

Diseño de herramienta para mecanizado de brazos de hornos de soleras múltiples / Designing of a tool for machining multiple hearth furnace arms

Rodney Enrique Correa-Suárez¹ rsuarez@moanickel.com.cu <https://orcid.org/0000-0002-6613-5851>; Isnel Rodríguez-González² <https://orcid.org/0000-0002-5020-850X>; Murphis Pompa-Larrazabal³ <https://orcid.org/0000-0001-9943-5685>

Institución de los autores

¹ Empresa Comandante Pedro Sotro Alba. Moa. Holguín

² Instituto Superior Minero Metalúrgico. Moa. Holguín

³ Empresa de Proyectos e Ingeniería del Ministerio de la Agricultura. Guantánamo

País: Cuba

Este documento posee una [licencia Creative Commons Reconocimiento - No Comercial 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)



Resumen

El artículo tuvo la finalidad de establecer el diseño de una herramienta de corte para el mecanizado de brazos de hornos de soleras múltiples, en los cuales su acabado final se realiza por medio de discos abrasivos de desbaste. Al tener en cuenta las solicitaciones y estados tensionales a que está sometida la herramienta de corte, se seleccionó un material empleado para esos fines, fueron también analizadas las variables y parámetros geométricos que garantizan un factor de seguridad, en correspondencia con las exigencias tecnológicas del proceso. De acuerdo con los elementos anteriormente planteados se diseñó una fresa para el mecanizado de las zonas de trabajo de dichos brazos, se determinó, por el método analítico, las cargas y momentos actuantes y por el método de los elementos finitos los esfuerzos tensionales de von Mises y se compararon con los admisibles obtenidos, evidenciándose los resultados deseados.

Palabras clave: Diseño; Fresa; Herramienta; Mecanizado; Esfuerzos

Abstract

The purpose of the article was to establish the design of a cutting tool for the machining of

multi-

shell furnace arms, in which the final finish is achieved by means of roughing abrasive discs. Taking into account the stress and tension states to which the cutting tool is subjected, a material used for these purposes was selected, and the geometric variables and parameters that guarantee a safety factor, in accordance with the technological requirements of the process, were also analyzed. In accordance with the elements previously mentioned, a milling cutter was designed for the machining of the working areas of these arms. The loads and moments acting on its were determined by the analytical method and the von Mises tensile stresses by the finite element method, which were compared with the admissible ones obtained, giving the desired results.

Key words: Design; Cutting tool; Tools; Machining; Stresses

Introducción

Los hornos de reducción de mineral laterítico poseen en el mecanismo de barrido brazos manufacturados a través del proceso tecnológico de fundición los cuales se importaban, éstos debido al régimen de trabajo presentaban fracturas en un corto período de tiempo, en consideración a los elevados costos de importaciones de estos elementos mecánicos con un diseño que no cumplía con las exigencias del proceso, el país estableció una tecnología para la manufactura de los mismos, la cual incrementó su tiempo de vida útil, pero no eliminó la ocurrencia de falla por fractura. Se consideró una modificación en la composición química de la aleación de los brazos, que brindaba una mayor resistencia mecánica y estabilidad térmica, a pesar de que la frecuencia de falla disminuyó, no constituyó la solución final, es por ello la necesidad de un análisis causa raíz el cual revela que las macro deformaciones, asperezas superficiales y pérdida de las tolerancias de forma y posición presentes en la ranura tipo cola de milano de los brazos era producto del maquinado manual con discos abrasivos por la ausencia de una fresa angular de vástago diseñada al efecto para su mecanizado, lo cual conducía a un desequilibrio del centro de masa con respecto al geométrico de rotación del mecanismo y con ello la falla catastrófica y repentina por fractura, ésta fue suprimida con el diseño de una fresa angular de vástago.

El objetivo es diseñar una herramienta de corte para el mecanizado de brazos para hornos de soleras múltiples.

Materiales y Métodos

Características del material para el diseño de la herramienta

Lykov, Gorelikov y Gantulga (2017) aseguran que para el diseño de las herramientas de corte se eligen materiales que tengan en su estructura metalográfica elevados valores de carburos de tungsteno y de wolframio, además de las aleaciones que contienen cromo, molibdeno, vanadio, wolframio; estos son denominadas aceros rápidos, las que poseen, entre sus propiedades, elevada resistencia mecánica y al desgaste, tenacidad, estabilidad al “rojo” y dureza, acompañadas de buena templabilidad, dentro de este grupo se escogió la aleación P6M5 (GOST 17 270), por su versatilidad y abundante disponibilidad.

Selección y preparación de muestra

Se seleccionó una barra de acero P6M5 de diámetro 100 mm y a la misma se le extrajo una probeta de 15 mm de espesor, mediante corte refrigerado en la sierra semiautomática modelo 8B661; se realizó la preparación de la superficie a examinar a través del desbaste y pulido en la electro-amoladora modelo HEQ – 5 248 – 2 y pulidora metalográfica Montasupal para lograr una superficie lisa y pulida libre de impregnación de impurezas o ralladuras, la muestra se desbastó con papeles abrasivos del tipo 100, 120, 150, 180; posteriormente se efectuó el análisis químico de la muestra, en un espectrómetro cuántico de masa ESPECTROLAB 230, con electrodo de carbón bajo arco sumergido en atmósfera de argón. Se comparó la composición química de la muestra con los estándares establecidos para conocer su correspondencia con la aleación a investigar.

Determinación del número de labios cortantes disponibles

Según Moufki (2004), el número de labios cortantes o aristas de corte está dada por:

$$Z = \frac{9,45}{B} D_f \quad (1)$$

Con:

B - ancho de corte; mm

D_f - diámetro de la fresa, mm

Para el maquinado de ranuras tipo cola de milano, Baker (2006), estableció la relación matemática siguiente:

$$D_f = 0,8 \cdot a \quad (2)$$

Siendo:

a - anchura de la ranura a mecanizar, mm

Altura de los labios cortantes

Este es uno de los parámetros geométricos que debe ser controlado porque de él depende el flujo de virutas arrancado por diente, así como su rigidez durante el trabajo. Arshinov (1976), propone determinar la altura de los labios cortantes por:

$$h_t = (0,15 \div 0,5)u ; \text{mm} \quad (3)$$

u - paso circular, mm

Longitud del flanco de corte

Según Arshinov (1976), la longitud de los flancos de corte se determinó como:

$$h_f = 1 \div 1,2 ; \text{mm} \quad (4)$$

Radio de fondo del diente

Para distribuir la fatiga y con ello atenuar los esfuerzos concentradores de tensión el radio de fondo del diente se determinó Stiopin (2005), como:

$$r = \frac{D_f}{(D_f - 2h_t)} ; \text{mm} \quad (5)$$

Cálculo del flujo de material arrancado

Se calcula el flujo de material arrancado por la herramienta de corte, durante en el proceso de fresado, se determina, según Sandvik (2011), como:

$$Q = a_p \cdot B \cdot n \cdot Z \cdot f_z ; \text{m}^3 / \text{s} \quad (6)$$

En la que:

a_p - profundidad de corte, mm

n - frecuencia de rotación de la fresa, min^{-1}

f_z - avance mesa de la fresadora, mm/diente

Determinación de la fuerza de corte

Según Gomes y Vallejos (2004), la fuerza de corte, para la fresa frontal, se obtuvo por intermedio de la ecuación modificada de Kinzle y se expresó como:

$$F_c = k_s \cdot a_p \cdot f_z ; \text{N} \quad (7)$$

k_s - resistencia específica de corte del material a mecanizar, MPa

Determinación de la presión de corte

La presión de corte se determina como:

$$K = k_s \cdot h_m^m; \text{ MPa} \quad (8)$$

h_m - espesor de la viruta

m - exponente que depende del tipo de material a mecanizar

Determinación de la potencia de corte

La variable potencia de corte permite determinar la energía para realizar trabajo, de acuerdo con Arshinov (1976), se calcula:

$$N_{cut} = 42,4 \times 10^{-5} \cdot a_p \cdot f_z^{0,75} \cdot B^{1,1} \cdot n^{0,8} \cdot \frac{Z}{D_f^{0,3}}; \text{ kW} \quad (9)$$

Cálculo de la potencia requerida

Fue necesario determinar la potencia requerida por el motor eléctrico, para realizar el mecanizado:

$$N_{cm} = \frac{N_{cut}}{\eta}; \text{ kW} \quad (10)$$

η - eficiencia de la máquina herramienta, %

Determinación del momento torsor

El momento torsional al que está sometida la herramienta de corte depende de la resistencia específica del material a mecanizar y de los regímenes establecidos, es por ello que Saranche, Guédez y Ramírez (2007), establecen su expresión matemática:

$$M_{tor} = \frac{k_s \cdot a_p \cdot B \cdot D_f \cdot S}{2v_c}; \text{ N} \cdot \text{m} \quad (11)$$

v_c - velocidad de corte, m/s

2.4.13. Análisis de las fuerzas que actúan sobre la fresa

Durante el fresado cada diente de la herramienta está sujeto a una carga de impacto cuando entra en la región de corte. La magnitud de dicha carga depende del material de la pieza, de la posición y geometría de la herramienta y de los parámetros de mecanizado. Las fuerzas en el fresado son cíclicas y fuertemente proporcionales a la espesura de corte en cada posición Weingaertner (2006).

Es preciso, para el análisis, un modelo matemático y un análisis, por el método de los elementos finitos, que permita determinar los esfuerzos generados por el corte en la fresa de vástago, debido al contacto entre el semiproducto y dicha fresa. Se parte del método de Vereshiaguin Stiopin (2005), se analizan las fuerzas que actúan sobre la herramienta a través del diagrama de cuerpo libre (figura 1), en el que se consideró que la herramienta de corte es una viga empotrada en el extremo superior, la cual presenta una carga distribuida en el extremo inferior, a una distancia igual a la profundidad de corte.

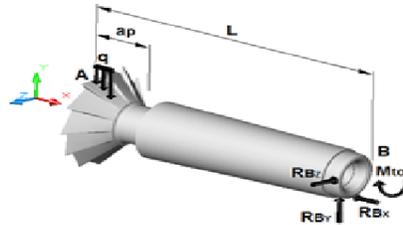


Figura. 1. Diagrama de cuerpo libre de la fresa angular de vástago

De acuerdo con la teoría de Morh Stipoin (2005) se establece un sistema equivalente (figura 2), en el cual se determina la desviación estática.

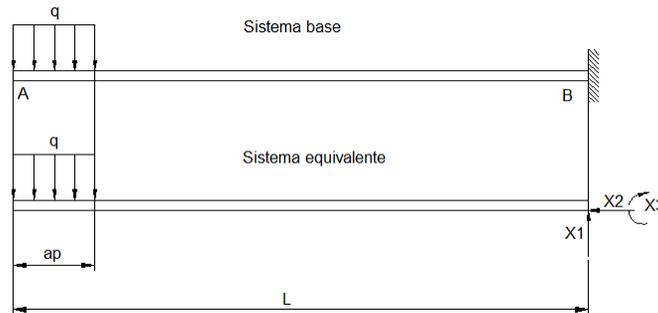


Figura. 2. Sistemas base y equivalente

Al aplicar el código ASME y de acuerdo con Stiopin (2005), se tiene que el diámetro mínimo de la sección de la garganta está dado por:

$$d = \sqrt[3]{\frac{16}{\pi \cdot s_{s_{\max}}} \sqrt{(C_m \cdot M_f)^2 + (C_T \cdot M_{tor})^2}} \quad (12)$$

C_m - coeficiente que considera las cargas combinadas de impacto y fatiga (se toma 1,5 para cargas aplicadas bruscamente y pequeños impactos)

M_f - momento flector, Nm

C_T - coeficiente aplicado al momento torsor (se toma la unidad)

M_{tor} - momento torsor, Nm

$s_{s_{\max}}$ - esfuerzo cortante máximo de trabajo, MPa

Si se aplica la teoría de rotura por cortante máximo y tener en cuenta la concentración de esfuerzos en las aristas cortantes, se considera el 75 % del esfuerzo de trabajo máximo, según Weingaertner (2006), se determina como:

$$s_{s_{\max}} = 0,375 \cdot S_y \quad (13)$$

Donde:

S_y - límite de fluencia del material con el que está construida la fresa, MPa

Análisis por el método de los elementos finitos (MEF)

La simulación se realizó con el empleo del método de elementos finitos (MEF), el que permitió pronosticar la resistencia mecánica en función del material y de la geometría de la fresa angular de vástago en las condiciones investigadas.

Variables para el proceso de simulación

Las variables de diseño son los factores que pueden ser ajustados para controlar la calidad de la herramienta. Para obtener los mejores resultados en el proceso, es necesario conocer el efecto de cada una de ellas sobre las diversas características o propiedades del proceso de mecanizado. Se tuvieron en cuenta las propiedades mecánicas del material, las cargas que actúan (momento torsional en el husillo de la máquina herramienta y la carga distribuida producida por el corte del material), propiedades térmicas, debido a que éstas limitan la capacidad de corte y por último el coeficiente de fricción como resultado de la fuerza de rozamiento que aparece en la interacción semiproducto-herramienta de corte. En la tabla 1 se exponen las variables a considerar.

Tabla 1. Parámetros para la simulación

Parámetros	Magnitud
Módulo de elasticidad, E (MPa)	210 000
Carga distribuida, q (N/m)	521,2
Momento torsor, M_{tor} (Nm)	145,9
Temperatura de mecanizado, T (°C)	600
Coeficiente de fricción, μ	0,5

Las propiedades que se utilizarán para el modelo de elementos finitos se clasificaron en dos grupos:

- Propiedades mecánicas: límite elástico, carga de rotura, módulo de elasticidad, alargamiento, densidad, coeficiente de Poisson.
- Propiedades térmicas: temperatura al rojo, conductividad, calor específico, calor latente, coeficiente de dilatación.

Resultados

Composición química de los materiales estudiados

Como se observa en la tabla 2, el promedio de las mediciones de la composición química, del material analizado, está dentro del rango establecido para la aleación, la que se corresponde con el acero rápido P6M5, de acuerdo con las especificaciones de GOST 17 270.

Tabla 2. Composición química de la probeta y los estándares de P6M5

Material	C	Cr	W	V	Mo	Fe
Probeta	0,848	4,08	6,22	1,789	5,19	81,873
P6M5	0,85	4,15	6,2	1,8	5,2	Balance

Determinación de la geometría del filo

Para la selección de los ángulos de las aristas de corte, en la fresa de vástago diseñada, se tuvieron en cuenta los parámetros como características y configuración geométrica de la superficie a mecanizar (ranura tipo cola de milano) en el elemento a trabajar. El ángulo de desprendimiento radial (α) se seleccionó de 6° , con el que se logra una mayor vida útil de la fresa y mayor resistencia en el filo, así como un aumento de la fuerza de corte. Para el ángulo de incidencia principal se determinó ($\beta = 8^\circ$) para lograr el espacio ideal entre la herramienta y la pieza y con ello disminuir el coeficiente de fricción e incrementar la vida útil. Se estableció un ángulo de incidencia secundario ($\lambda = 30^\circ$), el que posibilita evacuar mayor volumen de virutas, atenuar la temperatura de mecanizado e incrementar la productividad.

Cálculo del número de labios cortantes

Se consideró el diámetro de la fresa con la que se trabajó y se empleó la ecuación 2, tomar en cuenta una anchura de la ranura tipo cola de milano ($a = 105$ mm), luego fue estandarizado y resultó ser $D_f = 80$ mm. Para un ancho de la ranura de $B = 64$ mm, por lo que el número de labios cortantes (ecuación 1) resultó ser de 12 dientes, lo que garantiza un efectivo acabado superficial y tolerancias de forma y posición en la superficie a mecanizar.

En la ecuación 3 se determinó la altura de los labios cortantes, para ello se eligió como valor promedio 0,325, el paso circular $u = 20,94$ mm, donde ésta resultó ser:

$$h_f = 6,81 \text{ mm.}$$

La longitud del flanco definida en la ecuación 4 se tomó $h_f = 1,2$ mm, debido a que con el máximo valor se incrementa el tiempo de vida útil de la herramienta de corte.

El radio de fondo del diente, determinado por la ecuación 5, tiene en cuenta el diámetro de la fresa y la altura de este, al sustituir se obtiene:

$$r = 1,2 \text{ mm}$$

Variables determinantes en el diseño de la herramienta de corte

El flujo de material arrancado determinado en la ecuación 6 tiene en cuenta los parámetros: profundidad de corte, $a_p = 5 \text{ mm}$, el ancho calculado, la frecuencia de rotación, $n = 63 \text{ min}^{-1}$, número de dientes o aristas cortantes (obtenidas en la ecuación 1), avance de la mesa,

$f_z = 0,08 \text{ mm/diente}$, al sustituir se tiene que:

$$Q = 3,2 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$$

Resultado que garantiza que la herramienta de corte tenga una buena productividad como también lo refleja Sandvik (2011).

La fuerza de corte necesaria para el mecanizado se determinó por la ecuación 7, la cual tiene en cuenta la resistencia específica del material a mecanizar, de acuerdo con Gomes y Vallejos (2004), para aceros inoxidable austeníticos fundidos, $k_s = 2\,827 \text{ MPa}$, la profundidad de corte, $a_p = 5 \text{ mm}$ y el avance de la mesa (f_z) se mantuvo igual que en la ecuación 6, por lo que al sustituir $F_c = 1\,130,8 \text{ N}$.

La presión de corte ejercida durante el mecanizado se determinó por la ecuación 8, la que se obtuvo con un espesor medio de viruta, $h_m = 0,098 \text{ mm}$ y el exponente de mecanizado, $m = 0,98$, k_s es similar al de aceros inoxidable austeníticos fundidos, por lo que $K = 290,22 \text{ MPa}$.

La potencia de corte para realizar el mecanizado se determinó por la ecuación 9, la misma tiene en cuenta los parámetros: profundidad de corte, $a_p = 5 \text{ mm}$, a una velocidad de rotación, $n = 63 \text{ min}^{-1}$, se obtiene entonces:

$$N_{cut} = 2,74 \text{ kW}.$$

La potencia requerida por el motor eléctrico, para realizar el mecanizado, se determinó al considerar la potencia de corte obtenida y la eficiencia de la máquina, de acuerdo con las transmisiones y la “guitarra” que posee la máquina se tomó $\eta = 0,75$, por lo que al sustituir en la ecuación 10 resultó ser de $N_{cm} = 4,2 \text{ kW}$.

El momento torsional a que está sometida la herramienta de corte se determinó por la ecuación 11, de acuerdo con el material a mecanizar, la profundidad y el ancho de corte, el diámetro de la fresa, el avance lineal de la pieza, $S = 60,48$ mm/diente y la velocidad de corte, $v_c = 0,25$ m/s, entonces $M_{tor} = 145,9$ N·m.

Análisis de las fuerzas que actúan sobre la fresa

A través del diagrama de cuerpo libre y el sistema equivalente mostrados en las figuras 1 y 2, en los mismos se consideró que en el extremo izquierdo habrá una carga distribuida, formada por la masa del conjunto mesa de la máquina herramienta, brazo (pieza a mecanizar) y elementos de sujeción mecánica que intervienen en la basificación a una distancia denominada profundidad de corte y, en el extremo derecho, un empotramiento el cual tiene en cuenta un momento torsional y dos reacciones, se aplica la sumatoria de fuerzas en el plano XOY, el valor de la reacción RBy resulta ser RBy= 521,2 N.

El diámetro mínimo en la sección de la garganta, determinado por la ecuación 12, permite estimar los parámetros: esfuerzo cortante de trabajo máximo, calculado en la ecuación 13, éste considera el 75 % del cortante de trabajo máximo y el límite de fluencia, $S_y = 100$ MPa, para $S_{smax} = 37,5$ MPa, el coeficiente para cargas bruscas y pequeños impactos, $C_m = 1,5$, momento flector, $M_f = 91,21$ N·m, coeficiente aplicado al momento torsor, $C_T = 1$, el momento torsor, $M_{tor} = 145,9$ N·m, al sustituir se obtuvo como resultado $d = 20$ mm.

Análisis del diseño

Las tensiones máximas aparecen en el ángulo respecto a los ejes longitudinal y transversal de las superficies de corte de la fresa, las cuales alcanzan una magnitud de 20,68 MPa, valor inferior al admisible para el material (312 MPa, con coeficiente de seguridad de 2,5). Se observa además que las aristas cortantes y cambios de sección no sufren esfuerzos bajo la acción de la carga dinámica que se genera durante el proceso de mecanizado (figura 3).

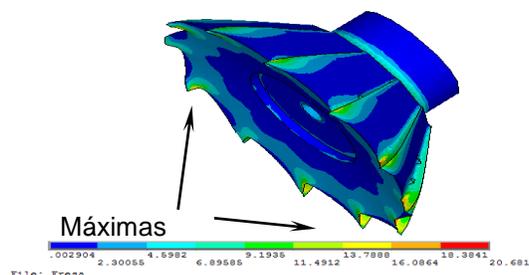


Figura. 3. Distribución espacial de las tensiones

Conclusiones

- Se diseñó una herramienta de corte con 12 aristas cortantes, que garantizará el mecanizado de brazos para hornos de soleras múltiples, los cuales son manufacturados de acero ACI HK-40.
- Las tensiones máximas se localizan en los ángulos de labios o aristas cortantes, las que toman valores inferiores a las admisibles.

Referencias Bibliográficas

Arshinov, V. (1976). Diseño de Elementos de Máquina, Editorial Mir. Moscú.

Baker, M. (2006). Finite element simulation of high speed cutting forces. *Journal of Materials Processing Technology*. 176. 117-126.

Gomes, J.O. y Vallejos, R.V. (2004). Análisis de la utilización de fresas de punta esférica de filos helicoidales y hectos para el afinado de superficies complejas en acero H13 (48 HRC). *Inf. Tecnol*, 15(4), 31-38.

Lykov, Y., Gorelikov, V. y Gantulga, B. (2017). Analytical research and classification of mechanism of diamond drilling-bits contact with rocks during well sinking. *Earth and Environmental Science*, 87. IOP: 022012.

Moufki, A. (2004). Thermo mechanical Modeling of oblique cutting and experimental validation. *Inter. Tools and Manufacture*, 44, 971-989.

Sandvik Coromant (2011). Guía Técnica de Mecanizado, en AB Sandvik Coromant.

Recuperado de:

http://www2.coromant.sandvik.com/coromat/downloads/tech_guide/spa/MTG_D.PDF

Saranche, L.M., Guédez, V.M. y Ramírez, R. (2007). Análisis multifactorial del consumo energético de un proceso de fresado frontal. *Inf. Tecnol*, 18(1), 67-72.

Stiopin, P. (2005). Resistencia de materiales. Ed. Revolucionaria. Cuba, La Habana.

Weingaertner, W.L. (2006). Evaluation of high-speed end-milling dynamic stability through audio signal measurement. *Journal of Materials Processing Technology*, 17(9), 133-138.

Síntesis curricular de los Autores

M. Sc. Rodney Enrique Correa-Suárez¹ Ingeniero Mecánico, Máster en Electromecánica, Especialista “A” en Mantenimiento Industrial, Posee 12 años de experiencia en la producción, ha realizado tutoría de trabajo de diploma a estudiantes de las universidades de Moa y de Oriente. Email: rsuarez@moanickel.com.cu <https://orcid.org/0000-0002-6613-5851>

Dr. C. Isnel Rodríguez-González² Ingeniero Mecánico, Master en Ciencias, Doctor en Ciencias Técnicas, Profesor Titular, Profesor universitario en el Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad e Moa “Dr. Antonio Núñez Jiménez”. Sus Líneas de Investigación son: Diseño de aerogeneradores para la explotación de la energía eólica; Diseño de elementos máquinas para la industria del Níquel; Caracterización de la resistencia en tubos inoxidables sometidos a altas temperaturas. Email: irgonzalez@ismm.edu.cu <https://orcid.org/0000-0002-5020-850X>

Ing. Murphis Pompa-Larrazabal³ Ingeniero Mecánico, Especialista Superior de Proyectos e Ingeniería, Empresa de Proyectos e Ingeniería del Ministerio de la Agricultura, UEB Proyectos e Ingeniería Guantánamo, Ha realizado diferentes estudios de posgrado, diferentes publicaciones relacionadas con la minería y la informática.

Email: mpompa@cugtmo.co.cu <https://orcid.org/0000-0001-9943-5685>

Institución de los autores

¹ Empresa Comandante Pedro Sotto Alba. Departamento Tecnología. Moa. Cuba

² Instituto Superior Minero Metalúrgico. Departamento Mecánica. Moa. Cuba

³ Empresa de Proyectos e Ingeniería del Ministerio de la Agricultura. Guantánamo. Cuba

Fecha de Recepción: 14 de enero 2020

Fecha de Aprobación: 16 de marzo 2020

Fecha de Publicación: 29 de abril 2020