

---

# Índice de Contenidos

Capítulo 1 INTRODUCCIÓN .....	13
1.1    Objetivo General.....	14
1.2    Objetivos específicos .....	14
1.3    Origen y contexto de este trabajo .....	15
1.4    Desarrollo y alcances.....	17
1.5    Limitaciones .....	17
Capítulo 2 MARCO TEÓRICO .....	18
2.1    Teoría de la destilación.....	19
2.1.1    Aparato de destilación .....	19
2.1.2    Etapas de destilación .....	19
2.1.3    Modelo de control para el proceso de destilación .....	22
2.2    Implementación del sensor virtual de etanol .....	23
2.2.1    Máquina de Vectores de Soporte (SVM) .....	24
2.3    Instrumentación .....	36
2.3.1    Temperatura.....	37
2.3.2    Control y medición del caudal de refrigerante .....	43
2.3.3    Densidad y caudal del producto.....	45
2.3.4    Control y medición de la potencia eléctrica .....	49
Capítulo 3 DESARROLLO .....	63
3.1    Diseño de la columna .....	64
3.1.1    Diseño mecánico.....	64
3.1.2    Construcción.....	72
3.1.3    Entrega de la columna .....	74
3.2    Instrumentación .....	75
3.2.1    Implementación del sensor virtual de concentración de etanol.....	75
3.2.2    Sensores de temperatura .....	85
3.2.3    Controlador y sensor de flujo de refrigerante.....	86
3.2.4    Sensor de densidad .....	88
3.2.5    Sensor de flujo de destilado.....	89
3.2.6    Diseño y construcción del sensor de potencia .....	90
3.3    Puesta en marcha de la columna de destilación.....	94

---

3.3.1	Instalación Hidráulica y Sanitaria.....	95
3.3.2	Instalación Eléctrica .....	98
3.4	Puesta en marcha .....	100
Capítulo 4	CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO .....	102
4.1	Conclusiones.....	103
4.1.1	Conclusiones generales.....	103
4.1.2	Conclusiones específicas .....	103
4.2	Trabajo futuro y sugerencias .....	104
Anexo A	Información de apoyo sobre SVM.....	108
A.1	Teorema de Karush-Kuhn-Tucke (KKT) .....	108
A.2	Optimización Secuencial Mínima .....	109
Anexo B	Tablas de propiedades químicas de la mezcla etanol y agua.....	111
B.1	Propiedades química de la mezcla agua-etanol .....	112
Anexo C	Especificaciones del diseño de la columna de destilación .....	117
C.1	Flanges.....	117
C.2	Condensador Total.....	118
C.3	Recolector de destilado.....	118
C.4	Condensador parcial .....	118
C.5	Relleno de columna .....	118
C.6	Estanque .....	118
C.7	Estructura.....	119
Anexo D	Especificaciones del controlador de potencia y calefactores de inmersión... .....	135
D.1	Especificaciones del controlador de potencia.....	135
D.2	Calefactores de inmersión .....	137
Anexo E	Información de apoyo sobre el sensor de potencia eléctrica .....	139
E.1	Código fuente del sensor de potencia escrito en lenguaje C y diagrama de flujo .....	139
E.2	Calibración del sensor de potencia .....	146
E.3	Construcción del sensor de potencia .....	148
E.4	Conexión del sensor de potencia .....	150
Anexo F	Datos experimentales de destilaciones obtenidas en España.....	151
F.1	Datos experimentales de destilaciones realizadas en España .....	151
Anexo G	Implementación del sensor virtual de la concentración de etanol .....	155

---

G.1	Optimización de parámetros de SVM .....	155
G.2	Manejo del software modificado de entrenamiento .....	156
G.3	Sensor virtual de la concentración de etanol en Labview .....	158
Anexo H	Fotografías de la columna de destilación .....	160
H.1	Fotografías de la columna de destilación .....	160

---

# Índice de Tablas

Tabla 2.1: Comparación entre redes neuronales y SVM.....	24
Tabla 2.2: Lista de instrumentación y componentes de la columna de destilación.....	37
Tabla 2.3: Ventajas y desventajas entre diferentes tipos de sensores de temperatura....	39
Tabla 2.4: Comparación del cumplimiento de las características requeridas entre diferentes tipos de sensores de temperatura .....	41
Tabla 2.5: Peso molecular del agua, etanol y metanol .....	48
Tabla 2.6: Pérdidas de calor en el hervidor .....	49
Tabla 3.1: Conjuntos de entrenamiento y la serie de corridas experimentales que lo componen .....	80
Tabla 3.2: Kernels y parámetros para los conjuntos entrenamiento.....	81
Tabla 3.3: Kernels y parámetros para el conjunto total de entrenamiento .....	81
Tabla 3.4: Lecturas del sensor de densidad .....	89
Tabla 3.5: Resultados teóricos de la calibración .....	90
Tabla 3.6: Factores de calibración para canal 1 y 2 del sensor de potencia .....	93
Tabla 3.7: Resultados obtenidos para el canal 1 del sensor de potencia .....	93
Tabla 3.8: Resultados obtenidos para el canal 2 del sensor de potencia .....	94
Tabla B.1: Relación densidad de mezcla-Fracción Molar-Grado Alcohólico GL.....	112
Tabla B.2: Densidad de la mezcla en función de la temperatura y fracción de etanol.....	114
Tabla B.3: Viscosidad de la mezcla en función de la temperatura y fracción de etanol.....	115
Tabla D.1: Especificaciones del calefactor de inmersión.....	137
Tabla E.1: Descripción de los conectores de la placa PCB.....	149

---

# Índice de Ilustraciones

Figura 1.1: Organigrama organizacional del proyecto .....	15
Figura 2.1: Secciones del alambique de destilación .....	20
Figura 2.2: (a) Representación geométrica de SVM lineal, (b) Penalización de observaciones mal clasificadas por medio de variables de relajación $\xi$ .....	25
Figura 2.3:(a) Función de pérdida $\epsilon$ -Insensitiva, (b) Función de regresión no lineal con SVM y penalización de puntos que sobrepasan los límites del $\epsilon$ -tubo.....	29
Figura 2.4: Proyectar el problema original (figura de la izquierda) a un espacio superior (figura de la derecha) puede simplificar el problema de clasificación. ....	32
Figura 2.5: Diagrama P&ID del proceso (ref. norma ISA 55.1) .....	36
Figura 2.6: (a) Conexión más básica con dos hilos (b) Conexión con arreglo en puente de Wheatstone.....	42
Figura 2.7: Arreglo en puente de Wheatstone con tres hilos.....	42
Figura 2.8: Arreglo con cuatro hilos y fuente de corriente.....	42
Figura 2.9: Esquema interno del componente de flujo laminar, con la disposición de los sensores dentro del flujometro.....	44
Figura 2.10: Principio de funcionamiento del sensor de densidad L-Dens (a) Vibración hacia abajo (b) Vibración hacia arriba.....	46
Figura 2.11: Fracción molar de etanol contrastado con la viscosidad absoluta y temperatura de la mezcla. ....	48
Figura 2.12: Control del ángulo de conducción .....	50
Figura 2.13: Desfase provocado por el filtro pasa altos .....	52
Figura 2.14: Desfase provocado por el filtro pasa altos para una señal recortada por TRIAC $\alpha=10^\circ$ (a) 4000 muestras por ciclo para el filtro (b) 1000 muestras por ciclo para el filtro .....	53
Figura 2.15: Dispersión de energía en el plano de frecuencias para señal filtrada y sin filtrar (TRIAC $\alpha=10^\circ$ ) (a) 4000 muestras por ciclo para el filtro (b) 1000 muestras por ciclo para el filtro.....	54
Figura 2.16: Desplazamiento de fase.....	56
Figura 2.17: Filtro RC pasa bajos.....	60
Figura 2.18: Respuesta del filtro RC a una señal PWM de 31250Hz con un DutyCycle al 0.01% .....	61
Figura 2.19: Respuesta del filtro RC a una señal PWM de 31250Hz con un DutyCycle al 50% .....	61
Figura 2.20: Respuesta del filtro RC a una señal PWM de 31250Hz con un DutyCycle al 90% .....	61
Figura 3.1: Vistas e isométrico del condensador Total. ....	66
Figura 3.2: Vistas e isométrico del recolector de destilado.....	67
Figura 3.3: Vistas e isométrico del condensador parcial .....	68
Figura 3.4: Vistas e isométrico del relleno de columna .....	69

---

Figura 3.5: Relleno de columna con malla de cobre. ....	69
Figura 3.6: Vistas e isométrico del hervidor .....	70
Figura 3.7: Planos del conjunto estructura y columna de destilación. ....	71
Figura 3.8: Ensamblaje del condensador total.....	72
Figura 3.9: Geometría del perfil de aluminio utilizado en la estructura de la columna .	74
Figura 3.10: Imágenes de la columna de destilación en el laboratorio al momento de su entrega .....	74
Figura 3.11: Características del sensor virtual de etanol.....	75
Figura 3.12: Estimación de la concentración de etanol para la muestra #29_05.....	82
Figura 3.13: Estimación de la concentración de etanol para la muestra #28_05.....	82
Figura 3.14: Estimación de la concentración de etanol para la muestra #27_05.....	83
Figura 3.15: Estimación de la concentración de etanol para la muestra #26_05.....	83
Figura 3.16: Estimación de la concentración de etanol para la muestra #20_05.....	84
Figura 3.17: Estimación de la concentración de etanol para la muestra #19_05.....	84
Figura 3.18: HMI implementado en Labview .....	85
Figura 3.19: Unión cono compresión .....	86
Figura 3.20: Filtro de osmosis reversa instalado en el laboratorio.....	87
Figura 3.21: Arreglo de vidrio en forma de “Y” .....	88
Figura 3.22: Formato de salida del sensor de densidad.....	89
Figura 3.23: Esquema de funcionamiento del sensor de potencia.....	91
Figura 3.24: Esquema de Circuito Electrónico del Sensor de Potencia .....	92
Figura 3.25: Formato de salida de datos del sensor de potencia a través de RS232-USB .....	92
Figura 3.26: Configuración del puerto serial del sensor de potencia .....	93
Figura 3.27: Solución a la instalación del sensor de temperatura .....	95
Figura 3.28: Configuración de válvulas para los serpentines del condensador parcial..	96
Figura 3.29: Configuración de válvula para serpentín del condensador total .....	96
Figura 3.30: Instalación sanitaria .....	97
Figura 3.31: Esquema multifilar del tablero eléctrico de la columna de destilación.....	99
Figura 3.32: Tablero eléctrico. Vista (a) Exterior del tablero (b) Interior del tablero....	99
Figura 3.33: HMI implementada en Microsoft Excel .....	100
Figura 3.34: Captura de datos (a) del sensor de potencia; (b) sensor de densidad en Hyperterminal.....	101
Figura 3.35: Columna de destilación.....	101
Figura A.1: Comparación de algoritmos.....	110
Figura B.1: Grado alcohólico de la mezcla contrastado con su densidad.....	113
Figura B.2: Densidad de la mezcla contrastada con su fracción molar de etanol y temperatura.....	116
Figura B.3: Viscosidad de la mezcla contrastada con su fracción molar de etanol y temperatura.....	116
Figura C.1: Flange con canal para o’ring.....	120
Figura C.2: Flange con cara lisa.....	121
Figura C.3: Flange ciego.....	122
Figura C.4: Plano de detalle del condensador total.....	123
Figura C.5: Conjunto condensador total.....	124

---

Figura C.6:	Plano de detalle del recolector de destilado.....	125
Figura C.7:	Conjunto recolector de destilado.....	126
Figura C.8:	Plano de detalle del condensador parcial.....	127
Figura C.9:	Conjunto condensador parcial.....	128
Figura C.10:	Plano de detalle del relleno de columna.....	129
Figura C.11:	Conjunto relleno de columna.....	130
Figura C.12:	Plano de detalle de estanque.....	131
Figura C.13:	Conjunto estanque.....	132
Figura C.14:	Estructura con dimensiones generales.....	133
Figura C.15:	Soporte de la columna.....	134
Figura D.1:	Esquema de conexión del controlador de potencia.....	136
Figura D.2:	Gráfico de los requerimientos de disipación térmica, de acuerdo a la corriente y potencia consumida por la carga.....	137
Figura D.3:	Características de los distintos modelos de calefactores de inmersión.....	138
Figura D.4:	Geometría del calefactor de inmersión.....	138
Figura E.1:	Diagrama del programa principal.....	144
Figura E.2:	Diagrama de subrutina de medición de potencia.....	145
Figura E.3:	Diagrama de subrutina de detección de señal alterna.....	146
Figura E.4:	Diagrama de calibración.....	147
Figura E.5:	Trazado de las pistas de la placa PCB.....	148
Figura E.6:	Placa PCB. Vista (a) Superior (b) Inferior.....	148
Figura E.7:	Placa PCB en pruebas.....	149
Figura E.8:	Esquema de conexión del sensor de potencia.....	150
Figura G.1:	Extracto de datos de entrenamiento con formato para Libsvm.....	155
Figura G.2:	Utilización del script de optimización.....	156
Figura G.3:	Resultados de la optimización $C = 32$ , $\gamma = 0.015625$ , $\epsilon = 0.125$ ... ..	156
Figura G.4:	Extracto de archivo con los datos de entrenamiento.....	157
Figura G.5:	Ingreso de parámetros para aprendizaje.....	158
Figura G.6:	Archivos generados después del aprendizaje en conjunto con el programa implementado en Labview.....	159
Figura H.1:	Tablero eléctrico general del laboratorio de extracción de componentes de alto valor.....	160
Figura H.2:	Canalización del cordón eléctrico.....	161
Figura H.3:	Tablero eléctrico de la columna de destilación.....	161
Figura H.4:	Rack que contiene al PLC y sus módulos.....	162
Figura H.5:	Sensor de potencia eléctrica.....	162
Figura H.6:	Columna de destilación vista desde fuera del laboratorio.....	163
Figura H.7:	Vista interna del boiler. Donde se aprecia los calefactores de inmersión.....	164
Figura H.8:	Columna vista desde frente.....	164
Figura H.9:	Panel de válvulas V-2, V-3 y V-4.....	165
Figura H.10:	Panel de instrumentos.....	165