

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE PROTOTIPO DE MÁQUINA AUTOMATIZADA, PARA MEZCLADO DE POLIESTIRENO RECICLADO Y ARCILLA

Gustavo Cruz Guzmán

Instituto Tecnológico de Querétaro
tavo_best@hotmail.com

Hernando Chagolla Gaona

Instituto Tecnológico de Querétaro
hchagollag@hotmail.com

Agustín Barrera Navarro

Instituto Tecnológico de Querétaro
abn792001@yahoo.com.mx

Román Silva Peñaloza

Instituto Tecnológico de Querétaro
rom_sp210@hotmail.com

Domingo Rangel Miranda

Centro de Física Aplicada y Tecnología Avanzada UNAM
ranged@fata.unam.mx

Genoveva Hernández Padrón

Centro de Física Aplicada y Tecnología Avanzada UNAM
genoveva@fata.unam.mx

Resumen

En este trabajo se presenta la automatización de una máquina mezcladora de poliestireno reciclado y arcilla con el propósito de mantener bajo control de calidad los parámetros dimensionales de las muestras, fabricadas en forma de tabletas de 1" de diámetro y 3 mm de espesor. Dichos parámetros dimensionales son imprescindibles para llevar a cabo una caracterización dieléctrica y mecánicas de

materiales con propiedades de aislamiento eléctrico y soporte mecánico. Esta máquina consta de un sistema para dosificar el poliestireno remolido y la arcilla tratada tipo Dickita. Un sistema de calentamiento e inyección que limita la cantidad de muestra que es introducida en un molde de metal y donde se deposita el material mezclado. El control del proceso se logra a través del autómatas Siemens S7-1200 AC/DC/RLY y una HMI Siemens KTP-400. Con ello se obtiene un sistema capaz de mantener las variables del proceso bajo control. Se presentan como resultados de este trabajo, las características de los bloques funcionales de la máquina, así como las primeras muestras obtenidas y datos de los parámetros dimensionales del material compuesto generado, los cuales inciden directamente sobre los parámetros dieléctricos a partir de este proceso de fabricación automatizado.

Palabra(s) Clave(s): Arcilla, automatización, control, dosificación, inyección.

1. Introducción

Los materiales dieléctricos juegan un papel importante en el desarrollo de nuevos dispositivos electrónicos. Los materiales cerámicos son mejores dieléctricos que los materiales poliméricos, sin embargo presentan desventajas como alta fragilidad y elevadas temperaturas de proceso, lo que limita sus aplicaciones en dispositivos electrónicos modernos y mecatrónicos, los cuales deben de tener cierta flexibilidad mecánica o capacidad de amortiguamiento de vibraciones mecánicas; en cambio, la naturaleza viscoelástica de los polímeros se puede interpretar como un comportamiento intermedio entre un líquido viscoso puro y un sólido elástico ideal [1]. Los composites hechos a través de polímeros y arcilla están llamando la atención debido a que presentan diversas ventajas en comparación a composites poliméricos [2]. Se han hecho investigaciones donde se comprueban las ventajas de combinar estos dos materiales [3] como lo son mejoras térmicas y mecánicas entre otras.

Un material compuesto o composite es un sistema material integrado por una combinación de dos o más micro o macro estructuras que difieren en forma y composición química y que son esencialmente insolubles entre sí.

Para la realización de este composito se utiliza la técnica de moldeo por inyección. El proceso parece ser muy simple, pero existen diversas fuentes de variación (temperatura, presión, velocidad, tiempos, etc) las cuales lo hacen difícil de controlar causando una no linealidad afectando la calidad del producto terminado. Un componente plástico moldeado depende de los parámetros involucrados en el proceso que típicamente son establecidos por el operador según su criterio. Por lo tanto, surge la necesidad de contar con un sistema capaz de contrarrestar los cambios inherentes al sistema y así mantenerlo bajo control en todo momento para obtener piezas de gran calidad de manufactura para su posterior análisis y caracterización. Investigaciones realizadas para la optimización del moldeo por inyección, concluyen que existen cinco parámetros del proceso que son considerados críticos en la variabilidad de los atributos de calidad: temperatura del plástico, temperatura del molde, presión de empaque y tiempo de enfriamiento [4] y la homogeneidad de los materiales.

2. Desarrollo

El proyecto fue desarrollado en el Laboratorio de Automatización y Sustentabilidad del Instituto Tecnológico de Querétaro. En el punto 2.1 se identifican las propiedades de los materiales involucrados en este trabajo, dado que es la base de la cual parten las consideraciones de diseño.

Propiedades de los materiales

Las propiedades de los materiales son descritas en la tabla 1 [5,6]. Tomando en cuenta las propiedades de los materiales (tabla 1), se identificaron las partes que debe contener el prototipo de la máquina (figura 1).

Áreas de interés para el diseño de la máquina

Para identificar las características de cada una de las partes de la máquina fue elaborado un análisis, mismo que se describe, en cada una de las secciones siguientes. En algunos casos, no es requerido un análisis muy riguroso o estricto, por lo cual no se aborda su desarrollo, tal el caso del tamaño de los contenedores

de material, que fue determinado, con base a mantener la fabricación de obleas constante sin necesidad de volver a alimentar, sin embargo, nuestra máquina a nivel prototipo, no afecta en medida significativa el tamaño de los contenedores, dado que la fabricación de obleas, no requiere la fabricación constante.

Tabla 1 Propiedades de los materiales.

Material	Poliestireno (PS)	Arcilla
Tipo	Cristal	Dickita $Al_2Si_2O_5(OH)_4$
Temperatura de fundido	190-288 °C	1000-1550 °C
Temperatura de transición vítrea (tg)	100 °C	-----
Temperatura de fusión (tm)	235 °C	1100°C
Temperatura del molde	38-65 °C	-----
Presión	49 psi-99 psi	-----
Encogimiento	0.004-0.010 mm	-----



Figura 1 Áreas de interés para el diseño de la máquina.

Dosificación

El área de dosificación está integrada por dos contenedores de forma cilíndrica que protegen al material con capacidad de almacenaje de 200 gramos cada uno. Para transportar el material hacia el cilindro de inyección se diseñó una válvula tipo tornillo sin fin (figura 2).

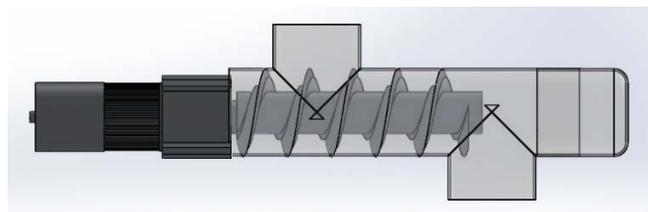


Figura 2 Válvula tornillo sin fin.

La capacidad de transporte está dada por ecuación 1.

$$S = \lambda * \frac{\pi * D^2}{4} \quad (1)$$

Donde S es el área de relleno del transportador, en m^2 ; d es el diámetro del canalón del transportador, en m; y λ es el coeficiente de relleno de la sección.

Sustituyendo:

$$S = 0.4 * \frac{\pi * 0.02^2}{4} = 0.000125 m^2.$$

La velocidad del desplazamiento del transportador (V), se calcula mediante ecuación 2.

$$V = \frac{P * \pi}{60} \quad (2)$$

Donde V es la velocidad, en m/s. P es el paso del tornillo, en m. N es la velocidad de giro del eje del tornillo en rpm.

Sustituyendo:

$$V = \frac{0.007 * 120}{60} = 0.014 m/s$$

El flujo de material transportado (Q) se calcula mediante ecuación 3.

$$Q = 3600 * S * v * \rho * i \quad (3)$$

Donde Q es el flujo de material transportados, en t/h. S es el área de relleno del transportador, en m^2 , ρ es la densidad del material transportado, en t/m^3 . I es el coeficiente de flujo del material debido a la inclinación del transporte.

Sustituyendo:

$$Q = 3600 * 0.000125 * 0.014 * 0.625 * 1 = 0.0039375 t/h$$

Potencia

La presión necesaria para la inyección de un polímero tipo Poliestireno (PS) es de 49-99 psi [4]; la cual es generada por un motor CA. Existe una relación entre la potencia del motor y la presión generada por el mismo para procesos de inyección de plástico [7], figura 3.

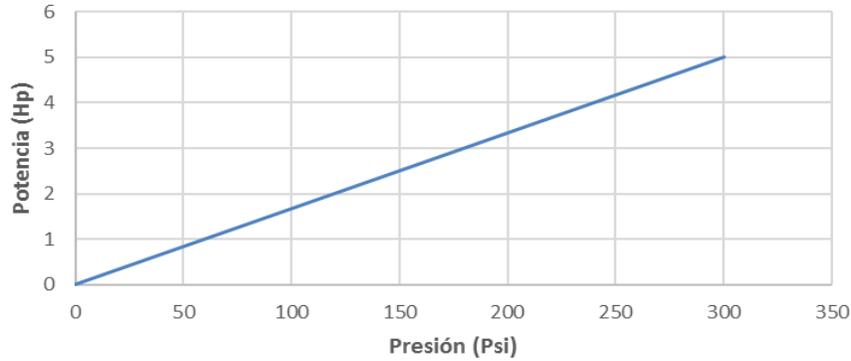


Figura 3 Gráfica presión vs potencia.

Para la selección del motor se tiene ecuación 4.

$$T = \frac{hp \cdot 716}{rpm} \quad (4)$$

Sustituyendo:

$$T = \frac{1hp \cdot 716}{54rpm} = 15.24 \text{ kg/m}$$

Para determinar la presión (P), tenemos ecuación 5.

$$P = \frac{F}{A} \quad (5)$$

Sustituyendo:

$$P = \frac{15.24kg}{0.00038 \text{ m}^2} = 40126.70 \text{ kg/m}^2 \approx 57 \text{ psi}$$

Inyección

El barril se selecciona de acuerdo a la cantidad de material que se inyecta en cada tiro; las piezas moldeadas son de 1.5 gramos de material (figura 4). La capacidad teórica se define como el volumen máximo de material que puede ser desplazado por el pistón de inyección, la cual se determina con ecuación 6.

$$Ci = \frac{\pi}{4} \cdot d^2 \cdot L \quad (6)$$

Donde Ci es la capacidad de inyección; d es el diámetro del tornillo en cm. L es el recorrido máximo del tornillo en cm.

$$Ci = \frac{\pi}{4} \cdot 2.5^2 \cdot 15 = 73.6 \text{ cm}^3$$

El rango de temperatura necesaria para el calentamiento e inyección de los materiales se encuentra entre 188-190 °C [8]. Por lo tanto se selecciona una

resistencia tipo banda de 5 cm de diámetro y 13 cm de largo con una potencia de 762 watts (figura 5).



Figura 4 Barril de inyección.

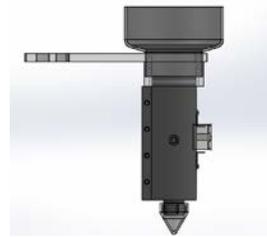


Figura 5 Resistencia calefactora.

Un mecanismo piñón-cremallera, acciona un vástago dentro del barril el cual inyecta el material en el molde (figura 6). El cual tiene las siguientes características:

- Distancia, ecuación 7.

$$d = \frac{z}{n} \quad (7)$$

- Velocidad de desplazamiento, ecuación 8.

$$v = N * \left(\frac{z}{n} \right) \quad (8)$$

Donde z es el número de dientes del piñón; n es el número de dientes por centímetro de la cremallera; N son las rpm.

Sustituyendo:

$$d = \frac{41}{1.5} = 27.3 \text{ cm}$$

$$v = 54 * \left(\frac{41}{1.5} \right) = 1474.2 \text{ cm/min}$$

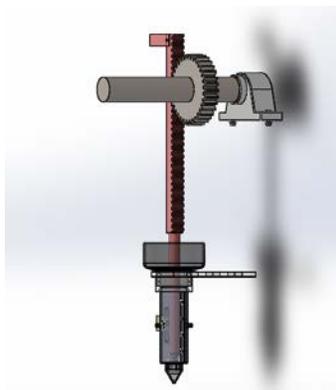


Figura 6 Mecanismo piñón-cremallera para la inyección.

Control

El control de la máquina se realiza mediante el PLC Siemens S7-1200 CPU1214C AC/DC/Relay 6ES7 214-1BG31-0XB0. Algunas de sus principales características se muestran en tabla 2.

Tabla 2 Características PLC siemens S7-1200.

Característica	Descripción
I/O	14 DI 24V DC; 10 DO Relay 2A; 2AI 0-10V DC
Memoria de datos	75 kb
Interfaz	Profinet
Voltaje de suministro	120 V AC
Salida de corriente	1600 mA; max. 5 V DC para SM y CM

El diagrama de flujo del proceso (figura 7) se caracterizó por los tiempos de inyección, ecuación 9.

$$t_i = \frac{(s F_m / F I)^2}{8(T_x - T_m / T_c - T_m)^2} \quad (9)$$

Donde S es el espesor de la pieza= 3 mm. FM es el recorrido máximo del fundido= 20mm. FI es la relación recorrido de flujo/espesor de pared= 100:1. Tc es la temperatura de fundido= 220 °C. Tm es la temperatura del molde= 20 °C, y Tx es la temperatura de distorsión bajo carga= 85 °C

Sustituyendo:

$$t_i = \frac{(3 \cdot 20 / 100)^2}{8(85 - 20 / 220 - 20)^2} = 0.8 \text{ s}$$

Saúl Sánchez Valdés en el libro Moldeo por Inyección de Termoplásticos [5] propone un tiempo de sostenimiento de 2 segundos.

Operación

Para manejo y programación de los parámetros de la máquina, se utiliza un HMI KTP 400 modelo 6AV2 123-2DB03-AX0 (figura 8). Desde éste dispositivo el operador puede controlar las variables del proceso [9]. Sus principales características son:

- 24 V DC.
- Compatibilidad con Tia Portal.

- Puerto de comunicación Ethernet.
- Puerto usb.
- 320x240 pixeles.
- 75 Mhz.

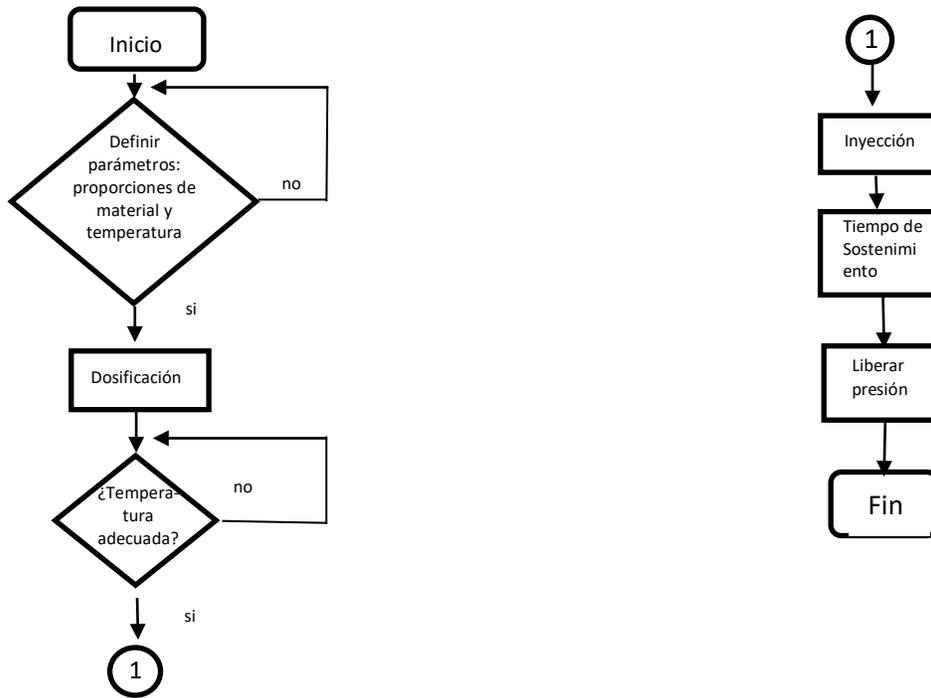


Figura7 Diagrama de flujo del proceso.



Figura 8 HMI Siemens KTP400.

3. Resultados

Dentro de los resultados obtenidos para la automatización de la máquina se muestran los diseños de los nuevos contenedores de arcilla y el poliestireno, están hechos de teflón para evitar contaminación de los materiales por oxidación, corrosión etc., así como para darle soporte mecánico y evitar deformaciones, las cuales incidirían en la precisión de la mezcla, como podemos apreciar en figura 9. Otro resultado obtenido es el sistema térmico para fundir el poliestireno reciclado, el cual se caracterizó térmicamente como un sistema de primer orden pues solo se toma en cuenta la capacidad térmica del contenedor y es por donde se extruye el material. Una vez alcanzada la temperatura de fusión, se aplica presión y se logra con ello inyectar material al contenedor que da forma a las muestras. Este sistema es controlado con un termostato colocado en una de las paredes del contenedor.

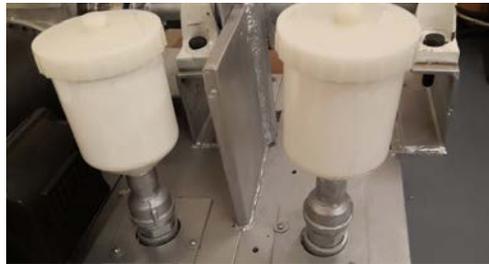


Figura 9 Contenedores para dosificar los materiales.

Es importante señalar que existe un gradiente de temperatura a lo largo del extrusor o inyector que es de aproximadamente 18 cm, y fue necesario tomar en cuenta la temperatura de control en la punta cónica donde sale el material, ya que esa es la temperatura que permitirá una inyección adecuada, como se aprecia en la figura 10.



Figura 10 Componentes de la unidad fusión térmica e inyección.

También se pudo llevar a cabo la inyección automatizada debido a que se tiene un sistema mecánico basado en piñón cremallera, el cual incrementa la precisión con la que es extruido el material al molde de metal. Este acoplamiento tiene pasos lineales del orden de milímetros que dan por resultado tener volúmenes de inyección del orden de mililitros. Tiene posicionados interruptores mecánicos de carrera para dar la secuencia exacta de llenado del molde, la cual es controlada desde el Controlador Lógico Programable, como se aprecia en la figura 11.



Figura 11 Mecanismo Cremallera-piñón para controlar la inyección.

Un elemento importante que pudo resolver la repetitividad en la fabricación de mezclas de poliestireno-arcilla fue la interfaz hombre máquina, ya que el tipo de usuario solo necesita introducir la relación de porcentaje de la mezcla y las dimensiones de la pastilla y el sistema automáticamente fabricará la muestra con las condiciones pedidas. La máquina cuenta con un sistema de detección de finalización de llenado para evitar sobrellenado del molde, además de paro automático para propósitos de seguridad. Es totalmente *touch* para facilitar su manejo y programación (figura 12).



Figura 12 Interfaz HMI para manejo de la máquina mezcladora.

Una vista preliminar de la máquina automatizada es mostrada en la figura 13, la cual muestra los diversos componentes incluyendo la etapa de control, potencia, interfaz de usuario, recipientes para dosificación, así como la etapa de moldeado y extrusión.



Figura 13 Máquina mezcladora de poliestireno y arcilla.

4. Discusión

Una vez que se realizó la automatización, se procedió a fabricar diversas muestras para cotejar su repetitividad, de acuerdo a sus parámetros dimensionales, así como de sus propiedades dieléctricas, las cuales son de nuestro interés tanto las propiedades dieléctricas y como las de aislamiento eléctrico. En la figura 14 se observan 7 muestras obtenidas con la máquina automatizada, los materiales mezclados fueron poliestireno reciclado y triturado con arcilla tipo Dickita en diferentes proporciones.

Se hicieron mediciones dimensionales de las muestras para saber su repetitividad, se midió el espesor promedio (tomado en tres puntos de la muestra) y el diámetro promedio (tomado en direcciones perpendiculares) con un Vernier marca Mitutoyo, modelo CD-6" CSX con 10 μm de resolución. También se calculó la repetitividad en función de la desviación estándar de todas las muestras y resultó ser buena.



Figura 14 Muestras de Poliestireno-arcilla obtenidas con la máquina.

Para las mediciones dieléctricas solo se tomó por ahora la constante dieléctrica y la impedancia de la muestra, ya que esas dos variables nos representan la capacidad de la muestra como material dieléctrico y la capacidad de la muestra como material aislante respectivamente. La figura 15 muestra el equipo LCR Agilent modelo E4980A con el que realizaron las mediciones anteriores.

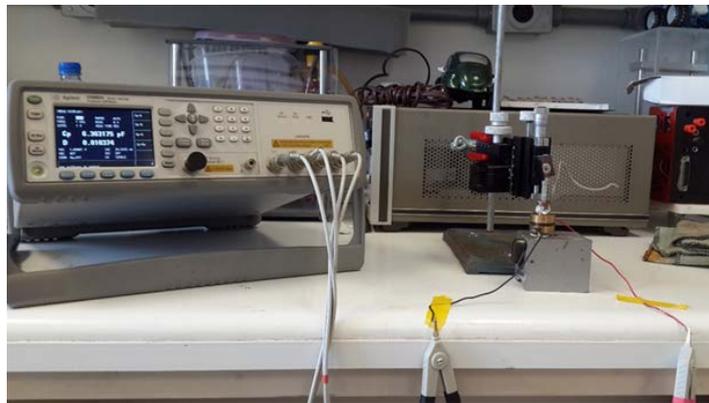


Figura 15 Mediciones de la constante dieléctrica e impedancia de las muestras.

En la tabla 3 se muestran los datos obtenidos para valorar la calidad de las muestras al mezclar poliestireno reciclado con arcilla en la máquina automatizada.

Tabla 3 Datos obtenidos de las muestras.

No. muestra	Diámetro [mm]	Espesor [mm]	Peso [g]	Constante Dieléctrica $K = \frac{C_{dieléctrico}}{C_{vacío}}$	Impedancia Z [MΩ]	Ángulo θ [°]
1	25.18	3.12	1.61	1.24	25.29	-89.54
2	25.15	3.08	1.5	1.41	25.55	-89.41
3	25.18	3.10	1.58	1.49	24.33	-89.37
4	25.17	3.13	1.55	1.48	24.51	-89.28
5	25.18	3.08	1.51	1.42	25.53	-89.37
6	25.18	3.06	1.5	1.46	24.55	-89.39
7	25.18	3.10	1.53	1.44	24.90	-89.40
Promedio	25.1771428	3.09642857	1.54	1.42	24.951428	-89.394285
Desviación Estándar	0.00958314	0.02215437	0.03927	0.07837638	0.4709391	0.07148569

5. Conclusiones

La automatización de la máquina mezcladora e inyectora de poliestireno y arcilla fue un trabajo y aporte para al área de la automatización de procesos e investigación de materiales, ya que este trabajo permitirá facilitar el trabajo de preparación de muestras para análisis dieléctrico y mecánico de materiales compuestos. La principal ventaja de esta automatización es que aumentó el rendimiento del procesamiento de polímeros por inyección, el cual es el más utilizado por el gran número de cualidades que tiene a diferencia de otras técnicas de procesamiento. La lógica de programación con la que fue diseñada pudo adaptarse a las características de inyección de este tipo de mezclas. La repetitividad de las dimensiones de las muestras fue mejorada significativamente ya que se obtuvo una desviación estándar de 0.0095 en relación al diámetro y de 0.0221 en relación al espesor de las muestras. Es posible aún mejorarla más, ya que es la cualidad más importante por el tipo de caracterización dieléctrica y mecánica que requiere este tipo de materiales aplicados a la Ingeniería.

6. Bibliografía y Referencias

- [1] J. G. Puente Córdova, E. Reyes Melo, "Materiales poliméricos dieléctricos". Ingenierías. Volumen XV. Número 57. Diciembre 2012. Páginas 29-37.

- [2] C. Il Córdoba, J. Gon Lim, "The fabrication of syndiotactic polystyrene/organophilic clay nanocomposites and their properties". Polymer, Volume X. Número VII. Febrero 2001. Páginas 7465-7475.
- [3] G. Peña Rodríguez, J. Sánchez molina, "Efecto de la concentración de Poliestireno expandido en la conductividad térmica efectiva de bloques de termoarcilla". Revista Colombiana de Física. Volumen 40. Número 2. Julio 2008.
- [4] A. Alvarado Iniesta, "Sistema neuro-difuso para el control de atributos de calidad de inyección en plásticos". Volumen 50. Número 2. Agosto 2013.
- [5] R. Grim Reynolds, Clay mineralogy. Second Edition. 1968. Mc Graw Hill. USA. Página 586.
- [6] S. Sánchez Valdés, I.G. Yáñez Flores, Moldeo por inyección de termoplásticos. Primera Edición. 2008. Limusa. México. Página 222.
- [7] C.L. Cadena Rueda. A. Meza Martínez. Diseño de una máquina inyectora de plástico. 2006. Universidad industrial de Santander Bucaramanga. Colombia. Página 119.
- [8] A. Alvarado Iniesta, J. García Alcaraz, "Optimization of injection molding process parameters by a hybrid of artificial neuronal network and artificial bee colony algorithm". Numero 67. Junio 2013. Páginas 43-51.
- [9] J. Girona Salgado, Automatización de procesos mediante la guía GEMMA. Primera Edición. 2005. UPC Editions. Páginas 94.

7. Autores

Ing. Gustavo Cruz Guzmán es Ingeniero en Mecatrónica por el Tecnológico de Estudios Superiores de Jocotitlán, Estado de México. Actualmente estudia la maestría en Ingeniería bajo la línea de automatización y sustentabilidad en el Instituto Tecnológico de Querétaro, México.

M.C. Hernando Chagolla Gaona, es maestro en ciencias en Ingeniería Electrónica; Profesor Investigador de la División de Estudios de Posgrado e Investigación del Instituto Tecnológico de Querétaro. Maestría en Ingeniería en Automatización y

Sustentabilidad. Catedrático del Depto. de Ingeniería Eléctrica y Electrónica del Instituto Tecnológico de Querétaro.

Dr. Domingo Rangel Miranda, es doctor en Ingeniería en el Área de Instrumentación y Control, es Responsable del Laboratorio de Instrumentación y Desarrollo del Centro de Física Aplicada y Tecnología Avanzada de la UNAM. Es Nivel 1 del Sistema Nacional de investigadores y sus líneas de interés están en la automatización e instrumentación para el procesamiento inteligente de materiales.

Dra. Genoveva Hernández Padrón, Ingeniero Químico, obtuvo los grados de maestría y doctorado en Ingeniería Química con especialidad en polímeros. Nivel 1 del Sistema Nacional de investigadores; sus líneas de interés son: síntesis, funcionalización y caracterización de polímeros.

M.T.A. Agustín Barrera Navarro. Profesor del Instituto Tecnológico de Querétaro desde el año 2005, adscrito al departamento de posgrado e investigación. Ha impartido cátedra en las carreras de electrónica, eléctrica, mecatrónica y materiales. Las áreas de interés en las que trabaja son control inteligente, electrónico, generación de energía y sistemas digitales. Ha participado como asesor de proyectos de residentes en diferentes empresas y centros de investigación.

C. Román Silva Peñaloza, estudiante de la licenciatura en ingeniería electrónica del Instituto Tecnológico de Querétaro con especialización en sistemas embebidos.