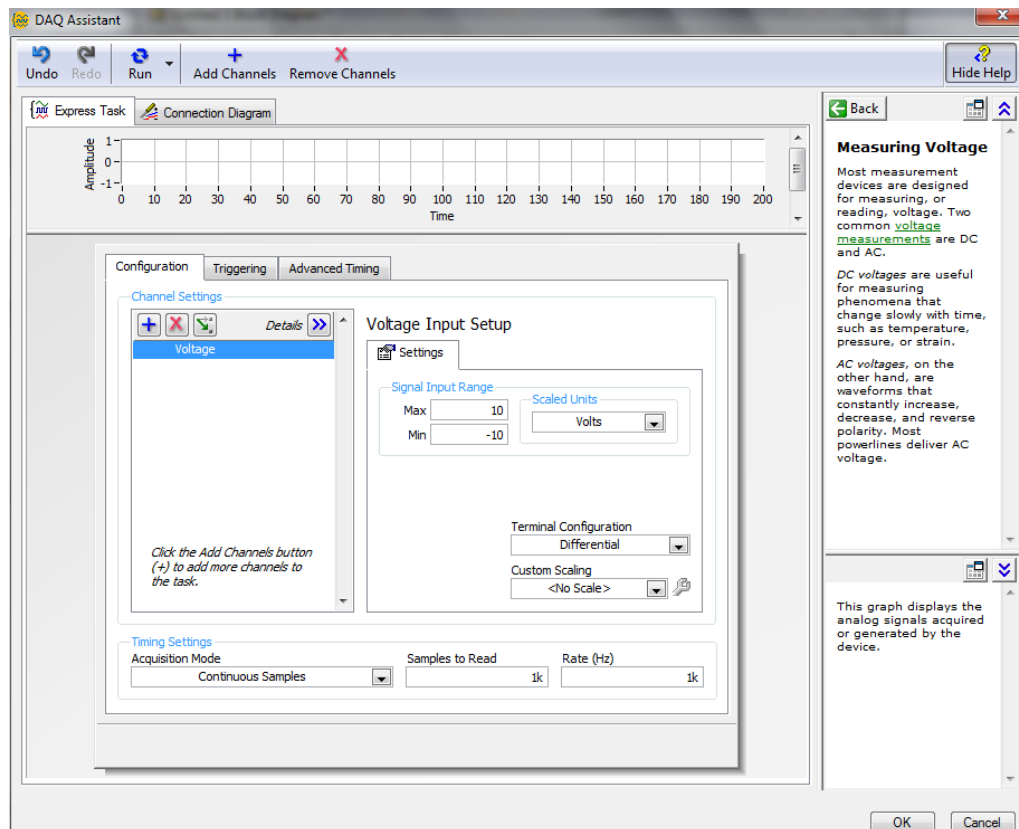
7. Después se selecciona la entrada en la tarjeta que se desee usar

Figura 164. Visualización de pantalla de selección de entrada física en la tarjeta



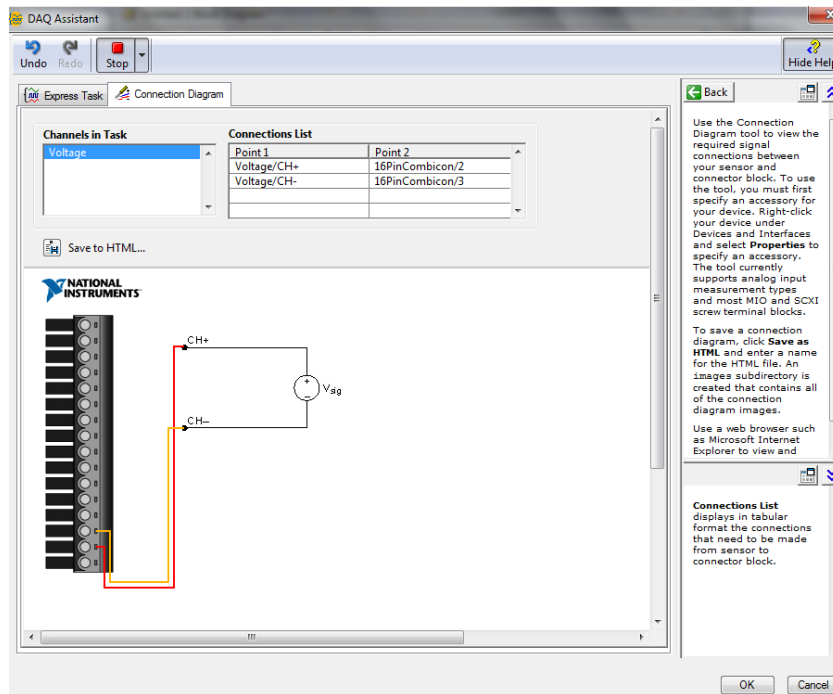
8. Después se configura en el DAQ assistant, las opciones de rango de tensión de entrada, la configuración del terminal (si se desea diferencial o RSE). Seguidamente en *Time Settings* se configura el modo de adquisición (para el ejemplo se selecciona continuos sample) y el tiempo de muestreo en las casillas samples to read y rate los cuales se recomiendan sean iguales.

Figura 165. Visualización de pantalla de configuración de los parámetros de la señal



9. El siguiente paso es seleccionar pestaña *conexion diagram* para visualizar como se debe conectar la entrada.

Figura 166. Visualización de pantalla de diagrama de conexión



10. Después nos regresamos a *Express Task* y se selecciona *Run* para verificar la comunicación y lectura. Para finalizar se oprime *Stop* y OK.

Figura 167. Visualización de pantalla de verificación de comunicación

