

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO PILOTO AUTOMATIZADO PARA LA PRODUCCIÓN DE BIODIÉSEL EN COLOMBIA

(Design and Construction of an Automated Prototype Pilot for Bio-diesel's Production in Colombia)

Óscar Ferney Pérez*, Víctor Alejandro Palacios*, Leonel Romero Pérez*, Nelson Barrera**

*Escuela de Ingeniería de Industrial, Uptc-Sogamoso. Grupo de Investigación Observatorio, biouptc@yahoo.com

** Escuela de Ingeniería de Electrónica, Uptc-Sogamoso. Grupo de Investigación GIRA, gira.uptc@gmail.com

(Recibido Abril 25 de 2007 y aceptado Septiembre 15 de 2007)

<p>Resumen: El propósito de este trabajo es desarrollar y desplegar tecnologías económicamente competitivas para la producción de biodiésel en Colombia, involucrando el diseño y construcción de un prototipo como desarrollo tecnológico. Se estudiaron características de diferentes materiales, seleccionándose el acero austenítico ANSI 304. Para el sistema de monitoreo y control automático de variables (temperatura, tiempo y velocidad) se implementaron dos microcontroladores PIC 18F452, junto con un microcontrolador PIC 12F629, en configuración un maestro-dos esclavos. Para la visualización de las variables se utilizó una pantalla LCD PG128128, con interfaz gráfica y menú configurable mediante teclado matricial. El dispositivo registra datos de temperatura y velocidad empleando la memoria EEPROM del microcontrolador maestro para visualizarlos en modo gráfico; adicionalmente se incluyó un puerto de comunicación serial con conexión a un PC. Finalmente se evaluó el funcionamiento del prototipo mediante producción y análisis de calidad del biodiésel de palma africana; el análisis consistió en la determinación del contenido de esteres metílicos en las muestras resultantes del proceso de producción, para lo cual se usó un cromatógrafo de gases Varian 3400; los resultados arrojaron datos de conversión hasta del 86,23 % en promedio.</p>	<p>Abstract: The purpose is to develop and to deploy some economically competitive technologies for Bio-diesel's production in Colombia, involving the design and construction of a prototype as a technological development. After studying different materials' characteristics, it was selected the austenitic steel ANSI 304. To the monitoring system and for the automatic variables control (temperature, time and speed) two microcontrollers PIC 18F452 were implemented, together with a microcontroller PIC 12F629, in a master-two slaves' configuration. For the variables visualization a screen LCD PG128128 was used, with interface graph and configurable menu by applying a matrix keyboard. The device registers information about temperature and speed using the memory EEPROM reports of the master microcontroller to visualize them in graphics, additionally a serial communication port was included with connection to a PC. Finally the prototype functioning was evaluated by the production and the African Palm's bio-diesel quality analysis. The test consisted in the determination of the content of methyl esters in the samples that came out of the production process, for which a gas chromatograph Varian 3400 was used. The results show conversions up of 86.23 % in average.</p>
<p>Palabras clave: Biodiésel, Etanol, Metanol, Palma Africana.</p>	<p>Key words: Bio-diesel, Ethanol, Methanol, African Palm.</p>

1. INTRODUCCIÓN

Algunos sectores, como el transporte pesado, agrícola y marítimo, se han venido convirtiendo a diésel debido al alto costo de la gasolina, y esto se ve reflejado en el aumento de la demanda de ACPM. El motor diésel es apto para funcionar casi con cualquier combustible: gasóleo, carbón pulverizado, queroseno, fuel óleo, etc; siempre que esté dotado con los sistemas de inyección adecuados para cada caso (Biodiésel del Plata, 2006). Los carburantes derivados de la biomasa no son la excepción, y el motor diésel admite perfectamente ser alimentado con alcohol, aceites vegetales y biodiésel.

Desde el punto de vista industrial la obtención de biocombustibles se presenta como un potencial de desarrollo. En términos de cifras, en Colombia operan 51 plantas extractoras de aceite de palma, que procesan 3.240.742 toneladas de fruta anualmente, de las que se obtienen 672.597 toneladas de aceite crudo de palma. La demanda nacional está en 450.000 toneladas de aceite para el consumo humano, ya sea de palma, girasol, maíz, soya, etc. Así, para la producción de biodiésel, la industria de la palma aceitera está lista, con aproximadamente 230.000 toneladas al año que serán usadas en las refinerías para dar comienzo al proceso de sustituir el 5% del combustible diésel que se utiliza en Colombia (Fedepalma, 2006).

En la actualidad no hay producción de biodiésel en el país, por lo que resulta esencial desarrollar y desplegar tecnologías económicamente competitivas que puedan convertir recursos abundantes de biomasa en combustible líquido, reduciendo el efecto contaminante emanado en la combustión de diésel de petróleo.

En el presente artículo se estudian los factores que implican la producción de biodiésel, lo cual involucra el diseño y construcción de un prototipo como desarrollo tecnológico. El prototipo es básicamente un tanque agitado (en acero inoxidable) con sistema de calefacción por baño de maría (agua caliente), que cuenta con entrada y salida tanto de materia prima como de agua, sistema de control automático y sistema de monitoreo (ver figura 1). Como validación y ajuste se hicieron análisis de calidad del biodiésel obtenido; se utilizó el laboratorio del grupo de Catálisis Química, de la sede central (Tunja) de la Uptc; el análisis consistió en la determinación del contenido de esteres metílicos en la muestra, siguiendo la norma EN 14103, para lo cual se usó un cromatógrafo de gases Varian 3400 con columna capilar CP-SIL 5CB (30 m, 0.5 mm, 0.25 micrómetros), gas de arrastre helio, detector FID y software Star chromatography Workstation Versión 4.5 1989-1996 S/N: D50212493.

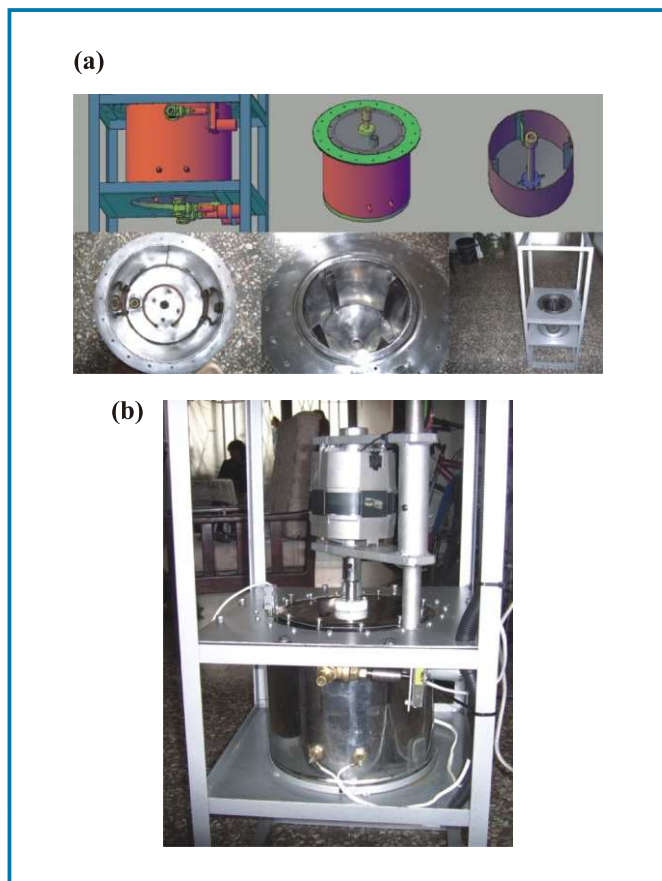


Figura 1. Prototipo para producir biodiésel. a) Construcción detallada, b) Prototipo terminado.

2. BIODIÉSEL

Definición: es un combustible sustituto del gas-oil para motores diésel, producido a partir de aceites vegetales y alcoholes de bajo peso molecular (metanol o etanol).

Transesterificación: es el método que actualmente se considera más adecuado para producir combustible de alta calidad; es una reacción que cambia el alcohol de un triglicérido mediante un catalizador (alcalino NaOH) y un alcohol de cadena corta (metanol o etanol) en métilésteres o etilésteres (biodiésel) mas glicerol (ver figura 2).

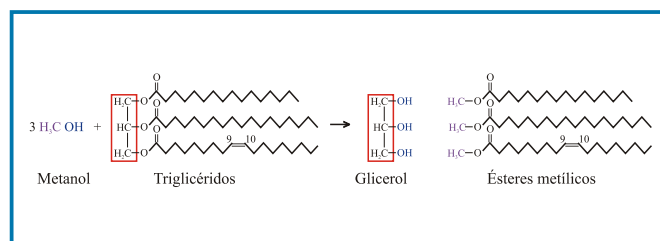


Figura 2. Reacción de transesterificación.

Operaciones para producir biodiésel de palma: en un recipiente se agrega aceite crudo de palma, que es expuesto a una temperatura de 20 °C hasta que sea líquido; se añade un concentrado álcali/alcohol (metóxido o etóxido) y se activa la agitación/ mezclado junto con la temperatura de reacción; cuando esté completo el tiempo de dicha reacción, la agitación se suspende y manteniendo la calefacción se espera el tiempo necesario para que ocurra la separación por decantación del glicerol y el biodiésel; se extrae el glicerol, se lava (con agua destilada) y neutraliza. El biodiésel que así es obtenido está listo para ser usado o almacenado.

3. REACTORES QUÍMICOS

Son recipientes donde se llevan a cabo las reacciones químicas (McCabe y Smith, 1968: 261). Deben permitir la entrada de reactivos, salida de productos y la regulación de temperatura para que la reacción se efectúe. Pueden trabajar en régimen continuo o discontinuo.

Tanques agitados: proveen el máximo grado de mezcla y permiten trabajar de forma continua o discontinua.

Reactores tubulares: son adecuados para reacciones en fase gaseosa. La reacción puede realizarse en el interior o en el exterior del tubo central, mientras que por el otro espacio circula el fluido refrigerante o calefactor.

Reactores de lecho fijo, móvil o fluido: en ellos los gases circulan a través de un lecho de partículas catalíticas que pueden estar fijas o no.

Reactores de película descendente: en ellos una capa de líquido resbala por la pared del tubo, entrando en contacto con el gas que fluye a contracorriente.

Fermentadores: se usan en las reacciones con microorganismos. Son tanques agitados con minucioso control de temperatura y presión (McCabe y Smith, 2002).

El control de procesos químicos: cuando se utilizan sistemas digitales, exige tener conocimiento sobre el proceso y disponer de un modelo adecuado para describir su comportamiento estático y dinámico. En el desarrollo de un modelo pueden distinguirse las siguientes fases:

1. Definición del problema y los objetivos.
2. Selección de las variables por observar en función del contexto.
3. Reconocimiento de las relaciones de causalidad.
4. Relación temporal entre causa-efecto (al poco rato de variar A varía B).
5. Grado de influencia (Si A aumenta un poco, B disminuye claramente).

Un sistema basado en el conocimiento presenta una serie de ventajas frente al operador humano (ver tabla 1):

Tabla 1. Comparación entre un experto humano y un sistema experto.

Sistema experto	Experto humano
Siempre disponible	No siempre disponible
Entrada simbólica	Experiencia sensorial
Permanente	Perecedero
Sin inspiración	Innovador
Fácil de transferir	Difícil de transferir
Necesita ser enseñado	Adaptativo
Dominio estrecho	Enfoque amplio
Rápido	Lento
Aprende con dificultad	Capacidad de aprendizaje

4. MATERIALES Y MÉTODOS

4.1 Selección de materiales

De los materiales estructurales más comunes, los polímeros se rechazan por su baja resistencia; los cerámicos pueden resistir la carga prevista en servicio, pero la carencia de ductilidad los hace peligrosos; por otro lado, algunos metales comunes

proporcionan la suficiente resistencia y ductilidad, por lo que resultan ser excelentes candidatos.

Selección del metal óptimo: la primera selección se hace por metales ferrosos, por su alta resistencia. Los aceros generalmente tienen un contenido de carbono entre el 0,05 y el 2% en peso; las fundiciones entre un 2 y un 4,5% en peso de C (McCabe y Smith, 2002); esto proporciona un parámetro para guiar la selección por aceros, puesto que se buscan aleaciones bajas de carbono y con elementos que ofrezcan propiedades especiales como resistencia a la corrosión.

Selección del acero inoxidable austenítico: el inoxidable ANSI 304 es recomendado a temperaturas inferiores de 925 °C, en servicios continuos; además de su disponibilidad en el mercado, sus características lo hacen el acero que cumple en mayor grado con los requerimientos de diseño; en la tabla 2 se especifican las características del acero ANSI 304.

Tabla 2. Características del acero austenítico ANSI 304
Fuente: McCabe y Smith (2002).

ACERO AUSTENÍTICO ANSI 304			
Característica	Abrev.	Unidades	Valor
Resistencia última	<i>R_u</i>	Mpa	515
Resistencia a la cedencia	<i>S_y</i>	Mpa	170
Densidad		Kg/m ³	8027
Calor específico		calorías/g °C (0100 °C)	0,12
Conductividad térmica		Cal./cm.seg °C (a 20°C)	0,035

Selección del agitador: la mezcla se alcanza utilizando un rodete movido por un motor instalado sobre el tanque. La velocidad del fluido en el tanque agitado tiene 3 componentes: a) uno radial, que actúa en una dirección perpendicular al eje; b) uno longitudinal o axial, que actúa paralelo al eje, y c) uno rotacional, que actúa en dirección tangencial al círculo de rotación del eje (Vernon, 2005: 4); donde solo las dos primeras componentes contribuyen al mezclado. Cuando los impulsores se montan verticalmente en el centro del tanque, se desarrolla un vórtice, lo cual es indeseable; por esto se coloca el agitador en una posición angular o desplazada del centro. Otra forma es empleando deflectores, método que se utilizó en el diseño del prototipo.

4.2 Diseño y configuración del reactor

El diseño y configuración del reactor necesita de un análisis detallado de cada una de sus partes, donde se destacan el diámetro y posición del agitador; dimensiones, número y posición de los deflectores; dimensiones y geometría del tanque de mezcla; además se tiene en cuenta la eficiencia del proceso, analizándose desde la potencia consumida y tiempo, mecanismo y efectividad de la mezcla.

Diseño del tanque de mezcla: el reactor usa la geometría de un tanque cilíndrico agitado. Como criterio de diseño para un solo rodete, la profundidad del líquido en el tanque no debe ser superior a 1,0 o 1,25 veces el diámetro del tanque (Doran, 2001: 157)). La figura 3 muestra las dimensiones del tanque e impulsor.

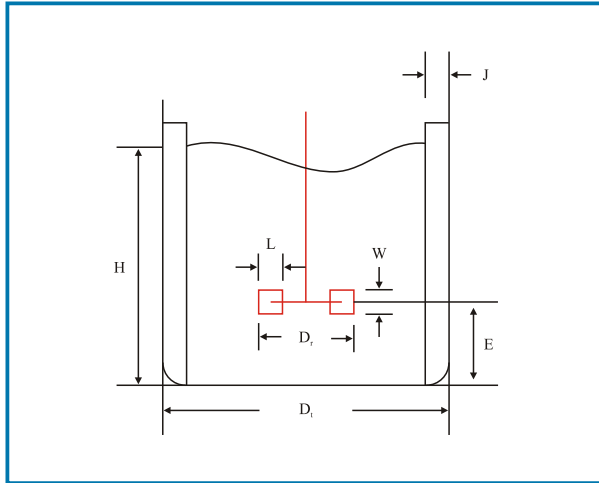


Figura 3. Dimensiones características del tanque e impulsor
Fuente: McCabe y Smith (2002).

Dimensionamiento del prototipo: reactor para 3,5 litros de materias primas; teniendo en cuenta que solo el 70-80% del volumen de los reactores agitados se llena con líquido.

4.3 Descripción del sistema electrónico

Se implementó un sistema electrónico basado en microcontroladores, ya que el desarrollo de la aplicación, la capacidad para el manejo de dispositivos electrónicos y el costo los convierte en una excelente alternativa. Concretamente se utilizaron dos microcontroladores PIC 18F452 de la gama alta de Microchip, junto con un microcontrolador PIC 12F629 de gama baja, en configuración un maestro–dos esclavos; esto con el fin de implementar un circuito con módulos de control separados.

Control del ambiente y agitación en el reactor: se establecieron en primera instancia los parámetros para la supervisión y regulación del ambiente térmico y agitación del reactor; de esta forma se definen los parámetros de entrada y de salida para la unidad de control, como se muestra en la figura 4.

En la figura 4 se observa que el sistema de control requerido consta de una entrada y una salida para cada una de las variables por controlar (velocidad, temperatura); las entradas son una señal de voltaje analógico proveniente del sensor de temperatura (TMP01) instalado en el interior de una chaqueta calefactora y una serie de pulsos provenientes del sensor de velocidad (tacómetro analógico) instalado en el interior de un motor universal de 2 hp empleado para la agitación; las salidas son señales digitales moduladas por ancho de pulso.

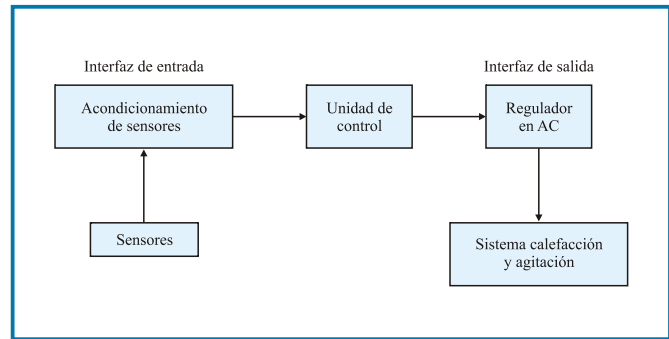


Figura 4. Esquema del sistema de control para el ambiente térmico y agitación constante en el reactor.

Con el fin de acoplar las señales de entrada y salida se emplearon circuitos de interfaz, que se describen a continuación:

Interfaz de entrada, control de temperatura: consta de un acondicionamiento analógico de señal, compuesto por un arreglo de amplificadores operacionales LM324 (figura 5), que se configuran de manera que representen una ecuación lineal de forma: $V_{out} = mV_{in} + b$.

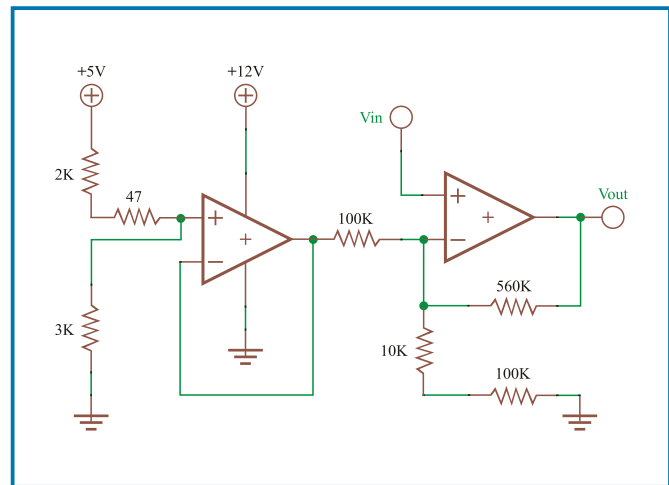


Figura 5. Acondicionamiento analógico de la señal del sensor TMP01.

Interfaz de entrada, control de velocidad: debido a que la señal del sensor es una onda senoidal que varía su frecuencia, se implementó un detector de cruce por cero saturada a 5 voltios, obteniendo una serie de pulsos digitales respecto a las rpm aplicadas al sistema. El arreglo se muestra en la figura 6.

Interfaz de salida, control de temperatura: está conformada por un optoacoplador que transfiere la señal PWM a un circuito de corte de fase. El tiristor se ha seleccionado de forma que pueda soportar la potencia que requiere el sistema calefactor del reactor (resistencias para calentar agua), tal como se aprecia en la figura 7.

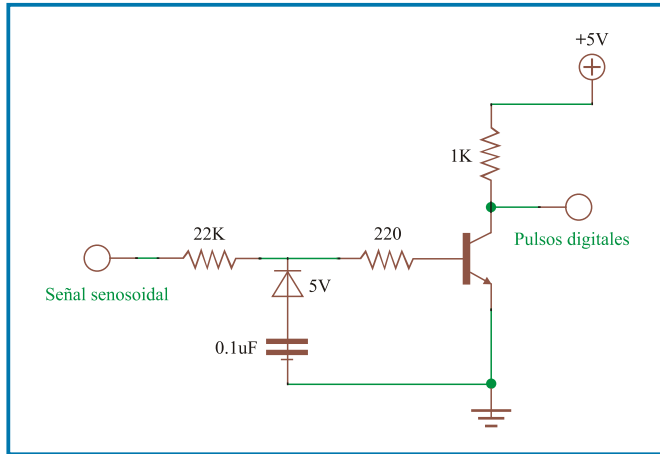


Figura 6. Acondicionamiento de la señal del sensor de velocidad (tacómetro analógico).

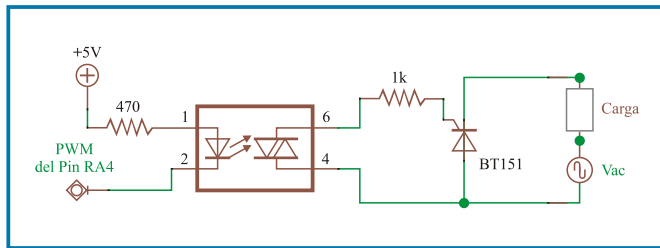


Figura 7. Optocouple para la señal PWM.

Interfaz de salida, control de velocidad: además de un corte de fase similar a la interfaz anterior, se adicionó un circuito para evitar efectos inductivos, y uno para cambiar el sentido de giro del motor universal, tal como se aprecia en la figura 8.

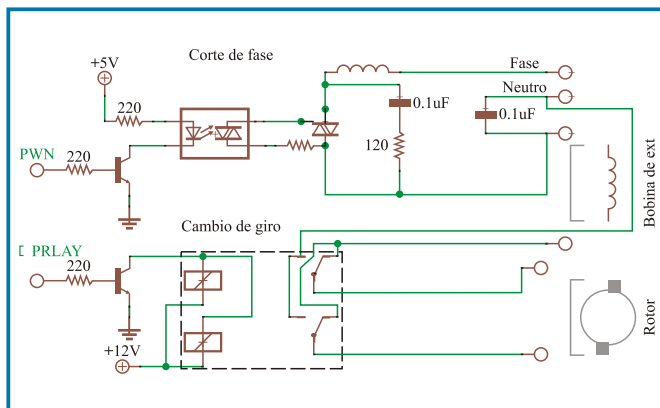


Figura 8. Optocouple para la señal PWM y activación de relés para cambiar el sentido de giro.

Finalmente, el bloque central del sistema está basado en una estrategia de control difusa, la cual se encuentra embebida en los microcontroladores esclavos del sistema.

Visualización de parámetros: los parámetros que requieren ser monitoreados son la temperatura y la velocidad de agitación, que se observan a través de una pantalla gráfica de cristal líquido (PG128128).

Configuración de parámetros: básicamente se realiza a través de una interfaz gráfica con el usuario, que consta de un menú con todas las opciones de configuración disponibles, al cual se accede mediante un teclado matricial 4X4.

Almacenamiento de información: esta característica del sistema permite hacer registro de datos tanto de temperatura como de velocidad, empleando la memoria EEPROM incluida en el microcontrolador maestro, con el fin de visualizarlos en modo gráfico. Adicionalmente se incluyó un puerto de comunicación serial para conectarse a un PC, tal como se muestra en la figura 9; esta característica le permite a la unidad descargar la información previamente almacenada, para llevar un registro estadístico por muestra realizada.

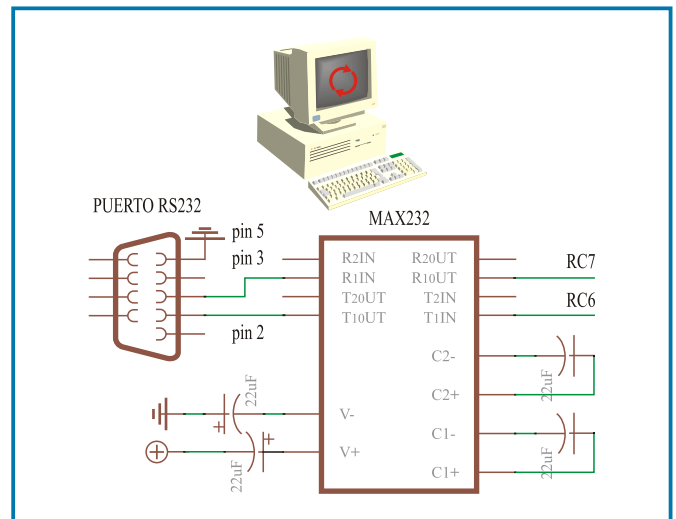


Figura 9. Esquema de la conexión vía cable serial entre el prototipo y un PC.

Apertura y cierre de válvulas: el prototipo cuenta con válvulas de entrada y salida de agua y salida de producto; para controlarlas se emplearon tres motores DC, junto con un circuito actuador (puente h), un convertor de corriente a voltaje, que cumple con la ecuación lineal $c = m(a - b)$ como se muestra en la figura 11, y un sensor de efecto hall (ugn3503), que detecta el llenado de agua en el tanque al hacer contacto directo con el imán que transporta un flotador instalado en el interior del prototipo; en la figura 10 se puede observar su acondicionamiento.

Otra característica importante consiste en la generación de alarmas, tanto visuales como sonoras, cada vez que ocurran eventos como solicitud de ingreso del aceite, metóxido o etóxido y fin del proceso, para ello se utiliza el circuito de la figura 12.

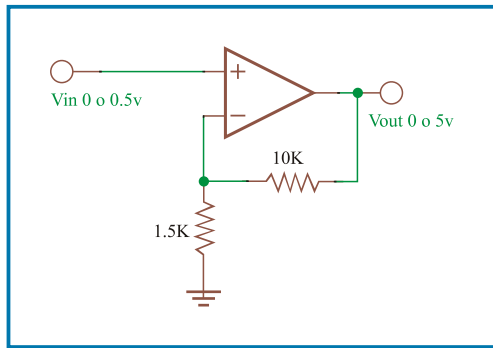


Figura 10. Acondicionador, sensor de efecto hall.

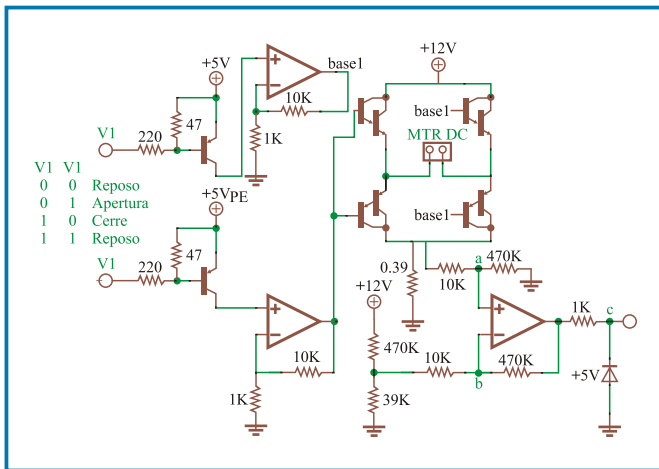


Figura 11. Control de apertura y cierre de válvulas.

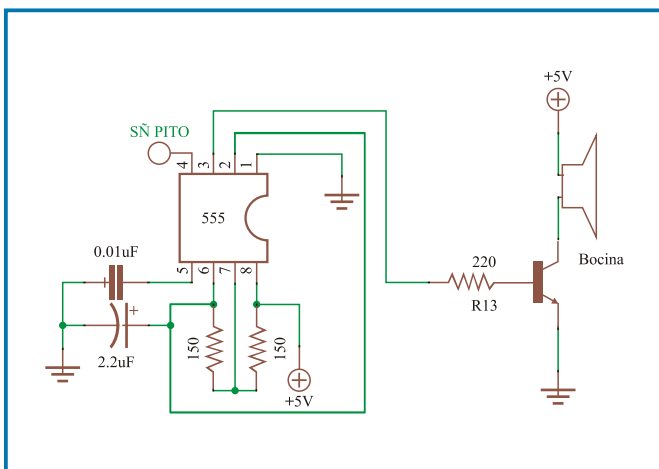


Figura 12. Señal de alarma.

4.4 Implementación del sistema electrónico

El sistema cuenta con un microcontrolador maestro (PIC 18F452) encargado de la interacción con el usuario, de la

comunicación con un PC y de ordenar la ejecución de las funciones de dos microcontroladores esclavos; uno de estos (PIC 12F629) encargado de controlar la velocidad de agitación y el cambio de sentido de giro; el otro (PIC 18F452) encargado de controlar la temperatura, junto con la apertura y cierre de las electroválvulas incluidas en el prototipo. El diagrama de flujo (figura 13) muestra la secuencia de operación.

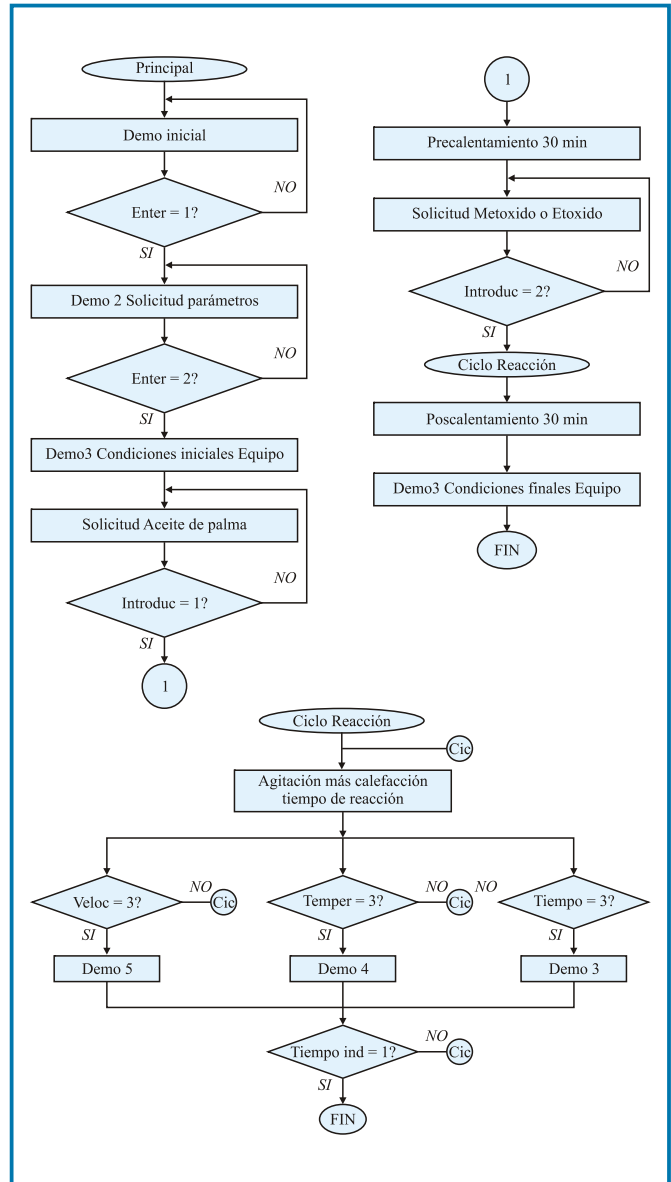


Figura 13. Algoritmo, procedimiento principal.

En la figura 13 se observa la configuración de demos animados de visualización en la pantalla gráfica PG128128 durante el proceso. Las variables Enter, Introduc, Veloc, Temper y Tiempo son contadores que se incrementan al presionar las teclas #, D, B, A y C, respectivamente; las tres últimas son las encargadas de la manipulación de parámetros [conteo:

(1) permiso para ingresar parámetro, (2) verificar parámetro, (3) Visualizar_ gráficamente parámetro]. Las condiciones iniciales de operación son: cierre de válvulas de salida, apertura de válvula de entrada y llenado del tanque. Las condiciones finales de operación son: evacuación de producto y drenaje de agua (apertura válvulas de salida).

Implementación del controlador difuso: se hizo mediante la generación de un archivo en lenguaje difuso ASCII FTL, elaborando un proyecto de diseño en la interfaz gráfica que provee el software FUZZY TECH-MP® (MICROCHIP, fuzzyTECH®-MP, USERs GUIDE, 1994); los pasos que se efectuaron para elaborar el proyecto del sistema difuso fueron los siguientes:

- Se seleccionaron las características generales para el sistema a implementar, definiéndose aspectos como: a) número de entradas y salidas del sistema, b) número de conjuntos de variables lingüísticas de entrada y salida y c) edición de los términos lingüísticos. Los anteriores aspectos se establecieron con base en el diseño previo en MATLAB®, tal como se aprecia en las figuras 14 y 15.

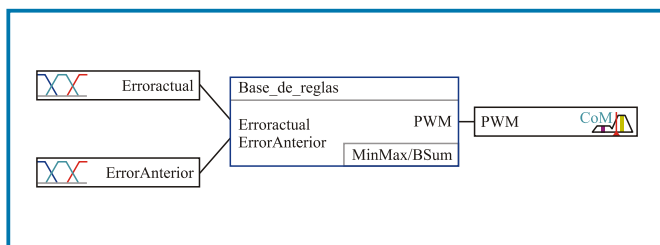


Figura 14. Esquema general para el sistema difuso elaborado en FUZZY TECH-MP®.

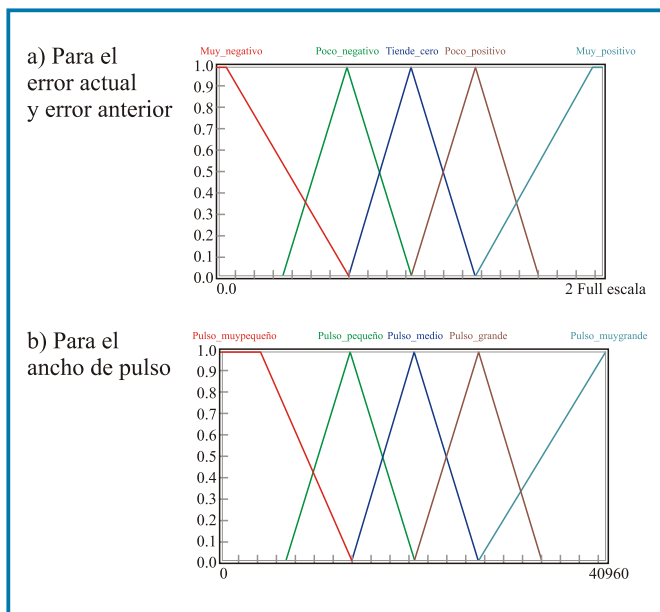


Figura 15. Términos lingüísticos para variables lingüísticas a) Variables de entrada, b) Variables de salida. Elaboradas en FUZZY TECH-MP®.

- El siguiente paso consiste en elaborar la base de 25 reglas que conforman el motor de inferencia; en la figura 16 se observa la edición final.

Matrix Utilities	IF		THEN	
	Error_Temp	ErrorPasado	DOS	MAP
1	Muy_negativo	Muy_negativo	1.00	Pulso_muypequeño
2	Muy_negativo	Poco_negativo	1.00	Pulso_pequeño
3	Muy_negativo	Tiende_cero	1.00	Pulso_muypequeño
4	Muy_negativo	Poco_positivo	1.00	Pulso_pequeño
5	Muy_negativo	Muy_positivo	1.00	Pulso_muypequeño
6	Poco_negativo	Muy_negativo	1.00	Pulso_medio
7	Poco_negativo	Poco_negativo	1.00	Pulso_muypequeño
8	Poco_negativo	Tiende_cero	1.00	Pulso_medio
9	Poco_negativo	Poco_positivo	1.00	Pulso_medio
10	Poco_negativo	Muy_positivo	1.00	Pulso_pequeño
11	Tiende_cero	Muy_negativo	1.00	Pulso_medio
12	Tiende_cero	Poco_negativo	1.00	Pulso_medio
13	Tiende_cero	Tiende_cero	1.00	Pulso_medio
14	Tiende_cero	Poco_positivo	1.00	Pulso_medio
15	Tiende_cero	Muy_positivo	1.00	Pulso_medio
16	Poco_positivo	Muy_negativo	1.00	Pulso_grande
17	Poco_positivo	Poco_negativo	1.00	Pulso_medio
18	Poco_positivo	Tiende_cero	1.00	Pulso_medio
19	Poco_positivo	Poco_positivo	1.00	Pulso_muygrande
20	Poco_positivo	Muy_positivo	1.00	Pulso_grande
21	Muy_positivo	Muy_negativo	1.00	Pulso_muygrande
22	Muy_positivo	Poco_negativo	1.00	Pulso_grande
23	Muy_positivo	Tiende_cero	1.00	Pulso_grande
24	Muy_positivo	Poco_positivo	1.00	Pulso_grande
25	Muy_positivo	Muy_positivo	1.00	Pulso_muygrande

Figura 16. Reglas de inferencia difusa elaboradas en FUZZY TEC-MP®.

- Luego se configura el método de defuzzificación; se eligió la mediana de máximo, ya que presenta la respuesta más suavizada. El paso final consiste en compilación y ajuste de la estrategia de control difuso, puesto en marcha durante el proceso.

Implementación de la configuración de parámetros: en concreto, se desarrolló una interfaz que le permitiera interactuar al operario con el hardware, con el fin de configurar algunas tareas en el microcontrolador maestro; de esta manera el sistema debe cumplir con estas características principales:

Configuración de la temperatura en un rango de 20 a 80 °C.

Configuración de la velocidad en un rango de 500 a 4500 rpm.

Configuración de la base de tiempo real (de reacción) de 30 min en adelante.

Sistema de monitoreo: con base en el lenguaje de programación Visual Basic, incluido en Microsoft Office Excel, se implementó el sistema de monitoreo (figura 17), donde el usuario puede descargar todos los datos de temperatura y velocidad previamente almacenados en el archivador del prototipo; además, puede actualizar las propiedades de las materias primas y parámetros de operación; por otro lado, puede imprimir el balance de masa y energía, parámetros de operación, dimensiones del equipo y reacciones químicas.



Figura 17. Pantallazo inicial. Sistema de Monitoreo.

5. RESULTADOS

Los resultados arrojaron conversiones del 86,23% en promedio para tres muestras analizadas de metilesteres; cifra alta en comparación con los datos de conversión reportados en la simulación (81,96%) previamente realizada en el software Hysys Hyprotech 3.1. Las condiciones de operación aplicadas al prototipo para la obtención de las muestras fueron: 500 rpm, relación Aceite:Metanol = 1:4, 3,5 grs / ltr de NaOH, 50 °C y 30 minutos de reacción.

Para la obtención de etilesteres se presentó la formación de geles en la reacción al utilizar como catalizador NaOH; por lo cual se prefirió por el momento no trabajar con etanol.

6. CONCLUSIONES

- El prototipo para producir biodiésel es un desarrollo tecnológico de impacto social construido en la Uptc, que fácilmente puede ser distribuido en el mercado nacional a bajo costo (\$1.500.000,00), con una única dificultad: el operador debe tener conocimientos básicos en química orgánica, de modo que manipule adecuadamente los subproductos resultantes de la reacción.

- La lógica difusa es la más indicada para implementar controladores en procesos químicos, como es la producción de biodiésel, debido a la cantidad de variables que se necesitan manejar en este proceso.

- Las pruebas que se hicieron para validar el funcionamiento del prototipo identificaron al metanol como el alcohol indicado para producir biodiésel, pues al utilizar etanol al 95% de pureza no se logra realizar la operación con éxito (no hubo reacción de transesterificación). Según literatura científica, el etanol debe ser 98% puro si se quiere producir biodiésel, lo que elevaría exageradamente el costo de este biocombustible.

- El uso del glicerol derivado de la reacción de transesterificación es de vital importancia para la factibilidad del proceso de producción de biodiésel, debido al aprovechamiento de este subproducto en la industria química, farmacéutica, de alimentos y automotriz, entre otras.

7. RECOMENDACIONES

- El método de calefacción implementado en el prototipo puede ser mejorado, a futuro, con un agitador o una electrobomba que haga circular el agua, para mantener en el sistema una temperatura uniforme.

- Con la finalidad de desarrollar la implementación de aplicaciones del glicerol, es fundamental adelantar el proceso de caracterización, ya que permite identificar las propiedades adecuadas para las posibles reacciones que faculten la obtención de productos que concedan valor agregado, como es el caso del ácido mesoxálico, que representa un componente fundamental de medicamentos para el tratamiento de la diabetes, y en la actualidad se realizan investigaciones especializadas acerca de sus posibles usos en otros medicamentos.

8. REFERENCIAS

- Biodiésel del Plata. (2006). Biodiésel –Aspectos técnicos–. Obtenido el 20 de junio de 2007 en <<http://www.biodiesel.delplata.com.ar/bdp.info.biodiesel.php>>.
- Doran P. (2001). Principios de Ingeniería de los Bioprocesos. Flujo y mezcla de Fluidos. 2 ed. España: Acribia.
- Fedepalma (2006). Balance económico. Desempeño del sector palmero colombiano. Obtenido el 20 de junio de 2007 en <http://www.fedepalma.org/document/Docnoticias/Boletin_Economico_2006.pdf>.
- Mccabe W. y Smith, J. (1968). Operaciones básicas de ingeniería química. Agitación y mezcla de líquidos.
- Mccabe W. y Smith J. (2002). Operaciones básicas de ingeniería química. Agitación y mezcla de líquidos. 4 ed., pp. 260-307.
- MICROCHIP, fuzzyTECH®-MP, USERS GUIDE, (1994). Microchip Technology Inc. Printed in USA, pp. 6-94.
- Vernon J. (2005). Agitación y mezclado de líquidos en tanques. Universidad Autónoma Metropolitana (2), 1.