

# Diseño y construcción de un prototipo experimental de una máquina perforadora de botellas de PET para la empresa NEUMAC S.A.

## Design and construction of a PET bottle perforating machine experimental prototype for the company NEUMAC S.A.

Ing. Carla Villacís-Núñez<sup>1</sup>, Ing. José Pérez-Rosales<sup>1</sup>, Ing. Milton Acosta-Jarrín<sup>1</sup>

I. Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE. Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica.

Av. General Rumiñahui, S/N, Sangolquí, Pichincha, Ecuador. CP 171-5-231-B.

Teléfono: (+593) 02 3989400.

Correo electrónico: [cnvillacis@gmail.com](mailto:cnvillacis@gmail.com)

---

### Resumen

El principal objetivo de este trabajo es el diseño y construcción de un prototipo experimental que permita perforar botellas de PET, para evitar los problemas ocasionados en la compactación con prensas hidráulicas. Para ello, se probaron teorías para obtener las fuerzas de perforado y compactado que se presentan en los elementos de la máquina al realizar los agujeros en las botellas, se realizaron experimentos para comprobar la aplicabilidad de dichas teorías y se determinó un valor para el diseño. Posteriormente, se obtuvo el factor de seguridad para los elementos perforadores y se realizaron pruebas de funcionamiento del prototipo, concluyendo que es funcional y cumple con los parámetros establecidos en el diseño.

**Palabras clave:** reciclaje, PET (polietileno tereftalato), máquina perforadora, botellas, plásticos.

### Abstract

The main goal of this work is the design and construction of an experimental prototype that allows perforating PET bottles, in order to avoid problems caused by compaction with hydraulic presses. For this, theories were tested to obtain the perforating and compaction forces that arise in the elements of the machine to make the holes in the bottles, experiments were performed to test the applicability of such theories and the design value was determined. Subsequently, the factor of safety for the borer elements was obtained and performance testing of the prototype was conducted. Finally, it was concluded that this prototype is functional and meets the established design parameters.

**Keywords:** recycling, PET (polyethylene terephthalate), perforating machine, bottles, plastics.

### INTRODUCCIÓN

En Ecuador, una de las empresas que impulsan el reciclaje es NEUMAC S.A., que se dedica a diseñar y construir máquinas que cuenten con sistemas hidráulicos y neumáticos. Entre estas máquinas se encuentran las prensas hidráulicas para comprimir PET, que tienen una capacidad de compactación pre-definida por el cliente, de acuerdo a sus necesidades. La mayoría de veces, la capacidad de la máquina no es suficiente para hacer explotar los envases que ingresan con tapa y liberar el aire o líquido de las botellas, por lo tanto, los fardos que se obtienen no son tan densos como se necesita en los centros de acopio y además, se ocasiona un sobre-

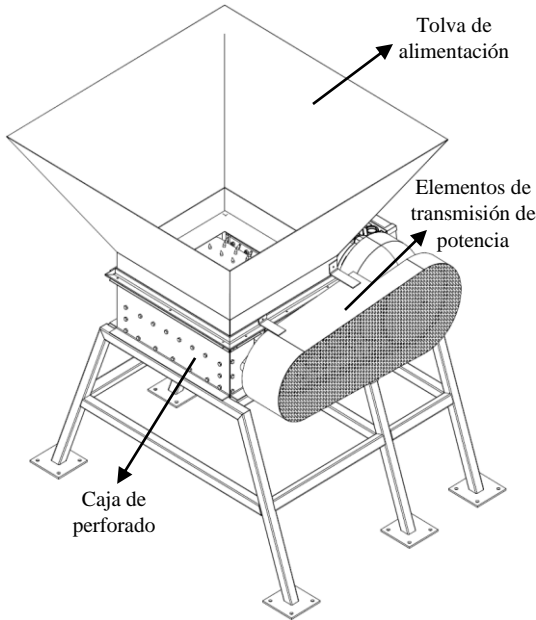
esfuerzo en el sistema hidráulico de la máquina, lo que conlleva pérdidas de tiempo y dinero.

Con una máquina que perfora los envases, previo a la etapa de compactado, se obtendrían varios beneficios: compactar las botellas con menos energía que la utilizada actualmente, incrementar la densidad de los fardos, disminuir costos de almacenamiento, aumentar la producción de fardos.

Por esta razón, se llevó a cabo este proyecto, con el objetivo de diseñar y construir un prototipo experimental de una máquina perforadora de botellas de PET para la empresa NEUMAC S.A.

## DISEÑO DEL PROTOTIPO

Para el desarrollo del prototipo se plantearon 4 alternativas de diseño, de las cuales se escogió un modelo que incluye dos rodillos que giran en sentidos opuestos y tienen puntas soldadas en su superficie, las mismas que realizan la labor de perforado de botellas. Los rodillos poseen una separación de 35 mm y se encuentran dentro de una caja que además posee topes laterales para la remoción de botellas atascadas. El esquema de la máquina se indica en la figura 1.

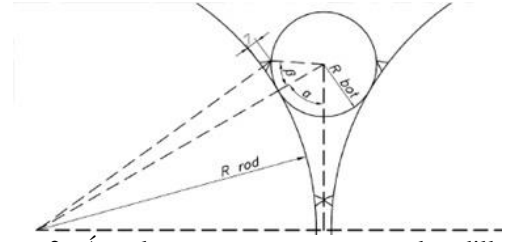


**Figura 1:** Esquema del prototipo de máquina perforadora de botellas de PET. Se muestra la tolva de alimentación, la caja de perforado y los elementos de transmisión de potencia cubiertos por su respectiva protección.

La capacidad planteada por la empresa NEUMAC S.A. fue de dos fardos de PET por hora; debido a que cada fardo pesa 250 kg aproximadamente, y en promedio las botellas sin tapa pesan 19.2 gramos, se especificó una capacidad de 28800 botellas/hora como base para los cálculos.

Los elementos principales del prototipo son las puntas perforadoras y el rodillo que las contiene. Su diseño requiere la determinación de las fuerzas de perforado y compactado de una botella de PET, y el cálculo del radio del rodillo.

La condición de no resbalamiento de una botella (1) propuesta por Medina [1], que se muestra en la figura 2, se utilizó para obtener el radio mínimo de rodillo. Las ecuaciones (2) y (3) se derivan por geometría.



**Figura 2:** Ángulos que aparecen entre el rodillo, las puntas perforadoras y la botella al momento que el envase fue atrapado por las puntas y está en posición de compactación [1].

$$\alpha + \beta > 90^\circ \quad (1)$$

$$\sin(\alpha) = \frac{\frac{L_{srod}}{2} + R_{rod}}{R_{rod} + R_{bot}} \quad (2)$$

$$\cos(\beta) = \frac{R_{bot}^2 + (R_{rod} + R_{bot})^2 - (R_{rod} + h_{puntas})^2}{2R_{bot}(R_{rod} + R_{bot})} \quad (3)$$

Con un radio de botella de 34.5 mm, una altura de puntas de 20 mm, y una separación de rodillos de 40 mm, se determina que:

$$R_{rod\text{mín}} = 16 \text{ mm}$$

Sin embargo, se utiliza un radio de  $R_{rod} = 110 \text{ mm}$  para hacer uso de materiales reciclados por la empresa.

Para la fuerza de perforado se aplicaron dos teorías:

- El método de fractura rápida para materiales con baja elasticidad, descrito por Ashby [2], que se refleja en la ecuación (4):

$$\delta W_{perf} = G_c t \delta a \quad (4)$$

Reemplazando los valores para el PET, con un diámetro de punta de 10 mm, se tiene:

$$F_{perf} = 7000 \frac{\text{J}}{\text{m}^2} \times 0,01 \text{ m}$$

$$F_{perf} = 70 \text{ N}$$

- La fuerza de corte en punzonado, que se muestra en Lehnert [3], y que utiliza la fórmula (5):

$$F_{perf} = \sigma_\tau A_{perf} \quad (5)$$

Con los valores correspondientes al PET se obtiene:

$$F_{perf} = \pi d_{punta} \sigma_{\tau_{PET}} e_{bot}$$

$$F_{perf} = \pi \times 10 \text{ mm} \times 55,2 \text{ MPa} \times 3 \text{ mm}$$

$$F_{perf} = 5,20 \text{ kN}$$

Por la discrepancia entre resultados de teorías, se calculó la fuerza de perforado por experimentación. Se utilizaron tres punzones de prueba para perforar las botellas, con ángulos de 30, 45 y 53 grados respectivamente. Con el ángulo de 30 grados se registraron las menores magnitudes de fuerza de perforado, y se determinó que para punzonar el cuerpo de las botellas de PET, con agua en su interior (15% más que una botella vacía), se necesita un total de:

$$F_{perf} = 72 \text{ N}$$

La única teoría disponible para la obtención de la fuerza de compactado es la de laminado plano (6), que se menciona en Kalpakjian [4]:

$$F_{rod} = L_n w Y_{avg} \quad (6)$$

Si hipotéticamente se estuviera compactando PET en estado sólido, la fuerza que se necesitaría en cada rodillo sería:

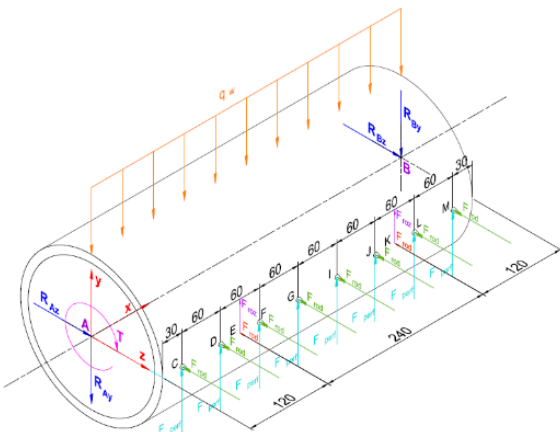
$$F_{rod} = 56,48 \text{ mm} \times 294 \text{ mm} \times 7,5 \text{ MPa}$$

$$F_{rod} = 124,5 \text{ kN}$$

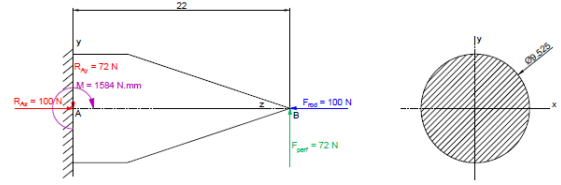
Y como consecuencia, la potencia para mover cada rodillo sería considerablemente alta. Por tal razón, también se determinó la fuerza de compactado por experimentación, reduciendo el cuerpo de la botella hasta un espesor de 40 mm:

$$F_{rod} = 100 \text{ N}$$

Las fuerzas obtenidas se aplicaron a la punta y al rodillo, como muestran las figuras 3 y 4.



**Figura 3:** Fuerzas que aparecen en el rodillo, al compactar y perforar 2 botellas en sentido horizontal, suponiendo que cada punta realiza una perforación en las botellas, y que en el centro de cada cuerpo se aplica una fuerza de rozamiento y una fuerza de compactado.



**Figura 4:** Diagrama de cuerpo libre de la punta perforadora, considerándola como viga con un apoyo fijo.

Después de realizar equilibrio estático en el rodillo, el mayor par de torsión registrado fue de:

$$T_{máx} = 68,86 \text{ N.m}$$

Con una velocidad mínima de giro de 140 rpm, derivada en base a la capacidad requerida y un ingreso crítico de 1 botella en sentido horizontal, como se explica en Villacís [5], se calculó una potencia de 2,4 kW para todo el sistema. Por requerimientos de la empresa, la potencia se redujo a 2,1 kW a 120 rpm.

En la punta perforadora, al analizar la soldadura (GTAW sin material de aporte), se tienen esfuerzos primarios y secundarios alternantes y medios, considerando que el cero es cuando no existen botellas, y el máximo cuando se alcanza el centro del rodillo. Las ecuaciones (7) a (10) muestran los esfuerzos generados, que se combinan en la ecuación de Gerber (11), extraída de Budynas & Nisbett [6], para obtener el factor de seguridad a fatiga:

$$\tau'_{arod} = \tau'_{mrod} = K_{fs} \frac{F_{rod}}{A} \quad (7)$$

$$\tau'_{aperf} = \tau'_{mperf} = K_{fs} \frac{F_{perf}}{A} \quad (8)$$

$$\tau''_{arod} = \tau''_{mrod} = K_{fs} \frac{M_a c}{0,707 h I_u} \quad (9)$$

$$\tau_a = \tau_m = \sqrt{\left( (\tau'_{arod})^2 + (\tau'_{aperf})^2 \right)^{1/2} + \tau''_{arod}} \quad (10)$$

$$n_f = \frac{1}{2} \left( \frac{0,67 S_{ut}}{\tau_m} \right)^2 \frac{\tau_a}{S_{se}} \left[ -1 + \sqrt{1 + \left( \frac{2 \tau_m S_{se}}{0,67 S_{ut} \tau_a} \right)^2} \right] \quad (11)$$

$$n_f = 2,19$$

Que es satisfactorio por ser mayor a 2. De los demás elementos, es importante recalcar que la tolva de alimentación tiene capacidad para alojar 480 botellas, y que los ejes, placas de remoción de botellas, rodamientos, tapas de rodillo, estructura, tienen como base de su diseño las reacciones obtenidas, tanto en el rodillo como en la punta y utilizan el criterio de Soderberg de fatiga a vida infinita (12), descrito en Budynas et al [6].

$$\frac{1}{n_f} = \frac{\sigma'_a}{S_e} + \frac{\sigma'_m}{S_y} \quad (12)$$

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Después de construir el prototipo, siguiendo los lineamientos del diseño, se realizaron las pruebas de funcionamiento, en las que se midieron los siguientes parámetros: consumo de corriente, tiempo de procesamiento de botellas, número de botellas perforadas, número de botellas que se quedaron saltando en los rodillos, número de agujeros por botella, velocidad angular del motor y del rodillo conductor.

En las tablas 1 a 4 se indican los valores estimados a partir de los parámetros medidos en las pruebas.

**Tabla 1:** Potencia estimada a partir de la corriente medida y los valores de placa del motor. La nomenclatura es la siguiente:  $P_v$  = Potencia en vacío,  $P_{mo}$  = Potencia máxima alcanzada en operación,  $P_{mc}$  = Potencia máxima al hacer arrancar la máquina con carga,  $P_p$  = Potencia promedio en operación.

Valor	%B <sub>perf</sub>	[kW]			
		$P_v$	$P_{mo}$	$P_{mc}$	$P_p$
Mín	100	1,76	1,82	1,93	1,87
Máx	100	2,02	2,11	2,30	2,06
$\bar{x}$	100	1,84	1,97	2,10	1,95

**Tabla 2:** Par de torsión estimado a partir de la potencia y la velocidad angular del rodillo. La nomenclatura es la siguiente:  $T_v$  = Par de torsión en vacío,  $T_{mo}$  = Par de torsión máximo alcanzado en operación,  $T_{mc}$  = Par de torsión máximo al hacer arrancar la máquina con carga,  $T_p$  = Par de torsión promedio en operación.

Valor	Par de torsión en el eje del rodillo conductor [N.m]			
	$T_v$	$T_{mo}$	$T_{mc}$	$T_p$
Mín	136,96	140,93	149,86	145,49
Máx	157,21	163,76	178,64	159,59
$\bar{x}$	143,21	153,00	162,71	151,25

**Tabla 3:** Capacidad estimada a partir del tiempo y número de botellas procesadas, y número de agujeros por botella.

Valor	Capacidad		Número de agujeros por botella
	[bot/s]	[bot/h]	
Mín	12,7	45900	2
Máx	20,5	73800	8
$\bar{x}$	17,0	61204	5

**Tabla 4:** Porcentaje de agujeros hechos en el cuerpo o en la tapa de la botella.

Agujeros en cuerpo	Agujeros en tapa o cuello	% agujeros en cuerpo	% agujeros en tapa o cuello
124	40	76	24

La tabla 5 muestra las características reales del prototipo vs las características de diseño.

**Tabla 5:** Características reales del prototipo frente a características utilizadas en el diseño y porcentaje de error obtenido.

Descripción	Unidad	Valor de diseño	Valor real	Error %
Velocidad angular del motor	rpm	49,5	51	3
Velocidad angular de los rodillos	rpm	121	123	1,7
Potencia a plena carga	kW	2,20	2,11	4,1
Potencia máxima	kW	2,20	2,20	0
Par de torsión a plena carga	N.m	176,31	163,76	7,1
Capacidad	botellas/hora	28800	61204	112,5
Porcentaje de botellas perforadas	%	100	100	0

Los errores obtenidos son menores al 10% en todos los parámetros, excepto la capacidad del prototipo. Sin embargo, no se obtuvo un valor menor de botellas por hora, sino mayor; por lo tanto, las pruebas de funcionamiento fueron satisfactorias, así como el diseño propuesto, y se valida la máquina.

## CONCLUSIONES

Los valores obtenidos de la teoría de fractura rápida son muy similares a los obtenidos por experimentación. Por lo tanto, futuras máquinas perforadoras podrían utilizar esta teoría y evitar la experimentación.

El prototipo construido es funcional. Las pruebas de funcionamiento indican que el diseño es satisfactorio y que la máquina se puede tomar como base para un diseño más avanzado que permita su validación comercial y desarrollo en serie.

La máquina fue validada mediante pruebas de funcionamiento y puesta a punto, obteniendo una

capacidad promedio de 61204 botellas/hora, que es aproximadamente el doble de la capacidad propuesta (28800 botellas/hora) y permitiría que el operador tenga tiempos de descanso durante la perforación de botellas, incrementándose la producción de fardos de envases plásticos aun con las demoras.

El prototipo consume aproximadamente 2,1 kW de potencia a plena carga, y debido a que el rodillo conductor gira a 123 rpm, el par de torsión generado es de 163,76 N.m Consecuentemente, no se tiene valores mayores a los tomados para el diseño de los elementos.

El porcentaje de botellas perforadas es del 100%, de las cuales, un 24% son perforadas en la tapa o cuello y el porcentaje restante en el cuerpo. El haber supuesto que todas las puntas hacen una perforación fue favorable para que se pudiera perforar la tapa sin alterar la potencia del motor.

## REFERENCIAS

- [1] Medina, S. *Diseño de una máquina compactadora de botellas de plástico*. Tutor: Barriga Gamarra, B. Tesis de pregrado. Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima, Perú, 2012. [Consultado el: 10 de diciembre de 2013]. Disponible en: <http://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/handle/123456789/1655>
- [2] Ashby, M.F. & Jones, D.R. *ENGINEERING MATERIALS 1: An introduction to their properties & applications*. 2da ed. UK: Butterworth-Heinemann, 2002, p. p. 131-138.
- [3] Lehnert, R. *La Construcción de Herramientas*. Traducido por: Saenz de Magarola, D. C. 1ra ed. España: Editorial Reverté, 1979, p. p. 26-27. [Consultado el: 15 de diciembre de 2013]. Disponible en: <http://books.google.com.ec/books?id=9spxsIXtlCIC&pg=PA27&dq=matrickeria+fuerza+de+corte&hl=es&sa=X&ei=Jo1qVMjXLazdsAS93ILQDQ&ved=0CCAQ6AEwAQ#v=onepage&q=matrickeria%20fuerza%20de%20corte&f=false>
- [4] Kalpakjian, S. & Schmid, S.R. *Manufactura, ingeniería y tecnología*. 4ta ed. México: Pearson Education, 2002, p. p. 320-323.
- [5] Villacís, C.N. *Diseño y construcción de un prototipo experimental de una máquina perforadora de botellas de PET para la empresa NEUMAC S.A.* Tutor: Pérez Rosales, J. Tesis de pregrado. Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE, Sangolquí, Ecuador, 2014.
- [6] Budynas, R.G. & Nisbett, J.K. *Diseño en ingeniería mecánica de Shigley*. 8va ed. México: McGraw-Hill, 2008, p. p. 458-479, 258-310.